บทที่ 7
การศึกษาลักษณะอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในการทำงาน เพื่อหาขีดจำกัดและคำแนะนำที่เหมาะสมสำหรับเด็ก

7.1 สภาพปัญหาของงานความร้อน

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนใกล้เส้นศูนย์สูตร ทำให้ภูมิอากาศของประเทศมีลักษณะเป็นแบบร้อนชื้นหรือภูมิอากาศแบบทุ่งหญ้าสะวันนา ทั่วประเทศมีอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่าง 19 – 38 องศาเซลเซียส อากาศจะร้อนที่สุดช่วงกลางเดือนเมษายน สำหรับประชากรในประเทศไทยประกอบอาชีพหลากหลายรูปแบบทั้งในภาคอุตสาหกรรม ภาคเกษตรกรรมและภาคบริการ เนื่องจากเป็นประเทศในเขตร้อนจึงยังคงมีการทำงานซึ่งมีโอกาสที่จะสัมผัสความร้อนจากสภาพอากาศอย่างหลีกเลี่ยงได้ยาก โดยเฉพาะงานในภาคเกษตรกรรมซึ่งเป็นอาชีพส่วนใหญ่ของประชากรในประเทศ จากรายงานสถานการณ์โดยทั่วไปของการใช้แรงงานเด็กในประเทศไทย (ILO, 2008) พบว่าแรงงานเด็กจำนวนมากต้องตกอยู่ในสภาพการทำงานที่เป็นอันตราย เช่น มีฝุ่น ควัน (ร้อยละ 40) เสียงดัง (ร้อยละ 26) สารเคมี (ร้อยละ 26) และภัยทางจิตใจ (ร้อยละ 15) แต่อย่างไรตามยังไม่พบว่ามีการศึกษาและเก็บข้อมูลเกี่ยวกับสภาพอันตรายที่เกิดจากการทำงานในสถานประกอบกิจการที่มีความร้อนสูง (ทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการกำหนดหรือหาค่าขีดจำกัดสำหรับการทำงานที่ต้องสัมผัสความร้อนอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อปัญหาสุขภาพได้โดยเฉพาะในเด็ก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องดำเนินการศึกษาและทดลองในประเด็นดังกล่าว

โดยปกติร่างกายมนุษย์จะมีการควบคุมระดับความร้อนอยู่ที่ 37 องศาเซลเซียส ซึ่งควบคุมโดยสมองส่วนไฮโปธาลามัสในการทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากร่างกาย แต่ในกรณีที่ต้องทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงความร้อนจากสิ่งแวดล้อมจะถูกพาเข้าสู่ร่างกายไปรวมกับความร้อนที่เกิดจากการเผาผลาญพลังงานเพื่อใช้ในการออกแรงทำงาน ทำให้ความร้อนในร่างกายยิ่งสูงขึ้น ซึ่งหากร่างกายระบายความร้อนไม่ทันอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพมากมาย และเมื่ออุณหภูมิของร่างกายสูงกว่า 41 องศาเซลเซียส เซลล์ประสาทในระบบประสาทส่วนกลางจะเริ่มถูกทำลายอย่างถาวร และหากยังได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นอีกศูนย์ควบคุมอุณหภูมิที่อยู่ในสมองจะเสียไป ร่างกายไม่สามารถระบายความร้อนออกได้ จะทำให้เกิดความรู้สึกมึนงงและอาจเกิดอาการชักอย่างรุนแรงได้ โดยอุณหภูมิที่ 45 องศาเซลเซียสจะเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่คนจะทนอยู่ได้ หากไม่ได้ช่วยลดความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ เซลล์ทั่วไปจะถูกทำลายจนอาจถึงแก่ชีวิตได้ ซึ่งอุณหภูมิที่กล่าวมาข้างต้นนั้น กล่าวถึงเฉพาะค่าอุณหภูมิอากาศกระเปาะแห้ง (dry bulb temperature, T_d) หรือเรียกสั้น ๆ ว่าอุณหภูมิอากาศ (air temperature, T_a) เท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากค่าอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ (wet bulb globe temperature, WBGT) ที่เป็นดัชนีวัดความร้อนตามที่กฎหมายกำหนด โดยค่าอุณหภูมิอากาศกระเปาะแห้ง เป็นหนึ่งตัวแปรในค่าอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ คิดเป็นร้อยละ 10 และจะใช้เฉพาะในสภาวะการทำงานนอกอาคารและมีแสงแดดเท่านั้น

ดัชนีชี้วัดความร้อนค่าอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ (WBGT) ประกอบไปด้วยตัวแปร 3 ค่า คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet bulb temperature, T_w) อุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อน (globe temperature, T_g) และอุณหภูมิอากาศกระเปาะแห้ง (dry bulb temperature, T_d) เมื่อทำการประเมินดัชนีชี้วัดความร้อนภายนอกอาคารหรือภายในอาคารที่สัมผัสแสงแดดค่าสัดส่วนของค่าตัวแปรทั้งสามจะคิดเป็นร้อยละ 70 20 และ 10 ตามลำดับ แต่หากเป็นการประเมินดัชนีชี้วัดภายในอาคารที่ไม่ได้สัมผัสแสงแดด สัดส่วนของค่าตัวแปรของอุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet bulb temperature, T_w) และอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อน (globe temperature, T_g) จะคิดเป็น

ร้อยละ 70 และ 30 ตามลำดับ โดยจะไม่นำค่าอุณหภูมิอากาศกระเปาะแห้ง (dry bulb temperature, T_d) หรืออุณหภูมิอากาศ (air temperature, T_a) มาใช้ในการประเมินดัชนีชี้วัดความร้อนในกรณีนี้ ซึ่งจะได้อธิบายอีกครั้งในหัวข้อที่ 7.4.2 โดยเมื่ออุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้การระบายความร้อนออกจากร่างกายทำได้ยาก เกิดการสะสมอุณหภูมิภายในร่างกายและส่งผลกระทบต่อสุขภาพได้

ทั้งนี้ การประเมินผลกระทบจากความร้อนนอกเหนือจากการประเมินอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบแล้วยังจำเป็นต้องพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของร่างกายอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น ความสามารถในการใช้ออกซิเจนสูงสุด (VO_2 max), ร้อยละอัตราการเต้นของหัวใจสูงสุด (Maximum Heart Rate, %MHR) ที่นำมาใช้กำหนดความหนักเบาของงานหรือภาระงาน (work load) เพื่อบ่งชี้สมรรถภาพร่างกายของผู้ปฏิบัติงาน

7.2 วัตถุประสงค์

เพื่อหาขีดจำกัดของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในการทำงานและระดับภาระงานที่เด็กสามารถทำได้ โดยใช้อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ (Wet Bulb Globe Temperature) และค่าอัตราการเต้นหัวใจ

7.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาในกลุ่มเด็กที่มีอายุตั้งแต่ 15 ปีถึงต่ำกว่า 18 ปี ที่กำลังศึกษาอยู่ในชั้นมัธยมปลายของโรงเรียนในจังหวัดปทุมธานี และไม่เคยมีประสบการณ์ในการทำงานในที่ร้อนมาก่อน การศึกษาทำในห้องทดสอบที่ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ระบบทำความเย็นแบบระบบอัดไอ (Vapor-Compression Cycle) รวมกับระบบทำความร้อนโดยใช้ขดลวดความร้อนและไอน้ำ มีขนาดกว้าง 3.2 เมตร ยาว 3.4 เมตร ความสูง 3 เมตร สร้างขึ้นโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี การทดสอบใช้การปั่นจักรยานวัดงานเพื่อป้อนภาระงานให้กับผู้ทดสอบแทนการจำลองงานจริง เนื่องจากสามารถควบคุมปัจจัยรบกวนอื่น ๆ ได้ง่าย เช่น ท่าทางการทำงาน แต่ด้วยข้อจำกัดของเวลาและการเดินทางของกลุ่มที่เข้าร่วมการทดลองที่สามารถเข้าร่วมการทดลองได้เฉพาะในช่วงวันหยุดเท่านั้น และเพื่อความปลอดภัยของกลุ่มอาสาสมัครที่เข้าร่วมการทดลอง การออกแบบการทดลองไม่ได้ดำเนินการแบบสุ่ม (randomized design) แต่ใช้การจัดลำดับการทดลองจากอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบจากต่ำไปสูงคือ 28 30 และ 32 °C WBGT และการเพิ่มภาระงานจากน้อยไปมากโดยแบ่งภาระงาน ออกเป็น 3 ระดับคือ งานเบามาก งานเบา และงานปานกลาง (ตารางที่ 7.1) ซึ่งระดับภาระงานนี้อ้างอิงจากตารางระดับความหนักของการออกกำลังกายโดย Edward (2010) NCFS (2014) และ มณินทร (2557) ดังนี้

งานเบามาก	อ้างอิงค่าร้อยละของอัตราการเต้นของหัวใจสูงสุด (%MHR) อยู่ในช่วงร้อยละ 50-60
งานเบา	อ้างอิงค่าร้อยละของอัตราการเต้นของหัวใจสูงสุด (%MHR) อยู่ในช่วงร้อยละ 61-70
งานปานกลาง	อ้างอิงค่าร้อยละของอัตราการเต้นของหัวใจสูงสุด (%MHR) อยู่ในช่วงร้อยละ 71-80

ตารางที่ 7.1 ค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ระดับภาระงานต่างๆ โดยอ้างอิงจากค่าอัตราการเต้นหัวใจสูงสุด (MHR) = 211 – (0.64 x age) ของเด็กช่วงอายุตั้งแต่ 15 ปี ถึงต่ำกว่า 18 ปี

ระดับภาระงาน	อายุ 15 ปี MHR = 202 ครั้ง/นาที	อายุ 16 ปี MHR = 201 ครั้ง/นาที	อายุ 17 ปี MHR = 201 ครั้ง/นาที
เบามาก (50-60 %MHR)	101 – 122 ครั้ง/นาที	101 – 121 ครั้ง/นาที	101 – 121 ครั้ง/นาที
เบา (61-70 %MHR)	124 – 142 ครั้ง/นาที	123 – 141 ครั้ง/นาที	123 – 141 ครั้ง/นาที
ปานกลาง (71-80 %MHR)	144 – 162 ครั้ง/นาที	143 – 161 ครั้ง/นาที	143 – 161 ครั้ง/นาที

หมายเหตุ คำนวณจากสูตร ค่าอัตราการเต้นหัวใจสูงสุด (MHR) = 211 – (0.64 x age) และเศษที่ได้จากการคำนวณปัดขึ้นเป็น 1 ครั้งต่อนาทีเสมอ

7.4 การทบทวนวรรณกรรม

7.4.1 ภาระทางความร้อน (heat stress) และความเครียดทางความร้อน (heat strain)

ภาระทางความร้อนถือว่าเป็นปัจจัยเสี่ยงและเป็นปัญหาสำคัญสำหรับผู้ปฏิบัติงานที่ต้องสัมผัสกับสภาพอากาศร้อน (Burkirk,1977) (Barnard, 2002) ได้อธิบายภาระทางความร้อนที่กระทบต่อร่างกายมนุษย์ด้วยสมการสมดุลของพลังงานดังต่อไปนี้

$$M \pm W = C \pm R + E + S$$

หรือ

$$S = M \pm W \pm C \pm R - E$$

M คือ พลังงานความร้อนที่เกิดจากกระบวนการสร้างพลังงานของร่างกาย (metabolism heat) หรือ ความร้อนที่เกิดจากการเผาผลาญพลังงานของร่างกาย (เป็นบวกเสมอ)

W คือ พลังงานทางกลที่ได้จากกระบวนการสร้างพลังงาน (effective mechanical power)

C คือ พลังงานความร้อนที่แลกเปลี่ยนผ่านทางการพาความร้อน (heat exchange by convection)

R คือ พลังงานความร้อนที่แลกเปลี่ยนผ่านทางการแผ่รังสีความร้อน (heat flow by radiation)

E คือ พลังงานความร้อนที่เกิดจากการระเหยของเหงื่อผ่านทางผิวหนัง (heat flow by evaporation) (เป็นบวกเสมอ)

S คือ ความร้อนที่สะสมอยู่ในร่างกาย (heat storage)

โดยทั่วไปกระบวนการสร้างพลังงานของร่างกายจะให้ประสิทธิภาพเชิงกลประมาณร้อยละ 25 หรืออธิบายได้ว่าพลังงานที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสร้างพลังงานของกล้ามเนื้อทั้งหมด 100 ส่วนจะสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานทางกลเพื่อใช้ในการทำงานได้เพียง 25 ส่วน พลังงานส่วนที่เหลือจะเป็นพลังงานความร้อนและพลังงานที่ใช้สำหรับการทำงานของอวัยวะต่าง ๆ ในร่างกาย ดังนั้นเมื่อร่างกายมีการใช้แรงมากก็ส่งผลให้เกิดความร้อนภายในร่างกายสูงขึ้น โดยปกติความร้อนเหล่านี้จะมีการแลกเปลี่ยนกับภายนอกร่างกายด้วยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิภายในร่างกายที่ 37 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ให้มีความเหมาะสมต่อการทำงานของระบบต่าง ๆ ของร่างกาย แต่หากความร้อนภายในร่างกายมีการสะสมมากขึ้น ระบบควบคุมอุณหภูมิของร่างกาย (Thermoregulation System) จะกระตุ้นระบบประสาทและอวัยวะที่เกี่ยวข้องให้ทำงานมากขึ้น เช่น ระบบการทำงานของหัวใจสูงขึ้นเพื่อเพิ่มการไหลเวียนของเลือดการพาความร้อนและการระบายความร้อนออกจากร่างกาย เมื่อการเต้นหัวใจสูงขึ้น ความดันโลหิตเพิ่มขึ้น ระบบประสาทซิมพาเทติกจะหลั่งสารสื่อประสาทที่มีชื่อว่า อะซิติลโคลีน (Acetylcholene) ออกมากระตุ้นต่อมเหงื่อให้เหงื่อหลั่งออกมามากขึ้น ทำให้รู้สึกอึดอัด ไม่สบายตัว เหนียวเนอะ ส่งผลให้ร่างกายสูญเสียน้ำและเกลือแร่ มีอาการ เหนื่อยล้า วิงเวียนหรือปวดศรีษะ อ่อนแรงและคลื่นไส้ เมื่อได้รับอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ จะทำให้เกิดอาการผิดปกติ เช่น สับสน พูดไม่ชัดเจน กระสับกระส่าย หรือเห็นภาพหลอน หากรุนแรงมากอาจทำให้เกิดการชักเกร็งและเสียชีวิตได้ในที่สุด การตอบสนองทางระบบสรีรวิทยาของร่างกาย (physiological response) และการตอบสนองทางอารมณ์ความรู้สึก (psychological response) เหล่านี้จะรวมเรียกว่า ความเครียดทางความร้อน (Heat Strain)

องค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (International Standard Organization, ISO) ทางด้านการยศาสตร์ได้กำหนดให้มีการใช้ค่าชี้วัดความเครียดทางความร้อน (heat strain) ด้วย อุณหภูมิแกนของร่างกาย (body core temperature) อุณหภูมิผิวหนัง (skin temperature) อัตราการเต้นหัวใจ (heart rate) และน้ำหนักตัวของร่างกายจากการสูญเสียเหงื่อ (loss of body mass through sweating) ตามมาตรฐาน ISO7243, 2003 ซึ่งนอกเหนือจากการวัดการตอบสนองทางสรีรวิทยาแล้วความเครียดทางความร้อนยังสามารถ

ประเมินได้จากดัชนีการรับรู้และความรู้สึกของร่างกาย (subjective perception index) สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้อัตราการเต้นหัวใจเป็นค่าในการกำหนดระดับภาระงาน และประยุกต์ใช้การประเมินความรู้สึกหลังจากทำการทดสอบที่อุณหภูมิและภาระงานในแต่ละครั้ง ด้วยตัวเลขตามมาตรวัด Borg's scale 0 – 10 โดยเริ่มตั้งแต่ระดับที่ 0 คือ ไม่รู้สึกอะไรเลย ไปจนถึงระดับที่ 10 คือ เหนื่อยเกือบสูงสุด (Borg, 1990)

7.4.2 ความหมายของค่าอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ (Wet Bulb Glob Temperature, WBGT)

ด้วยการตอบสนองทางสรีรวิทยาของร่างกายมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิร่างกายจำเป็นต้องรักษาสมดุลของอุณหภูมิภายในร่างกาย (core temperature) ไว้ที่ 37 องศาเซลเซียส โดยความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเผาผลาญพลังงานเป็นกลไกหนึ่งที่ช่วยรักษาระดับอุณหภูมิภายในของร่างกายไว้เพื่อไม่ให้สูญเสียความร้อนออกจากร่างกายมากเกินไปในสภาวะอากาศภายนอกเย็นกว่าภายในร่างกาย แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่ออุณหภูมิภายนอกรอบ ๆ ร่างกายสูงมากกว่าภายในร่างกายจะทำให้การถ่ายเทความร้อนของร่างกายออกสู่ภายนอกทำได้อยาก และยังส่งผลให้ความร้อนจากภายนอกถ่ายเทเข้าสู่ร่างกายมากขึ้น ซึ่งเมื่อรวมกับความร้อนที่ได้รับกับความร้อนที่เกิดจากกระบวนการเผาผลาญหรือสร้างพลังงานของร่างกาย จะเป็นเหตุให้เกิดการสะสมความร้อนและทำให้อุณหภูมิภายในร่างกายเพิ่มสูงขึ้น

ร่างกายสามารถถ่ายเทความร้อนออกสู่ภายนอกด้วยกระบวนการหลัก 3 ลักษณะ คือ การพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อน และการระเหย เพื่อลดระดับอุณหภูมิภายในร่างกายไม่ให้สูงเกินไปจนเกิดผลกระทบต่อสุขภาพหรือที่เรียกว่าเกิดความเครียดทางความร้อน (heat strain) ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น แต่เนื่องจากประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการต่าง ๆ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมภายนอกร่างกาย ที่สำคัญได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ระดับรังสีความร้อน และ ความเร็วลม เมื่ออุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนลดลง ซึ่งกรณีนี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยร่วมจากความเร็วลมด้วย ส่วนความชื้นส่งผลต่อการระเหยของเหงื่อซึ่งมีผลกระทบต่อกลไกการทำงานของรวบรวมคุมอุณหภูมิของร่างกาย (thermoregulation) อย่างมาก เมื่อมีความชื้นในอากาศสูงขึ้นการระเหยก็จะทำได้ยาก สำหรับการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อนซึ่งเป็นการถ่ายเทอุณหภูมิแบบไม่อาศัยตัวกลาง หากปริมาณพลังงานของรังสีหรือคลื่นความร้อนภายนอกสูงกว่าภายในก็จะก่อให้เกิดความร้อนสะสมในร่างกายเนื่องจากพลังงานหรือคลื่นความร้อนนั้น ๆ จากปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นล้วนมีผลกระทบต่อการแลกเปลี่ยนและถ่ายเทความร้อนของร่างกายกับสภาพแวดล้อมภายนอก ดังนั้น การพิจารณาค่าวัดอุณหภูมิของอากาศกระเปาะแห้ง (dry bulb temperature) หรืออุณหภูมิอากาศ (air temperature) เพียงอย่างเดียวจะไม่สามารถอธิบายผลกระทบจากสภาพอุณหภูมิหรือสะท้อนค่าของภาระทางความร้อนได้ (heat stress)

สำหรับค่าดัชนีอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ (wet blue globe temperature, WBGT) มีประวัติการใช้มาตั้งแต่ 60 ปีที่แล้ว (Alfano, 2014) ปัจจุบันได้รับการเสนอให้เป็นมาตรฐานระหว่างประเทศ โดยองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (ISO) ออกข้อกำหนดทางมาตรฐานทางการยศาสตร์ว่าด้วยสภาพแวดล้อมการทำงานที่ร้อน (hot environment) หมายเลข 7243 หรือ ISO 7243 อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ (WBGT) เป็นดัชนีในการบอกระดับความเสี่ยงของลักษณะอุณหภูมิที่จะมีผลต่อร่างกายมนุษย์ โดยนำค่าตัวแปรของอุณหภูมิที่ประกอบด้วย อุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet temperature หรือ wet blue temperature, T_w) อุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อน (radiation temperature หรือ globe temperature, T_g) และอุณหภูมิอากาศกระเปาะแห้ง (dry temperature, Td) มาคำนวณค่าดัชนีความร้อนเวตบัลบ์โกลบ ตามสมการด้านล่างสำหรับกรณีที่กำหนด ดังนี้

$$WBGT = 0.7\ Tw + 0.3\ Tg$$ สำหรับการวัดในร่มที่ไม่มีแสงแดด

WBGT = 0.7 Tw + 0.2 Tg + 0.1 Td สำหรับการวัดกลางแจ้งหรือภายในอาคารและมีแสงแดดส่องถึง

ดัชนีอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบจะให้ความสำคัญกับสภาวะที่มีผลต่อการระเหยค่อนข้างมาก ดังจะเห็นได้จากการถ่วงน้ำหนักในสมการข้างต้นที่ให้กับค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกสูงสุด แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ดัชนีอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบจะมีข้อจำกัดเมื่อสภาวะของการระเหยไม่เป็นอิสระที่มีผลโดยตรงจากสภาพอากาศ เช่น การสวมใส่เสื้อผ้า ซึ่งทำให้อากาศภายนอกไม่สัมผัสร่างกายโดยตรง ส่งผลให้การไหลเวียนของอากาศภายนอกถูกปิดกันไม่สัมผัสร่างกายโดยตรง กรณีนี้จะส่งผลให้ค่าดัชนีอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบไม่สามารถสะท้อนภาวะของภาระทางความร้อนและความเครียดทางความร้อนที่เกิดกับร่างกายได้จริง (Budd, 2008)

7.4.3 ภาระงานทางสรีรวิทยาและอัตราการเผาผลาญพลังงาน

การทำงานในที่ร้อนนอกจากร่างกายจะได้รับผลกระทบจากภาระงานทางความร้อน (high temperature workload) แล้ว การทำงานที่ต้องใช้แรงในระดับที่สูงขึ้นจะส่งผลต่อการใช้พลังงานที่สูงขึ้นซึ่งถือว่าเป็นภาระงานทางสรีรวิทยา (physiological workload) จากการศึกษาความแตกต่างทางสรีรวิทยาระหว่างเด็กกับผู้ใหญ่พบว่าเด็กยังมีการพัฒนาของระบบโครงกระดูกและกล้ามเนื้อไม่เต็มที่ พื้นที่ผิวกายของเด็กมากกว่าผู้ใหญ่เมื่อเทียบกับน้ำหนักตัว แต่มีไขมันใต้ผิวหนังน้อยกว่าและมีผิวหนังที่บางกว่าทำให้ความทนทานต่อการสัมผัสความร้อนน้อยกว่า และสามารถสูญเสียความร้อนผ่านทางผิวหนังได้มากกว่าเมื่อเทียบกับผู้ใหญ่ (Bequele และคณะ, 1995) (Forastieri, 1997) (ILO, 1998) การศึกษาเชิงลึกโดยวิเคราะห์จากอัตราการเผาผลาญพลังงานพื้นฐาน (Basal Metabolic Rate) พบว่าเด็กมีอัตราการเผาผลาญและใช้ออกซิเจน (Oxygen Consumption) ดีกว่าผู้ใหญ่ เนื่องจากร่างกายต้องใช้พลังงานในการเสริมสร้างกล้ามเนื้อและเนื้อเยื่อต่าง ๆ ทั้งนี้ในเด็กอายุไม่เกิน 10 ปี เพศชายและหญิงจะมีอัตราการเผาผลาญพลังงานที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อ~~เริ่ม~~มีอายุตั้งแต่ 10 ปีขึ้นไป เพศชายจะมีอัตราการเผาผลาญพลังงานที่มากกว่าเพศหญิง เนื่องจากสรีรวิทยาของเพศชายจำเป็นต้องสร้างมวลกล้ามเนื้อในร่างกายมากกว่าเพศหญิง นอกจากนี้ยังมีปัจจัยทางด้านอายุ น้ำหนักและส่วนสูงเข้ามาร่วมด้วย (Harris และ Benedict, 1919)

