
สภาวะน่าสบาย : พื้นฐานและแบบจำลองสำหรับภูมิอากาศเขตร้อนชื้น

Thermal comfort : Basics and Models for Hot and Humid Climates

อาจารย์ภัทรนันท์ ทักขนันท์

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทคัดย่อ

บทความนี้ปูพื้นฐานความรู้เรื่องสภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิเพื่อการออกแบบอาคารในเขตร้อนชื้น โดยเสนอคำจำกัดความของสภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิ, ดัชนีวัดสภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิ, เขตสภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิ, และแบบจำลองสภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิ โดยเฉพาะแบบจำลองแบบตายตัว (Static or constancy model) ของ Fanger ที่เรียกว่า PMV และ (Adaptive model) บทความนี้ยังนำเสนองานวิจัยที่มุ่งเน้นแบบจำลองสองแบบนี้ในด้านความสัมพันธ์กับการปรับตัวทางอุณหภูมิ และการนำไปใช้ในการออกแบบอาคารให้เกิดสภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิ ในขณะที่แบบจำลอง PMV คำนึงถึง 4 ตัวแปรทางกายภาพ (อุณหภูมิอากาศ, ความเร็วลม, อุณหภูมิเฉลี่ยจากการแผ่รังสีความร้อน และความชื้นสัมพัทธ์) และ 2 ตัวแปรบุคคล (เครื่องแต่งกาย และระดับกิจกรรม) โดยไม่เน้นความสำคัญของสภาพแวดล้อมภายนอก ซึ่งนำไปสู่การควบคุมสภาวะภายในอาคารที่พึ่งพาระบบปรับอากาศทางกล แบบจำลองแบบปรับได้กลับสนับสนุนการแปรเปลี่ยนของอุณหภูมิภายในและความสามารถในการปรับตัวทางอุณหภูมิของผู้ใช้อาคาร อันนำไปสู่การขยายขอบเขตความสบายของผู้ใช้อาคารและแนวทางในการออกแบบตามสภาวะแวดล้อมและการประหยัดพลังงาน บทความนี้ได้เสนอเขตสภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิสำหรับประเทศไทยโดยใช้แบบจำลองแบบปรับได้

คำสำคัญ: สภาวะน่าสบาย, ภูมิอากาศเขตร้อนชื้น, เขตสภาวะน่าสบาย, แบบจำลองแบบตายตัว, แบบจำลองแบบปรับได้

Abstract

This article gives a basic knowledge of thermal comfort for building design in hot and humid climates including the definition of thermal comfort, thermal indices, thermal comfort limit, and models of thermal comfort and preference, in particular, the static or constancy model, Fanger's Predicted Mean Vote (PMV), and the adaptive model. It reviews some research works focusing on the two models which show their relations to thermal adaptation and the implications of the models for thermal design of buildings. Whilst the PMV model combining four physical variables (air temperature, air velocity, mean radiant temperature, and relative humidity), and two personal variables (clothing insulation and activity level) with minimal recognition of outdoor climatic context contributes to a reliance on mechanical cooling to control indoor conditions, the adaptive model advocates the variation in indoor temperature and thermal adaptation of building occupants, thus enhancing the occupants' comfort limit and leading to environmentally responsive design and reducing energy consumption. In this article, the comfort zone for Thailand was proposed using the adaptive model.

Keywords: Thermal comfort, Hot and humid climates, Comfort zone, Static model, Adaptive model

การออกแบบสถาปัตยกรรมโดยคำนึงถึงสภาวะน่าสบายเราต้องหาว่าความสบายของผู้ใช้อาคาร คือ อะไร และจะออกแบบอย่างไร เพื่อให้เกิดสภาวะน่าสบายนั้น จากสภาวะน่าสบายของมนุษย์ อันประกอบด้วยสภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิ (Thermal comfort) สภาวะน่าสบายทางสายตา/การมองเห็น (Visual comfort) สภาวะน่าสบายทางหู/การได้ยินเสียง (Acoustic comfort) และสภาวะน่าสบายทางด้านคุณภาพอากาศ (Indoor air quality) บทความนี้จะครอบคลุมเรื่องสภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิเท่านั้น

พื้นฐานการออกแบบเพื่อความสะดวกสบายทางอุณหภูมิ

“ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง ผู้ที่สามารถปรับตัวได้มีความสามารถในการอยู่รอดเหนือกว่าผู้ที่ได้ปรับตัวแล้ว” (Auliciems and Szokolay, 1997)

การใช้ชีวิตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ถูกควบคุม ทำให้มนุษย์ซึ่ง ครั้งหนึ่งโดยธรรมชาติสามารถปรับตัวให้เกิดความเคยชินกับสภาวะที่แตกต่างกันเกิดความเคยตัวและความสามารถในการปรับตัวเพื่อการดำรงชีวิตภายใต้สภาวะต่างๆ ลดลง ความสามารถในการอยู่รอดจึงถูกจำกัดลงด้วยเช่นกัน

ขั้นตอนแรกในการออกแบบเพื่อให้เกิดความสะดวกสบายทางอุณหภูมิ คือ การวิเคราะห์ข้อมูลอากาศ และกำหนดขอบเขตของสภาวะน่าสบายเพื่อทำความเข้าใจให้ชัดเจนว่า สภาวะที่ต้องการควรเป็นอย่างไร

การออกแบบสถาปัตยกรรมเพื่อความเป็นอยู่ที่ดี นอกจากจะต้องคำนึงถึงการสร้างสภาวะน่าสบายแล้ว ยังควรกระตุ้น กระบวนการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมของผู้ใช้อาคารโดยไม่ทำให้เกิดอาการเจ็บป่วยเราจำเป็นต้องสร้างสมดุลระหว่าง การตอบสนองทางร่างกายให้น้อยที่สุด และการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมให้มากที่สุด

ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา นักวิจัยจำนวนมากในภูมิภาคต่างๆ ได้ทำการศึกษาเรื่องการทำงานของร่างกายมนุษย์ในการตอบสนองต่อสภาวะทางอุณหภูมิที่แตกต่างกัน และได้มีความพยายามที่จะกำหนดขอบเขตสภาวะน่าสบายให้มีขึ้น การศึกษาที่สำคัญสำหรับภูมิอากาศเขตร้อนชื้นมีดังปรากฏอยู่ในบทความนี้

สรีรวิทยาขั้นพื้นฐาน

ร่างกายมนุษย์ผลิตความร้อนอย่างต่อเนื่องโดยกระบวนการเผาผลาญอาหารด้วยอัตราที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับขนาดของร่างกายและระดับกิจกรรม เพื่อที่จะรักษาอุณหภูมิปกติของร่างกายที่ 37°C เราจะต้องรักษาสมดุลความร้อนระหว่างร่างกายและสภาพแวดล้อม ความร้อนส่วนเกินจาก

ร่างกายจะถูกขับออกสู่ภายนอกโดยการแผ่รังสี การพาความร้อน หรืออาจรวมถึงการนำความร้อน และการระเหยเป็นไอน้ำ

สมดุลความร้อนของร่างกายสามารถอธิบายได้จาก $M \pm R \pm Cv \pm Cd - E = \Delta S$ (W) สมการ 1 (Auliciems and Szokolay, 1997)

โดยที่ M คือ อัตราการเผาผลาญอาหาร
R คือ การแผ่รังสีความร้อนรวม
E คือ ความร้อนสูญเสียจากการระเหย
Cv คือ ความร้อนในกระบวนการพาความร้อน
Cd คือ ความร้อนในกระบวนการนำความร้อน
 ΔS คือ ค่าเปลี่ยนแปลงของความร้อนสะสม

สมดุลความร้อนคงอยู่ต่อเมื่อ DS มีค่าเป็นศูนย์ ถ้ามากกว่าศูนย์ อุณหภูมิร่างกายจะสูงขึ้นถึงภายในช่วงหนึ่งเกินกว่านั้นจะเกิดอาการความร้อนขึ้นสูงเฉียบพลันเกินกว่าที่ร่างกายจะทนได้ ถ้าน้อยกว่าศูนย์อุณหภูมิร่างกายจะลดต่ำลง

คำจำกัดความของสภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิ

ASHRAE กำหนดให้สภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิ คือ สภาวะทางจิตใจที่บ่งบอกถึงความรู้สึกพึงพอใจกับสภาพแวดล้อมทางอุณหภูมิ ซึ่งเกิดจากการประเมินตามความรู้สึกส่วนตัว (ASHRAE, 1992)

