

อุณหภูมิผิวหนังและความรู้สึกเชิงความร้อน: การศึกษาเบื้องต้น สำหรับการพัฒนาแบบจำลองสภาวะนำสบายเชิงบุคคลที่อาศัย

การตอบสนองทางสรีรวิทยา

Skin Temperature and Thermal Sensation: A Preliminary Study for Development of Personal Comfort Model Based on Physiological Responses

กวีวรรณ อินทรชาธร*** ดารณี จารีมิตร* และ ศีตภา รุจิกเกียรติกำจร***

Kaweewan Intharachathorn*** Daranee Jareemit* and Sitapa Rujikietgumjorn***

Received: August 08, 2022

Revised: February 20, 2023

Accepted: March 01, 2023

บทคัดย่อ

สภาวะนำสบายภายในอาคารเป็นเป้าหมายที่สำคัญในการออกแบบอาคารและการจัดการในอาคารเนื่องจากมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อผู้ใช้อาคารในหลายมิติ แบบจำลองสภาวะนำสบายเชิงบุคคล (PCM) เป็นแนวทางใหม่ในการประเมินสภาวะนำสบายซึ่งมุ่งแก้ปัญหาความแตกต่างระหว่างบุคคลซึ่งเป็นข้อจำกัดของแบบจำลองดั้งเดิม PCM มุ่งที่จะทำนายสภาวะนำสบายของผู้ใช้อาคารแต่ละคนโดยอาศัยการตอบสนองโดยตรงจากผู้ใช้งาน ผิวหนังเป็นส่วนหนึ่งของร่างกายที่สำคัญในกลไกควบคุมอุณหภูมิ ดังนั้นอุณหภูมิผิวหนังจึงถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการศึกษาก่อนหน้า อย่างไรก็ตามการศึกษาก่อนหน้านี้เกี่ยวกับ PCM นี้ยังอยู่ในวงจำกัด ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอุณหภูมิผิวหนังไบหน้า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวหนัง และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวหนังไบหน้ากับความรับรู้เชิงความร้อนภายใต้สภาพอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเพื่อนำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองสภาวะนำสบายเชิงบุคคลที่อาศัยอุณหภูมิผิวหนังของผู้ใช้อาคารในสภาพอากาศร้อนชื้น การวิจัยนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลจากอาสาสมัครที่คุ้นชินกับสภาพอากาศร้อนชื้นภายในห้องทดลองที่มีการไล่ระดับอุณหภูมิระหว่าง 21 ถึง 29°C อุณหภูมิผิวหนังไบหน้าถูกรวบรวมด้วยกล้องอินฟราเรด ขณะที่ความรู้สึกเชิงความร้อนถูกสำรวจด้วยแบบสอบถาม ผลการศึกษาแสดงให้เห็นความสัมพันธ์กันระหว่างอุณหภูมิผิวหนังกับความรับรู้เชิงความร้อนซึ่งชี้ให้เห็นถึงแนวทางที่เหมาะสมในการพัฒนาแบบจำลองสภาวะนำสบายเชิงบุคคลในอนาคต

* คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12121 ประเทศไทย

** คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และศิลปกรรมสร้างสรรค์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 30000 ประเทศไทย

*** ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ปทุมธานี 12121 ประเทศไทย

* Faculty of Architecture and Planning, Thammasat University, Pathum Thani, 12121, Thailand

** Faculty of Architecture and Creative Arts, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

*** National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) , Pathum Thani, 12121, Thailand

Corresponding author E-mail: kaweeewani@gmail.com*, jdaranee@gmail.com**

Abstract

Indoor thermal comfort is an essential goal in building design and management, as it is of great importance to the building occupants in various dimensions. The Personal Comfort Model (PCM) is a new approach to assessing thermal comfort that aims to address individual differences, which are the limitations of traditional models. PCM aims to predict an individual's thermal comfort based on the direct response of occupant. The human skin is a significant part of the body in human thermoregulation, so skin temperature has been widely used in previous studies. However, studies on PCM are still limited. Therefore, the objective of this research is to study facial skin temperature, skin temperature variations, and analyze the relationship between facial skin temperature and thermal sensation under various temperature conditions. This led to the development of individual thermal comfort models based on the skin temperature of building users in hot and humid climates. The research data were collected from volunteers accustomed to hot and humid climates in a laboratory with temperature gradient between 21°C and 29°C. The facial skin temperature is collected with an infrared camera. Meanwhile, thermal sensations are surveyed using questionnaires. The results of the study demonstrated a correlation between skin temperature and thermal sensations that suggested an appropriate approach to developing a personalized comfort model in further studies.

คำสำคัญ: ภาวะหน้าสบาย ความรู้สึกเชิงความร้อน การตอบสนองทางสรีรวิทยา อุณหภูมิผิวหนังใบหน้า

Keywords: Thermal Comfort, Thermal Sensation, Physiological Responses, Facial Skin Temperature

บทนำ

ภาวะหน้าสบายภายในอาคารมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อของผู้ใช้อาคารในหลายมิติทั้งในเชิงสุขภาพและประสิทธิภาพการทำงาน (Mujan et al., 2019; Geng et al., 2017) จึงเป็นเป้าหมายที่สำคัญในการออกแบบอาคารและการจัดการในอาคาร ระบบปรับอากาศคือกลไกสำคัญในการปรับสภาพแวดล้อมเชิงความร้อนในอาคารให้หน้าสบาย แต่ในขณะเดียวกันกลับเป็นส่วนที่ใช้พลังงานมากที่สุดในระบบอาคาร ดังนั้นเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคารและความอยู่ดีของผู้ใช้งานจำเป็นต้องมีการควบคุมหรือการจัดการระบบปรับอากาศที่เหมาะสม และการประเมินภาวะหน้าสบายของผู้ใช้ขณะอยู่ในอาคารอย่างถูกต้องคือปัจจัยพื้นฐานสำคัญที่จะนำไปสู่การจัดการควบคุมที่เหมาะสมนี้

แบบจำลองทำนายโหวตเฉลี่ยหรือ PMV (Predicted Mean Vote) เป็นที่ยอมรับและถูกใช้อย่างแพร่หลายที่สุดสำหรับการประเมินภาวะหน้าสบาย (Fanger, 1970) ระบบอาคารโดยทั่วไปควบคุมการทำงานของระบบ HVAC โดยอาศัยแบบจำลอง PMV การกำหนดค่าอุณหภูมิตามแบบจำลอง PMV ซึ่งเป็นการทำนายค่าเฉลี่ยความรู้สึกของคนกลุ่มใหญ่จึงไม่ได้ตั้งค่าเพื่อตอบสนองความรู้สึกสบายแต่ละบุคคลแต่เป็นการมุ่งตอบสนองความต้องการของผู้ใช้โดยเฉลี่ย วิธีการนี้ละเลยต่อความแตกต่างของแต่ละบุคคลและเป็นปัจจัยสำคัญของความไม่พึงพอใจต่อสภาพแวดล้อมเชิงความร้อนในอาคาร ด้วยเหตุนี้หลายงานวิจัยไม่นานมานี้จึงมีเป้าหมายที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าว (Deng & Chen,

2020; Li et al., 2020) โดยมุ่งเน้นให้ระบบ HVAC และการควบคุมสามารถที่จะทำการเรียนรู้และการปรับแต่งด้วยตนเองเพื่อให้สภาพแวดล้อมทางความร้อนในอาคารตรงตามที่ต้องการ ซึ่งอาศัยวิธีการเรียนรู้สถานะนำสบายทางความร้อนของผู้ใช้แต่ละคนผ่านแบบจำลองสถานะนำสบายเชิงบุคคล โดยระบบจำเป็นต้องเรียนรู้สภาพทางความร้อนที่ผู้ใช้ต้องการแท้จริงจากการตอบสนองของผู้ใช้โดยตรง และปรับแต่งการทำงานโดยอัตโนมัติเพื่อให้เป็นไปตามที่ต้องการของผู้ใช้

แบบจำลองสถานะนำสบายเชิงบุคคล Personal Thermal Comfort Model หรือ PCM เป็นแนวทางใหม่ในการประเมินสถานะนำสบายซึ่งมุ่งที่จะประเมินสถานะนำสบายและความรู้สึกของผู้ใช้อาคารแต่ละคนแทนการทำนายค่าเฉลี่ยความรู้สึกของคนกลุ่มใหญ่ และรองรับในความแตกต่างของแต่ละบุคคล (Wang et al., 2018; Kim et al., 2018) วิธีปัญญาประดิษฐ์ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง PCM โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบอาคารอัตโนมัติเพื่อการควบคุมสภาพแวดล้อมในอาคารที่สอดคล้องกับความรู้สึกขณะใช้งานจริง ตัวอย่างเช่น Li et al. (2017) ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองสถานะนำสบายเชิงบุคคลที่พัฒนาจากข้อมูลสภาพแวดล้อมกับข้อมูลทางสรีรวิทยาและพฤติกรรมของมนุษย์ที่ได้จากอุปกรณ์สวมใส่ในการควบคุม HVAC เพื่อปรับปรุงความสบายทางความร้อนของผู้ใช้โดยความต้องการเชิงความร้อนของผู้ใช้ถูกประเมินอย่างต่อเนื่องเพื่อกำหนดตั้งค่า HVAC ที่เหมาะสม ส่วน Lu et al. (2019) ได้พัฒนาแบบจำลองทำนายความรู้สึกทางความร้อนแต่ละบุคคลที่เทรนด้วยข้อมูลอุณหภูมิผิวหนังและเสื้อผ้าที่ได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนและประยุกต์ใช้เฟรมเวิร์กสำหรับการบูรณาการระบบระบายความร้อนแบบส่วนบุคคลตามความสบายกับการทำงานของระบบรวมศูนย์ในอาคารสำนักงาน เป็นต้น

