บทที่ 2

ภาวะสบายเชิงความร้อน (Thermal comfort)

2.1 ความหมายของภาวะสบายเชิงความร้อน

ความเจริญทางสังคมและอุตสาหกรรมทำให้คนเราต้องการความเป็นอยู่ที่สบายขึ้น จึงมีการสร้างสิ่งแวดล้อมของอากาศให้เหมาะสม และจากเทคนิคต่างๆ สามารถสร้าง Indoor climate ได้หลายรูปแบบ

Indoor climate คือ สภาพอากาศที่รวบรวมคุณสมบัติต่างๆ ทางกายภาพในห้องที่มีอิทธิพลต่อคน เช่น การสูญเสียความร้อน การหายใจ นิยามนี้จะไม่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบที่ไม่เกี่ยวกับความร้อน เช่น องค์ประกอบของอากาศว่ามีฝุ่น , กลิ่น , ประจุไฟฟ้า ฯลฯ ซึ่งในส่วนนี้สามารถประมาณค่าได้ แต่จะไม่อยู่ในขอบข่ายของงานวิจัยนี้

จุดประสงค์ของสภาพสิ่งแวดล้อมทางความร้อนสำหรับมนุษย์ คือ เพื่อดัดแปลงสิ่งแวดล้อมทางความร้อนให้เป็นภาวะสบายเชิงความร้อน คือให้คนมีความรู้สึกสบายพึงพอใจกับสิ่งแวดล้อมนั้น เพราะว่าภาวะสบายฯ นี้ สามารถตัดสินใจได้จากประสาทสัมผัสของคน และเนื่องจากแต่ละคนมีความรู้สึกต่อสภาพสิ่งแวดล้อมไม่เหมือนกันถึงแม้จะอยู่ในห้องเดียวกันก็ตาม ดังนั้นการที่จะหาภาวะสบายฯ จำนวนการทดสอบต้องมากพอทั้งในห้องทดลอง และในสถานที่ทำงานจริงที่ไปเก็บข้อมูลเพื่อหาอิทธิพลของสิ่งแวดล้อมทางความร้อน ต่อประสาทสัมผัสของคนได้แน่นอน ถึงแม้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จากผู้ทดสอบจะไม่ครบบริบูรณ์พอ แต่ก็แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของความไม่สบายแบบร้อนหรือเย็นเกินไป สมรรถนะทางด้านความคิด การใช้กำลังการเข้าใจจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อมีองค์ประกอบมาจากการอยู่ในภาวะสบายเชิงความร้อน

ปัจจุบันสถานที่มีการสร้างสภาพสิ่งแวดล้อมทางความร้อนให้เหมาะสมสำหรับมนุษย์มีอยู่หลายแห่งเช่น ห้องต่างๆ ในบ้าน ที่ทำงาน โรงงาน ร้านค้า โรงพยาบาล โรงเรียน โรงภาพยนต์ รวมถึงในรถยนต์ รถไฟ เครื่องบิน ฯลฯ และอีกไม่นานในอนาคตเราอาจจะเห็นเมืองทั้งเมืองมีการสร้างสิ่งแวดล้อมทางความร้อนที่เหมาะสมสำหรับมนุษย์ก็ได้

ตัวแปรที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อเงื่อนไขของภาวะสบายเชิงความร้อน คือ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1 ลักษณะงาน (Activity level)

2 ความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้า (ชุดแต่งกาย)

3 อุณหภูมิอากาศในห้อง

4 อุณหภูมิการแผ่ความร้อนเฉลี่ย (Mean radiant temp)

5 ความเร็วอากาศสัมพัทธ์

6 ความดันไอน้ำในอากาศ (Vapor pressure)

2.2 เงื่อนไขของภาวะสบายเชิงความร้อน

เงื่อนไขพื้นฐานอันดับแรกที่จำเป็นของภาวะความสบายเชิงความร้อนของคนที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมที่กำหนด คือการพิจารณาการสมดุลทางความร้อน (heat balance) ถ้าคนเราอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่ไม่สบายจะมีการสร้างสมดุลทางความร้อนขึ้น สมการสมดุลทางความร้อนที่สร้างขึ้นจะเป็นดังนี้

$$f\ (H/A_{DU}\ ,\ I_{cl}\ ,\ t_a\ ,\ t_{mrt}\ ,\ P_a\ ,\ v_a\ ,\ t_s\ ,\ E_{sw}/A_{DU}\ ) = 0 \quad (2.1)$$