Kornienko และ Gohblit (1983) ได้รายงานผลการวิจัยความเปลี่ยนแปลงของอัตราการเผาผลาญพลังงานของเด็กแรกเกิดไปจนถึงวัยรุ่น พบว่าเด็กแรกเกิดจนถึงขวบปีแรกนั้นจะมีอัตราการเผาผลาญพลังงานน้อยกว่าอัตราการเจริญเติบโตของร่างกาย หลังจากนั้นในช่วงอายุ 1.5 – 2 ปี จะมีการยับยั้งการเจริญเติบโตของร่างกายชั่วขณะ แต่มีอัตราการเผาผลาญพลังงานเพิ่มขึ้นสูงสุดและลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงอายุ 6 – 7 ปี ซึ่งจะสวนทางกับอัตราการเจริญเติบโตที่มากขึ้น โดยหลังจากช่วงอายุดังกล่าว~~นี้~~จะมีการยับยั้งการเจริญเติบโตพร้อม ๆ กับอัตราเผาผลาญพลังงานในภาวะเสถียรและค่อย ๆ ลดลง และในช่วงท้ายที่สุดของเด็กที่เข้าสู่วัยรุ่นตอนต้นกระบวนการเจริญเติบโตจะเริ่มพัฒนาอีกครั้งในระลอกสุดท้ายส่งผลให้มีอัตราการเผาผลาญพลังงาน~~ที่~~เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงอายุ 14 ปี และหลังจากนั้นเด็กที่มีอายุตั้งแต่ 15 ปี ถึงต่ำกว่า 18 ปี ซึ่งเป็นช่วงอายุของเด็กที่เข้าสู่วัยรุ่นเต็มตัว อัตราการเผาผลาญพลังงานมีแนวโน้มที่จะเสถียรในระดับปกติที่ใกล้เคียงกับผู้ใหญ่ (Valentin และ Ritta, 2012) แต่อย่างไรก็ตาม ผลงานวิจัยดังกล่าวเป็นเพียงการศึกษาร่างกายของคนยุโรปในขณะพัก จึงไม่เป็นที่แน่ชัดหากจะนำมาใช้กับคนไทยภายใต้สภาวะการทำงาน เนื่องจากสมรรถภาพร่างกายของคนไทยและยุโรปอาจมีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ งานวิจัยที่แสดงผลอัตราการเต้นของหัวใจเปรียบเทียบกับการใช้ออกซิเจนระหว่างคนไทยกับคนยุโรป พบว่าค่าของคนไทยสูงกว่าคนยุโรปประมาณ 20-30% (Kitti และ Kamiel, 1993) จึงเป็นข้อกังขาหากจะนำเกณฑ์ความหนักเบาของภาระงานของคนยุโรปมาใช้กับคนไทย ทั้งนี้ ควรพิจาณาระยะเวลา

การทำงานและระยะเวลาพักที่เหมาะสมกับคนไทยด้วย ตามข้อกำหนดการประเมินด้วยระเบียบวิธีทางการยศาสตร์

7.4.4 อัตราการเต้นของหัวใจสูงสุด (maximum heart rate, MHR)

หัวใจมีหน้าที่ในการบีบตัวเพื่อสูบฉีดเลือดไปเลี้ยงร่างกาย กิจกรรมการเคลื่อนไหวของร่างกายมีผลทำให้หัวใจบีบตัวช้าหรือเร็วตามความหนักของการทำกิจกรรมนั้น ๆ หากทำงานหนักมาก ๆ หัวใจจะบีบตัวเร็วมากขึ้นไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามหัวใจมีค่ากำหนดสูงสุดของการบีบตัวที่จะไม่สามารถที่จะทำให้การบีบและคลายตัวมากไปกว่าจุดกำหนดนั้นได้ นั่นคือไม่ว่ากิจกรรมที่เราทำจะหนักมากมายเพียงใด อัตราการเต้นหัวใจจะไม่เพิ่มไปมากกว่าจุดที่กำหนดดังกล่าว เราเรียกจุดนั้นว่า อัตราการเต้นของหัวใจสูงสุด (maximum heart rate, MHR) ประโยชน์ของอัตราการเต้นหัวใจสูงสุดนั้น นำใช้ในการกำหนดความหนักในการออกแรงกายทำงาน คล้ายคลึงกับการกำหนดความหนักในการออกกำลังกาย (Thompson, Gordon และ Pescatello, 2010) เพื่อป้องกันไม่ให้ร่างกายมีการออกแรงที่มากเกินไปจนอยู่ในภาวะที่มีการสะสมของกรดแลคติกมากกว่าปกติ (lactic threshold / anaerobic threshold) ซึ่งเป็นระดับที่ก่อให้เกิดความล้าของกล้ามเนื้อภายในร่างกาย

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าสูตรสำหรับคำนวณอัตราการเต้นหัวใจสูงสุดที่มีที่มาจากการคำนวณหาสมการเชิงเส้นโดยทดสอบในประชากรกลุ่มใหญ่ที่มีความหลากหลายในช่วงอายุ และได้มีการเปรียบเทียบความแม่นยำและถูกต้องกับสมการอื่น ๆ จำแนกตามเพศชายและหญิง และตามช่วงอายุ โดยพบว่ากลุ่มอายุต่ำกว่า 18 ปีนั้น ค่าอัตราการเต้นหัวใจสูงสุดมีความแม่นยำและเที่ยงตรงจากการใช้สูตรคำนวณโดยสมการเชิงเส้น และมีค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่าสูตรอื่น ๆ ที่สามารถยอมรับได้ (NES และคณะ, 2012) ดังแสดงในสมการด้านล่าง

$$MHR = 211 - (0.64 \times age)$$

เมื่อ MHR = อัตราการเต้นของหัวใจสูงสุด (ครั้ง/นาที)

Age = อายุ (ปี)

ค่าของอัตราการเต้นหัวใจสูงสุดที่คำนวณได้ในแต่ละช่วงอายุสามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลสำหรับการคำนวณหาค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ สำหรับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ไม่ได้ใช้ค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความเหมาะสมของการทำงานในที่ร้อน แต่จะใช้เป็นตัวแปรควบคุมเพื่ออธิบายผลการศึกษาเท่านั้น ซึ่งรายละเอียดในกับค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์จะอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 7.4.6

7.4.5 การทดสอบสมรรถภาพทางกายด้วยการทดสอบสมรรถภาพการใช้ออกซิเจน (Oxygen consumption or Oxygen uptake; VO_2 max)

การทดสอบสมรรถภาพทางกายด้วยการทดสอบสมรรถภาพการใช้ออกซิเจนในประเทศไทยพบว่ามีการวิจัยและทดสอบดังกล่าวในหน่วยงานการกีฬาแห่งประเทศไทย ทั้งในกลุ่มนักกีฬาและนักกีฬาเยาวชน โดยวิธีทดสอบตามแบบของ Astrand - Ryhming Test ที่เป็นการทดสอบเพื่อหา Sub-Maximum Heart Rate โดยใช้การปั่นจักรยานใส่โหลดน้ำหนักด้วยความถี่ 50 รอบต่อนาที และพิจารณาอัตราการเต้นของหัวใจเพื่อเทียบเคียงกับตารางความสามารถในการใช้ออกซิเจน ซึ่งการทดสอบดังกล่าวเป็นการทดสอบที่มีมาตรฐาน เนื่องจาก มีความเป็นปรนัย (Objectivity) คือ เป็นแบบทดสอบที่ไม่ว่าใครจะนำไปใช้จะสามารถวัดและแปลค่าที่ได้จากการวัดด้วยแบบทดสอบตรงกันเสมอ มีความเชื่อมั่น (Reliability) คือ มีความคงเส้นคงวาในผลการทดสอบ แม้จะทำการทดสอบซ้ำกี่ครั้งได้ผลการทดสอบค่าเดิมเสมอ และมีความเที่ยงตรง (Validity) คือ มีความถูกต้องของค่าที่ต้องการทดสอบ ทั้งยังเป็นเทคนิคการทดสอบที่เป็นมาตรฐาน (Technical Standard)

มีความเหมาะสมกับสถานที่และสภาพแวดล้อมที่ทำการศึกษา รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ วิธีการ และการแสดงค่ามีความชัดเจน นอกจากนี้ยังสามารถทดสอบได้กับกลุ่มบุคลอายุระหว่าง 15 - 65 ปี และมีการคำนวณผลโดยอาศัยปัจจัยทางด้านอายุเป็นตัวแปรร่วมด้วย ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ความแตกต่างของสมรรถภาพทางกายระหว่างเด็กและผู้ใหญ่ได้ดี ซึ่งการทดสอบดังกล่าวเป็นเกณฑ์มาตรฐานสมรรถภาพทางกายสำหรับนักกีฬาแห่งประเทศไทย (การกีฬาแห่งประเทศไทย, 2549) และเกณฑ์มาตรฐานสมรรถภาพทางกายของประชาชนไทยอีกด้วย (การกีฬาแห่งประเทศไทย, 2543) แต่ทั้งนี้การทดสอบดังกล่าวข้างต้นทำการทดสอบในสิ่งแวดล้อมปกติ ในกรณีที่นำผลการทดสอบไปประยุกต์ใช้สำหรับการทดลองภายใต้สภาพแวดล้อมพิเศษ เช่น สภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าปกติ ควรจัดให้มีมาตรการเฝ้าระวังและป้องกันเพิ่มเติมให้กับผู้เข้ารับการทดสอบ

7.4.6 อัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์และการใช้พลังงานของร่างกาย

นักสรีรวิทยาได้อธิบายกลไกการใช้พลังงานกับการออกแรงทำกิจกรรมต่าง ๆ ว่า เมื่อร่างกายต้องใช้กล้ามเนื้อในการออกแรง กล้ามเนื้อเป็นอวัยวะที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานกล พลังงานเคมีที่กล้ามเนื้อสามารถนำไปใช้ในการหดตัวได้ทันทีเป็นพลังงานที่อยู่ในรูปของสารพลังงานสูงที่มีชื่อว่า Adenosine triphosphate (ATP) ซึ่งได้มาจากการเผาผลาญอาหารพวกคาร์โบไฮเดรตและไขมันที่มีสะสมอยู่ในร่างกาย โดยการสร้างสารพลังงานเอทีพี (ATP) หลัก ๆ มี 2 กระบวนการ ได้แก่ การหายใจระดับเซลล์แบบใช้ออกซิเจน (aerobic cellular respiration) และแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic cellular respiration) โดยในกระบวนการหายใจระดับเซลล์แบบใช้ออกซิเจน เมื่อกล้ามเนื้อต้องออกแรงทำงานมาก ร่างกายจึงจำเป็นที่จะต้องใช้ออกซิเจนมากตามไปด้วย โดยในทางปฏิบัตินักการยศาสตร์จะวัดการใช้พลังงานของร่างกายโดยวิเคราะห์จากการวัดปริมาณการใช้ออกซิเจนของร่างกาย

Wu และ Wang (2002) ได้อ้างจากผลการวิจัยหลายชิ้นที่ให้คำแนะนำที่สอดคล้องกัน ว่าระดับภาระงานเฉลี่ยที่ต้องทำตลอด 8 ชั่วโมงการทำงานนั้น ควรเป็นภาระงานที่ก่อให้เกิดการใช้พลังงานไม่เกิน 1/3 หรือ 33% ของความสามารถในการใช้ออกซิเจนสูงสุด (Oxygen consumption or Oxygen uptake; VO_2 max) นอกจากนี้ยังพบว่าความสามารถในการใช้ออกซิเจนสูงสุดมีความสัมพันธ์กับอัตราการเต้นของหัวใจเมื่อพิจารณาอัตราการเต้นของหัวใจ (Heart rate; HR) ในรูปค่าสัมพัทธ์ (relative value) ซึ่งแสดงได้ดังสมการดังนี้

$$\%VO_2 \text{ or } RVO_2 \ \alpha \ \%RHR$$

โดย $\%VO_2$ หรือ RVO_2 คือ อัตราการใช้ออกซิเจนสัมพัทธ์ คำนวณได้จากสมการ

$$\%VO_2 \text{ หรือ } RVO_2 = [(VO_{2work} - VO_{2rest})/(VO_{2max} - VO_{2rest})] \times 100\%$$

VO_{2work}	คือ	ค่าความสามารถในการใช้ออกซิเจนขณะทำงาน
VO_{2rest}	คือ	ค่าความสามารถในการใช้ออกซิเจนขณะพัก
VO_{2max}	คือ	ค่าความสามารถในการใช้ออกซิเจนสูงสุด

%RHR (relative heart rate) หรือ คือ อัตราการเต้นของหัวใจสัมพัทธ์ มีหน่วยเป็น % หาได้จาก

$$\%RHR = [(HR_{work} - HR_{rest})/(HR_{max} - HR_{rest})] \times 100\%$$

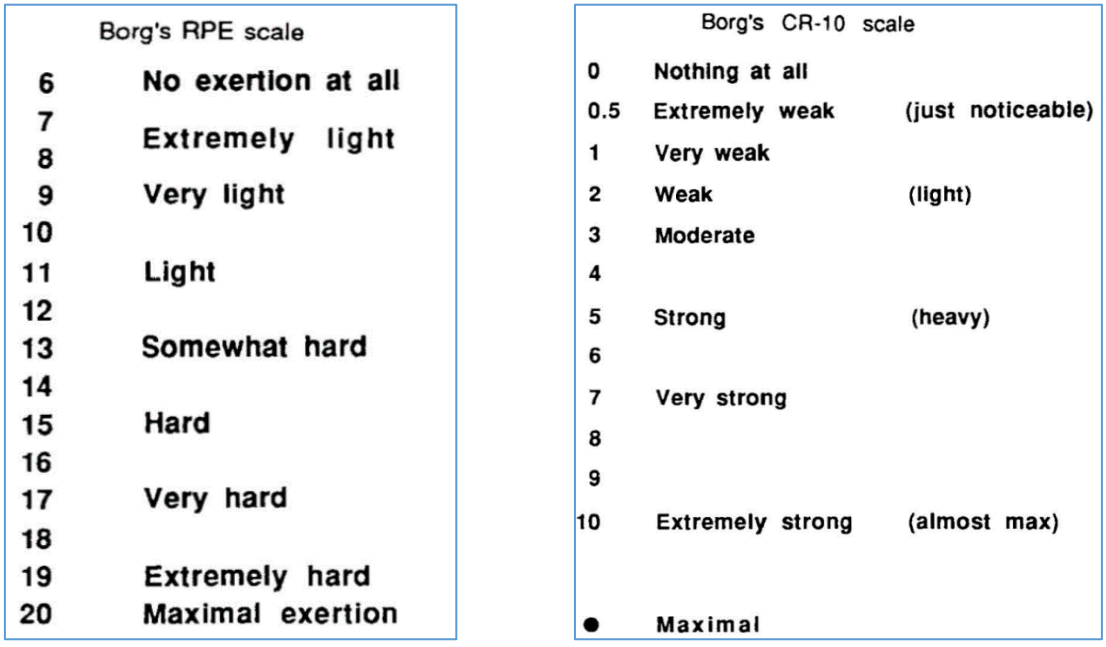
HR_{work}	คือ	อัตราการเต้นของหัวใจขณะทำงาน
HR_{rest}	คือ	อัตราการเต้นของหัวใจขณะพัก

HR_{max} คือ อัตราการเต้นของหัวใจสูงสุด

เนื่องจากในทางปฏิบัติการวัดปริมาณการใช้ออกซิเจนของร่างกายทำได้ยากและรบกวนการทำงาน งานวิจัยนี้จึงพิจารณาใช้ค่าวัดอัตราการเต้นของหัวใจซึ่งทำได้ง่ายกว่าสำหรับการทำงานต่อเนื่อง 8 ชั่วโมงต่อวัน โดยมีข้อแนะนำว่าควรเป็นภาระงานที่ก่อให้เกิดการใช้พลังงานไม่เกิน 1/3 หรือ 33% ของความสามารถในการสร้างพลังงานสูงสุด ซึ่งเกณฑ์นี้สามารถเทียบได้กับอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ที่ 23.3% (Wu และ Wang, 2002) แต่เนื่องจากการออกแบบการทดลองในครั้งนี้ใช้ค่าอัตราการเต้นหัวใจเป็นตัวแปรควบคุม (controllable factor) จึงไม่ได้นำอัตราการเต้นของหัวใจสัมพัทธ์มาใช้เป็นเกณฑ์หลักในการตัดสินใจแต่จะนำไปใช้ประกอบการพิจารณาร่วมกับเกณฑ์ทางจิตฟิสิกส์ (Psychophysic Criterion) ซึ่งจะกล่าวต่อไปนี้หัวข้อ 7.4.7

7.4.7 เกณฑ์ทางจิตฟิสิกส์ (Psychophysics Criterion)

เกณฑ์ทางจิตฟิสิกส์เป็นหนึ่งใน 4 วิธีที่นำมาใช้สำหรับการพิจารณาความปลอดภัยและความเหมาะสมระหว่างคนกับงาน เป็นการใช้ความรู้สึกของการรับรู้สภาพทางร่างกายและการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อร่างกาย เช่น ความรู้สึกในการใช้แรง ความเหนื่อยล้า เป็นต้น โดย Borg (1990) ได้แนะนำการประยุกต์ใช้ ที่การแบ่งระดับการรับรู้ทางกาย (psychophysical scaling) ไว้สองรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 7.1 โดยรูปแบบแรกดังแสดงในรูปที่ 7.1 (ก) เรียกว่าระดับความรู้สึกที่สัมพันธ์กับการใช้แรงทางกาย (Borg's RPE scale หรือ Borg's Rating Perceived Exertion) ซึ่งมีคะแนนจาก 6 - 20 โดยระดับของความรู้สึกนี้มีค่าสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่าอัตราการเต้นหัวใจที่อยู่ในช่วง 60 – 200 ครั้งต่อนาที ซึ่งได้จากการทดสอบด้วยการปั่นจักรยาน ซึ่งต่อมาภายหลังได้มีการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อบอกระดับความหนักเบาของงานสำหรับการออกกำลังกาย ที่แบ่งระดับความรู้สึกออกมาด้วยตัวเลข 0 - 10 หรือที่เรียกว่า Borg's CR-10 scale เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้ ดังแสดงในรูปที่ 7.1 (ข)



(ก) (ข)

รูปที่ 7.1 รูปแบบระดับความรู้สึกที่สัมพันธ์กับการใช้แรงกาย (ก) เป็นรูปแบบของ Borg's RPE scale และ (ข) เป็นรูปแบบของ Borg's CR10 Scale (Borg, 1990)

เกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะอ้างอิงงานวิจัยระบบการแจ้งเตือนภัยของ Yi และคณะ (2016) โดยเทียบค่าที่ได้จากแบบประเมินดัชนีรับรู้ความรู้สึกทางกายแบบ CR10 (Borg's CR10 Scale) กับอัตราการเต้นของหัวใจและลักษณะอาการที่ปรากฏ ซึ่งสามารถแบ่งระดับการเตือนภัยที่เกิดจากความร้อนออกเป็น 4 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 7.2 สำหรับเกณฑ์ที่เลือกใช้ในการพิจารณาลักษณะอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในการทำงานเพื่อหาขีดจำกัดและคำแนะนำที่เหมาะสมสำหรับเด็กในครั้งนี้จะพิจารณาจากระดับคะแนนความรู้สึกเหนื่อยของเด็กที่เข้าร่วมการทดสอบที่ระดับ 4 คะแนน เนื่องจากเป็นภาวะที่เริ่มเข้าสู่อันตราย ร่วมกับเกณฑ์ทางสรีรวิทยาโดยใช้ค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ที่ไม่เกิน 23.3%

ตารางที่ 7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับคะแนนความรู้สึกเหนื่อย (CR10) อัตราการเต้นหัวใจ ลักษณะอาการที่ปรากฏ และระดับการเตือนภัย (Yi และคณะ, 2016)

ระดับ CR10	ความรู้สึกเหนื่อยของผู้ปฏิบัติงาน	อัตราการเต้นหัวใจ (ครั้งต่อนาที)	ลักษณะอาการที่ปรากฏ	ระดับการเตือน
0	ไม่รู้สึกอะไรเลย	น้อยกว่า 100	สามารถทำงานได้อย่างสบายโดยไม่เกิดปัญหา	ปลอดภัยเกือบทั้งหมด (mostly safe)
0.5	สบายมาก ๆ			
1	สบายมาก			
2	สบาย			
3	ปานกลาง			
4	เริ่มรู้สึกเหนื่อย	100 ถึงน้อยกว่า 120	ผิวหนังเปียกชื้น และผิวหนังเริ่มซีด (pale skin)	ระวังอันตราย (caution)
5	เหนื่อย			
6				
7	เหนื่อยมาก	120 ถึงน้อยกว่า 160	กระตุกเกร็งกล้ามเนื้อ แขน ขา และหน้าท้อง เหงื่อออกมาก ปวดศีรษะ ผื่นแดงบนผิวหนัง อ่อนเพลียและอ่อนล้า	เตือนอันตราย (Warning)
8				
9		มากกว่า 180 วัด 3 นาทีต่อเนื่อง	ปวดศีรษะมาก หงุดหงิดและสับสน หายใจถี่มากอัตราการเต้นหัวใจพุ่งสูง ผิวหนังแห้ง ควบคุมกล้ามเนื้อลำบาก	อันตรายรุนแรง (severe warning)
10	เหนื่อยมากที่สุด			

หมายเหตุ มีการเปลี่ยนแปลงสีที่ใช้ในการสื่อความหมายจากของ Yi และคณะ (2016)

7.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

7.5.1 การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างจากอาสาสมัคร

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาในกลุ่มเด็กที่มีอายุตั้งแต่ 15 ปีถึงต่ำกว่า 18 ปี จำนวน 30 คน ทั้งเพศชายและหญิง เป็นเด็กที่กำลังศึกษาอยู่ในชั้นมัธยมปลายของโรงเรียนในจังหวัดปทุมธานี ที่ไม่มีประสบการณ์ในการทำงานในที่ร้อนสูงมาก่อน การทดลองทำในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ ตามรายละเอียดในข้อ 7.3 โดยมีเกณฑ์การคัดเข้าและออกดังต่อไปนี้

7.5.1.1 เกณฑ์การคัดเข้า:

1) เด็กหญิงและเด็กชายไทย อายุตั้งแต่ 15 ถึงต่ำกว่า 18 ปี นับถึงวันที่มีการเก็บตัวอย่าง
2) เป็นเด็กที่ไม่มีประสบการณ์ในการทำงานกับความร้อนสูงมาก่อน
3) ไม่เป็นนักกีฬาที่ต้องฝึกซ้อมกลางแจ้ง
4) ไม่มีอาการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อสะโพก ต้นขาด้านหน้า ด้านหลัง น่อง อาการปวดเข่า และการบาดเจ็บบริเวณข้อเท้า ที่ส่งผลกระทบต่อการทดสอบ
5) ไม่มีประวัติการใช้ยาบางประเภท เช่น ยาแก้ปวด, ยาลดไข้, ยารักษาโรคไทรอยด์ที่มีผลกดการทำงานของหัวใจ
6) ได้รับการอนุญาตจากผู้ปกครองในการเข้าร่วมโครงการเป็นลายลักษณ์อักษร
7) สามารถอ่านและเข้าใจภาษาไทยได้