จากการทบทวนวรรณกรรมการตอบสนองของผู้ใช้โดยตรงซึ่งนำมาใช้เป็นข้อมูลในการเรียนรู้สำหรับการพัฒนาแบบจำลอง PCM อาจแบ่งได้ดังนี้ 1) การตอบสนองของผู้ใช้ทางร่างกาย เช่น อุณหภูมิผิวหนัง (Salehi et al., 2020; Chaudhuri et al., 2020) อัตราชีพจร (Chaudhuri et al., 2020) ความดันโลหิต (Chaudhuri et al., 2018) อัตราการเต้นของหัวใจ (Liu et al., 2019; Pigliatile et al., 2020) เป็นต้น 2) การตอบสนองทางพฤติกรรมของผู้ใช้ ได้แก่ การปรับเปลี่ยนเสื้อผ้า การปรับระดับอุณหภูมิ (Deng & Chen, 2018) ระดับการใช้อุปกรณ์ปรับความเย็นเฉพาะบุคคล (Katić et al., 2020) การปรับเปลี่ยนท่าทางร่างกาย (Yang et al., 2019) หรือ 3) ข้อเสนอแนะ (Feedback) ของผู้ใช้ (Pritoni et al., 2017) อย่างไรก็ตามการตอบสนองทางร่างกายของผู้ใช้โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิผิวหนังถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายที่สุดในการศึกษาก่อนหน้า เนื่องจากผิวหนังเป็นส่วนหนึ่งของร่างกายที่ปฏิสัมพันธ์โดยตรงกับสภาพแวดล้อมเชิงความร้อนภายนอกจึงเป็นตัวกลางสำคัญของกลไกควบคุมอุณหภูมิ Dai et al. (2017) ได้ศึกษาอุณหภูมิผิวหนังจากส่วนต่างๆ ของร่างกาย 13 ตำแหน่ง เช่น ศีรษะ มือ แขน หน้าอก หลัง ต้นขา หน้าแข้งและเท้า เพื่อพัฒนาแบบจำลองสถานะนำสบายเชิงความร้อน Choi & Yeom (2017) วัดอุณหภูมิผิวหนังหลายส่วนของร่างกาย ได้แก่ หน้าผาก คอ หลัง หน้าอก เอว แขน ท้อง เพื่อใช้พัฒนาแบบจำลองทำนายความรู้สึกร้อนของผู้ใช้

เพื่อช่วยให้ง่ายและเก็บข้อมูลอุณหภูมิผิวหนังในทางปฏิบัติได้อย่างสะดวกโดยไม่รบกวนผู้ใช้อาคาร นักวิจัยจำนวนหนึ่งใช้อุปกรณ์แบบไร้สัมผัส (Contactless) เป็นวิธีการรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิผิวหนัง บางงานวิจัยใช้สายรัดข้อมือเพื่อสุขภาพ (Liu et al., 2019; Li et al., 2017) แต่วิธีนี้อาจสร้างความกังวลให้กับผู้ใช้จากการถูกติดตามและเข้าถึงข้อมูลส่วนบุคคล ในอีกด้านหนึ่งนักวิจัยใช้การวัดอุณหภูมิอินฟราเรด (Infrared Thermal Camera) สำหรับการเก็บข้อมูลอุณหภูมิผิวหนังใบหน้าโดยไม่ล่วงล้ำผู้ใช้งาน (Li et al., 2018; Cosma & Simha, 2019; Aryal & Becerik-Gerber, 2019; Faridah et al., 2021) อีกทั้งผิวหนังใบหน้าที่เป็นส่วนหนึ่งของร่างกายที่มักไม่มีเสื้อผ้าปกคลุมจึงช่วยให้สามารถเก็บข้อมูลในสถานการณ์จริงได้สะดวก

อย่างไรก็ดีการพัฒนาแบบจำลอง PCM และการใช้อุณหภูมิผิวหนังเพื่อการทำนายสภาวะนำสบายยังมีการศึกษาในวงจำกัด โดยส่วนมากทำการศึกษาวิจัยในประเทศที่มีสภาพภูมิอากาศอบอุ่น ในขณะที่การศึกษาในสภาพภูมิอากาศร้อนขึ้นมีน้อยมาก ซึ่งจากรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องได้ชี้ให้เห็นว่าผู้ใช้อาคารซึ่งอาศัยในประเทศที่มีสภาพภูมิอากาศแตกต่างกันย่อมมีประสบการณ์ทางความร้อน และการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมเชิงความร้อนที่ต่างกัน (Wang et al., 2020) ดังนั้นเพื่อนำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองสภาวะนำสบายเชิงบุคคลในสภาพอากาศร้อนขึ้นที่อาศัยอุณหภูมิผิวหนังเพื่อการทำนายซึ่งเป็นข้อจำกัดของการศึกษาก่อนหน้า การวิจัยนี้ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกของการศึกษาเพื่อการพัฒนาแบบจำลองสภาวะนำสบายเชิงบุคคลจึงมุ่งทำการศึกษาความรู้สึกเชิงความร้อนและอุณหภูมิผิวหนังซึ่งกลุ่มตัวอย่างในการศึกษาค้นเคยสภาพอากาศร้อนขึ้น

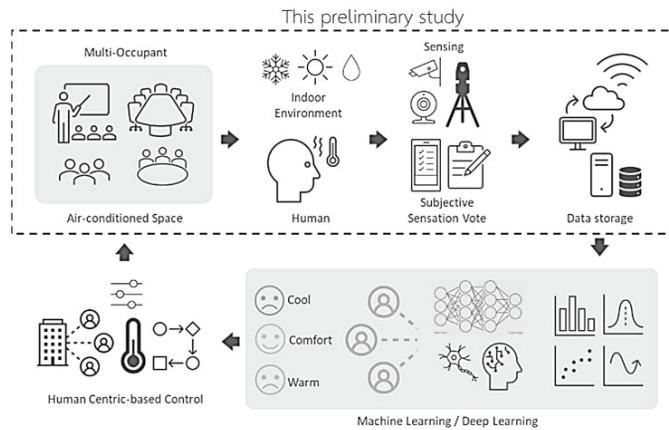
วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้คือ 1) เพื่อศึกษาความรู้สึกเชิงความร้อน และลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความรู้สึกเชิงความร้อนภายใต้สภาพอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง 2) เพื่อศึกษาอุณหภูมิผิวหนังบริเวณใบหน้า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผิวหนังบริเวณใบหน้า และเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงของความรู้สึกเชิงความร้อนตามสภาพอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง และ 3) เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวหนังบริเวณใบหน้ากับความรู้สึกเชิงความร้อน

การศึกษานี้มีคำถามการวิจัยว่า 1) ความรู้สึกเชิงความร้อนมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงอย่างไรภายใต้สภาพอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง 2) อุณหภูมิผิวหนังบริเวณใบหน้ามีลักษณะการเปลี่ยนแปลงอย่างไร เมื่อเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงของความรู้สึกเชิงความร้อนเหมือนหรือต่างกันอย่างไร และ 3) ในสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวหนังสัมพันธ์กับความรู้สึกเชิงความร้อน เป็นอย่างไร อุณหภูมิผิวหนังบริเวณใบหน้าสามารถบ่งชี้ระดับความรู้สึกเชิงความร้อน ได้หรือไม่ อย่างไร และได้กำหนดสมมติฐานการวิจัยในการศึกษานี้ว่า ในสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผิวหนังบริเวณใบหน้ามีความสัมพันธ์ทางบวกกับความรู้สึกเชิงความร้อน และสามารถบ่งชี้ระดับความรู้สึกเชิงความร้อนได้

ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษานี้จะช่วยให้เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวหนังใบหน้ากับความรู้สึกเชิงความร้อนซึ่งชี้ให้เห็นแนวทางที่เหมาะสมในการพัฒนาแบบจำลองสภาวะนำสบายเชิงบุคคลที่อาศัยการตอบสนองทางสรีรวิทยาเพื่อประยุกต์ใช้ในการควบคุมสภาพแวดล้อมที่มีผู้ใช้เป็นศูนย์กลาง (Occupant-Centric Environmental Control) ในระบบอาคารอัตโนมัติต่อไปได้

วิธีการศึกษา

การศึกษานี้ทำการเก็บข้อมูลในห้องทดลอง ข้อมูลในการศึกษาแบ่งออกเป็นสองส่วน ประกอบด้วย 1) ความรู้สึกเชิงความร้อนซึ่งทำการเก็บรวบรวมโดยใช้การสำรวจด้วยแบบสอบถาม และ 2) อุณหภูมิผิวหนังบริเวณใบหน้าซึ่งทำการเก็บรวบรวมโดยการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรดวัดค่าอุณหภูมิ ข้อมูลทั้งสองส่วนนี้ถูกนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติเพื่อตรวจสอบศักยภาพของอุณหภูมิผิวในการบ่งชี้ความรู้สึกเชิงความร้อนสำหรับใช้เป็นข้อมูลป้อนเข้าในการพัฒนาแบบจำลองเพื่อประเมินสภาวะนำสบายเชิงบุคคลในอนาคต กรอบแนวคิดของการวิจัยสำหรับการศึกษานี้แสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กรอบแนวความคิดของการศึกษานี้

กลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างในการทดลองเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลในการศึกษานี้คืออาสาสมัครที่มีสุขภาพดี ชาย 15 คนและหญิง 17 คน รวม 32 คน ทั้งหมดเป็นนักศึกษามหาวิทยาลัยซึ่งมีอายุเฉลี่ยประมาณ 20 ปี ในจำนวนนี้มีทั้งกลุ่มตัวอย่างที่น้ำหนักปกติ น้ำหนักน้อยและน้ำหนักเกิน กลุ่มตัวอย่างทั้งหมดคุ้นเคยกับสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น ข้อมูลลักษณะทางกายภาพของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดแสดงในตารางที่ 1 ประกอบด้วย เพศ อายุ น้ำหนัก ความสูง และค่าดัชนีมวลกาย

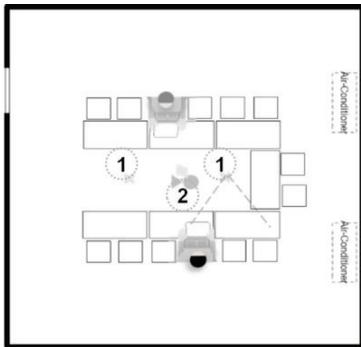
ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลลักษณะทางกายภาพของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด

ลักษณะประชากร	จำนวน (คน)	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
เพศ	ชาย 15 หญิง 17			
อายุ (ปี)		20.0	18	24
น้ำหนัก (กก.)		58.6	40	89
ส่วนสูง (ซม.)		166.0	152	183
BMI		21.1	16.1	29.7

งานวิจัยก่อนหน้าที่ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความรู้สึกเชิงความร้อนกับอุณหภูมิผิวหนังใบหน้าเพื่อพัฒนาโมเดลทำนายสภาวะนำสบายจากอุณหภูมิผิวหนังได้กำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่างอย่างหลากหลายตั้งแต่ 2 คน (Lu et al., 2019) ไปจนถึง 205 คน (Salehi et al., 2020) สำหรับการศึกษานี้ได้กำหนดจำนวนกลุ่มตัวอย่างจากการคำนวณขนาดกลุ่มตัวอย่างด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป G*Power ซึ่งใช้กันเป็นที่แพร่หลาย (นงลักษณ์ วิรัชชัย, 2555) การคำนวณนี้อาศัยการกำหนดค่าขนาดอิทธิพลหรือ Effect size จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson's correlation coefficient) ระหว่างความรู้สึกเชิงความร้อนกับอุณหภูมิผิวหนังบริเวณใบหน้าที่อ้างอิงจากการศึกษาก่อนหน้า (Salehi et al., 2020; Lu et al., 2019; Pavlin et al., 2017) ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.5-0.7 ผลการคำนวณได้จำนวนกลุ่มตัวอย่างอย่างน้อยเท่ากับ 24 คนซึ่งใกล้เคียงกับหลายงานวิจัยก่อนหน้า (Choi & Yeom, 2017; Choi & Loftness, 2012; Ghahramani et al., 2016)

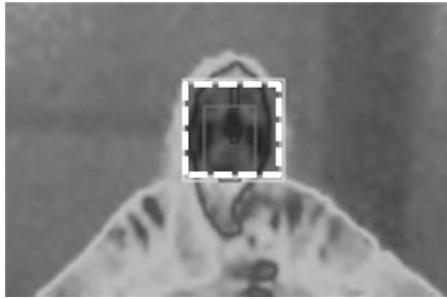
เครื่องมือที่ใช้

เครื่องมือที่ใช้ในการวัดและบันทึกสภาพอากาศภายในห้องทดลองขณะอาสาสมัครตอบแบบสอบถาม ประกอบด้วย Testo 440 (ช่วงการวัด 0-50 °C ความคลาดเคลื่อน ± 0.5 °C) ซึ่งเชื่อมต่อกับหัววัดความเร็วลมแบบ Turbulence probe (ช่วงการวัด 0-5 m/s ความคลาดเคลื่อน ± 0.03 m/s) และหัววัดอุณหภูมิโกลบขนาด $\varnothing 40$ mm (ช่วงการวัด 0-50 °C ความคลาดเคลื่อน ± 0.6 °C) สำหรับวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิอากาศ ความเร็วลม และอุณหภูมิโกลบ และใช้ iButton DS 1923 (ช่วงการวัด 0 to 100% RH ความคลาดเคลื่อน $\pm <1.0\%$) สำหรับวัดและบันทึกค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดลอง นอกจากนี้ยังวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกห้อง HOBO Data Logger (ช่วงการวัด -20-70 °C ความคลาดเคลื่อน ± 0.35 °C และ $\pm 2.5\%$ RH) เครื่องมือวัดสภาพแวดล้อมภายในห้องทั้งหมดถูกติดตั้งที่ระดับความสูง 0.6 เมตรเหนือพื้นใกล้กับกลุ่มตัวอย่าง (ภาพที่ 2) เครื่องมือทั้งหมดถูกปรับตั้งเวลาให้ตรงกัน และตั้งค่าให้วัดและบันทึกอัตโนมัติทุก 1 นาที



ภาพที่ 2 ตำแหน่งเครื่องมือวัดภายในห้องทดลอง (1) กล้องความร้อน (2) เครื่องมือวัดอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม

เครื่องมือเก็บข้อมูลอุณหภูมิผิวหน้าบริเวณใบหน้าในการวิจัยนี้ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรด (Infrared Thermal Imaging Camera) FLIR รุ่น E4 เนื่องจากเป้าหมายของการศึกษานี้เพื่อนำไปสู่การประยุกต์ใช้ในระบบอาคารอัตโนมัติ ดังนั้นในการวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงเลือกเก็บรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิผิวหน้าด้วยกล้องอินฟราเรดซึ่งเป็นวิธีการไร้สัมผัส โดยกล้อง FLIR E4 ที่ใช้มีความละเอียดขนาด 80 x 60 พิกเซล ช่วงการวัด -20 ถึง 250 °C และมีความแม่นยำที่ ± 2 °C สำหรับวัดและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิผิวหน้าบริเวณใบหน้า ปรับตั้งค่าการแผ่รังสี (Emissivity) เท่ากับ 0.98 ซึ่งเป็นค่าแนะนำสำหรับการวัดอุณหภูมิผิวหน้ามนุษย์ (FLIR, 2013) กล้องที่ใช้ได้รับการตรวจสอบความแม่นยำกับเซ็นเซอร์แบบสัมผัสก่อนการใช้งานจริง ค่าอุณหภูมิผิวหน้าบริเวณใบหน้าทั้งหมดถูกดึงออกจากภาพความร้อนโดยใช้วิธีการซึ่งประยุกต์จากงานวิจัยก่อนหน้า (Li et al., 2018; Aryal & Becerik-Gerber, 2019) ภาพที่ 3 แสดงบริเวณของอุณหภูมิผิวหน้าใบหน้าของกลุ่มตัวอย่างที่ถูกวัดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรดที่ใช้ในการศึกษา



ภาพที่ 3 บริเวณของอุณหภูมิผิวหนังใบหน้าในการศึกษา

เครื่องมือเก็บข้อมูลความรู้สึกเชิงความร้อนใช้แบบสอบถาม เนื้อหาในแบบสอบถาม แบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 สำหรับข้อมูลเชิงบุคคลเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ เพศ อายุ น้ำหนัก ส่วนสูง และเสื้อผ้าที่สวมใส่ และส่วนที่ 2 สำหรับข้อมูลความรู้สึกที่มีต่อสภาพแวดล้อมเชิงความร้อน ได้แก่ ความรู้สึกเชิงความร้อน (Thermal sensation) ในการศึกษาใช้มาตราวัดความรู้สึกเชิงความร้อน 7 ระดับของ ASHRAE (ASHRAE, 2017) ซึ่งเป็นการให้คะแนนจาก -3 ถึง +3 โดยที่ -3 หมายถึงหนาว (cold), -2 หมายถึงเย็น (cool), -1 หมายถึงเย็นเล็กน้อย (slightly cool), 0 หมายถึงเป็นกลางหรือพอดี (neutral), +1 หมายถึงอุ่นเล็กน้อย (slightly warm), +2 หมายถึงอุ่น (warm) และ +3 หมายถึงร้อน (hot)

วิธีการทดลองเก็บข้อมูล

การทดลองดำเนินการในห้องปรับอากาศในอาคารเรียนสถาปัตยกรรมของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมาซึ่งมีสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้นสลับแล้ง โดยได้ดำเนินการในช่วงเดือนพฤศจิกายน 2021 ห้องเรียนปรับอากาศซึ่งถูกใช้เป็นที่ทำการทดลองในการวิจัยนี้มีขนาดประมาณ $8 \times 8 \times 3 \text{ m}^3$ ภายในห้องติดตั้งเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนจำนวน 2 เครื่อง จัดวางโต๊ะเก้าอี้ในลักษณะห้องประชุมสำหรับผู้เข้าร่วมการทดลอง เครื่องมือวัดสภาพแวดล้อมทั้งหมดถูกติดตั้งไว้บริเวณกลางห้อง