เมื่อ

H = พลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นภายในร่างกาย

A_{DU} = พื้นที่ผิวร่างกายคน (เปลือย)

I_{cl} = ค่าความต้านทานทางความร้อนของเสื้อผ้า

t_a = อุณหภูมิอากาศ

t_{mrt} = อุณหภูมิการแผ่ความร้อนเฉลี่ย

P_a = ความดันไอน้ำในอากาศ

v_a = ความเร็วอากาศสัมพัทธ์

t_s = อุณหภูมิเฉลี่ยของผิวหนัง

E_{sw} = ความร้อนที่สูญเสีย ต่อ 1 หน่วยพื้นที่ผิวของร่างกาย คิดจากการระเหยของการขับเหงื่อ

เมื่อกำหนดระดับการทำงาน อุณหภูมิเฉลี่ยของผิวหนัง; t_s และการสูญเสียความร้อนจากการขับเหงื่อ ; E_{sw} จะเป็นตัวแปรทางกายภาพที่มีอิทธิพลต่อสมการสมดุลทางความร้อน (2.1)

ความรู้สึกทางภาวะสบายเชิงความร้อน จะเกี่ยวข้องกับตัวแปร 2 ตัวนี้ จากการทดลองกลุ่มคนที่มีระดับการทำงานที่แตกต่างกัน จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวหนัง และการขับเหงื่อที่ต่างกัน เป็นฟังก์ชั่นของระดับการทำงาน ผลลัพธ์ที่ได้จะเขียนได้เป็น

$$t_s = f\ (H/A_{DU}) \qquad (2.2)$$

$$E_{sw} = A_{DU}\ f\ (H/A_{DU}) \qquad (2.3)$$

สมการที่ (2.2) และ (2.3) เป็นเงื่อนไขพื้นฐานอันดับสองและสามสำหรับภาวะสบายเชิงความร้อน แทนค่า (2.2) , (2.3) ใน (2.1) จะเขียนสมการความสบายได้ดังนี้

$$f\ (H/A_{DU}\ ,\ I_{cl}\ ,\ t_a\ ,\ t_{mrt}\ ,\ P_a\ ,\ v_a) = 0 \qquad (2.4)$$

รายละเอียดของเงื่อนไขความสบายฯ นี้ดูได้ในหัวข้อ 2.13

2.3 สมดุลทางความร้อน

จุดประสงค์ของระบบภายในร่างกายคนต้องการรักษาอุณหภูมิภายในให้คงที่ จึงสมมุติได้ว่าในสภาวะสิ่งแวดล้อมทางความร้อนคงที่เป็นเวลานานๆ จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงภายในร่างกายคนคงที่ เช่น การผลิตพลังงานความร้อนจะเท่ากับการสูญเสียพลังงานความร้อนจากร่างกาย และถือว่าไม่มีพลังงานความร้อนสะสมภายในร่างกาย สมดุลทางความร้อนของเงื่อนไขเช่นนี้ คือ

$$H - E_d - E_{sw} - E_{re} - L = K = R + C \qquad (2.5)$$

เมื่อ

H = พลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นภายในร่างกาย

E_d = การสูญเสียความร้อนโดยการระเหยของน้ำผ่านผิวหนัง

E_{sw} = การสูญเสียความร้อนโดยการระเหยของเหงื่อจากผิวหนัง

E_{re} = การสูญเสียความร้อนแฝงทางการหายใจ

L = การสูญเสียความร้อนของการหายใจแบบแห้ง (Dry respiration)

K = การสูญเสียความร้อนจากผิวหนังสู่ผิวนอกของเสื้อผ้า (การนำความร้อนผ่านเสื้อผ้า)

R = การสูญเสียความร้อนโดยการแผ่ความร้อนจากผิวนอกเสื้อผ้า

C = การสูญเสียความร้อนโดยการพาความร้อนจากผิวนอกเสื้อผ้า

จากสมการที่ (2.5) แสดงให้เห็นว่า พลังงานที่ผลิตขึ้นภายใน ; ลบด้วย การสูญเสียความร้อนโดยการระเหยจากผิว ($E_d + E_{sw}$) และการหายใจ ($E_{re} + L$) เท่ากับความร้อนที่นำผ่านเสื้อผ้า (K) หรือการสูญเสียความร้อนทางการแผ่และการพาที่ผิวนอกเสื้อผ้า โดยสมมุติให้ว่า E_{sw} , E_d เกิดขึ้นที่หรือภายในผิวหนัง

