

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับความสุขสบายเชิงความร้อน

2.1.1 สมการสมดุลความร้อน

การที่ร่างกายทำกิจกรรมต่างๆ ย่อมมีพลังงานความร้อนเกิดขึ้นภายในร่างกาย อันสืบเนื่องจากการกระบวนการเผาผลาญพลังงานเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของร่างกายให้มีค่าคงที่ จึงจำเป็นต้องมีการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นออกไปสู่สิ่งแวดล้อม กระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับร่างกายไม่ว่าจะเป็นการพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อน การระเหยของเหงื่อ หรือแม้กระทั่งการหายใจล้วนเกิดขึ้นเพื่อตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ดังกล่าว แต่ถ้การถ่ายเทความร้อนออกจากร่างกายไม่สามารถระบายความร้อนอันเกิดจากการเผาผลาญพลังงานในให้หมดไปได้ย่อมมีปริมาณความร้อนจำนวนหนึ่งหลงเหลืออยู่และสะสมไว้ในร่างกาย

สมการสมดุลความร้อนเป็นความสัมพันธ์ที่ถูกสร้างขึ้นเพื่ออธิบายกลไกการทำงานของร่างกายเพื่อรักษาอุณหภูมิร่างกายให้อยู่ในระดับคงที่โดยพิจารณาจากความสมดุลระหว่างปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นภายในร่างกายกับปริมาณความร้อนที่สามารถระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม ถ้าปริมาณที่เกิดขึ้นกับปริมาณที่ระบายออกมีค่าเท่ากันหมายความว่าร่างกายอยู่ในสมดุลความร้อนและจะไม่มีปริมาณความร้อนหลงเหลืออยู่ภายในร่างกาย แต่ถ้าความร้อนที่ระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมมีปริมาณไม่เพียงพอแล้วจะมีความร้อนจำนวนหนึ่งหลงเหลืออยู่ในร่างกายและทำให้อุณหภูมิร่างกายมีค่าสูงขึ้น ในทางกลับกันถ้าปริมาณความร้อนระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมมากเกินไปแล้วอุณหภูมิร่างกายจะมีค่าลดลง จากแนวคิดที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จึงเขียนสมการสมดุลความร้อนออกมาในรูป

$$\begin{aligned}(M - W) &= Q_{sk} + Q_{res} + S \\ &= (C + R + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) + (S_{sk} + S_{cr})\end{aligned}\tag{1}$$

โดยที่	M	คือ	อัตราการผลิตพลังงาน
	W	คือ	งานภายนอก
	Q_{sk}	คือ	การสูญเสียความร้อนทั้งหมดขึ้นที่ผิวหนัง
	Q_{res}	คือ	การสูญเสียความร้อนผ่านกระบวนการหายใจ
	C	คือ	การสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อน

R	คือ	การสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อน
E_{sk}	คือ	การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอที่ผิวหนัง
C_{res}	คือ	การสูญเสียความร้อนจากการหายใจเนื่องจากการพาความร้อน
E_{res}	คือ	การสูญเสียความร้อนจากการหายใจเนื่องจากการกลายเป็นไอ
S	คือ	ปริมาณความร้อนที่สะสมอยู่ภายใน
S_{sk}	คือ	ปริมาณความร้อนที่สะสมอยู่บนผิวหนัง
S_{cr}	คือ	ปริมาณความร้อนที่สะสมอยู่ในร่างกาย

อัตราการเผาผลาญพลังงาน (M) ที่เกิดขึ้นในร่างกายเป็นผลมาจากการเผาผลาญอาหารที่บริโภคเข้าไปเพื่อนำมาใช้เป็นพลังงาน อัตราการเผาผลาญพลังงานที่เกิดขึ้นในร่างกายของแต่ละคนจะไม่เท่ากันโดยขึ้นอยู่กับระดับกิจกรรม อาหารที่บริโภค และยังขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในการทำกิจกรรมนั้นๆ เพราะเหตุนี้จึงทำให้การระบุถึงอัตราการเผาผลาญพลังงานที่เกิดขึ้นในแต่ละคนมีความจำเป็นต้องทำการวัดโดยตรงจึงจะได้ค่าที่ถูกต้อง ปริมาณออกซิเจนซึ่งเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการเผาไหม้ถูกพิจารณาให้มีความสัมพันธ์กับอัตราการเผาผลาญพลังงาน และถูกตรวจวัดควบคู่กับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการหายใจเพื่อบ่งบอกถึงอัตราการเผาผลาญพลังงานภายในร่างกาย

อย่างไรก็ตามค่าเฉลี่ยของอัตราการเผาผลาญพลังงานในแต่ละกิจกรรมสำหรับบุคคลทั่วไปสามารถนำมาแสดงได้ดังตาราง 2.1 โดยระบุอยู่ในรูปสัดส่วนต่อพื้นที่ผิวหนังในร่างกาย พื้นที่ผิวหนังในร่างกายถูกพิจารณาให้มีความสัมพันธ์กับน้ำหนักและความสูงของแต่ละบุคคลตามสมการของ DuBois

$$A_D = 0.202m^{0.425}l^{0.725} \quad (2)$$

โดยที่	A_D	คือ	พื้นที่ผิวเปลือยของร่างกาย
	m	คือ	มวลของผู้ทำการทดลอง
	l	คือ	ความสูงของผู้ทำการทดลอง

ASHRAE Fundamental Handbook (ASHRAE, 2001) ระบุว่าความสูงและน้ำหนักโดยเฉลี่ยของบุคคลทั่วไปคือ 70 kg และ 1.73 m ตามลำดับ กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือพื้นที่ผิวหนังของบุคคลทั่วไปมีค่าประมาณ 1.8 m^2 นั่นเอง ดังนั้นจากค่าอัตราการเผาผลาญพลังงานที่

แสดงไว้ในตาราง 2.1 กอปกับพื้นที่ผิวผนังที่ได้จากสมการ (2) จะสามารถคำนวณการใช้พลังงานโดยเฉลี่ยของแต่ละกิจกรรมได้

ตาราง 2.1 อัตราการเผาผลาญพลังงานโดยทั่วไปสำหรับกิจกรรมต่างๆ

Activities	W / m ²	met
Resting		
Sleeping	40	0.7
Reclining	45	0.8
Seated , quiet	60	1.0
Standing , relaxed	70	1.2
Walking (on level surface)		
3.2 km/h (0.9 m/s)	115	2.0
4.3 km/h (1.2 m/s)	150	2.6
6.4 km/h (1.8 m/s)	220	3.8
Office Activities		
Reading , seated	55	1.0
Writing	60	1.0
Typing	65	1.1
Filing , seated	70	1.2
Filing , standing	80	1.4
Walking about	100	1.7
Lifting / packing	120	2.1
Driving / Flying		
Car	60 to 115	1.0 to 2.0
Aircraft , routine	70	1.2
Aircraft , instrument landing	105	1.8
Aircraft , combat	140	2.4
Heavy vehicle	185	3.2
Miscellaneous Occupational Activities		
Cooking	95 to 115	1.6 to 2.0
Housecleaning	115 to 200	2.0 to 3.4
Seated , heavy limb movement	130	2.2
Machine work		
sawing (table saw)	105	1.8
light (electrical industry)	115 to 140	2.0 to 2.4
heavy	235	4.0
Handling 50 kg bags	235	4.0
Pick and shovel work	235 to 280	4.0 to 4.8
Miscellaneous Leisure Activities		
Dancing , social	140 to 255	2.4 to 4.4
Calisthenics / exercise	175 to 235	3.0 to 4.0
Tennis , singles	210 to 270	3.6 to 4.0
Basketball	290 to 440	5.0 to 7.6
Wrestling , competitive	410 to 505	7.0 to 8.7

แหล่งที่มา : ASHRAE, ASHRAE Fundamental Handbook 2001(New York : American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, 2001), Chapter8.

งานที่กระทำ (W) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ตัวที่สองในสมการสมดุลความร้อนถูกระบุให้อยู่ในหน่วยเดียวกับค่าอัตราการเผาผลาญพลังงาน งานที่กระทำนี้เกิดจากการทำงานของกล้ามเนื้อภายใต้กิจกรรมที่กำหนดและมักระบุให้อยู่ในเทอมของประสิทธิภาพการทำงานของร่างกาย แต่จากการที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของร่างกายมีค่าต่ำมากโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 5% ถึง 10% จึงระบุให้งานที่กระทำโดยกล้ามเนื้อในกิจกรรมต่างๆไปมีค่าเป็นศูนย์ด้วยเหตุผลหลายๆประการดังนี้

1. งานที่ถูกผลิตขึ้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอัตราการเผาผลาญพลังงานโดยเฉพาะอย่างยิ่งกิจกรรมในสำนักงาน
2. ค่าอัตราการเผาผลาญพลังงานที่แน่นอนนั้นยากต่อการตรวจวัด
3. สมมุติฐานนี้เป็นที่ยอมรับกันมานานในการออกแบบระบบปรับอากาศ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้งานที่ทำมีค่าเป็น 0 ในกรณีที่มีการวิเคราะห์ที่มีความจำเป็นต้องทราบค่าที่แน่นอนของพลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นในร่างกายหรือกรณีทำงานจากกล้ามเนื้อในกิจกรรมนั้นมีความสำคัญเช่น การยกของ การปีนเขาหรือการเดินบนพื้นเอียง งานที่กระทำมีความจำเป็นต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ อย่างไรก็ตามกรณีเหล่านี้อยู่นอกเหนือขอบเขตของงานวิจัย

อัตราการเผาผลาญพลังงาน (M) และงานที่ทำได้ (W) ก่อให้เกิดความร้อนขึ้นในร่างกาย ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเกือบทั้งหมดถูกระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผิวหนัง (Q_{sk}) และมีบางส่วนถูกระบายออกผ่านกระบวนการหายใจ (Q_{res}) อย่างไรก็ตามการระบายความร้อนออกจากร่างกายทั้ง 2 แนวทางนี้ต้องทำหน้าที่อย่างสัมพันธ์กันจึงจะรักษาสมดุลความร้อนของร่างกายเอาไว้ได้ เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของทั้งสองแนวทางโดยละเอียดพบว่าการถ่ายเทความร้อนทั้งสองแนวทางนี้ประกอบด้วย การถ่ายเทความร้อนสองชนิด นั่นคือการถ่ายเทความร้อนสัมผัสและการถ่ายเทความร้อนแฝง

การถ่ายเทความร้อนสัมผัสที่ผิวหนังเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นบนผิวหนังผ่านมายังเสื้อผ้าออกไปสู่ผิวนอก จากนั้นจึงถ่ายเทความร้อนที่ผิวนอกของเสื้อผ้าไปสู่สิ่งแวดล้อมผ่านการพาความร้อน (C) และการแผ่รังสีความร้อน (R) ความสัมพันธ์ของการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนสามารถแสดงอยู่ในรูปผลคูณระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของเสื้อผ้ากับอุณหภูมิทางสิ่งแวดล้อมดังนี้

$$C = f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \quad (3)$$

$$R = f_{cl} h_r (t_{cl} - t_{mrt}) \quad (4)$$

โดยที่	C	คือ	การสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อน
	R	คือ	การสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อน
	f_{cl}	คือ	สัดส่วนพื้นที่ของร่างกายที่ปกคลุมด้วยเสื้อผ้า
	t_{cl}	คือ	อุณหภูมิพื้นผิวเสื้อผ้าเฉลี่ย
	h_c	คือ	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
	h_r	คือ	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน
	t_a	คือ	อุณหภูมิอากาศ
	t_{mrt}	คือ	อุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย

สัดส่วนพื้นที่ของร่างกายซึ่งปกคลุมเสื้อผ้า (f_{cl}) ถูกนำมาเป็นตัวปรับแก้ปริมาณการถ่ายเทความร้อนสัมผัสที่เกิดขึ้นบนผิวหนังให้มีค่าเท่ากับการถ่ายเทความร้อนสัมผัสจริงที่เกิดขึ้นบนผิวหนังของเสื้อผ้า เนื่องจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนถูกนิยามให้เกิดขึ้นที่ผิวหนังของร่างกายซึ่งปราศจากอิทธิพลของเสื้อผ้า แต่ในความเป็นจริงบุคคลแต่ละคนสวมเสื้อผ้าอยู่ จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนสัมผัสที่เกิดขึ้นที่ผิวหนังของเสื้อผ้า ดังนั้นค่า f_{cl} ซึ่งถูกนิยามให้มีค่าเท่ากับสัดส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของเสื้อผ้าต่อพื้นที่ของผิวหนังถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณหาค่าความร้อนสัมผัสจริงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของเสื้อผ้าได้อย่างถูกต้อง

สมการที่ใช้คำนวณค่าสัดส่วนพื้นที่ร่างกายที่ปกคลุมด้วยเสื้อผ้า (f_{cl}) สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_c) สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (h_r) มีความแตกต่างกันไปในแต่ละงานวิจัยขึ้นอยู่กับว่าสมการใดเหมาะสมที่สุดหรือมีความถูกต้องมากที่สุดสำหรับงานวิจัยนั้นๆ รายละเอียดทั้งหมดเกี่ยวกับกรคำนวณจะยังไม่ขอกกล่าวถึงแต่จะนำเสนอไว้แล้วในขั้นตอนการคำนวณดัชนีความสบายเชิงความร้อนเพื่อให้ความสัมพัทธ์ที่ใช้คำนวณเป็นสมการที่ใช้จริงในการคำนวณของแต่ละดัชนี

ค่าอุณหภูมิอากาศ (t_a) ที่ปรากฏอยู่ในสมการ (3) หมายถึงอุณหภูมิอากาศของสิ่งแวดล้อม ในที่นี้หมายถึงค่าอุณหภูมิอากาศภายในโซนควบคุมนั่นเอง อุณหภูมิอากาศภายในอาคารเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์หลายๆ ตัวที่ได้รับผลกระทบโดยตรงจากรูปร่างและโครงสร้างของ

อาคาร ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงค่าที่แน่นอนของอากาศภายในบริเวณควบคุม การคำนวณสมดุลความร้อนของอาคารตลอดทั้ง 24 ชั่วโมงจึงเป็นสิ่งจำเป็น

ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย (t_{mn}) หมายถึงอุณหภูมิสม่ำเสมอของพื้นผิวดำที่จินตนาการขึ้น พื้นผิวดังกล่าวถูกกำหนดให้ล้อมรอบผู้อยู่อาศัยและทำให้การแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างพื้นผิวดำล้อมสีดำกับผู้อยู่อาศัยเท่ากับการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อมจริง ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ทางสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อความพึงพอใจเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัย การคำนวณค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยค่อนข้างซับซ้อนและขึ้นอยู่กับทิศทางรวมทั้งอุณหภูมิของผนังแต่ละด้านภายในโซนควบคุม รายละเอียดของการคำนวณสามารถดูได้จากหัวข้อ 2.1.5

เมื่อทราบถึงกระบวนการถ่ายเทความร้อนสัมผัสที่เกิดขึ้นบนผิวผนังแล้วขั้นตอนต่อไปจะทำการพิจารณาถึงการถ่ายเทความร้อนแฝงบนผิวผนังซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนในอีกลักษณะหนึ่งที่ทำให้ร่างกายสามารถระบายความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ การถ่ายเทความร้อนชนิดนี้ขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำที่ผิวผนังกับความดันไอน้ำในอากาศ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับจำนวนความชื้นที่เกิดขึ้นบนผิวผนังด้วยดังจะเห็นได้จากสมการ

$$E_{sk} = wh'_e (P_{sk,s} - P_a) \quad (5)$$

โดยที่	E_{sk}	คือ	การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอที่ผิวผนัง
	w	คือ	ความเปียกชื้นที่ผิวผนัง
	h'_e	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแฝงของเสื้อผ้า
	$P_{sk,s}$	คือ	ความดันไอน้ำอิ่มตัวบนผิวผนัง
	P_a	คือ	ความดันไอน้ำในอากาศ

ค่าความเปียกชื้นที่ผิวผนัง (w) หมายถึงสัดส่วนของการสูญเสียความร้อนแฝงที่เกิดขึ้นจริงบนผิวผนังต่อการสูญเสียความร้อนแฝงมากที่สุดที่สามารถเกิดบนผิวผนังได้ จากนิยามของค่าความชื้นที่ผิวผนังจึงเห็นได้ว่าค่ามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ของพารามิเตอร์ก็คือ w เท่ากับ 1.0 อันหมายถึงผิวผนังมีความเปียกชื้นอย่างสมบูรณ์

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแฝงของเสื้อผ้า (h'_e) ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ องค์ประกอบ อาทิเช่น ความเป็นฉนวนของเสื้อผ้า (I_c) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสัมผัสบนผิวผนัง (h) ประสิทธิภาพการซึมของไอน้ำผ่านเสื้อผ้า (icl) ประสิทธิภาพการซึมของไอน้ำผ่านชั้น

อากาศ (ia) ตัวแปรต่างๆ ที่กล่าวถึงนี้มีความจำเป็นต้องทำการตรวจวัดจึงสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแฝงของเสื้อผ้าได้อย่างถูกต้อง

ความดันไอน้ำอิ่มตัวบนผิวหนัง ($P_{sk,s}$) หมายถึงความดันไอน้ำอิ่มตัวที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิของผิวหนัง (T_{sk}) ดังนั้นการคำนวณค่าความดันนี้จะได้ก็ต่อเมื่อทราบค่าอุณหภูมิผิวหนังที่แน่นอนเสียก่อน ปัญหาในการคำนวณที่ตามมาก็คือทำอย่างไรจึงสามารถทราบค่าอุณหภูมิของผิวหนังได้

นอกจากนี้หากพิจารณาการถ่ายเทความร้อนแฝงบนผิวหนังอย่างละเอียดพบว่า การถ่ายเทความร้อนดังกล่าวเกิดจากการถ่ายเทความร้อนแฝงสองชนิดได้แก่การถ่ายเทความร้อนแฝงที่เกิดจากเหงื่อและการถ่ายเทความร้อนแฝงที่เกิดจากการซึมผ่านของเสื้อผ้า ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E_{sk} = E_{rsw} + E_{dif} \quad (6)$$

โดยที่ E_{rsw} คือ การสูญเสียความร้อนแฝงจากการกลายเป็นไอที่เกิดจากเหงื่อ
 E_{dif} คือ การสูญเสียความร้อนแฝงจากการกลายเป็นไอที่แพร่ผ่านเสื้อผ้า

การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอที่เกิดจากเหงื่อหรือซึมผ่านเสื้อผ้านี้วิเคราะห์ได้ยากมากเนื่องจากต้องพิจารณาถึงกลไกทางสรีรวิทยาของร่างกายไม่ว่าจะเป็นอัตราการไหลเวียนของเลือด การโป่งพองหรือหดตัวของหลอดเลือด การสั่นที่เกิดขึ้นในร่างกาย หรือแม้กระทั่งการนำความร้อนผ่านชั้นของผิวหนัง เพราะเหตุนี้จึงทำให้การคำนวณปริมาณความร้อนแฝงที่สูญเสียไปจากผิวหนังมีความซับซ้อนมากขึ้นและคำนวณค่าที่แน่นอนได้ยาก

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าการสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอที่เกิดขึ้นบนผิวหนังมีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนกับกลไกทางสรีรวิทยาของร่างกายและคำนวณได้ยาก Fanger (1970) ทำการทดลองเพื่อวัดปริมาณดังกล่าวโดยตั้งสมมุติฐานว่าการสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอน่าจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการเผาผลาญพลังงานที่เกิดขึ้น การทดลองในครั้งนี้ทำให้สามารถประมาณค่าความร้อนที่สูญเสียไปจากการกลายเป็นไอบนผิวหนังได้ นอกจากนี้การคำนวณค่าความร้อนจากการกลายเป็นไอบนผิวหนังที่สูญเสียไปสามารถทำได้ในอีกแนวทางหนึ่ง นั่นคือการสร้างแบบจำลองของร่างกายมนุษย์ขึ้น จากนั้นจึงคำนวณค่าปริมาณที่ต้องการด้วยแบบจำลองดังกล่าว แบบจำลองนี้แสดงร่างกายมนุษย์ด้วยทรงกระบอกสองอัน ทรงกระบอกที่อยู่ข้างในหมายถึงแกนกลางของร่างกาย (core) ทรงกระบอกอันนอกแสดงถึงเปลือกหุ้ม (shell) ดังนั้น

แบบจำลองชนิดนี้ว่าแบบจำลองสองจุด (2-node model, 2NM) นอกจากนี้ในแบบจำลองยังบรรจุกลไกทางสรีรวิทยาไว้อย่างครบถ้วนทำให้สามารถคำนวณอุณหภูมิที่แกนกลางของร่างกาย (T_{cr}) รวมถึงอุณหภูมิผิวหนัง (T_{sk}) อันนำไปสู่การคำนวณการสูญเสียความร้อนแฝงที่เกิดขึ้นได้ รายละเอียดของการวิเคราะห์หัดด้วยแบบจำลอง 2NM และสมการตามการทดลองของ Fanger สามารถดูได้จากหัวข้อ 2.1.2 และ 2.1.3 ตามลำดับ

ขั้นตอนต่อไปจะทำการพิจารณาถึงการสูญเสียความร้อนผ่านกระบวนการหายใจ (Q_{res}) ในระหว่างกระบวนการหายใจร่างกายสูญเสียทั้งความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงผ่านการพาความร้อนและการกลายเป็นไอไปสู่อากาศที่หายใจเข้าโดยสังเกตได้จากอากาศที่หายใจเข้าว่าอยู่ในสภาพที่ใกล้เคียงกับสิ่งแวดล้อมแต่อากาศที่หายใจออกกลับอยู่ในสภาวะที่เกือบอิ่มตัวและเย็นกว่าอุณหภูมิในร่างกายเล็กน้อย การสูญเสียความร้อนจากการหายใจเนื่องจากการพาความร้อน (C_{res}) และการกลายเป็นไอ (E_{res}) สามารถแสดงได้ในสมการต่อไปนี้

$$C_{res} = \frac{\dot{m}_{res} C_{p,a} (t_{ex} - t_a)}{A_D} \quad (7)$$

$$E_{res} = \frac{\dot{m}_{res} h_{fg} (w_{ex} - w_a)}{A_D} \quad (8)$$

โดยที่	A_D	คือ	พื้นที่ผิวของร่างกาย, 1.8 m ²
	C_{res}	คือ	การสูญเสียความร้อนสัมผัสจากการหายใจ
	E_{res}	คือ	การสูญเสียความร้อนจากการหายใจเนื่องจากการกลายเป็นไอ
	$C_{p,a}$	คือ	ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศที่หายใจเข้า
	h_{fg}	คือ	ความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอของน้ำ
	\dot{m}_{res}	คือ	อัตราการระบายอากาศของปอด
	t_{ex}	คือ	อุณหภูมิอากาศที่หายใจออก
	w_{ex}	คือ	สัดส่วนความชื้นของอากาศที่หายใจออก
	w_a	คือ	สัดส่วนความชื้นของอากาศที่หายใจเข้า