สมดุลความร้อนและสภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิ มีใช้อย่างเดียวกัน ถึงแม้ว่าสมดุลความร้อนจะอยู่บนพื้นฐานของความเป็นกลางทางอุณหภูมิ ในร่างกายซึ่งอาจเป็นเงื่อนไขแรกของสภาวะน่าสบาย สภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิยังเกี่ยวข้องกับปัจจัยเพิ่มเติมอื่นๆ เช่น ประสิทธิภาพ ปัจจัยทางสังคม-วัฒนธรรม อุปนิสัย และความคาดหวัง

ปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะน่าสบาย

การถ่ายเทความร้อนจากร่างกายขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สามารถจัดอยู่ใน 3 กลุ่ม ดังนี้ (Szokolay, 1987)

ตัวแปรทางด้านสภาพแวดล้อม ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ การเคลื่อนที่ของอากาศ ความชื้น และการแผ่รังสีความร้อน

ตัวแปรทางด้านบุคคล ได้แก่ อัตราการเผาผลาญอาหาร เสื้อผ้า

ตัวแปรเสริม ได้แก่ อาหารและเครื่องดื่ม การปรับตัวเข้ากับสภาพอากาศ รูปร่าง ไขมันใต้ผิวหนัง อายุและเพศ

อุณหภูมิอากาศเป็นตัวแปรทางด้านสภาพแวดล้อมที่สำคัญที่สุด เพราะเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดการพาความร้อนถ่ายเทออกจากผิวหนัง การเคลื่อนที่ของอากาศช่วยเร่งกระบวนการดังกล่าว และยังมีผลต่อการระเหยของความร้อนที่ผิวหนัง จึงเพิ่มการสูญเสียความร้อนโดยวิธีการระเหยกลายเป็นไอ ความชื้นในอากาศมีผลต่อการทำความเย็นโดยการระเหยกลายเป็นไวด้วยเช่นกัน หากความชื้นสัมบูรณ์ (ความชื้นในอากาศ) อยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 กรัมต่อกิโลกรัม จะมีผลเพียงเล็กน้อยต่อความรู้สึก ในการรับรู้ความร้อนขณะที่ความชื้นสูง (ประมาณ 12 กรัมต่อ กิโลกรัมหรือมากกว่า) จะจำกัดการสูญเสียความร้อนโดยวิธีการระเหยกลายเป็นไอการแผ่รังสีความร้อนเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุที่อุณหภูมิต่างกัน ขึ้นอยู่กับ MRT หรืออุณหภูมิเฉลี่ยจากการแผ่รังสีของพื้นผิวโดยรอบมาสู่ร่างกายค่านี้ได้จากการถ่วงน้ำหนักค่ามุมการแผ่รังสีที่กระทำต่อแต่ละพื้นผิว

การเผาผลาญอาหารเป็นกระบวนการทางชีววิทยาในการเปลี่ยนแปลงอาหารมาใช้เป็นพลังงานสำหรับการทำงานของร่างกาย อัตราการเผาผลาญอาหารขึ้นอยู่กับระดับของกิจกรรม ดังที่ ได้อธิบายในตอนต้น ณ ระดับกิจกรรมหนึ่งอัตราการเผาผลาญอาหารขึ้นอยู่กับอายุ เพศ และเป็นสัดส่วนกับน้ำหนัก และขนาดของร่างกายGivoni (1976) ชี้ให้เห็นว่าเสื้อผ้ามี อิทธิพลสำคัญต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างร่างกายและสภาพแวดล้อมเป็นสิ่งที่กันความร้อนจากการพาและการแผ่รังสีที่จะออกไปสู่สภาพแวดล้อม อีกทั้งยังขัดขวางในกระบวนการระเหยของเหงื่อ ค่า clo เป็นหน่วยที่ใช้กำหนดระดับความเย็นจนจนกันความร้อนรวมของเสื้อผ้าที่ห่อหุ้มร่างกายทั้งหมด โดยมีค่าการส่งผ่านความร้อนเฉลี่ย (U-value) ที่ 6.45 วัตต์ต่อตารางเมตรเคลวิน

ตัวแปรเสริมได้แก่ อาหารและเครื่องดื่ม การปรับตัวเข้ากับ สภาพอากาศ รูปร่าง ไขมันใต้ผิวหนัง อายุและเพศ อาหารและเครื่องดื่มมีผลโดยตรงต่ออัตราการเผาผลาญอาหาร การปรับตัวให้เข้ากับสภาพอากาศสามารถเป็นได้ทั้งการปรับตัวในระยะสั้น (20-30 นาที) และระยะยาว (6 เดือนขึ้นไป) (Auliciems and Szokolay, 1997) ร่างกายมนุษย์ตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน ขึ้นกับการเปิดเผยร่างกายสู่ภายนอก เขตสภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจเจกบุคคล รูปร่างและไขมันใต้ผิวหนังก็มีความสำคัญ เพราะการกระจายความร้อนขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของพื้นผิวสัมผัสของร่างกายต่อปริมาตร ดังนั้น คนผอมจึงสูญเสียความร้อนจากร่างกายให้กับสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าคนอ้วน ไขมันใต้ผิวหนังเป็นฉนวนความร้อนอย่างดีจึงเป็นสาเหตุให้คนอ้วนต้องการอุณหภูมิต่ำกว่า

การศึกษาเรื่องสภาวะอากาศขั้นพื้นฐาน

ได้มีความพยายามในการที่จะอธิบายผลรวมซึ่งเกิดจากตัวแปรทางสภาพแวดล้อมทั้งสี่ (อุณหภูมิอากาศ การเคลื่อนที่ของอากาศ ความชื้นและการแผ่รังสีความร้อน) ที่มีต่อสภาวะอากาศ ให้อยู่ในหนึ่งดัชนีเพื่อกำหนดเขตสภาวะน่าสบายแผนภูมิ "ไซโครเมตริก" และแผนภูมิ "ไบโอไคลเมติก" ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อสื่อแสดงถึงสภาวะบรรยากาศด้วยภาพ แผนภูมิแรกได้รับการพัฒนาขึ้นโดย Carrier ในปี 1911 (Carrier, 1911) ถือว่ามีความเที่ยงตรงแม่นยำสามารถรวมตัวแปรทางสภาพแวดล้อมมากมายไว้ได้ในแผนภูมิเดียว อุณหภูมิกระเปาะแห้งแสดงอยู่บนแกนนอน (X-axis) ส่วนแกนตั้ง (Y-axis) แสดงความชื้นสัมบูรณ์ หรือความดันไอน้ำในอากาศ ต่อมา ASHRAE ได้กำหนดเขตน่าสบายลงบนแผนภูมินี้ แผนภูมิหลังได้รับการพัฒนาโดย Olgay แสดงความชื้นสัมพัทธ์บนแกน X และอุณหภูมิกระเปาะแห้งบนแกน Y จากนั้นเขตน่าสบายได้ถูกวางลงบนแผนภูมิเพื่อแสดงช่วงของสภาวะน่าสบาย

การศึกษาและดัชนีวัดความสบายทางอุณหภูมิ

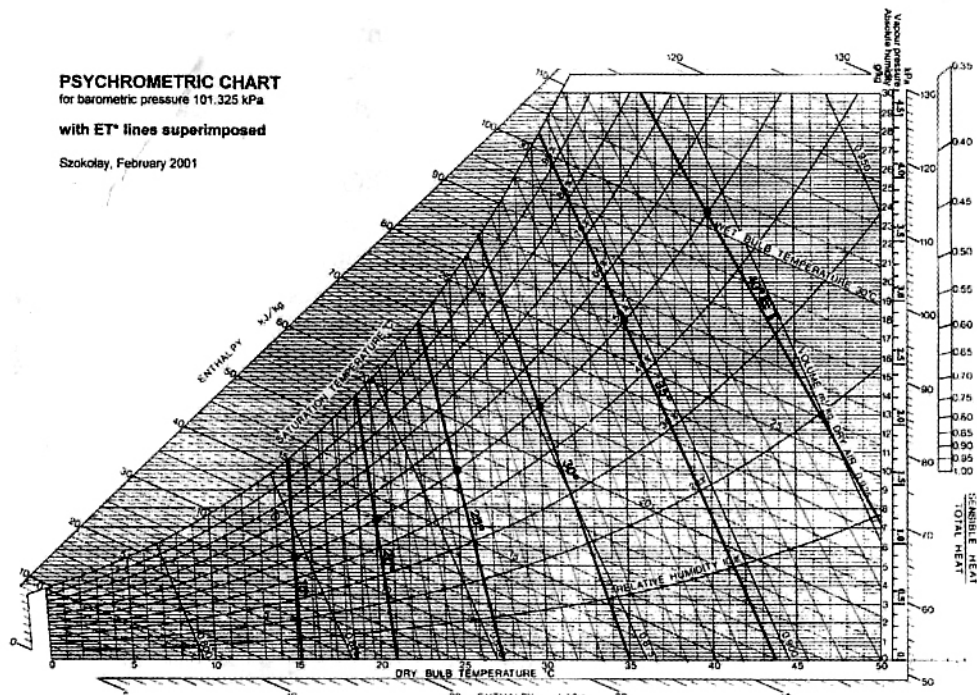
สองวิธีที่มีอยู่เพื่อใช้หาสภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิของมนุษย์ ได้แก่ การใช้แบบสอบถามพร้อมกับการตรวจวัดสภาวะอากาศ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันมากในการลงพื้นที่ศึกษาจริง และอีกวิธีคือการตรวจวัดการตอบสนองของร่างกาย เช่น การมีเหงื่อ ความชื้นที่ผิวหนัง หรืออุณหภูมิที่ผิว ซึ่งเป็นวิธีที่ได้ในห้องปฏิบัติการ