2.4 การผลิตความร้อนภายใน

พลังงานที่ปล่อยออกมาโดยขบวนการอ๊อกซิเดชั่นในร่างกายมนุษย์ ต่อ 1 หน่วยเวลา (Metabolic rate ; M) บางส่วนถูกเปลี่ยนเป็นกำลังงานภายนอก ; W แต่ส่วนใหญ่จะถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนภายในร่างกาย ; H ดังสมการนี้

$$M = H + W \qquad (2.6)$$

และจากคำนิยามของประสิทธิภาพทางกลภายนอก (External mechanic efficiency ; η)

$$\eta = W/M \qquad (2.7)$$

แทนค่า (2.7) ใน (2.6)

$$= M(1-\eta) \qquad (2.8)$$

หรือ $$H/A_{DU} = M/A_{DU}(1-\eta) \qquad (2.8ก)$$

ขนาดของ M/A_{DU} เป็นฟังก์ชั่นของการทำงานของคนในตารางที่ 2.1 ค่า M/A_{DU} อยู่ในรูปของการทำงาน ชนิดงาน ฯลฯ ในกรณีนี้การทำงานที่ให้มาจะเป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งเมื่อ

ทราบระดับ การทำงาน M/A_{DU} สามารถหาค่าประมาณได้จากตารางที่ 2.1

ค่าประมาณของ η จะมีอยู่ในตารางที่ 2.1 เช่นกัน เมื่อ $\eta = 0$ คือ ไม่มีงานกสภายนอก เช่น คนเดินไปตามระดับแนวราบจะมี $\eta = 0$ และในกรณี η จะมีค่าน้อยกว่า 0 ได้ เมื่องานภายนอกถูกส่งเข้าสู่ร่างกายคน (งานเป็นลบ) เช่นคนเดินลงเขา พลังงานศักย์ของคนจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนซึ่งอยู่ในข้อพับและกล้ามเนื้อขา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Table 2.1 *Metabolic Rate at Different Typical Acitivities*

Activity		Metabolic Rate M/A_{Du} kcal/hr m²	Mechanical Efficiency η	Relative Velocity in Still Air m/s
Resting				
Sleeping		35	0	0
Reclining		40	0	0
Seated, quiet		50	0	0
Standing, relaxed		60	0	0
Walking				
On the level	km/hr			
	3.2	100	0	0.9
	4.0	120	0	1.1
	4.8	130	0	1.3
	5.6	160	0	1.6
	6.4	190	0	1.8
	8.0	290	0	2.2
Up a Grade				
% Grade	km/hr			
5	1.6	120	0.07	0.6
5	3.2	150	0.10	0.9
5	4.8	200	0.11	1.3
5	6.4	305	0.10	1.8
15	1.6	245	0.15	0.4
15	3.2	230	0.19	0.9
15	4.8	350	0.19	1.3
25	1.6	180	0.20	0.4
25	3.2	335	0.21	0.9
Miscellaneous occupations				
Bakery (e.g. cleaning tins, packing boxes)		70–100	0 – 0.1	0 – 0.2
Brewery (e.g. filling bottles, loading beer boxes onto belt)		60–120	0 – 0.2	0 – 0.2
Carpentry				
Machine sawing		90	0	0 – 0.1
Sawing by hand		200–240	0.1 – 0.2	0.1 – 0.2
Planing by hand		280–320	0.1 – 0.2	0.1 – 0.2
Foundry Work				
Fettling (pneumatic hammer)		160	0 – 0.1	0.1 – 0.2
Tipping the moulds		200	0 – 0.1	0.1 – 0.2
Roughing (i.e. carrying 60 kg)		270	0 – 0.2	0.1 – 0.2

Table 2.1 *Metabolic Rate at Different Typical Activities* (cont.)