7.5.1.2 เกณฑ์การคัดออก

1) มีการเปลี่ยนแปลงของคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่บ่งบอกว่ามีภาวะหัวใจขาดเลือดกล้ามเนื้อหัวใจตาย (ภายใน 2 วันก่อนการทดสอบ) หรือภาวะผิดปกติเฉียบพลันของหัวใจ
2) มีอาการเจ็บหัวใจ (เจ็บแน่นหน้าอก) แบบไม่คงที่
3) ภาวะหัวใจเต้นผิดปกติที่ไม่สามารถควบคุมได้ จนมีอาการแสดง
4) ภาวะลิ้นหัวใจเอออร์ตาตีบอย่างรุนแรง
5) ภาวะหัวใจวายที่ควบคุมไม่ได้
6) ภาวะเส้นเลือดปอดถูกอุดกั้นอย่างเฉียบพลันหรือเนื้อปอดตาย
7) กล้ามเนื้อหัวใจหรือเยื่อหุ้มหัวใจอักเสบเฉียบพลัน
8) สงสัยหรือมีภาวะหลอดเลือดแดงใหญ่โป่งพอง
9) ภาวะติดเชื้ออย่างเฉียบพลัน
10) มีอาการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อสะโพก ต้นขาด้านหน้า ด้านหลัง น่อง อาการปวดเข่า และการบาดเจ็บบริเวณข้อเท้า ที่ส่งผลกระทบต่อการทดสอบ

อาสาสมัครที่ได้รับการคัดเลือกจะทำการศึกษาทดลองในห้องปฏิบัติการที่มีการปรับค่าอุณหภูมิ WBGT ในระดับต่าง ๆ รวมทั้งสิ้น 4 ระดับ ดังนี้ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ใช้สำหรับวัดสมรรถภาพร่างกายในสภาพแวดล้อมทั่วไป และที่อุณหภูมิ 28 30 และ 32 องศาเซลเซียส ใช้สำหรับวัดสมรรถภาพร่างกายในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง โดยมีเงื่อนไขว่าหากอัตราการเต้นหัวใจของอาสาสมัครขณะทดสอบมีค่าเกิน 170 ครั้ง/นาที ถือว่าไม่ผ่านการทดสอบและจะทำการหยุดการทดสอบโดยทันที

โดยการทดสอบแต่ละครั้ง จะกำหนดให้ผู้รับการทดสอบนั่งพักในห้องทดสอบก่อน บันทึกอัตราการเต้นของหัวใจขณะพักไว้เป็นอัตราการเต้นของหัวใจที่เกิดจากภาระทางความร้อน (thermal workload) ทำการทดสอบโดยเริ่มการทดสอบที่จากการไม่ใส่โหลดน้ำหนักจักรยาน ปั่นทดสอบเป็นระยะเวลา 3 นาที จากนั้นจะปรับโหลดน้ำหนักจักรยานขึ้นทีละ 25 วัตต์ ในทุก ๆ การปรับเพิ่มโหลดจะใช้เวลาปั่น 3 นาที ทำการทดสอบไปเรื่อย ๆ จนค่าอัตราการเต้นของหัวใจอยู่ในช่วงที่กำหนดจึงหยุดพัก

สำหรับทำการทดสอบครั้งใหม่จะเริ่มเมื่ออัตราการเต้นของหัวใจกลับเข้าสู่สภาวะปกติ (ระดับเดียวกับอัตราการเต้นของหัวใจก่อนการทดสอบ) ในระหว่างการทดสอบแต่ละครั้งจะทำการวัดและบันทึกค่าอัตราการเต้นของหัวใจทุก ๆ นาที (วินาทีที่ 45 ถึงวินาทีที่ 60 ของแต่ละนาที) เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบ จะให้

อาสาสมัครตอบแบบสอบถามความรู้สึกในเชิงจิตฟิสิกส์ (Psychophysics) ทุกครั้งหลังการทดสอบ เพื่อรวบรวมและเสนอแนะค่าอุณหภูมิ WBGT ที่เหมาะสมตามความหนักเบาของงาน

7.5.2 ขั้นตอนการทดลองในห้องปฏิบัติการ

1) เก็บข้อมูลส่วนตัวพื้นฐาน เช่น เพศ อายุ น้ำหนัก และติดเครื่องวัดและบันทึกอัตราการเต้นหัวใจแบบต่อเนื่องให้อาสาสมัคร ทำการวัดเพื่อหาค่าอัตราการเต้นหัวใจขณะพัก (heart rate at rest, HRR) โดยให้ผู้ทดสอบนั่งนิ่ง ๆ ให้ห้องทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และใช้ค่าดังกล่าว เป็นค่าอัตราการเต้นหัวใจขณะพัก เพื่อนำไปใช้คำนวณค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพันธ์ (relative heart rate, %RHR) ต่อไป
2) เตรียมจักรยานวัดงาน (Bicycle ergometer) ตามขั้นตอนในคู่มือ สำหรับการทดสอบสมรรถภาพทางกายโดยใช้หลักการของ Astrand and Ryhming (Astrand, 1952) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้
   2.1 การทดสอบที่อุณหภูมิ WBGT ที่ 25 องศาเซลเซียส มีรายละเอียดดังนี้
      2.1.1 ให้ผู้เข้ารับการทดสอบขึ้นนั่งบนอานจักรยาน ปรับระดับอานให้พอเหมาะ (ขายืดสุดแล้วเข่างอเล็กน้อยประมาณ 5 องศา)
      2.1.2 ตั้งจังหวะ 50 รอบต่อนาที ให้ผู้ถูกทดสอบรักษาความเร็วให้คงที่
      2.1.3 เริ่มการทดสอบโดยการปั่นจักรยานที่น้ำหนักถ่วง 1 กิโลปอนด์ หรือ 50 วัตต์ ทั้งในเพศชายและหญิง
      2.1.4 เริ่มจับเวลาเมื่อผู้ถูกทดสอบปั่นตามน้ำหนักถ่วงที่กำหนด และสามารถรักษาความเร็ว 50 รอบต่อนาที ตามที่กำหนดให้ตลอดเวลา
      2.1.5 บันทึกอัตราการเต้นของหัวใจทุกนาทีเป็นเวลา 6 นาที (กรณีถึงนาทีที่ 2 หากอัตราการเต้นหัวใจยังต่ำกว่า 120 ครั้งต่อนาที ให้เพิ่มน้ำหนักถ่วงอีก 0.5 กิโล-ปอนด์หรือ 25 วัตต์ ในเพศหญิงและ 1 กิโลปอนด์หรือ 50 วัตต์ ในเพศชายโดยไม่หยุดการปั่น เพิ่มเวลาทดสอบอีก 1 นาทีและจับต่อทุกนาที) จากนั้นนำอัตราการเต้นของหัวใจช่วงคงที่ของ 2 นาทีสุดท้ายมาหาค่าเฉลี่ย (อัตราการเต้นของหัวใจช่วงคงที่ มีความต่างไม่เกิน ±5 ครั้งต่อนาที และควรอยู่ระหว่าง 130 – 170 ครั้งต่อนาที) ถ้าใน 2 นาทีแรกของการทดสอบอาสาสมัครมีอัตราการเต้นหัวใจเกิน 170 ครั้งต่อนาที ให้หยุดการทดสอบทันที
      2.1.6 ขณะทำการทดสอบจะทำการวัดและบันทึกค่าอัตราการเต้นหัวใจแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องวัดและบันทึก Polar V300
      2.1.7 ใช้ค่าของอัตราการเต้นหัวใจช่วงคงที่นาทีที่ 5 และ 6 สำหรับการหาค่าความสามารถสูงสุดในการใช้ออกซิเจน (Oxygen Consumption, $VO_{2\ max}$) เทียบต่อน้ำหนักตัว และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอายุ (Age factor) เป็นค่าความสามารถสูงสุดในการใช้ ดูรายละเอียดวิธีการคำนวณได้ในหัวข้อที่ 7.6.8
   2.2 การทดสอบที่อุณหภูมิ WBGT ที่ 28, 30 และ 32 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 7.3 โดยมีรายละเอียดดังนี้
      2.2.1. ให้ผู้รับการทดสอบนั่งพักในห้องทดสอบที่ได้ปรับตั้งค่าอุณหภูมิไว้โดยเริ่มจากอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบที่ 28 องศาเซลเซียส ระดับภาระงานเบามาก จดบันทึกอัตราการเต้นของหัวใจขณะพักในห้องไว้เป็นอัตราการเต้นของหัวใจที่เกิดจากภาระงานทางความร้อนที่อุณหภูมินั้น ๆ เมื่อยังไม่มีภาระงานทางกาย

2.2.2. ให้อาสาสมัครนั่งบนจักรยานงานวัดงานปรับระยะห่างและระดับที่นั่งให้เหมาะสม เริ่มทดสอบที่การใช้น้ำหนักถ่วงจักรยานที่ 0 วัตต์ ปั่นทดสอบ 3 นาที

2.2.3. หากอัตราการเต้นของหัวใจไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด ให้ปรับน้ำหนักถ่วงจักรยานขึ้นทีละ 25 วัตต์ และให้ปั่นจักรการที่น้ำหนักถ่วงนี้เป็นเวลา 3 นาที ถ้าอัตราการเต้นหัวใจมากกว่าเกณฑ์ระดับภาระงานที่ทดสอบให้หยุดการทดสอบและบันทึกค่าน้ำหนักถ่วงก่อนหน้านี้และอัตราการเต้นหัวใจที่ระดับน้ำหนักถ่วงดังกล่าว ถ้าอัตราการเต้นหัวใจยังไม่ถึงเกณฑ์ภาระงานที่ใช้ทดสอบให้ปรับน้ำหนักถ่วงของจักรยานเพิ่มขึ้นอีก 25วัตต์ และดำเนินการในลักษณะเดิม

2.2.4. ทดสอบไปเรื่อย ๆ จนค่าอัตราการเต้นของหัวใจอยู่ในช่วงที่กำหนด จึงหยุดพัก

2.2.5. บันทึกค่าน้ำหนักถ่วงบนจักรยานและระยะเวลาที่ใช้ทดสอบ

2.2.6. สอบถามความรู้สึกเหนื่อย ด้วยแบบประเมินดัชนีรับรู้ความรู้สึกเหนื่อย (Borg's scale CR10) เพื่อบ่งชี้อันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับเด็กทำงาน

2.2.7. ให้อาสาสมัครที่เข้าร่วมการทดสอบพักจนอัตราการเต้นหัวใจเข้าสู่สภาวะปกติก่อนจะดำเนินการทดสอบที่ระดับภาระงานที่หนักขึ้นและอุณหภูมิสูงขึ้น 30 และ 32 °C WBGT ตามลำดับ พร้อมทั้งสอบถามความรู้สึกเหนื่อยทุกครั้งก่อนเริ่มการทดสอบซ้ำ จากนั้นทำการทดสอบซ้ำขั้นตอนที่การทดสอบที่ 2-4 ในตารางที่ 7.3

2.2.8. สรุปและรายงานผลการศึกษา เพื่อเสนอแนะค่าอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ (Wet Bulb Globe Temperature, WBGT) ที่เหมาะสมสำหรับแรงงานเด็กแยกตามความหนักเบาของงาน

ตารางที่ 7.3 ขั้นตอนการทดสอบที่อุณหภูมิ 28 °C WBGT และระดับภาระงานต่างกัน

การทดสอบที่ 1			การทดสอบที่ 2			การทดสอบที่ 3			การทดสอบที่ 4			
ห้องทดสอบ 25 °C WBGT			ห้องทดสอบ 28 °C WBGT (ภาระงานเบามาก)			ห้องทดสอบ 28 °C WBGT (ภาระงานเบา)			ห้องทดสอบ 28 °C WBGT (ภาระงานปานกลาง)			
วัด HRR ขณะนั่งนิ่ง ๆ ในห้องทดสอบ 5 นาที	ทดสอบสมรรถภาพทางกายบนจักรยาน ด้วยวิธีการของ Astrand and Ryhming (Astrand, 1952)	นั่งพักจน HR ลดลงเท่ากับก่อนการทดสอบ	วัด HRR ขณะนั่งนิ่ง ๆ ในห้องทดสอบ 5 นาที	ปั่นจักรยานที่ 50 รอบต่อนาที เริ่มจาก 0 วัตต์ และเพิ่มทีละ 25 วัตต์ ไปจนค่า HR นิ่งแต่ไม่เกินระดับภาระงานเบามาก บันทึกเวลาและวัตต์สุดท้ายที่ใช้ทดสอบ	นั่งพักบนจักรยานพอหายเหนื่อย	นั่งพักในห้องทดสอบจน HR กลับมาที่ค่าก่อนเริ่มปั่นจักรยาน วัด HRR ขณะนั่งนิ่ง ๆ ในห้องทดสอบ 5 นาที	ปั่นจักรยานที่ 50 รอบต่อนาที เริ่มจาก 0 วัตต์ และเพิ่มทีละ 25 วัตต์ ไปจนค่า HR นิ่งแต่ไม่เกินระดับภาระงานเบามาก บันทึกเวลาและวัตต์สุดท้ายที่ใช้ทดสอบ	นั่งพักบนจักรยานพอหายเหนื่อย	นั่งพักในห้องทดสอบจน HR กลับมาที่ค่าก่อนเริ่มปั่นจักรยาน วัด HRR ขณะนั่งนิ่ง ๆ ในห้องทดสอบ 5 นาที	ปั่นจักรยานที่ 50 รอบต่อนาที เริ่มจาก 0 วัตต์ และเพิ่มทีละ 25 วัตต์ ไปจนค่า HR นิ่งแต่ไม่เกินระดับภาระงานเบามาก บันทึกเวลาและวัตต์สุดท้ายที่ใช้ทดสอบ	นั่งพักบนจักรยานพอหายเหนื่อย	นั่งพักในห้องทดสอบจน HR กลับมาที่ค่าก่อนเริ่มปั่นจักรยาน
ทดสอบเพียงครั้งเดียวในช่วงเช้าเมื่ออาสาสมัครมาถึง			การทดสอบที่อุณหภูมิ 28 °C WBGT จะเริ่มจากภาระงานเบามากก่อน ระหว่างการทดสอบในภาระงานถัดไป อาสาสมัครจะนั่งในห้องทดสอบจนกว่าค่าอัตราการเต้นหัวใจ HR จะกลับมาที่ตำแหน่งก่อนก่อนการทดสอบ ±3 ครั้งต่อนาที เมื่อทดสอบที่ภาระงานสุดท้ายแล้วอาสาสมัครจึงออกจากห้องเพื่อพักจนมีค่าอัตราการเต้นหัวใจเท่ากับการทดสอบที่ 1 แล้วจึงเริ่มทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 30 และ 32 °C WBGT ตามลำดับ โดยทำการทดลองด้วยรูปแบบเดียวกับการทดลองที่ 2-4								

7.6 เครื่องมือและวิธีการเก็บข้อมูล

อาสาสมัครที่เข้าร่วมการศึกษาในครั้งนี้เป็นเด็กที่ไม่มีประสบการณ์ในการทำงานกับความร้อนสูงมาก่อน ดังนั้นเพื่อความปลอดภัย การทดลองจึงใช้การเรียงลำดับจากอุณหภูมิ WBGT ต่ำไปสูงคือ 28 30 และ 30 °C และจากภาระงานเบาไปหนัก และค่อย ๆ สังเกตอาการของเด็กในระหว่างการทดลอง โดยไม่ได้ดำเนินการทดลองแบบสุ่ม (randomized design) ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยของเด็กที่เข้าร่วมการทดสอบอาสาสมัครที่ได้รับอนุญาตจากผู้ปกครองและผ่านเกณฑ์การคัดเข้าแล้ว จะได้รับการอธิบายขั้นตอนในการทดลองอย่างละเอียดอีกครั้ง และเริ่มต้นด้วยการทดสอบสมรรถภาพทางกาย ที่ทำการศึกษาทดลองในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ปรับค่าอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบได้ในระดับต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 7.2

การวัดสมรรถภาพร่างกายในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ 25 องศาเซลเซียส ใช้วิธีการของ Astrand and Ryhming (Astrand, 1952) โดยใช้จักรยานวัดงาน (Bicycle ergometer) ดังแสดงในรูปที่ 7.3 สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการวัดอัตราการเต้นหัวใจเป็นแบบวัดและบันทึกผลต่อเนื่อง Polar V300 ของบริษัท Polar Inc. ดังแสดงในรูปที่ 7.4 โดยการทดสอบแต่ละครั้งตามขั้นตอนในข้อ 7.5.2 ข้อ 2 ซึ่งตัวอย่างการทดสอบภาระงานปานกลางตังแสดงในตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.4 ตัวอย่างการทดสอบภาระงานปานกลาง (MHR = 143 – 161ครั้ง/นาที)

โหลดน้ำหนักจักรยาน (วัตต์)	เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (นาที)	อัตราการเต้นของหัวใจ (ครั้ง/นาที)
0	3	118
25	3	130
50	3	143
75	3	161
หยุดการทดสอบ		

การบันทึกค่าการทดสอบจะบันทึกทุก ๆ นาที (วินาทีที่ 45 ถึงวินาทีที่ 60 ของแต่ละนาที) เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบ ให้อาสาสมัครตอบแบบสอบถามความรู้สึกเหนื่อยล้าในเชิงจิตฟิสิกส์ทุกครั้งหลังการทดสอบ เพื่อรวบรวมข้อมูลไปวิเคราะห์ผลต่อไป

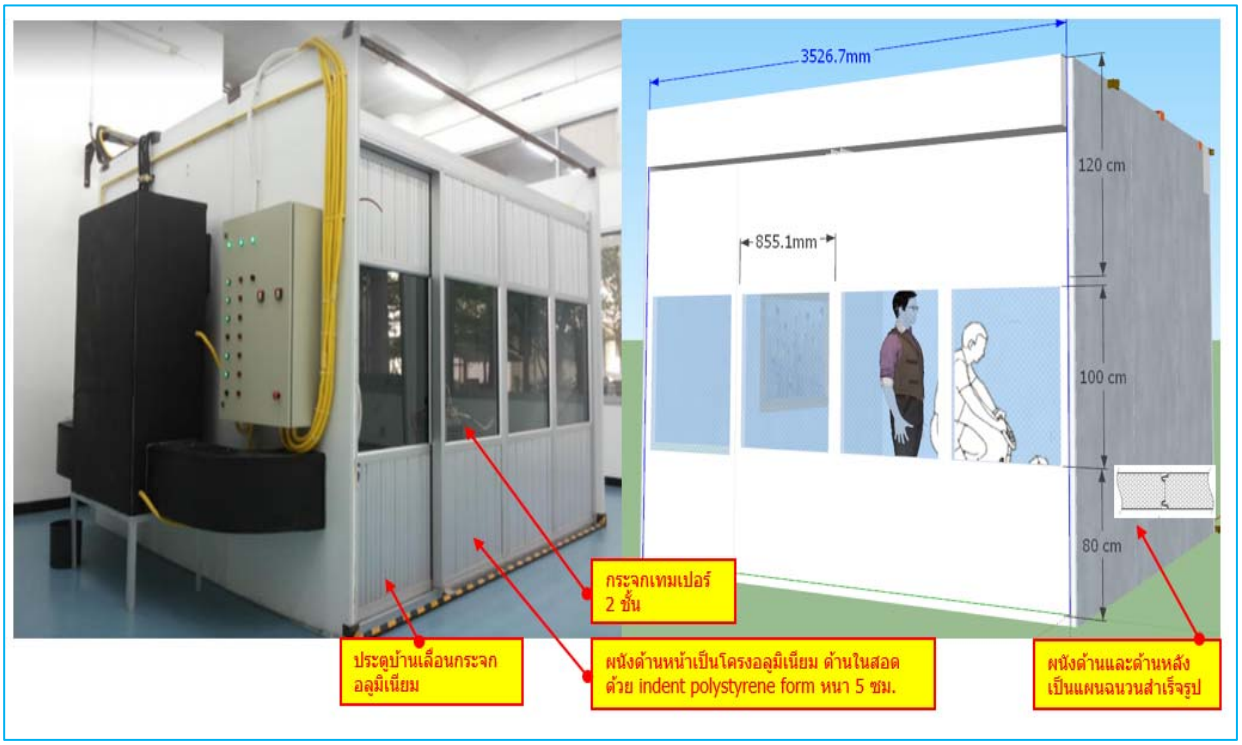
7.6.1 ห้องควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ

ด้วยสภาพอากาศภายนอกในแต่ละช่วงเวลามีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาในแต่ละวัน ในกรณีที่มีฝนตกอากาศจะค่อนข้างเย็นและชื้น สำหรับวันที่มีแดดทั้งวันอากาศจะร้อนอบอ้าวมาก ซึ่งอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบภายนอกนอกห้องทดสอบจะมีความผันแปรอยู่ในช่วง 25-28 องศาเซลเซียส และช่วงการเก็บข้อมูลในการศึกษานี้อยู่ในช่วงเดือนมกราคมถึงมีนาคม เป็นช่วงปลายฤดูหนาวที่กำลังจะเข้าสู่ฤดูร้อน เพื่อควบคุมความผันแปรของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ การศึกษานี้จึงทำการทดสอบในห้องควบคุมอุณหภูมิ (รูปที่ 7.2)

ห้องควบคุมอุณหภูมิที่สร้างขึ้นประกอบด้วยผนังทั้งหมด 5 ด้าน ผนังด้านหน้าเป็นอะลูมิเนียมและกระจกเทมเปอร์สองชั้นวางอยู่บนพื้นกระเบื้องยาง ส่วนผนังด้านข้างทั้ง ๒ ด้าน ด้านหลังและด้านบนเป็น แผ่นฉนวนสำเร็จรูปโพลีสไตรีนโฟมชนิดพิเศษที่ไม่ลามไฟและไม่มีส่วนผสมของสารซีเอฟซี มีความหนา 10 เซนติเมตร มีค่าการนำความร้อนต่ำมากอยู่ที่ 0.0285 kcal/m.h.°C สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ -40 ถึง 52 องศา

เซลเซียส มีผิวหน้าเป็นเหล็กเคลือบด้วยโลหะผสมระหว่างอลูมิเนียมและสังกะสีหนา 0.5 มิลลิเมตร และเคลือบด้วยซิลิคอนโพลีเอสเตอร์หนา 0.05 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นชนิดสามารถใช้สัมผัสอาหารได้

ห้องทดสอบนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบได้ในช่วง 10-40 องศาเซลเซียส ใช้ชุดควบคุมอุณหภูมิที่ประกอบด้วยชุดปรับอากาศเย็นขนาด 24000 บีทียู 2 ชุด ขดลวดความร้อน 1500 วัตต์ 3 ชุด 2 ชุด สำหรับทำอากาศร้อนและอีก 1 ชุดสำหรับระบบไอน้ำร้อน เชื่อมต่อกับระบบควบคุมอุณหภูมิในห้อง สำหรับงานวิจัยครั้งนี้จะทำการทดสอบในห้องที่สภาวะอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ 25-32 องศาเซลเซียส



รูปที่ 7.2 ห้องควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

7.6.2 จักรยานวัดงาน (Bicycle ergometer)

จักรยานวัดงานที่ใช้เป็นของบริษัท Bodyguard รุ่น Bodyguard 990 ดังแสดงในรูปที่ 7.3 เป็นจักรยานที่สามารถปรับระดับน้ำหนักถ่วง (โหลด) ได้ มีหน้าปัดแสดงผลความเร็วรอบขาเพื่อควบคุมความเร็วในการปั่น ซึ่งในการทดสอบนี้กำหนดความเร็วรอบไว้ที่ 50 รอบต่อนาที ในการทดสอบที่อุณหภูมิ 28, 30 และ 32 องศาเซลเซียส จะมีการปรับโหลดขึ้นทุก ๆ 25 วัตต์ เนื่องจากเป็นช่วงการปรับโหลดขั้นต่ำตามหลักเกณฑ์การทดสอบของ Astrand - Ryhming Test

