

ผลของความเร็วลมต่อภาวะสบายเชิงความร้อน



นายวัฒนา ศรีวาจนะ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

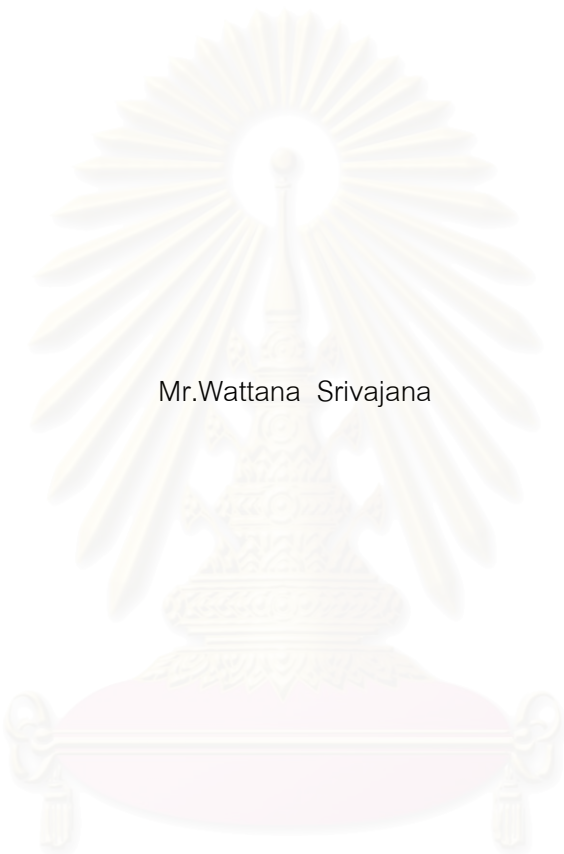
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2720-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF AIR VELOCITY ON THERMAL COMFORT



Mr.Wattana Srivajana

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Mechanical Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2002

ISBN 974-17-2720-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์                      ผลของความเร็วลมต่อภาวะสลายเชิงความร้อน  
โดย    นายวัฒนา ศรีวาจนะ  
สาขาวิชา                                    วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษา                        ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตุลย์ มณีวัฒนา

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ทวี เวชพฤติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตุลย์ มณีวัฒนา)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.มานิจ ทองประเสริฐ)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ศรัณยู จำปา)

วัฒนา ศรีวาจนะ : ผลของความเร็วลมต่อภาวะสบายเชิงความร้อน. (EFFECTS OF AIR VELOCITY ON THERMAL COMFORT) อ.ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ตฤณ มณีวัฒนา, 123 หน้า. ISBN 974-17-2720-8.

นักศึกษาจำนวนทั้งสิ้น 128 คน (ชาย 64 คน และ หญิง 64 คน) ถูกขอให้เข้าร่วมในการทดสอบแบบใช้ดุลยพินิจ เพื่อศึกษาถึงผลของความเร็วมที่มีต่อภาวะสบายเชิงความร้อน การทดลองนี้ถูกดำเนินการในห้องควบคุมสภาวะแวดล้อม ณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในช่วงเดือนเมษายน ถึง ธันวาคม 2545 ภายใต้ขอบเขตของการทดลองที่จำกัดอยู่แต่กรณีที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้มากที่สุด กล่าวคือ ผู้เข้าร่วมการทดลองสวมใส่เสื้อผ้าและปฏิบัติภารกิจเสมือนนั่งทำงานอยู่ในสำนักงานทั่วไป

ผลจากการศึกษาพบว่าแบบจำลองสมการ PMV ของ Fanger (1970) ไม่สามารถทำนายภาวะสบายเชิงความร้อนที่ความเร็วมสูงได้อย่างถูกต้อง ดัชนีภาวะสบายเชิงความร้อนตัวใหม่ (Modified SET\*) ที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้ทำนายภาวะสบายเชิงความร้อนที่ความเร็วมสูง และมีภูมิอากาศแบบร้อนชื้น ได้ถูกพัฒนาขึ้นจากแบบจำลองสมการ SET\* ของ Gagge et al. (1986) ค่า Modified SET\* ใหม่ทำให้ค่าการโหวตภาวะสบายเชิงความร้อนที่ได้จากการทดลองเมื่อนำมาพล็อตในเทอมของ Modified SET\* ปรับเรียงตัวเกือบจะเป็นแนวเส้นตรง ทำให้สามารถสร้างสมการถดถอยที่เป็นตัวแทนข้อมูลได้ดี

ผลจากการทดลองเพื่อหาช่วงของความเร็วมที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบพบว่า คนส่วนมากรู้สึกสบาย เชิงความร้อน เมื่อค่า Modified SET\* อยู่ระหว่าง 23.0 C ถึง 26.3 C และค่าที่ดีที่สุดอยู่ที่ 24.3 C ผลการทดลองในส่วนที่เกี่ยวข้องกับความเร็วมสูงสุดบ่งชี้ว่าคนส่วนใหญ่จะรู้สึกไม่รำคาญมากนัก ถ้าความเร็วมมีค่าโดยประมาณไม่เกิน 0.9 m/s ส่วนความเร็วมที่มีค่าโดยประมาณสูงกว่า 0.9 m/s จะยอมรับได้ในกรณีที่ไม่สามารถสร้างสภาวะสบายได้ด้วยวิธีอื่นและผู้เข้าร่วมการทดลองทำงานอยู่ในสภาวะที่ไม่มีความเครียด

ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2545	

## 4171809321 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD : THERMAL COMFORT / HIGH AIR VELOCITY / PREFERRED AIR VELOCITY

WATTANA SRIVAJANA : EFFECTS OF AIR VELOCITY ON THERMAL COMFORT.

THESIS ADVISOR: ASST. PROF. TUL MANEEWATTANA, Ph.D., 123 pp. ISBN 974-17-2720-8.

A subjective experiment was conducted to investigate the effects of air velocity on thermal comfort. A total of 128 college-age students (64 males, 64 females) were asked to participate in the research work. An experiment was conducted in the environmental chamber at Chulalongkorn University from April to December 2002. The scope of the experiment is limited to the most common application in which the subjects wear normal working dress and perform normal offices work.

The study shows that Fanger's PMV Model (Fanger, 1970) cannot correctly predict thermal sensation at high air velocity. A new environmental index (Modified SET\*) that is suitable for use in the prediction of thermal sensation under high air velocity in hot and humid climate is developed from Gagge's SET\* Model (Gagge et al., 1986). This modified SET\* when used as a parameter for plotting thermal sensation votes from the experiment creates a nearly perfect straight line of data points that can be easily fit by a linear regression model.

Results from a study to find a suitable range of design air velocity is that most people feel comfortable (thermally) when the value of modified SET\* is between 23.0 degree C and 26.3 degree C in which the best value is at 24.3 degree C. Results from a study to find a maximum air velocity that most people do not feel disturbed is when the air velocity is approximately less than 0.9 m/s. The air velocity approximately greater than 0.9 m/s is only acceptable in the situation where there is no other means of creating thermal comfort and the subject is working under stress-free condition.

Department      Mechanical Engineering      Student's Signature .....

Field of study    Mechanical Engineering      Advisor's Signature .....

Academic year                              2002

## กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของวิทยานิพนธ์เล่มนี้เกิดขึ้นได้ ด้วยพลังกาย กำลังใจ และความอนุเคราะห์ จากหลายฝ่ายด้วยกัน ข้าพเจ้าขอพระขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตุลย์ มณีวัฒนา อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งเป็นพลังที่สำคัญยิ่ง ช่วยผลักดันให้ข้าพเจ้าผลิตผลงานวิจัยครั้งนี้ และกรุณาแนะนำแนวทางในการวิจัย แนวทางแก้ปัญหา และข้อคิดเห็นต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณท่านรองศาสตราจารย์ ทวี เวชพฤติ ประธานกรรมการ สำหรับกำลังใจ พร้อมทั้งคำแนะนำอันทรงคุณค่า และสละเวลากرณาติดต่อประสานงานการส่งบทความวิจัย และขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.มานิจ ทองประเสริฐ และ ดร. ศรันยุ จำปา ที่กรุณาให้ความเมตตา ร่วมเป็นกรรมการในครั้งนี้ รวมถึง รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ กรรมการ และให้ความอนุเคราะห์เครื่องวัดต่าง ๆ ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณท่านศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ สละเวลากرณาติดต่อประสานงานการส่งบทความวิจัยให้แก่ผู้ที่เกี่ยวข้อง มา ณ โอกาสนี้เช่นกัน นอกจากนี้ต้องขอขอบ พระคุณท่านศาสตราจารย์ ดร. วรวิทย์ อึ้งภากรณ์ รองศาสตราจารย์ ดร. กุลธร ศิลปบรรเลง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มัทนี สงวนเสริมศรี ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการพิจารณาบทความวิจัยของข้าพเจ้าในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณท่านรองศาสตราจารย์ คุณวุฒิ ดำรงค์พลาสีทธิ และอาจารย์ ดร. กุณทีนี มณีรัตน์ ที่สละเวลาช่วยตรวจทานบทความวิจัย

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณวีระ สุทธิโสภณ ผู้จัดการ ห้างหุ้นส่วนจำกัด วีรสู ให้ความอนุเคราะห์พัสดุที่ใช้การทดลอง

นอกจากนี้ ด้วยความประทับใจยิ่ง ข้าพเจ้าขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ผู้ประดุจกัลยาณมิตร ที่ให้ความเกื้อหนุน และแสดงความอาทรช่วยเหลือในการดำเนินงานในทุกกระบวนการ ด้วยใจอันประเสริฐยิ่ง

และทุนการศึกษาวิจัยส่วนหนึ่ง โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบัณฑิตวิทยาลัย ทบวงมหาวิทาลัย และคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้ากราบขอบพระคุณบิดา-มารดา และ ครอบครัวศรีวาจนะ ที่ได้ให้ความรักและกำลังใจตลอดมา จนพบกับความสำเร็จในวันนี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญรูปภาพ .....	ฐ
รายการสัญลักษณ์ .....	ด
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัย .....	4
1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและแนวคิดเกี่ยวกับภาวะสบายเชิงความร้อน .....	13
2.1 การยอมรับภาวะสบายเชิงความร้อน .....	13
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อภาวะสบายเชิงความร้อน .....	14
2.2.1 ตัวแปรบุคคล .....	14
2.2.2 ตัวแปรสภาวะแวดล้อม .....	18
2.3 สมดุลความร้อนของร่างกาย .....	22
2.3.1 สมดุลความร้อนแบบของ Fanger .....	23
2.3.2 สมดุลพลังงานแบบ Two Node Model .....	29
2.4 ดัชนีภาวะสบายเชิงความร้อน .....	35
2.4.1 Predicted Mean Vote .....	36
2.4.2 อุณหภูมิยังผล (Effective Temperatue) .....	38
2.4.3 อุณหภูมิยังผลมาตรฐาน (Standard Effective Temperatue) .....	39



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การทดลอง .....	44
3.1 ห้องทดลอง .....	44
3.1.1 ห้อง Control Room .....	45
3.1.2 ห้อง Chamber Room .....	45
3.2 การวัดค่าตัวแปรในการทดลอง .....	47
3.2.1 การวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้อง .....	48
3.2.2 การวัดอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ย .....	49
3.2.3 การวัดความเร็วลม .....	49
3.3 ขอบเขตและเงื่อนไขการทดลอง .....	50
3.3.1 ผู้ร่วมทดลอง .....	50
3.3.2 สภาวะแวดล้อม .....	51
3.3.3 ตัวแปรอื่น ๆ .....	51
3.4 แบบสอบถาม .....	51
3.4.1 แบบสอบถามทั่วไป .....	52
3.4.2 แบบสอบถามเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมภายในห้องทดลอง .....	52
3.5 ขั้นตอนการทดลอง .....	54
3.5.1 ช่วงเตรียมความพร้อมก่อนการทดลอง .....	54
3.5.2 ช่วงทำการทดลอง .....	55
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล .....	59
4.1 ข้อมูลทางสถิติของผู้ร่วมทดลอง .....	59
4.2 อุณหภูมิและความชื้นของห้องทดลอง .....	59
4.3 การยอมรับได้ของระดับเสียงและระดับความเข้มแสงภายในห้องทดลอง ขณะทำการทดลอง .....	60
4.4 ความรู้สึกทางความร้อนของเพศชายและเพศหญิงไม่มีความแตกต่าง .....	61
4.5 การทำนายค่าความรู้สึกทางความร้อนในสภาวะที่มีความเร็วลมสูง .....	61
4.5.1 การใช้ค่า PMV ทำนายความรู้สึกทางความร้อนในสภาวะ ที่มีความเร็วลมสูง .....	61



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.2 การใช้ค่า ET* ทำนายความรู้สึกทางความร้อนในสภาวะ ที่มีความเร็วลมสูง .....	63
4.5.3 การใช้ค่า SET* ทำนายความรู้สึกทางความร้อนในสภาวะ ที่มีความเร็วลมสูง .....	64
4.6 ช่วงที่ยอมรับสำหรับการออกแบบในสภาวะที่มีความเร็วลม .....	68
4.6.1 การหาช่วงที่ยอมรับได้จากคำถามข้อที่ 10 ของแบบสอบถาม .....	68
4.6.2 การหาช่วงที่ยอมรับได้จากคำถามข้อที่ 1 และคำถามข้อที่ 9 ของแบบสอบถาม .....	70
4.7 ความเร็วลมที่ไม่รบกวน .....	71
4.8 ความเร็วลมที่พึงพอใจ .....	74
4.9 Comfort Chart under High Air Velocity under Hot and Humid Climate..	77
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	81
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	81
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	82
รายการอ้างอิง .....	84
ภาคผนวก .....	86
ภาคผนวก ก. การวัดความเร็วในการทดลอง .....	87
ภาคผนวก ข. การสอบเทียบเครื่องมือวัด .....	92
ภาคผนวก ค. การตรวจสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ภายในห้องทดลอง .....	103
ภาคผนวก ง. แสดงตัวอย่างการแต่งกายของผู้ร่วมทดลอง .....	106
ภาคผนวก จ. การตรวจสอบระดับเสียง และระดับความเข้มแสง .....	108
ภาคผนวก ฉ. การวิเคราะห์ทางสถิติ .....	113
ภาคผนวก ช. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modified SET* กับอุณหภูมิอากาศ .....	118
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	123

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 Preferred Air Velocity (จากงานวิจัยของ Tanabe) .....	11
ตารางที่ 2.1 แสดงการเผาผลาญพลังงานโดยทั่วไปสำหรับกิจกรรมต่าง ๆ .....	15
ตารางที่ 2.2 ค่าความต้านทานความร้อนของเครื่องแต่งกาย .....	17
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลทางสรีระของผู้ร่วมทดลอง .....	59
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของอากาศ ภายในห้องทดลองจากการวัดในการทดลอง .....	60
ตารางที่ 4.3 แสดงสมการถดถอยระหว่างค่า Thermal Sensation Vote กับค่า ET* และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ที่แต่ละความเร็วลม .....	64
ตารางที่ 4.4 Preferred Air Velocity .....	75
ตาราง ก1 แสดงความเร็วลมที่ตำแหน่งต่าง ๆ ก่อน และหลังการทดสอบ เมื่อเปิดพัดลมที่สวิตช์ความเร็วลมระดับ 1 และปรับค่าแรงดันไฟฟ้า 110 โวลต์ .....	88
ตาราง ก2 แสดงความเร็วลมที่ตำแหน่งต่าง ๆ ก่อน และหลังการทดสอบ เมื่อเปิดพัดลมที่สวิตช์ความเร็วลมระดับ 1 และปรับค่าแรงดันไฟฟ้า 140 โวลต์ .....	89
ตาราง ก3 แสดงความเร็วลมที่ตำแหน่งต่าง ๆ ก่อน และหลังการทดสอบ เมื่อเปิดพัดลมที่สวิตช์ความเร็วลมระดับ 1 และปรับค่าแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ .....	89
ตาราง ก4 แสดงความเร็วลมที่ตำแหน่งต่าง ๆ ก่อน และหลังการทดสอบ เมื่อเปิดพัดลมที่สวิตช์ความเร็วลมระดับ 2 และปรับค่าแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ .....	90
ตาราง ก5 แสดงความเร็วลมที่ตำแหน่งต่าง ๆ ก่อน และหลังการทดสอบ เมื่อเปิดพัดลมที่สวิตช์ความเร็วลมระดับ 3 และปรับค่าแรงดันไฟฟ้า 200 โวลต์ .....	90
ตาราง ก6 แสดงความเร็วลมที่ตำแหน่งต่าง ๆ ก่อน และหลังการทดสอบ เมื่อเปิดพัดลมที่สวิตช์ความเร็วลมระดับ 3 และปรับค่าแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ .....	91
ตาราง ข1 แสดงการสอบเทียบอุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียก..	93

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตาราง ข2	แสดงการสอบเทียบ thermo-couple no.1 ..... 94
ตาราง ข3	แสดงการสอบเทียบ thermo-couple no.2 ..... 95
ตาราง ข4	แสดงการสอบเทียบ thermo-couple no.3 ..... 96
ตาราง ข5	แสดงการสอบเทียบ thermo-couple no.4 ..... 97
ตาราง ข6	แสดงการสอบเทียบ thermo-couple no.5 ..... 98
ตาราง ข7	แสดงการสอบเทียบ thermo-couple no.6 ..... 99
ตาราง ข8	แสดงการสอบเทียบ thermo-couple no.7 ..... 100
ตาราง ข9	แสดงการสอบเทียบ thermo-couple no.8 ..... 101
ตาราง ข10	แสดงการสอบเทียบ thermo-couple no.9 ..... 102
ตาราง ค1	แสดงค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดลองที่ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่สภาวะอากาศ 26°C 50 %rh ความเร็วลม 0.25 m/s ..... 104
ตาราง ค2	แสดงค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดลองที่ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่สภาวะอากาศ 26°C 50 %rh ความเร็วลม 1.64 m/s ..... 104
ตาราง ค3	แสดงค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดลองที่ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่สภาวะอากาศ 30°C 70 %rh ความเร็วลม 0.25 m/s ..... 105
ตาราง ค4	แสดงค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดลองที่ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่สภาวะอากาศ 30°C 70 %rh ความเร็วลม 1.64 m/s ..... 105
ตาราง จ1	แสดงค่าระดับเสียงที่ความเร็วลมต่าง ๆ ..... 108
ตาราง จ2	ตารางแจกแจงความถี่ของคำตอบในคำถามข้อที่ 5 ของแบบสอบถาม ที่แต่ละความเร็วลม ..... 109
ตาราง จ3	ตารางแจกแจงความถี่ของคำตอบในคำถามข้อที่ 6 ของแบบสอบถาม ที่แต่ละความเร็วลม ..... 109
ตาราง จ4	แสดงมาตรฐานระดับความเข้มแสงที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของโต๊ะทดลอง ..... 110

## สารบัญตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตาราง ๑5	ตารางแจกแจงความถี่ของคำตอบในคำถามข้อที่ 7 ของแบบสอบถาม ที่แต่ละความเร็วลม .....	111
ตาราง ๑6	ตารางแจกแจงความถี่ของคำตอบในคำถามข้อที่ 8 ของแบบสอบถาม ที่แต่ละความเร็วลม .....	112
ตาราง ๑๗	แสดงค่าเฉลี่ยของการตอบคำถามข้อที่ 1 ในแบบสอบถาม ของเพศชาย และเพศหญิงที่สภาวะอากาศต่าง ๆ.....	115
ตาราง ๑๘	แสดงค่า Preferred Air Velocity ของเพศชาย และเพศหญิง .....	117



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมที่แนะนำกับ ค่า Operative Temperature .....	12
รูปที่ 2.1	ค่าเฉลี่ยตัวประกอบเชิงมุมระหว่างคนนั่งกับสี่เหลี่ยมแนวตั้ง หรือแนวนอนเมื่อคนถูกหมุนตามแกนแนวตั้ง	19
รูปที่ 3.1	แสดงห้องทดลองและอุปกรณ์ประกอบห้องทดลอง .....	44
รูปที่ 3.2	เครื่องจ่ายลม (Wind Box) .....	47
รูปที่ 3.3	แสดงตำแหน่ง Probe วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ และตำแหน่งโต๊ะที่ผู้ร่วมทดลองนั่งทดลอง .....	48
รูปที่ 3.4	แสดงตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิผนัง .....	49
รูปที่ 3.5	แสดงตัวอย่างแบบสอบถามทั่วไป .....	56
รูปที่ 3.6	แสดงตัวอย่างแบบสอบถามเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมภายในห้องทดลอง..	57
รูปที่ 3.7	แสดงสรุปขั้นตอนการทดลอง .....	58
รูปที่ 3.8	แสดงตัวอย่างการปรับความเร็วลมในการทดลอง .....	58
รูปที่ 4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Thermal Sensation Vote กับค่า PMV ที่ความเร็วลม 0.10 0.25 0.90 1.64 1.74 1.94 และ 2.47 m/s .....	62
รูปที่ 4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Thermal Sensation Vote กับค่า PMV ที่ความเร็วลม 0.10 0.25 0.90 1.64 1.74 1.94 และ 2.47 m/s เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Tanabe .....	62
รูปที่ 4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Thermal Sensation Vote กับค่า ET* ที่ความเร็วลม 0.10 0.25 0.90 1.64 1.74 1.94 และ 2.47 m/s .....	64
รูปที่ 4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Thermal Sensation Vote กับค่า SET* ที่ความเร็วลม 0.10 0.25 0.90 1.64 1.74 1.94 และ 2.47 m/s .....	65
รูปที่ 4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Thermal Sensation Vote กับ ค่า Modified SET*ที่ความเร็วลม 0.10 0.25 0.90 1.64 1.74 1.94 และ 2.47 m/s .....	66
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Thermal Sensation Vote กับ ค่า Modified SET* และสมการถดถอย .....	67