Activity	Metabolic Rate M/A_{Du} kcal/hr m²	Mechanical Efficiency η	Relative Velocity in Still Air m/s
Tending the furnaces	340	0 – 0.1	0.1 – 0.2
Slag removal	380	0 – 0.1	0.1 – 0.2
Garage Work (e.g. replacing tyres, raising cars by jack)	110–150	0 – 0.1	0.2
Laboratory Work			
Examining slides	70	0	0
General laboratory work	80	0	0 – 0.2
Setting up apparatus	110	0	0 – 0.2
Locksmith	110	0 – 0.1	0.1 – 0.2
Machine Work			
Light (e.g. electrical industry)	100–120	0 – 0.1	0 – 0.2
Machine fitter	140	0 – 0.1	0 – 0.9
Heavy (e.g. paint industry)	200	0 – 0.1	0 – 0.2
Manufacture of tins (e.g. filling, labelling and despatch)	100–200	0 – 0.1	0 – 0.2
Seated, heavy arm movements (e.g. metal worker)	110	0 – 0.2	0.1 – 0.4
Shoemaker	100	0 – 0.1	0 – 0.1
Shop assistant	100	0 – 0.1	0.2 – 0.5
Teacher	80	0	0
Watch repairer	55	0	0
Vehicle driving			
Car (light traffic)	50	0	0
Car (heavy traffic)	100	0	0
Heavy vehicle (e.g. power truck)	160	0 – 0.1	0.05
Night flying	60	0	0
Instrument landing	90	0	0
Combat flying	120	0	0
Heavy Work			
Pushing Wheelbarrow (57 kg at 4.5 km/hr)	125	0.2	1.4
Handling 50 kg bags	200	0.2	0.5
Pick & shovel work	200–240	0.1 – 0.2	0.5
Digging trenches	300	0.2	0.5
Domestic Work			
House cleaning	100–170	0 – 0.1	0.1 – 0.3
Cooking	80–100	0	
Washing dishes, standing	80	0	0 – 0.2
Washing by hand and ironing	100–180	0 – 0.1	0 – 0.2
Shaving, washing and dressing	85	0	0 – 0.2

Table 2.1 *Metabolic Rate at Different Typical Activities* (cont.)

Activity	Metabolic Rate M/A_{Du} kcal/hr m²	Mechanical Efficiency η	Relative Velocity in Still Air m/s
Shopping	80	0	0.2 – 1
Office Work wpm			
Typing (electrical) 30	45	0	0.05
40	50	0	0.05
Typing (mechanical) 30	55	0	0.05
40	60	0	0.05
Adding machine	60	0	0
Miscellaneous office work (e.g. filing, checking ledgers)	50– 60	0	0 – 0.1
Draughtsman	60	0	0 – 0.1
Leisure activities			
Gymnastics	150–200	0 – 0.1	0.5 – 2
Dancing	120–220	0	0.2 – 2
Tennis	230	0 – 0.1	0.5 – 2
Fencing	350	0	0.5 – 2
Squash	360	0 – 0.1	0.5 – 2
Basketball	380	0 – 0.1	1 – 3
Wrestling	435	0 – 0.1	0.2 – 0.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 การสูญเสียความร้อนทางผิวหนัง

การระเหยของน้ำผ่านผิวหนังเป็นส่วนหนึ่งของการขับเหงื่อ สมมุติให้จำนวนการ diffusion ต่อ 1 หน่วยพื้นที่ แปรผันตามค่าความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำอิ่มตัว; P_s ในอากาศล้อมรอบ (Ambient air) สมการการสูญเสียความร้อนผ่านผิวหนังคือ

$$E_d = a \cdot m \cdot A_{DU} \cdot (P_s - P_a) \quad \text{(kcal/hr)} \qquad (2.9)$$

เมื่อ

E_d = การสูญเสียความร้อนโดยการ diffusion เป็นไอผ่านผิวหนัง (kcal/hr)

a = 575 kcal/kg = ความร้อนของการระเหยของน้ำที่ 35 °c

m = สัมประสิทธิ์การซึมของผิวหนัง ($kg/hr.m^2.mm\ Hg$)

P_s = ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิผิวหนัง (mm Hg)

P_a = ความดันไอของอากาศล้อมรอบ (mm Hg)

จากการวิเคราะห์จะได้ว่า

$$m = 6.1 * 10^{-4} \quad (Kg / hr \cdot m^2 \cdot mm\ Hg)$$

และจาก Steam table P_s เป็นฟังก์ชั่นของ t_s เมื่อ $27\ ^\circ c < t_s < 37\ ^\circ c$

$$P_s = 1.92\ t_s - 25.3 \quad \text{(mm Hg)} \qquad (2.10)$$

(error น้อยกว่า 3%)

แทนค่า a , m , P_s ใน (2.9)

$$E_d = 0.35 A_{DU} \cdot (1.92\ t_s - 25.3 - P_a) \quad \text{(kcal/hr)} \qquad (2.9ก)$$