รูปที่ 7.3 จักรยานวัดงานที่ใช้ในการทดสอบสามารถปรับความหนักเบาได้

7.6.3 เครื่องวัดและบันทึกอัตราการเต้นหัวใจ

เครื่องวัดอัตราการเต้นหัวใจที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นของบริษัท Polar Electro Inc. ใช้ตัวรับรู้สัญญาณชีพชนิดคาดรอบบริเวณหน้าอก และมีตัวรับส่งสัญญาณแบบไร้สายระยะสั้น รุ่น H7 ส่งข้อมูลไปยังตัวรับและบันทึกสัญญารุ่น A300 สามารถบันทึกค่าอัตราการเต้นหัวใจได้ต่อเนื่อง ด้วยอัตราการบันทึกข้อมูลสูงสุด 1 ค่าต่อวินาที (1 Hz) ดังแสดงในรูปที่ 7.4

รูปที่ 7.4 เครื่องวัดและบันทึกค่าอัตราการเต้นหัวใจ Polar A300 และ Polar H7

7.6.4 นาฬิกาจับเวลา

นาฬิกาจับเวลาที่ใช้ในการศึกษานี้ ยี่ห้อ Casio รุ่น HS-30W ความละเอียดในการเก็บข้อมูล 1/1000 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 7.5

รูปที่ 7.5 นาฬิกาจับเวลา

7.6.5 เครื่องชั่งน้ำหนัก

ยี่ห้อ TANITA รุ่น HD-365 แสดงหน่วยวัดเป็นกิโลกรัม (kg) มีความละเอียดของเครื่องชั่ง 0.1 กิโลกรัม ดังแสดงในรูปที่ 7.6

รูปที่ 7.6 เครื่องชังน้ำหนัก

7.6.6 แบบสอบถามข้อมูลเบื้องต้น

แบบสอบถามที่ใช้บันทึกข้อมูลเบื้องต้น เพื่อคัดกรองข้อมูลสุขภาพของกลุ่มตัวอย่าง สำหรับประเมินความพร้อมก่อนเข้ารับการทดสอบ (ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ฉ.1) สำหรับตารางใช้ในการคำนวณเกณฑ์การประเมินสมรรถภาพร่างกาย จากค่าความสามารถในการใช้ออกซิเจนสูงสุด (VO_2 max) ดังแสดงในภาคผนวก ฉ.3 ถึง ฉ.4

7.6.7 แบบประเมิน Borg's scale สอบถามความรู้สึก

แบบประเมิน Borg's scale สอบถามความรู้สึกเหนื่อยและเมื่อยล้าจากการออกแรงกายหลังจากการทดสอบ โดยจะทำการสอบถามทุกครั้งหลังการทดสอบ รวมทั้งสิ้น 10 ครั้ง ดังแสดงในภาคผนวก ฉ.8

7.6.8 การเก็บข้อมูลเพื่อประมาณค่า VO2

การประมาณค่าความสามารถในการใช้ออกซิเจนสูงสุด (VO_2) เป็นการทดสอบสมรรถภาพทางกายของเด็กโดยจะทำการทดสอบในห้องที่อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ 25 องศาเซลเซียส ตามรายละเอียดได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 7.5.2 ขั้นตอนการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้วิธีปั่นจักรยานที่นำหนักถ่วงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ค่าของน้ำหนักถ่วงบนจักรยาน (วัตต์) และค่าอัตราการเต้นหัวใจสูงสุดในการทดสอบในขั้นตอนนี้จะนำมาใช้ในการเปิดตารางในภาคผนวก ฉ.3 (สำหรับเด็กชายตารางในภาคผนวก ฉ.3.1 ถึง ฉ.3.4) และตารางในภาคผนวก ฉ.4 (สำหรับเด็กหญิงตารางในภาคผนวก ฉ.4.1 ถึง ฉ.4.2)

ตัวอย่างการคำนวณสมรรถภาพการใช้ออกซิเจน

ด.ช. เอ อายุ 15 ปี น้ำหนัก 55 กิโลกรัม ใช้น้ำหนักถ่วงจักรยาน 100 วัตต์ อัตราการเต้นของหัวใจช่วงคงที่ 140 ครั้ง/นาที เมื่อเปิดตารางในภาคผนวก ฉ.3.2 จะได้ว่า

ด.ช. เอ มีสมรรถภาพการใช้ออกซิเจน = 2.6 ลิตร/นาที

แปลงค่าที่ได้จากหน่วย ลิตร/นาที เป็น มิลลิลิตรต่อนาทีต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม ($ml.min^{-1}\ kg^{-1}$)

= (2.6 x 1,000)/55

ดังนั้นจะได้ว่า ด.ช. เอ มีความสามารถในการใช้ออกซิเจนสูงสุดก่อนปรับแก้อายุ

= 47.27 มิลลิลิตร/กิโลกรัม.นาที

เปิดตารางในภาคผนวก ฉ.5 เพื่อหาค่าตัวประกอบการปรับแก้อายุ

ด.ช. เอ อายุ 15 ปีมีค่าตัวประกอบการปรับแก้อายุ = 1.10

นำค่าตัวประกอบไปคูณ

ดังนั้น ด.ช. เอ มีสมรรถภาพการใช้ออกซิเจนสูงสุดจริงเท่ากับ

= 47.27 x 1.10

= 52.00 มิลลิลิตร/กิโลกรัม/นาที

ค่าความสามารถในการใช้ออกซิเจนสูงสุดสามารถบอกถึงสมรรถภาพทางกายของเด็กว่าอยู่ในเกณฑ์ใดเมื่อเทียบกับตารางมาตรฐานในภาคผนวก ฉ.6 สำหรับเด็กชาย และ ตารางในภาคผนวก ฉ.7 สำหรับเด็กหญิง จากตัวอย่างนี้เมื่อนำข้อมูลผลการคำนวณค่าความสามารถสูงสุดในการใช้ออกซิของ ด.ช. เอ ไปเทียบกับตารางในภาคผนวก ฉ.6 จะพบว่าปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลมาตรฐานสำหรับเด็กในวัย 15-16 ปี ดังนั้นดังเทียบเกณฑ์มาตรฐานสำหรับเด็กที่อายุน้อยกว่า 17 ปี จะเทียบกับเกณฑ์ของเด็กในกลุ่มอายุ 17-19 ปี ซึ่งพบว่าได้ว่า ด.ช. เอก มีสมรรถภาพทางกายอยู่ในระดับดี

7.6.9 สถิติที่นำมาใช้วิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่เป็นข้อมูลตัวเลขจะนำเสนอผลในรูปจำนวนร้อยละ, กราฟการกระจายตัวของข้อมูล หรือแผนภูมิเส้นเท่านั้น ข้อมูลทั้งหมดจะถูกตรวจสอบความเรียบร้อย และผ่านการวิเคราะห์ข้อมูล (Analysis of data) โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) และ สถิติเชิงวิเคราะห์ แบบ Repeated measures ANOVA ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab 17.0 สำหรับการพิจารณาค่าน้ำหนักถ่วงบนจักรยานและระยะเวลาที่ใช้ทดสอบค่าอัตราการเต้นของหัวใจสัมพัทธ์เฉลี่ย (เทียบกับเกณฑ์จากการศึกษาของ Wu และ Wang (2002) คะแนนระดับความรู้สึกเหนื่อยล้า จากแบบประเมินดัชนีรับรู้ความรู้สึก (Borg CR10) และวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าน้ำหนักถ่วงบนจักรยานและระยะเวลาที่ใช้ทดสอบเฉลี่ยรายคู่การทดสอบ เพื่อวิเคราะห์ว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาอย่างไร

7.7 การวิเคราะห์และอภิปรายผลการศึกษา

7.7.1 ลักษณะทั่วไปของอาสาสมัคร

การศึกษาในกลุ่มตัวอย่างอายุตั้งแต่ 15 ถึงต่ำกว่า 18 ปีนับถึงวันที่มีการเก็บข้อมูล จำนวน 30 คน เป็นเพศชาย 15 คน คิดเป็นร้อยละ 50 เป็นเพศหญิง 15 คน คิดเป็นร้อยละ 50 มีอายุเฉลี่ย 16.3 ปี น้ำหนักเฉลี่ย 58.2 กิโลกรัม ความสูงเฉลี่ย 166.4 เซนติเมตร และค่า BMI เฉลี่ย 21.04 ดังแสดงในตารางที่ 7.5**Error! Not a valid bookmark self-reference.** จากการทดสอบทางสถิติพบว่าค่าดัชนีมวลกายของทั้งเด็กหญิงและชายไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 7.5 ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของข้อมูลทั่วไปของกลุ่มประชากรอาสาสมัครวิจัย

ข้อมูล	เพศชาย		เพศหญิง		รวม	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
อายุ	16.4	0.84	16.2	0.85	16.3	0.84
น้ำหนัก	62.0	6.80	54.5	6.29	58.2	7.47
ส่วนสูง	173.3	7.59	159.4	5.06	166.4	9.48
ค่า BMI	20.63	2.035	21.45	2.589	21.04	2.325

7.7.2 ผลการทดสอบสมรรถภาพร่างกาย

ผลการทดสอบสมรรถภาพร่างกายบนจักรยานด้วยวิธีการของ Astrand - Ryhming ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เพื่อประมาณค่าความสามารถสูงสุดในการใช้ออกซิเจน (Oxygen consumption; VO_2 max) พบว่าผู้เข้ารับการทดสอบมีสมรรถภาพร่างกายอยู่ในเกณฑ์ดี จำนวน 2 คน คิดเป็นร้อยละ 6.67 สมรรถภาพร่างกายอยู่ในเกณฑ์ปานกลางจำนวน 10 คน คิดเป็นร้อยละ 33.33 สมรรถภาพร่างกายอยู่ในเกณฑ์ต่ำจำนวน 10 คน คิดเป็นร้อยละ 33.33 สมรรถภาพร่างกายอยู่ในเกณฑ์ต่ำมากจำนวน 7 คน คิดเป็นร้อยละ 23.33 และไม่สามารถที่จะประเมินสมรรถภาพร่างกายได้จำนวน 1 คน คิดเป็นร้อยละ 3.34 เนื่องจากอาสาสมัครมีอัตราการเต้นหัวใจเลยเกณฑ์ที่กำหนดในระหว่างการทดสอบจึงต้องหยุดการทดสอบการสมรรถภาพร่างากายดังแสดงในตารางที่ 7.6

ข้อสังเกตเรื่องสมรรถภาพทางกายของอาสาสมัครจากข้อมูลสรรถภาพทางกายพบว่ากลุ่มอาสาสมัครเกือบทั้งหมดคือ 27 คนใน 30 คน (หรือคิดเป็นร้อยละ 93 มีสมรรถภาพทางกายอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ต่ำ และ ต่ำมาก โดยกลุ่มที่มีสมรรถภาพร่างกายต่ำถึงต่ำมากมีถึง 18 คน โดยในกลุ่มนี้มี 1 คนที่ไม่สามารถประเมินสมรรถภาพร่างกายได้ เนื่องจากค่าอัตราการเต้นหัวใจขณะปั่นที่ 50 วัตต์แรกเกิน 170 ครั้งต่อนาที จึงห ยุ ด การทดสอบ

ตารางที่ 7.6 ผลการทดสอบสมรรถภาพร่างกายที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เกณฑ์สมรรถภาพร่างกาย	เพศชาย	เพศหญิง	จำนวน (คน)
ดี	1 (3.34%)	1 (3.34%)	2 (6.67%)
ปานกลาง	5 (16.67%)	5 (16.67%)	10 (33.33%)
ต่ำ	3 (10.00%)	7 (23.33%)	10 (33.33%)
ต่ำมาก	5 (16.67%)	2 (6.67%)	7 (23.33%)
*ไม่สามารถประเมินสมรรถภาพร่างกายได้	1 (3.34%)	0 (0.00%)	1 (3.34%)
รวม	15 (50%)	15 (50%)	30 (100%)

***หมายเหตุ** ค่าอัตราการเต้นหัวใจขณะปั่นที่ 50 วัตต์แรกเกิน 170 ครั้งต่อนาที จึงหยุดการทดสอบ

7.7.3 ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของห้องทดสอบ

ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของการทดสอบที่ 25 °C WBGT ในห้องทดสอบสมรรถภาพ และห้องควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบทั้ง 3 ระดับอุณหภูมิ พบว่าที่อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ 32 องศาเซลเซียสมีการเบี่ยงเบนค่าอุณหภูมิมากกว่าที่ 28 และ 30 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบที่ 28 30 และ 32 องศาเซลเซียสมีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบเท่ากับ 28.0 ± 0.12 30.1 ± 0.14 และ 32.1 ± 0.27 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (Relative Humidity) ระหว่างการทดสอบอยู่ในช่วงประมาณ 63 – 64% ดังแสดงใน**Error! Not a valid bookmark self-reference.**

ตารางที่ 7.7 ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ (WBGT) ของห้องที่ใช้ในการทดสอบ

อุณหภูมิ WBGT	อุณหภูมิเฉลี่ยรวม		T_w		T_g		T_d		Relative Humidity (%)	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
25 °C	25.0	0.09	23.4	0.18	28.9	0.10	29.3	0.04	63.97	0.14
28 °C	28.0	0.12	26.0	0.22	33.4	0.13	31.3	0.08	63.34	0.19
30 °C	30.1	0.14	27.3	0.16	37.5	0.11	34.0	0.14	63.43	0.57
32 °C	32.1	0.27	32.1	0.21	30.0	0.18	35.3	0.22	62.98	0.75

หมายเหตุ WBGT = อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบในหน่วยองศาเซลเซียส (°C)

T_w = อุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet bulb temperature) (°C)

T_g = อุณหภูมิการแผ่นรังสีความร้อน (globe temperature) (°C)

T_d = อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (dry bulb temperature) (°C)

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลอุณหภูมิในห้องทดสอบกับข้อมูลสภาพอากาศที่สำรวจวัดในพื้นที่ทำงานของเด็ก มีทั้งงานรับจ้างและบริการบริเวณในอาคารและนอกอาคาร ซึ่งกรณีอุณหภูมิในอาคารพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ใช้อ้างอิงสำหรับการตั้งค่าอุณหภูมิในห้องทดสอบ ซึ่งผลตรวจวัดค่าอุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่บันทึกไว้เป็นตัวอย่างสถานที่ทำงานและค่าอุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่มีเด็กทำงานในช่วงเดือน ก.ย.– ต.ค. 2559 ดังแสดงในตารางที่ 7.8

ตารางที่ 7.8 อุณหภูมิ WBGT ในช่วงเดือน ก.ย. –ต.ค. 2559 ในโรงซักรีดเสื้อผ้า โรงอาหาร และสวนผัก

สถานที่ทำงาน	สภาพอากาศ	อุณหภูมิ WBGT ($^{\circ}C$)	T_w ($^{\circ}C$)	T_g ($^{\circ}C$)	T_d ($^{\circ}C$)
โรงซัก - รีดเสื้อผ้า	ในอาคาร	30.8	28.5	36.1	35.7
โรงอาหาร	ในอาคาร	29.8	27.4	35.5	35.4
สวนผัก	นอกอาคาร	34.6	30.5	47.6	37.0

7.7.4 ค่าอัตราการเต้นของหัวใจขณะพักและค่าอัตราการเต้นของหัวใจสัมพัทธ์ขณะพัก

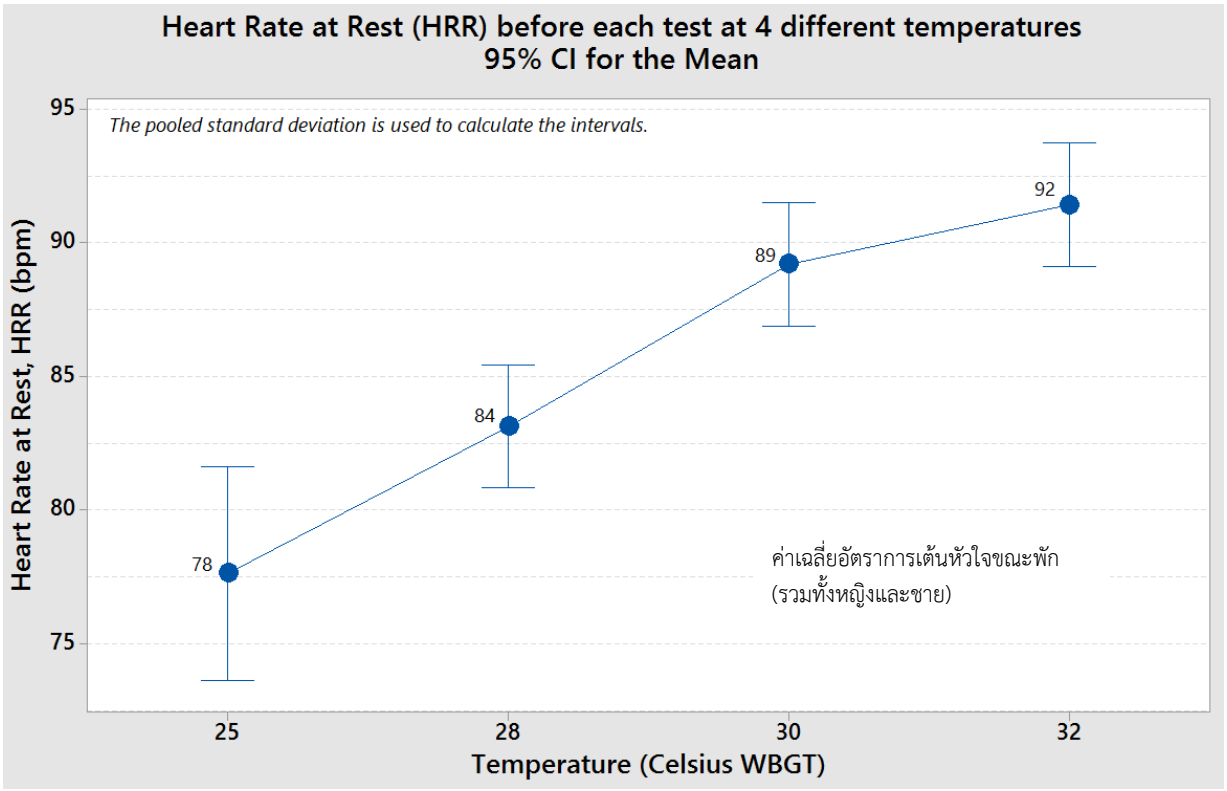
7.7.4.1 ค่าอัตราการเต้นหัวใจขณะพัก (heart rate at rest, HRR) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ภาระทางความร้อน (heat stress) เป็นภาระงานอย่างหนึ่งที่ส่งผลชัดเจนต่อระบบสรีรวิทยาของร่างกายโดยเฉพาะการเต้นหัวใจ การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการวัดอัตราการเต้นหัวใจขณะพักด้วยการให้ผู้เข้าร่วมการทดสอบนั่งนิ่ง ๆ ผลการวัดค่าอัตราการเต้นของหัวใจก่อนการทดสอบสมรรถภาพทางกายที่อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ 25 องศาเซลเซียส และก่อนการทดสอบในแต่ละระดับอุณหภูมิ พบว่าค่าอัตราการเต้นหัวใจขณะพักมีค่ามากขึ้นหรือการเต้นของหัวใจจะเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (ดังแสดงในรูปที่ 7.7) เนื่องจากการตอบสนองทางสรีรวิทยาของร่างกาย ที่ร่างกายต้องใช้พลังงานเพื่อรักษาสมดุลของอุณหภูมิภายในร่างกายไว้ ระบบประสาทส่วนควบคุมอุณหภูมิของร่างกายจึงกระตุ้นให้มีการไหลเวียนของเลือดมากขึ้น เพื่อลดผลกระทบของความร้อนจากภายนอก ค่าเฉลี่ยอัตราการเต้นหัวใจที่วัดได้เพิ่มขึ้นประมาณ 3 – 14 ครั้งต่อนาทีในแต่ละระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงนี้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 25 – 30 องศาเซลเซียส และน้อยลงในช่วง 30 ไป 32 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราการเต้นของหัวใจเฉลี่ยเท่ากับ 78 ครั้งต่อนาที ในห้องทดสอบ 25 องศาเซลเซียส 83 ครั้งต่อนาที ในห้องทดสอบ 28 องศาเซลเซียส 89 ครั้งต่อนาที ในห้องทดสอบ 30 องศาเซลเซียส และ 91 ครั้งต่อนาที ในห้องทดสอบ 32 องศาเซลเซียส สำหรับค่าทางสถิติอื่นๆ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 7.9

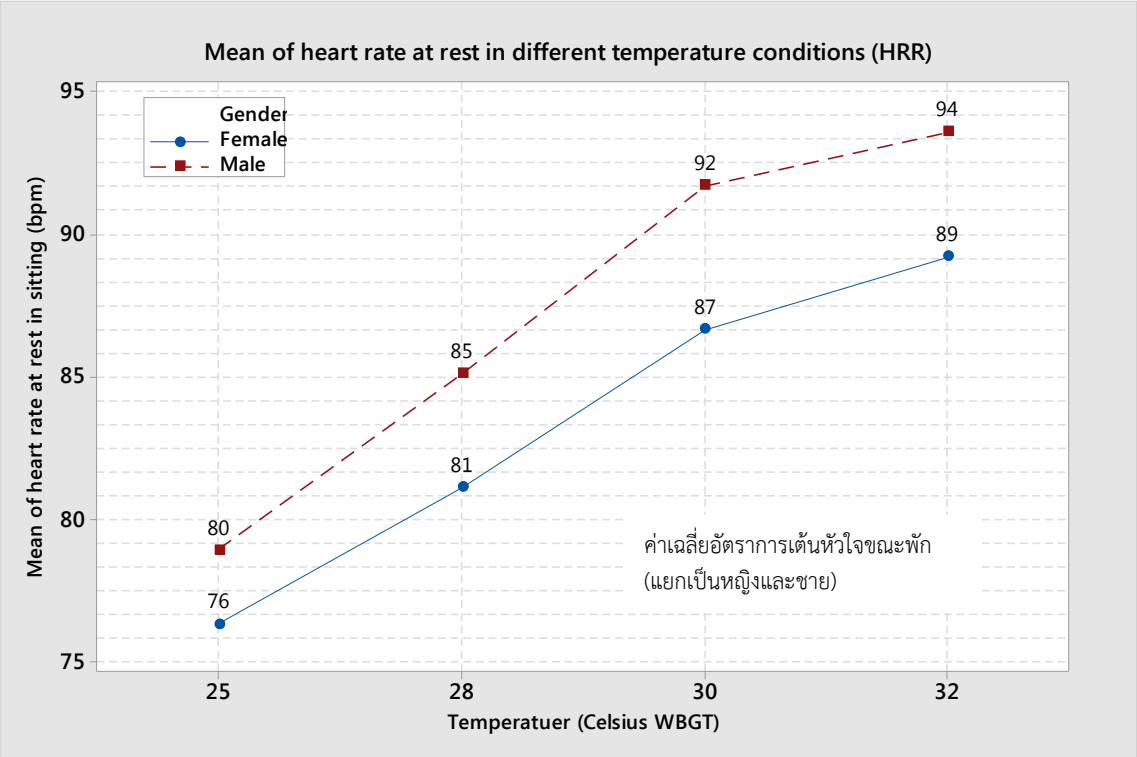
ตารางที่ 7.9 ค่าต่ำสุด (Min) ค่าสูงสุด (Max) ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่งเบนมาตรฐาน (SD) และเปอร์เซ็นไทล์ (Percentile, P) ของอัตราการเต้นหัวใจเฉลี่ยขณะพักนั่งนิ่ง ๆ ก่อนทำการทดสอบในแต่ละระดับอุณหภูมิรวมทั้งหญิงและชาย

อุณหภูมิ WBGT	อัตราการเต้นของหัวใจเฉลี่ยขณะพักก่อนทำการทดสอบ (ครั้งต่อนาที)						
	Min	Max	Mean	SD	P5	P50	P95
25$^{\circ}C$	55	96	78	11	58	78	94
28$^{\circ}C$	63	100	84	10	63	82	96
30$^{\circ}C$	69	110	89	11	74	88	102
32$^{\circ}C$	70	115	92	12	76	90	112

จากการทดสอบทางสถิติพบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลต่อทำให้อัตราการเต้นหัวใจขณะพักอย่างชัดเจน และมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ (P-value น้อยกว่า 0.0001) โดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 25 28 และ 30 องศาเซลเซียส แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างชัดเจนและมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 30 และ 32 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อาจเป็นเพราะลำดับขั้นการทดลองจะเริ่มจากอุณหภูมิต่ำไปที่สภาพอุณหภูมิสูง ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าสภาพร่างกายของอาสาสมัครที่เข้าร่วมการทดสอบมีการปรับตัวให้คุ้นเคย (acclimatization) กับสภาพอุณหภูมิที่สูงขึ้น (Poole, 2017) จึงส่งผลกระทบต่อภาระทางกายในสัดส่วนที่ลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการเต้นหัวใจขณะพักในกลุ่มอาสาสมัครเด็กชายมีค่าสูงกว่าหญิงอย่างมีนัยสำคัญ (P-value เท่ากับ 0.001) ด้วยเหตุที่เด็กที่มีอายุตั้งแต่ 10 ปีขึ้นไป เด็กชายจะมีอัตราการเผาผลาญพลังงานที่มากกว่า เนื่องจากสรีรวิทยาของเด็กชายจำเป็นต้องสร้างมวลกล้ามเนื้อในร่างกายมากกว่าเพศหญิง นอกจากนี้มีปัจจัยทางด้านอายุ น้ำหนักและส่วนสูงเข้ามาร่วมด้วย (Harris และ Benedict, 1919) (Rodriguez, 2000) ดังแสดงในรูปที่ 7.8 สำหรับค่าทางสถิติอื่นๆ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานดูดังแสดงในตารางที่ 7.10 และ ตารางที่ 7.11



รูปที่ 7.7 ค่าเฉลี่ยอัตราการเต้นหัวใจขณะพัก (รวมทั้งหญิงและชาย) ที่สภาวะแวดล้อมอุณหภูมิต่าง ๆ มีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกคือ จาก 25 ไปยัง 30 องศาเซลเซียส และอัตราการเพิ่มขึ้นลดลงในช่วงท้าย จาก 30 ไปยัง 32 องศาเซลเซียส



รูปที่ 7.8 ค่าเฉลี่ยอัตราการเต้นหัวใจขณะพัก ของผู้เข้าร่วมการทดสอบแยกตาม

ตารางที่ 7.10 ค่าต่ำสุด (Min) ค่าสูงสุด (Max) ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่งเบนมาตรฐาน (SD) ของอัตราการเต้นหัวใจเฉลี่ยขณะพักนั่งนิ่ง ๆ ก่อนทำการทดสอบในแต่ละระดับอุณหภูมิของอาสาสมัครชาย

อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ (°C WBGT)	อัตราการเต้นหัวใจขณะพัก (ชาย)					
	Min	Max	Mean	SD	กลุ่ม*	
25	62	96	76	10.5	A	
28	63	100	81	9.7	A	
30	74	110	87	9.9		B
32	76	110	89	9.2		B

หมายเหตุ *ตัวอักษรเหมือนกันหมายถึงไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 7.11 ค่าต่ำสุด (Min) ค่าสูงสุด (Max) ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่งเบนมาตรฐาน (SD) ของอัตราการเต้นหัวใจเฉลี่ยขณะพักนั่งนิ่ง ๆ ก่อนทำการทดสอบในแต่ละระดับอุณหภูมิของอาสาสมัครหญิง

อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ (°C WBGT)	อัตราการเต้นหัวใจขณะพัก (หญิง)						
	Min	Max	Mean	SD	กลุ่ม*		
25	55	93	79	11.8	A		
28	63	96	85	10.3	A	B	
30	69	107	92	12.1		B	C
32	70	115	94	13.8			C

หมายเหตุ *ตัวอักษรเหมือนกันหมายถึงไม่แตกต่างกัน

7.7.4.2 ค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ (%RHR at Rest) ขณะพัก

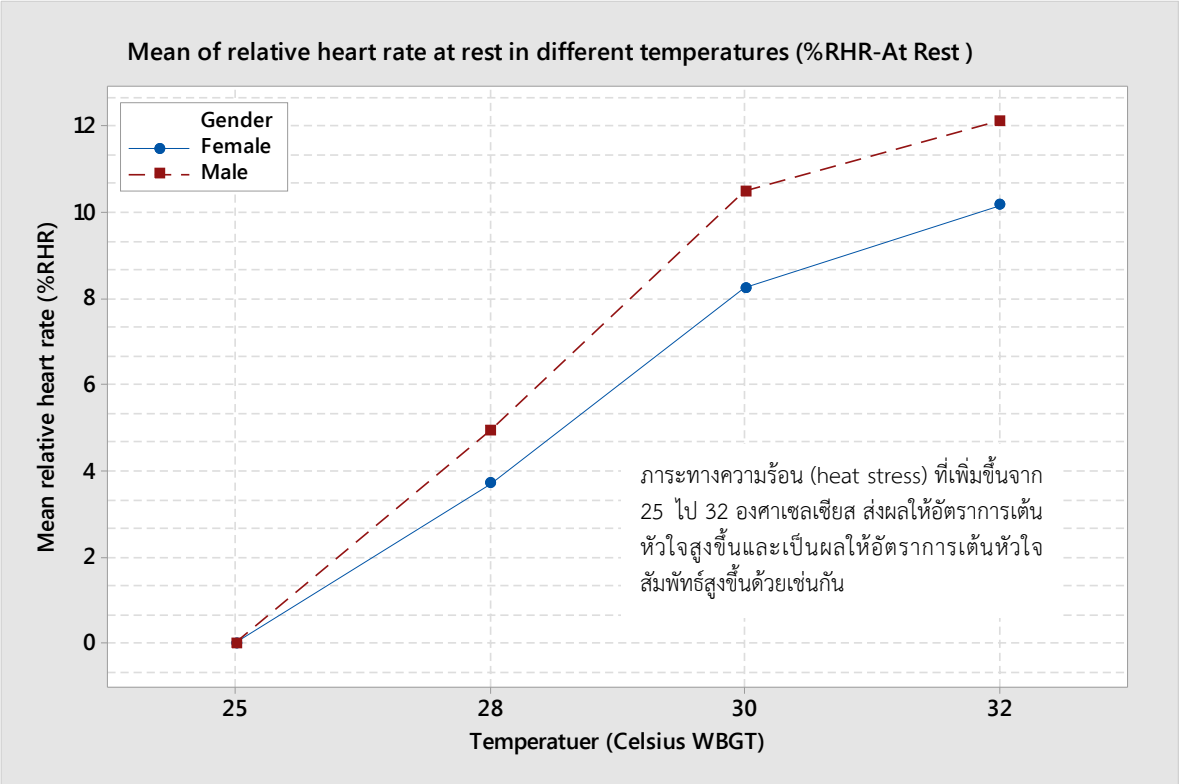
ค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ (relative heart rate, %RHR) เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างผลต่างของอัตราการเต้นหัวใจขณะทำงานกับผลต่างอัตราการเต้นหัวใจสูงสุดโดยเทียบกับค่าอัตราการเต้นหัวใจขณะพัก โดยผลต่างของอัตราการเต้นหัวใจสูงสุดเทียบกับค่าอัตราการเต้นหัวใจขณะพัก เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า อัตราการเต้นหัวใจสำรอง (reserved heart rate) ส่วนผลต่างของอัตราการเต้นหัวใจขณะทำงานเทียบกับค่าอัตราการเต้นหัวใจขณะพัก เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า อัตราการเต้นหัวใจที่ใช้ทำงาน (worked heart rate) ซึ่งอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ (%RHR) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการด้านล่าง ดังนี้

%RHR = (อัตราการเต้นหัวใจที่ใช้ทำงาน /อัตราการเต้นหัวใจสำรอง) * 100

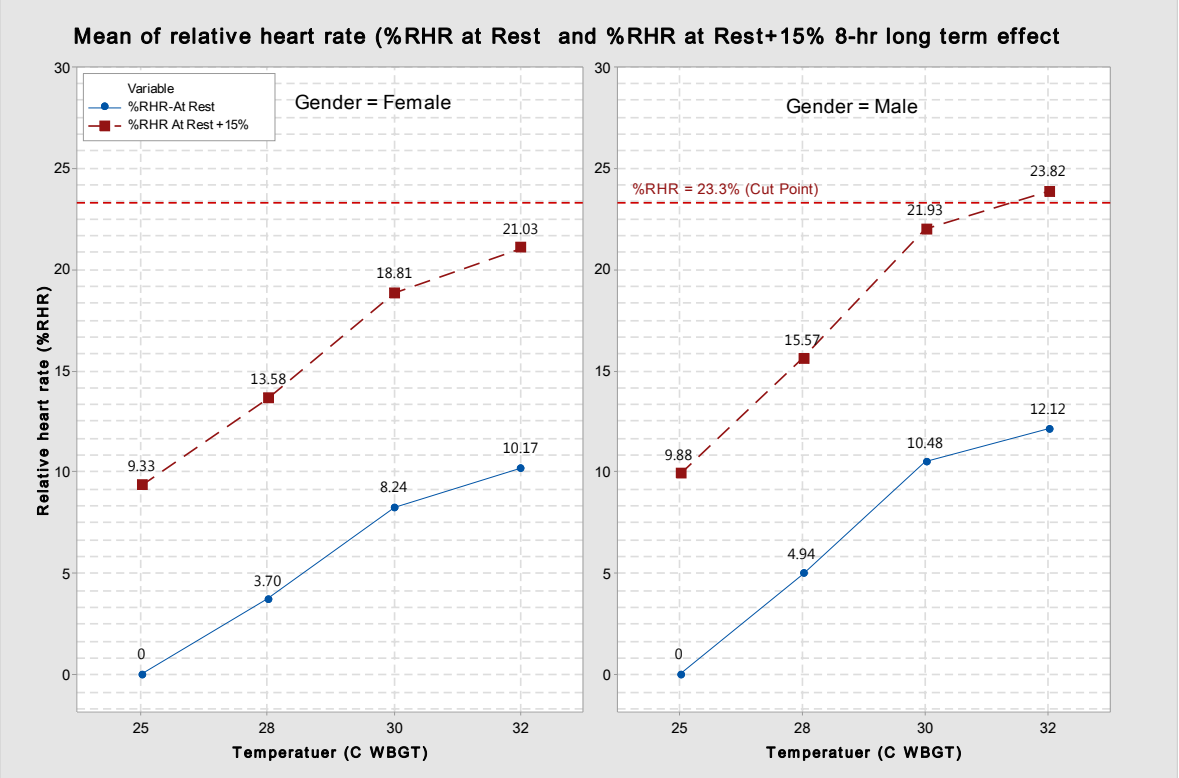
การศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้ค่าอัตราการเต้นหัวใจขณะนั่งพักนิ่ง ๆ ที่อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ 25 องศาเซลเซียส เป็นค่าอ้างอิง ดังนั้น ค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ขณะพักที่ 25 องศา จึงมีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อร่างกายได้รับภาระงานทางความร้อนก็ส่งผลให้อัตราการเต้นหัวใจสูงขึ้น เนื่องจากระบบสรีรวิทยามีการทำงานเพิ่มขึ้นเพื่อรักษาสมดุลของอุณหภูมิในร่างกาย ในการศึกษาครั้งนี้ค่าเฉลี่ยอัตราการเต้นของหัวใจสัมพัทธ์ขณะพักของอาสาสมัครทั้งหมดในห้องทดสอบที่อุณหภูมิเวตบัลบโกลบ 28 30 และ 32 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 4.31% 9.35% และ 11.14% ตามลำดับ (รายละเอียดค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 7.12) จากการศึกษาพบว่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์มีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเช่นเดียวกับอัตราการเต้นหัวใจขณะพัก เนื่องจากการรับภาระงานทางความร้อน (heat stress) ดังแสดงในรูปที่ 7.9 โดยจะเห็นว่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ของอาสาสมัครเพศชายมีค่าสูงกว่าเพศหญิงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P-value 0.006) และพบว่าค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ขณะพักที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียสมีค่าสูงสุด แต่อยู่ในเกณฑ์ความปลอดภัยทางสรีรวิทยา อย่างไรตามหากพิจารณาเด็กที่มีสมรรถภาพทางกายไม่ค่อยดีอุณหภูมิอาจจะส่งผลกระทบต่อการตอบสนองทางสรีรวิทยาที่สูงกว่า จากการพิจารณาค่าเปอร์เซ็นไทล์ที่ 95 (ตารางที่ 7.12) พบว่าค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 20.14 ที่ระดับอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ 32 องศาเซลเซียส ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทางสรีรวิทยาคือไม่เกิน 23.3% (Wu และ Wang, 2002) จึงเป็นไปได้ว่าอาสาสมัครเกือบทั้งหมดสามารถอยู่ในสภาพที่มีอุณหภูมิเวต-บัลบ์โกลบ 32 องศาเซลเซียส ได้อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามผลสรุปนี้ได้จากการประมาณการ และยังมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาการตอบสนองทางสรีรวิทยาของเด็กและผลกระทบจากการอยู่ในสภาวะดังกล่าวต่อเนื่องนานถึง 8 ชั่วโมง เมื่อลองประมาณผลกระทบระยะยาว 8 ชั่วโมงที่อาจส่งผลกระทบต่อค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ 15 % (ตารางที่ 7.13 และ ตารางที่ 7.14) พบว่าอาจมีเด็กบางคนที่จะอยู่ในภาวะเสี่ยงต่อสุขภาพได้เมื่อต้องอยู่ที่อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ 32 องศาเซลเซียส (รูปที่ 7.10)

ตารางที่ 7.12 ค่าต่ำสุด (Min) ค่าสูงสุด (Max) ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของอัตราการเต้นหัวใจเฉลี่ย และค่าเฉลี่ย (Mean) และเปอร์เซ็นไทล์ที่ 95 (P95) ของอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ขณะพักนั่งนิ่ง ๆ ก่อนทำการทดสอบของอาสาสมัครทั้งหมด

อุณหภูมิ WBGT	อัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ ขณะพักก่อนทำการทดสอบ				อัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ขณะพัก (%RHR)	
	Min	Max	Mean	SD	Mean	P95
25°C	0	0	0	0	0.00	0
28°C	0	11.35	4.31	10.3	4.31	9.35
30°C	3.28	22.95	9.35	11.4	9.35	16.94
32°C	-0.86	24.56	11.14	12.0	11.14	20.14



รูปที่ 7.9 ค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ (%RHR) ขณะนั่งพักนิ่ง ๆ ในที่อุณหภูมิต่าง ๆ เปรียบเทียบระหว่างอาสาสมัครที่เป็นเด็กหญิงและชาย



รูปที่ 7.10 ค่าเฉลี่ยอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ขณะพักที่อุณหภูมิต่าง ๆ และค่าประมาณของอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ที่ได้รับผลกระทบจากการทำงานยาวนาน 8 ชั่วโมงต่อวัน

ตารางที่ 7.13 ค่าต่ำสุด (Min) ค่าสูงสุด (Max) ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ขณะพักนั่งนิ่ง ๆ ก่อนทำการทดสอบในแต่ละระดับอุณหภูมิของอาสาสมัครชาย

อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ (°C WBGT)	อัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ขณะพัก (ชาย)							ค่าเฉลี่ยอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์เมื่อประมาณผลกระทบจากการอยู่ในสภาพดังกล่าว 8 ชั่วโมง
	Min	Max	Mean	SD	กลุ่ม*			
25	0	0	0	0	-	-	-	9.88
28	2.31	11.35	4.94	2.50		A		15.57
30	5.03	22.95	10.48	5.10			B	21.93
32	-0.86	24.56	12.12	6.47			B	23.82

หมายเหตุ *P-value น้อยกว่า 0.001

ตารางที่ 7.14 ค่าต่ำสุด (Min) ค่าสูงสุด (Max) ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ขณะพักนั่งนิ่ง ๆ ก่อนทำการทดสอบในแต่ละระดับอุณหภูมิของอาสาสมัครหญิง

อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ (°C WBGT)	อัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ขณะพัก (หญิง)								ค่าเฉลี่ยอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์เมื่อประมาณผลกระทบจากการอยู่ในสภาพดังกล่าว 8 ชั่วโมง
	Min	Max	Mean	SD	กลุ่ม*				
25	0	0	0	0	-	-	-	-	9.33
28	0	9.35	3.70	2.44		A			13.58
30	3.28	15.11	8.24	3.40			B		18.81
32	4.92	20.14	10.17	4.62				C	21.03

หมายเหตุ *P-value น้อยกว่า 0.001

7.7.5 ค่าอัตราการเต้นหัวใจและอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ขณะทำงานที่อุณหภูมิและระดับภาระงานต่างกัน

ในการศึกษาครั้งนี้กำหนดให้อัตราการเต้นหัวใจเป็นปัจจัยควบคุมร่วมกับการใช้การกำหนดระดับภาระงาน เพื่อให้ง่ายต่อการประยุกต์ใช้ในอนาคตด้วยการแบ่งระดับความหนักเบาของงานด้วยอัตราการเต้นหัวใจ ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 7.3 (ตารางที่ 7.1) ขอบเขตของงานวิจัย

จากการทดสอบปั่นจักรยานที่ 3 ระดับภาระงานพบว่าอัตราการเต้นหัวใจเฉลี่ยหลังทำการทดสอบในห้องทดสอบที่ควบคุมอุณหภูมิ WBGT ที่ 28 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 113 ครั้งต่อนาที ที่ระดับภาระงานเบามาก 134 ครั้งต่อนาที ที่ระดับภาระงานเบา และ 157 ครั้งต่อนาที ที่ระดับภาระงานปานกลาง ที่อุณหภูมิ WBGT ที่ 30 องศาเซลเซียส พบอัตราการเต้นหัวใจเฉลี่ยเท่ากับ 116 ครั้งต่อนาที ที่ระดับภาระงานเบามาก 133 ครั้งต่อนาที ที่ระดับภาระงานเบา, 155 ครั้งต่อนาที ที่ระดับภาระงานปานกลาง และที่อุณหภูมิ WBGT ที่ 32 องศาเซลเซียส พบอัตราการเต้นของหัวใจเฉลี่ยเท่ากับ 116 ครั้งต่อนาที ที่ระดับภาระงานเบามาก, 134 ครั้งต่อนาที ที่ระดับภาระงานเบา และ 155 ครั้งต่อนาที ที่ระดับภาระงานปานกลาง

ค่าอัตราการเต้นของหัวใจสัมพัทธ์ ในห้องทดสอบที่ควบคุมอุณหภูมิ WBGT ที่ 28 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราการเต้นของหัวใจสัมพัทธ์เฉลี่ยของอาสาสมัครเท่ากับ 28.46% ที่ระดับภาระงานเบามาก 45.53% ที่ระดับภาระงานเบา, 63.92% ที่ระดับภาระงานปานกลาง ในห้องทดสอบที่ควบคุมอุณหภูมิ WBGT ที่ 30 องศาเซลเซียส อัตราการเต้นของหัวใจสัมพัทธ์มีเฉลี่ยเท่ากับ 31.07% ที่ระดับภาระงานเบามาก 44.82% ที่ระดับภาระงานเบา และ 62.57% ที่ระดับภาระงานปานกลาง และในห้องทดสอบที่ควบคุมอุณหภูมิ WBGT ที่ 32 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราการเต้นของหัวใจสัมพัทธ์เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 30.80% ที่ระดับภาระงานเบามาก 45.45% ที่ระดับภาระงานเบา และ 62.65% ที่ระดับภาระงานปานกลาง ดังแสดงในตารางที่ 7.15

ตารางที่ 7.15 ค่าต่ำสุด (Min) ค่าสูงสุด (Max) ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของอัตราการเต้นหัวใจเฉลี่ย (ครั้งต่อนาที) และอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ (%RHR) หลังทำการทดสอบของกลุ่มตัวอย่าง

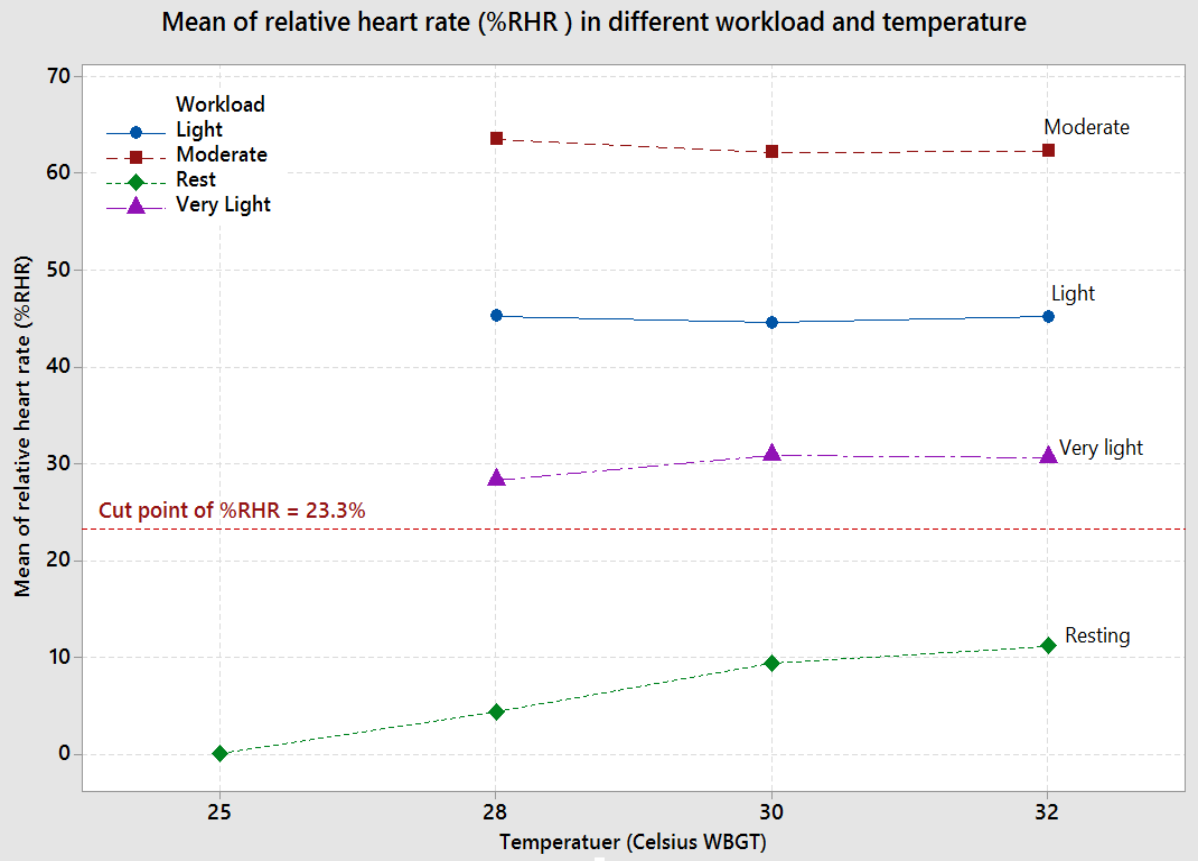
อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ (°C WBGT)	ระดับภาระงาน (ครั้ง/นาที)	อัตราการเต้นของหัวใจเฉลี่ยหลังทำการทดสอบ (ครั้งต่อนาที)				อัตราการเต้นของหัวใจสัมพัทธ์ (%RHR)
		Min	Max	Mean	SD	
28°C	เบามาก (101 – 122)	95	121	113.13	1.39	28.46
	เบา (123 – 142)	119	142	134.20	1.21	45.53
	ปานกลาง (143 – 162)	143	162	156.60	1.04	63.92
30°C	เบามาก (101 – 122)	100	122	116.13	1.17	31.07
	เบา (123 – 142)	113	142	133.17	1.33	44.82
	ปานกลาง (143 – 162)	141	162	154.87	1.11	62.57
32°C	เบามาก (101 – 122)	95	122	115.63	1.65	30.80
	เบา (123 – 142)	120	142	134.00	1.17	45.45
	ปานกลาง (143 – 162)	133	162	154.97	1.50	62.65