นักวิจัยส่วนมากใช้เกณฑ์การให้คะแนน 7 ระดับ ไม่ว่าจะเป็นของ Bedford (Bedford, 1936) หรือ ASHRAE เพื่อบ่งชี้ระดับความสบายเกณฑ์ของ Bedford แสดงระดับที่ผลรวมทางอุณหภูมิกระทบต่อความสบาย ในขณะที่เกณฑ์ของ ASHRAE สื่อถึงการตัดสินความรู้สึกรับรู้ในเชิงของความพอใจ

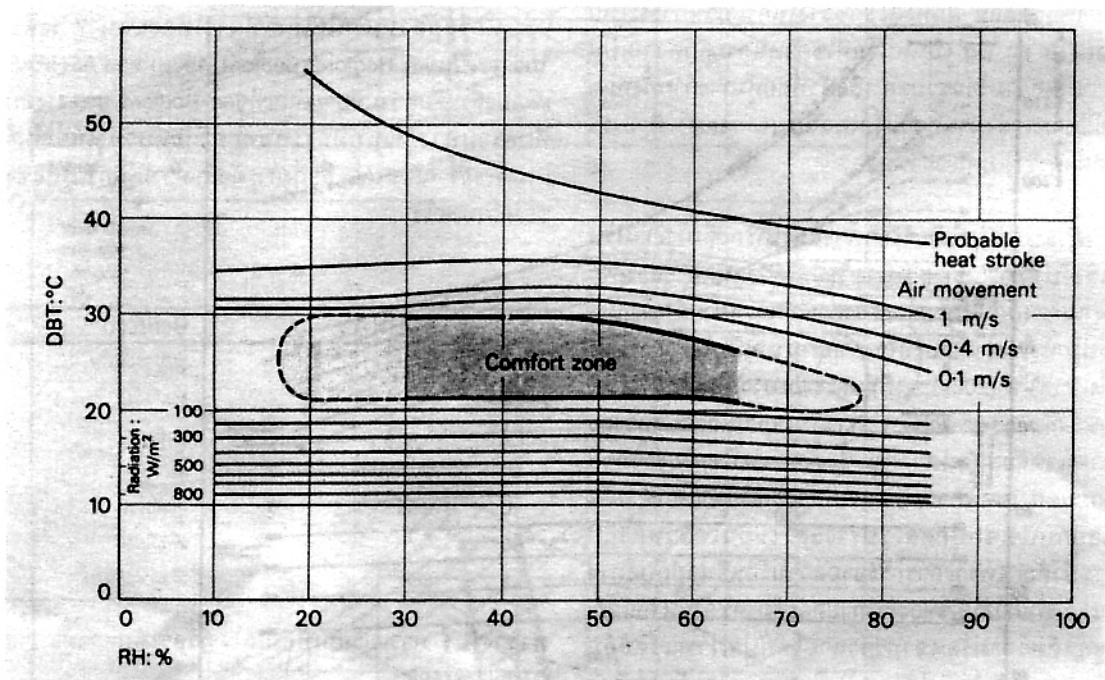
	ASHRAE	Bedford
+3	ร้อน	อุ่นมากเกินไป
+2	อุ่น	อุ่นเกินไป
+1	ค่อนข้างอุ่น	อุ่นสบาย
0	เป็นกลาง	สบาย
-1	ค่อนข้างเย็น	เย็นสบาย
-2	เย็น	เย็นเกินไป
-3	หนาว	เย็นมากเกินไป

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบเกณฑ์วัดระดับความสบาย (McIntyre, 1980)

ตามที่ได้กล่าวแล้วก่อนหน้านี้ ประสพการณ์ในอดีต ปัจจัยทางสังคม-วัฒนธรรม อาจมีอิทธิพลต่อระดับความพอใจทางอุณหภูมิของคนและสมดุลความร้อนได้หมายถึงความสบาย ในปีค.ศ.1981 Auliciems ได้เสนอแบบจำลองของความสบายทางอุณหภูมิโดยคิดจากปัจจัยทางร่างกายและจิตใจ ซึ่งเป็นที่มาของสมมุติฐานเรื่องการปรับตัวทางอุณหภูมิ



ภาพที่ 1 แผนภูมิไซโครเมตริก (ตาม Szokolay, 1980)



ภาพที่ 2 แผนภูมิไบโอไคลเมตริก (Koenigsberger et al, 1974-ปรับเพื่อเขตร้อนจากต้นแบบของ Olgyay, 1963)

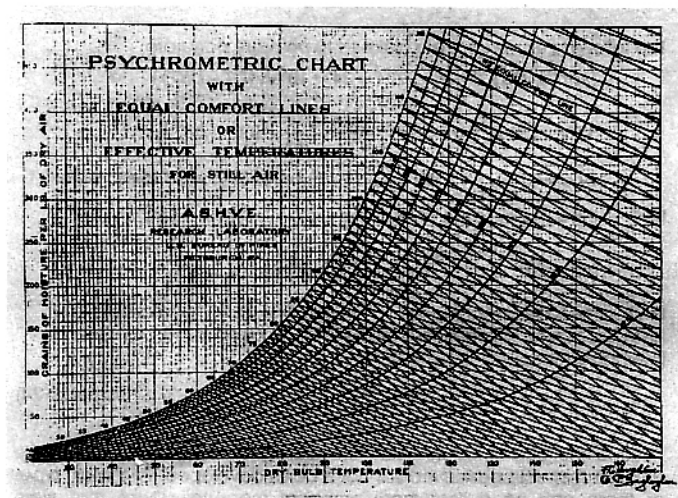
หลังจากการเสนอสมการสมมูลความร้อน (สมการที่ 1) โดย Gagge ในปีค.ศ.1936 มีสองรูปแบบที่ใช้กันโดยทั่วไป คือ "Two-node model" ที่ได้รับการพัฒนาโดย J B Pierce laboratories และสมการความสบายของ Fanger ซึ่งเป็นพื้นฐานของดัชนี PMV (Predicted Mean Vote) "Two-node model" พิจารณาการส่งผ่านความร้อนจากแกนภายในของร่างกายไปยังผิวหนัง และจากผิวหนังไปยังสภาพแวดล้อม ดัชนี PMV อิงเกณฑ์วัดระดับความสบายของ ASHRAE ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ในสมการทั้งสองยึดหลักพื้นฐานตามกฎเกณฑ์ทางสรีระ ส่วนค่าคงที่ต่างๆ และค่าสัมประสิทธิ์ในสมการ ได้มาจากการวัด

ดัชนีวัดความสบายทางอุณหภูมิมี 2 ดัชนี ดังนี้ ดัชนีที่ได้จากการสังเกตหรือประสบการณ์ ได้รับการพัฒนามาจากแบบสอบถาม อีกดัชนี คือ ดัชนีจากการวิเคราะห์ ได้มาจากการวิเคราะห์บนพื้นฐานเรื่องการเคลื่อนที่ของความร้อนจากกระบวนการเผาผลาญอาหารออกไปสู่สภาพแวดล้อม ได้มีการศึกษาแนวทางทั้งสองนี้โดยเฉพาะในแง่ของความ สัมพันธ์กับการปรับตัวทางอุณหภูมิและการนำต้นแบบนี้ ไปใช้ในการออกแบบอาคารเพื่อความสบายทางอุณหภูมิ