การเก็บรวบรวมข้อมูลในการศึกษานี้ได้ดำเนินการทดลองในสภาพอุณหภูมิไม่คงที่เพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรและความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามวัตถุประสงค์การวิจัยซึ่งได้ผ่านการรับรองจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน โดยทำการทดลองกับกลุ่มตัวอย่างอาสาสมัคร 32 คนซึ่งให้ความยินยอมโดยสมัครใจก่อนการเข้าร่วม กลุ่มตัวอย่างทั้งหมดถูกร้องขอให้สวมเสื้อผ้าฝ้ายลักษณะเดียวกันในชุดสุขภาพซึ่งสวมใส่ปกติในชีวิตประจำวันและเหมาะกับสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น คือ เสื้อแขนสั้น กางเกงขายาว และรองเท้าหุ้มส้นทั่วไป ก่อนการทดลองกลุ่มตัวอย่างได้รับการร้องขอให้งดทำกิจกรรมอย่างหนัก งดรับประทานอาหาร เครื่องดื่ม ที่อาจมีผลต่อการเผาผลาญพลังงาน และสูบบุหรี่อย่างน้อย 1 ชั่วโมงก่อนเริ่มทำการทดลอง

เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบต่อความรู้สึกของกลุ่มตัวอย่างจากกิจกรรมก่อนหน้า กลุ่มตัวอย่างต้องเข้าสู่พื้นที่ปรับสภาพก่อนเริ่มการทดลองที่อยู่ติดกับห้องทดลองซึ่งตั้งค่าอุณหภูมิประมาณ 27 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ในระหว่างนั้นทำการตอบแบบสอบถามส่วนที่หนึ่ง ก่อนเริ่มการทดลองเล็กน้อยแต่ละคนจะถูกติดตั้งเซนเซอร์แบบสัมผัส (iButton) สำหรับวัดอุณหภูมิผิวหนังบริเวณข้อมือและเข้าสู่ห้องทดลองที่อยู่ติดกันหลังจากครบกำหนด จากนั้นเริ่มการตอบแบบสอบถามความรู้สึกเชิงความร้อน โดยต้องบันทึกระดับความรู้สึกในแบบสอบถามทันทีเมื่อความรู้สึกเชิง

ความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงไปจากระดับความรู้สึกครั้งล่าสุดตลอดเวลาที่อยู่ในห้องทดลอง ขณะเดียวกันทุกหนึ่งนาที จะถูกวัดค่าอุณหภูมิผิวหนังบริเวณใบหน้าด้วยกล้องความร้อนอินฟราเรดเพื่อรวบรวมข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง โดยในระหว่างการทดลองกลุ่มตัวอย่างทำกิจกรรมประเภทงานสำนักงานเบาๆ ทั่วไป เช่น การอ่านเอกสาร การพิมพ์งาน การค้นข้อมูลในอินเทอร์เน็ต เป็นต้น

การทดลองสำหรับเก็บข้อมูลเป็นแบบไล่ระดับอุณหภูมิ โดยในช่วง 60 นาทีแรกเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบลดระดับอุณหภูมิเริ่มจากอุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียสแล้วลดลงทีละน้อยไปจนถึง 21 องศาเซลเซียส และในช่วง 60 นาทีหลังเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบเพิ่มระดับอุณหภูมิเริ่มจาก 21 องศาเซลเซียสแล้วเพิ่มขึ้นทีละน้อยไปจนถึง 29 องศาเซลเซียส รวมเวลาทั้งหมด 120 นาที ซึ่งระดับอุณหภูมิในการทดลองนี้อ้างอิงจากหลายการศึกษาท่อนหน้า (Li et al., 2018; Cosma & Simha, 2019) การปรับเพิ่มหรือลดอุณหภูมิในห้องทดลองเป็นไปอย่างช้าๆ หลีกเลียงการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมเชิงความร้อนอย่างฉับพลันซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความรู้สึกเชิงความร้อน ในระหว่างการทดลองตัวแปรสภาพแวดล้อมอื่นถูกควบคุมและบันทึกค่าเพื่อตรวจสอบ ได้แก่ ความเร็วลม ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิการแผ่รังสี ความเร็วลมในห้องเฉลี่ยไม่เกิน 0.2 m/s เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบต่อความรู้สึกเชิงความร้อนของกลุ่มตัวอย่าง (ASHRAE, 2017) ซึ่งข้อมูลสภาพแวดล้อมในระหว่างดำเนินการทดลองที่บันทึกค่าได้ อุณหภูมิอากาศมีค่าอยู่ระหว่าง 20.67-29.42 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอยู่ระหว่าง 45-63 % และความเร็วลมในห้องเฉลี่ยประมาณ 0.1 m/s

วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลแต่ละตัวแปรที่เก็บรวบรวมมาได้ถูกทำการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นโดยใช้สถิติพรรณนาทั่วไป ได้แก่ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และทำการทดสอบสมมติฐานการวิจัยโดยใช้การวิเคราะห์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson's Correlation coefficient) เพื่อทดสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของตัวแปรสองตัวระหว่างอุณหภูมิผิวหนังใบหน้าซึ่งได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรดกับความรู้สึกเชิงความร้อนที่ได้จากแบบสอบถาม การวิเคราะห์และการทดสอบทางสถิติในการศึกษานี้ดำเนินการโดยใช้ไลบรารี statsmodels และ scipy ใน Python เวอร์ชัน 3.8

ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้จัดเรียงเนื้อหาเสนอตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนย่อย ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

ความรู้สึกเชิงความร้อน และลักษณะการเปลี่ยนแปลงในสภาพอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

จากการทดลองในสภาพอุณหภูมิไม่คงที่ซึ่งอุณหภูมิอากาศในการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงค่าอยู่ระหว่าง 20.7 - 29.4 องศาเซลเซียส อุณหภูมิอากาศโดยเฉลี่ยเท่ากับ 25.6 องศาเซลเซียส คະแนนโหวตความรู้สึกเชิงความร้อนโดยรวมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -0.2 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.73 ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของอุณหภูมิอากาศและความรู้สึกเชิงความร้อน

	ค่าเฉลี่ย	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน SD.	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
อุณหภูมิอากาศในห้อง	25.6	2.7	20.7	29.4
ความรู้สึกเชิงความร้อน	-0.2	1.7	-3	+3

การกระจายของคะแนนโหวตความรู้สึกเชิงความร้อนของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดตามที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าคะแนนโหวตของความรู้สึกเป็นกลางหรือมีค่าเท่ากับ 0 มีจำนวนสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 23.8 ของจำนวนโหวตทั้งหมด คะแนนโหวตของความรู้สึกในทางเย็นหรือมีค่าลบรวมกัน (-1 ถึง -3) มีจำนวนมากกว่าคะแนนโหวตของความรู้สึกในทางร้อนหรือมีค่าบวกรวมกัน (+1 ถึง +3) ซึ่งการที่จำนวนโหวตทางเย็นมากกว่าทางร้อนนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากโดยปกติแล้วบริเวณผิวหนังคนเรามีตัวรับความรู้สึกเย็นมากกว่าตัวรับความรู้สึกร้อน (Arens & Zhang, 2006) กลุ่มตัวอย่างซึ่งคุ้นชินกับสภาพภูมิอากาศร้อนขึ้นจึงมีความไวต่อความรู้สึกเย็นมากกว่าความรู้สึกร้อน

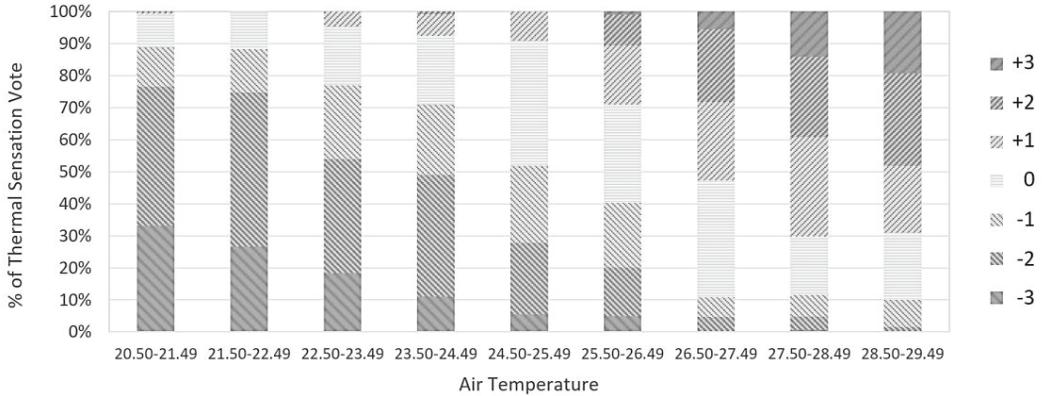
ตารางที่ 3 แสดงการกระจายของโหวตความรู้สึกเชิงความร้อนและค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของความรู้สึกเชิงความร้อนที่แตกต่างกัน

ความรู้สึกเชิงความร้อน (n=32)	หนาว (-3)	เย็น (-2)	เย็นเล็กน้อย (-1)	เป็นกลาง/สบาย (0)	อุ่นเล็กน้อย (+1)	อุ่น (+2)	ร้อน (+3)
ร้อยละ	9.2	19.2	12.8	23.8	15.6	13.4	6.0
ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ (°C)	22.3	23.2	25.0	26.0	27.3	27.8	28.3
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD.)	1.6	2.1	2.5	2.2	1.5	1.1	0.9

ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศ (mean) ที่กลุ่มตัวอย่างมีความรู้สึกเป็นกลางหรือสบายมีค่าเท่ากับ 26.0 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 3) อย่างไรก็ตามจากผลการสำรวจพบว่าค่ามัธยฐาน (median) และค่าฐานนิยม (mode) ของอุณหภูมิอากาศที่กลุ่มตัวอย่างให้โหวตความรู้สึกเป็นกลาง (0) มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศเล็กน้อยซึ่งหมายความว่าค่าอุณหภูมิอากาศที่กลุ่มตัวอย่างส่วนมากโหวต 0 นั้นมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยเล็กน้อย โดยทั้งค่ามัธยฐานและฐานนิยมที่กลุ่มตัวอย่างมีความรู้สึกเป็นกลางมีค่าเท่ากับ 26.6 องศาเซลเซียส และจากข้อมูลในตารางที่ 3 ยังแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิอากาศที่กลุ่มตัวอย่างมีความรู้สึกเย็นเล็กน้อย (-1) มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงที่สุด (SD. = 2.5) แสดงให้เห็นว่าค่าอุณหภูมิที่กลุ่มตัวอย่างมีความรู้สึกเย็นเล็กน้อยมีการแปรปรวนหรือการกระจายของข้อมูลสูงกว่าความรู้สึกเชิงความร้อนอื่น ในทางตรงข้ามกันอุณหภูมิอากาศที่กลุ่มตัวอย่างมีความรู้สึกร้อน (+3) มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด (SD. = 0.9) แสดงให้เห็นว่าค่าอุณหภูมิเมื่อกลุ่มตัวอย่างมีความรู้สึกร้อนมีการกระจายของข้อมูลน้อยหรือแปลได้ว่ามีความแตกต่างกันน้อย ผลการศึกษาในส่วนนี้ชี้ให้เห็นว่าในสภาพแวดล้อมที่ร้อนและเย็นกลุ่มตัวอย่างมีการรับรู้เชิงความร้อนต่างกันโดยในสภาพแวดล้อมที่เย็นกลุ่มตัวอย่างมีความแตกต่างหลากหลายในการรับรู้เชิงความร้อนมากกว่าในสภาพแวดล้อมที่ร้อน

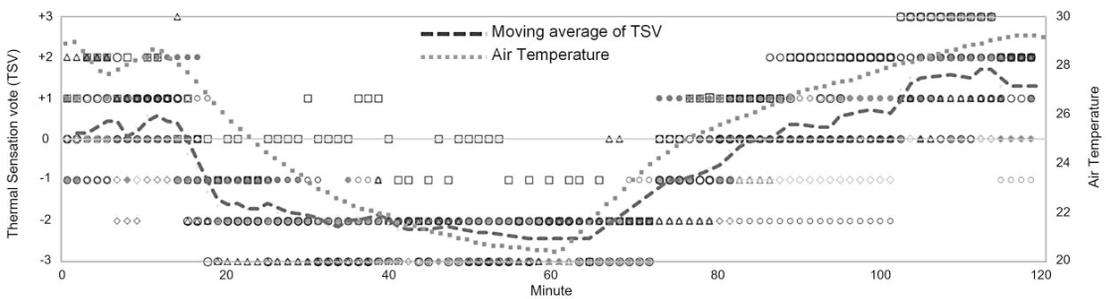
เมื่อทำการจัดกลุ่มระดับอุณหภูมิอากาศในห้องทดลองโดยให้ช่วงอุณหภูมิแต่ละกลุ่มมีระยะห่างหนึ่งองศาเท่าๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งแสดงร้อยละ (percentage) ของการกระจายของโหวตความรู้สึกในแต่ละช่วงอุณหภูมีย่อย เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของโหวตความรู้สึกต่างๆ ภายในแท่งกราฟแต่ละแท่งพบว่ามีความแตกต่างกันตามระดับอุณหภูมิ โดยภาพรวมแล้วเมื่ออุณหภูมิอากาศสูงขึ้นจำนวนของโหวตความรู้สึกในทางร้อน (+1 ถึง +3) เพิ่มขึ้นและโหวตความรู้สึกในทางเย็น (-1 ถึง -3) ลดลงตามลำดับ ในทางกลับกันเมื่ออุณหภูมิอากาศต่ำลงจำนวนของโหวตความรู้สึกในทางร้อนลดลงแต่โหวตความรู้สึกในทางเย็นเพิ่มขึ้นตามลำดับ และจากกราฟสามารถสังเกตได้ว่าในช่วงอุณหภูมิ 25.50-26.49 °C จำนวนโหวตความรู้สึกเท่ากับ 0 โหวตความรู้สึกทางร้อน และโหวตความรู้สึกทางเย็นมีสัดส่วนใกล้เคียงกันที่สุด ในขณะที่ในช่วงอุณหภูมิ 26.50-27.49 °C มากกว่าร้อยละ 50 ของโหวตความรู้สึกทั้งหมดในช่วงนี้เป็นโหวตความรู้สึกทางร้อน (ร้อยละ 52.7) มีเพียงร้อยละ 10.8 ที่เป็นโหวตความรู้สึกทางเย็นซึ่งแตกต่างอย่างชัดเจน

กับช่วงอุณหภูมิ 24.50-25.49 °C ที่มากกว่าร้อยละ 50 ของโหวตทั้งหมดในช่วงนี้เป็นโหวตความรู้สึกทางเย็น (ร้อยละ 51.9) ส่วนโหวตความรู้สึกทางร้อนมีเพียงร้อยละ 9.1 เท่านั้น



ภาพที่ 4 สัดส่วนของจำนวนโหวตความรู้สึกเชิงความร้อนที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงอุณหภูมิ

ภายใต้สภาพอุณหภูมิการทดลองที่เปลี่ยนแปลงแบบไล่ระดับจาก 29°C ไป 21°C และจาก 21°C ไป 29°C ความรู้สึกเชิงความร้อนของกลุ่มตัวอย่างแต่ละคน และค่าเฉลี่ยความรู้สึกของกลุ่มแสดงในภาพที่ 5 จุดรูปร่างต่างๆ ในภาพแทนโหวตความรู้สึกของแต่ละคน เส้นจุดไข่ปลาแสดงระดับอุณหภูมิในระหว่างการทดลอง และเส้นประแสดงถึงค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของความรู้สึกเชิงความร้อนของกลุ่มตัวอย่างจำนวน 14 คนในรอบทดลองหนึ่ง เส้นทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่สอดคล้องกันชี้ให้เห็นว่าในสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยความรู้สึกเชิงความร้อนเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในทิศทางเดียวกัน แต่อย่างไรก็ดีจะเห็นว่าในสภาพแวดล้อมเดียวกันระดับอุณหภูมิเดียวกันแต่ละบุคคลมีความรู้สึกต่อความร้อนอย่างหลากหลาย



ภาพที่ 5 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงของความรู้สึกเชิงความร้อนของกลุ่มตัวอย่าง

จากผลการศึกษาในส่วนนี้ยืนยันได้ชัดเจนว่า แม้อยู่ในสภาพแวดล้อมเชิงความร้อนเดียวกันแต่แต่ละคนมีความรู้สึกเชิงความร้อนที่แตกต่างกันอย่างหลากหลาย ค่าเฉลี่ยโหวตความรู้สึกจริงไม่สามารถสะท้อนความรู้สึกหรือความต้องการเชิงความร้อนที่แท้จริงของแต่ละคน

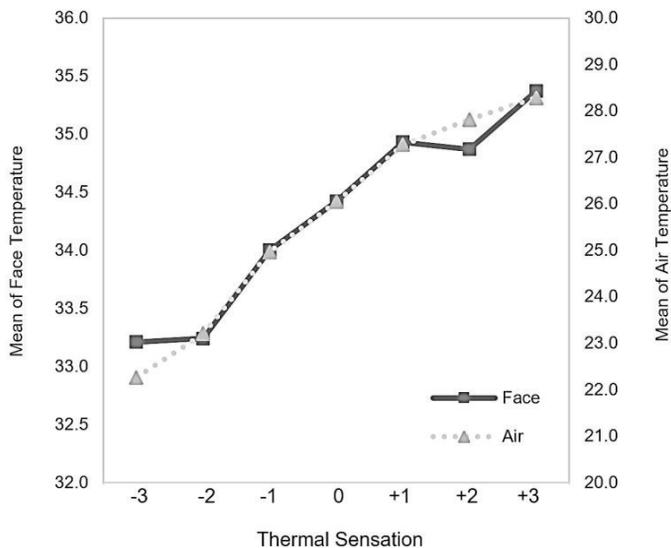
อุณหภูมิผิวหนังใบหน้า และลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวหนังใบหน้า

ตารางที่ 4 แสดงค่าเฉลี่ยอุณหภูมิผิวหนังบริเวณใบหน้าของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดแจกแจงตามความรู้สึกเชิงความร้อน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิผิวหนังใบหน้าเฉลี่ยต่ำที่สุดที่ระดับความรู้สึกหนาว (-3) มีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ 33.45 และอุณหภูมิผิวหนังใบหน้าเฉลี่ยสูงที่สุดที่ระดับความรู้สึกร้อน (+3) มีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ 35.53

ตารางที่ 4 แสดงอุณหภูมิผิวหนังบริเวณใบหน้าของกลุ่มตัวอย่าง

อุณหภูมิผิวหนังบริเวณใบหน้า (n=32)	หนาว (-3)	เย็น (-2)	เย็นเล็กน้อย (-1)	ปกติ/สบาย (0)	อุ่นเล็กน้อย (+1)	อุ่น (+2)	ร้อน (+3)
ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ (°C)	33.45	33.52	34.28	34.61	35.08	34.90	35.53
ค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD.)	1.1	1.3	1.5	1.3	1.2	1.0	0.9