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modified SET* กับ อุณหภูมิ ที่ $rh = 65\%$ $M = 1.2$ met $clo = 0.48$ $T_{mrt} = T_a$ ..... 68
รูปที่ 4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Percentage of Acceptability กับ ค่า Modified SET* ..... 69
รูปที่ 4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Percentage of Satisfied กับ ค่า Modified SET* ..... 70
รูปที่ 4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Percentage of Comfortable กับ ค่า Modified SET* ..... 71
รูปที่ 4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Percentage of not Draughty กับ ค่าความเร็วลม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ..... 72
รูปที่ 4.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Percentage of not Draughty กับ ค่าความเร็วลม ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ..... 72
รูปที่ 4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Percentage of Acceptable Air Velocity กับ ค่าความเร็วลม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ..... 73
รูปที่ 4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Percentage of Acceptable Air Velocity กับ ค่าความเร็วลม ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ..... 73
รูปที่ 4.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Preferred Air Velocity กับ ความชื้นสัมพัทธ์ ..... 75
รูปที่ 4.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Preferred Air Velocity กับ อุณหภูมิอากาศ ..... 76
รูปที่ 4.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Preferred Air Velocity กับ ความชื้นสัมพัทธ์ เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Tanabe ..... 76
รูปที่ 4.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Preferred Air Velocity กับ อุณหภูมิอากาศ เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Tanabe ..... 77
รูปที่ 4.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมที่สบาย กับ อุณหภูมิอากาศ ที่ความชื้น 50 60 70 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ที่ $M = 1.2$ met $clo\text{-value} = 0.48$ และ $T_{mrt} = T_a$ ..... 78



## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมที่สบาย กับ อุณหภูมิอากาศ ที่ความชื้น 50 60 70 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ที่ $M = 1.2 \text{ met}$ $\text{clo-value} = 0.48$ และ $T_{\text{mrt}} = T_a$ เปรียบเทียบกับค่า Preferred Air Velocity จากการทดลอง ค่า Preferred Air Velocity และค่าความเร็วลมที่แนะนำ จากงานวิจัยของ Tanabe .....	80
รูป ก1	แสดงตำแหน่งการวัดความเร็วลมเพื่อหาความเร็วลมเฉลี่ย .....	88
รูป ข1	กราฟแสดง calibration curve ของอุณหภูมิกะเปาะแห้ง .....	92
รูป ข2	กราฟแสดง calibration curve ของอุณหภูมิกะเปาะเปียก .....	93
รูป ข3	กราฟแสดง calibration curve ของ thermo-couple no.1 .....	94
รูป ข4	กราฟแสดง calibration curve ของ thermo-couple no.2 .....	95
รูป ข5	กราฟแสดง calibration curve ของ thermo-couple no.3 .....	96
รูป ข6	กราฟแสดง calibration curve ของ thermo-couple no.4 .....	97
รูป ข7	กราฟแสดง calibration curve ของ thermo-couple no.5 .....	98
รูป ข8	กราฟแสดง calibration curve ของ thermo-couple no.6 .....	99
รูป ข9	กราฟแสดง calibration curve ของ thermo-couple no.7 .....	100
รูป ข10	กราฟแสดง calibration curve ของ thermo-couple no.8 .....	101
รูป ข11	กราฟแสดง calibration curve ของ thermo-couple no.9 .....	102
รูป ค1	แสดงตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ .....	103
รูป ง1	แสดงตัวอย่างชุดแต่งกายผู้ร่วมทดลองเพศชาย .....	106
รูป ง2	แสดงตัวอย่างชุดแต่งกายผู้ร่วมทดลองเพศหญิง .....	107
รูป จ1	แสดงตำแหน่งที่วัดระดับความเข้มแสง .....	110
รูป ซ1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modified SET* และ อุณหภูมิอากาศ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์ ระดับกิจกรรม 1.2 met และความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้า 0.48 clo ที่ความเร็วลม 0.1-3.0 m/s .....	119
รูป ซ2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modified SET* และ อุณหภูมิอากาศ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์ ระดับกิจกรรม 1.2 met และความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้า 0.48 clo	



สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูป ช3	ที่ความเร็วลม 0.1-3.0 m/s ..... 120 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modified SET* และ อุณหภูมิอากาศ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ ระดับกิจกรรม 1.2 met และความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้า 0.48 clo ที่ความเร็วลม 0.1-3.0 m/s ..... 121
รูป ช4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modified SET* และ อุณหภูมิอากาศ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80 เปอร์เซ็นต์ ระดับกิจกรรม 1.2 met และความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้า 0.48 clo ที่ความเร็วลม 0.1-3.0 m/s ..... 122

## รายการสัญลักษณ์

2NM	คือ	แบบจำลอง 2 จุด (2-node model)
$A_D$	คือ	พื้นที่ผิวร่างกายเปลือย, $m^2$ (DuBois surface area of nude body)
$A_{eff}$	คือ	พื้นที่การไหลยังผล, ไร้มิติ (Effective flow area)
$A_r$	คือ	พื้นที่ยังผลของร่างกายที่เปล่งรังสีความร้อน, $m^2$ (Neutral radiation area of body)
BFN	คือ	อัตราการไหลเวียนปกติของเลือด, $L / (m^2 \cdot hr)$ (Neutral skin blood flow)
$c_{cr}$	คือ	ความจุความร้อนจำเพาะของแกนร่างกาย, $kJ / (kg \cdot K)$ (Specific heat of body core)
$c_{dil}$	คือ	ค่าคงที่สำหรับการไหลเวียนเลือด, ไร้มิติ (Constant for skin blood flow)
$c_{p,a}$	คือ	ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศที่หายใจเข้า, $kJ / (kg \cdot K)$ (Constant pressure specific heat of inhaled air)
$c_{p,bl}$	คือ	ความจุความร้อนจำเพาะของเลือด, $kJ / (kg \cdot K)$ (Constant pressure specific heat of blood)
$c_{sk}$	คือ	ความจุความร้อนจำเพาะของผิวหนัง, $kJ / (kg \cdot K)$ (Specific heat of skin)
$c_{sw}$	คือ	ค่าคงที่สำหรับการควบคุมเหงื่อ, $W / m^2$ (Proportionality constant flow sweat control)
C	คือ	การสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อน, $W / m^2$ (Convective heat loss)
$C_{res}$	คือ	การสูญเสียความร้อนสัมผัสจากการหายใจ, $W / m^2$ (Sensible respiratory heat loss)
$E_{dif}$	คือ	การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอที่แพร่ผ่านผิวหนัง, $W / m^2$ (Evaporative heat loss due to moisture diffusion through skin)

$E_{max}$	คือ	การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอน้ำมากที่สุด , $W / m^2$ (Maximum possible evaporative heat loss)
$E_{res}$	คือ	การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอน้ำจากการหายใจ , $W / m^2$ (Evaporative heat loss due to respiration)
$E_{rsw}$	คือ	การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอน้ำของเหงื่อ , $W / m^2$ (Evaporative heat loss due to regulatory sweating)
$E_{rsw,req}$	คือ	การสูญเสียความร้อนจากเหงื่อที่ต้องการเพื่อให้เกิดความสบายเชิงความร้อน , $W / m^2$ (Evaporative heat loss required for comfort)
$E_{sk}$	คือ	การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอน้ำที่ผิวหนัง , $W / m^2$ (Total evaporative heat loss from skin)
$ET^*$	คือ	อุณหภูมิยังผล , $^{\circ}C$ (Effective Temperature)
$f_{cl}$	คือ	สัดส่วนของพื้นที่ร่างกายซึ่งปกคลุมด้วยเสื้อผ้า , ไร้มิติ (Clothing area factor)
$F_{dA1-A2}$	คือ	ตัวประกอบเชิงมุมระหว่างเอलिเมนต์ย่อย $dA1$ กับระนาบ $A2$ (Angle factor from element $dA1$ to plane $A2$ )
$F_i$	คือ	Flux conduction transfer function
$F_{p-N}$	คือ	ตัวประกอบเชิงมุมระหว่างบุคคลกับพื้นผิวที่ $N$ , ไร้มิติ (Angle factor from person to surface $N$ )
$h$	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสัมผัสรวมทั้งที่ผิวหนัง , $W / (m^2 \cdot K)$ (Total sensible heat transfer at surface)
$h_c$	คือ	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน , $W / (m^2 \cdot K)$ (Convective heat transfer coefficient)
$h_{cl}$	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสัมผัสที่เสื้อผ้า , $W / (m^2 \cdot K)$ (Sensible heat transfer coefficient at clothing)
$h_e$	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแฝงที่เสื้อผ้า , $(W/m^2 \cdot kPa)$ (Evaporative heat transfer coefficient at clothing)
$h_{e,cl}$	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการกลายเป็นไอน้ำที่เสื้อผ้า , $W / (m^2 \cdot kPa)$ (Evaporative heat transfer coefficient at clothing)
$h_{fg}$	คือ	ความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอน้ำของน้ำ , $kJ / (kg \cdot K)$ (Heat of vaporization of water)

$h_r$	คือ	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน , $W / (m^2 \cdot K)$ (Radiative heat transfer coefficient)
$h'$	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสัมผัสทั้งหมด (รวมเสื้อผ้า) , $W / (m^2 \cdot K)$ (Overall sensible heat transfer coefficient including clothing)
$h'_e$	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแฝงทั้งหมด(รวมเสื้อผ้า) , $W / (m^2 \cdot kPa)$ (Overall evaporative heat transfer coefficient including clothing)
$h'_{es}$	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแฝงในสิ่งแวดล้อมมาตรฐาน , $W / (m^2 \cdot kPa)$ (Evaporative heat transfer coefficient in standard environment)
$h'_s$	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสัมผัสในสิ่งแวดล้อมมาตรฐาน , $W / (m^2 \cdot K)$ (Sensible heat transfer coefficient in standard environment)
$i_a$	คือ	ประสิทธิภาพการซึมของไอน้ำผ่านชั้นอากาศ , ไร้มิติ (Air layer vapor permeation efficiency)
$i_{cl}$	คือ	ประสิทธิภาพการซึมของไอน้ำผ่านเสื้อผ้า , ไร้มิติ (Clothing vapor permeation efficiency)
$I_{cl}$	คือ	ความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้าที่สวมใส่ , clo (Clothing insulation)
$I_{cls}$	คือ	ความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้าในสิ่งแวดล้อมมาตรฐาน , clo (Clothing insulation in standard environment)
$i_{sk}$	คือ	สัมประสิทธิ์การซึมของไอน้ำผ่านผิวหนัง , $kg / (s \cdot m^2 \cdot kPa)$
$K$	คือ	การนำความร้อนยังผลระหว่างแกนกลางของร่างกายกับผิวหนัง , $W / (m^2 \cdot K)$ (Effective conductance between core and skin)
$K_{res}$	คือ	ค่าคงที่ , $(kg \cdot m^2) / MJ$ (Proportionality constant)
$I$	คือ	ความสูงของผู้ทำการทดลอง , m (Height)
$L$	คือ	ภาระความร้อนที่ร่างกายได้รับ , $W / m^2$ (Thermal load on body)
$LR$	คือ	สัดส่วนของเลวิส , $^{\circ}C / kPa$ (Lewis ratio)
$m$	คือ	มวลของผู้ทำการทดลอง , $kg / m^2$ (Body mass)

$\dot{m}$	คือ	อัตราการไหลอากาศเชิงมวล , kg / s (Air mass flow rate)
$m_{bl}$	คือ	อัตราการไหลเวียนโลหิต , l / (m <sup>2</sup> ·hr) (Blood circulation between core and skin)
$m_{res}$	คือ	อัตราการระบายอากาศของปอด , kg / s (Pulmonary ventilation rate)
M	คือ	อัตราการเผาผลาญพลังงาน , W / m <sup>2</sup> (Metabolic rate)
$M_{shiv}$	คือ	อัตราการเผาผลาญพลังงานที่เกิดจากการสั่นของร่างกาย , W / m <sup>2</sup> (Metabolic Rte due to shivering)
$P_a$	คือ	ความดันไอน้ำในอากาศ , kPa (Water vapor pressure in ambient air)
$P_{atm}$	คือ	ความดันบรรยากาศ , kPa (Ambient pressure)
$P_{sk,s}$	คือ	ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิผิวหนัง , kPa (Saturated water vapor pressure at skin temperature)
$P_{so}$	คือ	Standard operative vapor pressure, kPa
$P_{SET,s}$	คือ	ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิ SET* , kPa (Saturated water vapor pressure at SET*)
PPD	คือ	Predicted percentage of Dissatisfied , ไร้มิติ
PMV	คือ	Predicted Mean Vote , ไร้มิติ
Q	คือ	ความร้อนที่ผลิตขึ้น , W / m <sup>2</sup> (Heat production)
$Q_{dry}$	คือ	การสูญเสียความร้อนสัมผัส , W / m <sup>2</sup> (Sensible heat loss)
$Q_{evap}$	คือ	การแลกเปลี่ยนความร้อนแฝง , W / m <sup>2</sup> (Latent heat loss from skin)
$Q_{res}$	คือ	การสูญเสียความร้อนผ่านกระบวนการหายใจ , W / m <sup>2</sup> (Heat loss due to respiration)
$Q_{sk}$	คือ	การสูญเสียความร้อนซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวหนัง , W / m <sup>2</sup> (Total heat loss from skin)

R	คือ	การสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อน , $W/m^2$ (Radiative heat loss)
$R_a$	คือ	ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของชั้นอากาศ , $(m^2 \cdot K) / W$ (Air layer thermal resistance)
$R_c$	คือ	ความต้านทานการพาความร้อน , $(m^2 \cdot K) / W$ (Convective resistance)
$R_{cl}$	คือ	ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของเสื้อผ้า , $(m^2 \cdot K) / W$ (Intrinsic clothing thermal resistance)
$R_{e,a}$	คือ	ความต้านทานต่อการกลายเป็นไอของชั้นอากาศ , $(m^2 \cdot kPa) / W$ (Evaporative resistance of air layer)
$R_{e,cl}$	คือ	ความต้านทานต่อการกลายเป็นไอของเสื้อผ้า , $(m^2 \cdot kPa) / W$ (Evaporative resistance of clothing)
$R_r$	คือ	ความต้านทานการแผ่รังสีความร้อน , $(m^2 \cdot K) / W$ (Radiative resistance)
rh	คือ	ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ , % (Relative air humidity)
S	คือ	ปริมาณความร้อนที่สะสมของร่างกาย , $W / m^2$ (Thermal heat storage)
$S_{cr}$	คือ	ปริมาณความร้อนที่สะสมในส่วนแกนกลางร่างกาย , $W / m^2$ (Thermal storage in core component)
$S_{sk}$	คือ	ปริมาณความร้อนที่สะสมอยู่ในส่วนของผิวหนัง , $W / m^2$ (Thermal storage in skin component)
SET*	คือ	อุณหภูมิยังผลมาตรฐาน, K (Standard effective temperature)
$t_a$	คือ	อุณหภูมิอากาศ , $^{\circ}C$ (Air temperature)
$t_b$	คือ	อุณหภูมิของร่างกาย , $^{\circ}C$ (Body temperature)
$t_{bset}$	คือ	อุณหภูมิของร่างกายที่กำหนด , $^{\circ}C$ (Assigned body temperature)
$t_{bc}$	คือ	อุณหภูมิขอบเขตล่างของเขตการระเหย , $^{\circ}C$

		(Lower limit of evaporative regulation zone)
$t_{cl}$	คือ	อุณหภูมิเสื้อผ้าเฉลี่ย , °C (Average clothing surface temperature)
$t_{cr}$	คือ	อุณหภูมิแกนกลางของร่างกาย , °C (Body core temperature)
$t_{ex}$	คือ	อุณหภูมิของอากาศที่หายใจออก , °C (Exhaled air temperature)
$t_{mb}$	คือ	อุณหภูมิร่างกายเฉลี่ย , °C (Mean body temperature)
$t_{mrt}$	คือ	อุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ย , °C (Mean radiant temperature)
$t_{pr}$	คือ	อุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนของระนาบ , °C (Plane radiant temperature)
$t_{sk}$	คือ	อุณหภูมิผิวหนัง , °C (Skin temperature)
$T_a$	คือ	อุณหภูมิอากาศ , K (Air temperature)
$T_{avg}$	คือ	อุณหภูมิเฉลี่ย , K (Average temperature)
$T_{cl}$	คือ	อุณหภูมิพื้นผิวเสื้อผ้าเฉลี่ย , K (Average clothing surface temperature)
$T_{cr}$	คือ	อุณหภูมิแกนกลางของร่างกาย , K (Body core temperature)
$T_{mrt}$	คือ	อุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย , K (Mean radiant temperature)
$T_N$	คือ	อุณหภูมิพื้นผิวที่ N , K (Temperature at surface N)
$T_O$	คือ	Operative temperature , K
$T_{sk,req}$	คือ	ค่าอุณหภูมิผิวหนังที่ต้องการเพื่อทำให้เกิดความสบายเชิง ความร้อน , K (Skin temperature required for comfort)
$v$	คือ	ความเร็วอากาศ , m / s



		(Air velocity)
$v_r$	คือ	ความเร็วอากาศสัมพัทธ์ , m /s
		(Relative air velocity)
$w$	คือ	ความเปียกชื้นที่ผิวหนัง , ไร้มิติ
		(Skin wettedness)
$w_{dif}$	คือ	ความเปียกชื้นที่เกิดจากการแพร่ , ไร้มิติ
		(Skin wettedness due to diffusion)
$w_{rsw}$	คือ	ความเปียกชื้นที่ผิวหนังอันเกิดจากเหงื่อ , ไร้มิติ
		(Skin wettedness due to regulatory sweat)
$W_a$	คือ	สัดส่วนความชื้นของอากาศที่หายใจเข้า , Kg ( H <sub>2</sub> O ) / kg ( dry air )
		(Humidity ratio of inhaled air)
$W_{ex}$	คือ	สัดส่วนความชื้นของอากาศที่หายใจออก , kg ( H <sub>2</sub> o ) / kg ( dry air )
		(Humidity ratio of exhaled air)
$W$	คือ	งานภายนอก , W / m <sup>2</sup>
		(External work)
$W_{cr}$	คือ	มวลของแกนร่างกายต่อพื้นที่ผิวหนัง , kg / m <sup>2</sup>
		(Mass of body core)
$W_{sk}$	คือ	มวลต่อพื้นที่ของผิวหนัง , kg / m <sup>2</sup>
		(Mass of skin)
$\alpha$	คือ	สัดส่วนมวลผิวหนังต่อมวลร่างกาย , ไร้มิติ
		(Fraction of total body mass)
$\epsilon$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน , ไร้มิติ
		(Emissivity)
$\sigma$	คือ	ค่าคงที่ของ stefan-Boltzman , W / (m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> )
		(Stefan-Boltzman constant)
$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของอากาศ , kg / m <sup>3</sup>
		(Air density)
$\theta$	คือ	เวลา , s

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนชื้นมีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั้งปีประมาณ  $29.55^{\circ}\text{C}$  (อุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิต่ำสุดในแต่ละวันมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง  $28-37^{\circ}\text{C}$  และ  $17-29^{\circ}\text{C}$ ) ส่วนความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยตลอดทั้งปีมีค่าประมาณ 67.45 เปอร์เซ็นต์ (ความชื้นสัมพัทธ์สูงสุดและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุดในแต่ละวันมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 71 ถึง 98 เปอร์เซ็นต์ และ 22 ถึง 75 เปอร์เซ็นต์) และเมื่อนำทั้งอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์รายชั่วโมงตลอดทั้งปีมาพิจารณาถึงภาวะสบายเชิงความร้อน (Thermal Comfort) โดยทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐานภาวะสบายเชิงความร้อนของ ASHRAE (ASHRAE Standard 55, 1992) พบว่าอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์รายชั่วโมงประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ไม่อยู่ในโซนภาวะสบาย (Comfort Zone)

เมื่อทำการศึกษาค้นคว้าพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับภาวะสบายเชิงความร้อนจากเอกสาร และงานวิจัยต่าง ๆ ในอดีตที่ผ่านมา (Fanger, 1970; ASHRAE Standard 55, 1992; ASHRAE Handbook Fundamentals, 1997) พบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อภาวะสบายเชิงความร้อนประกอบด้วยตัวแปร 2 ส่วน คือ ตัวแปรบุคคล (Personal Parameter) และตัวแปรสภาวะแวดล้อม (Environmental Parameter) โดยที่ตัวแปรบุคคลประกอบด้วยตัวแปรต่าง ๆ 3 ค่า คือ อัตราการเผาผลาญพลังงาน (Metabolic Rate, M) งานภายนอกที่ทำ (External Work, W) และความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้า (clo-value,  $I_{cl}$ ) ส่วนตัวแปรสภาวะแวดล้อมประกอบด้วยตัวแปรต่าง ๆ 4 ค่า คือ อุณหภูมิอากาศ (Air Temperature,  $t_a$ ) ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, %rh) อุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ย (Mean Radiant Temperature,  $t_{mr}$ ) และความเร็วลม (Air Velocity, v)