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากกราฟในรูปที่ 7.11 พบว่าขณะนั่งพัก (ไม่มีภาระงาน) และภาระงานเบามากจะเห็นผลกระทบของอุณหภูมิได้อย่างชัดเจน กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อภาระงานเริ่มหนักขึ้นในระดับหนึ่งจะพบว่าค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ไม่แตกต่างกันมากในแต่ละระดับของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นไปได้มากว่าภาระงานที่กำหนดในการทดสอบครั้งนี้อาจหนักเกินไปจนเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อภาระงานทางสรีรวิทยาของร่างกาย ส่งผลให้หัวใจเต้นสูงขึ้นและทำให้ค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์สูงขึ้นในทุกระดับภาระงาน แม้ว่าจะทำการทดสอบที่อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ 28 องศาเซลเซียส ก็พบว่าค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ที่เกิดจากการตอบสนองทางสรีรวิทยาของร่างกายมีค่าเกินเกณฑ์ความปลอดภัยทางสรีรวิทยาสำหรับการทำงานต่อ 8 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งพิจารณาที่ 23.3% (Wu และ Wang, 2002)

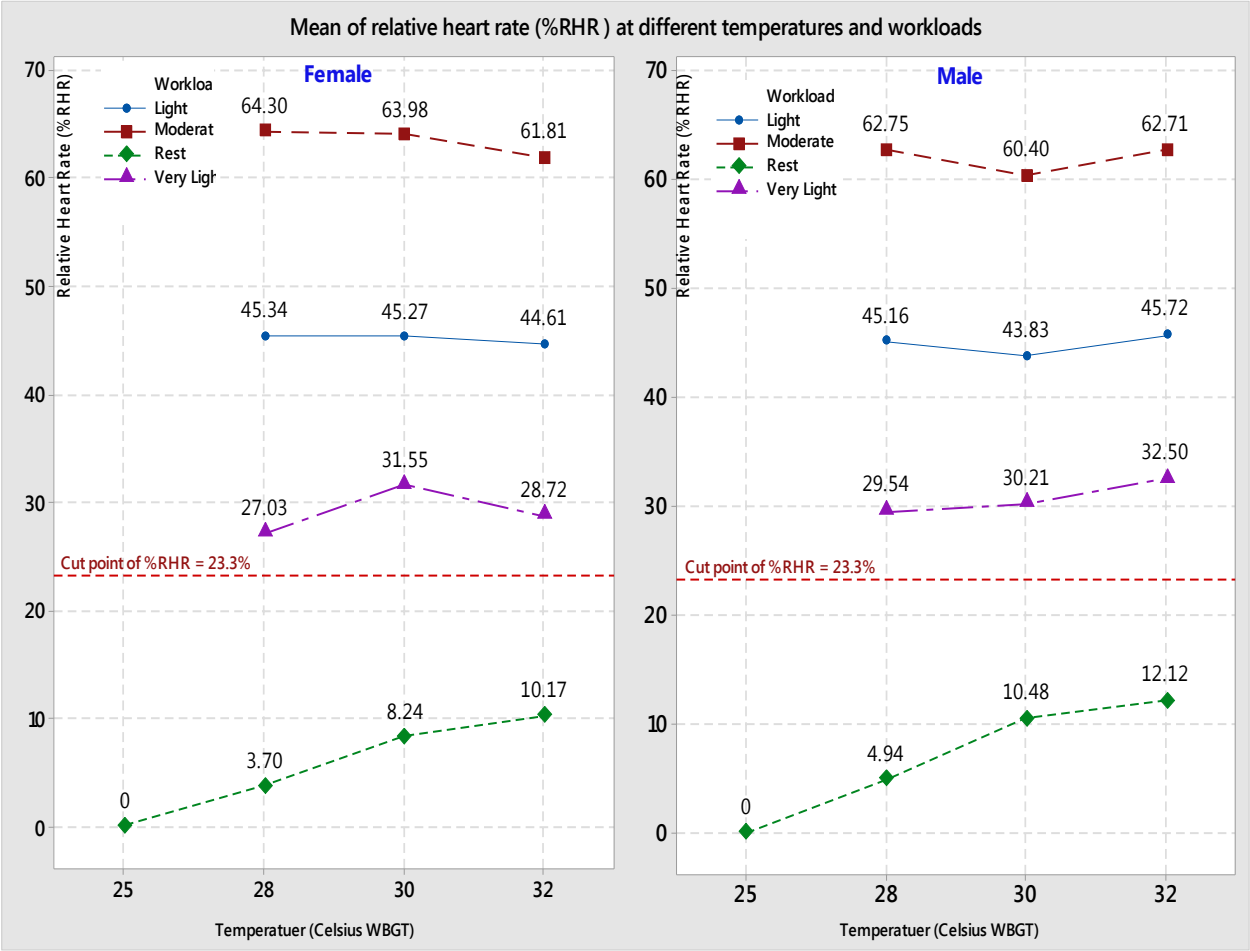
จากการศึกษายังพบอีกว่าภาระทางความร้อนที่เพิ่มขึ้นและระดับภาระงานที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการเต้นหัวใจและอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์สูงขึ้นและมีความแตกต่างกันระหว่างเพศหญิงและเพศชายอย่างมีนัยสำคัญ (P-value น้อยกว่า 0.001) ดังแสดงในรูปที่ 7.12 สำหรับค่าอัตราการเต้นหัวใจที่ภาระทางความร้อนและระดับงานต่าง ๆ พบว่าเพศชายมีค่าสูงกว่าเพศหญิงอย่างนัยสำคัญ (P-value น้อยกว่า 0.009) แต่พบว่าค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพันธ์ (%RHR) ที่อุณหภูมิและระดับภาระงานระหว่างเพศหญิงและชายไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P-value เท่ากับ 0.482)

จากผลการศึกษาครั้งนี้พบว่าการกำหนดระดับภาระงานด้วยการอ้างอิงค่าอัตราการเต้นหัวใจสูงสุด (maximum heart rate, MRH) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในทางการกีฬานั้นอาจจะไม่เหมาะสมต่อการกำหนดภาระงานสำหรับการทำงานในที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ในทุกระดับภาระงาน (เบามาก เบา และปานกลาง) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์เกินเกณฑ์ความปลอดภัยทางสรีรวิทยาของการทำงาน

8 ชั่วโมงต่อวันแม้ว่าจะเป็นภาระงานเบามาก ดังนั้น ภาระงานเบามากที่ 50-60% ของอัตราการเต้นหัวใจสูงสุด (NES และคณะ, 2012) อาจจะเป็นภาระงานที่หนักเกินไปสำหรับเด็กที่ต้องทำงานตลอด 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 28 °C WBGT) ค่านี้จึงน่าจะเป็นค่าที่เหมาะสมจะนำมาใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานสำหรับเด็ก และการกำหนดภาระงานควรกำหนดเป็นค่าอัตราการเต้นหัวใจสำรอง (reserved heart rate) ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างค่าอัตราการเต้นหัวใจสูงสุดกับอัตราการเต้นหัวใจขณะพักที่อุณหภูมิปกติ (สำหรับงานวิจัยครั้งนี้อ้างอิงอุณหภูมิปกติที่ 25 °C WBGT) ที่สามารถเชื่อมโยงถึงสมรรถภาพทางกายของเด็กและในขณะเดียวกันก็เป็นค่าที่ใช้ตามเกณฑ์ทางสรีรวิทยา โดยปกติเด็กที่มีสมรรถภาพทางกายดีมากหรือนักกีฬาจะมีค่าอัตราการเต้นหัวใจขณะพักที่ต่ำกว่าเด็กปกติหรือเด็กที่ไม่ค่อยได้ออกกำลัง (หรือสุขภาพไม่ดี) จึงทำให้ค่าอัตราการเต้นหัวใจสำรองในเด็กที่มีสมรรถภาพทางกายดีมีค่าสูงกว่าในเด็กที่มีสมรรถภาพทางกายไม่ดี การศึกษานี้จึงเสนอให้กำหนดความระดับภาระงานทางความร้อนสำหรับเด็กด้วยค่าอัตราการเต้นใจสัมพัทธ์ ซึ่งต้องไม่เกิน 23.3% (Wu และ Wang, 2002)



รูปที่ 7.11 ค่าเฉลี่ยอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ (%RHR) ที่อุณหภูมิและระดับภาระงานต่าง ๆ รวมทั้งอาสาสมัครหญิงและชาย

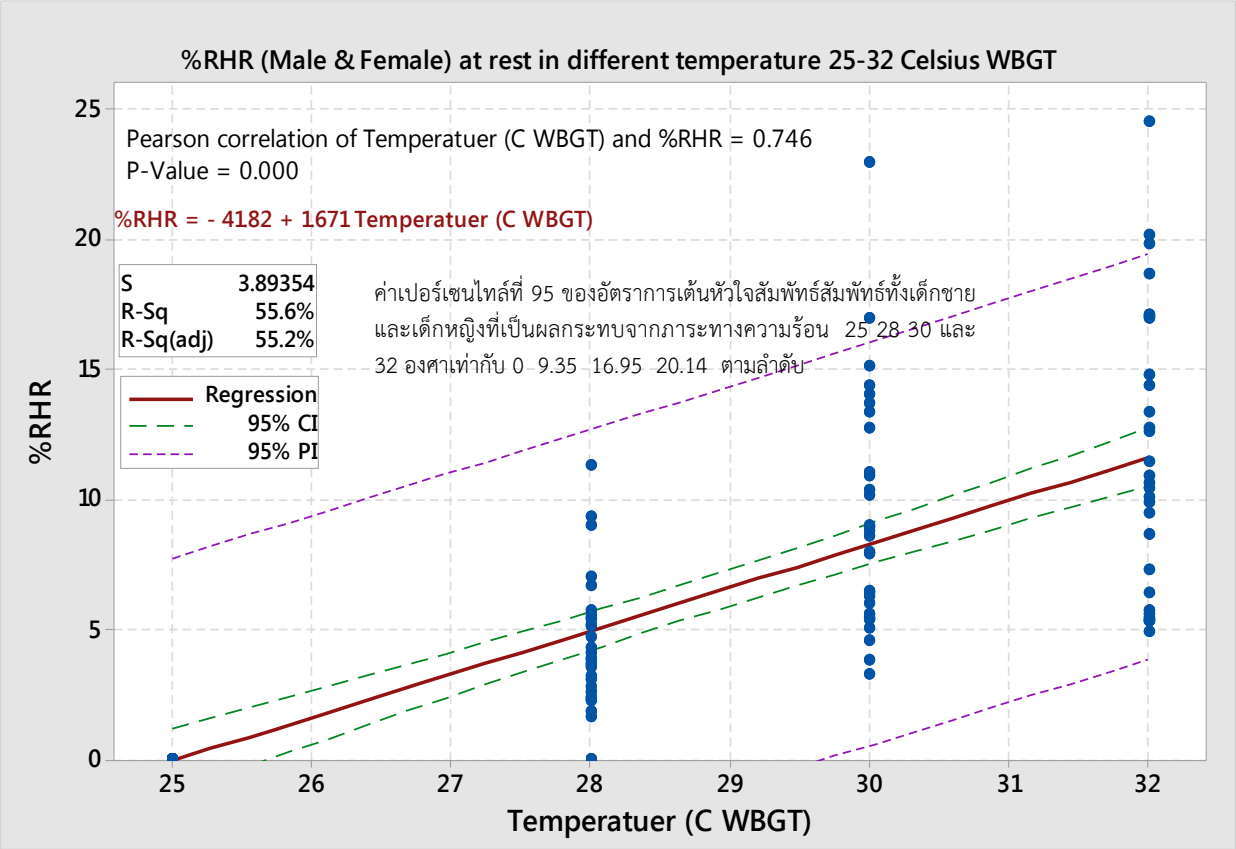


รูปที่ 7.12 ค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพันธ์ (%RHR) ที่อุณหภูมิและระดับภาระงานต่าง ๆ แยกกลุ่มอาสาสมัครหญิงและชาย

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์พบว่ามีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรง (รูปที่ 7.13) มีค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 0.746 และสมการเส้นตรงที่ได้มีความชันที่ 1.671 หรืออาจกล่าวได้ว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 1 องศา จะมีผลต่อการเพิ่มของค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ 1.67% เมื่อพิจารณาระดับความปลอดภัยของกลุ่มอาสาสมัครที่ 95% หรือจำนวนอาสาสมัครร้อยละ 95 อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยทางสรีรวิทยาสามารถพิจารณาจะหาได้จากค่าเปอร์เซ็นไทล์ที่ 95 ของอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์สัมพัทธ์ของทั้งเด็กชายและเด็กหญิงที่เป็นผลกระทบจากภาระทางความร้อนที่อุณหภูมิ WBGT ที่ 25 28 30 และ 32 องศาเซลเซียสซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 9.35 16.95 20.14 ตามลำดับ และเมื่อเทียบกับเกณฑ์ความปลอดภัยทางสรีรวิทยาแล้วพบว่ามีค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ที่จะสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิWBGT ที่ 25 28 30 และ 32 องศาเซลเซียสเท่ากับ 23.3% 13.95% 6.35% และ 3.16% ตามลำดับ

จากข้อมูลค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ที่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ 32 องศาเซลเซียสมีค่าเพียง 3.16% หากเด็กคนหนึ่งอายุ 15 ปี ค่าอัตราการเต้นหัวใจสูงสุดสำหรับเด็กอายุดังกล่าวจะอยู่ที่ 202 ครั้งต่อนาที จากข้อมูลของการศึกษาครั้งนี้ พบว่าค่าเฉลี่ยของอัตราการเต้นหัวใจขณะพักของเด็กหญิงอยู่ที่ 80 ครั้งต่อนาที จะมีค่าอัตราการเต้นหัวใจสำรองเท่ากับ 202 -80 = 122 ครั้งต่อนาที

ค่า 3.16% ของอัตราการเต้นหัวใจสำรองเท่ากับ 122 x .0316 = 3.85 หรือประมาณ 4 ครั้งต่อนาที ดังนั้นเด็กคนนี้จะสามารถทำงานที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียสได้โดยที่อัตราการเต้นหัวใจต้องไม่เกินค่า 80 + 4 = 84 ครั้งต่อนาที ซึ่งถือว่าน้อยมาก

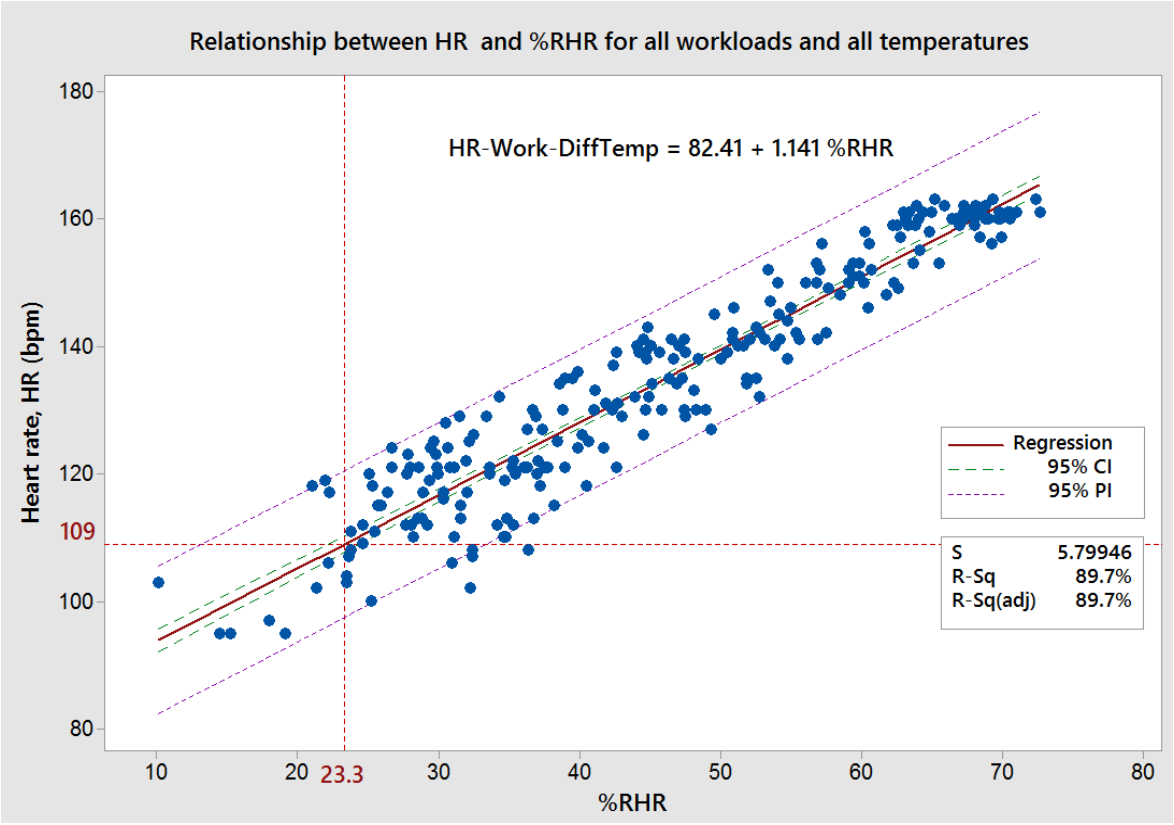


รูปที่ 7.13 สมการเชิงเส้นตรงเพื่อใช้ทำนายผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ (%RHR) ของกลุ่มอาสาสมัครทั้งหญิงและชายขณะพักที่สภาวะอุณหภูมิ WBGT ที่ 25 28 30 และ 32 ^{O}C

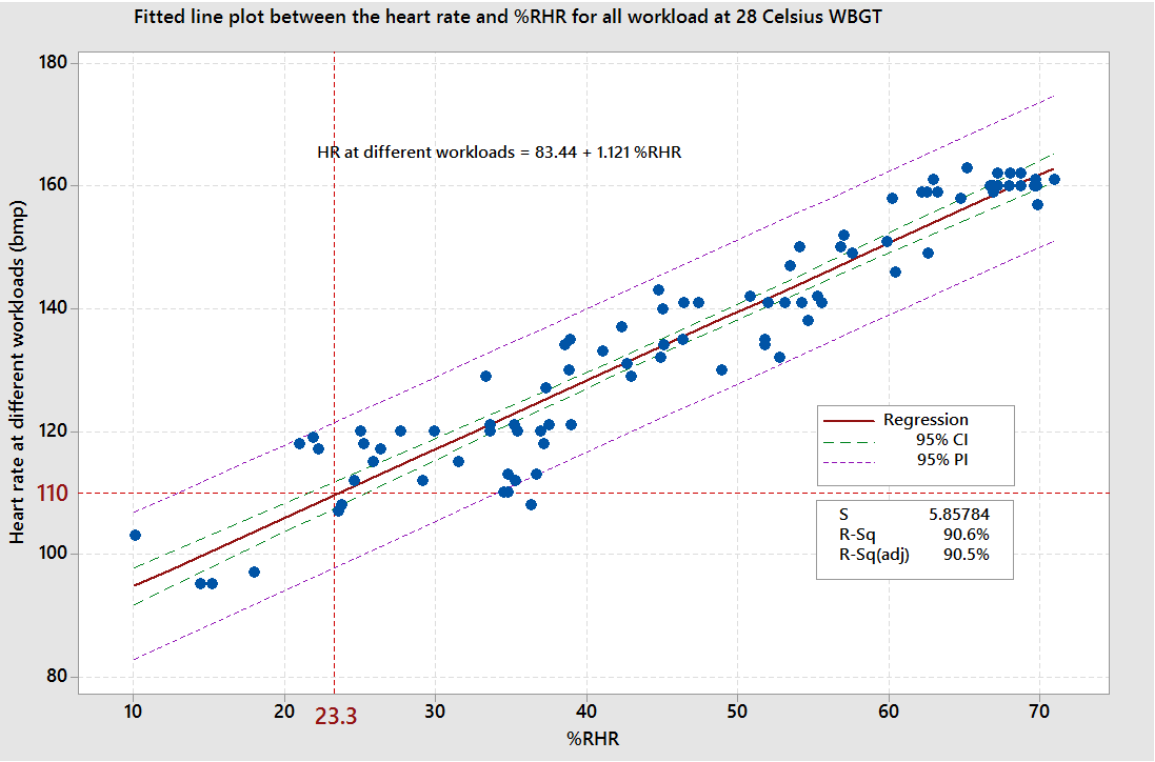
โดยปกติการเปลี่ยนแปลงจากท่านั่งมาเป็นยืนก็ส่งผลให้ร่างกายมีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการเต้นหัวใจของเด็กมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นที่ประมาณ 5-10 ครั้งต่อนาที ซึ่งอัตราการเต้นของหัวใจดังกล่าวจะเกินเกณฑ์การใช้พลังงานที่เหมาะสม (23.3 %RHR) เนื่องจากเป็นจุดที่จะเริ่มส่งผลต่อการสะสมความล้าของของร่างกาย ดังนั้นจึงเป็นไปไม่ได้ที่เด็กคนนี้จะทำงานที่อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ 32 องศาเซลเซียส ตลอด 8 ชั่วโมงต่อวัน ด้วยเหตุนี้จึงไม่แนะนำให้เด็กทำงานที่อุณหภูมิ 32 องศานี้ ส่วนการทำงานที่อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ 25 28 และ 30 องศาเซลเซียส ยังสามารถทำได้แต่ต้องไม่เกินภาระงานที่กำหนดไว้ตามคำแนะนำในตารางที่ 7.16 การกำหนดระดับภาระงานที่เหมาะสมนอกจากจะพิจารณาจากค่าเปอร์เซนไทล์แล้วยังสามารถอธิบายได้ด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเต้นหัวใจและค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ดังแสดงในรูปที่ 7.14 ซึ่งเมื่อแทนค่าสัดส่วนของอัตราการเต้นหัวใจสำรองที่ได้จากข้างต้นพบว่ามีความสอดคล้องกันดังแสดงสรุปคำแนะนำไว้ในตารางที่ 7.16 และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเต้นหัวใจและค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์แยกตามระดับของอุณหภูมิการทดสอบดังแสดงใน รูปที่ 7.15 ถึง รูปที่ 7.17 ก็พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ระหว่าง 108-110 ครั้งต่อนาที

ตารางที่ 7.16 คำแนะนำในการทำงานของเด็กที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อพิจารณาจากสมการภาระทางความร้อนในรูปที่ 7.13และเกณฑ์ทางสรีรวิทยา ที่เหมาะสมสำหรับเด็กสามารถทำงานได้ 8 ชั่วโมงต่อวัน โดยจะต้องมีระยะเวลาพักที่เหมาะสมระหว่าง 8 ชั่วโมง ระดับภาระงานนี้ยังสามารถประมาณได้จากสมการในรูปที่ 7.14