สมการทั้งสองสามารถประมาณค่าได้ด้วยความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองซึ่งพบว่าภายใต้สภาพแวดล้อมปกติอัตราการระบายอากาศมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอัตราการเผาผลาญพลังงานดังนี้

$$\dot{m}_{res} = K_{res} M \quad (9)$$

โดยที่ K_{res} คือ ค่าคงที่, $2.58 \text{ kg m}^2 / \text{MJ}$

นอกจากนั้นยังพบว่าอุณหภูมิอากาศที่หายใจออกและสัดส่วนไอน้ำที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างกระบวนการหายใจสามารถประมาณได้ด้วยสมการที่ได้จากการทดลอง

$$t_{ex} = 32.6 + 0.066t_a - 32w_a \quad (10)$$

$$w_{ex} - w_a = 0.0277 + 0.000065t_a - 0.8w_a \quad (11)$$

ในกรณีที่การระบายความร้อนผ่านทางผิวหนังและการหายใจไม่สามารถระบายความร้อนทั้งหมดที่เกิดจากการเผาผลาญพลังงานได้ ร่างกายจะสะสมพลังงานจำนวนหนึ่งไว้ในอัตราที่เท่ากับอัตราการเพิ่มของพลังงานในร่างกาย อัตราการสะสมของพลังงานสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความจุความร้อนและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดังนี้

$$S_{cr} = \frac{(1-\alpha)mc_{cr}}{A_D} \frac{dt_{cr}}{d\theta} \quad (12)$$

$$S_{sk} = \frac{\alpha mc_{sk}}{A_D} \frac{dt_{sk}}{d\theta} \quad (13)$$

โดยที่	S_{cr}	คือ	อัตราการสะสมความร้อนในร่างกาย
	S_{sk}	คือ	อัตราการสะสมความร้อนที่ผิวหนัง
	m	คือ	มวลร่างกาย
	c_{cr}	คือ	ความจุความร้อนจำเพาะของแกนร่างกาย, 3.5 kJ / kg K
	c_{sk}	คือ	ความจุความร้อนจำเพาะของผิวหนัง, 3.5 kJ / kg K
	t_{cr}	คือ	อุณหภูมิแกนกลางร่างกาย
	t_{sk}	คือ	อุณหภูมิผิวหนัง
	A_D	คือ	พื้นที่เปลือยของร่างกาย
	θ	คือ	เวลา, s
	α	คือ	สัดส่วนมวลผิวหนังต่อมวลร่างกาย

รายละเอียดทั้งหมดที่กล่าวมาในหัวข้อนี้คือความหมายและส่วนประกอบต่างๆ ของสมการสมดุลความร้อนซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการวิเคราะห์ความสบายเชิงความร้อนของผู้

อยู่อาศัยด้วยดัชนีชนิดต่างๆ ความสัมพันธ์อันซับซ้อนของสมการความสุขสบายที่คำนวณได้ยาก นั้นถูกทำให้ง่ายขึ้นด้วยความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองรวมทั้งแบบจำลองที่สมมุติขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะทางกายภาพของค่าดัชนีที่บ่งบอกถึงความสุขสบายเชิงความร้อน ขั้นตอนการคำนวณค่าดัชนีต่างๆ ได้แสดงไว้อย่างละเอียดในหัวข้อ 2.1.2 ถึง 2.1.7

2.1.2 อุณหภูมิยังผลมาตรฐาน (Standard Effective Temperature, SET*)

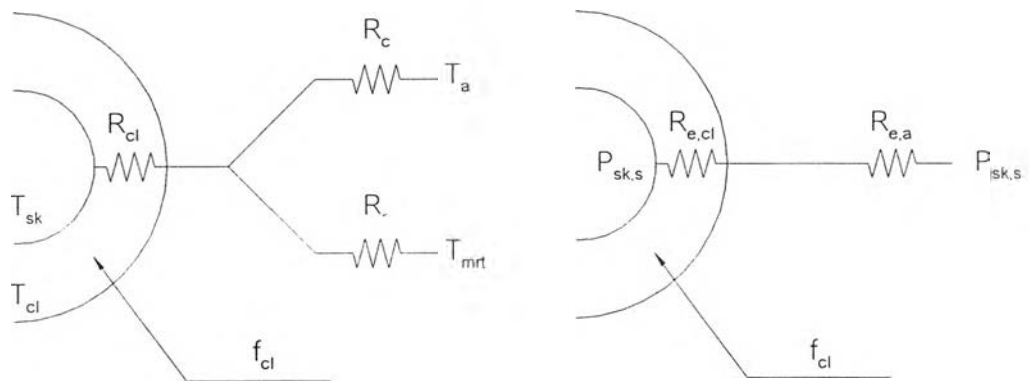
อุณหภูมิยังผลมาตรฐาน (SET*) คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของสิ่งแวดล้อมซึ่งมีความร้อนคงที่ซึ่งสมมุติขึ้น ณ ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 50% และทำให้ผู้ที่ทำการทดลองซึ่งใส่เสื้อผ้ามาตรฐานสำหรับกิจกรรมนั้นๆ มีความเปียกชื้นรวมถึงการแลกเปลี่ยนความร้อนบนผิวหนังเท่ากับปริมาณที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมที่ทำการทดลอง (Gagge, 1986) ดังนั้นจากนิยามของ SET* พบว่าความเป็นฉนวนของเสื้อผ้าที่ใส่ในแต่ละกิจกรรมรวมถึงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนยังผลในเสื้อผ้าและอากาศต้องเปลี่ยนให้เป็นค่าที่ได้จากสภาพแวดล้อมมาตรฐานซึ่งใช้ในการทดลอง

ค่า SET* หาได้จากคำตอบของสมการที่อยู่ในรูปความสัมพันธ์ดังนี้

$$SET^* = T_{so} + w \frac{h'_{es}}{h'_s} (P_{so} - 0.5P_{SET^*,s}) \quad (14)$$

โดยที่	$P_{SET^*,s}$	คือ	ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิ SET*
	h'_s	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสัมผัสในสิ่งแวดล้อมมาตรฐาน
	h'_{es}	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแฝงในสิ่งแวดล้อมมาตรฐาน
	T_{so}	คือ	Standard operative temperature
	P_{so}	คือ	Standard operative pressure
	w	คือ	ความเปียกชื้นที่ผิวหนัง

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะจำลองร่างกายตามวิธีของแบบจำลองสองจุด (2-node model, 2NM) ซึ่งแสดงร่างกายของคนด้วยทรงกระบอกสองอัน ทรงกระบอกอันแรกที่อยู่ด้านในแสดงถึงแกนกลาง (core) ของร่างกายและถูกล้อมรอบด้วยเปลือกหุ้ม (shell) ซึ่งแทนด้วยทรงกระบอกที่อยู่ด้านนอก การถ่ายเทความร้อนตามแบบจำลองของ 2NM ถูกจำลองโดยคุณสมบัติทางความร้อนของแกนและเปลือกของแบบจำลองนั่นเอง



รูป 2.1 การถ่ายเทความร้อนสัมผัสจากผิวหนัง รูป 2.2 การถ่ายเทความร้อนแผ่รังสีจากผิวหนัง

ความหมายของพารามิเตอร์ต่างๆในรูป 2.1 และ 2.2 แสดงได้ดังนี้ R_{cl} คือความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของเสื้อผ้า R_c คือ ความต้านทานการพาความร้อน R_r คือ ความต้านทานการแผ่รังสีความร้อน $R_{e,cl}$ คือความต้านทานการกลายเป็นไอของเสื้อผ้า $R_{e,a}$ คือความต้านทานต่อการกลายเป็นไอของชั้นอากาศและ f_{cl} คือสัดส่วนของพื้นที่ร่างกายซึ่งปกคลุมด้วยเสื้อผ้า

รูป 2.1 สามารถหาความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของอากาศได้จากความต้านทานซึ่งเกิดจาก R_c และ R_r ที่ต่อขนานกัน ถ้าพิจารณาว่าความต้านทานการส่งผ่านความร้อนเป็นส่วนกลับของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อน ($R = 1/h$) จะได้ว่า

$$\frac{1}{R_a} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_r} \quad (15)$$

นั่นคือ
$$h = h_c + h_r \quad (16)$$

โดยที่	h	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสัมผัสรวมที่พื้นผิว
	h_c	คือ	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
	h_r	คือ	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน
	R_a	คือ	ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของชั้นอากาศ

ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสัมผัส (h') เกิดจากส่วนกลับของผลรวมของความต้านทานระหว่าง R_{cl} และ R_a ซึ่งเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม

$$h' = \frac{1}{R_{cl} + \frac{R_a}{f_{cl}}} = \frac{1}{0.155l_{cl} + \frac{1}{hf_{cl}}} \quad (17)$$

โดยที่ h' คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสัมผัสทั้งหมด (รวมเสื้อผ้า)
 l_{cl} คือ ความเป็นฉนวนของเสื้อผ้าที่สวมใส่

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_c) ที่ใช้ในการคำนวณค่า SET* อ้างอิงจากความสัมพัทธ์ที่แสดงไว้ในงานวิจัยของ Gagge (1986) ซึ่งอยู่ในรูปของความเร็วลมสัมพัทธ์ระหว่างคนกับอากาศและอัตราการเผาผลาญพลังงานดังนี้

$$h_c = 8.6v_r^{0.53} \quad (18)$$

หรือ

$$h_c = 5.66 \left(\frac{M}{58.15} - 0.85 \right)^{0.39} \quad (19)$$

โดยที่ M คือ อัตราการเผาผลาญพลังงาน
 v_r คือ ความเร็วลมอากาศสัมพัทธ์

ค่า h_c ที่ได้จากความสัมพัทธ์ทั้งสองถูกนำมาเปรียบเทียบกันและจะนำเฉพาะค่า h_c ที่มากกว่าไปใช้ในการคำนวณ อย่างไรก็ตามในกรณีที่ h_c ซึ่งคำนวณได้มีค่าน้อยกว่าที่ใช้ในการคำนวณทั่วไปแล้วจะกำหนดให้ h_c มีค่าเป็น $3.0 \text{ W / m}^2 \text{ K}$ สำหรับค่าความเร็วอากาศสัมพัทธ์ที่ใช้ในการคำนวณนั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามกิจกรรมที่ทำ แต่ถ้าผู้อยู่อาศัยกำลังพักผ่อนหรือหยุดทำกิจกรรมแล้วความเร็วอากาศสัมพัทธ์จะมีค่าเท่ากับความเร็วอากาศ

$$v_r = v + 0.05(M - 58.15) \quad (20)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (h_r) เป็นตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงลักษณะของการแผ่รังสีความร้อนให้อยู่ในรูปเชิงเส้นซึ่งแสดงอยู่ในรูปของความสัมพัทธ์ดังต่อไปนี้

$$h_r = 4\varepsilon\sigma \frac{A_r}{A_D} \left(273.2 + \frac{(t_{cl} + t_{mrt})}{2} \right)^3 \quad (21)$$

โดยที่ ε คือ ค่าการเปล่งรังสีเฉลี่ย

σ	คือ	ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzman
A_r	คือ	พื้นที่ของร่างกายที่เปล่งรังสีความร้อน
A_D	คือ	พื้นที่ผิวเปลือยของร่างกาย
t_{cl}	คือ	อุณหภูมิพื้นผิวเสื้อผ้าเฉลี่ย
t_{mt}	คือ	อุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย

โดยทั่วไป ε มีค่าอยู่ระหว่าง 0.9 ถึง 1.0 สำหรับการคำนวณในงานวิจัยนี้กำหนดให้ ε มีค่าเท่ากับ 0.95 ค่าคงที่ตัวถัดมาก็คือ σ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ K}$ ค่าสัดส่วน $\frac{A_r}{A_D}$ จะแยกการพิจารณาออกเป็นสองกรณีเนื่องจากการเปล่งรังสีความร้อนของร่างกายในแต่ ละกิจกรรมมีค่าไม่เท่ากัน Fanger (1970) ทำการศึกษาถึงสัดส่วนดังกล่าวและพบว่าค่า $\frac{A_r}{A_D}$ สำหรับการนั่งมีค่า 0.696 และมีค่า 0.725 สำหรับการยืน อย่างไรก็ตามค่า h_r ยังไม่สามารถคำนวณได้โดยตรงเนื่องจากยังไม่ทราบค่าที่แน่นอนของ t_{cl} จึงทำให้การคำนวณมีความจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการทำซ้ำจึงสามารถคำนวณค่า t_{cl} และ h_r ได้ แต่สำหรับสภาพแวดล้อมปกติค่า h_r มีค่าเกือบคงที่ประมาณ $4.7 \text{ W / m}^2 \text{ K}$ ถ้าหากการคำนวณไม่มีการพิจารณาสภาพอากาศร้อนจัดหรือหนาวจัดแล้วการกำหนดค่า h_r เท่ากับ $4.7 \text{ W / m}^2 \text{ K}$ จะสามารถคำนวณค่า t_{cl} ได้โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการทำซ้ำ

ค่าอุณหภูมิพื้นผิวเสื้อผ้าเฉลี่ย (t_{cl}) สามารถคำนวณได้จากแบบจำลอง 2NM โดยพิจารณาถึงสมดุลความร้อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเสื้อผ้า การเท่ากันระหว่างปริมาณที่ออกจากผิวหนังสู่เสื้อผ้ากับปริมาณความร้อนที่ออกสู่สิ่งแวดล้อมทำให้ t_{cl} คำนวณได้ตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\text{จาก} \quad (T_{cl} - T_{sk})h_{cl} = (T_o - T_{cl})h_{f_{cl}}$$

$$\text{นั่นคือ} \quad T_{cl} = \frac{h_{cl}T_{sk} + f_{cl}hT_o}{h_{cl} + f_{cl}h} \quad (22)$$

โดยที่	h_{cl}	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสัมผัสที่เสื้อผ้า
	T_o	คือ	Operative temperature
	T_{sk}	คือ	อุณหภูมิผิวหนัง

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสัมผัสบนเสื้อผ้า (h_{cl}) คำนวณได้จากส่วนกลับของ R_{cl} ค่า T_o และ T_{sk} เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ในขั้นตอนนี้จะยังไม่กล่าวถึงนิยามและรายละเอียด

ละเอียดของการคำนวณ อย่างไรก็ตามเมื่อได้ศึกษาถึงค่าอุณหภูมิทั้งสองตัวนี้ที่แสดงไว้ในเนื้อหาถัดไปแล้วจะพบว่า การคำนวณค่าอุณหภูมิดังกล่าวมีความจำเป็นต้องทราบค่าของ h_c และ h_r เพราะเหตุนี้จึงทำให้การคำนวณ h_c , h_r และ t_{cl} จำเป็นต้องกระทำควบคู่กันไปโดยอาศัยกระบวนการซ้ำ

จากค่าสัดส่วนของพื้นที่ร่างกายซึ่งปกคลุมด้วยเสื้อผ้า (f_{cl}) ตามที่เคยให้คำอธิบายอย่างละเอียดไว้ในขั้นตอนการวิเคราะห์สมการสมดุลความร้อน ในหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงความสัมพันธ์ที่ใช้คำนวณ ตามที่กล่าวมาแล้วว่าความสัมพันธ์ที่ใช้คำนวณค่า f_{cl} ในแต่ละงานวิจัยมีสมการที่แตกต่างกันไป แต่ค่า SET* ซึ่งเป็นดัชนีความสบายเชิงความร้อนสำคัญตัวหนึ่งที่กำลังนำเสนออยู่ ณ ที่นี้ถูกนิยามขึ้นโดย Gagge (1986) ดังนั้นค่า f_{cl} ที่นำมาคำนวณต้องสอดคล้องกับความสัมพันธ์ที่ใช้ในงานวิจัยของเขา

$$f_{cl} = 1 + 0.25I_{cl} \quad (23)$$

ส่วนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสัมผัสในสิ่งแวดล้อมมาตรฐาน (h'_e) ก็คือค่า h' ซึ่งคำนวณในเงื่อนไขของ SET* ที่ระบุว่าผู้ที่ทำการทดลองสวมเสื้อผ้ามาตรฐานสำหรับกิจกรรมนั้นๆ โดยที่ความเป็นฉนวนของเสื้อผ้าในสิ่งแวดล้อมมาตรฐานที่สวมใส่ (I_{cls}) มีความสัมพันธ์กับอัตราการเผาผลาญพลังงาน (M) ดังนี้

$$I_{cls} = \frac{1.33}{M - W + 0.74} - 0.095 \quad (24)$$

โดยที่	I_{cls}	คือ	ความเป็นฉนวนของเสื้อผ้าในสิ่งแวดล้อมมาตรฐาน
	M	คือ	อัตราการเผาผลาญพลังงาน
	W	คือ	งานภายนอก

รูป 2.2 แสดงถึงวงจรความต้านทานของการกลายเป็นไอ ความต้านทานรวมของการกลายเป็นไอเกิดจากความต้านทานรวมของการกลายเป็นไอที่เกิดขึ้นทั้งในอากาศและเสื้อผ้า ซึ่งเชื่อมต่อกันอย่างอนุกรม ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการกลายเป็นไอคือ

$$h'_e = \frac{1}{R_{e,cl} + \frac{R_{e,a}}{f_{cl}}} \quad (25)$$

โดยที่ h'_e คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแฝงทั้งหมด (รวมเสื้อผ้า)

$R_{e,cl}$ และ $R_{e,a}$ ซึ่งแสดงถึงความต้านทานของการกลายเป็นไอนี้มีความสัมพันธ์กับ R_{cl} และ R_a ที่เป็นความต้านทานของการถ่ายเทความร้อนสัมผัสโดยมีค่าสัดส่วนของ Lewis (Lewis ratio, LR) เป็นกฎเกณฑ์สำคัญในการเชื่อมต่อความสัมพันธ์ดังกล่าว LR หมายถึงสัดส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการกลายเป็นไอ (h_e) กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_c) นอกจากนี้ยังพบว่า LR ยังแปรผันกับอุณหภูมิที่ผิวหนังตามสมการต่อไปนี้

$$LR = 15.15 \frac{(t_{sk} + 273.2)}{273.2} \quad (26)$$

โดยที่ t_{sk} คือ อุณหภูมิผิวหนัง

จากนิยามของค่า LR นี้เองจึงสามารถเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนจากการกลายเป็นไอกับความต้านทานความร้อนสัมผัสได้ ความสัมพันธ์ระหว่าง $R_{e,a}$ กับ R_a และ ความสัมพันธ์ระหว่าง $R_{e,cl}$ กับ R_{cl} จะแสดงได้ด้วยสูตรที่อ้างอิงจาก ASHRAE (2001) ดังต่อไปนี้

$$ia \cdot LR = \frac{h_e}{h} = \frac{R_a}{R_{e,a}} \quad (27)$$

$$icl \cdot LR = \frac{h_{e,cl}}{h_{cl}} = \frac{R_{cl}}{R_{e,cl}} \quad (28)$$

โดยที่ ia คือ ประสิทธิภาพการซึมของไอน้ำผ่านชั้นอากาศ

icl คือ ประสิทธิภาพการซึมของไอน้ำผ่านเสื้อผ้า

$h_{e,cl}$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการกลายเป็นไอที่เสื้อผ้า

ประสิทธิภาพการซึมของไอน้ำผ่านชั้นอากาศ (ia) หมายถึงสัดส่วนของความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจากการกลายเป็นไอน้ำผ่านชั้นอากาศภายนอกต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อนสัมผัส ASHRAE (2001) ได้แสดงสมการความสัมพันธ์ของ ia ไว้ดังสมการ (29)

$$ia = \frac{h_c}{h} \quad (29)$$

ประสิทธิภาพการซึมของไอน้ำผ่านเสื้อผ้า (icl) หมายถึงสัดส่วนของความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจากการกลายเป็นไอน้ำผ่านเสื้อผ้าต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อนสัมผัส ค่า icl นี้จำเป็นต้องเปิดจากตารางที่ได้ระบุไว้ใน ASHRAE (2001) สำหรับลักษณะการแต่งกายในการอยู่อาศัยภายในอาคารทั่วไป Gagge (1986) แนะนำว่าควรใช้ค่า icl เท่ากับ 0.45

ดังนั้นเมื่อทราบถึงความสัมพันธ์ของ ia icl $R_{e,cl}$ และ $R_{e,a}$ แล้วแทนค่าเข้าไปในสมการของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแผ่ (h'_e) จะได้ว่า

$$h'_e = \frac{1}{\frac{R_{cl}}{icl \cdot LR} + \frac{R_a}{ia \cdot LR \cdot f_{cl}}} = \frac{1}{\frac{0.155 icl}{icl \cdot LR} + \frac{1}{h \cdot f_{cl} \cdot ia \cdot LR}} \quad (30)$$

จากสมการของ h'_e จะสามารถคำนวณค่า $h'_{e,s}$ ที่แสดงถึงค่า h'_e ซึ่งพิจารณา ณ สิ่งแวดล้อมมาตรฐานได้โดยทำการคำนวณค่า h'_e ของผู้ทำการทดลองที่สวมเสื้อผ้ามาตรฐานสำหรับกิจกรรมนั้นๆ หรือความเป็นฉนวนของเสื้อผ้ามีค่าเท่ากับ I_{cls} นั้นเอง