ดังนั้นถ้าต้องการควบคุมภาวะสบายเชิงความร้อนอยู่ในช่วงที่เกิดความสบาย จำเป็นที่จะต้องควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ทั้ง 7 ค่า ที่กล่าวมาข้างต้นให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งตัวแปรสามตัวแรกนั้นเป็นตัวแปรเฉพาะบุคคล (Personal Parameter) ไม่สามารถทำการควบคุมได้เนื่องจากตัวแปรดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับแต่ละบุคคล แต่สำหรับตัวแปรสภาวะแวดล้อมนั้นสามารถที่จะควบคุมได้ด้วยวิธีการควบคุมแต่ละตัวแปร ดังนี้

1. การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้อง สามารถควบคุมได้ด้วยการติดตั้งเครื่องปรับอากาศ

2. การควบคุมอุณหภูมิรังสีความร้อนเฉลี่ย สามารถควบคุมได้ด้วยการลดการถ่ายเทความร้อนจากแสงอาทิตย์มายังคน ซึ่งมีหลายวิธี เช่นการใช้อุปกรณ์บังเงากับหน้าต่างของอาคาร การใช้กระจกที่มีคุณสมบัติลดรังสีความร้อนจากแสงอาทิตย์ การใช้วัสดุผนังภายนอกที่มีความเป็นฉนวนสูง เป็นต้น

3. การควบคุมความเร็วลม สามารถควบคุมได้ด้วยการติดตั้งพัดลมภายในห้อง

การควบคุมตัวแปรสภาวะแวดล้อมด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นมีค่าใช้จ่ายที่แตกต่างกันทั้งในส่วนของการติดตั้งอุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ และเมื่อพิจารณาบ้านแต่ละหลังในประเทศไทยพบว่าส่วนใหญ่ไม่มีการติดตั้งเครื่องปรับอากาศ แต่มีการติดตั้งพัดลมไว้เพื่อสร้างภาวะสบายเชิงความร้อนให้แก่ผู้อยู่อาศัย ดังนั้นการเพิ่มความเร็วลมด้วยพัดลม ซึ่งมีค่าใช้จ่ายน้อย จึงน่าจะเป็นวิธีการที่มีความเหมาะสมที่จะช่วยเพิ่มภาวะสบายเชิงความร้อนของคนไทย

จากแนวทางการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในเครื่องปรับอากาศของสำนักงานนโยบายพลังงาน กระทรวงพลังงาน แนะนำว่า “ ถ้าตั้งค่าอุณหภูมิของเทอร์โมสตัทเพิ่มขึ้น  $1^{\circ}\text{C}$  จะทำให้เครื่องปรับอากาศประหยัดพลังงานได้ร้อยละ 10” และ ถ้าหากประชาชนที่ใช้เครื่องปรับอากาศขนาด 12,000 BTUH (1 ตัน) ปรับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $1^{\circ}\text{C}$  จาก  $24^{\circ}\text{C}$  ไปเป็น  $25^{\circ}\text{C}$  คิดว่าเครื่องปรับอากาศใช้งานประมาณวัน 8 ชั่วโมง จะประหยัดได้ 2 บาทต่อวันต่อครัวเรือน หรือประหยัดค่าไฟได้ 60 บาทต่อเดือนต่อครัวเรือน คิดเป็น 720 บาทต่อปีต่อครัวเรือน หากผู้ใช้เครื่องปรับอากาศจำนวนประมาณ 1.6 ล้านเครื่องทั่วประเทศทำตาม จะประหยัดเงินได้อย่างน้อย 96 ล้านบาทต่อเดือน หรือคิดเป็น 1,152 ล้านบาทต่อปี<sup>1</sup>

ดังนั้น ถ้าเราสร้างภาวะสบายเชิงความร้อนด้วยการเพิ่มความเร็วลมแทนการลดอุณหภูมิอากาศด้วยเครื่องปรับอากาศได้จะช่วยให้ประเทศชาติประหยัดเงินได้อย่างมาก และประกอบกับการศึกษาในเรื่องผลของความเร็วลมต่อภาวะสบายเชิงความร้อนไม่เคยมีมาก่อนในประเทศไทย จึงทำให้นักวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงผลของความเร็วลมต่อภาวะสบายเชิงความร้อนของคนไทย

<sup>1</sup> ข้อมูลจาก [www.eppo.go.th](http://www.eppo.go.th)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลของความเร็วลมต่อภาวะสบายเชิงความร้อนด้วยวิธีการทดลอง วัตถุประสงค์ของงานวิจัยสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. ทำการทดลองเพื่อหาผลของความเร็วลมที่มีต่อภาวะสบายเชิงความร้อนของคนไทย
2. ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองในรูปของดัชนีภาวะสบายเชิงความร้อนแบบต่างๆ และศึกษาหาค่าดัชนีภาวะสบายเชิงความร้อนที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำนายค่าความสบายเชิงความร้อนของคนไทย โดยเฉพาะเมื่อความเร็วลมเป็นปัจจัยสำคัญ
3. ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทดลอง หรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่น ๆ ที่มีอยู่ เพื่อหาค่าความเบี่ยงเบนที่อาจมี

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองในห้องทดลองที่สร้างขึ้น โดยมีเงื่อนไขและขอบเขต ดังนี้

### 1.3.1 ผู้ร่วมทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองที่ห้องทดลองที่ตั้งอยู่ที่ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังนั้น ผู้เข้าร่วมทดลองส่วนใหญ่จึงเป็นนักศึกษาอาสาสมัคร โดยมีคุณสมบัติของผู้ร่วมทดลอง ดังนี้

1. เป็นผู้ที่อาศัยอยู่ในกรุงเทพมหานคร
2. มีอายุประมาณ 17 ถึง 30 ปี
3. มีสภาพร่างกายปกติ
  - ไม่เจ็บไข้
  - ก่อนการทดลอง ได้รับประทานอาหารปกติ (ไม่มีรสเผ็ดจัด หรือเป็นอาหารที่อาจมีผลทำให้ท้องเสีย หรือปวดท้องในระหว่างทำการทดลอง) มีการทำงานอย่างปกติ และมีการนอนหลับพักผ่อนอย่างพอเพียง

### 1.3.2 การทดลอง

ผู้ร่วมทดลองจะสวมใส่เสื้อผ้าที่ค่าความต้านทานความร้อน 0.48 clo มีการทำกิจกรรมที่คล้ายคลึงกับการทำงานในสำนักงาน (มีค่าระดับกิจกรรมประมาณ 1.2 met) โดยจะทำการทดลองภายใต้เงื่อนไข ดังนี้

1. อุณหภูมิภายในห้องประมาณ 26, 28, 30 และ 32 °C
2. ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในห้องประมาณ 50, 60, 70 และ 80 เปอร์เซ็นต์
3. อุณหภูมิแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ย ( $t_{mr}$ ) เท่ากับอุณหภูมิห้อง ( $t_a$ )
4. ความเร็วอากาศภายในห้องทดลอง 0.10, 0.25, 0.90, 1.64, 1.74, 1.94 และ 2.47 m/s

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัย

ผลจากการวิจัยนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อส่วนรวมในเรื่องที่เกี่ยวกับภาวะสบายเชิงความร้อนของคนไทย ดังนี้

1. ได้ทราบถึงผลของความเร็วมต่อภาวะสบายเชิงความร้อนของคนไทย ซึ่งสามารถนำพื้นฐานความรู้นี้ไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบงานระบบทางวิศวกรรมที่ทำให้เกิดภาวะสบายเชิงความร้อน โดยพิจารณาถึงความเร็วมเป็นปัจจัยสำคัญ
2. ได้ทราบว่าดัชนีภาวะสบายเชิงความร้อนค่าใดมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ทำนายค่าภาวะสบายเชิงความร้อนของคนไทยโดยเฉพาะ เมื่อมีความเร็วมเป็นปัจจัยสำคัญ

#### 1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาเอกสาร และผลงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา พบว่าในต่างประเทศมีการศึกษาวิจัยในหัวข้อที่เกี่ยวกับภาวะสบายเชิงความร้อนมาเป็นระยะเวลาหลายสิบปีแล้ว โดยมีการศึกษาวิจัยในหลายแง่มุมที่เกี่ยวกับภาวะสบายเชิงความร้อน เช่น ศึกษาถึงผลของตัวแปรหลักทั้ง 7 ค่าต่อภาวะสบายเชิงความร้อน ดัชนีชี้วัดภาวะความร้อนที่เหมาะสม และความคุ้นเคยต่อสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันของคนในแต่ละประเทศ เป็นต้น ในส่วนของงานวิจัยที่ศึกษาถึงผลของความเร็วมต่อภาวะสบายเชิงความร้อน ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับงานวิจัยนี้พอสรุปได้ ดังนี้

##### 1.5.1 งานวิจัยเรื่อง Ceiling Fans as Extenders of The Summer Comfort Envelope

ในปี ค.ศ. 1983 Rohles และคณะ (Rohles F.H. et al ,1983) ได้ทำการศึกษาถึงความสามารถของพัสดลมแบบติดผ้าพาดานในการขยายช่วงภาวะสบายเชิงความร้อนในฤดูร้อน โดยทำการทดลองภายใต้เงื่อนไข ขอบเขต และวิธีการ ดังนี้

1. ผู้ร่วมทดลองมีคุณสมบัติ ดังนี้

- 1) ผู้ร่วมทดลองจำนวน 256 คน เป็นชาย 128 และหญิง 128 คน
- 2) ผู้ร่วมทดลองอายุระหว่าง 18 ถึง 22 ปี
- 3) ผู้ร่วมทดลองเป็นผู้ที่อาศัยอยู่ในประเทศสหรัฐอเมริกา ก่อนการทดลองอย่างน้อยเป็นเวลา 6 เดือน
- 4) ผู้ร่วมทดลองทุกคนเป็นผู้ที่มีสุขภาพดี ไม่ป่วยไข้
- 5) ขณะทดลองผู้ร่วมทดลองสวมใส่เสื้อผ้าที่มีค่าความต้านทานความร้อน 0.5 clo

2. ขอบเขตการทดลอง ดังนี้

- 1) ทดลองที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ 24, 26, 28 และ 29 °C ( $ET^{*2}$ )
- 2) ทดลองที่ความเร็วลมปรับเปลี่ยน 5 ความเร็วลม คือ 0.06 (ไม่เปิดพัดลม), 0.15, 0.25, 0.46 และ 1.02 m/s

3. วิธีการทดลอง ดังนี้

- 1) การทดลองใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง
- 2) ในขณะที่ทำการทดลองผู้ร่วมทดลองจะนั่งอ่านหนังสือที่โต๊ะที่จัดไว้ให้ ซึ่งจะมีค่ากิจกรรมประมาณ 1.0 met
- 3) ช่วงชั่วโมงแรกของการทดลองจะไม่มีเปิดพัดลม (ความเร็วลมประมาณ 0.06 m/s)
- 4) สองชั่วโมงต่อมา แบ่งเป็น 4 ช่วงเวลา ช่วงเวลาละ 30 นาที ผู้ร่วมทดลองจะได้รับความเร็วลมแบบสุ่ม 4 ความเร็วลม ตามที่กล่าวมาข้างต้น
- 5) ในระหว่างการทดลองผู้ร่วมทดลองจะถูกขอให้กรอกแบบสอบถามที่เกี่ยวกับความรู้สึกต่อสภาวะแวดล้อมก่อนที่จะมีการเปลี่ยนความเร็วลมทุกครั้ง

---

<sup>2</sup>ET\* คือ อุณหภูมิยังผล (Effective Temperature) เป็นตัวแปรที่ได้จากการคำนวณถึงผลของ อุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ย และความชื้นสัมพัทธ์ โดยรายละเอียดการคำนวณแสดงในบทที่ 2



จากการทดลองภายใต้เงื่อนไข ขอบเขต และวิธีการ ตามที่กล่าวมาข้างต้น Rohles และคณะ ได้วิเคราะห์ผลการทดลอง และสรุปว่า ที่อุณหภูมิ 26, 28 และ 29 °C (ET\*) ถ้ามีความเร็วลม 0.15, 0.25 และ 0.46 m/s ตามลำดับ ผู้ทดลองจะมีความรู้สึกต่อภาวะสบายเชิงความร้อนใกล้เคียงกับผู้ทดลองที่อุณหภูมิ 24 °C (ET\*) ที่ไม่มีการเปิดพัดลม

### 1.5.2 งานวิจัยเรื่อง The Use of Oscillating Fan to Extend The Summer Comfort Envelope in Hot Arid Climates

ในปี ค.ศ. 1989 Wu (Wu H., 1989) ได้ทำการศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่าความเร็วลมจากการติดตั้งพัดลมแบบผ้าเพดานจะช่วยขยายช่วงอุณหภูมิสบายของภาวะสบายเชิงความร้อน

เนื่องจากการติดตั้งพัดลมแบบติดผ้าเพดานจะช่วยเพิ่มความเร็วลมภายในห้อง ซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อภาวะสบายเชิงความร้อน แต่ถ้ามาพิจารณาการติดตั้งพัดลมแบบส่ายซึ่งช่วยทั้งเพิ่มความเร็วลม และมีการเปลี่ยนทิศทางของลมด้วย ไม่มีใครทราบว่าจะมีผลอย่างไรต่อภาวะสบายเชิงความร้อน ดังนั้น Wu จึงทำการศึกษาถึงผลของการใช้พัดลมแบบส่าย เพื่อช่วยขยายช่วงของภาวะสบายเชิงความร้อนในฤดูร้อนภายใต้สภาวะอากาศร้อนความชื้นต่ำ โดยทำการทดลองภายใต้เงื่อนไข ขอบเขต และวิธีการ ดังนี้

#### 1. รายละเอียดห้องทดลอง ดังนี้

- 1) ขนาดกว้าง 4.62 เมตร ยาว 4.36 เมตร และสูง 3.05 เมตร
- 2) ในห้องทดลองมีโต๊ะ 4 ชุด แต่ละชุดมีการจัดวางในตำแหน่งที่ได้รับการออกแบบให้ความเร็วลมมีความสัมพันธ์กับความถี่ของการส่ายของพัดลมและแต่ละตำแหน่งที่นี้มีความเร็วลมต่างกัน คือ 0.26, 0.51, 1.02 และ 1.52 m/s
- 3) จ่ายลมด้วยหัวจ่ายลมที่ผ้าที่ขอบผนังทิศเหนือ และทิศใต้ และลมกลับที่แผงลมกลับที่ผนังด้านทิศตะวันออก

#### 2. ผู้ร่วมทดลองมีคุณสมบัติ ดังนี้

- 1) ผู้ร่วมทดลองเป็นนักศึกษามหาวิทยาลัย
- 2) ผู้ร่วมทดลองอายุระหว่าง 20 ถึง 30 ปี
- 3) ผู้ร่วมทดลองจำนวน 93 คน
- 4) ผู้ร่วมทดลองสวมใส่เสื้อผ้าที่มีความต้านทานความร้อนรวมสำหรับเพศชาย 0.5 clo และเพศหญิง 0.4 clo

#### 3. ขอบเขตการทดลอง ดังนี้



- 1) ทดลองที่สภาวะอากาศภายในห้อง 3 ค่า คือ
  - อุณหภูมิ 32 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 71 เปอร์เซ็นต์
  - อุณหภูมิ 31 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์
  - อุณหภูมิ 33 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 30 เปอร์เซ็นต์
- 2) คาบของการแกว่งของพัดลม 7 วินาที และ 14 วินาที
- 3) ความเร็วลมที่ทดลองมีค่าประมาณ 0.06, 0.26, 0.51, 1.02 และ 1.52 m/s

#### 4. วิธีการทดลอง ดังนี้

- 1) การทดลองใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง 25 นาที
- 2) การทดลองช่วง 25 นาทีแรก จะไม่เปิดพัดลม ความเร็วลม คือ ความเร็วของลมที่ได้จากเครื่องปรับอากาศ (ความเร็วลมประมาณ 0.06 m/s)
- 3) ใน 2 ชั่วโมงต่อมา ผู้ทดลองจะสลับที่นั่งตามโต๊ะทดลอง 4 ชุด โดยใช้เวลาดทดลองที่แต่ละโต๊ะทดลอง 30 นาที
- 4) ในช่วงเวลา 5 นาทีท้ายของแต่ละช่วงการทดลอง ผู้ร่วมทดลองถูกขอให้กรอกแบบสอบถามที่แสดงความรู้สึกทางความร้อน

จากการทดลองภายใต้เงื่อนไข ขอบเขต และวิธีการ ตามที่กล่าวมาข้างต้น Wu ได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง และสรุปผล ดังนี้

1. จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิสูงถึง 33 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 30 เปอร์เซ็นต์ ผู้ร่วมทดลองยังรู้สึกสบายด้วยการใช้พัดลมแบบสายที่ความเร็วลม 1.52 m/s
2. ที่ความเร็วลมน้อยกว่า 1.02 m/s ความถี่ของการสายของพัดลมไม่มีผลต่อภาวะสบายเชิงความร้อน

#### 1.5.3 Importance of Air Movement for Thermal Comfort under Hot and Humid Condition

ในปี ค.ศ. 1989 Tanabe S. และ Kimura K. (Tanabe S. and K. Kimura, 1989) ได้ทำการศึกษาถึงการเพิ่มความเร็วลมจะมีผลอย่างไรต่อภาวะสบายเชิงความร้อน โดยทำการศึกษาในหัวข้อ “ความสำคัญของการเคลื่อนที่ของลมต่อภาวะสบายเชิงความร้อนภายใต้เงื่อนไขอากาศร้อนชื้น” ด้วยการทดลองภายใต้ เงื่อนไข ขอบเขต และวิธีการ ดังนี้

1. รายละเอียดห้องทดลองมี ดังนี้

- 1) ปรับเปลี่ยนความเร็วลมด้วย Wind Box โดยมีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 0.13 ถึง 1.63 m/s
  - 2) คุณหมึกการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยเท่ากับคุณหมึกห้อง
2. ผู้ร่วมทดลองมีคุณสมบัติ ดังนี้
- 1) นักศึกษามหาวิทยาลัย
  - 2) จำนวน 64 คน เป็นชาย 32 คน และหญิง 32 คน
  - 3) ผู้ร่วมทดลองสวมใส่เสื้อผ้าที่มีความต้านทานความร้อนรวม 0.5 clo
  - 4) ผู้ร่วมทดลองนั่งอ่านหนังสือในขณะที่ทดลอง (มีกิจกรรมประมาณ 1 met)
3. ขอบเขตการทดลอง ดังนี้
- 1) ทดลองที่สภาวะอากาศภายในห้อง ดังนี้
    - อุณหภูมิ 27.8 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์
    - อุณหภูมิ 29.6 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์
    - อุณหภูมิ 28.8 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 80 เปอร์เซ็นต์
    - อุณหภูมิ 31.1 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์
  - 2) ทดลองที่ความเร็วอากาศ 0.13, 0.44, 0.71, 1.03, 1.34 และ 1.63 m/s
  - 3) ห้องทดลองตั้งอยู่ที่เมืองโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น
  - 4) ทำการทดลองในช่วงเวลาเดียวกันของทุกวัน คือ 12:00-15:00 น. และ 16:30-19:30 น. ในช่วงฤดูร้อน ของปี ค.ศ. 1986
4. วิธีการทดลอง ดังนี้
- 1) การทดลองใช้เวลา 3 ชั่วโมง
  - 2) ในช่วงชั่วโมงแรกของการทดลอง ความเร็วลมในห้องทดลองจะมีค่าคงที่ 0.13 m/s
  - 3) ใน 5 ช่วงเวลาต่อมา (ช่วงเวลาระยะ 20 นาที) ความเร็วลมของแต่ละช่วงจะแตกต่างกันอย่างสุ่ม (0.44, 0.71, 1.03, 1.34 และ 1.63 m/s) โดยในช่วงเวลานี้ผู้ร่วมทดลองจะถูกขอให้กรอกแบบสอบถามที่แสดงความรู้สึกทางด้านความร้อนทุก ๆ 5 นาที
  - 4) ในช่วงเวลา 20 นาที สุดท้ายของการทดลอง ผู้ทดลองจะถูกขอให้แสดงความรู้สึกต่อความเร็วลมว่า “ สูงไป ” หรือ “ ต่ำไป ” หรือ “ พอดี ” ในทุก ๆ 2 นาที ถ้าไม่พอดีจะทำการเปลี่ยนความเร็วอากาศไปเรื่อย ๆ จนผู้ร่วมทดลองตอบว่า “ พอดี ” มากกว่า 3 ครั้ง และจะใช้ความเร็วอากาศที่ผู้ร่วมทดลองตอบว่า “ พอดี ” คงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาของการทดลองที่เหลือ

จากการทดลองภายใต้เงื่อนไข ขอบเขต และวิธีการ ตามที่กล่าวมาข้างต้น Tanabe และคณะ ได้ทำการวิเคราะห์ และสรุปผล ดังนี้

1. ที่ความเร็วลมมากกว่า 0.5 m/s ผลของความเร็วลมต่อความรู้สึกทางความร้อนจากการทดลองจะมีมากกว่าการทำนายจากการคำนวณด้วยสมการ PMV ของ Fanger
2. ที่สภาวะอากาศแบบร้อนชื้นความเร็วลมทำให้ผู้ร่วมทดลองรู้สึกรำคาญน้อยกว่าในสภาวะอากาศปกติ

#### 1.5.4 Locally Controlled Air Movement Preferred in Warm Isothermal Environments

ในปี ค.ศ. 1994 Fountain และคณะ (Fountain M. et al , 1994 ) ได้ทำการศึกษาถึงผลของความเร็วลมที่มีต่อความพึงพอใจในสภาวะอากาศอบอุ่น โดยทำการวิจัยในหัวข้อเรื่อง “การควบคุมความเร็วลมที่น่าพึงพอใจในสภาวะแวดล้อมที่อบอุ่น” ด้วยการทดลองภายใต้เงื่อนไข ขอบเขต และวิธีการ ดังนี้