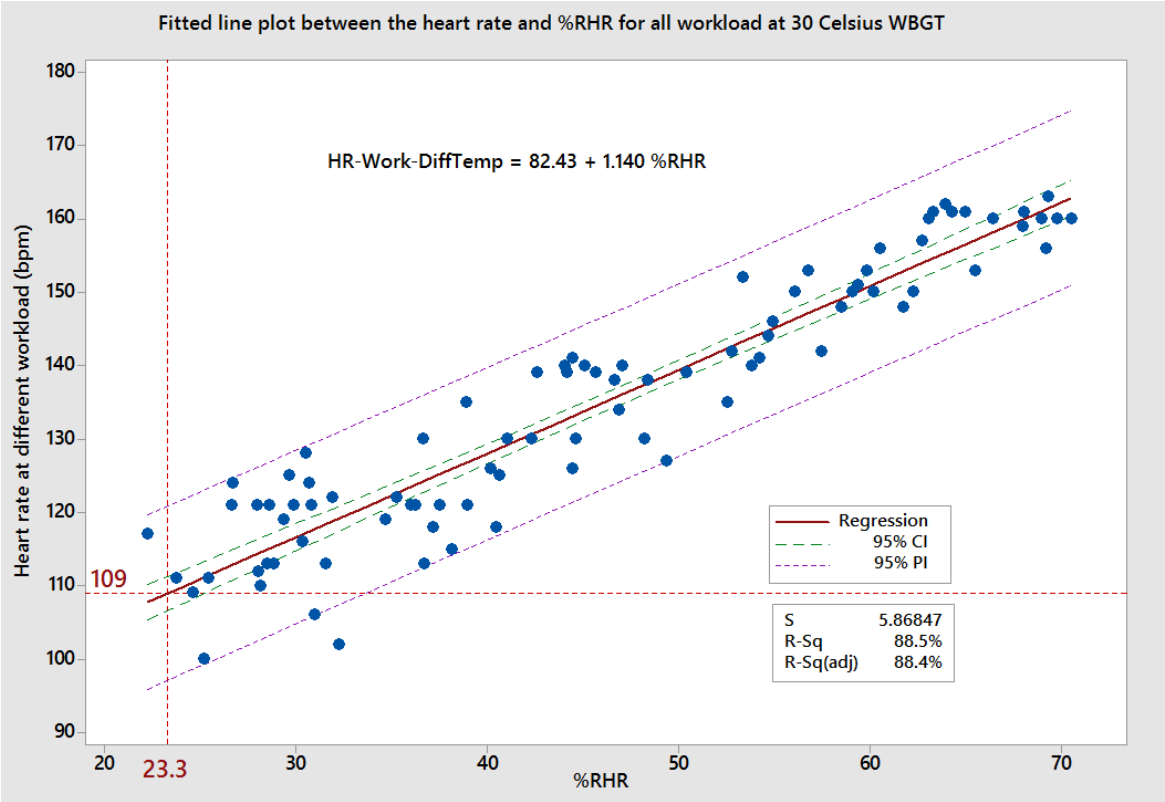
อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ (°C WBGT)	ระดับภาระงานที่ทำได้ร้อยละของอัตราการเต้นหัวใจสำรอง	คำแนะนำระดับภาระงานที่เหมาะสมกับอุณหภูมิระดับต่าง ๆ (อ้างอิงค่าอัตราการเต้นหัวใจขณะพักที่อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ 25 องศา ที่ 80 ครั้งต่อนาที)	ค่าระดับภาระงานที่คำนวณจากสมการในรูปที่ 7.14 (ครั้งต่อนาที)	เมื่อเทียบกับค่าอัตราการเต้นหัวใจสูงสุดที่ 201-202 ครั้งต่อนาที (%MHR)
25	23.3%	สามารถทำงานได้โดยมีระดับภาระงานไม่เกิน 23.3% ของอัตราการเต้นหัวใจสำรอง หรือมีอัตราการเต้นหัวใจเฉลี่ยไม่เกิน 108 ครั้งต่อนาที	108	53-54%
28	13.95%	สามารถทำงานได้โดยมีระดับภาระงานไม่เกิน 13.95% ของอัตราการเต้นหัวใจสำรอง ซึ่งต้องเป็นงานที่เบามาก ๆ อัตราการเต้นหัวใจโดยเฉลี่ยตลอดทั้งวันไม่เกิน 97 ครั้งต่อนาที	98	48-49%
30	6.35%	สามารถทำงานได้โดยมีระดับภาระงานไม่เกิน 6.35% ของอัตราการเต้นหัวใจสำรอง ซึ่งต้องเป็นงานที่เบามาก ๆ อัตราการเต้นหัวใจโดยเฉลี่ยตลอดทั้งวันไม่เกิน 87 ครั้งต่อนาที หากเกินกว่านี้อาจจะต้องมีระยะเวลาในการพักที่มากกว่าปกติ ซึ่งงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัด ในการหาเวลาพักและทำงานที่เหมาะสม	89	43-44%
32	3.16%	ไม่อนุญาตให้ทำงานที่สภาพอุณหภูมินี้ตลอดทั้งวัน (8 ชั่วโมง) เนื่องจากผลการศึกษาพบว่ามีเด็กจำนวนหนึ่งที่อาจได้รับอันตรายจากภาระงานทางความร้อนที่ทำให้ร่างกายมีการใช้อัตราการเต้นหัวใจสำรองของเด็กบางคนมีค่าเกือบถึง 23.3% แม้ว่าจะนั่งเฉย ๆ ในที่อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ อาจจะสามารถทำงานในระยะเวลาสั้น ๆ และมีการพักที่เหมาะสมเท่านั้น ซึ่งงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัด ในการหาเวลาพักและทำงานที่เหมาะสม	-	-



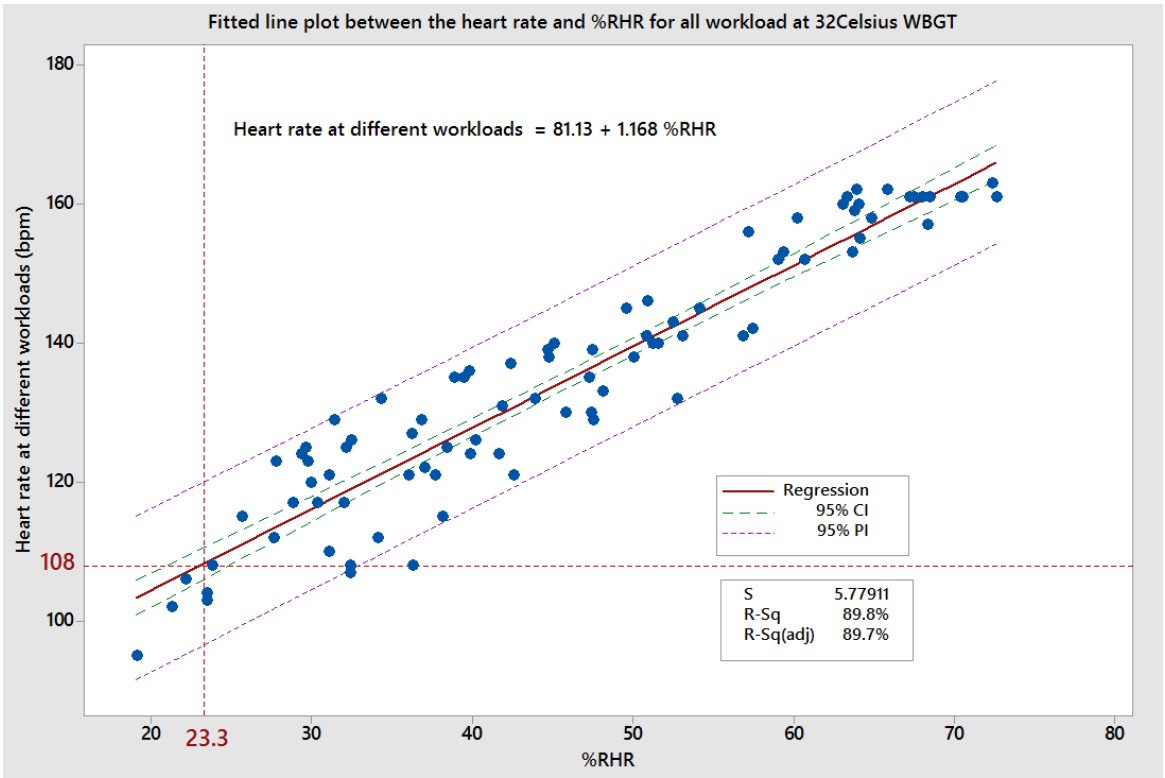
รูปที่ 7.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเต้นหัวใจและค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ (%RHR) ของเด็กอาสาสมัครทั้งหมดในทุกการทดลองของการศึกษาวิจัยครั้งนี้



รูปที่ 7.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเต้นหัวใจและค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ (%RHR) ในสภาวะอุณหภูมิ 28 องศา ของเด็กอาสาสมัครทั้งหมดในทุกระดับภาระงาน



รูปที่ 7.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเต้นหัวใจและค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ (%RHR) ในสภาวะอุณหภูมิ 30 องศา ของเด็กอาสาสมัครทั้งหมดในทุกระดับภาระงาน



รูปที่ 7.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเต้นหัวใจและค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ (%RHR) ในสภาวะอุณหภูมิ 32 องศา ของเด็กอาสาสมัครทั้งหมดในทุกระดับภาระงาน

7.7.6 ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบและค่าน้ำหนักถ่วงบนจักรยานวัดงาน

การศึกษาครั้งนี้กำหนดระดับงานที่ใช้ในการทดสอบจากค่าอัตราหัวใจสูงสุดดังแสดงในตารางที่ 7.1 เมื่ออาสาสมัครที่เข้าร่วมการทดลองปั่นจักรยานจนค่าอัตราการเต้นหัวใจถึงเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในแต่ละระดับภาระงานตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 7.1 จะหยุดการทดสอบ และในระหว่างการทดสอบมีบันทึกระยะเวลา (นาที) ตั้งแต่เริ่มต้นปั่นจักรยานจนอัตราการเต้นหัวใจถึงระดับที่กำหนดไว้ รวมถึงบันทึกค่าน้ำหนักถ่วงสุดท้ายบนจักรยาน (วัตต์) ด้วยเช่นกัน จากผลการศึกษาครั้งนี้พบว่าที่ระดับภาระงานเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบและค่าน้ำหนักถ่วงสุดท้ายบนจักรยานจะมีค่าน้อยลง (รูปที่ 7.18 และรูปที่ 7.19) โดยพบว่าในห้องทดสอบที่อุณหภูมิ WBGT 28 องศาเซลเซียส เวลาเฉลี่ยที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 6.10 นาที ที่ระดับภาระงานเบามาก 9.40 นาที ที่ระดับภาระงานเบา และ 12.90 นาที ที่ระดับภาระงานปานกลาง ในห้องทดสอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลาเฉลี่ยที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 5.20 นาที ที่ระดับภาระงานเบามาก 7.90 นาที ที่ระดับภาระงานเบา และ 11.10 นาที ที่ระดับภาระงานปานกลาง ส่วนในห้องทดสอบที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส เวลาเฉลี่ยที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 4.60 นาที ที่ระดับภาระงานเบามาก, 7.50 นาที ที่ระดับภาระงานเบา, 10.40 ที่ระดับภาระงานปานกลาง ดังค่าทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 7.17 ส่วนตารางที่ 7.18 เป็นค่าทางสถิติของระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ (นาที) และน้ำหนักถ่วงบนจักรยานวัดงาน (วัตต์) ที่จำแนกตามอุณหภูมิ เพศ และระดับภาระงาน

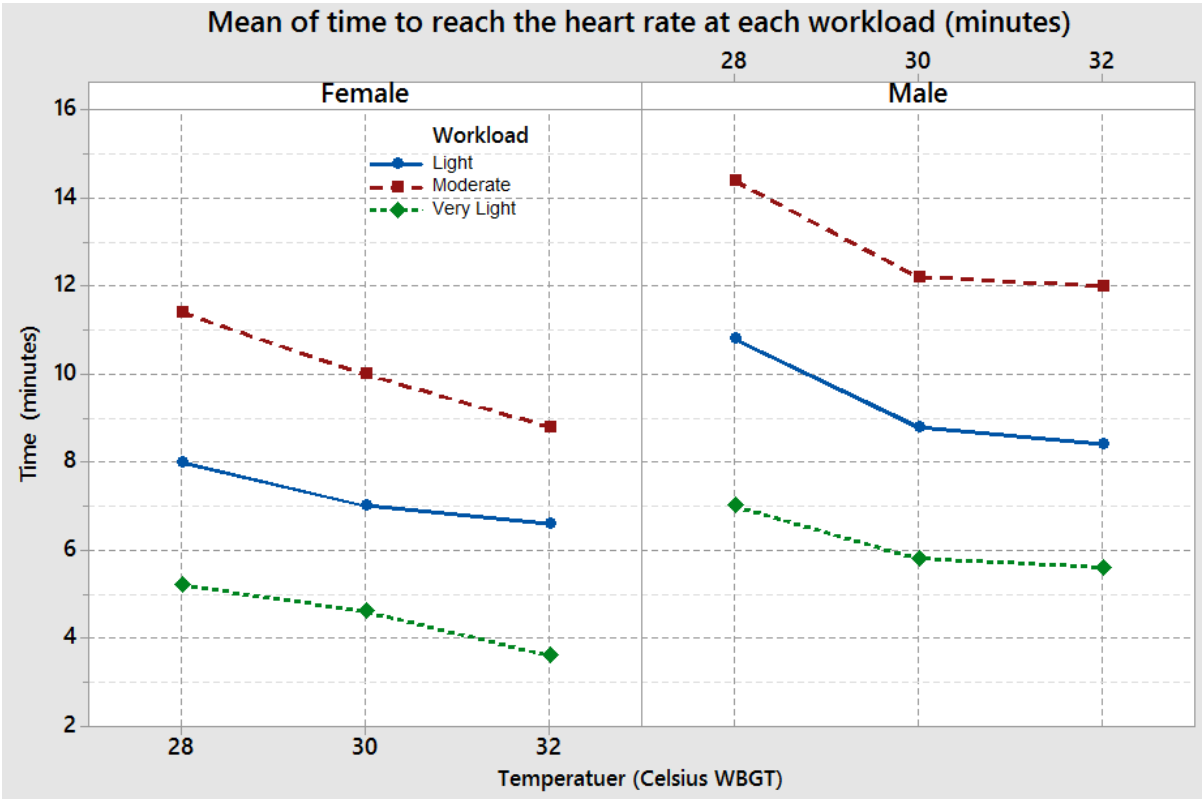
จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบของอาสาสมัครเพศหญิงและเพศชายมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน (P-value น้อยกว่า 0.001) และพบอีกว่าอุณหภูมิและระดับภาระงานที่สูงขึ้นส่งผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (P-value น้อยกว่า 0.001) ซึ่งกราฟในรูปที่ 7.18 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระยะเวลาในการทดสอบลดลง อาสาสมัครเด็กหญิงจะมีระยะเวลาสั้นกว่าเด็กชาย ซึ่งเป็นไปได้ว่าการตอบสนองทางสรีรวิทยาต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อเพศหญิงได้เร็วกว่าเพศชาย ที่อาจอนุมานได้ว่าเด็กหญิงจะมีความเสี่ยงมากกว่าเด็กชายเมื่อต้องทำงานในสภาพอุณหภูมิเดียวกัน ส่วนระดับภาระงานที่สูงขึ้นก็ส่งผลให้ระยะเวลาในการทดสอบลดลงและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่แต่ระดับภาระงาน (P-value น้อยกว่า 0.001)อาจยกไปไว้ในหัวข้อถัดไปจะสอดคล้องกว่า

ตารางที่ 7.17 ค่าต่ำสุด (Min) ค่าสูงสุด (Max) ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของระยะเวลาที่ใช้ทดสอบ (นาที) และน้ำหนักถ่วงบนจักรยานวัดงาน (วัตต์) ของอาสาสมัครทั้งชายและหญิง

อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ (°C WBGT)	ระดับภาระงาน * (ครั้ง/นาที)	ภาระงานบนจักรงานวัดงานที่ใช้ทดสอบ (วัตต์)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ทดสอบ (นาที)			
		Min	Max	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD
28°C	เบามาก (101 – 122)	0	75	25.8	17.9	3	12	6.1	2.2
	เบา (123 – 142)	0	100	53.3	22.4	3	15	9.4	2.7
	ปานกลาง (143 – 162)	25	125	82.5	25.5	6	18	12.9	3.1
30°C	เบามาก (101 – 122)	0	50	18.3	17.3	3	9	5.2	2.1
	เบา (123 – 142)	0	75	40.8	19.1	3	12	7.9	2.3
	ปานกลาง (143 – 162)	25	125	67.5	23.8	6	18	11.1	2.9
32°C	เบามาก (101 – 122)	0	75	13.3	20.5	3	12	4.6	2.5
	เบา (123 – 142)	0	100	37.5	20.5	3	15	7.5	2.5
	ปานกลาง (143 – 162)	25	125	61.6	26.0	6	18	10.4	3.1

ตารางที่ 7.18 ค่าต่ำสุด (Min) ค่าสูงสุด (Max) ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ (นาที) แยกตาม เพศ ระดับภาระงาน และ อุณหภูมิของการทดสอบ

อุณหภูมิ (°C WBGT)	เพศ	ระดับภาระงาน (workload)											
		เบามาก				เบา				ปานกลาง			
		Min	Max	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD
28	หญิง	3	9	5.2	1.78	3	12	8.0	2.17	6	15	11.4	2.59
	ชาย	3	12	7.0	2.17	6	15	10.8	2.48	9	18	14.4	2.82
	รวม	3	12	6.1	2.16	3	15	9.4	2.70	6	18	12.9	3.07
30	หญิง	3	6	4.6	1.54	3	9	7.0	2.17	6	15	10.0	2.93
	ชาย	3	9	5.8	2.40	6	12	8.8	2.11	9	18	12.2	2.4
	รวม	3	9	5.2	2.07	3	12	7.9	2.30	6	18	11.1	2.86
32	หญิง	3	6	3.6	1.24	3	9	6.6	1.68	9	12	8.8	2.4
	ชาย	3	12	5.6	2.97	6	15	8.4	2.82	6	18	12.0	3.0
	รวม	3	12	4.6	2.46	3	15	7.5	2.46	6	18	10.4	3.13



รูปที่ 7.18 ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบบนจักรยานวัดงานลดลง เมื่ออุณหภูมิในห้องทดสอบเพิ่มขึ้น โดยเด็กหญิงมีระยะเวลาที่สั้นกว่าเด็กชายอย่างมีนัยสำคัญในทุกระดับงาน (P-value น้อยกว่า 0.001)

ในส่วนของระดับภาระงานพบว่าระดับภาระงานที่สูงขึ้นก็ส่งผลให้ระยะเวลาในการทดสอบลดลงและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่แต่ระดับภาระงาน (P-value น้อยกว่า 0.001) ยกมาจากย่อหน้าก่อนหน้า ซึ่งก็สอดคล้องกับการศึกษาของ Kitti และ Kamiel (1993) ด้วยเหตุนี้การกำหนดลักษณะงานและขีดจำกัดที่เหมาะสมจำเป็นต้องกำหนดทั้งระดับภาระงานควบคู่ไปกับอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมการทำงาน แต่อย่างไรก็ตาม ภาระงานไม่ควรกำหนดจากการอ้างอิงค่าอัตราการเต้นหัวใจสูงสุดเพราะค่านี้ไม่ได้สะท้อนสมรรถภาพทางกาย แต่ควรจะกำหนดจากลักษณะของภาระงานภายนอกร่วมกับค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์

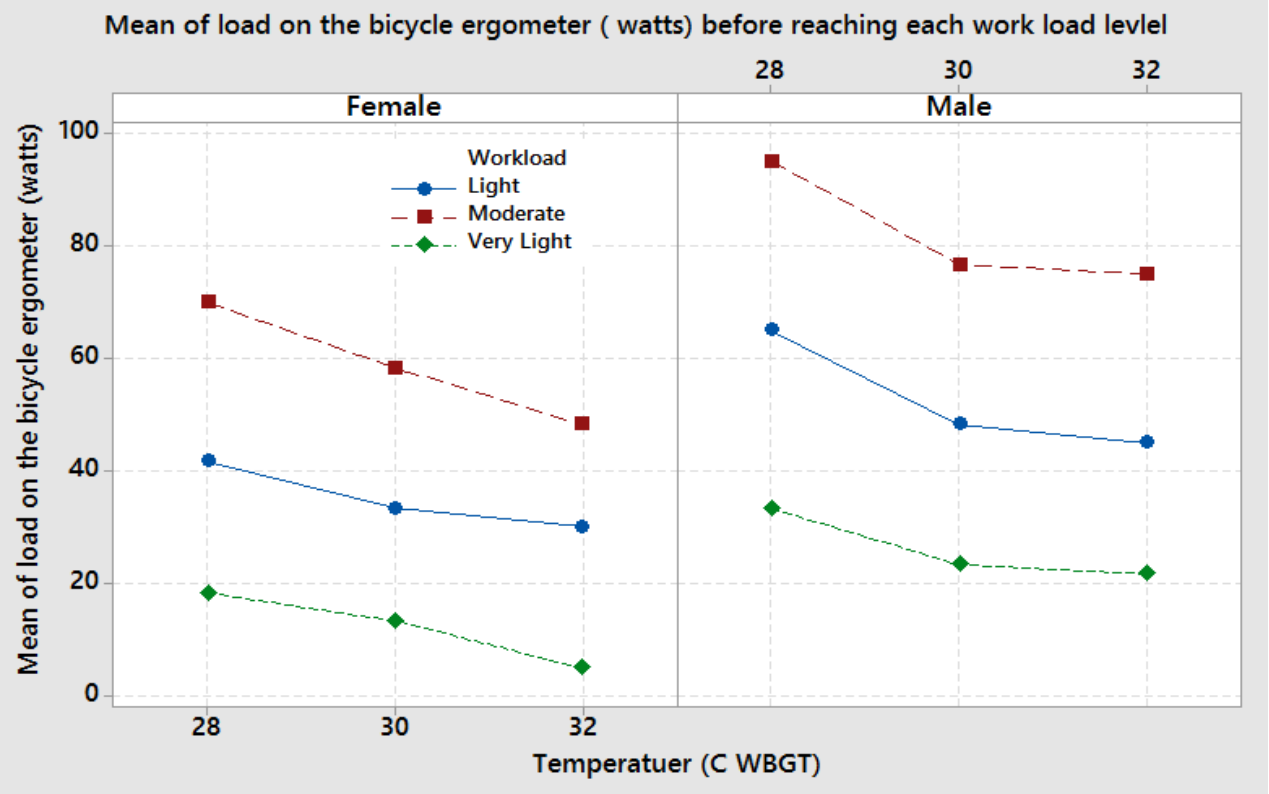
ค่าน้ำหนักถ่วงบนจักรยานวัดงานที่ใช้ในการทดสอบนี้เปรียบเสมือนงานภายนอกที่อาสาสมัครทำ โดย 1 วัตต์บนจักรยานจะมีค่าเท่า 1 จูลต่อวินาที หรือ 60 จูลต่อนาที หรือ 60 นิวตันเมตรต่อนาที ถ้าจะอธิบายเทียบกับการยกของก็เท่ากับงานที่ได้จากการยกของหนักประมาณ 6 กิโลกรัมเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 1 เมตรในเวลา 1 นาที จากผลการศึกษาในครั้งนี้พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ค่าน้ำหนักถ่วงบนจักรยานที่ใช้ในการทดสอบจะลดน้อยลงตามลำดับ (ตารางที่ 7.19 และ รูปที่ 7.19) โดยในห้องทดสอบที่อุณหภูมิ WBGT 28 องศาเซลเซียส ค่าน้ำหนักถ่วงบนจักรยานเฉลี่ยที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 25.8 วัตต์ ที่ระดับภาระงานเบามาก 53.3 วัตต์ ที่ระดับภาระงานเบา และ 82.5 วัตต์ ที่ระดับภาระงานปานกลาง ในห้องทดสอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าน้ำหนักถ่วงบนจักรยานเฉลี่ยที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 18.33 วัตต์ ที่ระดับภาระงานเบามาก 40.8 วัตต์ ที่ระดับภาระงานเบา และ 67.5 วัตต์ ที่ระดับภาระงานปานกลาง และในห้องทดสอบที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส ค่าน้ำหนักถ่วงบนจักรยานเฉลี่ยที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 13.3 วัตต์ ที่ระดับภาระงานเบามาก 37.5 วัตต์ ที่ระดับภาระงานเบา 61.6 วัตต์ ที่ระดับภาระงานปานกลาง