เมื่อได้นิยามรวมถึงความสัมพันธ์ของค่า $h'_{e,s}$ และ h'_s แล้วลำดับต่อไปจะพิจารณานิยามและความสัมพันธ์ของค่า T_{so} และ P_{so} T_{so} หรือ Standard operative temperature ก็คืออุณหภูมิที่สม่ำเสมอของอากาศนิ่งที่อยู่ล้อมรอบและทำการแลกเปลี่ยนความร้อนสัมผัสในปริมาณที่เท่ากับสิ่งแวดล้อมที่ทำการทดลอง จากนิยามของ T_{so} จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ต่อไปนี้

$$Q_{dry} = h'(T_{sk} - T_o) = h'_s(T_{sk} - T_{so}) \quad (31)$$

โดยที่	Q_{dry}	คือ	การแลกเปลี่ยนความร้อนสัมผัส
	T_o	คือ	Operative temperature
	T_{sk}	คือ	อุณหภูมิที่ผิวหนัง

เนื่องจากนิยามของค่า SET* กำหนดให้แลกเปลี่ยนความร้อนที่ผิวหนังในสิ่งแวดล้อมจริงเท่ากับการแลกเปลี่ยนความร้อนในสิ่งแวดล้อมที่ทำการทดลอง การคำนวณ T_{so} จึงจำเป็นต้องคำนวณว่าการแลกเปลี่ยนความร้อนของสภาพแวดล้อมจริงเป็นเช่นไรแล้วจึงคำนวณอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่ทำการทดลองเพื่อทำให้สิ่งแวดล้อมที่ทำการทดลองส่งผ่านการถ่ายเทความร้อนสัมผัสในปริมาณที่เท่ากับสิ่งแวดล้อมจริงกระทำ ดังนั้น T_{so} คำนวณได้จากสมการ

$$T_{so} = \left(\frac{h'}{h'_s} \right) T_o + \left(1 - \frac{h'}{h'_s} \right) T_{sk} \quad (32)$$

สำหรับ Operative temperature (T_o) นั้น ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 1992/1995) ได้ให้นิยามไว้ว่า T_o คืออุณหภูมิที่สม่ำเสมอของพื้นผิวปิดสีดำซึ่งทำให้ผู้อยู่อาศัยแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งเกิดจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนในปริมาณเท่ากับที่เกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อมจริงซึ่งมีอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ T_o จะได้จากค่าเฉลี่ยเชิงเลขระหว่างอุณหภูมิอากาศ (T_a) และอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย (T_{mrt}) ถ่วงน้ำหนักด้วยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของทั้งสองซึ่งแสดงได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$T_o = \frac{h_c T_a + h_r T_{mrt}}{h_c + h_r} \quad (33)$$

โดยที่	T_o	คือ	Operative temperature
	T_a	คือ	อุณหภูมิอากาศ
	T_{mrt}	คือ	อุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย

สำหรับอุณหภูมิที่ผิวหนัง (T_{sk}) นั้นเป็นตัวแปรสำคัญและยากต่อการคำนวณมากที่สุดซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (43) และ (44) ดังนั้นจากนิยามของ T_o , h' และ h'_s ก็จะสามารถคำนวณ Standard operative temperature (T_{so}) ได้

Standard operative vapor pressure (P_{so}) คือ ความดันไอน้ำที่สม่ำเสมอของอากาศนิ่งที่อยู่ล้อมรอบ ณ ระดับอุณหภูมิ T_{so} ซึ่งทำให้การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอน้ำที่ผิวหนังมีปริมาณเท่ากับสิ่งแวดล้อมที่ทำการทดลองและเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Q_{evap} = wh'_e (P_{sk,s} - P_a) = wh'_{es} (P_{sk,s} - P_{so}) \quad (34)$$

โดยที่	Q_{evap}	คือ	การถ่ายเทความร้อนสัมผัสจากการกลายเป็นไอน้ำ
	w	คือ	ความเปียกชื้นที่ผิวหนัง
	P_a	คือ	ความดันไอน้ำในบรรยากาศ
	$P_{sk,s}$	คือ	ความดันไอน้ำอิมมิตัวที่อุณหภูมิ T_{sk}

จากนิยามของค่า SET* ที่ระบุให้ความเปียกชื้นที่ผิวหนังของผู้ที่ทำการทดลองในสภาพแวดล้อมจริงเท่ากับสภาพแวดล้อมที่ทำการทดลอง ดังนั้นจะสามารถเขียนความสัมพันธ์เพื่อใช้คำนวณ P_{so} ใหม่ได้ดังนี้

$$P_{so} = \left(\frac{h'_e}{h'_{es}} \right) P_a + \left(1 - \frac{h'_e}{h'_{es}} \right) P_{sk,s} \quad (35)$$

เมื่อความสัมพันธ์สำหรับคำนวณค่า T_{so} และ P_{so} แล้วพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ SET* จะเหลือค่า w เพียงตัวเดียว ค่า w หรือความเปียกชื้นที่ผิวหนังนี้แสดงถึงสัดส่วนความร้อนสูญเสียจากการกลายเป็นไอที่ผิวหนังต่อความร้อนสูญเสียจากการกลายเป็นไอบางที่สุด w มีค่าอยู่ในช่วง 0.06 ซึ่งเกิดจากความร้อนสูญเสียจากการกลายเป็นไอที่แพร่ผ่านผิวหนัง (E_{dif}) จนถึง 1.0 ซึ่งหมายถึงผิวหนังเปียกชื้นด้วยเหงื่อโดยสมบูรณ์ ค่า w สามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$w = \frac{E_{sk}}{E_{max}} \quad (36)$$

โดยที่ E_{sk} คือ การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอที่ผิวหนัง
 E_{max} คือ การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอบางที่สุด

การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอเป็นสัดส่วนของผลต่างความดันไอน้ำที่เกิดขึ้นกับค่าความต้านทานของการกลายเป็นไอ ดังนั้นการสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอบางที่สุดที่เกิดเมื่อ w เท่ากับ 1.0 มีสมการดังนี้

$$E_{max} = h'_e (P_{sk,s} - P_a) \quad (37)$$

สำหรับค่า E_{sk} นั้นจะพบว่าปริมาณดังกล่าวเกิดจากผลรวมระหว่างการสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอที่เกิดจากเหงื่อ (E_{rsw}) กับการสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอที่เกิดจากการแพร่ (E_{dif}) เมื่อไม่มี E_{rsw} เกิดขึ้น ความเปียกชื้นที่เกิดจากการแพร่ (w_{dif}) สำหรับสภาพปกติจะมีค่า 0.06 และเมื่อ E_{rsw} มีค่ามากขึ้นหรือความชื้นในอากาศมีค่าน้อยลง w_{dif} อาจมีค่าลดลงจนถึง 0.02 ได้เนื่องจากเกิดการสูญเสียไอน้ำของผิวหนังด้านนอก

$$E_{dif} = 0.06(1 - w_{rsw})E_{max} \quad (38)$$

โดยที่ w_{rsw} คือ ความเปียกชื้นที่ผิวหนังอันเกิดจากเหงื่อ

การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอที่เกิดจากเหงื่อ (E_{rsw}) จะเท่ากับผลคูณระหว่างความเปียกชื้นที่ผิวหนังอันเกิดจากเหงื่อ (w_{rsw}) กับความสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอมากที่สุดที่เกิดขึ้น (E_{max}) นอกจากนี้ E_{rsw} ยังมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของร่างกายและอุณหภูมิที่ผิวหนังอีกด้วย

$$E_{rsw} = c_{sw} (t_b - t_{bset}) \exp \left[\frac{(t_{sk} - 34)}{10.7} \right] \quad (39)$$

โดยที่	c_{sw}	คือ	ค่าคงที่สำหรับการควบคุมเหงื่อ, $170 \text{ W} / \text{m}^2$
	t_b	คือ	อุณหภูมิของร่างกาย
	t_{bset}	คือ	อุณหภูมิของร่างกายที่กำหนด
	t_{sk}	คือ	อุณหภูมิผิวหนัง

ส่วนประกอบของผิวหนังประกอบด้วยหนังกำพร้ากับผิวแท้ได้ผิวหนังและมีความหนาประมาณ 1.6 มิลลิเมตร ผิวหนังแท้มีมวลประมาณ 10% ของมวลร่างกายทั้งหมด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับปริมาณเลือดที่ไหลผ่านอันเกิดจากระบบรักษาอุณหภูมิของร่างกาย สัดส่วนของผิวหนังถูกนำไปใช้ในการประมาณอุณหภูมิของร่างกายโดยพิจารณาว่าอุณหภูมิร่างกายเกิดจากค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิผิวหนังกับอุณหภูมิภายในร่างกาย

$$t_{mb} = \alpha t_{sk} + (1 - \alpha) t_{cr} \quad (40)$$

โดยที่	t_{mb}	คือ	อุณหภูมิร่างกายเฉลี่ย
	t_{cr}	คือ	อุณหภูมิแกนกลางของร่างกาย
	α	คือ	สัดส่วนมวลของผิวหนังต่อมวลของร่างกาย

สัดส่วนมวลของผิวหนัง (α) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการไหลเวียนโลหิต

$$\alpha = 0.0418 + \frac{0.745}{\dot{m}_{bl} - 0.585} \quad (41)$$

การไหลเวียนโลหิตขึ้นอยู่กับความเร็วของการผันแปรของ t_{cr} และ t_{sk} ออกจากค่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้โดยการไหลเวียนโลหิตจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิภายในร่างกายสูงขึ้นและจะลดลงเมื่อผิวหนังมีอุณหภูมิต่ำลง อัตราการไหลเวียนโลหิตภายในร่างกายจะมีค่าไม่เกิน $90 \text{ l} / \text{m}^2 \text{ hr}$ และมีค่าไม่น้อยกว่า $6.3 \text{ l} / \text{m}^2 \text{ hr}$ เสมอโดยแสดงได้ในสมการ

$$\dot{m}_{bl} = \text{BFN} + \frac{c_{dil}(t_{cr} - 37)}{1 + s_r(34 - t_{sk})} \quad (42)$$

โดยที่	BFN	คือ	อัตราการไหลเวียนปกติของเลือด, 6.3 l / m ² hr
	c _{dil}	คือ	ค่าคงที่สำหรับการไหลเวียนโลหิต, 175
	s _r	คือ	ค่าคงที่สำหรับการหดตัวของเลือดใต้ผิวหนัง, 0.5

การเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลของโลหิตจะเกิดเมื่อ t_{cr} สูงขึ้นหรือ t_{sk} มีค่าลดลง ดังนั้นค่าในวงเล็บของความสัมพันธ์จะมีค่า 0 ทันทีเมื่อพบว่าผลต่างของอุณหภูมิมีค่าเป็นลบ ซึ่งจะสอดคล้องกับธรรมชาติของการไหลเวียนโลหิตที่มีค่าไม่ต่ำกว่า 6.3 l / m² hr เสมอ

สำหรับอุณหภูมิของร่างกายที่กำหนดขึ้นเพื่ออ้างอิงกับอุณหภูมิร่างกายเฉลี่ยที่คำนวณได้จะพิจารณาจากค่าอุณหภูมิของผิวหนังและอุณหภูมิของแกนร่างกายที่ได้กำหนดไว้ซึ่งมีค่า 37 °C และ 34 °C ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพิจารณาว่ามวลของผิวหนังมีค่าประมาณ 10% ของมวลร่างกายทั้งหมด เพราะฉะนั้นอุณหภูมิร่างกายที่ต้องกำหนดขึ้น (t_{bset}) จะมีค่าเท่ากับ

$$t_{bset} = (0.1) \times 34 + (1 - 0.1 \times 37) = 36.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

เมื่อทราบความสัมพันธ์ของอุณหภูมิร่างกายเฉลี่ย (t_{mb}) แล้วอัตราการไหลเวียนของเลือด (\dot{m}_{bl}) รวมถึงอุณหภูมิของร่างกายที่ไว้ใช้อ้างอิง (t_{bset}) ก็จะสามารถคำนวณการสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอของเหงื่อ (E_{rsw}) และจะนำไปสู่การคำนวณการสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไออันเกิดจากการแพร่ (E_{dif}) สุดท้ายแล้วก็จะสามารถคำนวณความเปียกชื้นที่เกิดขึ้นบนผิวหนังได้ (w) หากแต่ถ้าปริมาณต่างๆ ที่จะต้องคำนวณซึ่งได้แก่ E_{dif} E_{rsw} E_{sk} \dot{m}_{bl} และ w ล้วนอยู่ในรูปของอุณหภูมิผิวหนัง (t_{sk}) ทั้งสิ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการคำนวณที่ผ่านมาพบว่า t_{sk} ยังเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการคำนวณ T_{so} และ P_{so} อีกด้วย จึงกล่าวได้ว่า t_{sk} เป็นกุญแจสำคัญต่อการคำนวณอุณหภูมียังผลมาตรฐาน (SET*)

การคำนวณ t_{sk} จะต้องวิเคราะห์ถึงสมดุลความร้อนในร่างกายซึ่งถูกจำลองตามลักษณะของ 2NM ในส่วนของแบบจำลองซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่คงตัวจะแสดงถึงระบบควบคุมความร้อนของร่างกายและจะทำให้แบบจำลองที่แสดงถึงร่างกายของคนนั้นสามารถเกิดการโป่งพองหรือเกิดการหดตัวของเส้นเลือดได้ นอกจากนี้ยังมีการขับเหงื่อและมีการสั่นซึ่งสอดคล้องกับสภาพของร่างกายในแต่ละสภาวะอีกด้วย สภาพของร่างกายจะมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อมภายนอก เสื้อผ้าที่สวมใส่รวมถึงกิจกรรมที่ทำ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าแกนกลางของร่างกายเกิดความรู้สึก

ร้อนเกินไปอันเกิดจากอุณหภูมิแกนกลางสูงกว่าอุณหภูมิที่ได้กำหนดไว้ (ในที่นี้คือ 37°C) การขยายตัวของเส้นเลือดและเหงื่อจะเกิดขึ้นเพื่อปรับเปลี่ยนการถ่ายเทความร้อนระหว่างแกนกลางของร่างกายและผิวหนังซึ่งแทนในแบบจำลองด้วยทรงกระบอกสองอันนั่นเอง

สมดุลความร้อนที่เกิดขึ้นในร่างกายจะประกอบด้วยสองส่วนคือสมดุลความร้อนของแกนร่างกายและสมดุลความร้อนที่เกิดขึ้นบนผิวหนัง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแกนร่างกายเกิดจากอัตราการผลิตพลังงานจากกิจกรรมที่ทำ (M) อัตราการผลิตพลังงานอันเกิดจากการสั่นของร่างกาย (M_{shiv}) งานจากกิจกรรม (W) การสูญเสียความร้อนจากการหายใจ (Q_{res}) รวมถึงการสูญเสียความร้อนออกสู่ผิวหนังผ่านกระแสโลหิต ส่วนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ผิวหนังนั้นจะเกิดจากการนำความร้อนผ่านกระแสโลหิตที่ส่งมาจากแกนกลางของร่างกาย การสูญเสียความร้อนสัมผัส (Q_{dry}) และการสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอ (Q_{evap}) ที่เกิดขึ้นบนผิวหนังนั่นเอง สมการความสัมพันธ์ของสมดุลความร้อนที่เกิดขึ้นตามแบบจำลองของ 2NM จะแสดงได้ดังนี้

$$W_{\text{cr}} c_{\text{cr}} \frac{dt_{\text{cr}}}{d\theta} = M + M_{\text{shiv}} - W - Q_{\text{res}} - (K - \dot{m}_{\text{bl}} c_{\text{p,bl}})(t_{\text{cr}} - t_{\text{sk}}) \quad (43)$$

$$W_{\text{sk}} c_{\text{sk}} \frac{dt_{\text{sk}}}{d\theta} = (K - \dot{m}_{\text{bl}} c_{\text{p,bl}})(t_{\text{cr}} - t_{\text{sk}}) - Q_{\text{dry}} - Q_{\text{evap}} \quad (44)$$

โดยที่	c_{cr}	คือ	ความจุความร้อนจำเพาะของแกนร่างกาย, 3.5 kJ / kg K
	$c_{\text{p,bl}}$	คือ	ความจุความร้อนจำเพาะของเลือด, 4.19 kJ / kg K
	c_{sk}	คือ	ความจุความร้อนจำเพาะของผิวหนัง, 3.5 kJ / kg K
	K	คือ	การนำความร้อนยังผลระหว่างแกนกลางของร่างกายกับผิวหนัง
	M	คือ	อัตราการผลิตพลังงานที่เกิดขึ้น
	M_{shiv}	คือ	อัตราการผลิตพลังงานที่เกิดจากการสั่นของร่างกาย
	Q_{dry}	คือ	การสูญเสียความร้อนสัมผัส
	Q_{evap}	คือ	การสูญเสียความร้อนที่เกิดจากการกลายเป็นไอ
	Q_{res}	คือ	การสูญเสียความร้อนที่เกิดจากการหายใจ
	W	คือ	งานที่ทำ
	W_{cr}	คือ	มวลของแกนร่างกายต่อพื้นที่ผิวหนัง
	W_{sk}	คือ	มวลของผิวหนังต่อพื้นที่ผิวหนัง

มวลของแกนร่างกายกับมวลของผิวหนังจะมีความสัมพันธ์กับสัดส่วนมวลของผิวหนัง (α) ถ้าพิจารณาว่าคนที่ทำการทดลองมีมวล m จะได้ว่ามวลของแกนร่างกายกับมวลของผิวหนังมีค่า

$$W_{cr} = \frac{(1 - \alpha) \cdot m}{A_D} \quad (45)$$

$$W_{sk} = \frac{\alpha \cdot m}{A_D} \quad (46)$$

โดยที่ m คือ มวลผู้ทำการทดลอง

ASHRAE (2001) กำหนดให้คนที่มีรูปร่างมาตรฐานมีมวลและพื้นที่ผิวเท่ากับ 70 kg และ 1.8 m² ตามลำดับ จากอุณหภูมิที่ได้กำหนดไว้ (ในที่นี้กำหนดตำแหน่งอ้างอิงของอุณหภูมิแกนร่างกายกับอุณหภูมิผิวหนังที่ 37 °C และ 34 °C ตามลำดับ) การสั่นของร่างกายจะเกิดเฉพาะกรณีที่อุณหภูมิของแกนร่างกายและอุณหภูมิของผิวหนังมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้ มิเช่นนั้นแล้วจะไม่มี การสั่นเกิดขึ้น

$$M_{shiv} = 19.4(34 - t_{sk})(37 - t_{cr}) \quad (47)$$

การสูญเสียความร้อนสัมผัส (Q_{dry}) เกิดจากผลรวมของการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวของเสื้อผ้าและมีปริมาณเท่ากับการสูญเสียความร้อนออกจากผิวหนัง สมการที่แสดงถึงการสูญเสียความร้อนสัมผัสเคยแสดงไว้ครั้งหนึ่งแล้วในขั้นตอนการคำนวณ T_{so} และแสดงอีกครั้งได้ดังต่อไปนี้

$$Q_{dry} = h'(T_{so} - T_o) = h'_s(T_{sk} - T_{so}) \quad (48)$$

การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวหนังเคยแสดงความสัมพันธ์ไปแล้วในขั้นตอนการคำนวณ P_{so} โดยพบว่ามีความสัมพันธ์กับความดันไอน้ำที่แตกต่างกันระหว่างอากาศกับผิวหนังซึ่งต่างจากการสูญเสียความร้อนสัมผัสที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิ สมการความสัมพันธ์ของการสูญเสียความร้อนด้วยวิธีการดังกล่าวคือ

$$Q_{evap} = E_{sk} = wh'_e(P_{sk,s} - P_a) = wh'_{es}(P_{sk,s} - P_{so}) \quad (49)$$

สำหรับการสูญเสียความร้อนซึ่งเกิดจากกระบวนการหายใจ (Q_{res}) ประกอบด้วย การสูญเสียความร้อนสองชนิดได้แก่การสูญเสียความร้อนสัมผัส (C_{res}) และการสูญเสียความร้อนแฝงจากการกลายเป็นไอซึ่งเกิดจากไอน้ำของอากาศที่หายใจเข้าไป (E_{res}) การสูญเสียความร้อนที่สำคัญในร่างกายคนจะมีสาเหตุที่สำคัญมาจากการสูญเสียความร้อนชนิดหลังนี้โดยจะสังเกตได้จาก การที่อากาศซึ่งหายใจเข้าไปจะอยู่ในสภาพเดียวกับสิ่งแวดล้อม แต่อากาศที่หายใจออกกลับมีลักษณะชื้นและเกือบอิ่มตัว นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิของอากาศที่หายใจออกมีอุณหภูมิต่ำกว่า t_{cr} อีกด้วย

การสูญเสียความร้อนจากการหายใจทั้งในส่วนที่เกิดจากการพาความร้อนและในส่วนที่เกิดจากความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสามารถแสดงได้ต่อไปนี้

$$C_{res} = \frac{\dot{m}_{res} c_{p,a} (t_{ex} - t_a)}{A_D} \quad (50)$$

$$E_{res} = \frac{\dot{m}_{res} h_{fg} (w_{ex} - w_a)}{A_D} \quad (51)$$

โดยที่	A_D	คือ	พื้นที่ผิวของร่างกาย, 1.8 m ²
	C_{res}	คือ	การสูญเสียความร้อนจากการหายใจซึ่งเกิดจากการพาความร้อน
	E_{res}	คือ	การสูญเสียความร้อนจากการหายใจเนื่องจากการกลายเป็นไอ
	$c_{p,a}$	คือ	ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศที่หายใจเข้า
	h_{fg}	คือ	ความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอของน้ำ
	\dot{m}_{res}	คือ	อัตราการระบายอากาศของปอด
	t_{ex}	คือ	อุณหภูมิของอากาศที่หายใจออก
	w_a	คือ	สัดส่วนความชื้นของอากาศที่หายใจเข้า
	w_{ex}	คือ	สัดส่วนความชื้นของอากาศที่หายใจออก

ในปี 1970 Fanger ได้ประมาณอัตราการระบายอากาศของปอดให้เป็นฟังก์ชันของอัตราการเผาผลาญพลังงาน (M) จากนั้นทำการทดลองภายใต้สภาวะปกติและได้ความสัมพันธ์ตามสมการ (9)