ในปีค.ศ.1997 Auliciems และ Szokolay ได้สำรวจ 20 ดัชนีที่มีการนำมาใช้บ่อย โดยรวมดัชนีที่ได้จากการสังเกต 9 ดัชนีที่สำคัญ ได้แก่ Effective temperature (ET), Corrected effective temperature (CET), Wet bulb globe temperature (WBGT), Operative temperature (OT), Equivalent temperature (EqT), Resultant temperature (RT), Equatorial comfort index (ECI), และ Tropical summer index (Tsi) ส่วนดัชนีที่ได้จากการวิเคราะห์ 11 ดัชนีที่สำคัญประกอบด้วย Thermal strain index (TSI), Thermal Acceptance Ratio (TAR), Predicted 4-hour sweat rate (P4SR), Heat stress index (HSI), Relative strain index (RSI), Index of thermal stress (ITS), Predicted mean vote (PMV), New effective temperature (ET*), Standard effective temperature (SET), Subjective temperature (ST), และ Index of thermal sensation (TS and DISC) ทั้งนี้ดัชนีส่วนมากใช้สำหรับสภาวะภายในอาคารภายใต้สภาวะที่แตกต่างกันแต่ดัชนีก็มีข้อจำกัดแตกต่างกันในด้านการประเมินผลที่สูงหรือต่ำเกินไปของบางตัวแปรที่ใช้วัด เช่น ความชื้นและการเคลื่อนที่ของอากาศ ย่อหน้าต่อไปจะบรรยายถึงดัชนีสำคัญบางตัวที่ควรนำมาพิจารณาในการออกแบบเพื่อความสบายทางอุณหภูมิสำหรับภูมิอากาศเขตร้อนชื้น

Effective temperature (ET)

Effective temperature (ET) ได้รับการพัฒนาโดย Houghten และ Yagloglou ในปีค.ศ.1923 สื่อโดยใช้ชุดของเส้นแสดง ความสบายในระดับที่เท่ากันบนแผนภูมิไซโครเมตริก เส้นนี้คือค่าอุณหภูมิอากาศ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 100 % ที่หากปราศจากการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ จะให้ความ รู้สึกทางอุณหภูมิในระดับเดียวกัน ภายใต้สภาวะที่กำหนด มาของอุณหภูมิอากาศ ความชื้น การเคลื่อนที่ของอากาศ และอุณหภูมิเฉลี่ยจากการแผ่รังสี Yaglou

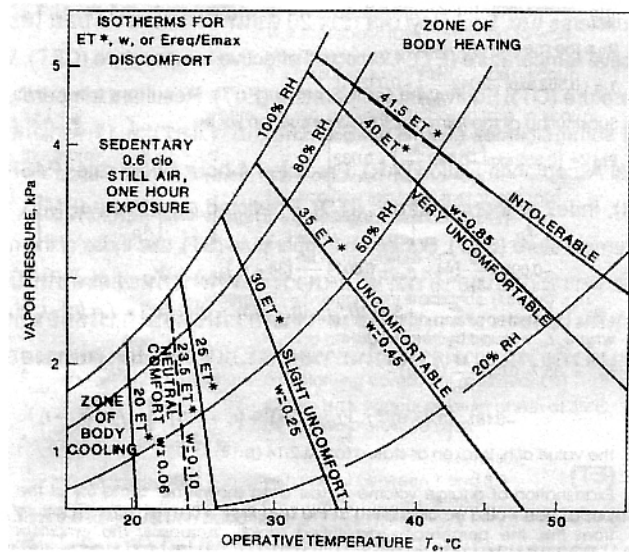


ภาพที่ 3 ภาพต้นฉบับของ ET โดย Yagloglou (Houghten and Yagloglou, 1923)

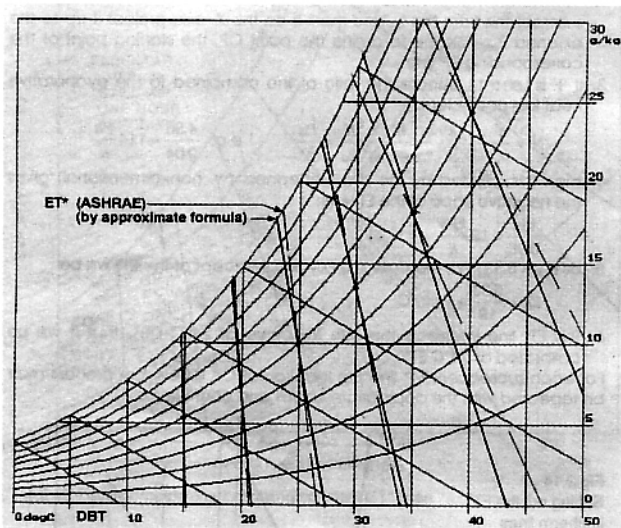
(ชื่อย่อ) ได้กล่าวไว้ในปี 1947 ว่า ET นี้ประเมินผลของความชื้นสูงเกินไปโดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ในปี 1950 Glickman และคณะยังได้ให้ข้อสังเกตไว้ว่า ET ประเมินผลจากความชื้นสูงเกินไปทั้ง ณ อุณหภูมิที่ให้ความเย็นสบาย และที่อุณหภูมิสูงมาก

New effective temperature (ET*)

ET* สำหรับวัดความสบายได้ถูกพัฒนามาจาก 'two-node model' ในสภาพแวดล้อมปิดที่มีสภาวะสม่ำเสมอเป็นอย่างเดียวกัน ET* คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 50% ที่สร้างความรู้สึกเดียวกันกับสภาพแวดล้อม เส้น ET* ทับกันพอดีกับค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้ง ณ เส้นความชื้นสัมพัทธ์ที่ 50% ความชันของแต่ละเส้น ET* ไม่เท่ากันเป็นผลมาจากการคำนวณที่ซับซ้อน จากที่แสดงในแผนภูมิไซโครเมตริก เส้น ET* ปกติที่ซ้อนทับอยู่จนถึงเส้นที่ 14°C ซ้อนอยู่กับเส้นตั้ง ของอุณหภูมิกระเปาะแห้ง แต่หลังจากตำแหน่งนี้ ความชันจะเพิ่มขึ้น ในปี 1991 Szokolay ได้สร้างสมการง่าย ๆ เพื่อใช้ประมาณเส้น ET* สำหรับการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ สมการนี้ใช้ได้กับสภาวะปกติไปจนถึงเส้น ET* ที่ 32°C



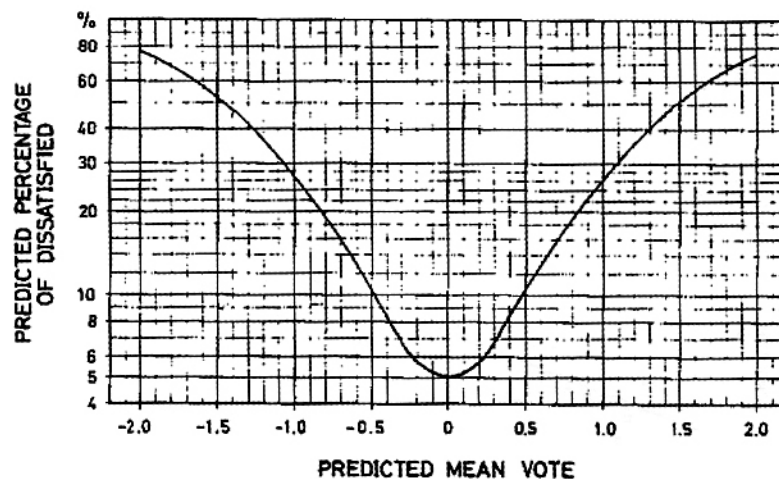
ภาพที่ 4 แผนภูมิไซโครเมตริก แสดงเส้น ET* (ASHRAE, 1985)



ภาพที่ 5 การเปรียบเทียบ ET* และ ET* ที่ได้จากการประมาณ (Szokolay, 1991)

Predicted mean vote (PMV)