2.6 การสูญเสียความร้อนโดยการระเหยของเหงื่อ

เมื่อมีเหงื่อในอุณหภูมิอากาศ , ความดันไอที่พอเหมาะซึ่งคนที่อยู่ในภาวะสบายเชิงความร้อน พอที่จะสมมุติได้ว่า เหงื่อที่ออกมาระเหยไปหมด จำนวนเหงื่อที่ออกมาจะเป็นฟังก์ชั่นของระดับการทำงานในภาวะสบายเชิงความร้อน

2.7 การสูญเสียความร้อนแฝงทางการหายใจ

ความร้อนและไอน้ำจะถูกร่วมอยู่ในอากาศที่หายใจเข้าโดยการพาความร้อนและการ

ระเหยของทางเดินหายใจ และเมื่อหายใจเข้าการถ่ายเทความร้อนของอากาศจะถ่ายเทกลับเข้าสู่ร่างกาย และน้ำจะกลั่นตัว แต่อากาศที่หายใจออก จะมีความร้อนและน้ำมากกว่าอากาศหายใจเข้าในสภาพแวดล้อมที่สบายๆ จะได้สมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$E_{re} = V (W_{ex} - W_a) \quad \text{(kcal/hr)} \qquad (2.11)$$

เมื่อ E_{re} = การสูญเสียความร้อนแฝงในการหายใจ (kcal/hr)

V = ปริมาณการหมุนเวียนอากาศของปอด (kg/hr)

W_{ex} = อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่หายใจออก (Kgน้ำ/Kgอากาศแห้ง)

W_a = อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่หายใจเข้า (Kgน้ำ/Kgอากาศแห้ง)

= 575 kcal/kg

จากการวิเคราะห์ของ Asmussen และ Nielsen และได้ปรับปรุงโดย Liddel จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$V = 0.0060\ M \quad \text{(Kg/hr)} \qquad (2.12)$$

จาก Mc Cutchan และ Taylor จะได้สมการดังนี้

$$W_{ex} - W_a = 0.0277 + 6.5 * 10^{-5}\ t_a - 0.80W_a$$

$$\simeq 0.029 - 0.80W_a \quad \text{(Kgน้ำ/Kgอากาศแห้ง)} \qquad (2.13)$$

ประมาณค่า $W_a = 0.622 * P_a/(P-P_a)$ ด้วย $0.00083\ P_a$ ใน (2.13)

เมื่อ P_a = ความดันบางส่วนของไอน้ำในอากาศที่หายใจเข้า (mm Hg)

P = 760 mm Hg

แทนค่าใน (2.11) จะได้

$$E_{re} = 0.0023 \cdot M \cdot (44-P_a) \quad \text{(kcal/hr)} \qquad (2.11ก)$$

2.8 การสูญเสียความร้อนของการหายใจ(แบบแห้ง)

การสูญเสียความร้อนจากร่างกายเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศที่หายใจ

เข้าและออก

$$L = V \cdot C_p \cdot (t_{ex} - t_a)$$

$$= 0.0014 \cdot M \cdot (t_{ex} - t_a) \quad (kcal/hr) \qquad (2.14)$$

เมื่อ C_p = 0.24 kcal/kg·c

= ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้งที่ความดันคงที่

และค่า t_{ex} หาได้จากสูตรของ Mc Cutchan และ Taylor

$$t_{ex} = 32.6 + 0.066 \cdot t_a + 32 \cdot W_a \qquad (2.15)$$

แต่การสูญเสียความร้อนในหัวข้อนี้มีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับเทอมอื่น ดังนั้น ค่าประมาณ t_{ex} ที่ถือว่าให้ความแม่นยำได้พอสมควร คือ

t_{ex} = 34 ·c = อุณหภูมิผิวหนังของคนเมื่ออยู่ในสภาวะสบายเชิงความร้อน

แทนค่า t_{ex} ใน (2.14)

$$L = 0.0014\ M \cdot (34 - t_a) \quad (kcal/hr) \qquad (2.14ก)$$

2.9 การนำความร้อนผ่านเสื้อผ้า

การส่งผ่านความร้อน (แห้ง) ระหว่างผิวหนังและผิวนอกของเสื้อผ้า มีความซับซ้อนทั้งการพาความร้อน การแผ่ความร้อนภายใน ช่องว่างระหว่างผิวหนังกับเสื้อผ้ารวมถึงการนำความร้อนของเสื้อผ้าเอง Gagge ได้กำหนดเทอม I_{cl} เป็นสัญญาลักษณ์ที่ไม่มีหน่วย หมายถึง ความต้านทานความร้อนทั้งหมดจากผิวหนังถึงผิวนอกของเสื้อผ้า

$$I_{cL} = R_{cl}/0.18 \quad (clo) \qquad (2.16)$$

เมื่อ R_{cl} = ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดจากผิวหนังถึงผิวนอกของเสื้อผ้า (m^2.hr·c/kcal)