นอกจากนั้น Fanger ได้ทำการทดลองและแสดงค่าอุณหภูมิรวมถึงสัดส่วนความชื้นของอากาศที่หายใจออกในรูปอุณหภูมิและสัดส่วนความชื้นที่ของอากาศที่หายใจเข้า

$$t_{ex} = 32.6 + 0.066t_a + 32w_a \quad (52)$$

$$w_{ex} - w_a = 0.0277 + 0.000065t_a - 0.8w_a \quad (53)$$

เมื่อทราบถึงปริมาณทุกปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแกนร่างกายและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ผิวหนังแล้วก็จะสามารถคำนวณค่าของอุณหภูมิทั้งสองนี้ในแต่ละชั้นเวลาได้ โดยเริ่มจากกำหนดเงื่อนไขตั้งต้นของสภาวะในร่างกายให้เท่ากับสิ่งแวดล้อม จากนั้นจึงคำนวณหาค่าในแต่ละช่วงของเวลา การคำนวณจะทำให้ทราบถึง t_{sk} และ t_{cr} ที่เวลาต่างๆ ความเปียกชื้นที่ผิวหนัง รวมถึงการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้น

หลังจากคำนวณค่าของ h'_s , h'_{es} , T_{so} , P_{so} และ w แล้วจะสามารถคำนวณค่า SET^* ได้ และจากการที่ปริมาณต่างๆ นั้นเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิผิวหนัง (t_{sk}) โดยที่ค่าของ t_{sk} จะต้องคำนวณจากการถ่ายเทความร้อนของปริมาณต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการสูญเสียความร้อนสัมผัส (Q_{dy}) การสูญเสียความร้อนแฝง (Q_{evap}) การสูญเสียความร้อนจากการหายใจ (Q_{res}) การสูญเสียความร้อนผ่านกระบวนการต่างๆ เหล่านี้ล้วนต้องคำนวณจากตัวแปรทางสิ่งแวดล้อมซึ่งก็คือ T_a , T_{mrt} , v และ Rh ทั้งสิ้น จึงกล่าวได้ว่าค่า SET^* ซึ่งมี t_{sk} เป็นกุญแจสำคัญในการคำนวณนั้นต้องคำนวณมาจากพารามิเตอร์ทางสิ่งแวดล้อมพื้นฐานนั่นเอง

ASHRAE Standard 55-a (ASHRAE, 1992/1995) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กำหนดสภาพสิ่งแวดล้อมที่ทำให้ 80% ของผู้อยู่อาศัยมีความพึงพอใจเชิงความร้อนได้ระบุถึงช่วงอุณหภูมิที่ทำให้ผู้ทำการทดลองรู้สึกพึงพอใจต่อสิ่งแวดล้อมโดยไม่คำนึงถึงปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่ไม่เกี่ยวกับความร้อนเช่นคุณภาพอากาศ มลภาวะทางเสียง หรือผลกระทบจากปัจจัยทางด้านการส่องสว่าง ผู้ทำการทดลองที่สมมติให้สวมเสื้อผ้าซึ่งมีความเป็นฉนวนเท่าๆกันและทำกิจกรรมเบาๆ (≤ 1.2 met) ที่ความเร็วอากาศหนึ่งเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นของการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อให้ทราบถึงช่วงของสิ่งแวดล้อมดังกล่าว จากนั้นจึงทำการทดลองโดยอยู่ในเงื่อนไขว่าจำนวนผู้ทำการทดลองที่ไม่พึงพอใจต่อสภาพแวดล้อมจะต้องมีค่าไม่เกิน 10% ช่วงอุณหภูมิที่ทำให้ผู้อยู่อาศัยรู้สึกพึงพอใจซึ่งได้มาจากการทดลองนี้แสดงอยู่ในรูปของค่าอุณหภูมิยังผล (ET^*) และ Operative temperature (T_o) ตามรูป 2.3 และ ตาราง 2.2

ตาราง 2.2 ค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมและช่วงที่ยอมรับได้ของ Operative temperature สำหรับผู้คนที่ทำกิจกรรมเบาๆ (≤ 1.2 met) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และมีความเร็วลมเฉลี่ยน้อยกว่า 0.15 m / s

Season	Description of typical clothing	I_{cl} (clo)	Optimum operative temperature	Operative temperature range (10% dissatisfaction criterion)
Winter	Heavy slacks , long-sleeve and sweater	0.9	22 °C 71 °F	20 – 23.5 °C 68 – 75 °F
Summer	Light slacks and short-sleeve shirt	0.5	24.5 °C 76 °F	23 – 26 °C 73 – 79 °F
	minimal	0.05	27 °C 81 °F	26 – 29 °C 79 – 84 °F

Other than clothing, there are no adjustments for season or sex to the temperatures of Table 2.2. For infants, certain elderly people, and individuals who are physically disabled, the lower limits of Table 2.2 should be avoided.

แหล่งที่มา : ASHRAE, Standard 55-1995a : Thermal environmental conditions for human occupancy (Atlanta : American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 1995)

เป็นที่น่าสังเกตว่าค่า ET^* ที่แสดงไว้ในมาตรฐานดังกล่าวมาจากการทดลองที่ความเร็วอากาศนิ่งโดยผู้ทำการทดลองแต่ละคนนั้นสวมใส่เสื้อผ้ามาตรฐานซึ่งมีค่าความเป็นฉนวนใกล้เคียงกัน ลักษณะการทดลองเช่นนี้สอดคล้องกับนิยามของ SET^* จึงทำให้ค่า ET^* ที่นำเสนออยู่นั้นมีพฤติกรรมเสมือนค่า SET^* นั้นเอง ดังนั้นค่า SET^* ซึ่งเป็นดัชนีความสบายความร้อนตัวหนึ่งที่มีความสำคัญที่สุดในงานวิจัยนี้จะนำไปอ้างอิงกับ ASHRAE Standard 55 เพื่อให้ทราบถึงความสบายเชิงความร้อนที่ผู้อยู่อาศัยมีต่ออาคาร

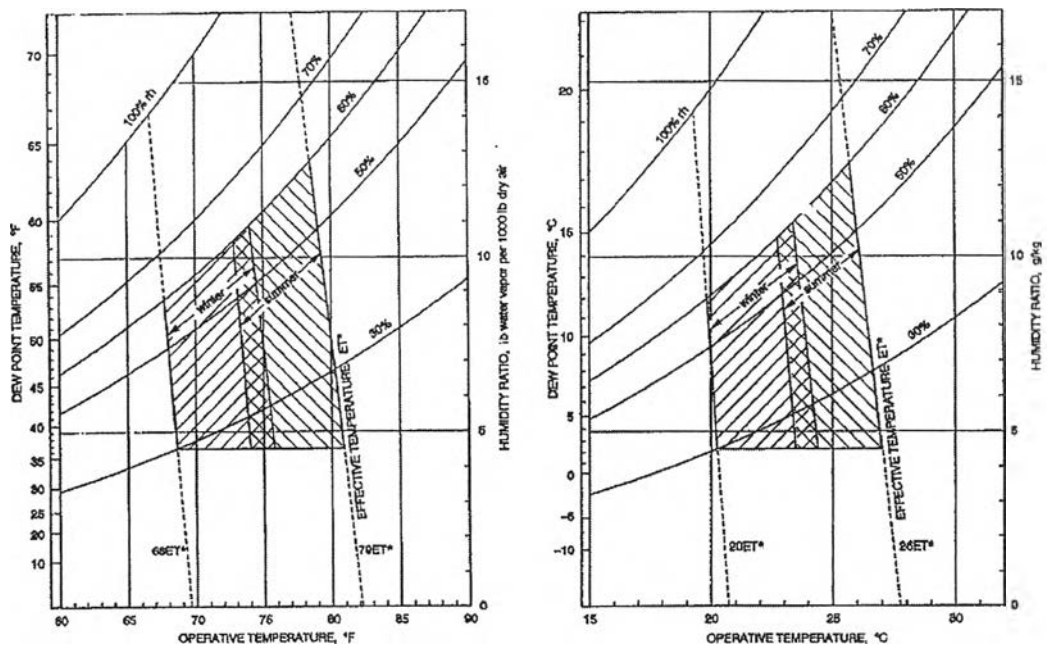
2.1.3 Predicted Mean Vote (PMV)

ในการออกแบบระบบปรับอากาศนั้นภาวะความสบาย (comfort condition) จะเป็นสิ่งที่พิจารณาก่อนเป็นอันดับแรกแต่ในทางปฏิบัติแล้วจะทราบได้อย่างไรว่าสภาพอากาศที่กำลังพิจารณาอยู่นั้นมีภาวะความสบายเชิงความร้อน (thermal comfort) เท่าไรและเหมาะสมต่อการใช้งานหรือไม่ Fanger (1970) ได้พยายามสร้างดัชนีที่บ่งบอกถึงภาวะสบายเชิงความร้อนโดย

ที่ดัชนีตัวนี้จะต้องเป็นทรวมของพารามิเตอร์ทางสิ่งแวดล้อม (environmental parameter) และพารามิเตอร์ของแต่ละบุคคล (personal parameter)

จากแนวคิดดังกล่าวจึงทำให้ Fanger สร้างดัชนีเพื่อบ่งบอกถึงสภาวะสบายเชิงความร้อนขึ้นมาหนึ่งตัวโดยอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าความรู้สึกเชิงความร้อน (thermal sensation) ของแต่ละบุคคลขึ้นอยู่กับความเครียดเชิงความร้อน (thermal strain) ที่บุคคลนั้นๆ ได้รับภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนด Fanger ได้ตั้งชื่อดัชนีตัวนี้ว่า Predicted Mean Vote (PMV)

ในสภาพแวดล้อมปกติร่างกายคนจะสามารถรักษาสมดุลความร้อนของร่างกายไว้ได้ในช่วงกว้างๆ ของพารามิเตอร์ทางสิ่งแวดล้อมแต่จะมีเพียงช่วงๆ หนึ่งของพารามิเตอร์นี้เท่านั้นที่บุคคลรู้สึกสบาย ทั้งนี้เนื่องจากกลไกในร่างกายต้องรับภาระมากขึ้นเพื่อรักษาสมดุลความร้อน จากเหตุผลดังกล่าวจึงนำไปสู่แนวความคิดที่ว่าความรู้สึกสบายเชิงความร้อนน่าจะขึ้นอยู่กับภาระความร้อนที่ร่างกายได้รับ



รูป 2.3 ช่วงอุณหภูมิและความชื้นในฤดูร้อนและฤดูหนาวที่ทำให้ผู้คนที่ทำกิจกรรมเบาๆ รู้สึกสบายซึ่งกำหนดโดย ASHRAE Standard 55-a (ASHRAE 1992/1995)

พิจารณาสมการสมดุลความร้อนของร่างกายในกรณีที่ไม่มีปริมาณความร้อนใดๆ สะสมอยู่ในร่างกาย

$$(M - W) = Q_{sk} + Q_{res} \quad (54)$$

$$= (C + R + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res})$$

สมการสมดุลความร้อนซึ่งแสดงในครั้งนี้เป็นสมการเดียวกับที่เคยอธิบายไว้ในหัวข้อที่ผ่านมารวมทั้งได้นำเสนอถึงอุปสรรคที่มีต่อการคำนวณมาแล้ว หัวข้อนี้จะนำเสนอถึงวิธีของ Fanger ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์สมการดังกล่าวโดยอาศัยความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองซึ่งมีเงื่อนไขอยู่ว่าร่างกายอยู่ในสภาวะที่ใกล้เคียงกับสมดุลความร้อน เพราะเหตุนี้จึงทำให้ค่าพารามิเตอร์ทางสรีรวิทยาที่มีผลต่อสมดุลความร้อนมีอยู่เพียงสองชนิดอันได้แก่ อุณหภูมิที่ผิวหนัง (t_{sk}) กับปริมาณความร้อนจากการกลายเป็นไอที่เกิดจากเหงื่อ (E_{sw})

สัดส่วนของพื้นที่ร่างกายซึ่งปกคลุมด้วยเสื้อผ้า (f_{cl}) ที่ใช้ในการทดลองสามารถคำนวณได้จากสมการ 2 สมการซึ่งแบ่งตามความเป็นฉนวนของเสื้อผ้าที่สวมใส่ (I_{cl}) ดังนี้

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 0.2 \cdot I_{cl}; & I_{cl} < 0.5 \text{ clo} \\ 1.05 + 0.1 \cdot I_{cl}; & I_{cl} \geq 0.5 \text{ clo} \end{cases} \quad (55)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_c) จำเป็นต้องแยกการพิจารณาออกเป็นสองกรณีเพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการพาความร้อนซึ่งได้แก่การพาความร้อนโดยวิธีธรรมชาติ (natural convection heat transfer) และเกิดการพาความร้อนเชิงบังคับ (forced convection heat transfer) ตัวแปรสำคัญในการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่แบ่งออกเป็นสองประเภทนี้ก็คือค่าความเร็วอากาศสัมพัทธ์ระหว่างคนกับอากาศในห้อง ความเร็วอากาศซึ่งนำมาคำนวณจะพิจารณาเฉพาะขนาดโดยไม่คำนึงถึงทิศทางที่พัดเข้ามาหาผู้อยู่อาศัย ความสัมพันธ์ที่ใช้ในการคำนวณความเร็วอากาศสัมพัทธ์ได้แสดงไว้ในสมการ (22) ของหัวข้อการคำนวณค่าอุณหภูมิยังผลมาตรฐาน (SET*) เมื่อทราบค่าความเร็วอากาศสัมพัทธ์แล้วค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตัวที่มีค่ามากที่สุดซึ่งคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้จะถูกนำไปใช้เพื่อวิเคราะห์การพาความร้อนที่เกิดขึ้นกับร่างกายซึ่งเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งในสมการสมดุลความร้อน

$$h_c = \begin{cases} 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \\ 12.1\sqrt{v_r} \end{cases} \quad (56)$$

โดยที่	t_a	คือ	อุณหภูมิอากาศในห้อง
	t_{cl}	คือ	อุณหภูมิพื้นผิวเสื้อผ้าเฉลี่ย
	v_r	คือ	ความเร็วอากาศสัมพัทธ์

สำหรับปริมาณความร้อนจากการกลายเป็นไอที่สูญเสียไปบนผิวหนัง (E_{sk}) ได้นำเสนอไว้อย่างคร่าวๆ ในหัวข้อของการคำนวณสมการสมดุลความร้อนแล้วว่าปริมาณดังกล่าวประกอบด้วย การสูญเสียความร้อนสองชนิดนั่นคือการสูญเสียความร้อนแฝงอันเกิดจากการซึมผ่านเสื้อผ้า (E_{dif}) กับการสูญเสียความร้อนอันเกิดจากการระเหยของเหงื่อ (E_{rsw}) Fanger แยกการพิจารณาปริมาณความร้อนแฝงที่สูญเสียออกจากผิวหนัง (E_{sk}) ตามแนวทางทั้งสองนี้พร้อมกับทำการวิเคราะห์เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ที่ใช้ในการคำนวณจากผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยของเขารวมทั้งผลการทดลองที่ได้มาจากงานวิจัยอื่นๆ

ผลการวิเคราะห์ของ Fanger ทำให้สามารถคำนวณค่าความร้อนแฝงที่สูญเสียไปจากการซึมผ่านเสื้อผ้า (E_{dif}) ด้วยความสัมพันธ์ง่ายๆ ที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิผิวหนัง (t_{sk}) ดังนี้

$$E_{dif} = 3.062(P_{sk,s} - P_a) \quad (57)$$

โดยที่	$P_{sk,s}$	คือ	ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิผิวหนัง
	P_a	คือ	ความดันไอน้ำในอากาศ

การวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้ต่อไปเพื่อหาสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าอุณหภูมิผิวหนัง (t_{sk}) และปริมาณความร้อนแฝงที่สูญเสียไปซึ่งเกิดจากการระเหยของเหงื่อนั้น Fanger ทำการทดลองโดยยึดแนวความคิดเดิมที่ว่า ความสุขสบายเชิงความร้อนเกิดขึ้นเฉพาะช่วงแคบๆ ของพารามิเตอร์ทางสิ่งแวดล้อมอันนำมาซึ่งค่าอุณหภูมิผิวหนัง (t_{sk}) และปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากเหงื่อ (E_{rsw}) ที่จำกัดอยู่ในช่วงๆหนึ่ง การทดลองเพื่อวัดพารามิเตอร์ทั้งสองตัวจึงเกิดขึ้น พร้อมกันนี้สมการความถดถอยเชิงเส้นได้รับการนำมาใช้เพื่อเป็นตัวแทนของค่าที่ได้จากการทดลอง

$$t_{sk,req} = 35.7 - 0.0275(M - W) \quad (58)$$

$$E_{rsw,req} = 0.42(M - W - 58.15) \quad (59)$$

โดยที่ $t_{sk,req}$	คือ	ค่าอุณหภูมิผิวหนังที่ต้องการเพื่อทำให้เกิด ความสบายเชิงความร้อน
$E_{rsw,req}$	คือ	การสูญเสียความร้อนแฝงจากเหงื่อที่ต้องการเพื่อทำให้ เกิดความสบายเชิงความร้อน

จากความสัมพันธ์ที่ใช้ในการคำนวณความร้อนแฝงที่สูญเสียไปจากการซึมผ่านเสื้อผ้า (E_{cl}) ค่าอุณหภูมิผิวหนัง (t_{sk}) และค่าการสูญเสียความร้อนแฝงจากเหงื่อ (E_{rsw}) ทำให้สามารถคำนวณปริมาณความร้อนแฝงที่สูญเสียไปบนผิวหนัง (E_{sk}) ได้ ผลการคำนวณค่าการสูญเสียความร้อนดังกล่าวจะนำกลับไปแทนค่าในสมการสมดุลความร้อนเพื่อใช้ในการคำนวณค่า PMV ต่อไป

ค่าการสูญเสียความร้อนจากการหายใจ (Q_{res}) ที่นำเสนอไปในขั้นตอนการคำนวณสมการสมดุลความร้อนมีรายละเอียดที่เพียงพอต่อการคำนวณแล้ว แต่เพื่อให้การคำนวณมีความสะดวกขึ้นค่าคงที่ต่างๆอันได้แก่ค่าความร้อนแฝงในกลายเป็นไอของน้ำ (h_{fg}) ความจุจำเพาะของอากาศที่หายใจเข้า ($c_{p,a}$) รวมทั้งค่า K_{res} ถูกแทนค่าลงไปทำให้สมการลดรูปเป็น

$$C_{res} = 0.0014M(34 - t_a) \quad (60)$$

$$E_{res} = 0.0173M(5.87 - P_a) \quad (61)$$

เมื่อได้สมการความสัมพันธ์ที่ใช้คำนวณสมการสมดุลความร้อนของร่างกายตามเงื่อนไขในการทดลองของ Fanger ครบแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะนำเสนอถึงแนวคิดและวิธีการคำนวณค่า PMV ที่เป็นหนึ่งในดัชนีความสบายเชิงความร้อนที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางเพื่อนำไปวิเคราะห์ความสบายของผู้อยู่อาศัยอันเป็นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในครั้งนี้ต่อไป

แนวคิดของ Fanger ที่ใช้ในการสร้างดัชนีที่บ่งบอกถึงความสบายเชิงความร้อนซึ่งต่อมาคือค่า PMV นั้นเกิดจากความไม่สมดุลของสมการสมดุลความร้อนเป็นสำคัญ หากร่างกายไม่สามารถรักษาสมดุลความร้อนเอาไว้ได้กล่าวคือปริมาณความร้อนที่เกิดจากการเผาผลาญพลังงานภายในร่างกายเนื่องจากกิจกรรมต่างๆ นั้นไม่สามารถระบายออกจากร่างกายผ่านทางความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอได้ทันแล้วย่อมจะเกิดความเครียดทางความร้อนอันเนื่องมาจากการที่มีความร้อนสะสมอยู่ในร่างกายนั่นเอง ดังแสดงได้จากความสัมพันธ์

$$L = (M - W) - (Q_{sk} + Q_{res}) \quad (62)$$

โดยที่ L คือ ภาวะความร้อนที่ร่างกายได้รับ

ค่าภาวะความร้อนที่ร่างกายได้รับถูกนำมาพิจารณาร่วมกับหน่วยวัดความรู้สึกทางความร้อนตามมาตรฐานของ ASHRAE ซึ่งมีอยู่ทั้งสิ้น 7 จุดดังนี้

-3	คือ	หนาว	(Cold)
-2	คือ	เย็น	(Cool)
-1	คือ	เย็นเล็กน้อย	(Slightly cool)
0	คือ	ปกติ	(Neutral)
+1	คือ	อุ่นเล็กน้อย	(Slightly warm)
+2	คือ	อบอุ่น	(Warm)
+3	คือ	ร้อน	(Hot)

หากกำหนดให้ค่า PMV นี้สามารถแสดงได้ด้วยมาตรฐานทั้ง 7 ของ ASHRAE โดยนิยามว่าค่า PMV เท่ากับ 0 หมายถึงร่างกายอยู่ในสมดุลความร้อนซึ่งเป็นสภาพที่ร่างกายมีความสุขสบายเชิงความร้อนและเมื่อ PMV มีค่าเป็นลบหมายถึงร่างกายจะรู้สึกร้อน และจะร้อนมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อ PMV มีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันหาก PMV มีค่าเป็นลบหมายถึงร่างกายจะรู้สึกหนาว และจะหนาวมากยิ่งขึ้นเมื่อ PMV มีค่าน้อยลง ความสัมพันธ์ดังกล่าวเมื่อพิจารณาร่วมกับสมมุติฐานที่ได้กล่าวไว้แล้วในตอนต้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ของ PMV ออกมาได้ในรูปแบบ

$$PMV = f(L, Q) \quad (63)$$

โดยที่ Q คือ ความร้อนที่ผลิตขึ้นมีค่าเท่ากับ $M - W$

Fanger ได้ทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ดังกล่าว ในการทดลองนี้ได้กำหนดเงื่อนไขต่างๆ เพื่อให้ L เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (t_a) เท่านั้นหมายความว่า Fanger ทำการทดลองเพื่อหาค่า PMV ณ ระดับอุณหภูมิทางสิ่งแวดล้อมต่างๆ นั่นเอง ความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองของ Fanger ที่ระดับกิจกรรมต่างๆ (M) ณ ความเร็วลม (v) และเสื้อผ้า (I_{cl}) ที่ระบุได้แสดงไว้ในตาราง 2.3

จากข้อมูลที่ได้ในตาราง 2.3 และฟังก์ชันที่แสดงไว้ในสมการ (64) หากทราบการเปลี่ยนแปลงของ PMV เทียบกับ L แล้วก็จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง PMV กับ L ได้

Fanger นำผลการทดลองไปวาดกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\partial}{\partial L}$ PMV กับค่า M ดังรูป 2.4 และทำการประมาณผลการทดลองดังกล่าวด้วยสมการ exponential ต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial L} \text{PMV} = 0.352 \exp[-0.42(M - W)] + 0.032 \quad (64)$$

ทำการอินทิเกรตความสัมพันธ์ดังกล่าวและได้สมการของค่า PMV ในรูป

$$\text{PMV} = \{0.352 \exp[-0.42(M - W)] + 0.032\} \cdot L \quad (65)$$

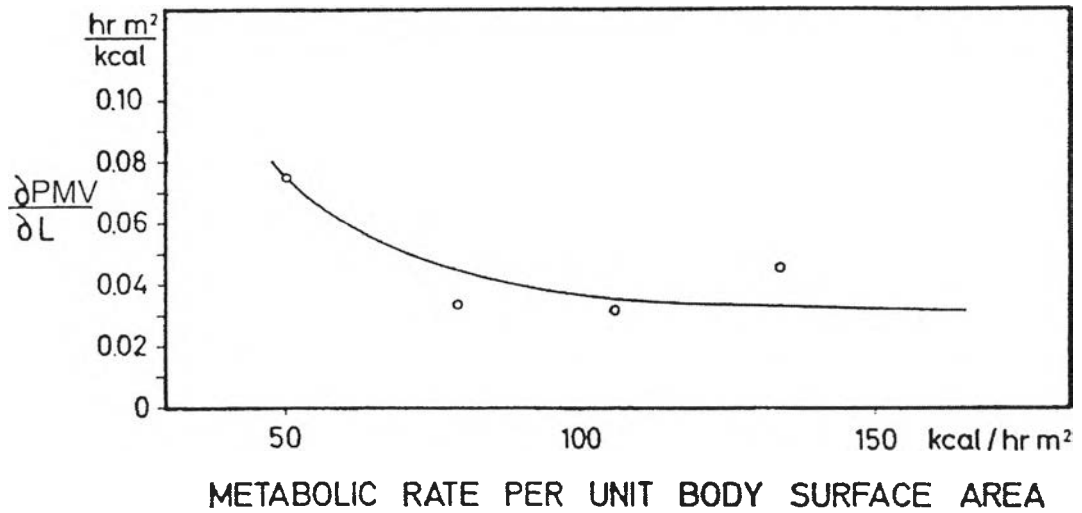
ทำการแทนค่าความสัมพันธ์ต่างๆ ที่ใช้คำนวณสมการสมดุลความร้อนตามเงื่อนไขการทดลองของ Fanger ลงในสมการ (62) เพื่อคำนวณค่าภาวะความร้อน (L) ที่ร่างกายได้รับ ทำให้สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ในรูปสุดท้ายดังนี้

$$L = (M - W) \left\{ \begin{array}{l} 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{mn} + 273)^4] \\ + f_{cl} h (t_{cl} - t_a) \\ + 3.05 [5.73 - 0.007(M - W) - P_a] \\ + 0.42 [(M - W) - 58.15] \\ + 0.0173M(5.87 - P_a) \\ + 0.0014M(34 - t_a) \end{array} \right\} \quad (66)$$

ตาราง 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง PMV และอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่ระดับกิจกรรมต่างๆ

Activity level	M (kcal / hr m ²)	I _{cl} (clo)	v (m / s)	PMV at Rh = 50%
Sedentary	50	0.6	0.1	PMV=-8.471+0.331t _a
Low	80	0.6	0.2	PMV=-3.643+0.175t _a
Medium	106	0.6	0.25	PMV=-3.356+0.174t _a
High	135	0.6	0.32	PMV=-4.158+0.265t _a

แหล่งที่มา : Fanger, P.O., Thermal comfort analysis and applications in environmental engineering (New York : McGraw-Hill, 1970), p. 113.



แหล่งที่มา : Fanger, P.O., Thermal comfort analysis and applications in environmental engineering (New York : McGraw-Hill, 1970), p. 113.

รูป 2.4 ค่า $\frac{\partial}{\partial L} PMV$ ที่เป็นฟังก์ชันของอัตราการเผาผลาญพลังงาน

พจน์ต่างๆ ที่แสดงอยู่ในสมการ (66) มาจากสมการสมดุลความร้อนที่ใช้ในการทดลองของ Fanger ซึ่งได้อธิบายไว้แล้วทั้งสิ้น อย่างไรก็ตามมีค่าพารามิเตอร์อยู่หนึ่งตัวที่ยังไม่เคยกล่าวถึงในขั้นตอนการคำนวณค่า PMV พารามิเตอร์ตัวนั้นได้แก่ค่าอุณหภูมิพื้นผิวเสื้อผ้าเฉลี่ย (t_{cl}) รายละเอียดในการคำนวณค่าอุณหภูมิเสื้อผ้าเฉลี่ยได้นำเสนอไว้ในขั้นตอนการคำนวณค่าอุณหภูมิยังผลมาตรฐาน (SET*) ซึ่งใช้วิธี 2NM มาจำลองการทำงานของร่างกายมนุษย์ การทดลองของ Fanger ทำการคำนวณค่าอุณหภูมิดังกล่าวด้วยแนวความคิดของสมดุลความร้อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเสื้อผ้าเช่นเดียวกัน แต่ความสัมพันธ์ที่ใช้ในการคำนวณความร้อนแต่ละประเภทมีจะลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นเมื่อแทนความสัมพันธ์เพื่อคำนวณค่าการพาความร้อน (C) การแผ่รังสีความร้อน (R) อุณหภูมิผิวหนัง (t_{sk}) ที่ได้จากการทดลองของ Fanger ลงในสมการ (22) ก็จะได้สมการที่ใช้คำนวณหาค่าอุณหภูมิพื้นผิวเสื้อผ้าเฉลี่ย (t_{cl}) ในรูป

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - R_{cl} \left\{ \begin{array}{l} 39.6 \times 10^{-9} f_{cl} \left[\begin{array}{l} (t_{cl} + 273)^4 \\ - (t_{mt} + 273)^4 \end{array} \right] \\ + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \end{array} \right\} \quad (67)$$

โดยที่ R_{cl} คือ ความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้า

ความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการ (65) ถึง (67) นี้ถูกนำมาใช้คำนวณรวมกันเพื่อคำนวณค่า PMV อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงสมการ (67) จะพบว่าสมการ (67) แสดงความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิพื้นผิวเสื้อผ้าเฉลี่ย (t_{cl}) ให้เป็นฟังก์ชันของตนเอง ดังนั้นกระบวนการทำซ้ำจึงถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณหาค่าอุณหภูมิดังกล่าว เพราะฉะนั้นการคำนวณค่า PMV ควรกระทำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อลดความยุ่งยากอันเกิดจากกระบวนการทำซ้ำลง

เป็นที่น่าสังเกตว่าค่า PMV เป็นดัชนีพื้นฐานที่ได้จากการทดลองซึ่งไม่ตรงกับสภาพการทำงานจริง ดังนั้นความถูกต้องของค่า PMV ในสภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงกับสภาพการทดลองจะค่อนข้างสูง หากค่า PMV ที่คำนวณได้อยู่ในช่วงที่มากกว่า ± 2 แล้ว การใช้ค่า PMV ต้องเพิ่มความระมัดระวังเป็นพิเศษโดยเฉพาะในช่วงที่ PMV มีค่าเป็นบวกมากๆ เนื่องจากการทดลองเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนอันเนื่องจากการระเหยของเหงื่อมีความผิดพลาดค่อนข้างสูง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ของค่า PMV นี้พบว่าค่า PMV เกิดจากการทดลองโดยการปรับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (t_a) ที่ระดับต่างๆ โดยไม่ได้พิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ (Rh) และความเร็วลม (v) ดังนั้นค่า PMV จึงไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของทั้งสองปริมาณ ยิ่งไปกว่านั้นในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองกับชาวเดนมาร์คที่มีช่วงอายุอยู่ในระดับอุดมศึกษา เพราะฉะนั้นความรู้สึกเชิงความร้อนของคนไทยที่อยู่ในสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้นต่อค่า PMV จึงเป็นสิ่งที่น่าศึกษา

2.1.4 Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)

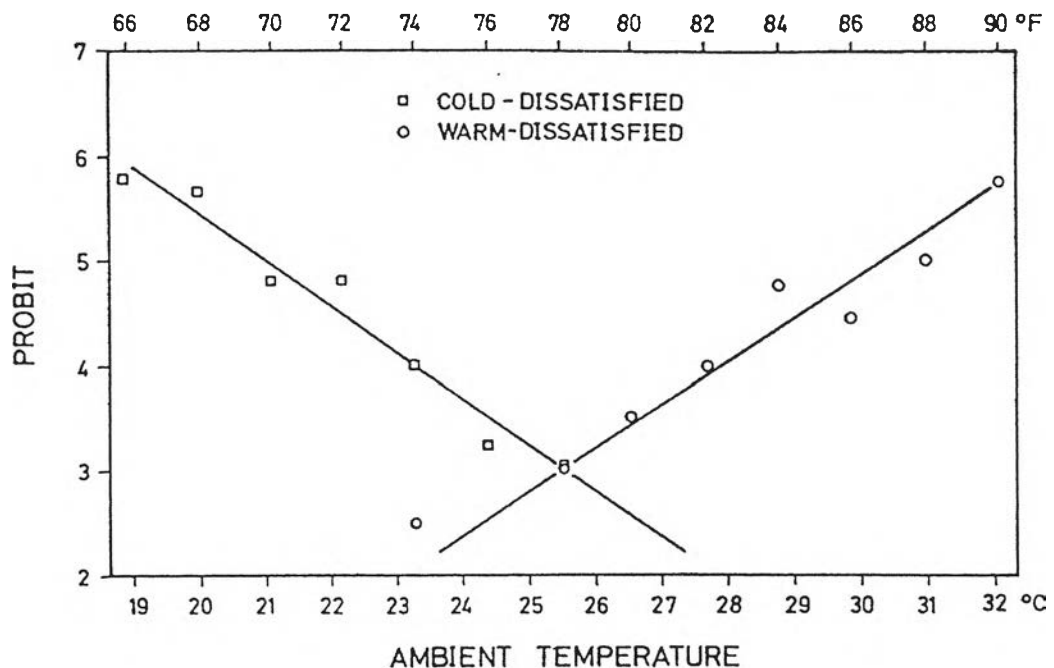
ค่า PMV ที่ Fanger ได้สร้างขึ้นเพื่อบ่งบอกถึงระดับความสบายนั้นยังยากต่อการตีความ อาทิเช่นถ้าผลการคำนวณออกมาว่าค่า PMV มีค่าเท่ากับ 0.3 ซึ่งอยู่ระหว่างความรู้สึกเย็นเล็กน้อย (slightly cool) กับรู้สึกปกติ (neutral) นั้นบุคคลจะรู้สึกอย่างไร จากปัญหาดังกล่าวทำให้ Fanger สร้างดัชนีที่บ่งบอกถึงความสบายเชิงความร้อนขึ้นมาอีกหนึ่งตัวเพื่อบ่งบอกถึงร้อยละของบุคคลที่ไม่พึงพอใจต่อสภาพแวดล้อม และตั้งชื่อดัชนีดังกล่าวว่า PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) ค่า PPD นี้สร้างขึ้นมาบนรากฐานของความคิดที่ว่าร้อยละของบุคคลที่ไม่พึงพอใจต่อสภาพแวดล้อมน่าจะขึ้นอยู่กับค่า PMV เป็นสำคัญ

จากความคิดนี้เอง Fanger จึงเริ่มทำการทดลองเพื่อหาร้อยละของบุคคลที่ไม่พึงพอใจ ณ ระดับ PMV ต่างๆ แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าแบบสอบถามที่ใช้ในการทดลองดังกล่าวมีค่าให้เลือกเฉพาะ -2 (cool) -3 (cold) +2 (warm) +3 (hot) เนื่องจากมีการวิจัยมาก่อนแล้วว่าความไม่พึงพอใจเชิงความร้อนต่อสภาพแวดล้อมที่บุคคลได้รับจะเกิดเมื่อค่า PMV มีค่ามากกว่า ± 1 ผล

การทดลองของ Fanger ในครั้งนี้แสดงไว้ในรูป 2.5 รูปดังกล่าวสามารถประมาณความสัมพันธ์ระหว่างความไม่พึงพอใจทางความร้อนและความเย็นกับค่า PMV ได้ด้วยสมการเส้นตรงสองเส้น และเป็นที่น่าสนใจที่จุดตัดของเส้นทั้งสองซึ่งก็คือจุดที่อุณหภูมิอากาศมีค่าเท่ากับ 25.6°C นั้นเป็นจุดที่มีจำนวนบุคคลซึ่งไม่พึงพอใจต่อความร้อนและความเย็นมีค่าเท่ากัน ค่า 25.6°C เป็นค่าอุณหภูมิที่สอดคล้องกับสมการสุขสบาย (comfort equation) ตามการทดลองของ Fanger พอดี เพราะฉะนั้นอาจกล่าวได้ว่าที่สมดุลความร้อนหรือที่ PMV เท่ากับ 0 นั้นจำนวนของผู้คนที่ไม่พึงพอใจต่อทั้งความร้อนและความเย็นจะมีค่าเท่ากันและมีจำนวนน้อยที่สุด เมื่อนำผลการทดลองของ Fanger นี้มาวาดกราฟ semilog จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง PPD กับ PMV ดังรูป 2.6 และสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองได้ในสมการ (68)

$$\text{PPD} = 100 - 95 \exp\left[-\left(0.03353\text{PMV}^4 + 0.2179\text{PMV}^2\right)\right] \quad (68)$$

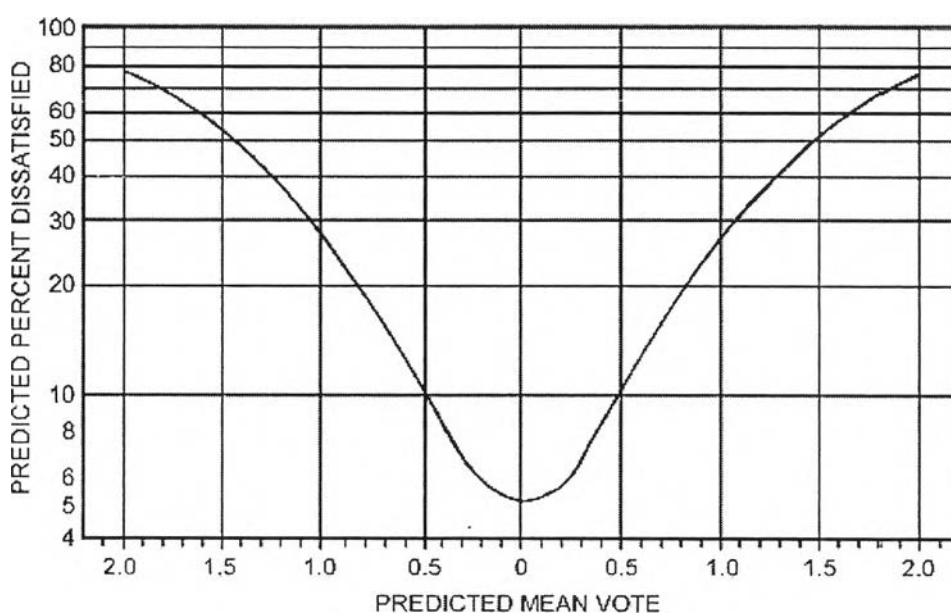
โดยที่ PMV คือ Predicted Mean Vote
PPD คือ Predicted Percentage of Dissatisfied



แหล่งที่มา : Fanger, P.O., Thermal comfort analysis and applications in environmental engineering (New York : McGraw-Hill, 1970), p. 131.

รูป 2.5 สัดส่วนของบุคคลที่ไม่พึงพอใจเชิงความร้อนที่อุณหภูมิอากาศต่างๆ

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PMV กับค่า PPD จะเห็นได้ว่าไม่มีวิธีใดที่จะทำให้ทุกคนพึงพอใจและจะมีบางคนที่ไม่พึงพอใจต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ที่ค่า PMV มีค่าเป็น 0 แล้วก็ตาม จำนวนบุคคลที่ไม่พึงพอใจต่อสภาพแวดล้อมจะมีค่าน้อยที่สุดได้เพียง 5% เท่านั้น เพราะฉะนั้นในการออกแบบถึงแม้ว่าจะมีบางคนที่ไม่พึงพอใจเชิงความร้อนอยู่บ้างก็ไม่เป็นไร ถ้าบุคคลที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่พึงพอใจ ค่า PPD ของสภาพแวดล้อมที่ยอมรับได้มีค่า 7.5% ดังนั้นถ้าห้องที่ทำการออกแบบมีค่า PPD ไม่เกินค่านี้อาจพิจารณาว่าสภาพแวดล้อมในห้องนั้นน่าจะทำให้ผู้ที่อยู่ภายในมีความสุขสบายเชิงความร้อน



แหล่งที่มา : Fanger, P.O., Thermal comfort analysis and applications in environmental engineering (New York : McGraw-Hill 1970). p. 131

รูป 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า PPD กับค่า PMV

2.1.5 อุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย (Mean Radiant Temperature)

อุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยมีใช้ดัชนีที่บ่งบอกถึงความสุขสบายเชิงความร้อน หากแต่เป็นตัวแปรสำคัญซึ่งใช้ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับร่างกายอันเป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณค่าดัชนีความสุขสบายเชิงความร้อน อุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยหมายถึงอุณหภูมิที่สม่ำเสมอของพื้นผิวปิดล้อมสีดำซึ่งทำให้การแผ่รังสีความร้อนจากบุคคลมีปริมาณเท่ากับสิ่งแวดล้อมจริง ในทางปฏิบัติแล้วค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยอาจทำการตรวจวัดได้จากเทอร์โมมิเตอร์ทรงกลมสีดำ (black globe thermometer) ซึ่งทำให้การคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไม่

สะดวกนัก ดังนั้นการคำนวณค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยในงานวิจัยนี้จึงต้องกระทำในแนวทางอื่นที่แตกต่างออกไป

การคำนวณค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยสามารถคำนวณได้จากอุณหภูมิของทุกพื้นผิวรวมทั้งตำแหน่งเทียบกับบุคคล นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงค่าการเปล่งรังสีความร้อนของแต่ละพื้นผิวอีกด้วย ถ้าพิจารณาว่าแต่ละพื้นผิวมีค่าการเปล่งรังสีความร้อนที่สูงแล้วค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยยกกำลังสี่จะมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิพื้นผิวกำลังสี่ถ่วงน้ำหนักด้วยตัวประกอบเชิงมุมตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$T_{mrt}^4 = F_{P-1} T_1^4 + F_{P-2} T_2^4 + \dots + F_{P-N} T_N^4 \quad (69)$$

- โดยที่ T_{mrt} คือ อุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย
- T_N คือ อุณหภูมิของพื้นผิวที่ N
- F_{P-N} คือ ตัวประกอบเชิงมุมระหว่างบุคคลกับพื้นที่ผิวที่ N

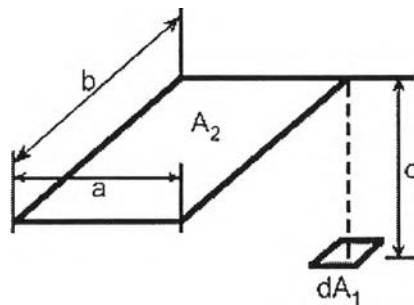
ในกรณีที่โชนซึ่งกำลังพิจารณามีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก การคำนวณค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยสามารถทำได้ง่ายขึ้นโดยคำนวณจากค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิการแผ่รังสีของระนาบทั้ง 6 ทิศทาง สมการที่ใช้คำนวณอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยด้วยวิธีนี้สำหรับบุคคลที่ยืนและนั่งแสดงไว้ในสมการที่ (70) และ (71) ตามลำดับ

$$t_{mrt} = \frac{\left\{ \begin{array}{l} 0.08 [t_{pr} (up) + t_{pr} (down)] + \\ 0.23 [t_{pr} (right) + t_{pr} (left)] + \\ 0.35 [t_{pr} (front) + t_{pr} (back)] \end{array} \right\}}{2[0.08 + 0.23 + 0.35]} \quad (70)$$

$$t_{mrt} = \frac{\left\{ \begin{array}{l} 0.18 [t_{pr} (up) + t_{pr} (down)] + \\ 0.22 [t_{pr} (right) + t_{pr} (left)] + \\ 0.30 [t_{pr} (front) + t_{pr} (back)] \end{array} \right\}}{2[0.18 + 0.22 + 0.30]} \quad (71)$$

- โดยที่ t_{pr} คือ อุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยของระนาบในแต่ละทิศทาง

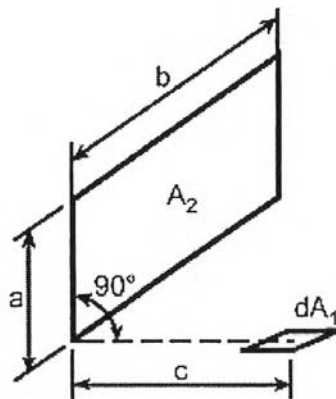
ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยของระนาบ (plane radiant temperature) หมายถึง อุณหภูมิสมำเสมอของพื้นผิวปิดที่มีฟลักซ์ตกกระทบบนเอลิเมนต์ย่อยตามทิศทางที่ระบุเท่ากับ ปริมาณการแผ่รังสีที่ได้จากสิ่งแวดล้อมจริง ดังนั้นค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีของระนาบจะแสดงถึง การแผ่รังสีความร้อนในทิศทางหนึ่ง ส่วนค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยจะแสดงการแผ่รังสีความร้อน จากร่างกายในทุกทิศทาง การคำนวณค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยของระนาบสามารถคำนวณจาก ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (69) โดยที่ค่าตัวประกอบเชิงมุมคำนวณจากความสัมพันธ์ต่อไปนี้



(รูปอ้างอิงตามสมการ 72)

$$x = \frac{a}{c} \quad y = \frac{b}{c}$$

$$F_{dA_1-A_2} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{x}{\sqrt{1+x^2}} \arctan \frac{y}{\sqrt{1+x^2}} + \frac{y}{\sqrt{1+y^2}} \arctan \frac{x}{\sqrt{1+y^2}} \right) \quad (72)$$