ดัชนีวัดความรู้สึกทางอุณหภูมิหาได้จากสมการความสบาย โดยคิดจากตัวแปรทางสภาพแวดล้อม 4 ตัวแปร และตัวแปรทางด้านบุคคล 2 ตัวแปรเพื่อทำนายค่ากลางของความรู้สึกทางอุณหภูมิที่ได้จากการให้คะแนนตามเกณฑ์มาตรฐานของคนกลุ่มใหญ่ อีกหนึ่งตัวแปรที่เข้ามาเกี่ยวข้องในวิธีการนี้ คือ PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) ซึ่งตัดสินจำนวนร้อยละของคนกลุ่มใหญ่ที่สามารถคาดได้ว่า จะรู้สึกไม่สบายอย่างแน่นอน ภายใต้สภาพแวดล้อมที่กำหนด เส้นโค้งที่สร้างขึ้นจากผลการสังเกตแสดงค่า PPD เพื่อแสดงถึง PMV ณ ระดับที่ดีที่สุดที่ PMV เท่ากับ 0 ร้อยละ 5 ของจำนวนประชากรจะรู้สึกไม่พึงพอใจ และเหนือระดับนี้ขึ้นไป ค่า PPD จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดัชนีที่ได้จากการวิเคราะห์ PMV-PPD นี้สร้างพื้นฐานให้กับและรวมเข้าด้วยกันใน ISO 7730:1994, การตัดสินของดัชนี PMV และ PPD และการระบุสภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิ (ISO 7730, 1994)



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง PPD และ PMV (Fanger, 1972)

ปีค.ศ. 1980 Lee แนะนำดัชนี ET* เหมาะสมที่สุดในการกำหนดเขตสภาวะน่าสบายสำหรับลักษณะการพักอาศัยหรือสำนักงาน เพราะได้นำเรื่องการปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมมาพิจารณา ในปีค.ศ. 1952 Drysdale เสนอให้ภายใน 27°C อุณหภูมิ กระเปาะแห้งเป็นดัชนีวัดสภาวะทางอุณหภูมิที่ดีที่สุด แต่ในบางกรณีซึ่งต้องการวัดความไม่สบายตัวแปรทางสภาพแวดล้อมอื่นๆ เช่น ความชื้น รังสีความร้อน การเคลื่อนที่ของอากาศจำเป็นต้องถูกรวมไว้ในดัชนีด้วย

Fanger (ค.ศ. 1972) กล่าวว่าไว้ว่าคนทุกคนมีความพอใจทางอุณหภูมิเหมือนกันซึ่งขึ้นอยู่กับระดับกิจกรรมและค่า clo แบบจำลองแบบตายตัวของเขาซึ่งนำไปสู่มาตรฐานสภาวะอากาศภายในอาคาร ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอาคารทุกประเภท แบบจำลองนี้กำหนดขึ้นจากสภาวะที่ถูกควบคุมโดยการใช้เครื่องกลในการทำความเย็น โดยไม่คำนึงถึงสภาวะอากาศภายนอกอาคาร อย่างไรก็ตามผลการสำรวจจากแบบสอบถามความรู้สึกสบายของคนในพื้นที่จริงชี้ให้เห็นว่าความพอใจทางอุณหภูมิของคนขึ้นอยู่กับที่ตั้งทางภูมิศาสตร์และสภาพภูมิอากาศ

แบบจำลองแบบปรับได้เพื่อหาสภาวะน่าสบาย

พัฒนาการในช่วงหลังได้นำเสนอ “แบบจำลองแบบปรับได้” เป็นที่มาของมาตรฐานสำหรับอุณหภูมิที่แปรเปลี่ยนภายในอาคาร ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการปรับตัวของผู้ที่อยู่ในอาคาร งานของ Humphreys ในปี 1975 เป็นก้าวแรกของแบบจำลองแบบปรับได้ แสดงผลที่ชัดเจนทางสถิติว่าอุณหภูมิกลางหรืออุณหภูมิที่ความไม่สบายเกิดขึ้นน้อยที่สุดตามเกณฑ์ ที่กำหนด (ดูตารางที่ 1) เป็นผลมาจากการตอบสนองต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศ โดยผู้ที่อาศัยอยู่ภายในหรือภายนอกอาคาร ในช่วงระยะเวลาประมาณหนึ่งเดือน

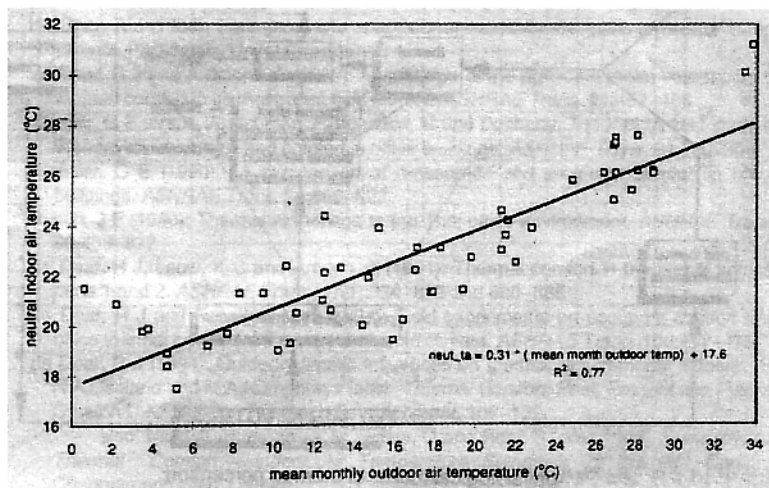
Auliciems (1981,1982) พบความสัมพันธ์ที่คล้ายคลึงกันมากกับงานของ Humphreys โดยใช้ทั้งกับอาคารไม่ปรับอากาศและอาคารปรับอากาศ แบบจำลองนี้ได้พัฒนาความพอใจทางอุณหภูมิอันเป็นผลมาจากการตอบสนองโดยทันทีของร่างกายต่อตัวแปรทางสภาพแวดล้อมภายในอาคาร (ได้จากเครื่องมือตรวจวัด) และองค์ประกอบทางด้านจิตใจ เช่น ประสิทธิภาพ ในอดีตและความคาดหวัง

$$T_n = 17.6 + 0.31 = T_{av} \quad \dots \text{สมการ 2}$$

โดยที่ T_{av} คือ อุณหภูมิภายในอาคารเฉลี่ยรายเดือน

T_n คือ อุณหภูมิกลาง

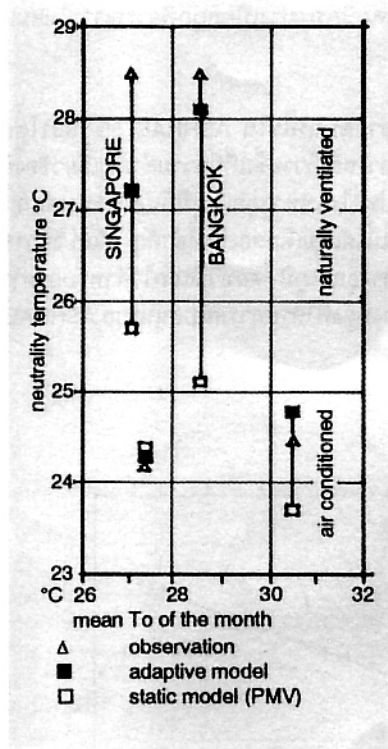
และให้ค่า T_n อยู่ระหว่าง 18.5 และ 28.5°C โดยเขตสภาวะน่าสบาย หาได้จาก 2.5°C สูงหรือต่ำกว่า T_n



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิภายในอาคารและอุณหภูมิภายในอาคารเฉลี่ยรายเดือน (de Dear, Brager & Cooper, 1997)

แบบจำลองแบบปรับได้ได้รับการปรับปรุงต่อมาโดย de Dear และคณะในปีค.ศ.1997 พบว่าอุณหภูมิภายในอาคารมีความสัมพันธ์ที่ปรับเปลี่ยนได้กับอุณหภูมิเฉลี่ยภายในอาคารและอุณหภูมิเฉลี่ยภายนอกอาคาร ความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งภายในและภายนอกอาคาร จะเห็นได้ในอาคารที่อาศัยการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติชัดเจนกว่าในอาคารปรับอากาศสอดคล้องกันกับข้อสังเกตที่ว่าอุดมคติในเรื่องอุณหภูมิของผู้ใช้อาคารได้รับอิทธิพลจากการประสบกับความร้อนทั้งภายในและภายนอกอาคารของเขา ความรู้สึกทางอุณหภูมิของมนุษย์ประกอบไปด้วย 3 กระบวนการที่เกี่ยวข้องกัน ได้แก่ กระบวนการทางพฤติกรรม ร่างกาย และจิตใจ ผลจากการสังเกตในอาคารปรับอากาศสอดคล้องกันกับการทำนายอุณหภูมิภายในที่เป็นที่พอใจที่สุดโดยใช้แบบจำลอง PMV โดยพบว่าการปรับตัวทางอุณหภูมิในอาคารดังกล่าวเป็นไปในเชิงพฤติกรรม ซึ่งได้รับอิทธิพลหลักมาจากการปรับการแต่งกายและความเร็วลมภายในอาคาร ตรงกันข้ามกับกรณีอาคารที่พึ่งพาการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ อุณหภูมิภายในที่น่าพอใจที่สุด มีช่วงกว้างถึงสองเท่าของที่คาดโดยการใช้นิยามแบบจำลอง PMV มีข้อเสนอแนะได้ว่าในบริบทของการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ กระบวนการปรับตัวทางร่างกาย (การปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อม) และทางจิตใจ (การปรับความคาดหวัง) มีผลมากกว่าการปรับพฤติกรรมและการปรับการแต่งกายและการปรับความเร็วลม