หรือ 1 clo = 0.155 m^2 ·c / W

018511

การวัด I_{cl} ค่อนข้างยากเพราะไม่มีเครื่องมือวัดความต้านทานการนำความร้อนของเนื้อผ้าที่แปลงค่าเป็นความต้านทานการนำความร้อนของวัสดุอาคาร

การสูญเสียความร้อนจากผิวหนังสู่ผิวนอกของเสื้อผ้า คือ

$$K = A_{DU} \cdot (t_s - t_{cl}) / 0.18\ I_{cl} \quad \text{(kcal/hr)} \qquad (2.16ก)$$

2.10 <u>การสูญเสียความร้อนโดยการแผ่ความร้อน</u>

การแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการแผ่เกิดขึ้นระหว่างร่างกายคนกับสิ่งแวดล้อมและการสูญเสียความร้อนโดยการแผ่ จากผิวนอกของเสื้อผ้าสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$R = A_{eff} \cdot \varepsilon \cdot \delta \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{mrt} + 273)^4] \quad \text{(kcal/hr)} \quad (2.17)$$

เมื่อ

A_{eff} = พื้นที่ effective ของการแผ่ความร้อนของเสื้อผ้า

ε = สัมประสิทธิ์การส่งออกของผิวนอกของเสื้อผ้า

δ = ค่าคงที่ Stefan - Boltzman ; $4.96 * 10^{-8}$ $(kcal/m^2 hr.K^4)$

t_{mrt} = อุณหภูมิการแผ่ความร้อนเฉลี่ย (°c) ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิที่ uniform ของ black enclosure ที่มีผลลัพธ์ การสูญเสียความร้อนโดยการแผ่ความร้อนจากคนเท่ากับห้องปิดจริง (Actual enclosure) ที่ศึกษาอยู่ เมื่อคนทดสอบอยู่ในตำแหน่งท่าทาง และเสื้อผ้าที่กำหนดให้

อย่างไรก็ตามเพราะว่าร่างกายคนที่มีส่วนเว้าโค้ง ดังนั้นจะใช้พื้นที่ effective แทนพื้นผิวของคน

$$A_{eff} = f_{eff} \cdot f_{cl} \cdot A_{DU} \quad (m^2) \qquad (2.18)$$

เมื่อ

A_{eff} = พื้นที่ effective ของร่างกายคน

f_{eff} = ตัวประกอบ effective radiation area

f_{cl} = อัตราส่วนของพื้นผิวของรูปร่างเสื้อผ้ากับพื้นผิวคน (เปลือย)

A_{DU} = พื้นที่ผิวของร่างกายคน (เปลือย) (m^2)

จากการทดลองจะได้ว่า f_{eff} = 0.71 เป็นค่าเฉลี่ยสำหรับคนนั่งและยืน

และ f_{cl} หาได้จากตารางที่ 2.2

จากข้อมูลของ Hardy J.d.และ Mitchell ε ของผิวหนังมีค่าใกล้ 1 และเสื้อผ้าส่วนใหญ่จะมีค่า ε ประมาณ 0.95 ดังนั้นค่าเฉลี่ยที่ใช้ คือ 0.97

แต่ถ้าคนได้รับแสงสว่างจาก short wave เช่น ดวงอาทิตย์ การส่งผ่านความร้อนโดยการแผ่ทั้งหมด ยังคงหาได้จากสมการ (2.17) แต่การหาค่า t_{mrt} ของกรณีนี้จำเป็นต้องหาข้อมูลเกี่ยวข้องกับการสะท้อนกลับของผิวหนังและเสื้อผ้า

จากสมการ (2.17) เมื่อแทนค่า ε,ó , A_{eff} จะได้

$$R = 3.4*10^{-8} \cdot A_{DU} \cdot f_{cl} [(t_{cl}+273)^4 - (t_{mrt}+273)^4] \quad (kcal/hr) \quad (2.17\ ก)$$