(รูปอ้างอิงตามสมการ 73)

$$x = \frac{a}{b} \quad y = \frac{c}{b}$$

$$F_{dA_1-A_2} = \frac{1}{2\pi} \left(\arctan \frac{1}{y} - \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}} \arctan \frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}} \right) \quad (73)$$

โดยที่ $F_{dA_1-A_2}$ คือ ตัวประกอบเชิงมุมระหว่างเอลิเมนต์ย่อย dA_1 กับระนาบ A_2

สำหรับกรณีที่โซนซึ่งกำลังพิจารณาไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากนั้นค่าตัวประกอบเชิงมุมจะอยู่ในรูปแบบที่ซับซ้อนและคำนวณได้ยาก การคำนวณค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยจึงมีความจำเป็นต้องประมาณอย่างคร่าวๆ ด้วยค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิพื้นผิวถ่วงน้ำหนักด้วยค่าการเปล่งรังสีความร้อนและพื้นที่ของแต่ละผิว

$$T_{\text{mrt}} = \frac{\epsilon_1 A_1 T_1 + \epsilon_2 A_2 T_2 + \dots + \epsilon_N A_N T_N}{\epsilon_1 A_1 + \epsilon_2 A_2 + \dots + \epsilon_N A_N} \quad (74)$$

โดยที่ ϵ_N คือ ค่าการเปล่งรังสีความร้อนของพื้นผิว N
 A_N คือ พื้นที่ผิวของระนาบที่ N
 T_N คือ อุณหภูมิพื้นผิวที่ N

การประมาณค่าอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยด้วยวิธีการเช่นนี้ควรเพิ่มความระมัดระวังเป็นพิเศษเนื่องจากค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้มีค่าเท่ากันตลอดทั้งห้องโดยไม่คำนึงถึงตำแหน่งและทิศทางท่าทางของบุคคลที่อยู่ภายในห้อง นอกจากนี้ยังไม่คำนึงถึงระยะห่างของแต่ละผนังอีกด้วย อย่างไรก็ตามการประมาณค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยด้วยวิธีนี้ทำได้อย่างสะดวกเนื่องจากไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าตัวประกอบเชิงมุมที่ยากต่อการคำนวณ

งานวิจัยนี้คำนวณค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยด้วยการหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิพื้นผิวถ่วงน้ำหนักด้วยพื้นที่ แต่ในกรณีที่โซนซึ่งกำลังพิจารณามีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากแล้วค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยของระนาบถูกนำมาใช้เพื่อให้สามารถคำนวณค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยได้อย่างถูกต้อง สำหรับกรณีที่ผนังในทิศทางใดทิศทางหนึ่งประกอบด้วยหลายพื้นผิวความสัมพันธ์ตามสมการ (74) ถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยในทิศทางนั้น เมื่อได้อุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยในแต่ละทิศทางแล้วจึงคำนวณหาค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยของระนาบจากนั้นจึงสามารถคำนวณหาค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยของห้องได้โดยใช้ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีของระนาบที่คำนวณได้ใน 6 ทิศทาง

2.1.6 Thermal Sensation (TSENS)

TSENS เป็นดัชนีสำหรับการวัดความรู้สึกทางความร้อนที่เกิดขึ้นในร่างกายโดยระบุอยู่ในรูปมาตรฐาน 11 จุดซึ่งแสดงถึงความรู้สึกเชิงความร้อนที่แตกต่างกัน ค่าที่เป็นบวกของมาตรฐานหมายถึงความรู้สึกร้อน ในทางกลับกันค่าที่เป็นลบหมายถึงความรู้สึกเย็น มาตรฐานเชิงเลขทั้ง 11 จุดของ TSENS สามารถแสดงได้ดังนี้ (-5) คือ หนาวแบบทนไม่ได้ (-4) คือ หนาว

มาก (-3) คือ หนาว (-2) คือ เย็น (-1) คือ เย็นเล็กน้อย (0) คือ ปกติ (+1) คือ อุ่นเล็กน้อย (+2) คือ อบอุ่น (+3) คือ ร้อน (+4) คือ ร้อนมาก และ (+5) คือ ร้อนแบบทนไม่ได้

จึงเห็นได้ว่า TSENS อยู่บนพื้นฐานของมาตราส่วนเดียวกับค่า PMV แต่ TSENS มีหน่วยวัดความรู้สึกเพิ่มเข้ามาอีก 4 หน่วยก็คือ (-5) (-4) (+4) และ (+5) ดังนั้นการพิจารณาค่า TSENS ควรพิจารณาควบคู่ไปกับค่า PMV เพื่อให้เข้าใจถึงความรู้สึกเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่มีต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างลึกซึ้ง

TSENS ถูกนิยามให้อยู่ในรูปของการเบี่ยงเบนอุณหภูมิร่างกายเฉลี่ย (t_{mb}) ออกจากอุณหภูมิซึ่งถือว่าเป็นขอบเขตล่าง ($t_{b,c}$) และขอบเขตบน ($t_{b,h}$) ของช่วงที่เหงื่อสามารถระเหยได้ จึงทำให้ค่า TSENS มีความสัมพันธ์กับความเปียกชื้นที่ผิวหนัง (w) ซึ่งเป็นกุญแจสำคัญในการควบคุมอุณหภูมิของร่างกาย ค่า TSENS สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$t_{b,c} = \frac{0.194}{58.15}(M - W) + 36.01 \quad (75)$$

$$t_{b,h} = \frac{0.347}{58.15}(M - W) + 36.669 \quad (76)$$

$$TSENS = \begin{cases} 0.4685(t_{mb} - t_{b,c}) & ; t_{mb} < t_{b,c} \\ 4.7w_{crit} (t_{mb} - t_{b,c}) / (t_{mb} - t_{b,h}) & ; t_{b,c} \leq t_{mb} \leq t_{b,h} \\ 4.7w_{crit} + 0.4685(t_{mb} - t_{b,h}) & ; t_{b,h} \leq t_{mb} \end{cases} \quad (77)$$

$$w_{crit} = 0.59v_r^{-0.08} \quad (78)$$

โดยที่	$t_{b,c}$	คือ	อุณหภูมิขอบเขตล่างของเขตการระเหย
	$t_{b,h}$	คือ	อุณหภูมิขอบเขตบนของเขตการระเหย
	w_{crit}	คือ	ค่าวิกฤตของความเปียกชื้นบนผิวหนัง
	M	คือ	อัตราการเผาผลาญพลังงาน
	W	คือ	งานที่ทำ
	v_r	คือ	ความเร็วอากาศสัมพัทธ์

2.1.7 Thermal Discomfort (DISC)

DISC เป็นดัชนีที่แสดงถึงความเครียดที่มีต่อกลไกควบคุมอุณหภูมิร่างกายซึ่งใช้ในการรักษาภาวะสบายและควบคุมสมดุลความร้อน การขับเหงื่อออกจากร่างกายเป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิร่างกาย DISC จะใช้กลไกการขับเหงื่อซึ่งอยู่ในรูปของความเปียกชื้นที่ผิวหนัง (w) มาบ่งบอกถึงความรู้สึกพึงพอใจและไม่พึงพอใจที่เกิดขึ้น ส่วนในสภาวะที่ร่างกายไม่สามารถขับเหงื่อได้นั้น DISC จะมีค่าเชิงเลขเท่ากับทุกประการกับ TSENS

ถึงแม้ว่าในบางกรณี DISC มีค่าเชิงเลขเท่ากับ TSENS แต่ค่าของ DISC จะแสดงถึงความรู้สึกที่ต่างจาก TSENS ค่า DISC ซึ่งมีค่าได้ทั้งบวกและลบสามารถแสดงได้ด้วยมาตราส่วนเชิงเลข 11 จุดที่คล้ายกับ TSENS ดังนี้

- ± 5 คือ ทนไม่ได้
- ± 4 คือ เกือบจะทนไม่ได้
- ± 3 คือ ไม่สบายอย่างมาก
- ± 2 คือ ไม่สบายและไม่พึงพอใจ
- ± 2 คือ ไม่สบายเล็กน้อยแต่ยังยอมรับได้
- 0 คือ สุขสบาย

ความไม่พึงพอใจต่ออากาศที่หนาวตามคำจำกัดความของ DISC เกิดจากความเครียดของร่างกายที่จำเป็นต้องทำให้เกิดการสั่นและเกิดการหดตัวของเส้นเลือดเพื่อรักษาสมดุลความร้อนของร่างกายมิให้เสียไป การสั่นของร่างกายสามารถเพิ่มความร้อนจากการเผาผลาญพลังงานได้เป็นสามเท่าของอัตราการเผาผลาญเมื่อร่างกายกำลังพักผ่อน ส่วนการหดตัวของเส้นเลือดนั้นอาจทำให้เกิดผลเสมือนใส่เสื้อเวดเทอร์บางๆ (I_{cl} เท่ากับ 0.5 clo) ความสัมพันธ์ที่ใช้ในการคำนวณค่า DISC แสดงได้ตามสมการต่อไปนี้

$$DISC = \begin{cases} TSENS; & t_{mb} < t_{b,c} \\ 4.7 \frac{(E_{rsw} - E_{rsw,req})}{(E_{max} - E_{rsw,req} - E_{dif})}; & t_{b,c} \leq t_{mb} \end{cases} \quad (79)$$

โดยที่ E_{rsw} คือ การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอที่เกิดจากเหงื่อ
 $E_{rsw,req}$ คือ การสูญเสียความร้อนแฝงจากเหงื่อที่ต้องการเพื่อให้เกิดความสบายเชิงความร้อน

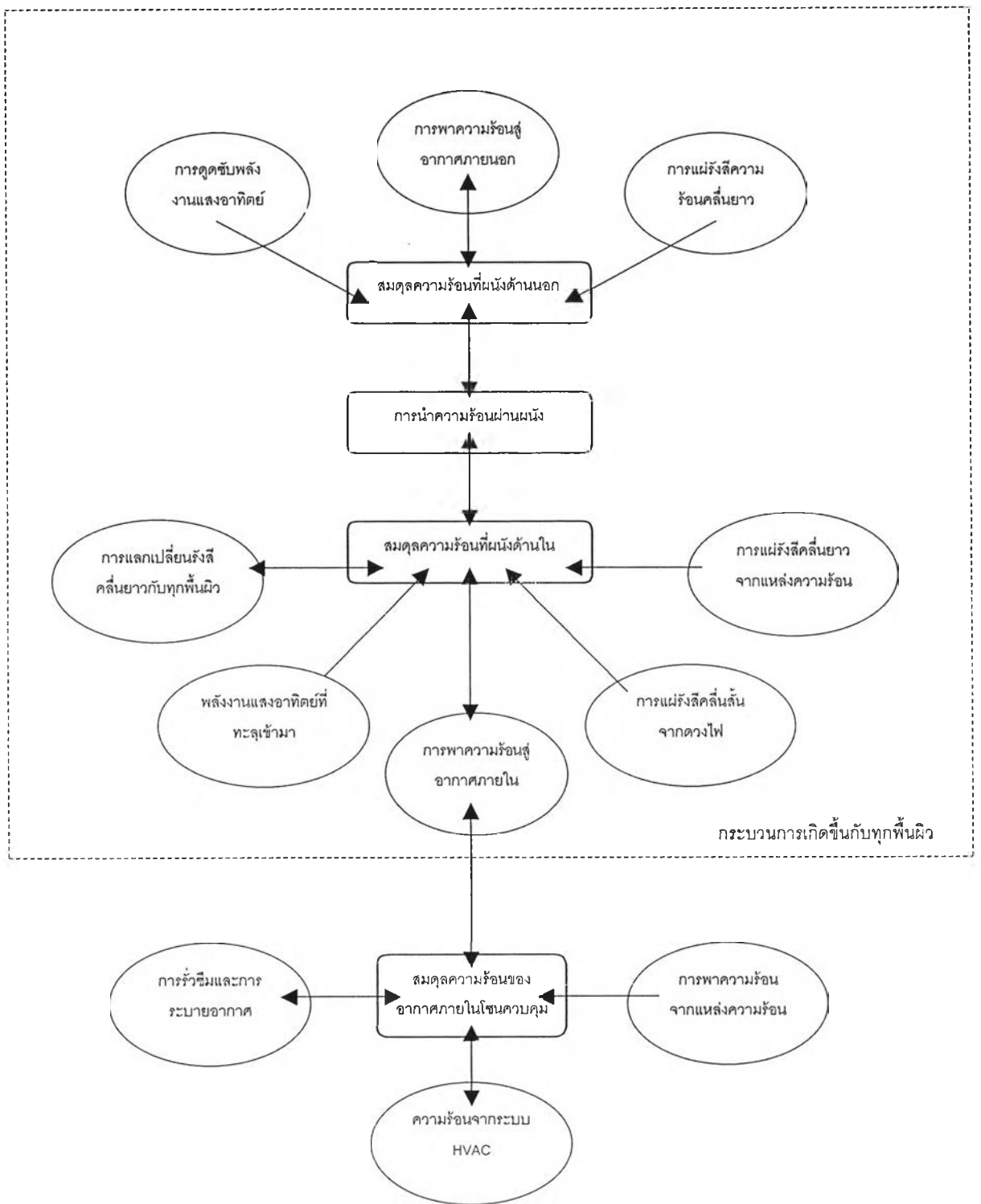
E_{dif}	คือ	การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอที่แพร่ผ่านผิวหนึ่ง
E_{max}	คือ	การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอมากที่สุด

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการวิเคราะห์สมดุลความร้อน

ตามที่กล่าวไว้แล้วในบทนำว่าองค์ประกอบต่างๆของอาคาร อาทิเช่น ลักษณะของหลังคา ลักษณะช่องเปิด ทิศทางของอาคาร โครงสร้างของผนัง รวมถึงระบบหน้าต่างล้วนส่งผลกระทบต่อพารามิเตอร์ทางสิ่งแวดล้อมซึ่งมีอิทธิพลต่อความพึงพอใจเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัย เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบดังกล่าวอาคารถูกนำมาวิเคราะห์สมดุลความร้อนซึ่งตั้งอยู่บนพื้นฐานของกฎข้อที่หนึ่งตามหลักอุณหพลศาสตร์ จากผลการวิเคราะห์สมดุลความร้อนค่าอุณหภูมิของแต่ละผนังตลอดจนอุณหภูมิอากาศภายในโซนซึ่งเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ทางสิ่งแวดล้อมที่ขึ้นอยู่กับรูปทรงและโครงสร้างอาคารจะไม่ใช่ปัญหาอีกต่อไป เพราะเหตุนี้จึงสามารถวิเคราะห์ความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยภายในอาคารได้

ส่วนสำคัญในการวิเคราะห์สมดุลความร้อนประกอบด้วยสมดุลความร้อนทั้งสี่สามแห่งได้แก่สมดุลความร้อนที่ผนังด้านนอก สมดุลความร้อนที่ผนังด้านใน และสมดุลความร้อนของอากาศภายในโซน กลไกสำคัญที่เชื่อมโยงสมดุลความร้อนทั้งสามแห่งเข้าด้วยกันก็คือกระบวนการนำความร้อนผ่านผนัง ดังนั้นการที่อาคารอยู่ในสมดุลความร้อนหมายความว่าสมดุลความร้อนและกลไกการทำงานทุกอย่างที่กล่าวมานี้จะต้องเกิดขึ้นพร้อมกัน ความสัมพันธ์ของกระบวนการที่กล่าวมานี้สามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิดังรูป 2.7

รูป 2.7 แสดงรายละเอียดของกระบวนการสมดุลความร้อนที่เกิดขึ้นสำหรับพื้นผิวใดพื้นผิวหนึ่งภายในโซนควบคุม กระบวนการที่อยู่ในกรอบเส้นประทางด้านบนของรูปเป็นกระบวนการที่เกิดกับทุกพื้นผิวที่ภายในโซน ส่วนกระบวนการที่เกิดกับผนังโปร่งใส่นั้นมีกระบวนการที่คล้ายคลึงกัน ต่างกันตรงที่ผนังโปร่งใสจะไม่มี การดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ผนังด้านนอก แต่พลังงานแสงอาทิตย์ดังกล่าวจะถูกรวมไว้ในกลไกการนำความร้อนผ่านผนังซึ่งแสดงออกมาในรูปสัดส่วนการไหลเข้า (inward-flowing fraction) และสัดส่วนการไหลออก (outward-flowing fraction) นอกจากนี้ผนังโปร่งใสยังทำให้เกิดการทะลุผ่านของพลังงานแสงอาทิตย์เข้ามาในห้องอีกด้วย ทิศทางของลูกศรที่ปรากฏอยู่ในแผนภูมิแสดงถึงทิศทางของกระบวนการซึ่งแบ่งเป็นสองประเภทได้แก่กระบวนการที่เกิดขึ้นในทิศทางเดียวกับกระบวนการที่เกิดขึ้นในสองทิศทางโดยแสดงด้วยหัวลูกศรแบบปลายเดียวและหัวลูกศรคู่ตามลำดับ สำหรับกรอบสี่เหลี่ยมมนซึ่งแสดงอยู่ในแผนภูมินั้นหมายถึงสมดุลความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งสี่แห่ง



รูป 2.7 กระบวนการสมดุลความร้อนที่เกิดขึ้นในหนึ่งโซน

หลักการพื้นฐานของการคำนวณสมดุลความร้อนก็คือการพิจารณาว่าอากาศภายในโซนควบคุมนั้นอยู่ในสภาพเกือบหยุดนิ่ง กล่าวคืออากาศมีอุณหภูมิที่สม่ำเสมอตลอดทั้งโซนสาเหตุที่สามารถพิจารณาให้อากาศมีอุณหภูมิสม่ำเสมอตลอดทั้งโซนนั้นเนื่องมาจากอากาศที่มีอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอย่อมเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นจึงทำให้อากาศเกิดการผสมตนเองจนกระทั่งมีอุณหภูมิสม่ำเสมอตลอดทั้งโซนได้ ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีงานวิจัยบางชิ้นที่ศึกษาเกี่ยวกับความถูกต้องของสมมุติฐานดังกล่าวแต่สมมุติฐานนี้ค่อนข้างเป็นจริงกับการใช้งานที่สภาวะปกติทั่วไป เพราะฉะนั้นการจำลองอากาศให้มีสภาพเกือบหยุดนิ่งจึงกลายเป็นพื้นฐานสำคัญในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในห้อง

นอกจากสมมุติฐานข้างต้นจะเป็นหลักการพื้นฐานของการคำนวณสมดุลความร้อนแล้วยังมีสมมุติฐานอื่นที่สำคัญต่อการคำนวณอีก สมมุติฐานที่นำเสนอต่อไปนี้จะประยุกต์เข้ากับทุกพื้นผิวในห้องตัวอย่างเช่นผนัง พื้น ฝ้าต่างโดยทำการพิจารณาว่าแต่ละพื้นผิวมี 1. อุณหภูมิสม่ำเสมอ 2. การเปล่งรังสีความร้อนที่สม่ำเสมอเสมอไม่ว่าจะเป็นรังสีคลื่นสั้นหรือรังสีคลื่นยาว 3. พื้นผิวที่กระจายรังสี และ 4. การนำความร้อนแบบหนึ่งมิติ

เมื่อทราบถึงสมมุติฐานของการคำนวณสมดุลความร้อนแล้วขั้นตอนต่อไปจะพิจารณาถึงรายละเอียดของสมดุลความร้อนที่เกิดขึ้นแต่ละแห่ง อย่างไรก็ตามรายละเอียดเพิ่มเติมของการคำนวณสมดุลความร้อนสามารถศึกษาได้จาก สมบูรณ์ (พ.ศ. 2543) และ Pederson, C.O. (1997)

2.2.1 สมดุลความร้อนที่ผนังด้านนอก

สมดุลความร้อนที่ผนังด้านนอกประกอบด้วยการถ่ายเทความร้อนหลายชนิดซึ่งมีความสัมพันธ์กันไม่ว่าจะเป็นการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ การพาความร้อนออกจากผนัง การแผ่รังสีคลื่นยาวระหว่างผนังกับท้องฟ้า พื้นดิน หรือแม้กระทั่งอากาศ นอกจากนี้ปริมาณการถ่ายเทความร้อนรวมยังต้องเท่ากับการนำความร้อนผ่านเปลือกอาคารเข้าสู่โซนควบคุมอีกด้วย เพื่อให้ทราบถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดกับผนังด้านนอกซึ่งมีความซับซ้อน สมมุติฐานบางอย่างนอกเหนือจากสมมุติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์สมดุลความร้อนจำเป็นต้องกำหนดเพิ่มเติมควบคู่ไปกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะใช้ในการคำนวณ รายละเอียดของสมมุติฐานที่กำหนดขึ้นสามารถแสดงได้ดังนี้

การเปล่งรังสีความร้อน : เนื่องจากการเปล่งรังสีความร้อนของพื้นผิวใด ๆ มีค่าขึ้นอยู่กับแสงสเปกตรัมซึ่งวิเคราะห์ได้ยาก อย่างไรก็ตามการแผ่รังสีความร้อนของพื้นผิวส่วนใหญ่จะมีความสม่ำเสมอและแบ่งออกอย่างหยาบๆ ได้เป็นสองช่วงนั่นคือช่วงความยาวคลื่นที่สามารถมองเห็นได้กับช่วงความยาวคลื่นที่มองไม่เห็น ดังนั้นการคำนวณสมดุลความร้อนของผนังด้านนอกจะพิจารณาการเปล่งรังสีความร้อนออกเป็นสองส่วนนั่นคือ การเปล่งรังสีคลื่นสั้นกับการเปล่งรังสีคลื่นยาว

ความสม่ำเสมอของพื้นผิว : การพิจารณารายละเอียดปลีกย่อยของแต่ละส่วนบนผนังไม่ว่าจะเป็นลักษณะพื้นผิว สี หรืออุณหภูมิที่แตกต่างกันทำให้ข้อมูลที่จำเป็นต้องป้อนเข้ามามีมากขึ้นไปและไม่เหมาะต่อการใช้งาน ในที่นี้จึงพิจารณาให้พื้นผิวของผนังภายนอกมีความสม่ำเสมอทั้งทางด้านสัมประสิทธิ์การพาความร้อน อุณหภูมิ การเปล่งรังสีคลื่นสั้นและการเปล่งรังสีคลื่นยาว

การแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวและตัวประกอบเชิงมุม : โดยธรรมชาติแล้วผนังด้านนอกมีการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวกับทุกพื้นผิวที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมซึ่งถูกถ่วงน้ำหนักด้วยตัวประกอบเชิงมุมของแต่ละพื้นผิว อย่างไรก็ตามสิ่งแวดล้อมมีการเปลี่ยนอุณหภูมิและตำแหน่งอยู่เสมอจึงไม่สามารถทำนายการเปล่งรังสีคลื่นยาวได้ การคำนวณสมดุลความร้อนจึงแบ่งประเภทของการเปล่งรังสีคลื่นยาวออกเป็นสามชนิดได้แก่การแลกเปลี่ยนรังสีระหว่างผนังกับอากาศ ผนังกับท้องฟ้าและผนังกับพื้นดิน ซึ่งคำนวณได้ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากงานวิจัยต่างๆ

จากสมมุติฐานข้างต้นจึงสามารถเขียนความสัมพันธ์ของสมดุลความร้อนที่ผนังด้านนอกได้ตามสมการที่ (80) ทุกพจน์ที่อยู่ในสมการมีค่าเป็นบวกในทิศทางที่ฟลักซ์มุ่งเข้าสู่ผนัง ยกเว้นพจน์ที่แสดงถึงการนำความร้อนซึ่งจะมีค่าเป็นบวกในทิศที่ฟลักซ์มุ่งออกจากโหนดควบคุม

$$q''_{ko} = q''_{\alpha sol} + q''_{conv} + q''_{LWR} \quad (80)$$

โดยที่	q''_{ko}	คือ	ฟลักซ์การนำความร้อนออกจากผนังด้านนอก
	$q''_{\alpha sol}$	คือ	ฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์(ดูดซับที่ผิวนอก)
	q''_{conv}	คือ	ฟลักซ์การพาความร้อนออกสู่อากาศ
	q''_{LWR}	คือ	ฟลักซ์การแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวกับสิ่งแวดล้อม

ฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อนออกจาดวงอาทิตย์ดูดซับที่ผิวนอก ($q''_{\alpha sol}$) คำนวณตามแบบจำลองใน ASHRAE Fundamental Handbook (ASHRAE, 2001)

พลักร์การพาความร้อนออกสู่อากาศ (q''_{conv}) อยู่ในรูปผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนกับผลต่างอุณหภูมิระหว่างอากาศและผนัง แบบจำลองคณิตศาสตร์ของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีอยู่หลายแบบอาทิเช่น BLAST Simplified/Detailed Convection Model, MoWitt, TARP Detailed Convection Model และ DOE-2 Convection Model จากแบบจำลองของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่กล่าวมาทั้งหมดหากพิจารณาถึงรายละเอียดของการคำนวณจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณจาก BLAST Detailed Convection Model มีค่าเท่ากับทุกประการกับแบบจำลองของ TARP Detailed Convection Model หากแต่ว่าแบบจำลองของ TARP มีรายละเอียดของการคำนวณมากกว่าเล็กน้อย เพราะฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงนำแบบจำลองของ TARP Detailed Convection Model มาใช้ในการคำนวณโดยไม่มีการแก้ไขดัดแปลง ดังนั้นรายละเอียดของแต่ละแบบจำลองรวมถึงความถูกต้องของผลการคำนวณจึงไม่ขอนำเสนอไว้ ณ ที่นี้แต่สามารถศึกษาได้จากงานวิจัยของ McClellan, T.M. (1997)

พลักร์การแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวกับสิ่งแวดล้อม (q''_{LWR}) ระหว่างผนังกับท้องฟ้า ผนังกับอากาศ และผนังกับพื้นดิน ถูกคำนวณด้วยผลคูณระหว่างค่าการดูดซับรังสีที่พื้นผิว ตัวประกอบเชิงมุม และความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ ค่าการดูดซับรังสีของแต่ละพื้นผิวเป็นข้อมูลที่ป้อนเข้าโดยตรง ค่าตัวประกอบเชิงมุมของท้องฟ้า อากาศและพื้นดินคำนวณตามแบบจำลองของ BLAST ค่าอุณหภูมิท้องฟ้าสามารถเลือกคำนวณจากแบบจำลองต่างๆ ได้แก่ BLAST Design Day Sky Model, TARP Sky Model, Brown Sky Model อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองของ Brown ตามคำแนะนำของ McClellan, T.M. (1997) รายละเอียดของแต่ละโมเดลสามารถศึกษาได้จากงานวิจัยดังกล่าวและไม่ขอนำเสนอไว้ ณ ที่นี้

2.2.2 การนำความร้อนผ่านชั้นผนัง

จากที่กล่าวมาแล้วพบว่าการนำความร้อนผ่านชั้นผนังเป็นกลไกสำคัญที่เชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างสมดุลความร้อนที่ผนังด้านนอกกับด้านใน ดังนั้นระเบียบวิธีที่นำมาคำนวณจำเป็นต้องตอบสนองต่อสมดุลความร้อนทั้งสองแห่งซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกันให้ได้ การคำนวณการนำความร้อนด้วยอนุกรมเวลาซึ่งใช้ฟังก์ชันการนำความร้อน (Conduction Transfer Function, CTF) หรือเรียกว่าระเบียบวิธีตัวประกอบการตอบสนอง (Response Factors Method) ถูกนำมาใช้เพื่อวัตถุประสงค์ดังกล่าว ระเบียบวิธีนี้จะพิจารณาพลักร์ความร้อน ณ เวลาปัจจุบันให้ขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิรวมถึงพลักร์ความร้อนเมื่อเวลาในอดีต เพราะฉะนั้นระเบียบวิธีตัวประกอบการตอบสนองจึงเหมาะสมต่อการคำนวณสมดุลความร้อนในอาคารซึ่งได้รับความร้อนผ่านทางแผ่รังสี

ความร้อน โดยธรรมชาติของการแผ่รังสีความร้อนพบว่าเมื่อไรก็ตามที่ผนังได้รับการแผ่รังสีความร้อน ผนังนั้นจะไม่ส่งผ่านความร้อนออกมาในทันทีแต่จะทยอยส่งผ่านความร้อนออกมาเมื่อเวลาผ่านไป ระเบียบวิธีตัวประกอบการตอบสนองซึ่งพิจารณาให้ฟลักซ์ความร้อนในปัจจุบันเป็นฟังก์ชันของค่าอุณหภูมิและฟลักซ์ความร้อนเมื่อเวลาในอดีตจึงสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพดังกล่าวและมีความเหมาะสมต่อการวิเคราะห์การนำความร้อนผ่านชั้นผนัง ความสัมพันธ์ที่แสดงถึงการนำความร้อนที่ผนังด้านในและผนังด้านนอกแสดงอยู่ในสมการ (81) และ (82) ตามลำดับ

$$q''_{ki} = -X_0 T_{i,t} + Y_0 T_{o,t} - \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{i,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} F_j q''_{ki,t-j\delta} \quad (81)$$

$$q''_{ko} = -Y_0 T_{i,t} + Z_0 T_{o,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} F_j q''_{ko,t-j\delta} \quad (82)$$

โดยที่	q''_{ki}	คือ	ฟลักซ์การนำความร้อนจากผนังด้านใน
	q''_{ko}	คือ	ฟลักซ์การนำความร้อนจากผนังด้านนอก
	X_j	คือ	inside CTF เมื่อ $j = 0, 1, \dots, nz$
	Y_j	คือ	cross CTF เมื่อ $j = 0, 1, \dots, nz$
	Z_j	คือ	outside CTF เมื่อ $j = 0, 1, \dots, nz$
	F_j	คือ	flux CTF เมื่อ $j = 0, 1, \dots, nq$
	T_i	คือ	อุณหภูมิพื้นผิวด้านใน
	T_o	คือ	อุณหภูมิพื้นผิวด้านนอก

ตัวห้อย j แสดงถึงคาบเวลาในแต่ละชั้นเวลา δ เทอมแรกในแต่ละอนุกรมถูกแยกออกมาเพื่อใช้ประโยชน์ในการหาค่าอุณหภูมิพื้นผิวที่เวลาปัจจุบัน สำหรับค่าขอบเขตของอนุกรม nq และ nz นั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างผนังรวมถึงระเบียบวิธีที่ใช้คำนวณฟังก์ชันการนำความร้อน (CTF) ในทางทฤษฎีนั้น nz จะมีค่านันต์แต่ในทางปฏิบัติค่า nz และ nq ขึ้นอยู่กับอันดับ (order) และรากของสมการที่ใช้คำนวณฟังก์ชันการนำความร้อน การคำนวณฟังก์ชันการนำความร้อนรวมถึงระเบียบวิธีเชิงเลขเพื่อหารากของสมการศึกษาได้จาก Hittle, D.C. (1979, 1983)

2.2.3 สมดุลความร้อนที่ผนังด้านใน

สมดุลความร้อนที่ผนังด้านในนี้ประกอบด้วยการนำความร้อนผ่านเปลือกอาคาร การพาความร้อนออกสู่อากาศ การสะท้อนและการดูดซับรังสีคลื่นสั้น รวมถึงการแลกเปลี่ยนรังสี

คลื่นยาวของทุกพื้นผิวในโซน การแผ่รังสีคลื่นสั้นเกิดจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์เข้ามาทางหน้าต่างและการเปล่งรังสีจากหลอดไฟ การแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวประกอบด้วย การดูดซับรังสีและการแผ่รังสีความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำเช่นพื้นผิวภายในโซน อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนผู้อยู่อาศัย สมการความสัมพันธ์ของสมดุลความร้อนที่ผนังด้านในแสดงได้ดังนี้

$$q''_{ki} + q''_{sw} + q''_{sol} + q''_{LWX} + q''_{LWS} + q''_{conv} = 0 \quad (83)$$

โดยที่	q''_{ki}	คือ	ฟลักซ์การนำความร้อนจากผนังด้านใน
	q''_{sw}	คือ	ฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อนจากแหล่งความร้อนภายในโซน
	q''_{sol}	คือ	ฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ ซึ่งเข้ามาทางระบบหน้าต่าง
	q''_{LWX}	คือ	ฟลักซ์การแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิว
	q''_{LWS}	คือ	ฟลักซ์การแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวจากอุปกรณ์ต่างๆ
	q''_{conv}	คือ	ฟลักซ์การพาความร้อนออกสู่อากาศ

การแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวภายในโซน (q''_{LWX}) กระทำบนพื้นฐานของการพิจารณาว่าอากาศภายในโซนประพฤติต่อการแผ่รังสีคลื่นยาวเสมือนตัวกลางโปร่งใสซึ่งปราศจากการดูดซับรังสีความร้อนใดๆ นอกจากนี้ยังมีสมมุติฐานอื่นอีกที่เอื้ออำนวยต่อการวิเคราะห์การเปล่งและการดูดซับรังสีซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ตัวประกอบเชิงมุมรวมถึงความยาวคลื่นของแต่ละพื้นผิว สมมุติฐานเหล่านั้นคือ

1. ทุกพื้นผิวเป็นสีเทาซึ่งมีค่าการเปล่งรังสีและค่าการดูดซับรังสีคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ
2. การเปล่งรังสีและการสะท้อนรังสีถูกกระจายไปทุกทิศทาง
3. ฟลักซ์ความร้อนจากพื้นผิวใดพื้นผิวหนึ่งถูกกระจายไปสู่พื้นผิวอื่นอย่างสม่ำเสมอ

การแผ่รังสีความร้อนคลื่นยาวจากแหล่งความร้อนภายใน (q''_{LWS}) ถูกระบุในรูปร้อยละของปริมาณความร้อนที่ปล่อยออกมาจากแหล่งต่างๆ พลังงานความร้อนที่ปล่อยออกมานี้สามารถแบ่งการพิจารณาเป็นสองส่วนนั่นคือการเปล่งรังสีความร้อนกับการพาความร้อน พลังงานที่อยู่ในรูปการแผ่รังสีความร้อนจะกระจายไปยังส่วนต่างๆ ของอาคารอย่างสม่ำเสมอ ส่วนพลังงานที่อยู่ในรูปของการพาความร้อนจะถ่ายเทให้แก่อากาศภายในโซนโดยตรง สาเหตุที่ทำการกระจายการแผ่รังสีความร้อนไปสู่ทุกพื้นผิวอย่างสม่ำเสมอนั้นเนื่องจากในทางปฏิบัติไม่สามารถทราบค่าที่แน่นอนของอุณหภูมิพื้นผิวในแต่ละอุปกรณ์ได้ นอกจากนี้ยังต้องคำนวณค่าตัวประกอบเชิงมุมของ

แต่ละอุปกรณ์อีกด้วย ดังนั้นการแบ่งปริมาณความร้อนออกเป็นการแผ่รังสีความร้อนกับการพาความร้อนจึงเป็นทางออกที่เหมาะสมกว่า

การแผ่รังสีจากแหล่งความร้อนภายใน (q''_{sw}) เช่น การแผ่รังสีความร้อนของดวงไฟซึ่งสามารถส่งผ่านรังสีความร้อนออกมาได้ทั้งแบบคลื่นสั้นและคลื่นยาว ความร้อนจากรังสีคลื่นสั้นที่แผ่ออกมานี้ถูกกระจายไปทั่วทั้งโซนอย่างสม่ำเสมอเหมือนกับแผ่รังสีคลื่นยาว

รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่เข้ามาทางระบบหน้าต่าง (q''_{sol}) สามารถวิเคราะห์ถึงตำแหน่งที่รังสีอาทิตย์ตกกระทบบนพื้นของโซนควบคุมได้ หากแต่การพิจารณาในลักษณะดังกล่าวไม่สอดคล้องกับสมมติฐานของระเบียบวิธีสมดุลความร้อนที่ระบุว่าแต่ละพื้นผิวต้องมีอุณหภูมิและการดูดซับรังสีความร้อนที่สม่ำเสมอ ดังนั้นค่า q''_{sol} ทั้งหมดที่เข้าสู่โซนควบคุมจำเป็นต้องถูกฉายลงสู่พื้นอย่างเท่าเทียมกันตลอดทั้งโซน ความถูกต้องของการคำนวณด้วยวิธีการนี้มีการนำเสนอไว้ในงานวิจัยของ Liesen, R.J. (1997)

กระบวนการสำคัญในการวิเคราะห์สมดุลความร้อนที่ผนังภายในก็คือวิธีการวิเคราะห์การแผ่รังสีคลื่นยาวระหว่างแต่ละพื้นผิว (q''_{lw}) ซึ่งมีความจำเป็นต้องทราบอุณหภูมิและตัวประกอบเชิงมุมของแต่ละพื้นผิว แต่เนื่องจากอุณหภูมิของแต่ละพื้นผิวเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า จึงทำให้การวิเคราะห์เป็นไปด้วยความยากลำบาก ยิ่งไปกว่านั้นการนำค่าแม่นยำตรงของตัวประกอบเชิงมุมมาใช้ในการคำนวณทำให้ระบบสมการมีลักษณะไม่เชิงเส้นซึ่งอยู่ในรูปสมการกำลังสี่ Liesen, R.J. (1997) ทำการเปรียบเทียบการคำนวณซึ่งใช้ค่าแม่นยำตรงของตัวประกอบเชิงมุมกับวิธีการอื่นที่ง่ายกว่าแต่ได้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกัน จากการศึกษาวิจัยพบว่าวิธีการที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวก็คือระเบียบวิธี MRT Balance (Mean Radiant Temperature with Balance)

สำหรับระเบียบวิธี MRT Balance จะพิจารณาว่าแต่ละพื้นผิวในโซนควบคุมจะทำการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนคลื่นยาวกับพื้นผิวปลอมที่สมมุติขึ้น พื้นผิวปลอมนี้มีคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ตัวอย่างเช่นการเปล่งรังสี รวมถึงอุณหภูมิเท่ากับค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของพื้นผิวอื่นซึ่งปิดล้อมพื้นผิวที่กำลังพิจารณา แต่การคำนวณเช่นนี้ทำให้เกิดความไม่สมดุลในค่าพลังงานการแผ่รังสีรวมอันเป็นผลมาจากตัวประกอบเชิงมุมและอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่นำมาวิเคราะห์มิใช่ค่าแม่นยำ ระเบียบวิธี MRT Balance คำนึงพฤติกรรมดังกล่าวจึงทำการเฉลี่ยความไม่สมดุลทั้งหมดที่เกิดขึ้นให้แก่ทุกพื้นผิวเพื่อรองรับสมดุลพลังงาน

การนำระเบียบวิธี MRT Balance ที่ไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าแม่นยำตรงของตัวประกอบเชิงมุมมาคำนวณจะมีประโยชน์อย่างมากต่อการวิเคราะห์สมดุลความร้อนของอาคาร เนื่องจากอาคารทั่วไปไม่ได้เป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก นอกจากนี้ภายในอาคารยังประกอบด้วยอุปกรณ์ตกแต่ง ดวงไฟ และ ผู้คน จึงไม่สามารถคำนวณค่าตัวประกอบเชิงมุมได้อย่างถูกต้อง แต่ระเบียบวิธี MRT Balance ที่อยู่บนพื้นฐานของค่าพื้นที่และค่าการเปล่งรังสีเฉลี่ยสามารถพิจารณาผลของสิ่งต่างๆที่อยู่ภายในโซนได้โดยมีความผิดพลาดในกรณีห้องรูปทรงสี่เหลี่ยมไม่เกิน 10% (Liesen, R.J., 1997)

2.2.4 สมดุลความร้อนของอากาศภายในโซน

การคำนวณสมดุลความร้อนของอากาศภายในโซนจะไม่พิจารณาความจุความร้อนของอากาศ นอกจากนี้อากาศภายในโซนถูกกำหนดให้อยู่ในสภาวะเกือบคงที่ (quasi-steady) ในแต่ละช่วงเวลา การถ่ายเทความร้อนที่เกี่ยวข้องกับสมดุลความร้อนของอากาศภายในโซนคือการพาความร้อนจากพื้นผิวภายในโซน การพาความร้อนจากแหล่งความร้อนภายใน การรั่วซึมของอากาศและการถ่ายเทความร้อนจากระบบ HVAC

$$q_{\text{conv}} + q_{\text{CE}} + q_{\text{IV}} + q_{\text{sys}} = 0 \quad (84)$$

โดยที่	q_{conv}	คือ	การพาความร้อนจากแต่ละพื้นผิว
	q_{CE}	คือ	การพาความร้อนจากแหล่งความร้อนภายใน
	q_{IV}	คือ	การถ่ายเทความร้อนสัมผัสจากการรั่วซึมและการระบายอากาศ
	q_{sys}	คือ	การถ่ายเทความร้อนจากระบบ HVAC

การพาความร้อนจากแต่ละพื้นผิว (q_{conv}) เป็นผลรวมของการพาความร้อนจากทุกพื้นผิวที่เคยพิจารณาแล้วในสมดุลความร้อนที่ผนังภายใน ปริมาณความร้อนเหล่านี้จะถ่ายเทเข้าสู่อากาศภายในโซนผ่านทางสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นผิวภายในโซน

การพาความร้อนจากแหล่งความร้อนภายใน (q_{CE}) เป็นความร้อนอีกส่วนนอกเหนือจากการแผ่รังสีความร้อน q''_{LWS} และ q''_{SW} ซึ่งเคยอธิบายไว้ในสมดุลความร้อนที่ผนังด้านใน ปริมาณการพาความร้อนที่เกิดขึ้นชนิดนี้จะถูกพิจารณาให้ถ่ายเทสู่อากาศภายในโซนโดยตรง

การพิจารณาการถ่ายเทความร้อนจากการรั่วซึมและการระบายอากาศ (q_{IV}) ต้องพิจารณาควบคู่กับสมมติฐานของการคำนวณสมดุลความร้อนที่กำหนดให้อากาศอยู่ใน

สภาวะเกือบหยุดนิ่ง ดังนั้นอากาศที่เข้ามาสู่โซนควบคุมทั้งจากการรั่วซึมหรือการระบายอากาศถูกกำหนดให้เกิดการผสมกับอากาศภายในโซนโดยทันที การวิเคราะห์ถึงปริมาณอากาศที่ถ่ายเทเข้าและออกจากโซนมีความจำเป็นต้องวิเคราะห์สมการความต่อเนื่องรวมถึงความดันที่แตกต่างกันระหว่างโซนควบคุมกับสิ่งแวดล้อมเพื่อให้ทราบถึงอัตราการไหลของอากาศเชิงมวลที่เข้าและออกจากโซนควบคุมได้

2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับการวิเคราะห์การไหลของอากาศ

โดยทั่วไปการถ่ายเทอากาศเข้าและออกจากตัวอาคารสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทคือการระบายอากาศ (ventilation) และการรั่วซึมของอากาศ (infiltration) ซึ่งแต่ละประเภทจะให้ผลที่แตกต่างกันในด้านการควบคุมการใช้พลังงาน คุณภาพอากาศภายในอาคาร และทางด้านความรู้สึกสบายของผู้อยู่อาศัยอีกทั้งยังให้ผลในการรักษาอัตราการถ่ายเทอากาศที่ต่างกันด้วย อัตราการถ่ายเทอากาศ ณ เวลาใดๆ เป็นผลรวมของลักษณะการถ่ายเทอากาศทั้งสองประเภทซึ่งต้องพิจารณาควบคู่กันเสมอ

กลไกที่ทำให้เกิดการถ่ายเทอากาศเข้าและออกจากตัวอาคารได้แก่ความแตกต่างระหว่างความดันภายในและภายนอกอาคาร ปัจจัยหลักที่ทำให้ความดันมีค่าแตกต่างกันคืออิทธิพลของลมที่พัดปะทะตัวอาคาร ความหนาแน่นของอากาศที่ต่างกันอันเป็นผลมาจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในกับภายนอกอาคาร ผลจากการระบายอากาศเชิงกลในอาคาร การวิเคราะห์การไหลที่เกิดขึ้นในอาคารอาศัยหลักการตามสมการของ Bernoulli โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งออก (discharge coefficient, c_d) เป็นตัวปรับแก้พฤติกรรมของการไหลที่คำนวณได้ให้ใกล้เคียงกับการไหลที่เกิดขึ้นจริง สมการความต่อเนื่องเป็นเงื่อนไขสำคัญที่ตัดสินว่าการถ่ายเทอากาศที่คำนวณได้เป็นการไหลที่เกิดขึ้นจริงในอาคารหรือไม่ แบบจำลองเครือข่าย (Network Models) ที่จำลองอาคารด้วยจุดต่อ (node) และบริเวณ (space) ถูกนำมาประยุกต์เข้ากับอาคารเพื่อให้สามารถวิเคราะห์การไหลที่เกิดขึ้นด้วยสมการ Bernoulli และสมการความต่อเนื่อง รายละเอียดทั้งหมดของการคำนวณสามารถแสดงได้ดังนี้