1. รายละเอียดห้องทดลองมี ดังนี้
  - 1) ขนาดกว้าง 5.40 เมตร ยาว 5.40 เมตร และสูง 2.40 เมตร
  - 2) มีการควบคุมความเร็วลมด้วยการจ่ายลมที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังนี้
    - พัดลมตั้งโต๊ะ
    - หัวจ่ายที่พื้น
    - หัวจ่ายที่ระดับโต๊ะ
  - 3) อุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยเท่ากับอุณหภูมิห้อง
2. ผู้ร่วมทดลองมีคุณสมบัติ ดังนี้
  - 1) ผู้ร่วมทดลองจำนวน 54 คน ชาย 32 คน และหญิง 22 คน
  - 2) ผู้ร่วมทดลองอายุ 20-40 ปี
  - 3) ผู้ร่วมทดลองสูงระหว่าง 1.50-1.73 เมตร
  - 4) ผู้ร่วมทดลองน้ำหนัก 56.8-79.5 กก.
  - 5) ผู้ร่วมทดลองสวมใส่เสื้อผ้าที่มีความต้านทานความร้อนรวม 0.5-0.6 clo
3. ขอบเขตการทดลอง ดังนี้
  - 1) ทดลองที่อุณหภูมิห้อง 25 26 27 และ 28 °C
  - 2) ทดลองที่ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์

- 3) ความเร็วลมปรับเปลี่ยน และจ่ายลมจาก 3 จุด คือ พัดลมตั้งโต๊ะ (0.07-1.95 m/s) หัวจ่ายที่พื้น (0.05-0.57m/s) และหัวจ่ายที่ระดับโต๊ะ (0.05-0.20 m/s)

#### 4. วิธีการทดลองมี ดังนี้

- 1) ในระหว่างการทดลองจะมีการควบคุมอุณหภูมิห้องให้คงที่
- 2) ในระหว่างการทดลองผู้ทดลองแต่ละคนจะนั่งที่โต๊ะที่จัดไว้ให้ ซึ่งจะมีการจ่ายลมจากแหล่งจ่ายลมทั้ง 3 จุดตามที่กล่าวมาข้างต้น
- 3) การทดลองจะแบ่งเป็น 3 ช่วงเวลา (ใช้เวลาระหว่างละ 45 นาที) โดยแต่ละช่วงการทดลองผู้ร่วมทดลองจะได้รับการจ่ายลมจากแหล่งจ่ายที่ต่างกัน 3 จุดตามที่กล่าวมาข้างต้นอย่างสลับ
- 4) ในแต่ละช่วงผู้ร่วมทดลองจะทำการปรับความเร็วลมด้วยตนเองตามความพึงพอใจ และแต่ละช่วงการทดลองผู้ร่วมทดลองจะถูกขอให้กรอกแบบสอบถามที่เกี่ยวกับความรู้สึกต่อภาวะสบายเชิงความร้อน

จากการทดลองภายใต้เงื่อนไข ขอบเขต และวิธีการ ตามที่กล่าวมาข้างต้น Fountain และคณะ ได้ทำการวิเคราะห์หาค่า และนำเสนอสมการเพื่อใช้ทำนายค่าความพึงพอใจของคน (PS model) ที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิห้องและความเร็วลมในสภาวะที่อากาศอบอุ่น ดังแสดงในสมการ 1.1

$$PS = 1.13T_o^{0.5} - 0.24 T_o + 2.7 v^{0.5} - 0.99 v \quad (1.1)$$

เมื่อ PS คือ เปอร์เซ็นต์ของความพึงพอใจ , ( % )

$T_o$  คือ Operative Temperature , ( °C )

$v$  คือ ความเร็วลมภายในห้อง , ( m/s )

#### 1.5.5 Effects of Air Temperature, Humidity, and Air Movement on Thermal Comfort Under Hot and Humid Conditions

ในปี ค.ศ. 1994 Tanabe S. และ Kimura K. (Tanabe S. and K. Kimura, 1994) ได้รวบรวมงานผลงานวิจัยของเขาที่เกี่ยวข้องกับ ผลของอุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และการเคลื่อนที่ของอากาศที่มีผลต่อภาวะสบายเชิงความร้อนในสภาวะอากาศร้อนชื้น เสนอบทความทางวิชาการในวารสาร ASHRAE Transactions ซึ่งมีผลบางส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้สรุปได้ดังนี้

1. สมการ PMV ของ Fanger ไม่สามารถทำนายภาวะสบายเชิงความร้อนในสภาวะความเร็วลมสูงได้อย่างถูกต้อง

2. ความเร็วลมที่พึงพอใจ (Preferred Air Velocity) ที่ได้จากการทดลองที่ 4 สภาวะอากาศกับผู้ร่วมทดลองสภาวะอากาศละ 16 คน (ชาย 8 คน และหญิง 8 คน) มีค่าดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 Preferred Air Velocity (จากงานวิจัยของ Tanabe)

	Female (m/s)	Male (m/s)	Female and Male(m/s)
27.8 °C , 50 %rh	1.0	1.0	1.0
29.6 °C , 50 %rh	1.4	1.1	1.2
28.8 °C , 80 %rh	1.5	1.3	1.4
31.3 °C , 50 %rh	1.5	1.7	1.6

3. จากการทดลองกับหุ่นจำลองมนุษย์ถึงผลของความเร็วลมต่อค่าความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้า (clo-value,  $I_{cl}$ ) พบว่า ค่าความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้าจะมีค่าลดลงเมื่อความเร็วลมสูงขึ้น โดยความสัมพันธ์ที่เป็นฟังก์ชันกับความเร็วลม ดังนี้

$$I_{cl} = 0.3846 - 0.1229 \cdot \log(v) \quad (1.2)$$

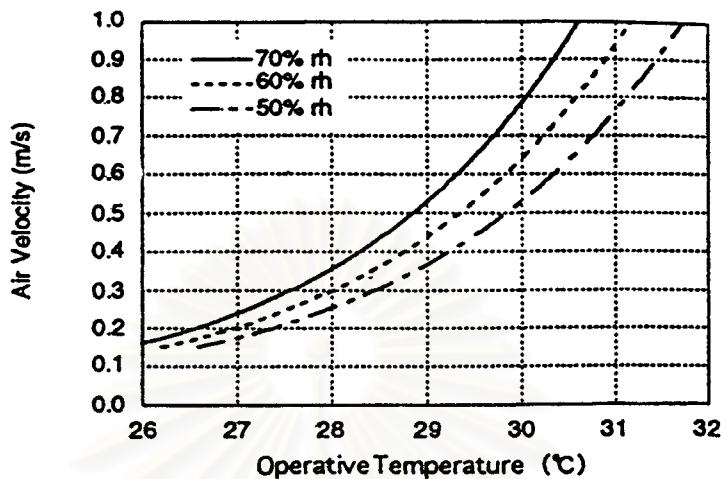
เมื่อ  $I_{cl}$  คือ ค่าความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้าที่สวมใส่, (clo)

$v$  คือ ความเร็วลม, (m/s)

หมายเหตุ : ค่า clo-value ของเสื้อผ้าที่ใช้ทดลองคือ 0.5 ทดลองที่อุณหภูมิ 27 °C

4. จากการทดลองถึงผลของความเร็วลมต่อค่าความเปียกชื้นของผิวหนัง (Skin Wettedness) โดยทดลองที่ความเร็วลม 1.0 m/s ความชื้นสัมพัทธ์ 50 % ค่าความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้า 0.6 clo ระดับกิจกรรม 1.0 met และอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ อุณหภูมิอากาศ พบว่าค่าความเปียกชื้นของผิวหนังที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ SET\* คือ อุณหภูมิอากาศ 27 °C จากการทดลองมีค่าความเปียกชื้นของผิวหนังเท่ากับ 0.028 จากการคำนวณด้วยสมการ SET\* มีค่าเท่ากับ 0.06 และ อุณหภูมิอากาศ 29 °C จากการทดลองมีค่าความเปียกชื้นของผิวหนังเท่ากับ 0.076 จากการคำนวณด้วยสมการ SET\* มีค่าเท่ากับ 0.112

5. ความเร็วลมที่เหมาะสมภายใต้สภาวะอากาศร้อนชื้น แสดงในรูปที่ 1.1 โดยความเร็วลมที่แนะนำนี้จะทำให้รู้สึกร้อนเล็กน้อย



รูปที่ 1.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมที่แนะนำกับค่า Operative Temperature



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและแนวคิดเกี่ยวกับภาวะสบายเชิงความร้อน

การดำรงชีวิตของมนุษย์ในปัจจุบันมีหลักที่ช่วยให้เกิดความพึงพอใจที่มนุษย์ต้องการ นั่นคือ การมีพฤติกรรมการดำเนินชีวิตควบคู่กับ “ ความสุขสบาย ” โดยเฉพาะการใช้ชีวิตอยู่ในพื้นที่วงจำกัดเป็นเวลานาน เช่น การอยู่ในห้องนั่งเล่นที่บ้าน การเรียนในห้องเรียน การทำงานในห้องที่สำนักงาน การดูหนังในโรงภาพยนตร์ เป็นต้น ดังนั้นความสุขสบายของมนุษย์จึงขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมที่มนุษย์อยู่อาศัย เช่น ระดับความเข้มแสง ระดับเสียง กลิ่น คุณภาพอากาศ และภาวะสบายเชิงความร้อน (Thermal Comfort) เป็นต้น

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาถึงผลของความเร็วมต่อภาวะสบายเชิงความร้อน ดังนั้น ในบทนี้จึงขอกล่าวเฉพาะหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับภาวะสบายเชิงความร้อน คือ การยอมรับภาวะสบายเชิงความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อภาวะสบายเชิงความร้อน สมดุลความร้อนของร่างกาย และดัชนีภาวะสบายเชิงความร้อน ซึ่งมีรายละเอียดในแต่ละส่วน ดังนี้

#### 2.1 การยอมรับภาวะสบายเชิงความร้อน

จากมาตรฐาน ASHRAE (ASHRAE Standard 55-1992) ได้ให้คำนิยามของ “ภาวะสบายเชิงความร้อน (Thermal Comfort)” คือ สภาวะทางจิตใจที่แสดงออกซึ่งความพึงพอใจในสภาวะแวดล้อมทางความร้อน (The conditions of mind that expresses satisfaction with the thermal environment) การที่จิตใจจะสามารถตัดสินใจได้ว่ามีความพึงพอใจหรือไม่พึงพอใจ จะเป็นผลโดยตรงจากการรับรู้อุณหภูมิและความชื้นจากผิวหนัง อุณหภูมิภายในร่างกาย และความพยายามในการรักษาอุณหภูมิของร่างกาย<sup>1</sup> ซึ่งปกติแล้วคนเราจะพึงพอใจเมื่ออุณหภูมิร่างกายมีค่าค่อนข้างคงที่ และผิวหนังมีความชื้นต่ำ การที่ร่างกายจะมีอุณหภูมิคงที่นั้นจะเกิดขึ้นเมื่อมีสมดุลความร้อนในร่างกายเท่านั้น ดังนั้น มนุษย์จะพึงพอใจภาวะสบายเชิงความร้อนก็ต่อเมื่อร่างกายมีสมดุลความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับคำกล่าวของ Fanger ในหนังสือ “Thermal Comfort : Analysis and Application in Environmental Engineering” ที่ว่า “สมดุลความร้อนของร่างกายเป็นความต้องการข้อแรกที่จะทำให้เกิดความพึงพอใจต่อภาวะสบายเชิงความร้อน”<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ASHRAE, ASHRAE Handbook Fundamentals 1997 (Atlanta, 1997), p.8.1

<sup>2</sup> P.O. Fanger, Thermal Comfort : Analysis and Application in Environmental Engineering (New York : McGrawhill, 1970), p.37.



## 2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อภาวะสบายเชิงความร้อน

ปัจจัยที่มีผลต่อภาวะสบายเชิงความร้อน ประกอบด้วยตัวแปรหลัก 2 ส่วน คือ ตัวแปรบุคคล (Personal Parameter) และตัวแปรสภาวะแวดล้อม (Environmental Parameter) โดยแต่ละตัวแปรมีรายละเอียดใน ดังนี้

### 2.2.1 ตัวแปรบุคคล (Personal Parameter)

ตัวแปรบุคคลประกอบด้วยตัวแปรต่าง ๆ 3 ค่า คือ อัตราการเผาผลาญพลังงาน (Metabolic Rate, M) งานภายนอก (External Work, W) และความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้า (clo-value,  $I_{cl}$ ) โดยแต่ละตัวแปรมีรายละเอียด ดังนี้

#### 2.2.1.1 อัตราการเผาผลาญพลังงาน ( Metabolic Rate)

อัตราการเผาผลาญพลังงาน คือ อัตราการผลิตพลังงานเนื่องจากกระบวนการเผาผลาญอาหารระดับเซลล์เพื่อนำพลังงานไปใช้ในการทำกิจกรรมต่าง ๆ ของร่างกาย อัตราการเผาผลาญพลังงานที่เกิดขึ้นในร่างกายของแต่ละคนจะมีค่าไม่เท่ากัน โดยจะขึ้นอยู่กับระดับกิจกรรมอาหารที่รับประทาน และสภาพแวดล้อมในการทำกิจกรรมนั้น ๆ ซึ่งสามารถประมาณค่าได้ดังสมการ (AWBI H.B.,1991) ดังนี้

$$M = 2.06 \times 10^4 V (F_{oi} - F_{oe}) \quad (2.1)$$

เมื่อ M คือ อัตราการเผาผลาญพลังงาน , W

V คือ อัตราการหายใจอากาศเข้าออก , (l/s)

$F_{oi}$  คือ อัตราส่วนของออกซิเจนในการหายใจเข้า

$F_{oe}$  คือ อัตราส่วนของออกซิเจนในการหายใจออก

โดยปกติแล้ว ค่า  $F_{oi}$  จะมีค่าเท่ากับ 0.209 ส่วนค่า  $F_{oe}$  จะเปลี่ยนแปลงตามส่วนประกอบของอาหารที่รับประทาน เช่น ประเภทไขมัน  $F_{oe}$  จะมีค่าประมาณ 0.3 และ ประเภทคาร์โบไฮเดรต  $F_{oe}$  จะมีค่าประมาณศูนย์ เป็นต้น

อัตราการเผาผลาญพลังงานต่อหน่วยพื้นที่ร่างกาย สามารถหาได้โดยใช้สมการ 2.1 หาค่าพื้นที่ผิวร่างกาย ( $A_D$ ) ค่า  $A_D$  หาได้จากสมการของ Du Bois (ASHRAE, 1993)

$$A_D = 0.202 \text{ m}^{0.425} I^{0.725} \quad (2.2)$$

- เมื่อ  $A_D$  คือ พื้นที่ผิวร่างกายเปลือย, ( $\text{m}^2$ )  
 $m$  คือ มวลของผู้ร่วมทดลอง, (kg)  
 $I$  คือ ความสูงของผู้ร่วมทดลอง, (m)

เมื่อพิจารณาสมการ 2.1 พบว่าปริมาณออกซิเจน และอัตราการหายใจเข้าออก เป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดการเผาผลาญพลังงาน ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการตรวจวัดค่าทั้งสองในแต่ละบุคคลนั้นทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้น เพื่อความสะดวกใน ASHRAE Standard55-1992 (ASHRAE,1992) ได้เสนอค่าอัตราการเผาผลาญพลังงานสำหรับบุคคลทั่วไป (สูง 1.73 m และหนัก 70 kg ซึ่งมีพื้นที่ผิวเปลือยร่างกาย  $1.8 \text{ m}^2$ ) ด้วยการรวบรวมจากหลายแหล่งข้อมูล ซึ่งมีค่าตามที่แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงการเผาผลาญพลังงานโดยทั่วไปสำหรับกิจกรรมต่าง ๆ  
 แหล่งที่มา : ASHRAE,ASHRAE Standard55-1992 (Atlanta,1992), p.11

Activity	met	W/m <sup>2</sup>	Btu/h.ft <sup>2</sup>
Reclining	0.8	46.6	14.8
Seated and quiet	1.0	58.2	18.4
Sedentary activity			
(office,dwelling,lab,school)	1.2	69.8	22.1
Standing,relaxed	1.2	69.8	22.1
Light activity,standing			
(shopping,lab,light industry)	1.6	93.1	29.5
Medium activity,standing			
(shop assistant,domestic work,machine work)	2.0	114.4	36.9
High activity			
(Heavy machine work ,garage work , lf sustained)	3.0	174.6	55.3

<sup>a</sup> Typically ,rest breaks (scheduled or hidden) or other operational factor (get parts, move products ,etc.) combine to limit most individual work to a time-weighted average level of about 2 met.

1 met = 58.2 W/m<sup>2</sup>

พลังงานที่ได้จากการเผาผลาญพลังงานจะถูกใช้บางส่วนไปในการทำกิจกรรมต่าง ๆ ของร่างกาย และส่วนที่เหลือร่างกายจะต้องทำการขับออกมาในรูปแบบของความร้อนเพื่อรักษาสมดุลความร้อนของร่างกาย

### 2.2.1.2 งานภายนอก (External Work)

งานภายนอกเกิดจากกระบวนการทำงานของกล้ามเนื้อภายในร่างกาย โดยจะมีค่าที่ต่างกันในแต่ละกิจกรรม ซึ่งสามารถประมาณค่าได้จากประสิทธิภาพเชิงกลของร่างกาย ( $\eta$ ) ที่มีค่าเท่ากับ W/M แต่ในความเป็นจริงประสิทธิภาพเชิงกลของร่างกายในแต่ละกิจกรรมมีค่าค่อนข้างต่ำ (เข้าใกล้ศูนย์) มีเพียงบางกิจกรรมเท่านั้นที่มีค่าอยู่ระหว่าง 5% ถึง 10 % ดังนั้น ในกิจกรรมโดยทั่วไปเราสามารถกำหนดงานภายนอกมีค่าเท่ากับศูนย์ ด้วยเหตุผลสนับสนุนหลายประการ ดังนี้ (ASHRAE, 1997)

- 1) งานภายนอกมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอัตราการเผาผลาญพลังงานของร่างกาย โดยเฉพาะกิจกรรมที่ทำอยู่กับที่ เช่น งานในสำนักงาน นอนหลับ นั่งพักผ่อน เป็นต้น
- 2) การประมาณค่าอัตราการเผาผลาญพลังงานส่วนใหญ่ไม่มีความถูกต้อง
- 3) สมมติฐานแบบนี้ค่อนข้างจะเป็นการประมาณค่าอย่างปลอดภัยสำหรับการออกแบบอุปกรณ์ระบบปรับอากาศภายใต้ข้อกำหนดด้านความสบายและสุขภาพ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงกำหนดค่างานภายนอกของผู้ร่วมทดลองมีค่าเท่ากับศูนย์ (ในระหว่างการทดลอง ผู้ร่วมทดลองนั่งทำงานในลักษณะเหมือนทำงานสำนักงาน) แต่ถ้ามีกิจกรรมในลักษณะที่งานภายนอกมีค่าค่อนข้างมาก เช่น การปีนเขา การยกของ เดินขึ้นบันได หรือการเดินบนพื้นเอียง จะต้องพิจารณาหรือคำนวณงานภายนอกอย่างรอบคอบ เนื่องจากค่างานภายนอกนี้จะมีผลต่อสมดุลความร้อนของร่างกาย

### 2.2.1.3 ความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้า (clo-value )

เนื่องจากเสื้อผ้าที่สวมใส่เป็นส่วนที่กั้นระหว่างร่างกายกับสภาวะแวดล้อม ทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างร่างกายกับสภาวะแวดล้อมต้องส่งความร้อนผ่านเสื้อผ้าด้วยการนำความร้อน กระบวนการนำความร้อนผ่านเสื้อผ้าประกอบด้วยสองส่วน คือ การส่งผ่านความร้อนผ่านอากาศเข้าไปตามรูพรุนของเนื้อผ้า และการนำความร้อนผ่านเนื้อผ้า ความสามารถในการส่งผ่านความร้อนของทั้งสองส่วนขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว เช่น ความเร็วลม ความเปียกของเสื้อผ้า อัตราส่วนของรูพรุน และความสามารถในการส่งผ่านอากาศของเนื้อผ้า ดังนั้น ด้วยเหตุแห่งความยุ่งยากในการวิจัยทั้งหมด ทำให้เกิดการพัฒนามาเป็นคุณสมบัติของชุดแต่งกาย ที่รวมค่าความต้านทานความร้อนทั้งหมด โดยการวัดจากผิวภายนอกของเสื้อผ้า แต่ไม่รวมค่าความต้านทานความร้อนภายนอก มีค่าแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าความต้านทานความร้อนของเครื่องแต่งกาย  
แหล่งที่มา : ASHRAE, ASHRAE Standard 55-1992 (Atlanta, 1992), p.6

Garment description	$I_{cl}$ (clo)	Garment description	$I_{cl}$ (clo)
<b>Underwear</b>		<b>Dresses and Skirt</b>	
Bra	0.01	Skirt (thin)	0.14
Panties	0.03	Skirt (thick)	0.23
Men's briefs	0.04	Sleeveless, scoop neck (thin)	0.23
T-shirt	0.08	Sleeveless, scoop neck (thick)	
Half-slip	0.14	i.e. jumper	0.27
Long underwear bottoms	0.15	Short-sleeve shirtdress (thin)	0.29
Full slip	0.16	Long-sleeve shirtdress (thin)	0.33
Long underwear top	0.20	Long-sleeve shirtdress (thick)	0.47
<b>Footwear</b>		<b>Sweaters</b>	
Ankle-length athletic socks	0.02	Sleeveless vest (thin)	0.13
Pantyhose/stockings	0.02	Sleeveless vest (thick)	0.22
Sandals/thongs	0.02	Long-sleeve (thin)	0.25
Shoes	0.02	Long-sleeve (thick)	0.36
Slippers (quilted, pile lines)	0.03	<b>Suit Jackets and Vests</b>	
Calf-length socks	0.03	Sleeveless vest (thin)	0.10
Knee socks (thick)	0.06	Sleeveless vest (thick)	0.17
Boots	0.10	Single-breasted (thin)	0.36
<b>Shirts and Blouses</b>		Single-breasted (thick)	0.42
Sleeveless/scoop-neck blouse	0.13	Double-breasted (thin)	0.44
Short-sleeve knit sport shirt	0.17	Double-breasted (thick)	0.48
Short-sleeve dress shirt	0.19	<b>Sleepwear and Robes</b>	
Long-sleeve dress shirt	0.25	Sleeveless short gown (thin)	0.18
Long-sleeve flannel shirt	0.34	Sleeveless long gown (thin)	0.20
Long-sleeve sweatshirt	0.34	Short-sleeve hospital gown	0.31
<b>Trousers and Coveralls</b>		Short-sleeve short robe (thin)	0.34
Short shorts	0.06	Short-sleeve pajamas (thin)	0.42
Walking shorts	0.08	Long-sleeve long gown (thick)	0.46
Straight trousers (thin)	0.15	Long-sleeve short wrap robe (thick)	0.48
Straight trousers (thick)	0.24	Long-sleeve pajamas (thick)	0.57
Sweatpants	0.28	Long-sleeve long wrap robe (thick)	0.69
Overalls	0.30		
Coveralls	0.49		

<sup>a</sup> "thin" refers to garments made of lightweight, thin fabrics often worn in the summer, "thick" refers to garments made of heavyweight, thick fabrics often worn in the winter.