ภาพที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในอาคารจากการคาดหมายและผลจากการศึกษาในพื้นที่จริงในทำเลที่ตั้งต่างๆ ภาพแสดงให้เห็นว่าคนในพื้นที่เดียวกันมีความพอใจทางอุณหภูมิแตกต่างกัน โดยเฉพาะในอาคารที่ระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ ผลจากการสังเกตมีค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองแบบตายตัวมาก และแม้แต่เมื่อเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองแบบปรับได้ ผลจากการสังเกตยังคงสูงกว่าเล็กน้อย



ภาพที่ 8 อุณหภูมิกลางที่คาดหมายเปรียบเทียบกับผลจากการสำรวจในพื้นที่ศึกษา (Auliciems and Szokolay, 1997)

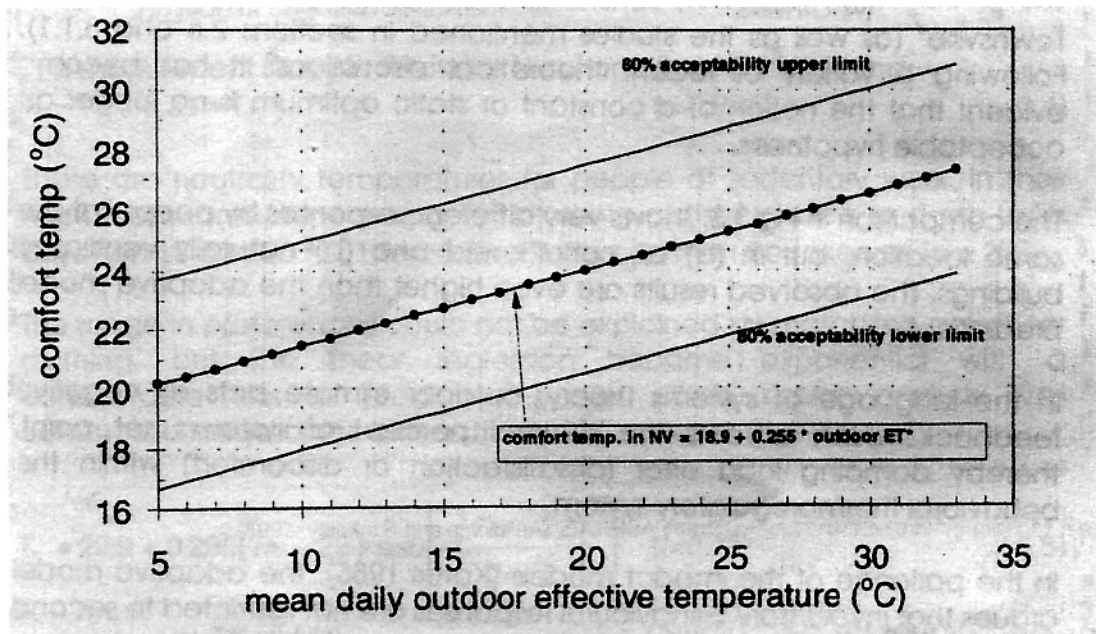
เมื่อใช้ ET^* ภายนอกอาคาร สมการที่เหมาะสม ควรเป็น

$$T_n = 18.9 + 0.255 ET^* \quad \dots \text{สมการ 3}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของ ET^* ในสมการนี้ต่ำกว่าใน สมการของ Auliciems ซึ่งใช้อุณหภูมิกระเปาะแห้ง ขณะที่ในสมการนี้ ET^* ยอมรับผลที่เกิดจาก ความชื้น

เขตสภาวะน่าสบาย

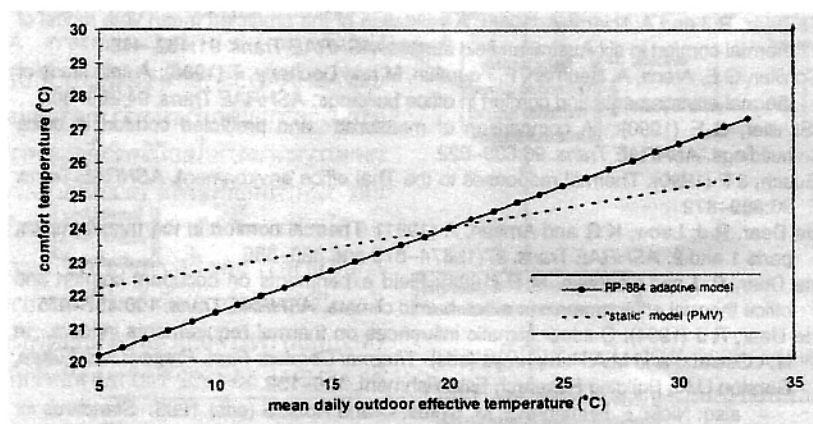
คำจำกัดความของเขตสภาวะน่าสบายของ ASHRAE เปลี่ยนแปลงตามกาลเวลา ครอบคลุมที่มีงานวิจัยใหม่ๆ เกิดขึ้น เนื่องจากมาตรฐานนี้เป็นมาตรฐานทางด้านอุณหภูมิ ผลกระทบที่ไม่ใช่ทางอุณหภูมิจะไม่ถูกนำมารวมไว้รูปแบบของขีดจำกัดบนของความชื้นได้เปลี่ยนแปลงมาโดยตลอด ประวัติศาสตร์ของการสร้างมาตรฐาน ASHRAE 55-1974 และ ASHRAE 55-1981 (ซึ่งเป็นแบบที่ปรับมาจากมาตรฐานแรกเพื่อความแตกต่างระหว่างฤดูร้อนและฤดูหนาว) เสนอเขตสภาวะน่าสบายโดยมีขีดจำกัดของความชื้นที่ประมาณ 4 และ 12 กรัมต่อกิโลกรัม (ความดันไอน้ำในอากาศ 0.6 ถึง 1.9 กิโลปาสคาล) ได้มาจากการพิจารณาเรื่องคุณภาพอากาศภายในอาคาร ขณะที่ความดันไอน้ำในอากาศที่ผิวหนังยากที่จะเปลี่ยนแปลงความดันไอน้ำในบรรยากาศจะเป็นสิ่งเดียวที่ควบคุมการระเหยกลายเป็นไอของเหงื่อ มาตรฐานถัดมาคือ ASHRAE 55-1992 ซึ่งกำหนดขีดจำกัดบนของเขตสภาวะ



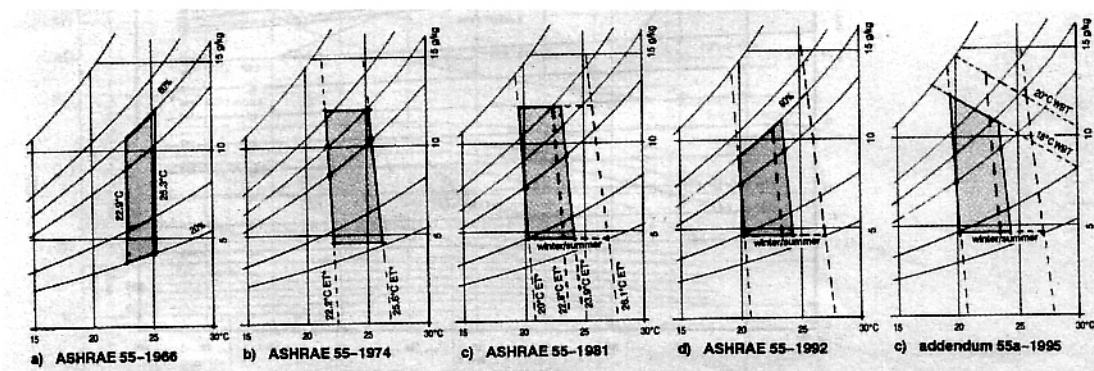
ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์จาก ASHRAE RP-884 และขีดจำกัด 80% ที่ยอมรับได้ (de Dear, Brager & Cooper, 1997)