2.11 <u>การสูญเสียความร้อนโดยการพาความร้อน</u>

การสูญเสียความร้อนโดยการพาจากผิวนอกเสื้อผ้า เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$C = A_{DU} \cdot F_{cl} \cdot h_c (t_{cl} - t_a) \quad (kcal/hr) \quad (2.19)$$

เมื่อ h_c = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($kcal/m^2hr.^oc$) โดยที่ค่าของ h_c ขึ้นอยู่กับชนิดของการพา และถ้าความเร็วอากาศต่ำๆ การถ่ายเทความร้อนจะเป็นแบบ free convection ดังนั้น h_c จะเป็นฟังก์ชั่นของ $t_{cl}-t_a$ ถ้าเป็น force convection h_c จะเป็นฟังก์ชั่นของความเร็วอากาศ

ในกรณี free convection Nilsen และ Pedensen พบว่าเมื่อคนทดสอบอยู่ในท่านั่งและยืน

$$h_c = 2.05 (t_{cl}-t_a)^{0.25} \quad (kcal/m^2hr^oc) \quad (2.20)$$

หรือ $h_c = 2.38(t_{cl}-t_a)^{0.25}$ $(W/m^2\ ^oc)$

เมื่อ $2.38(t_{cl}-t_a)^{0.25} > 12.1(v_a)^{0.5}$ (2.20 ก)

ในกรณีเป็น force convection Winslow , Gagge และ Herrington พบว่า

$$h_c = 10.4 (v_a)^{0.5} \quad (kcal/hr.m^2.^oc) \quad (2.21)$$

หรือ $h_c = 12.1(v_a)^{0.5}$ $(W/m^2.^oc)$

เมื่อ $2.38(t_{cl}-t_a)^{0.25} < 12.1(v_a)^{0.5}$ (2.21ก)

Table 2.2*Data for Different Clothing Ensembles*

Clothing Ensemble	I_{cl} clo	f_{cl}
Nude	0	1.0
Shorts	0.1	1.0
Typical Tropical Clothing Ensemble: Shorts, open-neck shirt with short sleeves, light socks and sandals	0.3–0.4	1.05
Apollo Constant Wear Garment (astronauts): Light cotton undergarment with short sleeves and ankle length legs, cotton socks	0.35	1.05
Light Summer Clothing: Long light-weight-trousers, open neck shirt with short sleeves	0.5	1.1
Light Working Ensemble: Athletic shorts, woollen socks, cotton work shirt (open-neck), and work trousers, shirt tail out	0.6	1.1
U.S. Army "Fatigues", Man's: Light-weight underwear, cotton shirt and trousers, cushion sole socks and combat boots	0.7	1.1
Combat Tropical Uniform: Same general components as U.S. Army fatigues but with shirt and trousers of cloth, wind resistant, poplin	0.8	1.1
Typical Business Suit	1.0	1.15
Typical Business Suit + Cotton Coat	1.5	1.15
Light Outdoor Sportswear: Cotton shirt, trousers, T-shirt, shorts, socks, shoes and single ply poplin (cotton and dacron) jacket	0.9	1.15
Heavy Traditional European Business Suit: Cotton underwear with long legs and sleeves, shirt, woollen socks, shoes, suit including trousers, jacket and vest	1.5	1.15–1.2
U.S. Army Standard Cold-wet Uniform: Cotton-wool undershirt and drawers, wool and nylon flannel shirt, wind resistant, water repellent trousers and field coat, cloth mohair and wool coat liner and wool socks	1.5–2.0	1.3–1.4
Heavy Wool Pile Ensemble: (Polar weather suit)	3–4	1.3–1.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.12 สมการสมดุลความร้อน

เมื่อแทนค่าการสูญเสียความร้อนในสมการ (2.5) และหารด้วย A_{DU} จะได้สมการสมดุลความร้อนคือ

$$M/A_{DU}\ (1-\eta)-0.35\ [1.92t_s - 25.3-P_a]-E_{sw}/A_{DU} - 0.0023M/A_{DU}\ (44-P_a)$$
$$- 0.0014M/A_{DU}\ (34-t_a) =(t_s-t_{cl})/0.18\ I_{cl} = 3.4*10^{-8}\ f_{cl}[(t_{cl}+273)^4$$
$$- (t_{mrt}+273)^4] + f_{cl}\ h_c\ (t_{cl}-t_a) \qquad (2.22)$$