<sup>b</sup> Knee-length dresses and skirts.

<sup>c</sup> Lined vests.

1 clo = 0.155 (m<sup>2</sup>·K)/W

## 2.2.2 ตัวแปรสภาวะแวดล้อม (Environmental Parameter)

ตัวแปรสภาวะแวดล้อมประกอบด้วยตัวแปรต่าง ๆ 4 ค่า คือ อุณหภูมิอากาศ (Air Temperature,  $t_a$ ) ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, %rh) อุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ย (Mean Radiant Temperature,  $t_{mr}$ ) และความเร็วลม (Air Velocity,  $v$ ) โดยแต่ละตัวแปรมีรายละเอียด ดังนี้

### 2.2.2.1 อุณหภูมิอากาศ (Air Temperature)

อุณหภูมิอากาศเป็นตัวแปรที่มีปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการถ่ายเทความร้อนระหว่างร่างกายกับสิ่งแวดล้อม ประกอบด้วย การพาความร้อนที่ผิวหนัง (Convection) และการถ่ายเทความร้อนด้วยการหายใจในส่วนของความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) กระบวนการถ่ายเทความร้อนทั้งสองนี้เป็นกระบวนการสำคัญที่ร่างกายใช้ในการรักษาสมดุลความร้อน ดังนั้นอุณหภูมิอากาศจึงเป็นตัวแปรที่มีผลต่อภาวะสบายเชิงความร้อน

### 2.2.2.2 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)

ความชื้นสัมพัทธ์เป็นตัวแปรที่สำคัญในการสูญเสียความร้อนของร่างกายจากการกลายเป็นไอที่ผิวหนัง (Total evaporative heat loss from skin) การสูญเสียความร้อนของร่างกายด้วยวิธีการแบบนี้มีปริมาณประมาณสองในห้าของการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดระหว่างร่างกายกับสิ่งแวดล้อม (Olgay, 1973) ดังนั้น ความชื้นสัมพัทธ์จึงมีความต่อการรักษาสมดุลความร้อนของร่างกาย ซึ่งมีผลต่อภาวะสบายเชิงความร้อน

### 2.2.2.3 อุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ย (Mean Radiant Temperature)

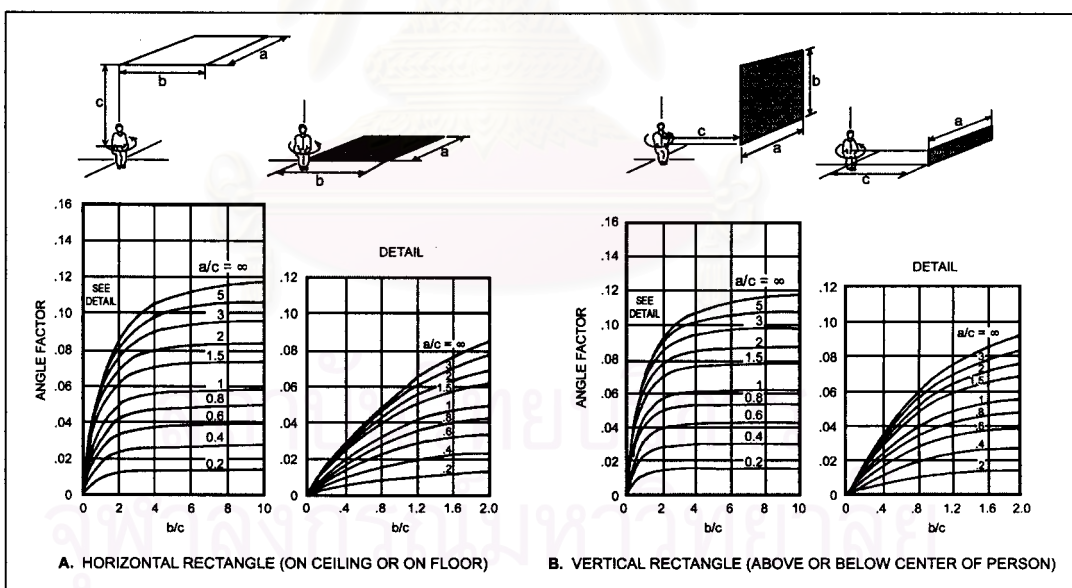
อุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ย คือ อุณหภูมิพื้นผิวของห้องสมมติให้มีค่าสม่ำเสมอ [ห้องสมมตินี้มีผนังที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (emittance,  $e$ ) เท่ากับ 1 หรือเปรียบได้กับผนังห้องสีดำ] ที่ทำให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการแผ่รังสีระหว่างร่างกายกับพื้นผิวของห้องสมมติมีค่าเท่ากับพื้นผิวแวดล้อมจริงที่มีค่าไม่สม่ำเสมอ อุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยเป็นตัวแปรที่สำคัญของการแผ่รังสีความร้อนจากผิวหนัง ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งที่สำคัญต่อการรักษาสมดุลความร้อนของร่างกาย ดังนั้น อุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยจึงมีผลต่อภาวะสบายเชิงความร้อน

อุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยคำนวณได้จากอุณหภูมิของแต่ละพื้นผิวของห้อง และตัวประกอบเชิงมุมระหว่างบุคคลกับแต่ละพื้นผิว (Angle factor from person to surface N,  $F_{p-N}$ ) สำหรับพื้นผิวอาคารส่วนมากจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของทุกผนังในห้องสามารถคิดเป็นผนังสีดำได้ ดังนั้น เราจึงสามารถคำนวณอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยได้จากสมการดังนี้

$$T_{mrt}^4 = T_1^4 F_{p-1} + T_2^4 F_{p-2} + \dots + T_N^4 F_{p-N} \tag{2.3}$$

- เมื่อ  $T_{mrt}$  คือ อุณหภูมิแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ย
- $T_N$  คือ อุณหภูมิพื้นผิวของพื้นผิวที่ N
- $F_{p-N}$  คือ ตัวประกอบเชิงมุมระหว่างคนกับพื้นผิวที่ N

ตัวประกอบเชิงมุมจะขึ้นกับตำแหน่งและทิศทางของแต่ละคน และมีค่าผลรวมเท่ากับ 1 การคำนวณตัวประกอบเชิงมุมมีวิธีการค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้น เพื่อความสะดวกเราสามารถประมาณค่าได้จากรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ค่าเฉลี่ยตัวประกอบเชิงมุมระหว่างคนหนึ่งกับสี่เหลี่ยมแนวดิ่งหรือแนวนอน เมื่อคนถูกหมุนตามแกนแนวดิ่ง

แหล่งที่มา : ASHRAE, ASHRAE Handbook Fundamentals 2001 (Atlanta,2001), p.8.11



นอกจากการคำนวณค่าอุณหภูมิแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยด้วยสมการ 2.3 แล้ว เรายังสามารถคำนวณค่าอุณหภูมิแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยได้จากค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ย

ของแต่ละระนาบ (Plane Radian Temperature ,  $t_{pr}$ ) ของหกทิศทาง คือ ด้านบน ด้านล่าง ด้านซ้าย ด้านขวา ด้านหน้า และด้านหลัง โดยสมการที่ใช้คำนวณหาอุณหภูมิแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยสำหรับคนยืน และนั่งแสดงไว้ในสมการที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ ดังนี้

$$t_{mrt} = \{0.08[t_{pr}(up) + t_{pr}(down)] + 0.23[t_{pr}(right) + t_{pr}(left)] + 0.35[t_{pr}(front) + t_{pr}(back)]\} / [2(0.08+0.23+0.35)] \quad (2.4)$$

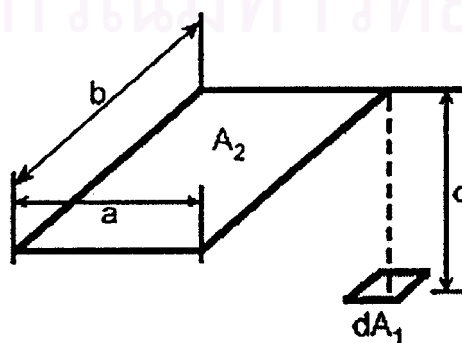
$$t_{mrt} = \{0.18[t_{pr}(up) + t_{pr}(down)] + 0.22[t_{pr}(right) + t_{pr}(left)] + 0.30[t_{pr}(front) + t_{pr}(back)]\} / [2(0.18+0.22+0.30)] \quad (2.5)$$

เมื่อ  $t_{mrt}$  คือ ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ย , °C

$T_{pr}$  คือ ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยของแต่ละระนาบ , °C

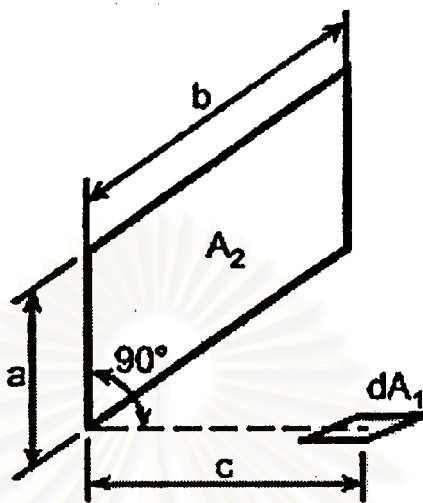
ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยของระนาบ (เสนอโดย McIntyre , 1974) คือ อุณหภูมิสมมุติของพื้นผิวปิดที่มีฟลักซ์ตกกระทบบนเอลิเมนต์ย่อยตามทิศทางที่ระบุเท่ากับ

ปริมาณการแผ่รังสีที่ได้จากสิ่งแวดล้อมจริง ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยของระนาบเป็นการบรรยายถึงลักษณะการแผ่รังสีความร้อนในหนึ่งทิศทางเท่านั้น แต่ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยเป็นการบรรยายถึงลักษณะการแผ่รังสีความร้อนในทุกทิศทางของร่างกายคน การหาค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยของแต่ละระนาบสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.3 โดยใช้ค่าตัวประกอบเชิงมุมระหว่างเอลิเมนต์ย่อยที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ 2.6 และสมการ 2.7 (ASHRAE, 1997)



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

$$F_{dA_1-A_2} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\frac{x}{\sqrt{1+x^2}} \operatorname{arctan} \frac{y}{\sqrt{1+x^2}}}{\frac{y}{\sqrt{1+y^2}} \operatorname{arctan} \frac{x}{\sqrt{1+y^2}}} \right) \quad (2.6)$$



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

$$F_{dA_1-A_2} = \frac{1}{2\pi} \left( \operatorname{arctan} \frac{1}{y} - \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}} \operatorname{arctan} \frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}} \right) \quad (2.7)$$

สำหรับกรณีที่ไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากนั้นค่าตัวประกอบเชิงมุมจะอยู่ในรูปแบบที่ซับซ้อนและคำนวณได้ยาก ดังนั้น ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยที่ถูกต้องคำนวณได้ยาก แต่สามารถประมาณค่าได้โดยการคำนวณจากค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิพื้นผิวถ่วงน้ำหนักด้วยการ

เปล่งรังสีความร้อนและพื้นที่ของผิวด้วยสมการ 2.8 ดังนี้

$$T_{mrt} = \frac{\epsilon_1 A_{1T} + \epsilon_2 A_{2T} + \dots + \epsilon_N A_{NT}}{\epsilon_1 A_1 + \epsilon_2 A_2 + \dots + \epsilon_N A_N} \quad (2.8)$$

- เมื่อ  $T_{mrt}$  คือ อุณหภูมิแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ย, K  
 $\epsilon_N$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของพื้นผิวที่ N  
 $A_{Nr}$  คือ พื้นที่ผิวของระนาบที่ N, K  
 $T_N$  คือ อุณหภูมิพื้นผิวของพื้นผิวที่ N, K

ในส่วนของงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยคำนวณค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยด้วยสมการ 2.5 โดยใช้ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยของแต่ละระนาบที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ 2.3 ด้วย

การใช้ค่าอุณหภูมิผนังได้มาจากการวัดจริงในขณะที่ทำการทดลอง ภายใต้สมมติฐานที่ว่าอุณหภูมิผิวหนังแต่ละด้านมีค่าที่สม่ำเสมอ และคำนวณค่าตัวประกอบเชิงมุมระหว่างเอลิเมนต์ย่อยด้วยสมการ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ

#### 2.2.2.4 ความเร็วลม (Air Velocity)

ความเร็วลมเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อสมดุลความร้อนของร่างกาย โดยมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนระหว่างร่างกายกับสภาวะแวดล้อม ทั้งในส่วนของ การพาความร้อนระหว่างผิวหนังกับอากาศ และการระเหยของเหงื่อที่ผิวหนัง ซึ่งกระบวนการถ่ายเทความร้อนทั้งสองนี้มีผลต่อภาวะสบายเชิงความร้อนโดยตรง โดยพบว่าเมื่อกระแสลมที่พัดผ่านผิวหนังมีความเร็วเพิ่มขึ้น มนุษย์เราจะรู้สึกเย็นลงกว่าอุณหภูมิที่วัดได้จริง ความรู้สึกเย็นลงกว่าอุณหภูมิอากาศจริงเป็นเพราะอัตราการระบายความร้อนออกจากผิวหนังแปรผันตามความเร็วของกระแสลม กล่าวคือ ถ้ากระแสลมมีความเร็วสูงขึ้น ร่างกายจะระบายความร้อนได้เร็วขึ้น จึงทำให้มีความรู้สึกเย็นลงกว่าอุณหภูมิอากาศที่วัดได้จริง ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้จริงกับความรู้สึกเมื่อมีลมพัดผ่านผิวหนังนี้ (ในที่นี้เรียกว่าความรู้สึกเย็นลง) เมื่อนำมาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์โดยการใช้อยู่สมการถดถอย (Regression Analysis) พบว่า<sup>3</sup>

$$\text{ความรู้สึกเย็นลง (}^{\circ}\text{C)} = 0.381 v + 0.016 rh \quad (2.9)$$

เมื่อ  $v$  คือ ความเร็วลม , กิโลเมตรต่อชั่วโมง  
 $rh$  คือ ความชื้นสัมพัทธ์ , เปอร์เซ็นต์

### 2.3 สมดุลความร้อนของร่างกาย (Heat Balance)

กิจกรรมที่มนุษย์ทำในชีวิตประจำวันทุกกิจกรรมล้วนแต่ต้องใช้พลังงานทั้งสิ้นพลังงานที่ใช้จะได้มาจากการเผาผลาญพลังงานของร่างกาย (Metabolism) พลังงานที่ได้จากการเผาผลาญพลังงานจะถูกใช้ส่วนใหญ่ไปกับการดำเนินกิจกรรมของร่างกาย แต่ก็ยังมีส่วนที่เหลือเป็นความร้อนในร่างกาย ซึ่งส่งผลทำให้อุณหภูมิภายในร่างกายสูงขึ้นและอาจเป็นอันตรายต่ออวัยวะภายใน ดังนั้น ร่างกายจึงจำเป็นต้องถ่ายเทพลังงานส่วนที่เหลือนี้ออกสู่สภาวะแวดล้อม จนกว่าร่างกายจะมีสมดุลความร้อนภายในร่างกาย การถ่ายเทพลังงานระหว่างร่างกายกับสภาวะแวดล้อมประกอบด้วย การพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อน การระเหยของเหงื่อ และการหายใจ ซึ่งเมื่อนำการ

<sup>3</sup> สุนทร บุญญาธิการ, การออกแบบบ้านประหยัดพลังงานเพื่อคุณภาพชีวิตที่ดีกว่า, (กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542) หน้า 35

สร้างพลังงานภายในร่างกาย พลังงานที่ใช้ในกิจกรรม และการถ่ายเทความร้อนกับสภาวะแวดล้อม มาสร้างสมการสมดุลความร้อนของร่างกายจะได้ตามสมการ 2.10

$$(M - W) = Q_{sk} + Q_{res} + S \quad (2.10)$$

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

เมื่อ	M	คือ อัตราการเผาผลาญพลังงาน , $W/m^2$
	W	คือ งานภายนอก , $W/m^2$
	$Q_{sk}$	คือ การสูญเสียความร้อนที่เกิดที่ผิวหนัง , $W/m^2$
	$Q_{res}$	คือ การสูญเสียความร้อนผ่านกระบวนการหายใจ , $W/m^2$
	S	คือ ปริมาณความร้อนที่สะสมของร่างกาย , $W/m^2$
	C	คือ การสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อน , $W/m^2$
	R	คือ การสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อน , $W/m^2$
	$E_{sk}$	คือ การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอที่ผิวหนัง , $W/m^2$
	$C_{res}$	คือ การสูญเสียความร้อนสัมผัสจากการหายใจ , $W/m^2$
	$E_{res}$	คือ การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอจากการหายใจ , $W/m^2$
	$S_{sk}$	คือ ปริมาณความร้อนที่สะสมในส่วนของผิวหนัง , $W/m^2$
	$S_{cr}$	คือ ปริมาณความร้อนที่สะสมในส่วนของแกนกลางร่างกาย , $W/m^2$

สมดุลความร้อนของร่างกายเป็นเงื่อนไขสำคัญอย่างยิ่งของเกิดภาวะสบายเชิงความร้อน การศึกษาสมดุลความร้อนของร่างกายที่เกี่ยวข้องกับภาวะสบายเชิงความร้อนได้มีการพิจารณาสมการเป็น 2 แบบ คือ สมดุลความร้อนแบบของ Fanger และสมดุลพลังงานแบบ Two Node Model โดยแต่ละแบบมีรายละเอียด ดังนี้

### 2.3.1 สมดุลความร้อนแบบของ Fanger

ในปี ค.ศ. 1970 Fanger ได้ทำการพัฒนาสมการสมดุลพลังงานของร่างกายคน (Fanger, 1970) โดยมีสมมติฐานว่าร่างกายจะอยู่ในสภาวะสมดุลความร้อนโดยไม่มีพลังงานสะสมในร่างกาย ดังนั้น สมการสมดุลพลังงานที่ได้จะเหมือนสมการ 2.10 เพียงแต่ตัดเทอมที่เป็นการสะสมพลังงานในส่วนต่าง ๆ ของร่างกายออก ได้เป็นสมการใหม่ ดังนี้

$$(M - W) = (C + R + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) \quad (2.11)$$

โดยที่ค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการ 2.11 ในส่วนของค่าการเผาผลาญพลังงาน และงานภายนอก ได้แสดงรายละเอียดและวิธีการคำนวณไว้ในหัวข้อ 2.2.1.1 และ 2.2.1.2 ตามลำดับ ส่วนในตัวแปรอื่น ๆ มีรายละเอียดและวิธีการคำนวณ ดังนี้

### 2.3.1.1 การสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อน

การสูญเสียความร้อนด้วยการพาความร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนจากร่างกายสู่สภาวะแวดล้อมด้วยการพาความร้อน ซึ่งมีทั้งแบบอิสระ (Free Convection) และแบบบังคับ (Forced Convection) โดยมีสมการดังนี้

$$C = f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a), \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2.12)$$

- เมื่อ  $C$  คือ การสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อน ,  $\text{W/m}^2$   
 $f_{cl}$  คือ สัดส่วนของพื้นที่ร่างกายซึ่งปกคลุมด้วยเสื้อผ้า  
 $h_c$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา ,  $\text{W/(m}^2 \cdot \text{K)}$   
 $t_{cl}$  คือ อุณหภูมิผิวของเสื้อผ้า ,  $^{\circ}\text{C}$   
 $t_a$  คือ อุณหภูมิอากาศ ,  $^{\circ}\text{C}$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } f_{cl} &= 1.0 + 0.2 I_{cl} \quad \text{เมื่อ } I_{cl} < 0.5 \text{ clo} && \text{หรือ} \\ &= 1.05 + 0.1 I_{cl} \quad \text{เมื่อ } I_{cl} > 0.5 \text{ clo} \end{aligned} \quad (2.13)$$