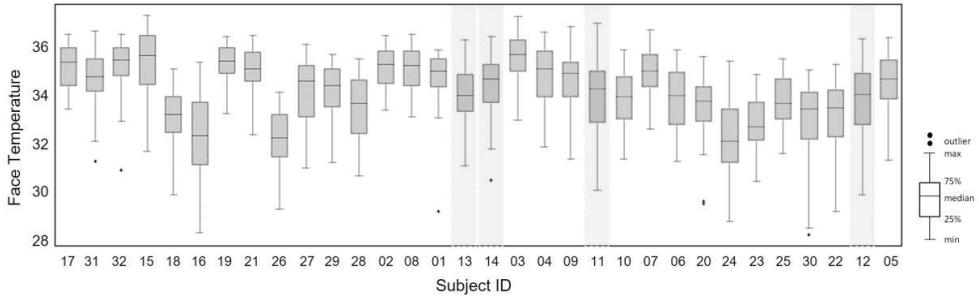
ภาพที่ 6 เปรียบเทียบให้เห็นความสัมพันธ์กันของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศที่แจกแจงตามความรู้สึกเชิงความร้อนซึ่งแสดงในตารางที่ 3 และค่าเฉลี่ยอุณหภูมิผิวหนังใบหน้าที่แจกแจงตามความรู้สึกเชิงความร้อนซึ่งแสดงในตารางที่ 4 จากภาพจะเห็นว่า ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศสูงขึ้นสัมพันธ์กับความรู้สึกที่ร้อนขึ้น และค่าเฉลี่ยอุณหภูมิผิวหนังใบหน้าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศตามความรู้สึกเชิงความร้อนที่แตกต่างกัน



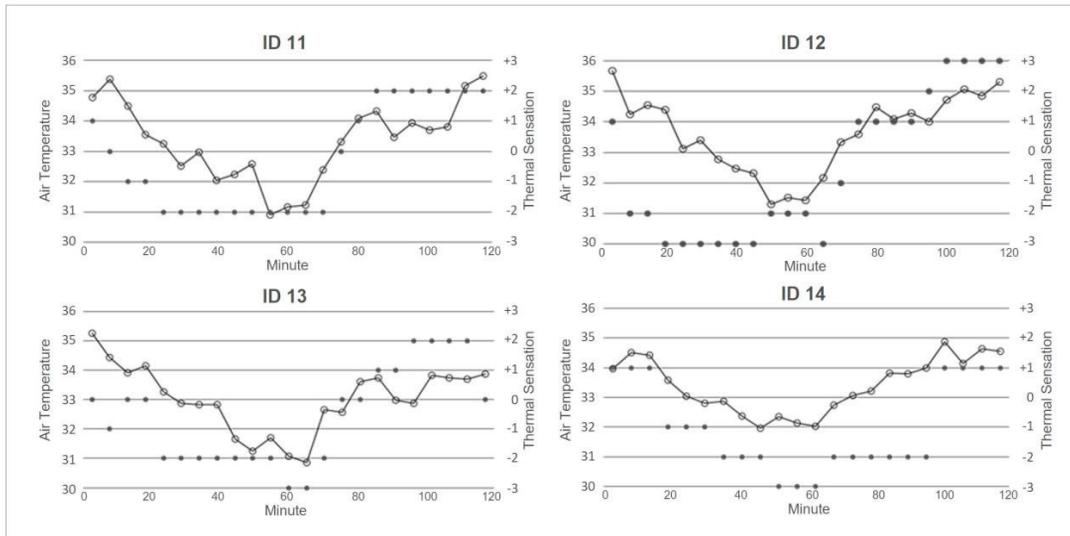
ภาพที่ 6 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิห้อง และค่าเฉลี่ยอุณหภูมิผิวหนังใบหน้าตามความรู้สึกเชิงความร้อนที่แตกต่างกัน

ภาพที่ 7 แสดงให้เห็นการกระจายของอุณหภูมิผิวหนังใบหน้าของกลุ่มตัวอย่างแต่ละคน ซึ่งมีความแตกต่างกันทั้งระดับค่าอุณหภูมิและความกว้างของช่วงอุณหภูมิแม้ว่าจะอยู่ในสภาพแวดล้อมเชิงความร้อนเดียวกัน และในภาพที่ 8 แสดงให้เห็นสีตัวอย่างของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวหนังใบหน้าทุกๆ 5 นาทีขณะอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิไม่คงที่ โดยอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงแบบลดลงในช่วงแรกและอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงแบบเพิ่มขึ้นในช่วงหลัง ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวหนังใบหน้าของตัวอย่างทั้งสี่รายมีการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้อง

กับอุณหภูมิห้องและความรู้สึกเชิงความร้อน อย่างไรก็ตามก็สังเกตเห็นได้ว่า ID14 มีช่วงอุณหภูมิของผิวหน้าที่เปลี่ยนแปลงแคบกว่ารายอื่นๆ



ภาพที่ 7 การกระจายของอุณหภูมิผิวหน้าบริเวณใบหน้าของแต่ละคน



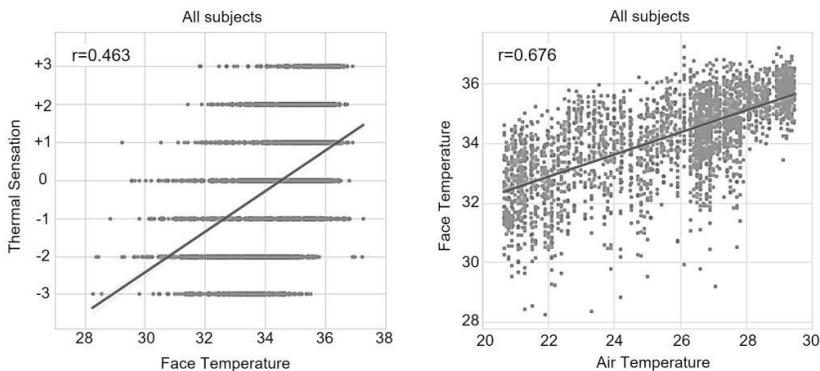
ภาพที่ 8 ตัวอย่างของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวหน้าบริเวณใบหน้าของกลุ่มตัวอย่าง 4 คน

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวหน้าบริเวณใบหน้า กับความรู้สึกเชิงความร้อน และอุณหภูมิอากาศ
 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวหน้า และระดับความรู้สึกเชิงความร้อน (TSV) ด้วย
 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson’s Correlation Analysis) เพื่อทดสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่าง
 ตัวแปรสองตัว

ผลการทดสอบความสัมพันธ์ค่าอุณหภูมิผิวหน้าบริเวณใบหน้าของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดกับความรู้สึกเชิงความร้อน
 ของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดพบว่าอุณหภูมิผิวหน้าบริเวณใบหน้ากับความรู้สึกเชิงความร้อนสัมพันธ์ในเชิงบวกระดับ
 ปานกลางอย่างน้อยสำคัญ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.46 (ตารางที่ 5) ซึ่งใกล้เคียงกับการศึกษาก่อนหน้านี้ (Salehi
 et al., 2020; Xiong et al., 2016) ภาพที่ 9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวหน้าบริเวณใบหน้ากับความรู้สึก
 เชิงความร้อนของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวหน้าบริเวณใบหน้ากับอุณหภูมิอากาศ ซึ่ง

จากภาพจะเห็นได้ว่าแม้ว่าอุณหภูมิผิวของทั้งกลุ่มมีความสัมพันธ์ค่อนข้างสูงกับอุณหภูมิอากาศ แต่ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวหนึ่งใบหน้ากับความรูสึกเชิงความร้อนของทั้งกลุ่มนั้นไม่สูงเพียงระดับปานกลางเท่านั้น

ในขณะที่ผลการทดสอบในแต่ละคนพบว่าอุณหภูมิผิวหนึ่งใบหน้าที่มีความสัมพันธ์กับความรูสึกเชิงความร้อนในเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ระหว่าง 0.33 ถึง 0.86 และมีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.68 (SD. = 0.13) มีเพียงสามคนเท่านั้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยกว่า 0.5 เล็กน้อย ซึ่งแปลได้ว่าอุณหภูมิผิวหนึ่งใบหน้าสามารถบ่งชี้ความรู้สึกของแต่ละคนได้ดี ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของการทดสอบทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 5 และภาพที่ 10 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวหนึ่งใบหน้าที่มีความรูสึกเชิงความร้อนของแต่ละคน ซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจนว่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวหนึ่งใบหน้าที่มีความรูสึกแตกต่างกันหลายหลายระหว่างบุคคล



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวหนึ่งใบหน้าที่มีความรูสึกเชิงความร้อนของกลุ่มตัวอย่าง และอุณหภูมิอากาศ