2.13 เงื่อนไขของภาวะสบายเชิงความร้อน

จากหัวข้อ 2.1 ได้กล่าวถึงความหมายของภาวะสบายเชิงความร้อนในแง่ของจิตใจความรู้สึกของคน ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงภาวะสบายฯ ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ว่าเป็นอย่างไร

เมื่ออยู่ภายใต้ภาวะ Steady state มีเงื่อนไขดังนี้

ก. เป็นไปตามสมการสมดุลความร้อน

ข. จากสมการ(2.22) เมื่อกำหนดลักษณะงานจะมีเทอม t_s และ E_{sw}/A_{DU} เป็นตัวแปรทางด้านกายภาพ ค่าตัวแปรทั้งสองตัวนี้จะมีค่าเป็นไปได้เฉพาะช่วงหนึ่ง จากการทดลองของ Fanger ที่ลักษณะงานและตัวแปรทางความร้อนต่าง ๆ กัน เมื่ออยู่ในภาวะสบายฯ จะพบว่า t_s และ E_{sw} ต่างก็เป็นฟังก์ชั่นของลักษณะงานดังสมการดังนี้

$$\bar{t}_s = 35.7 - 0.032\ H/A_{DU} \quad (^{\circ}c) \qquad (2.23)$$

$$\bar{E}_{sw} = 0.42\ A_{DU}\ (H/A_{DU} - 50) \quad (kcal/hr) \qquad (2.24)$$

หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า สมการ(2.23),(2.24) เป็นเงื่อนไขที่สองและสามของภาวะสบายฯ

2.14 สมการความสบาย

เมื่อแทนค่า (2.23) , (2.24) ใน (2.22)

$$M/A_{DU}(1-\eta) -0.35 [43-0.061M/A_{DU}(1-\eta) -P_a] -0.42 [M/A_{DU} (1-\eta) -50]$$
$$-0.0023 M/A_{DU}(44-P_a) -0.0014 M/A_{DU}(34-t_a)$$
$$= (35.7 -0.032 M/A_{DU}(1-\eta) -t_{cl})/0.18 I_{cl}$$
$$= 3.4*10^{-8} f_{cl} [(t_{cl}+273)^4 -(t_{mrt}+273)^4] +f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a) \qquad (2.25)$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$t_{cl} = 35.7 -0.32 M/A_{DU}(1-\eta) -0.18I_{cl} [M/A_{DU}(1-\eta) -0.35 \{ 43- 0.061M/A_{DU}$$
$$(1-\eta) -P_a \} -0.42 \{ M/A_{DU}(1-\eta)-50 \} -0.0023M/A_{DU}(44-P_a) -0.0014M/A_{DU}$$
$$(34-t_a)] \qquad (2.26)$$

จากสมการที่ (2.25) พิจารณาเฉพาะเทอมซ้ายกับขวามือจะได้

$$M/A_{DU}(1-\eta) -0.35 [43-0.61M/A_{DU}(1-\eta)-P_a] -0.42 [M/A_{DU}(1-\eta)-50]$$
$$-0.0023M/A_{DU}(44-P_a) -0.0014 M/A_{DU}(34-t_a)$$
$$= 3.4*10^{-8} f_{cl} [(t_{cl}+273)^4-(t_{mrt}+273)^4] +f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a) \qquad (2.27)$$

จากสมการ (2.27) เป็นสมการความสบายที่ใช้ได้ทั่วไป (General comfort equation) ดังนั้นพอที่จะสรุปสั้นๆ ได้ว่าสมการความสบายประกอบด้วยตัวแปรดังนี้

1 ฟังก์ชั่นของชนิดเสื้อผ้า I_{cl} , f_{cl}

2 ฟังก์ชั่นของระดับการทำงาน M/A_{DU} , η , v_a

3 ตัวแปรต่างๆ ทางสิ่งแวดล้อม v_a , t_a , p_a , t_{mrt}

สมการความสบายนี้ได้มาจากการทดลองกับชาวอเมริกันวัยที่อยู่ในวัยเรียน ในสิ่งแวดล้อมที่เป็น uniform และ steady state สามารถนำไปใช้กับคนทดสอบที่มีรูปร่าง, เชื้อชาติ, เพศ, ฯลฯ ที่แตกต่างกัน และสามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้เลยโดยไม่ต้องมีการปรับปรุง