ค่า  $h_c$  ในกรณีแบบอิสระ (Free Convection) จะมีค่าเท่ากับ

$$h_c = 2.38 (t_{cl} - t_a)^{0.25} \quad \text{เมื่อ } (t_{cl} - t_a)^{0.25} > (v_r)^{0.5} \quad (2.14)$$

กรณีแบบบังคับ (Force Convection) จะมีค่าเท่ากับ

$$h_c = 12.1 (v_r)^{0.5} \quad \text{เมื่อ } (t_{cl} - t_a)^{0.25} < (v_r)^{0.5} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $v_r$  คือความเร็วลมสัมพัทธ์ และสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.16 ดังนี้

$$v_r = v + 0.05(M-58.2) \quad (2.16)$$

เมื่อ  $v_r$  คือความเร็วลมสัมพัทธ์ , m/s

$v$  คือ ความเร็วลม , m/s

$M$  คือ อัตราการเผาผลาญอาหาร ,  $W/m^2$

### 2.3.1.2 การสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อน

การสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อน คือ การแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการแผ่รังสีระหว่างผิวหนึ่งกับพื้นผิวของสิ่งแวดล้อม (เช่น ผนังแต่ละด้านของห้อง ฝ้าเพดาน เป็นต้น) การสูญเสียความร้อนดังกล่าวสามารถคำนวณได้โดยสมการของ Stefan Boltzmann ดังนี้

$$R = f_{cl} h_r (t_{cl} - t_{mrt}) \quad (2.17)$$

เมื่อ  $f_{cl}$  คือ สัดส่วนของพื้นที่ร่างกายซึ่งปกคลุมด้วยเสื้อผ้า

มีค่าเท่ากับ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวเสื้อผ้าต่อพื้นที่ผิวร่างกายเปลือย

$h_r$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อน ,  $W/(m^2 \cdot K)$

$t_{cl}$  คือ อุณหภูมิผิวของเสื้อผ้า ,  $^{\circ}C$

$t_{mrt}$  คือ อุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ย ,  $^{\circ}C$

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี ( $h_r$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$h_r = 4 \epsilon \sigma \frac{A_r}{A_D} \left[ 273.2 + \frac{t_{cl} + t_{mrt}}{2} \right]^3 \quad (2.18)$$

เมื่อ  $\epsilon$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

$\sigma$  คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann เท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$

$A_r$  คือ พื้นที่ประสิทธิผลในการแผ่รังสีความร้อนของร่างกาย ,  $m^2$

$A_D$  คือ พื้นผิวร่างกาย ,  $m^2$

$t_{cl}$  และ  $t_{mrt}$  มีความหมายเหมือนที่เคยกล่าวมาแล้วข้างต้น



จาก Fanger , 1967 (ASHRAE , 1993) จะใช้ค่า  $A_r/A_o$  เท่ากับ 0.70 สำหรับทำนั่ง และ เท่ากับ 0.73 สำหรับทำยืน และโดยทั่วไป  $\epsilon$  จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.97

### 2.3.1.3 การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอที่ผิวหนัง

การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอที่ผิวหนัง ประกอบด้วย การสูญเสียความร้อน 2 แบบ คือ การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอแพร่ผ่านผิวหนัง และการสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอของเหงื่อ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$E_{sk} = E_{dif} + E_{rsw} \quad (2.19)$$

เมื่อ  $E_{dif}$  คือ การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอแพร่ผ่านผิวหนัง ,  $W/m^2$   
 $E_{rsw}$  คือ การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอของเหงื่อ ,  $W/m^2$

#### 1. การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอแพร่ผ่านผิวหนัง

การระเหยของน้ำผ่านผิวหนังเป็นส่วนหนึ่งของการขับเหงื่อ ขบวนการนี้ไม่เกี่ยวกับการควบคุมการปรับสมดุลทางความร้อนของร่างกาย การระเหยของน้ำผ่านผิวหนังจะเป็นผลโดยตรงจากความแตกต่างระหว่างความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิผิวหนัง ( $P_{sk,s}$ ) กับความดันไอน้ำในอากาศ ( $P_a$ ) ของอากาศล้อมรอบ (Ambient Air) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการสูญเสียได้ ดังนี้

$$E_{dif} = h_{fg} i_{sk} (P_{sk,s} - P_a) \quad (2.20)$$

เมื่อ  $E_{dif}$  คือ การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอแพร่ผ่านผิวหนัง ,  $W/m^2$   
 $h_{fg}$  คือ ความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอของน้ำ  
 ที่  $35^\circ C$  มีค่าเท่ากับ  $2,418 \text{ kJ/kg}$   
 $i_{sk}$  คือ สัมประสิทธิ์การซึมของไอน้ำผ่านผิวหนัง  
 มีค่าเท่ากับ  $1.26 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kPa})$   
 $P_{sk,s}$  คือ ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิผิวหนัง ,  $\text{kPa}$   
 $P_a$  คือ ความดันไอน้ำในอากาศ ,  $\text{kPa}$

และจาก Steam Table ที่อุณหภูมิ  $27^\circ C < t_{sk} < 37^\circ C$  ค่า  $P_{sk,s}$  จะเป็นฟังก์ชันของ  $t_{sk}$  ดังแสดงในสมการ 2.21 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 3 %

$$P_{sk,s} = 0.256 t_{sk} - 3.373 \quad (2.21)$$

แทนค่า  $h_{fg}$ ,  $i_{sk}$ ,  $P_{sk,s}$  ในสมการ 2.20 จะได้สมการใหม่ ดังนี้

$$E_{dif} = 3.05 (0.256 t_{sk} - 3.373 - P_a) \quad (2.22)$$

## 2 การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอของเหงื่อ

Fanger ได้ทำการพิจารณาการระเหยของเหงื่อว่า ถ้าอุณหภูมิอากาศ และความดันไอที่พอเหมาะ ซึ่งเป็นสภาวะที่อยู่ในช่วงภาวะสบายเชิงความร้อน พอที่จะสมมติได้ว่า เหงื่อที่ออกมาจะระเหยไปหมด การระเหยของเหงื่อจะเป็นฟังก์ชันของระดับกิจกรรม ซึ่งจากการทดลองที่สภาวะแวดล้อมที่ทำให้เกิดภาวะสบายเชิงความร้อน พบว่าการสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอของเหงื่อมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับระดับกิจกรรม ดังนี้

$$E_{rsW} = 0.42 (M-W-58.2) \quad (2.23)$$

### 2.3.1.4 การสูญเสียความร้อนสัมผัสจากการหายใจ

การสูญเสียความร้อนแบบนี้เกิดเนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศที่หายใจเข้าและหายใจออก ซึ่งสามารถคำนวณค่าได้จากสมการ 2.24 ดังนี้

$$C_{res} = \dot{m}_{res} c_{p,a} (t_{ex} - t_a) / A_D \quad (2.24)$$

เมื่อ	$C_{res}$	คือ การสูญเสียความร้อนสัมผัสจากการหายใจ, $W/m^2$
	$\dot{m}_{res}$	คือ อัตราการระบายอากาศของปอด, $kg/s$
	$c_{p,a}$	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศที่หายใจเข้า มีค่าเท่ากับ $1.0048 \text{ kJ}/(kg \cdot ^\circ C)$
	$t_{ex}$	คือ อุณหภูมิของอากาศที่หายใจออก, $^\circ C$
	$t_a$	คือ อุณหภูมิของอากาศที่หายใจเข้า, $^\circ C$
	$A_D$	คือ พื้นผิวร่างกายเปลือย, $1.8 \text{ m}^2$

โดยที่อัตราการระบายอากาศของปอดมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอัตราการเผาผลาญพลังงาน ดังนี้

$$\dot{m}_{res} = K_{res} M \quad (2.25)$$

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

และในคนปกติแล้วอุณหภูมิของอากาศที่หายใจออกจะมีค่าที่ค่อนข้างคงที่คือประมาณ  $34 \text{ }^\circ\text{C}$  เมื่อแทนค่าตัวแปรแต่ละตัวลงในสมการ 2.24 จะได้เป็นสมการ 2.26 ดังนี้

$$C_{res} = 0.0014 M (34 - t_a) \quad (2.26)$$

### 2.3.1.5 การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอจากการหายใจ

การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอจากการหายใจเกิดเนื่องจากความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นของอากาศที่หายใจเข้าและหายใจออก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$E_{res} = \dot{m}_{res} h_{fg} (W_{ex} - W_a) / A_D \quad (2.27)$$

เมื่อ  $E_{res}$  คือ การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอจากการหายใจ ,  $\text{W/m}^2$

$\dot{m}_{res}$  คือ คืออัตราการระบายอากาศของปอด ,  $\text{kg/s}$

$h_{fg}$  คือ ความร้อนแฝงในการกลายเป็นของน้ำ

ที่  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  มีค่าเท่ากับ  $2,444 \text{ kJ/kg}$

$W_{ex}$  คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่หายใจออก ,  $\text{kg (H}_2\text{O) / kg (dry air)}$ .

$W_a$  คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่หายใจเข้า ,  $\text{kg (H}_2\text{O) / kg (dry air)}$ .

$A_D$  คือ พื้นผิวร่างกาย ,  $1.8 \text{ m}^2$

MC Cutchan และ Taylor ได้เสนอสมการเพื่อใช้ประมาณค่าค่าแตกต่างของอัตราส่วนความชื้นระหว่างอากาศหายใจเข้าและออกจาก ดังนี้

$$\begin{aligned} W_{ex} - W_a &= 0.0277 + 0.000065 t_a - 0.80 W_a \\ &\cong 0.029325 - 0.80 W_a \quad (\text{kgน้ำ/kgอากาศแห้ง}) \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\text{โดยที่ } W_a = 0.622 * [P_a / (P_{atm} - P_a)]$$

เมื่อ  $P_a$  คือ ความดันไอน้ำในอากาศที่หายใจเข้า

$P_{atm}$  คือ ความดันบรรยากาศ 101.325 kPa

พิจารณาที่สภาวะมาตรฐาน  $W_a \cong 0.4995 * P_a$

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการ 2.27 และจัดรูปใหม่ จะสมการที่ง่ายต่อการคำนวณ ดังนี้

$$E_{res} = 0.00173 M (5.87 - P_a) \quad (2.29)$$

### 2.3.2 สมดุลพลังงานแบบ Two Node Model

ในปี ค.ศ. 1971 Gagge และคณะ (ASHRAE, 1993) ได้พัฒนาคิดค้นวิธีการที่ใช้ในการทำนายสมดุลพลังงานของร่างกาย โดยใช้ชื่อเรียกว่า "Two Node Model, 2NM" วิธีการดังกล่าวอาศัยหลักการ คือ เปรียบร่างกายเหมือนมีทรงกระบอก 2 อันซ้อนกันอยู่ ทรงกระบอกใน คือ ส่วนของร่างกายภายใน เช่น กระดูก กล้ามเนื้อ และอวัยวะต่าง ๆ ภายใน เป็นต้น ส่วนทรงกระบอกนอก คือ ส่วนของผิวหนัง ซึ่งสมการสมดุลพลังงานนี้เป็นสมการที่พัฒนาขึ้นโดยใช้สมมติฐาน ดังนี้

1. ไม่คิดการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการนำความร้อนที่ผิวหนัง
2. อุณหภูมิในแต่ละส่วนของร่างกายมีค่าสม่ำเสมอ เช่น อุณหภูมิผิวหนัง (Skin Temperature,  $t_{sk}$ ) อุณหภูมิแกนกลางของร่างกาย (Body Core Temperature,  $t_{cr}$ ) เป็นต้น
3. อัตราการเผาผลาญพลังงาน งานภายนอกที่ทำ และการสูญเสียความร้อนจากการหายใจเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในแกนกลางร่างกาย
4. แกนกลางร่างกายและผิวหนังจะแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกันด้วยวิธีการหลัก 2 วิธี คือ การสัมผัสกันโดยตรง และจากกระบวนการควบคุมความร้อนของร่างกายด้วยการไหลเวียนของเลือด

เมื่อนำสมมติฐานและแนวคิดที่กล่าวมาข้างต้นมาพิจารณาสร้างสมการสมดุลพลังงานความร้อนที่สภาวะไม่คงตัวของร่างกายจะได้สมการสมดุลพลังงาน 2 สมการ คือ สมการจากการพิจารณาที่แกนกลางของร่างกาย และสมการจากการพิจารณาที่ผิวหนัง ดังแสดงในสมการ 2.30 และ 2.31 ตามลำดับ โดยที่แต่ละสมการจะเป็นสมการสมดุลพลังงานระหว่างอัตราการสะสมพลังงานในส่วนที่พิจารณากับอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิของส่วนนั้น

$$S_{cr} = M - W - (C_{res} + E_{res}) - Q_{cr,sk} \quad (2.30)$$

$$S_{sk} = Q_{cr,sk} - (C + R + E_{sk}) \quad (2.31)$$

เมื่อ	$S_{cr}$	คือ อัตราการสะสมความร้อนในส่วนของแกนกลางร่างกาย , $W/m^2$
	$S_{sk}$	คือ อัตราการสะสมความร้อนในส่วนของผิวหนัง , $W/m^2$
	$M$	คือ อัตราการเผาผลาญพลังงาน , $W/m^2$
	$W$	คือ งานภายนอก , $W/m^2$
	$C_{res}$	คือ การสูญเสียความร้อนสัมผัสจากการหายใจ , $W/m^2$
	$E_{res}$	คือ การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอจากการหายใจ , $W/m^2$
	$C$	คือ การสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อน , $W/m^2$
	$R$	คือ การสูญเสียความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อนจากผิวหนัง , $W/m^2$
	$E_{sk}$	คือ การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอที่ผิวหนัง , $W/m^2$

อัตราการสะสมความร้อนของแต่ละส่วน ( $S_{cr}$  ,  $S_{sk}$ ) สามารถคำนวณค่าได้จากสมการของแต่ละส่วน ดังแสดงในสมการ 2.32 และสมการ 2.33 (ASHRAE , 1997) สมการดังกล่าวจะอยู่ในรูปของค่าความจุความร้อนจำเพาะของแต่ละส่วนซึ่งมีค่าเท่ากัน ( $c_{p,b}$ ) มวลของแต่ละส่วน และอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแต่ละ

$$S_{cr} = \frac{(1-\alpha) mc_{p,b} dt}{A_D d\theta} \quad (2.32)$$

$$S_{sk} = \frac{\alpha mc_{p,b} dt}{A_D d\theta} \quad (2.33)$$

และ

$$Q_{cr,sk} = (K + m_{bl} C_{p,bl}) \cdot (t_{cr} - t_{sk}) \quad (2.34)$$

เมื่อ	$S_{cr}$	คือ อัตราการสะสมความร้อนในส่วนของแกนกลางร่างกาย , $W/m^2$
	$S_{sk}$	คือ อัตราการสะสมความร้อนในส่วนของผิวหนัง , $W/m^2$
	$\alpha$	คือ สัดส่วนโดยระหว่างผิวหนังกับร่างกาย โดยเฉลี่ยจะมีค่าประมาณ 0.1
	$m$	คือ มวลของร่างกาย , kg
	$c_{p,b}$	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของร่างกาย โดยเฉลี่ยจะมีค่าเท่ากับ 3.49 kJ/(kg.K)

$\frac{dt}{d\theta}_{cr}$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแกนกลางร่างกายเทียบกับเวลา, °C/s

$\frac{dt}{d\theta}_{sk}$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผิวหนังเทียบกับเวลา, °C/s

$A_D$  คือ พื้นที่ผิวร่างกายเปลือย, m<sup>2</sup>

$\theta$  คือ เวลา, s

$K$  คือ การนำความร้อนยังผลระหว่างแกนกลางร่างกายกับผิวหนัง  
โดยเฉลี่ยจะมีค่าเท่ากับ 5.28 W / (m<sup>2</sup>.K)

$c_{p,bl}$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเลือด  
โดยเฉลี่ยจะมีค่าเท่ากับ 4.187 kJ/(kg.K)

$t_{cr}$  คือ อุณหภูมิแกนกลางร่างกาย, °C

$t_{sk}$  คือ อุณหภูมิผิวหนัง, °C

ค่าพื้นที่ผิวร่างกาย ( $A_D$ ) คำนวณได้จากสมการ 2.2 ดังนั้น และเมื่อแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการ 2.30 และสมการ 2.31 ได้เป็นสมการใหม่ ดังนี้

$$\frac{(1-\alpha) mc_{p,b}}{A_D} \frac{dt}{d\theta}_{cr} = M - W - (C_{res} - E_{res}) - (K + m_{bl} c_{p,bl}) (t_{cr} - t_{sk}) \quad (2.35)$$

$$\frac{\alpha mc_{p,b}}{A_D} \frac{dt}{d\theta}_{sk} = (K + m_{bl} c_{p,bl}) (t_{cr} - t_{sk}) - (C + R + E_{sk}) \quad (2.36)$$

โดยที่ค่าตัวแปรส่วนใหญ่ในสมการ 2.30 และสมการ 2.31 ได้กล่าวรายละเอียดและวิธีการคำนวณไว้ในหัวข้อ 2.3.1 แล้ว มีเพียงค่าการสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอที่ผิวหนัง ( $E_{sk}$ ) เท่านั้นที่มีการคำนวณที่แตกต่างกัน ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

### 2.3.2.1 การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอที่ผิวหนัง



การสูญเสียความร้อนด้วยการระเหยจากผิวหนัง คือ การสูญเสียความร้อนที่เป็นผลเนื่องจากความแตกต่างระหว่างความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิผิวหนัง ( $P_{sk,s}$ ) กับความดันของไอน้ำในอากาศ ( $P_a$ ) และจะเป็นอัตราส่วนกับความเปียกชื้นของผิวหนัง เราสามารถคำนวณค่า  $E_{sk}$  ได้จากสมการ ดังนี้ (ASHRAE , 1997)

$$E_{sk} = \frac{w(P_{sk,s} - P_a)}{R_{e,cl} + 1/(f_{cl} h_e)} \quad (2.37)$$

เมื่อ	$w$	คือ ความเปียกชื้นของผิวหนัง
	$P_{sk,s}$	คือ ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิผิวหนัง , kPa
	$P_a$	คือ ความดันของไอน้ำในอากาศ , kPa
	$R_{e,cl}$	คือ ความต้านทานต่อการกลายเป็นไอของเสื้อผ้า , $(m^2 \cdot kPa) / W$
	$f_{cl}$	คือ สัดส่วนของพื้นที่ร่างกายซึ่งปกคลุมด้วยเสื้อผ้า เท่ากับ $A_{cl}/A_D$
	$h_e$	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการกลายเป็นไอ , $W / (m^2 \cdot kPa)$

จาก Fundamental Handbook, 1993

$$R_{e,cl} = R_{cl}/(i_{cl} LR) \quad (2.38)$$

เมื่อ	$LR$	คือ อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการกลายเป็นไอ ( $h_e$ ) กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน ( $h_c$ ) (Lewis Ratio) และจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามอุณหภูมิผิวหนัง ( $t_{sk}$ ) ซึ่งสามารถคำนวณด้วยสมการ ดังนี้
-------	------	--

$$LR = 15.15 (t_{sk} + 273.2) / 273.2 , (K / kPa) \quad (2.39)$$

$i_{cl}$	คือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอน้ำผ่านชั้นของเสื้อผ้า และจากการวิจัยในปี ค.ศ. 1989 ของ McCullough et al. (ASHRAE , 1997) เสื้อผ้าโดยทั่วไปที่ใช้ภายในอาคารจะมีค่า $i_{cl}$ เฉลี่ยเท่ากับ 0.34
----------	---

$$R_{cl} = 0.155 i_{cl}$$

เมื่อ  $I_{cl}$  คือ ค่าความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้า, ( $Clo$ ) สามารถคำนวณได้จากผลรวมของค่าความต้านทานความร้อนของเครื่องนุ่งห่มแต่ละชิ้นที่สวมใส่ สำหรับค่าความต้านทานความร้อนของเครื่องนุ่งห่มแต่ละชิ้นแสดงในตารางที่ 2.2

จากสมการ 2.37 ค่า  $E_{sk}$  จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความเปียกชื้นของผิวหนัง ซึ่งค่า  $w$  มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.0 ดังนั้น เราสามารถคำนวณค่าการสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอที่ผิวหนังมากที่สุด ( $E_{max}$ ) ได้จากสมการ ดังนี้

$$E_{max} = \frac{(p_{sk,s} - p_a)}{R_{e,cl} + 1/(f_{cl} h_e)} \quad (2.40)$$

นอกจากการหาค่า  $E_{sk}$  ตามสมการ 2.37 แล้ว เรายังสามารถหาค่า  $E_{sk}$  จากแนวความคิดที่ว่า “ การสูญเสียความร้อนจากผิวหนัง จะประกอบด้วยการสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอแพร่ผ่านผิวหนัง ( $E_{dif}$ ) และการสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอของเหงื่อ ( $E_{rsw}$ ) ” จากแนวความคิดดังกล่าวเราสามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$E_{sk} = E_{dif} + E_{rsw} \quad (2.41)$$