2.3.1 สมการการไหล

สมการการไหลอากาศเชิงมวลผ่านรอยรั่วซึมที่เปลือกอาคารสามารถเขียนได้ในรูปฟังก์ชันของผลต่างความดันที่ตกคร่อมรอยรั่วซึมซึ่งแสดงอยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$\dot{m} = \text{Sign} \left[c_d A_{\text{eff}} \sqrt{\rho |\Delta P|} \right] \quad (85)$$

โดยที่	\dot{m}	คือ	อัตราการไหลอากาศเชิงมวล
	Sign	คือ	เครื่องหมายของผลต่างความดัน
	c_d	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งออก
	A_{eff}	คือ	พื้นที่การไหลยังผล (effective flow area)
	ρ	คือ	ความหนาแน่นอากาศ
	ΔP	คือ	ผลต่างความดันตกคร่อมเส้นทางการไหล

สมการ (85) เป็นสมการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อคำนวณอัตราการไหลผ่านช่องเปิดเล็กๆ (orifice) และมีชื่อที่เรียกว่าสมการ orifice อย่างไรก็ตามสมการนี้ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์หรืออัตราการไหลที่เกิดขึ้นในอาคารและการวิเคราะห์ระบบควบคุมควันไฟ อย่างไรก็ตามเนื่องจากสมการดังกล่าวดัดแปลงมาจากสมการ Bernoulli การวิเคราะห์จึงจำกัดเฉพาะการไหลในสภาวะคงที่ ไร้แรงเสียดทานและไม่อัดตัว ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การส่งออก (c_d) จึงถูกนำมาใช้เพื่อคำนึงถึงผลจากแรงเสียดทานต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นแรงเสียดทานที่เกิดจากความหนืดหรือแรงเสียดทานตามหลักพลศาสตร์ ดังนั้น c_d จึงขึ้นอยู่กับตัวเลข Reynolds และรูปร่างของช่องการไหล ในงานวิจัยนี้พิจารณาว่าช่องทางการไหลเกิดจากช่องว่างตามประตูหรือหน้าต่าง ช่องเปิดแต่ละที่ และรอยแตกของโครงสร้างอาคาร โดยปกติแล้ว c_d มีค่าอยู่ระหว่าง 0.6 ถึง 0.7 สำหรับกรณีทั่วไปจะกำหนดให้ c_d มีค่าเท่ากับ 0.65 จากสมการที่ (85) หากพิจารณาอากาศให้มีพฤติกรรมเสมือนก๊าซในอุดมคติจะได้ว่า

$$\dot{m} = c_{\text{adj}} (\Delta P)^{\frac{1}{2}} \quad (86)$$

โดยที่	c_{adj}	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การไหลหลังการปรับปรุงซึ่งมีค่าเท่ากับ
			$\text{Sign}[c_d A_{\text{eff}} \sqrt{\rho}]$

ผลต่างความดันอยู่ในรูป

$$\Delta P = P_i - P_j - g \frac{P_{\text{avg}}}{RT_{\text{avg}}} (h_j - h_i) \quad (87)$$

โดยที่	P_i	คือ	ความดันเกจที่บริเวณ i
	P_j	คือ	ความดันเกจที่บริเวณ j
	h_i	คือ	ความสูงของจุด i
	h_j	คือ	ความสูงของจุด j

g	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง
R	คือ	ค่าคงที่ของก๊าซ
T_{avg}	คือ	อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างจุด i กับ j
P_{avg}	คือ	ความดันสมบูรณ์เฉลี่ยระหว่างจุด i กับ j

ในกรณีที่บริเวณซึ่งกำลังพิจารณาตั้งอยู่นอกอาคารความดันที่บริเวณนั้นย่อมได้รับอิทธิพลจากลมที่ผิวอาคาร ลมทำให้เกิดการกระจายความดันสถิตยบนเปลือกอาคาร การกระจายตัวของความดันขึ้นอยู่กับทิศทางลม ความเร็วลม ความหนาแน่นอากาศ ทิศทางของผนัง และยังขึ้นอยู่กับความขรุขระบนของผิวผนังอีกด้วย ความดันที่เกิดจากลมนี้สามารถมีค่าได้ทั้งบวกและลบขึ้นอยู่กับทิศทางของพื้นผิวเทียบกับทิศทางลม ถ้าผนังอยู่ในทิศด้านลมความดันจะมีค่าเป็นบวก ในทางกลับกันความดันลมจะมีค่าเป็นลบเมื่อผนังอยู่ทิศตามลม จากอิทธิพลของความดันลมทำให้ความดันที่บริเวณนอกอาคารอยู่ในรูป

$$P_o = P_h + c_w P_w \quad (88)$$

โดยที่ P_o	คือ	ความดันเกจที่ภายนอกอาคาร
P_h	คือ	ผลต่างความดันสถิตยที่ระดับความสูง h เทียบกับพื้นดิน
P_w	คือ	ความดันลมที่ระดับความสูง h
c_w	คือ	สัมประสิทธิ์ความดันลม

โดยส่วนใหญ่ข้อมูลของสัมประสิทธิ์ความดันลม (c_w) มักเป็นข้อมูลในกรณีที่ลมพัดตั้งฉากกับผิวอาคารซึ่งเป็นโอกาสที่เกิดขึ้นยาก จึงทำให้ข้อมูลเหล่านี้ไม่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ได้ ASHRAE (2001) ได้อ้างอิงฟังก์ชัน harmonic trigonometric ซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นจาก Walker และ Wilson ในปี 1994 เพื่อมาใช้ประมาณค่า c_w บนพื้นผิวอาคารที่ไม่อยู่ในทิศตั้งฉากกับลม ฟังก์ชันที่อ้างอิงนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อคำนวณอาคารเตี้ยที่มีความสูงน้อยกว่าสามชั้นและมีความยาวน้อยกว่าสามเท่าของด้านกว้าง ค่า c_w ที่ผนังแต่ละด้านสามารถแสดงได้ดังนี้

$$c_w = \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} & (c_{w1} + c_{w2}) (\cos^2 \phi)^{\frac{1}{4}} + (c_{w1} - c_{w2}) (\cos \phi)^{\frac{3}{4}} \\ & + (c_{w3} + c_{w4}) (\sin^2 \phi)^2 + (c_{w3} - c_{w4}) (\sin \phi) \end{aligned} \right\} \quad (89)$$

โดยที่ c_{w1}	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความดันลมเมื่อลมอยู่ที่ตำแหน่ง 0°
c_{w2}	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความดันลมเมื่อลมอยู่ที่ตำแหน่ง 180°

c_{w3}	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความดันลมเมื่อลมอยู่ที่ตำแหน่ง 90°
c_{w4}	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความดันลมเมื่อลมอยู่ที่ตำแหน่ง 270°
ϕ	คือ	ทิศทางลมวัดตามเข็มนาฬิกาเทียบกับผนังแรกของอาคาร

ASHRAE (2001) นำเสนอว่าฟังก์ชันดังกล่าวพัฒนาขึ้นจากผลการทดลองของ Akins et al. (1979) และ Wiren (1985) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความดันลมตามทิศต่างๆ คงที่ดังต่อไปนี้ c_{w1} เท่ากับ 0.6 c_{w2} เท่ากับ -0.3 c_{w3} และ c_{w4} เท่ากับ -0.65 ตามที่กล่าวมาแล้วว่ารูปทรงของอาคารมีผลต่อการกระจายตัวของความดันลมรวมถึงข้อจำกัดของสมการ (89) ที่ใช้ได้เฉพาะอาคารเตี้ยซึ่งมีความยาวน้อยกว่าสามเท่าของด้านกว้าง (ไม่เป็นรูปตัวแอล) ดังนั้นหากอาคารที่ทำการพิจารณาเป็นอาคารเตี้ยแต่ไม่มีรูปร่างตามที่กล่าวมานี้ การคำนวณค่า c_w จำเป็นต้องประมาณจากความสัมพันธ์ตามสมการ (90)

$$c_w = \ln \left[\begin{array}{l} 1.248 - 0.703 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) - 1.175 \sin^2(\theta) \\ + 0.131 \sin^3(2\theta G) + 0.769 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ + 0.07G^2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) + 0.717 \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{array} \right] \quad (90)$$

โดยที่	θ	คือ	มุมระหว่างทิศทางลมกับผนังที่ทำการพิจารณา
	G	คือ	ลอการิทึมธรรมชาติของสัดส่วนระหว่างความกว้างของผนังที่พิจารณากับผนังที่ใกล้เคียง

นอกจากความดันลมเป็นสาเหตุของความดันลมที่ลดลงแล้วในกรณีที่มีปัญหาเป็นอาคารเตี้ยยังพบว่าความเร็วลมที่หน้าอาคารจะได้รับผลกระทบจากสิ่งกีดขวางที่อยู่รอบอาคารอีกด้วย การกีดขวางของต้นไม้ ปล่องควันรวมถึงอาคารที่อยู่ใกล้เคียงทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศขนาดใหญ่ที่นอกจากทำให้ความเร็วลมมีค่าลดลงแล้วยังอาจทำให้ทิศทางลมเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นการนำข้อมูลลมที่ได้รับจากกรมอุตุนิยมวิทยา (2544) มาวิเคราะห์อาคารเตี้ยควรกระทำด้วยความระมัดระวัง

เพื่อให้การวิเคราะห์ความดันลมที่ผิวอาคารมีความแม่นยำขึ้นค่าตัวประกอบสิ่งกีดขวาง (shelter factor, s) ถูกนำมาใช้เพื่อลดความเร็วลมที่หน้าอาคารอันเป็นผลมาจากสิ่งกีดขวางซึ่งอยู่รอบอาคาร

$$s = \frac{1}{2} \left[\begin{array}{l} (s_1 + s_2) \cos^2 \phi + (s_1 - s_2) \cos \phi \\ + (s_3 + s_4) \sin^2 \phi + (s_3 - s_4) \sin \phi \end{array} \right] \quad (91)$$

- โดยที่ s คือ ตัวประกอบสิ่งกีดขวางเมื่อลมอยู่ในทิศ ϕ
 s_1 คือ ตัวประกอบสิ่งกีดขวางเมื่อลมอยู่ในทิศตั้งฉากกับผนังที่ i และมีค่าตามตาราง 2.4
 ϕ คือ ทิศทางลมวัดตามเข็มนาฬิกาเทียบกับผนังแรกของอาคาร

ลมที่หน้าอาคารได้รับอิทธิพลจากสิ่งแวดล้อมต่างๆไม่ว่าจะเป็นความขรุขระของพื้นผิวที่อยู่บริเวณต้นลมหรือแม้กระทั่งตัวเมืองซึ่งประกอบด้วยอาคารที่มีความสูงหลากหลาย เพราะเหตุนี้ความเร็วลมที่หน้าอาคารจะแตกต่างจากบริเวณที่ทำการตรวจวัดอย่างมาก จึงมีความจำเป็นต้องแก้ไขข้อมูลลมที่ตรวจวัดให้เป็นความเร็วลมที่หน้าอาคารโดยพิจารณาถึงผลกระทบจากความขรุขระของพื้นผิวและระดับความสูงที่แตกต่างกัน

กฎกำลัง (power law) ถูกนำมาวิเคราะห์ถึงความเร็วลมเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างทางกายภาพของการไหลระหว่างการไหลผ่านผิวขรุขระกับการไหลผ่านแผ่นเรียบ จากกฎกำลังทำให้ความเร็วลมรายชั่วโมงเฉลี่ย ณ ระดับความสูงต่างๆ ของสถานที่ทำการพิจารณาสามารถคำนวณด้วยข้อมูลลมซึ่งได้จากสถานีตรวจอากาศตามสมการต่อไปนี้

$$U_H = s U_{met} \left(\frac{\delta_{met}}{H_{met}} \right)^{a_{met}} \left(\frac{H}{\delta} \right)^a \quad (92)$$

- โดยที่ U_H คือ ความเร็วลมเฉลี่ย ณ ระดับความสูง H
 U_{met} คือ ความเร็วลมที่สถานีตรวจอากาศ
s คือ ตัวประกอบสิ่งกีดขวาง
H คือ ระดับความสูงของกำแพงด้านต้นลมวัดจากพื้น
 H_{met} คือ ระดับความสูงเครื่องวัดความเร็วลมที่สถานีตรวจอากาศ
 δ คือ ความหนาชั้นขอบเขตของบริเวณที่พิจารณา

δ_{met}	คือ	ความหนาชั้นขอบเขตของบริเวณรอบสถานีตรวจอากาศ
a	คือ	เลขชี้กำลังตามกฎกำลังซึ่งมีค่าตามภูมิภาค รอบสถานีที่ทำการพิจารณา
a_{met}	คือ	เลขชี้กำลังตามกฎกำลังซึ่งมีค่าตามภูมิภาค รอบสถานีตรวจอากาศวัด

ความหนาชั้นขอบเขตของลม (δ) และเลขชี้กำลัง (a) สำหรับบริเวณที่พิจารณา และบริเวณที่ทำการตรวจวัดสามารถดูได้จากตาราง 2.5 โดยปกติแล้วสถานีที่ทำการตรวจวัดข้อมูลอากาศมักตั้งอยู่ในภูมิภาคที่เปิดโล่งและอยู่ในที่ราบจึงทำให้ค่าความหนาชั้นขอบเขต (δ_{met}) และเลขชี้กำลัง (a_{met}) มีค่า 270 m และ 0.14 ตามลำดับ ระดับความสูงมาตรฐานที่ใช้เก็บข้อมูล (H_{met}) อยู่ที่ 10 m เหนือพื้นดิน

ตาราง 2.4 ค่าตัวประกอบสิ่งกีดขวาง

Shelter Class	Description	No	One	Two	Three
			Story	Story	Story
		Flue	with	with	with
			Flue	Flue	Flue
1	No obstructions or local shielding	1.00	1.10	1.07	1.06
2	Typical shelter of an isolated rural house	0.90	1.02	0.98	0.97
3	Typical shelter caused by other buildings across the street from the building under study	0.70	0.86	0.81	0.79
4	Typical shelter for urban buildings on larger lots where sheltering obstacles are more than one building height away	0.50	0.70	0.64	0.61
5	Typical shelter produced by buildings or other structures that are immediately adjacent (closer than one house height)	0.30	0.54	0.47	0.43

แหล่งที่มา : ASHRAE, ASHRAE Fundamental Handbook 2001 (American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, 1993), Chapter 26.

ตาราง 2.5 ค่าพารามิเตอร์ของชั้นขอบเขต

Terrain Category	Description	Exponent a	Layer Thickness δ, m
1	Large city centers , in which at least 50% of buildings are higher than 2.1 m over a distance of at least 200 m upwind	0.33	460
2	Urban , suburban , wooded areas , and other areas with closely spaced obstructions compared to or larger than single-family dwellings (over a distance of at least 200 m upwind)	0.22	370
3	Open terrain with scattered obstacles generally less than 10 m high	0.14	270
4	Flat , unobstructed areas exposed to wind flowing over a large water body (no more than 500 m inland)	0.10	210

แหล่งที่มา : ASHRAE, ASHRAE Fundamental Handbook 2001 (American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, 1993), Chapter 16.

จากนิยามของลมที่หน้าอาคารตัวประกอบสิ่งกีดขวางและกฎกำลังทำให้ความดันลมที่พื้นผิวอาคารอยู่ในรูป

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \left[sU_{met} \left(\frac{\delta_{met}}{H_{met}} \right)^{a_{met}} \left(\frac{H}{\delta} \right)^a \right]^2 \quad (93)$$

หากพิจารณาว่าอุณหภูมิของอากาศภายนอกอาคารมีค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อทำการประยุกต์กฎของก๊าซในอุดมคติเข้าไปในความสัมพันธ์ของผลต่างความดันสถิตยจะได้ความดันสถิตย ณ ระดับความสูงที่กำลังพิจารณาดังนี้

$$P_h = P_{atm} \exp \left[- \frac{g}{RT_{out}} H \right] \quad (94)$$

โดยที่ P_{atm} คือ ความดันบรรยากาศ
 T_{out} คือ อุณหภูมิอากาศภายนอก

ค่า P_n ณ ระดับความสูงที่พิจารณาซึ่งคำนวณได้จากสมการ (94) และ P_w ตามสมการ (93) รวมถึงค่า c_w ตามสมการ (89) และ (90) ถูกนำไปแทนค่าในสมการ (88) เพื่อคำนวณค่าความดันที่เปลือกอาคารในแต่ละด้าน ค่าความดันที่คำนวณได้ถูกใช้เป็นเงื่อนไขขอบเขตที่สำคัญต่อการวิเคราะห์ความดันในแต่ละห้อง การคำนวณจะดำเนินการต่อไปเรื่อยๆ ผ่านกระบวนการทำซ้ำจนกว่าอัตราการไหลอากาศภายในอาคารที่คำนวณจากสมการ (85) มีความสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง (95)

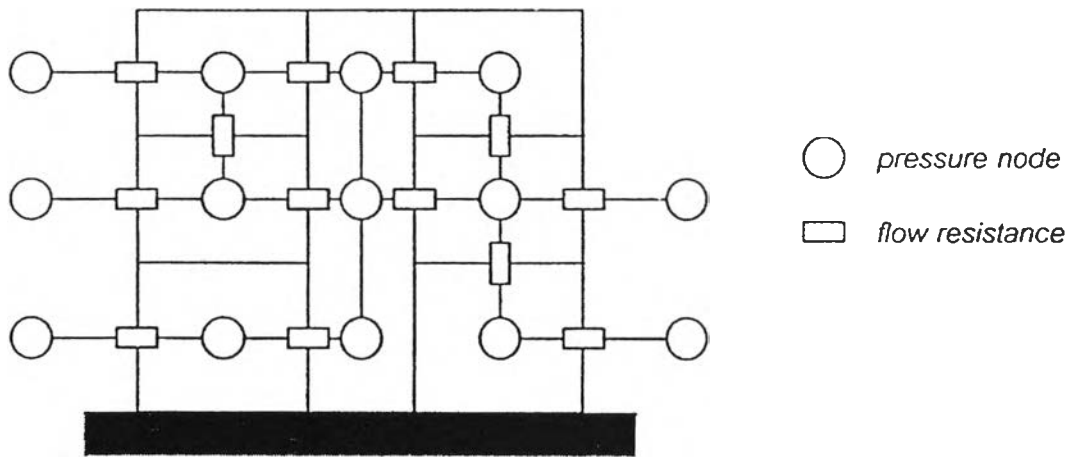
2.3.2 สมการความต่อเนื่อง

สมการความต่อเนื่องถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกับแบบจำลองเครือข่าย (Network Models) อาคารที่นำมาวิเคราะห์ถูกแบ่งออกเป็นห้องย่อยๆ ซึ่งมีอุณหภูมิและความดันสม่ำเสมอ ห้องเหล่านี้เรียกว่าโซนควบคุม (control zone) และแทนด้วยจุด (node) ในอัตราส่วนหนึ่งจุดต่อหนึ่งโซนควบคุม แต่ละโซนควบคุมถูกเชื่อมต่อด้วยช่องเปิดหรือรอยแตกของผนังซึ่งทำให้อากาศสามารถถ่ายเทถึงกันได้ สมการ (85) หรือ (86) ถูกนำมาคำนวณอัตราการไหลที่ช่องทางการไหลเหล่านี้โดยพิจารณาอัตราการไหลเป็นฟังก์ชันของความดันตกคร่อม การไหลของอากาศภายในอาคารตามวิธีของแบบจำลองเครือข่ายแสดงอยู่ในรูป 2.8

จากวิธีของแบบจำลองเครือข่ายจะได้ว่าสมการความต่อเนื่องสำหรับจุดต่อใดๆ ภายในอาคารคือ

$$\sum_{j=1}^{N_c} \dot{m}(i,j) + \sum_{k=1}^{N_o} \dot{m}_o(i,k) + \dot{m}_r(i) = 0 \quad (95)$$

โดยที่	$\dot{m}(i,j)$	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลจากจุด j ไปยังจุด i
	$\dot{m}_o(i,k)$	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลจากทิศทาง k ภายนอกอาคารไปยังจุด i
	$\dot{m}_r(i)$	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศสุทธิเนื่องจากระบบปรับอากาศ
	N_c	คือ	จำนวนของจุดต่อภายในอาคารที่เชื่อมต่อกับจุด i
	N_o	คือ	จำนวนของจุดต่อภายนอกอาคารที่เชื่อมต่อกับจุด i



รูป 2.8 การไหลของอากาศภายในอาคารตามวิธีของแบบจำลองเครือข่าย

เมื่อแทนสมการ (85) ลงในสมการ (95) แล้วเขียนให้อยู่ในรูปของความดันที่จุดต่อทำให้ได้ระบบสมการไม่เชิงเส้นโดยมีจำนวนสมการและตัวแปรไม่ทราบค่าเท่ากับจำนวนของจุดต่อที่แสดงถึงโซนควบคุมดังนี้

$$\begin{aligned}
 f_1(P_1, \dots, P_1, \dots, P_n) &= 0 \\
 &\vdots \\
 f_i(P_1, \dots, P_1, \dots, P_n) &= 0 \\
 &\vdots \\
 f_n(P_1, \dots, P_1, \dots, P_n) &= 0
 \end{aligned} \tag{96}$$

สำหรับการหาคำตอบของระบบสมการไม่เชิงเส้นของแบบจำลองการไหลของอากาศแบบเครือข่ายที่สามารถทำได้ด้วยระเบียบวิธีวางตัวผิวดั้งเดิมที่มีหลักการสำคัญคือกำหนดค่าความดันเริ่มต้นของแต่ละจุดต่อและกำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงความดัน (ΔP) จากนั้นจึงทำการปรับปรุงค่าความดันที่แต่ละจุดต่อจนคำตอบของระบบสมการไม่เชิงเส้นลู่เข้าถึงเกณฑ์ (convergence criterion) ที่กำหนด