ที่ควบคุมการระเหยกลายเป็นไอของเหงื่อ มาตรฐานถัดมา คือ ASHRAE 55-1992 ซึ่งกำหนดขีดจำกัดบนของเขตสภาวะน่าสบายด้วยความชื้นสัมพัทธ์ และ ASHRAE 55-1995a ซึ่งยึดตามอุณหภูมิกระเปาะเปียกถูกพิจารณาว่าไม่สมเหตุผลผล (Auliciems และ Szokolay, 1997)

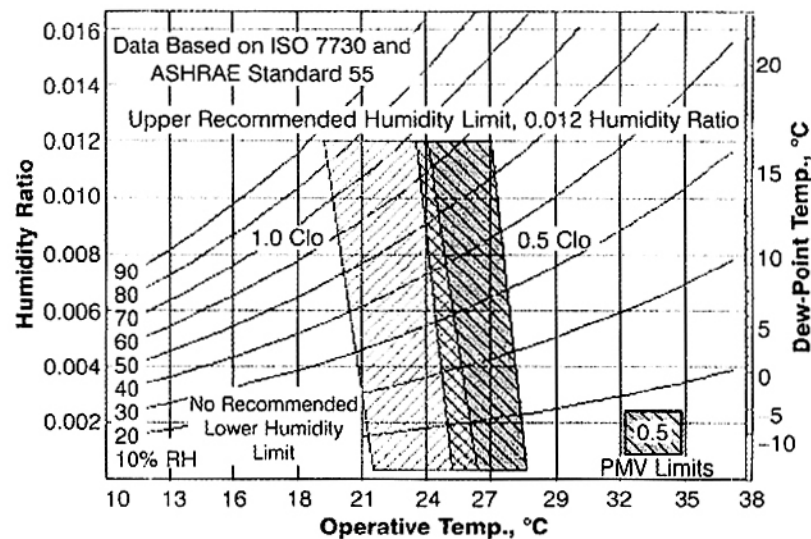
มาตรฐานใหม่ของ ASHRAE 55 ปี 2004 ได้กลับไปสู่ขีดจำกัดบนที่ใช้ใน ASHRAE 55-1981 โดยไม่มีการกำหนดขีดจำกัดล่างของเขตสภาวะน่าสบายเนื่องจากถือว่าไม่มีขีดจำกัดล่างของความชื้นที่มีความสำคัญเกี่ยวข้องกับสภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามมาตรฐานได้ยอมรับว่าอาจมีตัวแปรที่ไม่ใช่ทางอุณหภูมิมิมีผลกระทบต่อกรยอมรับสภาวะที่มีความชื้นต่ำมาก (Brager, G. And Olesen, B. 2004) มาตรฐานนี้ได้เพิ่มเติมสองสิ่งที่สำคัญ ได้แก่ วิธีการวิเคราะห์โดยใช้ดัชนี PMV-PPD และการนำเสนอแนวความคิดเรื่องการปรับตัวทางอุณหภูมิ โดยมีวิธีแยกไว้สำหรับอาคารที่ระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ พัฒนาการดังกล่าวมีที่มาจากโครงการวิจัยในช่วงหลังที่ได้รับการสนับสนุนจาก ASHRAE อาทิเช่น ASHRAE RP-884 (de Dear, R. and Brager, G.1997)



ภาพที่ 10 การเปรียบเทียบอุณหภูมิกลางที่ได้จากสมการและจากแบบจำลอง PMV สำหรับอาคารที่ระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ (de Dear, Brager&Cooper, 1997)



ภาพที่ 11 พัฒนาการของเขตสภาวะน่าสบายของ ASHRAE (Auliciems and Szokolay, 1997)



ภาพที่ 12 เขตสภาวะน่าสบายใน ASHRAE 55-2004

เพื่อที่จะออกแบบอาคารให้เหมาะสมกับสภาพอากาศของประเทศไทย จำเป็นอย่างยิ่งที่เราจะต้องเข้าใจเรื่องความคาดหวังต่อความสบายทางอุณหภูมิของผู้ที่ได้ปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมอย่างเต็มที่แล้ว ซึ่งจะแตกต่างจากผู้ที่เคยชินกับระบบปรับอากาศจากมาตรฐาน ASHRAE 55a-1995 ในเรื่อง "สภาวะแวดล้อมทางอุณหภูมิเพื่อการอยู่อาศัยของมนุษย์" ชีตจำกัดบนของอุณหภูมิในสภาวะคือ 26°C และชีตจำกัดบนของอุณหภูมิกระเปาะแห้งคือ 20°C (ASHRAE, 1995) อย่างไรก็ตาม การศึกษามากมายได้ให้ข้อสรุปว่าในภูมิภาคเขตร้อนชื้นซึ่งคนสามารถปรับตัว และ/หรือมีความหลากหลายในกระบวนการทางสรีรวิทยามีอุณหภูมิในสภาวะสูงกว่าภูมิภาคอื่น ผลจากการศึกษาโดย Busch ในปี 1992 แสดงความขัดแย้งกันระหว่างความต้องการสภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิของคนไทยและผู้ที่ไม่ได้ปรับตัวเข้ากับสภาพอากาศ เมื่อยึดร้อยละ 80 ของคนทำงานชาวไทยที่รู้สึกพอใจกับอุณหภูมิเป็นเกณฑ์ ชีตจำกัดบนของเขตสภาวะน่าสบายอยู่สูงถึง 28°C สำหรับกรณีของผู้ที่อยู่ในอาคารปรับอากาศ และ 31°C สำหรับผู้ที่อยู่ในอาคารที่ระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ

จากแผนภูมิไบโอไคลเมติกของ Olgyay เขตสภาวะน่าสบาย แสดงช่วงสภาวะความสบายที่เป็นที่ยอมรับ ซึ่งใช้ได้กับคนที่แต่งกายที่ค่า clo เท่ากับ 1 และทำงานในลักษณะนั่งอยู่กับที่ เขตสภาวะน่าสบายนี้ใช้ได้กับสภาพอากาศแบบอบอุ่นของอเมริกา ซึ่งตั้งอยู่ที่ประมาณละติจูด

40 องศาเหนือ โดยมีข้อแนะนำในการปรับดังนี้ เขตสภาวะน่าสบายควรสูงขึ้น 1 K ทุก 12° ละติจูดที่ลดลง และควรต่ำลง 0.6 K ทุก 0.1 clo ที่เพิ่ม ขึ้น และทุก 1 met* ที่เพิ่มขึ้น สามารถชดเชยได้โดยลดอุณหภูมิลง 2.5 K (Olgyay, 1953) ตัวอย่างเช่น กรุงเทพฯ ตั้งอยู่ประมาณที่ละติจูด 14 องศาเหนือ ดังนั้นชีตจำกัดบนของอุณหภูมิในสภาวะจะเป็น 28.2°C ซึ่งค่าอุณหภูมินี้ใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิกลางที่ได้จากการศึกษาของ Busch ชีตจำกัด บนจาก 28.2°C + 2.5 K จะเท่ากับ 30.7°C นอกจากนี้การ ทดสอบโดยกิจชัย จิตขจรวานิชในปี 1998 แสดงให้เห็นว่าชีตจำกัดบนของอุณหภูมิในสภาวะสูงถึง 31.5°C สอดคล้องกับ ผลของ Busch ในกรณีของอาคารที่ระบายอากาศโดยธรรมชาติ (*met เป็นหน่วยแสดงระดับการเผาผลาญอาหารที่เป็นผลมาจากระดับการทำกิจกรรมของร่างกาย มีค่า 58.2 W/m² ของพื้นที่ผิวของร่างกาย)

ผลงานวิจัยที่ผ่านมาจำนวนมากพิจารณาว่า แบบจำลองแบบปรับได้นำไปสู่มาตรฐานอุณหภูมิภายในอาคารที่แปรเปลี่ยนได้ ซึ่งช่วยพัฒนาความสามารถในการปรับตัวของผู้ใช้อาคาร ดังนั้น แนวทางนี้จึงเป็นไปได้ที่จะเพิ่มระดับความสบายของผู้อาศัย และนำมาซึ่งการออกแบบอาคารที่คำนึงถึงการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อม สมการ 2 ถูกนำมาใช้ในการหาเขตสภาวะน่าสบายเฉพาะสำหรับแต่ละที่ตั้ง ในบทความนี้ได้ใช้ กรุงเทพฯเป็นตัวอย่าง เมื่อชีตจำกัดบน คือ ความชื้นสัมบูรณ์มีค่า 12 กรัมต่อกิโลกรัมและอุณหภูมิเฉลี่ยของเดือนที่ร้อนที่สุด (เมษายน) ของกรุงเทพฯ