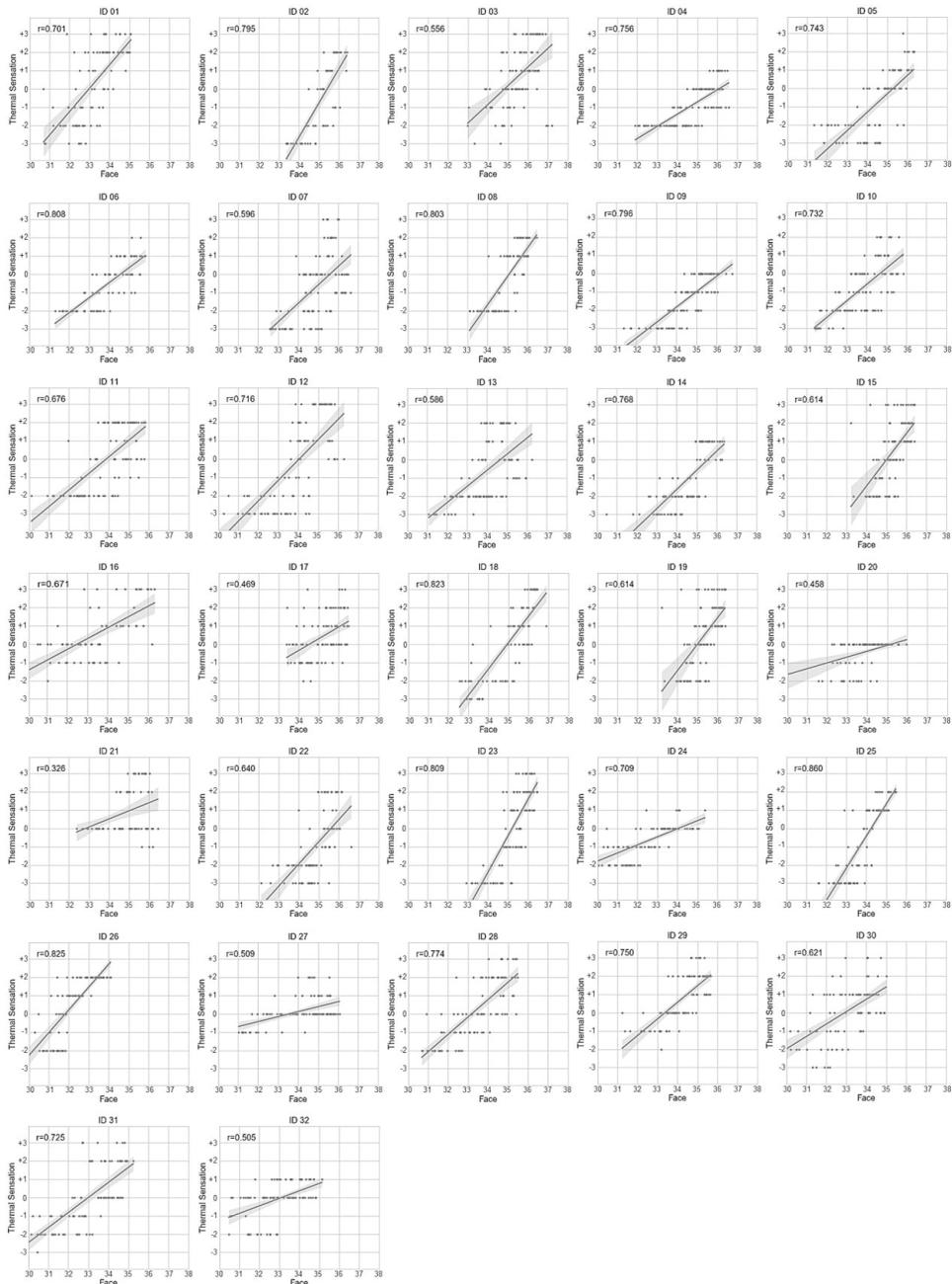
ตารางที่ 5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวหนึ่งบริเวณใบหน้า กับความรูสึกเชิงความร้อน

Subject	ID 01	ID 02	ID 03	ID 04	ID 05	ID 06	ID 07	ID 08	ID 09	ID 10	ID 11	ID 12	ID 13	ID 14	ID 15	ID 16	ID 17
Pearson r	0.70**	0.80**	0.56**	0.76**	0.74**	0.81**	0.60**	0.80**	0.80**	0.73**	0.66**	0.72**	0.59**	0.77**	0.71**	0.67**	0.47**
Subject	ID 18	ID 19	ID 20	ID 21	ID 22	ID 23	ID 24	ID 25	ID 26	ID 27	ID 28	ID 29	ID 30	ID 31	ID 32	Average	Overall
Pearson r	0.82**	0.61**	0.46**	0.33*	0.64**	0.81**	0.71**	0.86**	0.83**	0.51**	0.77**	0.75**	0.62**	0.73**	0.51**	0.68±0.13	0.46**

หมายเหตุ * หมายถึง p-value < 0.01, ** หมายถึง p-value < 0.0001

ผลการศึกษาทั้งหมดนี้อาจอธิบายโดยสรุปได้ว่าภายใต้สภาพแวดล้อมที่เย็นหรือร้อน ผิวหนังส่วนต่างๆ ของร่างกายรวมถึงใบหน้าจะถูกกระตุ้นจากอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม ส่งผลให้อุณหภูมิผิวหนังส่วนต่างๆ ของร่างกายเกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อม แต่ในขณะที่เดียวกันอุณหภูมิของผิวหนังก็มีบทบาทสำคัญในกระบวนการควบคุมอุณหภูมิเนื่องจากร่างกายมีการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวหนังไปสู่สภาพแวดล้อมด้วยเช่นกัน ดังนั้นอุณหภูมิของผิวหนังแต่ละส่วนของร่างกายแต่ละคนจึงมีการเปลี่ยนแปลงตามการหดและขยายตัวของหลอดเลือดเพื่อรักษาอุณหภูมิแกนกลางร่างกายให้ให้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดเพื่อให้ระบบต่างๆ ของร่างกายทำงานได้อย่างปกติในสภาพแวดล้อมที่เย็นและร้อนด้วย การถ่ายเทความร้อนผ่านผิวหนังซึ่งเกี่ยวข้องกับการไหลเวียนของเลือดและการเผาผลาญพลังงานนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณไขมันในร่างกายแต่ละส่วนของแต่ละคนและปัจจัยทางร่างกายอื่นๆ ที่แตกต่างกันในแต่ละบุคคล

ด้วยเหตุนี้อุณหภูมิผิวหน้าของแต่ละคนในการศึกษานี้แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กับความ
รู้สึกเชิงความร้อนและอุณหภูมิห้องในมีลักษณะเดียวกัน แต่มีรายละเอียดหรือคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่าง
กันอย่างหลากหลาย เช่น ช่วงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ความไวในการเปลี่ยนแปลง เป็นต้น สำหรับการพัฒนาแบบ
จำลองสภาวะนําสบายเชิงบุคคลที่อาศัยอุณหภูมิผิวหน้า คุณลักษณะต่างๆ เหล่านี้ควรได้มีการศึกษาอย่างละเอียดต่อไป



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอุณหภูมิผิวหน้ากับความรู้สึกเชิงความร้อนของแต่ละคน

สรุปผลการศึกษา

บทความนี้ได้นำเสนอการศึกษาเบื้องต้นที่มุ่งทำความเข้าใจความรู้สึกเชิงความร้อน และลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความรู้สึกเชิงความร้อนและอุณหภูมิผิวหนังใบหน้าภายใต้สภาพอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ตลอดจนความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวหนังใบหน้ากับความรู้สึกเชิงความร้อน เพื่อชี้ให้เห็นแนวทางในการพัฒนาแบบจำลองสภาวะน่าสบายเชิงบุคคลที่อาศัยอุณหภูมิผิวหนัง โดยได้ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลในห้องทดลองปรับอากาศในสภาพอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับอาสาสมัคร 32 คน ที่คุ้นเคยกับสภาพอากาศร้อนชื้น ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อทดสอบสมมติฐาน

ผลลัพธ์การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าแต่ละคนมีความรู้สึกเชิงความร้อนที่แตกต่างกันอย่างหลากหลายแม้อยู่ในสภาพแวดล้อมเชิงความร้อนเดียวกัน ดังนั้นค่าเฉลี่ยโหวตความรู้สึกจึงไม่สามารถสะท้อนความรู้สึกหรือความต้องการเชิงความร้อนที่แท้จริงของแต่ละคนได้ ผลลัพธ์ของการศึกษายังชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิผิวหนังบริเวณใบหน้าของแต่ละคนมีความสัมพันธ์ค่อนข้างสูงกับความรู้สึกเชิงความร้อนจึงสามารถบ่งชี้ความรู้สึกเชิงความร้อนของแต่ละบุคคลได้ องค์ความรู้ที่นำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองสภาวะน่าสบายเชิงบุคคลที่อาศัยอุณหภูมิผิวหนังซึ่งเป็นการตอบสนองทางสรีรวิทยาของผู้ใช้อาคารต่อไปได้ อย่างไรก็ตามบทความนี้เป็นเพียงการศึกษาในขั้นต้นเท่านั้น ยังจำเป็นต้องศึกษาคุณลักษณะผิวหนังที่เหมาะสมโดยละเอียดในขั้นต่อไปสำหรับการพัฒนาแบบจำลองสภาวะน่าสบายเชิงบุคคลที่อาศัยอุณหภูมิผิวหนังบริเวณใบหน้าเพื่อประยุกต์ใช้ในระบบอาคารอัตโนมัติ