ถ้าในกรณีที่ไม่มี การสร้างเหงื่อ ค่าความเปียกชื้นที่เกิดจากการแพร่ ( $w_{dif}$ ) โดยปกติจะมีค่าประมาณ 0.06 และเมื่อนำค่า  $w_{dif}$  ดังกล่าวมาคิดในส่วนของผิวหนังที่ไม่มีเหงื่อ ( $1-w_{rsw}$ ) ค่า  $E_{dif}$  จะสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$E_{dif} = (1-w_{rsw}) 0.06 E_{max} \quad (2.42)$$

โดยที่  $w_{rsw}$  คือ ความเปียกชื้นของผิวหนังอันเกิดจากเหงื่อ มีค่าเท่ากับ  $E_{rsw}/E_{max}$

เมื่อแทนค่า  $E_{dif}$  และ  $E_{rsw}$  ในสมการ 2.41 จะได้

$$E_{sk} = (1-w_{rsw}) 0.06 E_{max} + w_{res} E_{max} \quad (2.43)$$

$$w = (1-w_{rsw}) 0.06 + w_{res}$$

$$w = 0.06 + 0.94 E_{rsw}/E_{max} \quad (2.44)$$

ในส่วนของอัตราการสูญเสียความร้อนจากการระเหยของเหงื่อ ( $E_{rsw}$ ) สามารถประมาณค่าได้จากอุณหภูมิผิวหนัง ( $t_{sk}$ ) และอุณหภูมิร่างกาย ( $t_b$ ) ด้วยสมการ(ASHRAE ,1997) ดังนี้

$$E_{rsw} = \frac{c_{sw} (t_b - t_{bset}) \exp[-(t_{sk} - 34)]}{10.7} \quad (2.45)$$

เมื่อ	$E_{rsw}$	คือ การสูญเสียความร้อนจากการกลายเป็นไอของเหงื่อ , $W/m^2$
	$c_{sw}$	คือ ค่าคงที่สำหรับควบคุมเหงื่อ มีค่าเท่ากับ $170 W/(m^2.K)$
	$t_b$	คือ อุณหภูมิของร่างกาย , $^{\circ}C$
	$t_{bset}$	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของร่างกายที่สภาวะเหมาะสม , $^{\circ}C$
	$t_{sk}$	คือ อุณหภูมิผิวหนัง , $^{\circ}C$

โดยที่เราสามารถคำนวณค่าอุณหภูมิของร่างกายจากสมการที่เป็นตัวแปรของอุณหภูมิแกนกลางร่างกาย อุณหภูมิผิวหนัง และสัดส่วนของผิวหนังต่อมวลของร่างกาย ดังนี้

$$t_{mb} = \alpha t_{sk} + (1-\alpha) t_{cr} \quad (2.46)$$

เมื่อ	$t_{mb}$	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของร่างกาย , $^{\circ}C$
	$\alpha$	คือ สัดส่วนโดยมวลของผิวหนัง ต่อ มวลของร่างกาย
	$t_{sk}$	คือ อุณหภูมิผิวหนัง , $^{\circ}C$
	$t_{cr}$	คือ อุณหภูมิแกนกลางร่างกาย , $^{\circ}C$

สำหรับค่าสัดส่วนโดยมวลของผิวหนัง ต่อ มวลของร่างกาย ( $\alpha$ ) จะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของเลือดที่ผ่านเส้นเลือดบริเวณผิวหนัง ( $m_{bl}$ ) ซึ่งจะทำให้เส้นเลือดโป่งพองต่างกันและส่งผลทำให้ค่า  $\alpha$  เปลี่ยนไปตามสมการ ดังนี้

$$\alpha = 0.0418 + 0.745/(m_{bl} - 0.585) \quad (2.47)$$

การไหลของเลือด ( $m_{bl}$ ) เป็นกระบวนการหนึ่งที่สำคัญที่ใช้ในการควบคุมสมดุลความร้อนภายในร่างกาย อัตราการไหลของเลือดจะขึ้นกับตัวแปรที่สำคัญคืออุณหภูมิแกนกลางร่างกาย ( $t_{cr}$ ) และอุณหภูมิผิวหนัง ( $t_{sk}$ ) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$m_{bl} = BFN + \frac{c_{dil}(t_{cr} - 37)}{1 + S_{tr}(34 - t_{sk})} \quad (2.48)$$

- เมื่อ  $m_{bl}$  คือ อัตราการไหลเวียนของเลือด,  $l / (m^2 \cdot hr)$   
 BFN คือ อัตราการไหลเวียนปกติของเลือด มีค่าเท่ากับ  $6.3 l / (m^2 \cdot hr)$   
 $c_{dil}$  คือ ค่าคงที่สำหรับการไหลเวียนโลหิต มีค่าเท่ากับ 175  
 $S_{tr}$  คือ ค่าคงที่สำหรับการไหลเวียน มีค่าเท่ากับ 0.5

ในการหาค่า  $t_{bset}$  สามารถหาได้ ด้วยการแทนค่าอุณหภูมิแกนกลางร่างกาย ( $t_{cr}$ ) เท่ากับ  $37^\circ C$  อุณหภูมิผิวหนัง ( $t_{sk}$ ) เท่ากับ  $34^\circ C$  และค่าสัดส่วนโดยมวลของผิวหนังต่อมวลของร่างกาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ 0.1 (เป็นสภาวะที่ทำให้ร่างกายเกิดความสมดุลทางความร้อน) ในสมการ 2.46 ดังนี้

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

จากการหาค่าตัวแปรที่กล่าวมาข้างต้นมีหลายตัวแปรที่เป็นฟังก์ชันของ  $t_{sk}$  และ  $t_{cr}$  ซึ่งเราสามารถคำนวณหาค่าของ  $t_{sk}$  และ  $t_{cr}$  ได้จากสมการสมดุลความร้อน สมการ 2.35 และ 2.36 ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

## 2.4 ดัชนีภาวะสบายเชิงความร้อน (Thermal Comfort Indices)

สภาวะแวดล้อมทางความร้อนที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดภาวะสบายเชิงความร้อนจะต้อง

ประกอบด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ทำให้ร่างกายเกิดความสมดุลทางความร้อน ตามสมการที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ภาวะสบายเชิงความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อตัวแปรที่มีต่อภาวะสบายเชิงความร้อนทั้ง 7 ตัวแปร คือ  $I_{clo}$ ,  $M$ ,  $W$ ,  $t_a$ ,  $t_{mrt}$ ,  $rh$  และ  $v$  มีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ดัชนีภาวะสบายเชิงความร้อนจะเป็นการรวมผลของแต่ละตัวแปรที่มีต่อภาวะสบายเชิงความร้อน ดัชนีภาวะสบายเชิงความร้อนที่ใช้กันในปัจจุบันมีหลายค่า แต่ในที่นี้จะขอกกล่าวถึงเฉพาะค่า PMV ค่า  $ET^*$  และค่า  $SET^*$  ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลาย และถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

### 2.3.1 Predicted Mean Vote (PMV)

ค่าดัชนีภาวะสบายเชิงความร้อนจะได้มาจากพื้นฐานการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ดังนั้น ค่าดัชนีแต่ละตัวจึงเหมาะสมที่จะใช้เฉพาะช่วงสภาวะแวดล้อมที่มีการทำการทดลองเท่านั้น ถ้าต้องการหาค่าดัชนีที่สามารถใช้งานได้กับทุกช่วงสภาวะแวดล้อม ก็ต้องทำการทดลองจำนวนมากซึ่งในทางปฏิบัติจะทำได้ค่อนข้างยาก

ในปี ค.ศ. 1970 Fanger แก้ปัญหาการหาค่าดัชนีภาวะสบายเชิงความร้อนให้สามารถใช้งานได้กับทุกช่วงของสภาวะแวดล้อม โดยเสนอสมมติฐานว่าคนที่คนจะมีภาวะสบายเชิงความร้อนที่เหมาะสม ร่างกายจะต้องมีระบบทางด้านความร้อนเป็นไปตามเงื่อนไข 3 ข้อ ดังนี้

1. ร่างกายต้องมีสมดุลทางความร้อนกับสิ่งแวดล้อมตามสมการ 2.11 ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น คือไม่มีพลังงานสะสมภายในร่างกาย
2. ความรับรู้ทางด้านความร้อน (Thermal Sensation) จะมีความเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิผิว ( $t_{sk}$ ) ซึ่งควรอยู่ในระดับที่พอเหมาะ จากการทดลองพบว่าจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราการเผาผลาญพลังงานเพิ่มขึ้น และสามารถคำนวณค่า  $t_{sk}$  ได้จากสมการ ดังนี้

$$t_{sk} = 35.7 - 0.0275(M - W), (^\circ\text{C}) \quad (2.49)$$

3. ให้พิจารณาว่าการสูญเสียความร้อนโดยเหงื่อ ( $E_{rsw}$ ) เป็นฟังก์ชันของอัตราการเผาผลาญพลังงาน และงานภายนอก ซึ่งมีสมการ ดังนี้

$$E_{rsw} = 0.42 (M - W - 58.2), (\text{W/m}^2) \quad (2.50)$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการสมดุลความร้อนแบบของ Fanger (สมการ 2.11) และแทนค่า  $t_{sk}$  จากสมการ 2.49 และ  $E_{rsw}$  จากสมการ 2.50 จะได้สมการใหม่ ดังนี้

$$\begin{aligned} M - W = & 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{mrt} + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \\ & + 3.05 [5.73 - 0.007(M - W) - P_a] + 0.42 [(M - W) - 58.2] \\ & + 0.0173 M (5.87 - P_a) + 0.0014 M (34 - t_a) \end{aligned} \quad (2.51)$$

$$\begin{aligned}
 \text{และ} \quad t_{cl} &= 3.57 - 0.0275(M-W) + R_{cl} [5.73 - 0.007(M-W) - P_a] \\
 &\quad - 0.42 [(M-W) - 58.15] - 0.0173 M (5.87 - P_a) \\
 &\quad - 0.0014 M (34 - t_a)
 \end{aligned} \tag{2.52}$$

เมื่อ  $R_{cl}$  คือ ความต้านทานการถ่ายความร้อนของเสื้อผ้า,  $(m^2 \cdot K)/W$

$$R_c = 0.155 I_{cl}$$

$I_{cl}$  คือ ความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้า, clo

$$\begin{aligned}
 h_c &= 2.38 (t_{cl} - t_a)^{0.25} \quad \text{เมื่อ} \quad 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1v^{0.5} \quad \text{หรือ} \\
 &= 12.1v^{0.5} \quad \text{เมื่อ} \quad 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1v^{0.5}
 \end{aligned} \tag{2.53}$$

$$\begin{aligned}
 f_{cl} &= 1.0 + 0.2 I_{cl} \quad \text{เมื่อ} \quad I_{cl} < 0.5 \text{ clo} \quad \text{หรือ} \\
 &= 1.05 + 0.1 I_{cl} \quad \text{เมื่อ} \quad I_{cl} > 0.5 \text{ clo}
 \end{aligned} \tag{2.54}$$

สมการภาวะสบายเชิงความร้อนที่กล่าวมาข้างต้นเป็นสมการสมดุลพลังงานระหว่างร่างกายคนกับสภาพแวดล้อม ถ้าเกิดความไม่สมดุลร่างกายจะถูกความเครียดทางด้านจิตใจกระตุ้นทำให้ผิวหนังปรับอุณหภูมิ เพื่อทำให้เกิดสมดุลที่จุดใหม่ Fanger ตั้งสมมติฐานว่าการรับรู้เชิงความร้อนที่ระดับกิจกรรมหนึ่ง ๆ จะมีความสัมพันธ์กับความเครียด เขาใช้สมการสมดุลความร้อนตามสมการ 2.51 เพื่อทำนายค่าระดับการรับรู้กับข้อมูลจากการทดลองของเขาและจากการทดลองอื่น ๆ ที่กิจกรรมต่าง ๆ ที่มีการเผยแพร่ Fanger ใช้ดัชนีการรับรู้เชิงความร้อนตาม ASHRAE ที่มี 7 ระดับ (seven-point psychophysical scale) ดังนี้ คือ

-3 คือ cold

-2 คือ cool

-1 คือ slightly cool

0 คือ neutral

+1 คือ slightly warm

+2 คือ warm

+3 คือ hot

มาใช้ในการหาค่าการรับรู้เชิงความร้อนในการทดลองเพื่อหาค่า PMV ค่า PMV คือ ค่าของการโหวตที่คาดว่าจะได้รับจากค่าเฉลี่ยของการโหวตการรับรู้เชิงความร้อนของกลุ่มคนจำนวนมากในสภาวะแวดล้อมหนึ่ง จากการทดลอง Fanger สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า PMV และค่าความไม่สมดุลพลังงานของร่างกาย (L) ตามสมการ 2.55 ได้ ดังนี้



$$PMV = (0.303 e^{-0.036M} + 0.028)*L \quad (2.55)$$

เมื่อ  $M$  คือ อัตราการเผาผลาญพลังงาน

$$\begin{aligned} L = & (M-W) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl}+273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \\ & - 3.05 [5.73 - 0.007(M-W) - P_a] - 0.42 [(M-W) - 58.2] \\ & - 0.0173 M (5.87 - P_a) - 0.0014 M (34 - t_a) \end{aligned} \quad (2.56)$$

เมื่อแทนค่า  $L$  ในสมการ 2.55 จะได้สมการใหม่ ดังนี้

$$\begin{aligned} PMV = & (0.303 e^{-0.036M} + 0.028)\{(M-W) \\ & - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl}+273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \\ & - 3.05 [5.73 - 0.007(M-W) - P_a] - 0.42 [(M-W) - 58.2] \\ & - 0.0173 M (5.87 - P_a) - 0.0014 M (34 - t_a)\} \end{aligned} \quad (2.57)$$

### 2.3.2 อุณหภูมิยังผล (Effective Temperature, ET\*)

อุณหภูมิยังผล (ET\*) คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของสภาวะแวดล้อมสมมติที่มีความร้อนคงที่และความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่ทำให้คนที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมสมมติมีการแลกเปลี่ยนความร้อนบนผิวหนังเท่ากับปริมาณที่เกิดขึ้นในสภาวะแวดล้อมจริง จากคำจำกัดความดังกล่าวการหาค่า ET\* ได้จากสมการ ดังนี้

$$ET^* = T_o + w_i \frac{LR(P_a - 0.5P_{ET^*,s})}{m} \quad (2.58)$$

เมื่อ  $T_o$  คือ Operative Temperature , K

$w$  คือ ค่าความเปียกชื้นของผิวหนัง

$i_m$  คือ ความสามารถในการซึมผ่านของเสื้อผ้า

LR (Lewis Ratio) คือ อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการระเหย ( $h_e$ ) กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา ( $h_c$ )

$P_a$  คือ ความดันบรรยากาศ, kPa

$P_{ET^*,s}$  คือ ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิ ET\* , kPa

$$T_o = \frac{h_c T_a + h_r T_{mrt}}{h_c + h_r} \quad (2.59)$$

$w = E_{sk}/E_{max}$  โดยที่ค่า  $E_{sk}$  และ ค่า  $E_{max}$  คำนวณได้จากสมการสมดุลพลังงานแบบ

Two Node Model

$$i_m = (R_{a,cl} + R_{cl}) / (R_{a,cl}/i_a + R_{cl}/i_{cl}) \quad (2.60)$$

$$R_{cl} = 0.155 I_{cl}$$

$$R_{a,cl} = 1 / (F_{cl} \cdot h)$$

$$F_{cl} = 1.0 + 0.2 I_{cl} \quad \text{เมื่อ } I_{cl} < 0.5 \quad \text{หรือ}$$

$$= 1.05 + 0.1 I_{cl} \quad \text{เมื่อ } I_{cl} \geq 0.5$$

$$h = h_c + h_r$$

$$i_a = h_c / (h_c + h_r)$$

$i_{cl}$  คือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอน้ำผ่านชั้นของเสื้อผ้า และจากการวิจัย

ในปี ค.ศ. 1989 ของ McCullough et al. (ASHRAE, 1997) เสื้อผ้าโดยทั่วไปที่ใช้ภายในอาคาร จะมีค่า  $i_{cl}$  เฉลี่ยเท่ากับ 0.34

LR จะมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยกับอุณหภูมิผิวหนัง ( $t_{sk}$ ) คำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$LR = 15.15 (t_{sk} + 273.2) / 273.2 \quad (2.61)$$

### 2.3.3 อุณหภูมิยังผลมาตรฐาน (Standard Effective Temperature, SET\*)

อุณหภูมิยังผลมาตรฐาน (SET\*) คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของสภาวะแวดล้อมสมมติที่มีความร้อนคงที่และความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่ทำให้ผู้ที่ทำการทดลองซึ่งใส่เสื้อผ้ามาตรฐานสำหรับกิจกรรมนั้น ๆ มีความเปียกชื้นรวมถึงการแลกเปลี่ยนความร้อนบนผิวหนังเท่ากับปริมาณที่เกิดขึ้นในสภาวะแวดล้อมจริง (Gagge, 1986) จากคำจำกัดความดังกล่าวการหาค่า SET\* ต้องการสภาวะมาตรฐาน ดังนี้

1. ความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้าที่สวมใส่มีความสัมพันธ์ที่มาตรฐานกับกิจกรรมตามสมการ ดังนี้

$$I_{cls} = 1.33 / [(M-W)/58.2 + 0.74] - 0.095 \quad (2.62)$$

เมื่อ  $M$  คือ อัตราการเผาผลาญพลังงาน,  $W/m^2$

$W$  คือ งานภายนอก ,  $W/m^2$

2. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน  $h'_s$  และ  $h'_{es}$  สำหรับเสื้อผ้า และความเร็วลมอยู่ในสภาวะมาตรฐาน คือ ค่าความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้าเป็นไปตามสมการ 2.62 ข้างต้น และความเร็วลมมาตรฐานเท่ากับ  $0.15 \text{ m/s}$

ดังนั้นจากคำจำกัดความ และการปรับเปลี่ยนสิ่งต่าง ๆ ให้อยู่ในสภาวะมาตรฐาน จึงสามารถหาค่า  $SET^*$  ได้จากสมการ ดังนี้

$$SET^* = T_{so} + w \frac{h'_{es}}{h'_s} (P_{so} - 0.5 P_{SET^*,s}) \quad (2.63)$$

- เมื่อ
- $T_{so}$  คือ Standard Operative Temperature , K
  - $w$  คือ ค่าความเปียกชื้นของผิวหนัง
  - $h'_{es}$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสัมผัสมาตรฐาน ,  $W / (m^2 \cdot kPa)$   
(Standard Sensible Heat Transfer Coefficient)
  - $h'_s$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแฝงมาตรฐาน ,  $W / (m^2 \cdot K)$   
(Standard Insensible Heat Transfer Coefficient)
  - $P_{so}$  คือ Standard Operative Vapor Pressure , kPa
  - $P_{SET^*,s}$  คือ ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิ  $SET^*$  , kPa

โดยตัวแปรแต่ละตัวแปรมีรายละเอียดในการคำนวณ ดังนี้

### 2.3.3.1 ค่า Standard Operative Temperature ( $T_{so}$ )

ค่า Standard Operative Temperature ( $T_{so}$ ) คือ อุณหภูมิที่สม่ำเสมอของสภาวะแวดล้อมสมมติ ซึ่งทำให้ร่างกายมีการสูญเสียความร้อนแบบสัมผัส (Sensible Heat) มีปริมาณเท่ากับที่สูญเสียในสภาวะแวดล้อมจริง ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\begin{aligned} h'(T_{sk} - T_o) &= h'_s (T_{sk} - T_{so}) \\ T_{so} &= (h'/h'_s) T_o + (1 - h'/h'_s) T_{sk} \end{aligned} \quad (2.64)$$

เมื่อ  $h'$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสัมผัส ,  $W / (m^2 \cdot K)$

$h'_s$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสัมผัสมาตรฐาน ,  $W / (m^2 \cdot K)$

$T_o$  คือ Operative Temperature , K

$T_{sk}$  คือ อุณหภูมิผิวหนัง , K

โดย  $h' = 1/(I_a + R_{cl})$

เมื่อ  $I_a = 1/[f_{cl}(h_r + h_c)]$

$$f_{cl} = 1.0 + 0.3 I_{cl}$$

$R_{cl}$  คือ ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของเสื้อผ้า ,  $(m^2 \cdot K)/W$

$$R_c = 0.155 I_{cl}$$

$I_{cl}$  คือ ความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้า , clo

เมื่อ  $h_c$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา ในที่นี้ให้คำนวณจากสมการ ดังนี้

การ ดังนี้

$$h_c = 8.6 v_r^{0.53} \quad \text{เมื่อ } 8.6 v_r^{0.53} > 5.66(M/58.2 - 0.85)^{0.39} \quad \text{หรือ}$$

$$= 5.66(M - 0.85)^{0.39} \quad \text{เมื่อ } 8.6 v_r^{0.53} < 5.66(M/58.2 - 0.85)^{0.39} \quad (2.65)$$

เมื่อ  $v_r = v + 0.05 (M - 58.2)$

$v_r$  คือ ความเร็วลมสัมพัทธ์

$M$  คือ อัตราการเผาผลาญพลังงาน

ค่า  $h'_s$  คือ ค่าของ  $h'$  ที่คำนวณในเงื่อนไขของ SET\* ซึ่งผู้ทดลองสวมใส่เสื้อผ้ามาตรฐานสำหรับกิจกรรมนั้น โดยที่ความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้าที่สวมใส่มาตรฐาน ( $I_{cls}$ ) จะมีความสัมพันธ์กับกิจกรรมตามสมการ 2.62 และค่า  $h_{cs}$  คำนวณจากสมการ 2.65 โดยคิดความเร็วลมมาตรฐานเท่ากับ 0.15 m/s