คือ 30.7°C (ได้จากค่าเฉลี่ยของกรมอุตุนิยมวิทยากรุงเทพฯ ในช่วงปี 1991 ถึง 1998) ค่าอุณหภูมิกลางจะเป็น

$$T = 17.6 + 0.31 \times 30.7 = 27.1^\circ\text{C}$$

และขีดจำกัดบนของอุณหภูมินำสบายที่ได้จากสมการนี้ คือ $27.1 + 2.5 = 29.6^\circ\text{C}$

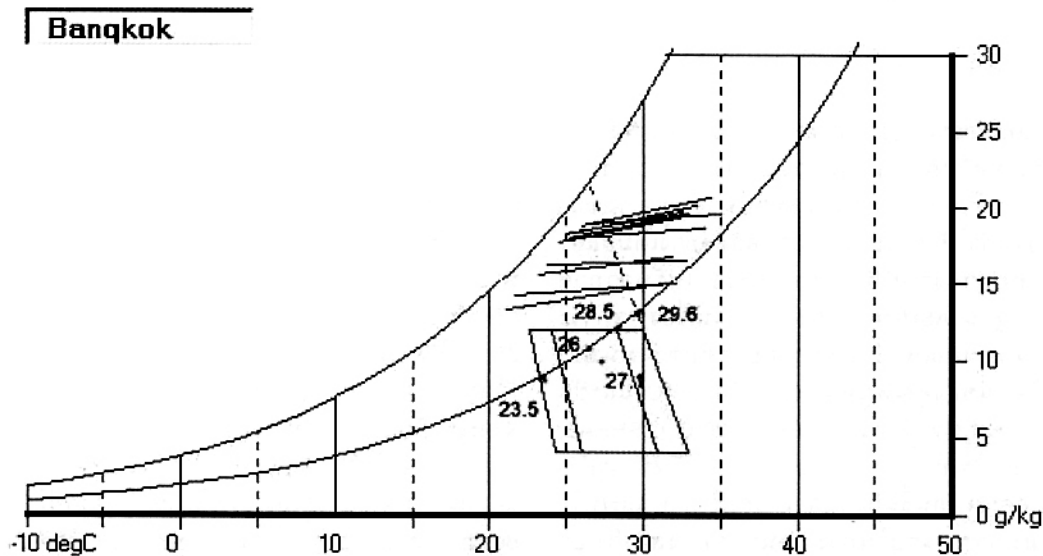
สำหรับเดือนที่เย็นที่สุด (มกราคม)

$$T_{av} = 27^\circ\text{C}, T_n = 17.6 + 0.31 \times 27 = 26^\circ\text{C}$$

และขีดจำกัดของสภาวะนำสบายคือ 23.5 และ 28.5°C ตามลำดับ

ดังนั้นเขตสภาวะนำสบายของกรุงเทพฯ ในแผนภูมิไซโครเมตริก ซึ่งพัฒนาโดย Szokolay ในปี 1986 จึงกำหนดอุณหภูมิกลางของเดือนเมษายน เมื่ออุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 30.7°C และมีขีดจำกัดบนที่ 29.6°C

นักวิจัยยังคงศึกษาเรื่องดัชนีทางอุณหภูมิเพื่อทำนายสภาวะนำสบายทางอุณหภูมิของมนุษย์ แม้กระนั้นก็ตามทราบได้ที่สภาวะนำสบายทางอุณหภูมิถูกจำกัดความให้เป็นสภาวะทางจิตใจที่แสดงถึงความพึงพอใจกับสภาวะแวดล้อมทางอุณหภูมิ สภาวะนำสบายจะเป็นผลมาจากการประเมินความรู้สึกส่วนตัวบุคคล ซึ่งเป็นที่แน่ชัดว่าสามารถเปลี่ยนแปลงได้



ภาพที่ 13 แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงเขตสภาวะนำสบายของ กรุงเทพฯ (Szokolay, 2002)

เอกสารอ้างอิง

- ASHRAE. 1983. ASHRAE Handbook of Fundamentals. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers Inc.
- ASHRAE. 1992. ASHRAE Standard 55: Thermal Environment Conditions for Human Occupancy. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers Inc.
- ASHRAE. 1995. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE Standard 55a-1995, ASHRAE, Atlanta.
- Auliciems, A. 1981. "Towards a psycho-physiological model of thermal perception" International Journal of Biometeorology supplement 25: 109-122.
- Auliciems, A. 1982. "Psycho-physiological criteria for global thermal zones of building design" International Journal of Biometeorology, 26 (Suppl.): 69-86.
- Auliciems, A., Szokolay, S V. 1997. Thermal Comfort, PLEA Note3. Brisbane: University of Queensland.
- Bedford, T. 1936. Warmth Factor in Comfort at Work: A Physiological Study of Heating and Ventilation. Industrial Health Research Board Report, 76.
- Brager, G. and Olesen, B. 2004. "A better way to predict comfort" ASHRAE Journal, Aug 2004: 46: 20.
- Busch, J.F. 1992. "A tale of two populations: thermal comfort in air-conditioned and naturally ventilated offices in Thailand" Energy and Buildings, 18: 235-249.
- Carrier, W. 1911. "Rational psychometric formulae their relation to the problems of meteorology and of air conditioning" ASME Transaction 33:1005-1053.
- de Dear, R., Brager, G., Cooper, D. 1997. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference, Final report ASHRAE RP-884, March, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers Inc., and Macquarie Research, Ltd.
- Drysdale, J.W. 1992. "Designing houses for Australian climates" Bulletin No.6, CEBS, Sydney.
- Fanger, P.O. 1972. Thermal Comfort. New York: McGraw-Hill.
- Gagge, A.P. 1936. "The linearity criterion applied to partitioned calorimetry" American Journal of Physiology, 116: 656-668.
- Givoni, B. 1976. Man, Climate and Architecture. London: Applied Science Publishers Ltd.
- Glickman, N., Inouye, T., Keeton, R W and Fahnestock, M K. 1950. "Physiological examination of the effective temperature index" ASHVE Transaction, 56:51.
- Houghten, F.C. and Yagloglou, C.P. 1923. "Determination of comfort zone" ASHVE Transaction, 29:361.
- Humphreys, M A. 1975. "Field Studies of Thermal Comfort Compared and Applied" Building Research Establishment, Current Paper (76/75), U.K. Department of Environment.
- ISO 7730. 1994. Moderate Thermal Environments-Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort. Geneva : International Standards Organisation.
- Jitkhajornwanich, K., Pitts, A.C., Malama, A., Sharples, S. 1998. "Thermal Comfort in Transitional Spaces in the Cold Season of Bangkok" ASHRAE Transaction, 104: 1181-1193.
- Koenigsberger, O.H., Ingersoll, T.G., Mayhew, A., & Szokolay, S.V. 1974. Manual of Tropical Housing and Building, Part I. Climatic design. London : Longman.
- Lee, D H K. 1980. "Seventy-five years of searching for a heat index" Env.Res.,22: 331-356 (Academic Press).
- Lovins, A.B. 1992. Air Conditioning Comfort: Behavioral and Cultural Issues. Boulder. CO : E source, Inc.

- McIntyre, D.A. 1980. Indoor Climate. London : Applied Science Publishers Ltd.
- Olgyay, V. 1953. Bioclimatic Approach to Architecture, BRAB Report No.5. Washington DC : National Research Council.
- Olgyay, V. 1963. Design with Climate. Princeton : Princeton University Press.
- Szokolay, S.V. 1980. Environmental Science Handbook. London : Longman/Construction Press, Wiley/Halsted Press.
- Szokolay, S.V. 1986. "Climate analysis based on the psychrometric chart". International Journal of Ambient Energy, 7: 171-182.
- Szokolay, S.V. 1987. Thermal Design of Buildings. Canberra.
- Szokolay, S.V. 1991. "Heating and cooling of buildings, chap.20" in H J Cowen (ed): Handbook of Architectural Technology. New York : Van Nostrand Reinhold.
- Szokolay, S.V. 1996. "Thermal Design of Houses for Warm-Humid Climates" Passive and Low Energy Architecture PLEA. Belgium.
- Szokolay, S.V. 2002. ARCHIPAK: Programs for thermal design of buildings and passive solar systems in Visual Basic. Brisbane
- Yaglou, C.P. 1947. "A method for improving the effective temperature index" ASHVE Transaction, 53:307.