ตารางที่ 7.19 ค่าต่ำสุด (Min) ค่าสูงสุด (Max) ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของน้ำหนักถ่วงบนจักรยานวัดงาน (วัตต์) ที่ใช้ในการทดสอบ แยกตาม เพศ ระดับภาระงาน และ อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบของการทดสอบ

อุณหภูมิ °C WBGT	เพศ	ระดับภาระงานที่กำหนดจากอัตราการเต้นหัวใจสูงสุด											
		เบามาก				เบา				ปานกลาง			
		Min	Max	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD
28	หญิง	0	50	18.3	14.84	0	75	41.7	18.09	25	75	70.0	21.55
	ชาย	0	75	33.3	18.09	25	100	65.0	20.70	50	125	95.0	23.53
	รวม	0	75	25.8	17.96	0	100	53.3	22.49	25	125	82.5	25.55
30	หญิง	0	25	13.3	12.91	0	50	33.3	18.09	25	75	58.3	24.40
	ชาย	0	50	23.3	19.97	25	75	48.3	17.59	50	125	76.7	19.97
	รวม	0	50	18.3	17.29	0	75	40.8	19.12	25	125	67.5	23.81
32	หญิง	0	25	5.0	10.35	0	50	30.0	14.02	25	75	48.3	19.97
	ชาย	0	75	21.7	24.76	25	100	45.0	23.53	50	125	75.0	25.0
	รวม	0	75	13.3	20.48	0	100	37.5	20.50	25	125	61.7	26.04

จากการทดสอบทางสถิติพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าน้ำหนักถ่วงบนจักรยานวัดงานมีค่าลดลงในทุกระดับภาระงานที่กำหนดและมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนหรือมีนัยสำคัญ (P-value น้อยกว่า 0.001) ทั้งในกลุ่มอาสาสมัครหญิงและชาย ซึ่งอธิบายได้ในลักษณะเดียวกับระยะเวลาคืออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลต่อภาระงานทางสรีรวิทยาของร่างกายที่สูงขึ้น อัตราการเต้นหัวใจเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากภาระทางความร้อน ดังนั้น

การทดสอบที่อุณหภูมิสูงขึ้นและปรับน้ำหนักถ่วงบนจักรยานเพียงเล็กน้อยก็ส่งผลให้อัตราการเต้นหัวใจเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและเข้าสู่เกณฑ์ภาระงานที่กำหนดไว้ โดยตารางที่ 7.19 แสดงค่าสูงสุด (Max) ค่าต่ำสุด (Min) ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของน้ำหนักถ่วงบนจักรยานที่ใช้ในการทดสอบ แยกตามอุณหภูมิ เพศ และระดับภาระงาน



รูปที่ 7.19 ค่าเฉลี่ยน้ำหนักถ่วงบนจักรยานวัดงาน แยกตามอุณหภูมิ ระดับภาระงาน และเพศ พบว่าเด็กหญิงมีค่าสูงกว่าเด็กชายอย่างมีนัยสำคัญในทุกระดับภาระงานงาน (P-value น้อยกว่า 0.001)

7.7.7 ผลการวิเคราะห์ค่าระดับความเหนื่อยจากคะแนน (Borg CR10) และคะแนนความเมื่อยล้า

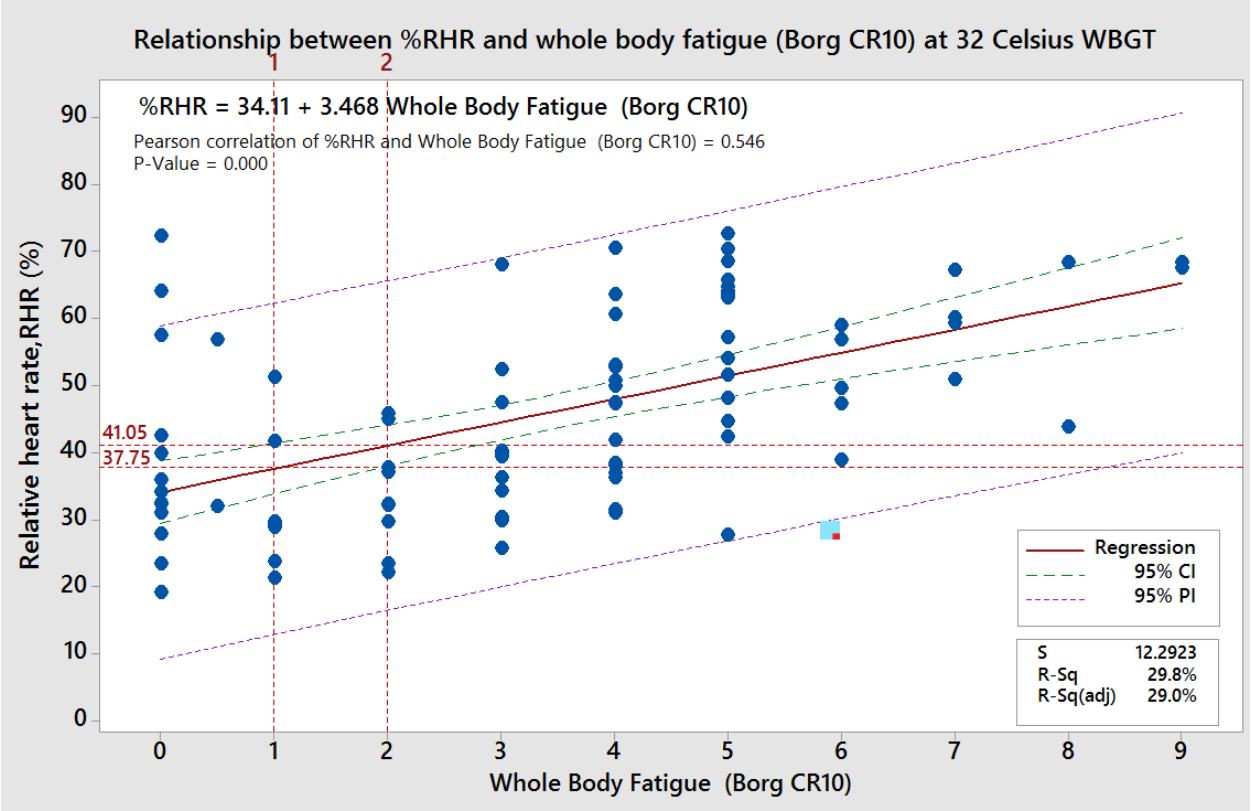
ระดับความรู้สึกเหนื่อยและเมื่อยล้าจากการทำงานเป็นวิธีการทางจิตฟิสิกส์ (psychophysics) ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 7.4.7 โดยอ้างอิงจาก W. Yi และคณะ (2016) ผลการวิเคราะห์ค่าคะแนนระดับความเหนื่อยและคะแนนความเมื่อยล้าเฉลี่ยของขาที่ใช้ในการปั่นจักรยานพบว่า ทั้งคะแนนความเหนื่อยและเมื่อยล้ามีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันและเพิ่มสูงขึ้นตามระดับภาระงานที่หนักขึ้น แต่เมื่อพิจารณาในระดับภาระงานเดียวกันค่าความเหนื่อยและความเมื่อยล้ามีแนวโน้มลดลง ตรงกันข้ามกับอุณหภูมิที่สูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 7.20

จากผลการศึกษาในครั้งนี้ พบว่าระดับความเหนื่อยล้า Borg CR10 มีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการเต้นหัวใจไม่มาก ผลการทดลองที่ระดับอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ 32 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.546 เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 7.20 นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อใช้เกณฑ์ที่อ้างอิงการเตือนอันตรายของการทำงานในที่ร้อนของ W. Yi และคณะ (2016) ที่ค่า Borg CR10 เท่ากับ 1-2 ซึ่งเป็นระดับความรู้สึกสบายในการทำงานนั้น ค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ (%RHR) ที่ได้มีอยู่ในช่วง 37.75 - 41.05% ซึ่งถือว่าสูงเกินกว่าเกณฑ์ทางสรีรวิทยามาก ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าการรับรู้สภาพความเหนื่อยล้าทางกายของเด็กอาจจะไม่เหมาะสมและไวพอต่อการตอบสนองทางสรีรวิทยาของร่างกาย เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ยังมีข้อจำกัดด้วยขนาดของกลุ่มประชากรและข้อมูลเปรียบเทียบกับผลการศึกษาอื่น ๆ อย่างไรก็ตามสิ่งหนึ่งที่ได้จากผลการศึกษาด้วย

วิธีการทางจิตฟิสิกส์คือการรอจนกระทั่งเด็กรู้สึกเหนื่อยอาจเป็นจุดที่ช้าเกินไปที่จะใช้เป็นเกณฑ์การเตือนภัยสำหรับเด็ก

ตารางที่ 7.20 ค่าเฉลี่ยคะแนน Borg's scale ความรู้สึกเหนื่อยล้าของร่างกาย และคะแนนความเมื่อยล้าขาขณะปั่นจักรยานวัดงาน เทียบกับค่าเฉลี่ยของอัตราการเต้นหัวใจและอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์หลังการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิและภาระงานต่างๆ กัน

อุณหภูมิ WBGT	ระดับภาระงาน	Borg's scale (0-10)	แปลผล Borg's scale	คะแนนความเมื่อยล้า (0-10)	อัตราการเต้นหัวใจหลังทดสอบ	%RHR
28°C	เบามาก	2.12	สบาย	1.93	113.13 ± 1.39	28.46
	เบา	3.52	เริ่มรู้สึกเหนื่อย	3.97	134.20 ± 1.21	45.53
	ปานกลาง	4.83	เหนื่อย	5.73	156.60 ± 1.04	63.92
30°C	เบามาก	1.62	สบาย	1.73	116.13 ± 1.17	31.07
	เบา	3.33	ปานกลาง	3.43	133.17 ± 1.33	44.82
	ปานกลาง	4.90	เหนื่อย	5.50	154.87 ± 1.11	62.57
32°C	เบามาก	1.62	สบาย	1.83	115.63 ± 1.65	30.80
	เบา	3.45	ปานกลาง	3.73	134.00 ± 1.17	45.45
	ปานกลาง	5.23	เหนื่อย	5.53	154.97 ± 1.50	62.65



รูปที่ 7.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ (%RHR) และค่าความรู้สึกเหนื่อยล้ามีความสัมพันธ์ไม่มาก

7.8 สรุปผลการศึกษาวิจัย

ค่าอัตราการเต้นของหัวใจสัมพัทธ์ (relative heart rate หรือ %RHR) จะแปรผันตรงกับความสามารถในการใช้ออกซิเจนสูงสุด (VO_2) ซึ่งเทียบได้กับความสามารถในการสร้างพลังงานของร่างกาย โดยมีคำแนะนำว่าตลอด 8 ชั่วโมงการทำงาน ควรจะมีการใช้พลังงานไม่เกิน 1/3 หรือ 33% ของความสามารถในการสร้างพลังงานสูงสุดของร่างกาย ซึ่งเกณฑ์นี้สามารถเทียบได้กับอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ (%RHR) ที่ 23.3% จากการศึกษาของ Wu และ Wang (2002) ได้อธิบายถึงเกณฑ์การใช้ค่าความสามารถในการใช้ออกซิเจนสูงสุดมีความแตกต่างจากการใช้เกณฑ์ค่าอัตราการเต้นของหัวใจสัมพัทธ์ เนื่องจากขณะพักค่าอัตราการเต้นของหัวใจและค่า VO_2 ไม่ได้มีค่าเป็นศูนย์ หากประมาณว่าขณะพักมีการใช้พลังงานที่ 1 MET (ค่าอัตราการใช้พลังงานพื้นฐานขณะพัก) ซึ่งคนปกติที่มีสุขภาพดีที่ไม่ใช่นักกีฬาและไม่ใช่บุคคลที่ผ่านการฝึกฝนทางกายมาจะมีความสามารถสูงสุดในการใช้พลังงานที่ประมาณ 10 MET ดังนั้นขณะพักจะประมาณได้ว่ามีการใช้พลังงานอยู่ที่ 10% ของ VO_2 max แต่ในขณะพักค่า %RHR จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นเกณฑ์ที่เหมาะสมกับค่าอัตราการเต้นของหัวใจสัมพัทธ์ที่จะใช้ในการพิจารณาการทำงานจึงควรอยู่ที่ 23.3% ซึ่งน้อยกว่าค่าของ %VO_2 max ลงมา 10%

การศึกษาครั้งนี้พบว่าภาระทางความร้อน (heat stress) ส่งผลต่อการตอบสนองทางสรีรวิทยาของร่างกายของอาสาสมัครที่เข้าร่วมการทดลอง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าอัตราการเต้นหัวใจสูงขึ้นอย่างชัดเจนและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญจากระดับอุณหภูมิ WBGT ที่ 25 28 30 และ 32 องศาเซลเซียส โดยพบว่าขณะพักนั่งนิ่ง ๆ ในห้องทดสอบที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นแต่ละระดับ ส่งผลให้อัตราการเต้นของหัวใจเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณ 2 – 6 ครั้งต่อนาที (รูปที่ 7.7) และเมื่อพิจารณาเป็นอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ (%RHR) จะอยู่ในช่วง 1.96 – 5.12 %RHR แต่เมื่อทดสอบด้วยการให้อาสาสมัครปั่นจักรยานตามเกณฑ์งานเบามาก งานเบา และงานปานกลางที่กำหนดไว้จากค่าอัตราการเต้นหัวใจสูงสุดตามตารางที่ 7.1 พบว่าทุก ๆระดับภาระงานมีค่า %RHR เพิ่มขึ้นเกิน 23.3% ในทุกอุณหภูมิการทดสอบ เมื่อพิจารณาจากเกณฑ์ความปลอดภัยทางสรีรวิทยาสำหรับการทำงาน 8 ชั่วโมงในการทำงานโดยมีระยะเวลาพักที่เหมาะสม จากตารางที่ 7.16 สรุปได้ดังนี้

อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ (°C WBGT)	ขีดจำกัดของอัตราการเต้นหัวใจ (ครั้งต่อนาที)	ขีดจำกัดค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ (%RHR)	ขีดจำกัดเมื่อเทียบกับค่าอัตราการเต้นหัวใจสูงสุด (%MHR)	คำแนะนำระดับภาระงานที่เหมาะสมกับอุณหภูมิระดับต่าง ๆ (อ้างอิงค่าอัตราการเต้นหัวใจขณะพักที่อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ 25 องศา ที่ 80 ครั้งต่อนาที)
25	108	23.3%	53-54%	สามารถทำงานได้โดยมีระดับภาระงานไม่เกิน 23.3% ของอัตราการเต้นหัวใจสำรอง หรือมีอัตราการเต้นหัวใจเฉลี่ยไม่เกิน 108 ครั้งต่อนาที
28	98	13.95%	48-49%	สามารถทำงานได้โดยมีระดับภาระงานไม่เกิน 13.95% ของอัตราการเต้นหัวใจสำรอง ซึ่งต้องเป็นงานที่เบามาก ๆ อัตราการเต้นหัวใจโดยเฉลี่ยตลอดทั้งวันไม่เกิน 98 ครั้งต่อนาที

30	89	6.35%	43-44%	สามารถทำงานได้โดยมีระดับภาระงานไม่เกิน 6.35% ของอัตราการเต้นหัวใจสำรอง ซึ่งต้องเป็นงานที่เบามาก ๆ อัตราการเต้นหัวใจโดยเฉลี่ยตลอดทั้งวันไม่เกิน 89 ครั้งต่อนาที หากเกินกว่านี้อาจจะต้องมีระยะเวลาในการพักที่มากกว่าปกติ ซึ่งงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัด ในการหาเวลาพักและทำงานที่เหมาะสม

อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ (°C WBGT)	**ขีดจำกัดของอัตราการเต้นหัวใจ (ครั้งต่อนาที)**	**ขีดจำกัดค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ (%RHR)**	**ขีดจำกัดเมื่อเทียบกับค่าอัตราการเต้นหัวใจสูงสุด (%MHR)**	**คำแนะนำระดับภาระงานที่เหมาะสมกับอุณหภูมิระดับต่าง ๆ (อ้างอิงค่าอัตราการเต้นหัวใจขณะพักที่อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ 25 องศา ที่ 80 ครั้งต่อนาที)**
32	ไม่แนะนำให้ทำงานในสภาวะอุณหภูมินี้	ไม่แนะนำให้ทำงานในสภาวะอุณหภูมินี้	ไม่แนะนำให้ทำงานในสภาวะอุณหภูมินี้	ไม่แนะนำให้เด็กทำงานที่สภาวะอุณหภูมินี้ เนื่องจากผลการศึกษาพบว่ามีเด็กจำนวนหนึ่งที่อาจได้รับผลกระทบทางสุขภาพ ทั้งนี้จากผลการศึกษาพบว่าภาระทางความร้อนระดับนี้แม้ว่าจะเป็นการนั่งเฉย ๆ ก็ทำให้เด็กบางคนค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ (%RHR) เกือบถึงเกณฑ์ความปลอดภัยทางสรีรวิทยาที่ 23.3% ซึ่งอาจจะเกิดกับเด็กที่ไม่เคยชินต่อสภาพความร้อนหรือมีสุขภาพไม่แข็งแรง มีค่าอัตราการเต้นหัวใจสำรองต่ำ

7.9 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมสำหรับผู้บริหารพิจารณา

7.9.1 ควรให้มีการทบทวนอุณหภูมิสำหรับสภาวะแวดล้อมการทำงาน

จากกฎกระทรวงแรงงาน ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2541) ออกตามความในพระราชบัญญัติคุ้มครองแรงงาน พ.ศ. 2541 ซึ่งห้ามมิให้นายจ้างให้ลูกจ้างซึ่งเป็นเด็กอายุต่ำกว่าสิบแปดปีทำงานในที่ที่มีอุณหภูมิในสภาวะแวดล้อมในการทำงานสูงกว่า 45 องศาเซลเซียส ข้อกำหนดนี้ถือว่าไม่เหมาะสม ควรพิจารณาใช้ค่าดัชนีอุณหภูมิเวตบัลบ์-โกลบ (wet bulb globe temperature, WBGT) หน่วยเป็นองศาเซลเซียส เนื่องจากหน่วยวัดที่กำหนดไว้ 45 องศาเซลเซียส มีความไม่ชัดเจนว่าเป็นอุณหภูมิจากเครื่องมือวัดใด ถ้าหากหมายถึงอุณหภูมิของกระเปาะแห้ง (dry bulb temperature, T_d) ค่านี้ถือว่าสูงมากเพราะจากผลการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ค่าอุณหภูมิของกระเปาะแห้งเพียง 35 องศาเซลเซียส ก็อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของเด็กได้แล้ว และจากการทบทวนเอกสารทั้งมาตรฐานสากลระหว่างประเทศและงานวิจัยต่าง ๆ ยังพบว่าหน่วยวัดสภาวะแวดล้อมในงานที่มีความร้อนสูงจะวัดด้วยรูปแบบที่เรียกว่า ดัชนีอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ (wet bulb globe temperature, WBGT) หน่วยเป็นองศาเซลเซียส สะท้อนปัจจัยเสี่ยงได้มากกว่าทั้งในเรื่องความชื้น การแผ่รังสี และการไหลเวียนของอากาศ อีกทั้งยังเป็นมาตรฐานสากล ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 7.4.2

7.9.2 ควรปรับปรุงการกำหนดค่าอุณหภูมิที่ปลอดภัยสำหรับเด็กใหม่

ปัจจุบันกฎหมายและคำแนะนำต่าง ๆ เกี่ยวกับเด็กทำงานและข้อห้ามต่าง ๆ เกี่ยวกับการใช้แรงงานเด็กของกรมสวัสดิ์การและคุ้มครองแรงงาน มีข้อกำหนดห้ามเด็กทำงานในที่ร้อนแต่ยังไม่ได้มีเกณฑ์ที่ชัดเจนว่าความร้อนระดับใดที่เด็กสามารถทำได้และระดับใดที่เป็นอันตรายสำหรับเด็ก ซึ่งจากการศึกษาวิจัยในครั้ง

นี้พบว่าเด็กบางส่วนอาจได้รับผลกระทบทางด้านสุขภาพเมื่อต้องอยู่ในสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิเพียงเวตบัลบ์โกลบ 32 องศาเซลเซียส จึงเห็นควรให้ปรับรายละเอียดของกฎหมายดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

อุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ (°C WBGT)	ระดับภาระงานไม่เกินขีดจำกัดของอัตราการเต้นหัวใจ (ครั้งต่อนาที)	ระดับภาระงานไม่เกินขีดจำกัดค่าอัตราการเต้นหัวใจสัมพัทธ์ (%RHR)	ระดับภาระงานไม่เกินร้อยละของค่าอัตราการเต้นหัวใจสูงสุด (%MHR)
25	108	23.3%	53-54%
28	98	13.95%	48-49%
30	89	6.35%	43-44%
32	ไม่แนะนำให้ทำงานในสภาวะอุณหภูมินี้	ไม่แนะนำให้ทำงานในสภาวะอุณหภูมินี้	ไม่แนะนำให้ทำงานในสภาวะอุณหภูมินี้

7.9.3 ข้อจำกัดของงานวิจัยและแนวทางการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ให้ผลการศึกษาที่เป็นประโยชน์ต่อการพิจารณาหาขีดจำกัดและอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับสภาพแวดล้อมการทำงานสำหรับเด็ก แต่อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ ทำการทดสอบในกลุ่มอาสาสมัครกลุ่มเล็กในพื้นที่จุดเดียวของประเทศ นอกจากนี้รูปแบบการทดลองในครั้งนี้เป็นการศึกษาในระยะเวลาสั้น ๆ ประมาณ 3-18 นาที เพื่อความปลอดภัยของเด็กที่เข้าร่วมในการทดสอบในครั้งนี้ เนื่องจากการศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาในลักษณะการทดลองจริงเป็นครั้งแรกซึ่งยังมีข้อมูลในการอ้างอิงไม่มากนัก การนำผลการศึกษานี้ไปใช้ยังอาจมีข้อจำกัดและข้อควรระวังในเรื่องระยะเวลาในการทำงานของเด็กที่ต้องทำงานต่อเนื่องยาวนานหลายชั่วโมง รวมทั้งการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ใช้เครื่องวัดอัตราการเต้นหัวใจเป็นหลักซึ่งเป็นเครื่องมือที่วัดภาระงานทางสรีรวิทยาในทางอ้อมเนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องเวลาและงบประมาณ ดังนั้นจึงเสนอให้มีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตโดยให้ครอบคลุมเด็กในพื้นที่อื่น ๆ ของประเทศ ให้มีการใช้เครื่องมือในการวัดความสามารถในการใช้ออกซิเจนของร่างกายเพื่อให้ได้ข้อมูลภาระงานทางสรีรวิทยาที่แม่ยำมากขึ้นและให้การทำการทดลองติดตามผลกระทบเนื่องจากการทำงานที่มีระยะเวลาต่อเนื่องนานมากขึ้น จึงจะได้ข้อมูลอ้างอิงที่สมบูรณ์และเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

7.10 เอกสารอ้างอิง

การทดสอบสมรรถภาพทางกายนักกีฬาเยาวชนแห่งชาติและนักกีฬาแห่งชาติ (2549) กองสมรรถภาพการกีฬา ฝ่ายวิทยาศาสตร์การกีฬา การกีฬาแห่งประเทศไทย

กิตติ อินทรานนท์, เสรี สมนาแซง, พรเทพ ขอขจายเกียรติ, นิวิท เจริญใจ และ วราวุธ วรพุทธพร (2531) สัดส่วนร่างกายและความสามารถสูงสุดในการทำงาน ของกลุ่มประชากรอาชีพกสิกรรมและอุตสาหกรรม ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย, สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เกณฑ์มาตรฐานสมรรถภาพทางกายประชาชนไทย, ฝ่ายวิทยาศาสตร์การกีฬา การกีฬาแห่งประเทศไทย 2543