การศึกษานี้ยังมีข้อจำกัดบางประการ ประการแรกคือการทดลองในการศึกษานี้ได้พิจารณาระดับกิจกรรมเพียงระดับเดียวในขณะที่อัตราการเผาผลาญซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งของสภาวะน่าสบายอาจส่งผลต่อความรู้สึกเชิงความร้อนได้ ดังนั้นข้อค้นพบของการศึกษานี้จึงอาจจำกัดในสภาพที่ระดับกิจกรรมเปลี่ยนแปลงได้ อีกประการหนึ่งคือการศึกษานี้ได้ดำเนินการทดลองในช่วงฤดูกาลเดียวกันเท่านั้น ในขณะที่ลักษณะสภาพอากาศของฤดูกาลที่แตกต่างกันอาจส่งผลต่อความรู้สึกเชิงความร้อนและลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวหนังได้ ดังนั้นผลของการศึกษานี้จึงอาจค่อนข้างจำกัดสำหรับเงื่อนไขสภาพแวดล้อมอื่น นอกจากนี้แม้ว่าผลการศึกษาเบื้องต้นในการศึกษานี้ได้ชี้ให้เห็นว่าการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมทั้งทางร่างกายและความรู้สึกของแต่ละคนแตกต่างกันไปแม้อยู่ในสภาวะความร้อนเดียวกัน ซึ่งความแตกต่างนี้อาจมีสาเหตุจากลักษณะทางร่างกายของแต่ละคนทั้งเพศ อายุ และดัชนีมวลกาย อย่างไรก็ตามวิธีการวิจัยยังมีขนาดค่อนข้างเล็กและทั้งหมดมีอายุใกล้เคียงกัน ดังนั้นเพื่อความชัดเจนของผลการศึกษาที่สามารถใช้ได้กับสภาพแวดล้อมและบุคคลที่หลากหลายในอนาคตควรต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมโดยเพิ่มขนาดและความหลากหลายของกลุ่มตัวอย่างที่เข้าร่วมการทดลอง รวมทั้งควรได้มีการศึกษาตรวจสอบในช่วงฤดูกาลอื่นเพิ่มเติม

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอกของผู้เขียนที่หนึ่งซึ่งได้รับการสนับสนุนทุนการศึกษาจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ในโครงการทุนร่วมผลิตบัณฑิตวิจัยคุณภาพสูง (Excellent Research Graduate Scholarship - EreG)

เอกสารอ้างอิง

นงลักษณ์ วิรัชชัย. (2555). การกำหนดขนาดตัวอย่างในการทดสอบสมมุติฐานวิจัย. สืบค้นเมื่อ 10 ตุลาคม 2564, จาก <http://llskill.com/web/files/GPower.pdf>

- Arens, E., & Zhang H. (2006). The skin's role in human thermoregulation and comfort. In N. Pan and P. Gibson (Eds.), *Thermal and Moisture Transport in Fibrous Materials* (Issue January 2020). <https://doi.org/10.1533/9781845692261.3.560>
- Aryal, A., & Becerik-Gerber, B. (2019). Skin temperature extraction using facial landmark detection and thermal imaging for comfort assessment. *BuildSys 2019 - Proceedings of the 6th ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Buildings, Cities, and Transportation*, 71-80. <https://doi.org/10.1145/3360322.3360848>
- ASHRAE. (2017). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. ASHRAE Inc.
- Chaudhuri, T., Soh, Y. C., Li, H., & Xie, L. (2020). Machine learning driven personal comfort prediction by wearable sensing of pulse rate and skin temperature. *Building and Environment*, 170. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106615>
- Chaudhuri, T., Zhai, D., Chai, Y., Li, H., & Xie, L. (2018). Random forest based thermal comfort prediction from gender-specific physiological parameters using wearable sensing technology. *Energy & Buildings*, 166, 391-406. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.035>
- Choi, J. H., & Loftness, V. (2012). Investigation of human body skin temperatures as a bio-signal to indicate overall thermal sensations. *Building and Environment*, 58, 258-269. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.07.003>
- Choi, J. H., & Yeom, D. (2017). Study of data-driven thermal sensation prediction model as a function of local body skin temperatures in a built environment. *Building and Environment*, 121, 130-147. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.004>
- Cosma, A. C., & Simha, R. (2019). Using the contrast within a single face heat map to assess personal thermal comfort. *Building and Environment*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106163>
- Dai, C., Zhang, H., Arens, E., & Lian, Z. (2017). Machine learning approaches to predict thermal demands using skin temperatures : Steady-state conditions. *Building and Environment*, 114, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.005>
- Deng, Z., & Chen, Q. (2018). Artificial neural network models using thermal sensations and occupants' behavior for predicting thermal comfort. *Energy and Buildings*, 174, 587-602. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.060>
- Deng, Z., & Chen, Q. (2020). Development and validation of a smart HVAC control system for multi-occupant offices by using occupants' physiological signals from wristband. *Energy and Buildings*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109872>
- Fanger, P.O. 1970. *Thermal Comfort Analysis and Application in Environmental Engineering*. New York: McGraw-Hill.

- Faridah, F., Waruwu, M. M., Wijayanto, T., Budiarto, R., Pratama, R. C., Prayogi, S. E., Nadiya, N. M., & Yanti, R. J. (2021). Feasibility study to detect occupant thermal sensation using a low-cost thermal camera for indoor environments in Indonesia. *Building Services Engineering Research and Technology*, 2. <https://doi.org/10.1177/0143624421994015>
- FLIR. (2013). User's manual FLIR Ex series. FLIR Systems. Retrieved from <https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/flir-ex-series-user-manual.pdf>
- Geng, Y., Ji, W., Lin, B., & Zhu, Y. (2017). The impact of thermal environment on occupant IEQ perception and productivity. *Building and Environment*, 121, 158-167. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.022>
- Ghahramani, A., Castro, G., Becerik-Gerber, B., & Yu, X. (2016). Infrared thermography of human face for monitoring thermoregulation performance and estimating personal thermal comfort. *Building and Environment*, 109, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.005>
- Katić, K., Li, R., & Zeiler, W. (2020). Machine learning algorithms applied to a prediction of personal overall thermal comfort using skin temperatures and occupants' heating behavior. *Applied Ergonomics*, 85. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103078>
- Kim, J., Schiavon, S., & Brager, G. (2018). Personal comfort models - A new paradigm in thermal comfort for occupant-centric environmental control. *Building and Environment*, 132, 114-124. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.023>
- Li, D., Menassa, C. C., & Kamat, V. R. (2017). Personalized human comfort in indoor building environments under diverse conditioning modes. *Building and Environment*, 126, 304-317. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.004>
- Li, D., Menassa, C. C., & Kamat, V. R. (2018). Non-intrusive interpretation of human thermal comfort through analysis of facial infrared thermography. *Energy and Buildings*, 176, 246-261. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.02>
- Li, D., Menassa, C. C., Kamat, V. R., & Byon, E. (2020). HEAT - Human Embodied Autonomous Thermostat. *Building and Environment*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106879>
- Liu, S., Schiavon, S., Das, H. P., Jin, M., & Spanos, C. J. (2019). Personal thermal comfort models with wearable sensors. *Building and Environment*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106281>
- Lu, S., Hameen, E. C., & Zou, Y. (2019). An interactive building control for the integrative HVAC system featuring personalized cooling in office buildings. *ASHRAE Transactions*, 125, 389-397.

- Lu, S., Wang, W., Wang, S., & Hameen, E. C. (2019). Thermal comfort-based personalized models with non-intrusive sensing technique in office buildings. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9 (9). <https://doi.org/10.3390/app9091768>
- Mujan, I., Anđelković, A. S., Munćan, V., Kljajić, M., & Ružić, D. (2019). Influence of indoor environmental quality on human health and productivity - A review. *Journal of Cleaner Production*, 217, 646-657. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.307>
- Pavlin, B., Pernigotto, G., Cappelletti, F., Bison, P., Vidoni, R., & Gasparella, A. (2017). Real-time monitoring of occupants' thermal comfort through infrared imaging: A preliminary study. *Buildings*, 7 (1). <https://doi.org/10.3390/buildings7010010>
- Pigliautile, I., Casaccia, S., Morresi, N., Arnesano, M., Pisello, A. L., & Revel, G. M. (2020). Assessing occupants' personal attributes in relation to human perception of environmental comfort: Measurement procedure and data analysis. *Building and Environment*, 177. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106901>
- Pritoni, M., Salmon, K., Sanguinetti, A., Morejohn, J., & Modera, M. (2017). Occupant thermal feedback for improved efficiency in university buildings. *Energy and Buildings*, 144, 241-250. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.048>
- Salehi, B., Ghanbaran, A. H., & Maerefat, M. (2020). Intelligent models to predict the indoor thermal sensation and thermal demand in steady state based on occupants' skin temperature. *Building and Environment*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106579>
- Wang, Z., de Dear, R., Luo, M., Lin, B., He, Y., Ghahramani, A., & Zhu, Y. (2018). Individual difference in thermal comfort: A literature review. *Building and Environment*, 138, 181-193. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.040>
- Wang, Z., Zhang, H., He, Y., Luo, M., Li, Z., Hong, T., & Lin, B. (2020). Revisiting individual and group differences in thermal comfort based on ASHRAE database. *Energy and Buildings*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110017>
- Xiong, J., Zhou, X., Lian, Z., You, J., & Lin, Y. (2016). Thermal perception and skin temperature in different transient thermal environments in summer. *Energy and Buildings*, 128, 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.085>
- Yang, B., Cheng, X., Dai, D., Olofsson, T., Li, H., & Meier, A. (2019). Real-time and contactless measurements of thermal discomfort based on human poses for energy efficient control of buildings. *Building and Environment*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106284>