### 2.3.3.2 ความเปียกชื้นของผิวหนัง (Skin Wettedness)

ความเปียกชื้นของผิวหนัง (Skin Wettedness) คือ ตัวแปรที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนด้วยการระเหยของเหงื่ออย่างมาก สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$w = E_{sk}/E_{max} \quad (2.66)$$

ค่า  $E_{sk}$  และค่า  $(E_{sk})_{max}$  สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.41 และ 2.40 ตามลำดับ

### 2.3.3.3 ค่า Standard Operative Vapor Pressure ( $P_{so}$ )

ค่า Standard Operative Vapor Pressure ( $P_{so}$ ) คือ ความดันไอที่สม่ำเสมอของสภาวะแวดล้อมสมมติที่อุณหภูมิ  $T_{so}$  ซึ่งทำให้ร่างกายมีการสูญเสียความร้อนด้วยการระเหยที่ผิวหนัง ( $E_{sk}$ ) มีปริมาณเท่ากับที่สูญเสียในสภาวะแวดล้อมจริง ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

$$E_{sk} = w h'_e (p_{sk,s} - p_a) = w h'_{es} (P_{sk,s} - P_{so})$$

$$P_{so} = (h'_e/h'_{es}) P_a + (1 - h'_e/h'_{es}) P_{sk,s} \quad (2.67)$$

- เมื่อ  $h'_e$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการระเหย  
 $h'_{es}$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการระเหยมาตรฐาน  
 $P_a$  คือ ความดันบรรยากาศ  
 $P_{sk,s}$  คือ ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิผิวหนัง

ค่า  $h'_e$  คำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$h'_e = 1 / (R_{e,a} + R_{e,cl})$$

โดยที่  $R_{e,a} = I_a / (LR \cdot i_a)$

เมื่อ  $I_a = 1 / [f_{cl}(h_r + h_c)]$

$$f_{cl} = 1.0 + 0.3 I_{cl}$$

$I_{cl}$  คือ ค่าความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้า

$h_c, h_r$  ความหมายเหมือนที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

LR (Lewis Ratio) คือ อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการระเหย ( $h_e$ ) กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา

$i_a$  คือ ประสิทธิภาพการซึมผ่านของน้ำผ่านชั้นฟิล์มอากาศที่ผิวหนัง

มีค่าเท่ากับ  $h_c / h$

และ  $R_{e,cl} = R_{cl} / (LR \cdot i_{cl})$

เมื่อ  $R_{cl} = 0.155 I_{cl}$  , ( $m^2K/W$ )

$I_{cl}$  คือ ค่าความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้า , (clo)

LR (Lewis Ratio) ได้กล่าวรายละเอียดแล้วข้างต้น

$i_{cl}$  คือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอน้ำผ่านชั้นของเสื้อผ้า และจากการวิจัยในปี ค.ศ. 1989 ของ McCullough et al. (ASHRAE , 1997) เสื้อผ้าโดยทั่วไปที่ใช้ภายในอาคาร จะมีค่า  $i_{cl}$  เฉลี่ยเท่ากับ 0.34

ค่า  $h'_{es}$  คือ ค่าของ  $h'_e$  ที่คำนวณในเงื่อนไขของ SET\* ซึ่งผู้ทดลองสวมใส่เสื้อผ้ามาตรฐานสำหรับกิจกรรมนั้น โดยที่ความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้าที่สวมใส่มาตรฐาน ( $I_{cls}$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับกิจกรรมตามสมการ 2.62 และค่า  $h_{cs}$  คำนวณจากสมการ 2.65 โดยคิดความเร็วลมมาตรฐานเท่ากับ 0.15 m/s

เมื่อทำการแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการ 2.63 เพื่อคำนวณค่า SET\* จะพบว่า จะติดค่าที่เป็นตัวแปรของ  $t_{sk}$  การคำนวณค่า  $t_{sk}$  สามารถคำนวณได้จากสมการสมดุลความร้อนแบบ Two Node Model ตามที่กล่าวมาข้างต้น



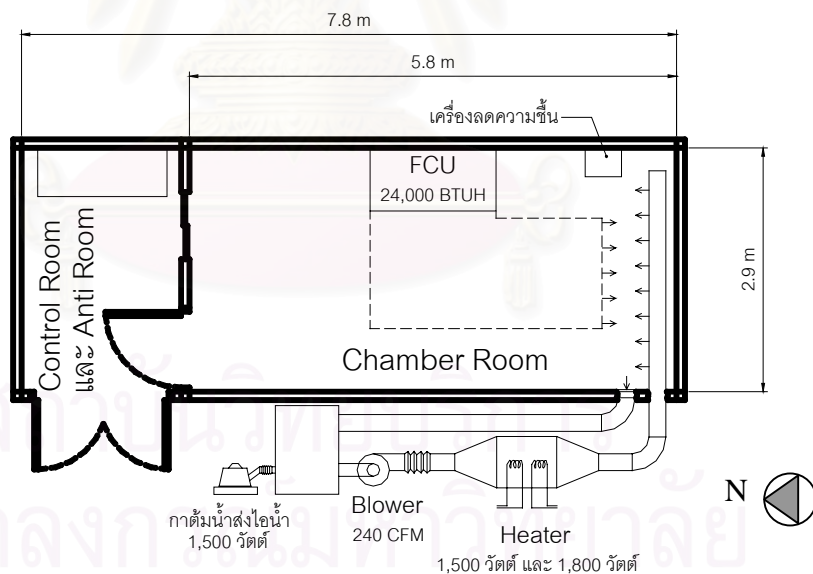
## บทที่ 3

### การทดลอง

งานวิจัยนี้ จะทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของความเร็วมต่อภาวะสบายเชิงความร้อนของคนไทย ในสภาวะอากาศร้อนชื้น โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญต่อการทดลอง คือ ห้องทดลอง การวัดค่าตัวแปรในการทดลอง ขอบเขตและเงื่อนไขการทดลอง แบบสอบถาม และวิธีการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดในแต่ละส่วน ดังนี้

#### 3.1 ห้องทดลอง

ห้องทดลองที่ใช้ในการวิจัยนี้ ตั้งอยู่ที่ตึกโคลัมโบ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีขนาดกว้าง 2.90 เมตร ยาว 7.80 เมตร และสูง 2.55 เมตร โดยมีการแบ่งห้องดังกล่าวออกเป็น 2 ส่วน คือ ห้องควบคุมการทดลอง (Control Room) และห้องทดลอง (Chamber Room) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงห้องทดลองและอุปกรณ์ประกอบห้องทดลอง

### 3.1.1 ห้อง Control Room

ห้องนี้มีขนาด กว้าง 2.00 เมตร ยาว 2.90 เมตร และสูง 2.55 เมตร ถูกใช้งานในสองช่วงเวลา คือ ในช่วงก่อนการทดลอง และช่วงระหว่างการทดลอง โดยในแต่ละช่วงเวลามีรายละเอียดการใช้งาน ดังนี้

1. ในช่วงก่อนการทดลอง ห้องนี้จะถูกใช้เป็นที่ตั้งและอธิบายวิธีการทดลอง และรายละเอียดของแบบสอบถาม พร้อมทั้งชี้แจงหน้าที่ และวัตถุประสงค์ของผู้ร่วมทดลอง หลังจากนั้น ผู้ร่วมทดลองจะถูกขอให้กรอกแบบสอบถามทั่วไป ก่อนเข้าทดลองในห้องทดลอง(ในขณะที่ผู้ร่วมทดลองอยู่ในห้องนี้จะมีการปรับสภาวะอากาศให้มีความใกล้เคียงกับสภาวะอากาศที่จะทดลองกับผู้ร่วมทดลองนั้น ๆ)

2. ในช่วงระหว่างการทดลอง ห้องนี้จะถูกใช้เป็นที่ควบคุมการทดลอง โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการทดลอง คือ ชุดควบคุมความเร็วลม ชุดควบคุมอุณหภูมิ ชุดควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ และติดตั้งอุปกรณ์แสดงผลการวัดค่าตัวแปร ซึ่งประกอบด้วย เครื่องอ่านอุณหภูมิผนังห้อง FLUKE พร้อมเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับเก็บค่าที่วัดได้ และเครื่องแสดงผลการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของห้องทดลอง

### 3.1.2 ห้อง Chamber Room

ห้องนี้มีขนาดกว้าง 2.9 เมตร ยาว 5.8 เมตร สูง 2.55 เมตร เป็นห้องที่มีการควบคุมตัวแปรสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อภาวะสบายเชิงความร้อนทั้ง 4 ค่า คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ย และความเร็วลม ให้มีค่าเป็นไปตามขอบเขตและเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งการควบคุมแต่ละตัวแปรมีรายละเอียด ดังนี้

#### 1.การควบคุมอุณหภูมิห้องทดลอง

อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดลองจะถูกควบคุมให้มีความคงที่ด้วยการจ่ายลมเย็นมาผสมกับลมร้อน เพื่อทำให้อากาศภายในห้องทดลองเกิดสมดุลทางความร้อน โดยลมเย็นได้มาจากเครื่องปรับอากาศขนาด 24,000 BUTH ต่อที่ลมมาจ่ายลมที่บริเวณหลังชุดพัดลม และลมร้อนได้มาจากพัดลมขนาด 150 CFM ส่งลมผ่านขดลวดความร้อน 2 ชุดขนาด 1,500 วัตต์ และ 1,800 วัตต์ ด้วยท่อ PVC ขนาด 4 นิ้ว ซึ่งมีลักษณะรูปแบบการส่งลมของทั้งสองส่วนแสดงในรูปที่ 3.1

ในส่วนของการกำหนดค่าอุณหภูมิห้องทดลองทำได้โดยการตั้งค่าอุณหภูมิที่ thermostat ของเครื่องปรับอากาศร่วมกับปรับปริมาณความร้อนของลมร้อน เพื่อให้อุณหภูมิห้องมีค่าคงที่ หนึ่งการปรับปริมาณความร้อนของลมร้อนสามารถทำได้โดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดความร้อนด้วยเครื่อง Variable Voltage ขนาด 10 กิโลวัตต์

## 2. การควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องทดลอง

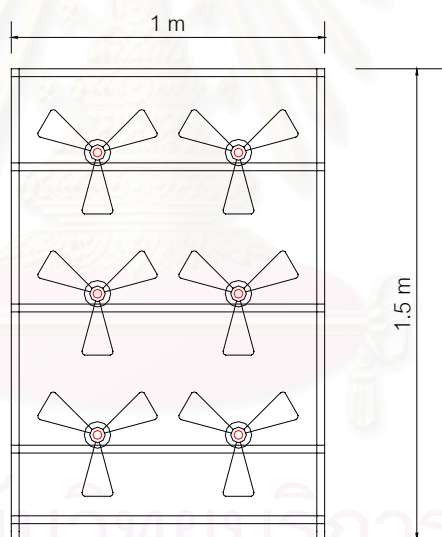
การควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องทดลองให้มีค่าคงที่ และเป็นไปตามเงื่อนไขของการทดลอง สามารถดำเนินการได้ ดังนี้ ในขั้นตอนแรก ทำการป้องกันการซึมผ่านของความชื้นตามรอยรั่วระหว่างห้องทดลองกับสภาวะแวดล้อม โดยทำการอุดรอยรั่วของห้องทดลองตามบริเวณต่าง ๆ เช่น ขอบหน้าต่าง รอยรั่วของผนัง และประตูห้อง ด้วยวิธีการติดเทปกาว และในระหว่างทำการทดลองผู้ร่วมทดลองจะต้องอยู่ในห้องทดลองตลอดเวลา ประตูเข้าห้องทดลองจะถูกปิดรอยรั่วด้วยการติดเทปกาวเช่นเดียวกัน ส่วนในขั้นที่สอง จะทำการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้มีค่าตามต้องการ โดยทำการลดความชื้นด้วยเครื่องลดความชื้น และเพิ่มความชื้นด้วยการเพิ่มไอน้ำโดยใช้กาต้มน้ำขนาด 1,500 วัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1

## 3. การควบคุมอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ย

ห้องทดลองในงานวิจัยนี้จะถูกควบคุมอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิภายในห้องทดลองด้วยการดำเนินการ 2 ขั้นตอน คือ ในขั้นแรก ทำการป้องกันไม่ให้แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นปัจจัยหลักซึ่งส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยสัมผัสกับผนังห้องทดลอง ด้วยการชิงผ้าใบป้องกันแสงอาทิตย์เฉพาะผนังห้องทดลองซึ่งได้รับแสงอาทิตย์โดยตรง แต่สำหรับผนังห้องทดลองที่ติดบริเวณทางเดินหรือผนังห้องอื่น ไม่ได้รับแสงอาทิตย์โดยตรง จึงไม่มีความจำเป็นต้องชิงผ้าใบป้องกันแสงอาทิตย์ ขั้นตอนที่สอง ลดการนำความร้อนจากภายนอกผ่านผนังห้องทดลองมายังห้องทดลอง ด้วยการเพิ่มความต้านทานความร้อนของผนังห้องทดลองสำหรับการทดลองนี้ ผนังห้องทดลองจะสร้างด้วยวิธีการขึ้นโครงไม้ในบริเวณที่จะกั้นผนัง กรูผนังสองด้านด้วยไม้อัด และนำฉนวนใยแก้วหนาประมาณ 2 นิ้ว ใส่ระหว่างไม้อัดกรูผนังทั้งสองด้าน ซึ่งเป็นการเพิ่มความต้านทานความร้อนของผนังห้องทดลองได้อย่างมาก

#### 4. การปรับความเร็วลม

ในการทดลองนี้ จะทำการทดลองที่ความเร็วลมต่างกัน 7 ระดับความเร็วลม โดยความเร็วลมในแต่ละระดับจะต้องมาจากอุปกรณ์จ่ายลมที่สามารถจ่ายลมได้อย่างสม่ำเสมอ และสัมผัสร่างกายผู้ร่วมทดลองอย่างทั่วถึงตลอดการทดลอง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงทำการสร้างอุปกรณ์จ่ายลม ซึ่งในที่นี้ขอเรียกว่า “ Wind Box” Wind Box ที่สร้างขึ้นมีความกว้าง 100 เซนติเมตร และสูง 150 เซนติเมตร สร้างจากการใช้เหล็กฉากขนาด 1 ½ นิ้ว เชื่อมยึดเป็นโครงสร้างหลัก และทำการติดตั้งชุดพัดลมที่ประกอบด้วยมอเตอร์ และใบของพัดลม จำนวน 6 ชุด โดยติดตั้งในแนวตั้ง 2 แถว แถวละ 3 ชุดดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ชุดพัดลมดังกล่าวได้นำมาจากพัดลมแบบตั้งพื้น ยี่ห้อ HITACHI รุ่นที่มีใบพัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 นิ้ว) ในส่วนของการปรับความเร็วลมนั้น ทำโดยการเปิดสวิตซ์พัดลมที่ระดับความเร็วลม 1 หรือ 2 หรือ 3 ร่วมกับการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้พัดลมด้วยเครื่อง Variable Voltage ขนาด 10 กิโลวัตต์ Wind Box ชุดที่สร้างขึ้นมานี้สามารถจ่ายลมได้ค่อนข้างสม่ำเสมอที่ความเร็วลมตามเงื่อนไขการทดลองดังแสดงในภาคผนวก ข



รูปที่ 3.2 เครื่องจ่ายลม (Wind Box)

#### 3.2 การวัดค่าตัวแปรในการทดลอง

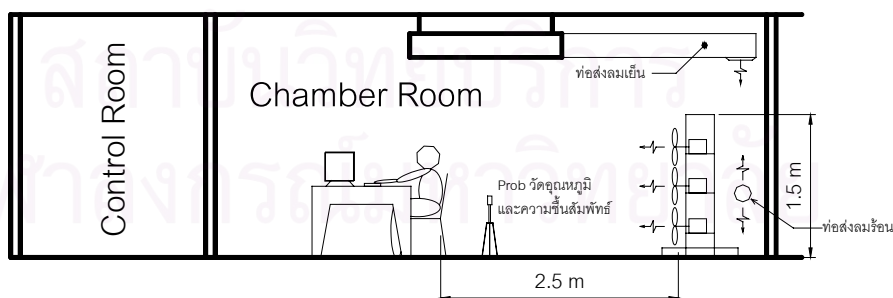
ในการทดลองนี้ จะทำการวัดค่าตัวแปรสภาวะแวดล้อมภายในห้องทดลอง คืออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้อง อุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ย และความเร็วลม โดยมีรายละเอียดการวัดค่าของแต่ละตัวแปร ดังนี้

### 3.2.1 การวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้อง

ในการทดลองนี้ จะทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ เพื่อวัตถุประสงค์ 2 ประการ คือ เพื่อใช้ในการพิจารณาความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องทดลอง และนำค่าที่ได้ใช้ในการคำนวณดัชนีชี้วัดภาวะสบายเชิงความร้อน ซึ่งการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในการทดลอง จะใช้เครื่องมือวัดที่มีลักษณะเป็น Probe ที่สามารถวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นได้ในเวลาเดียวกัน พร้อมทั้งแสดงผลเป็นตัวเลข โดยเครื่องอ่านอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ยี่ห้อ MOORE INDUSTRIES รุ่น DPD/4-20 MA/0-20.0 MA/230 AC ที่มีความละเอียดของอุณหภูมิ 0.01 องศาเซลเซียส และมีความละเอียดของความชื้นสัมพัทธ์ 0.01 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งได้รับการสอบเทียบแล้ว ดังแสดงในภาคผนวก ข

การตรวจสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในห้องทดลองจะทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในตำแหน่งต่าง ๆ ภายในห้องก่อนที่จะทำการทดลองครั้งแรก ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่ามีความค่อนข้างสม่ำเสมอ ดังแสดงผลของการวัด ตำแหน่งการวัด และการวิเคราะห์ ในภาคผนวก ค

ในส่วนของการวัดค่าเพื่อนำค่าที่ได้มาเป็นตัวแปรในการคำนวณดัชนีชี้วัดภาวะสบายเชิงความร้อนจะทำการวัดในขณะที่ทำการทดลองที่ตำแหน่งกึ่งกลางห้อง ที่ระดับความสูง 60 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (เป็นระดับความสูงเฉลี่ยของผู้ร่วมทดลองขณะนั่งทดลอง) และจะทำการจดบันทึกค่าในทุก ๆ 5 นาที ตลอดการทดลอง

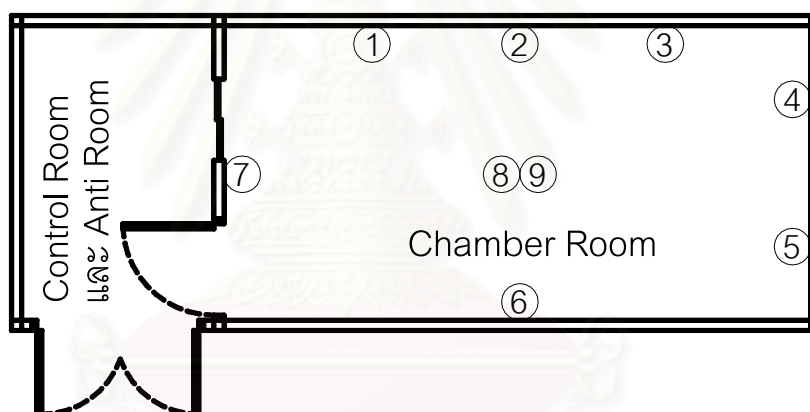


รูปที่ 3.3 แสดงตำแหน่ง Probe วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ และตำแหน่งโต๊ะที่ผู้ร่วมทดลองนั่งทดลอง

### 3.2.2 การวัดอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ย

เนื่องจากอุปกรณ์ในการวัดอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงใช้วิธีการวัดอุณหภูมิผนังห้องทดลองและนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ย ด้วยวิธีการคำนวณที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2.1

การวัดอุณหภูมิผนังในการทดลองนี้ จะทำการวัดอุณหภูมิผนัง ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั้งหมด 9 ตำแหน่งด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยใช้สาย thermo-couple ชนิด type K ที่แสดงผลเป็นตัวเลขด้วยเครื่องอ่านอุณหภูมิ ยี่ห้อ FLUKE รุ่น HYDRA 2620A ที่มีความละเอียด 0.01 องศาเซลเซียส และมีการบันทึกค่าที่วัดได้ลงในหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์ทุก ๆ 1 นาที ตลอดการทดลอง ซึ่ง สาย thermo-couple ทุกเส้นที่ใช้ได้รับการสอบเทียบแล้ว ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข



รูปที่ 3.4 แสดงตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิผนัง

### 3.2.3 การวัดความเร็วลม

การวัดความเร็วลมในการทดลองจะต้องทำการวัดแบบต่อเนื่องเช่นเดียวกับการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ แต่เนื่องจากความเร็วลมที่ได้จากพัดลม โดยการเปิดสวิตช์พัดลมที่ระดับความเร็วลมและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้พัดลมเดียวกันปกติแล้วจะมีความเร็วลมที่เท่ากันเสมอ ดังนั้น ในการทดลองนี้ จึงทำการวัดความเร็วลมที่ค่าต่าง ๆ กัน 7 ระดับความเร็วลม เฉพาะในครั้งแรกของการทดลอง โดยการวัดค่านี้ จะทำการบันทึกความเร็วลมและตำแหน่งของสวิตช์พัดลมที่เปิดพร้อมทั้งบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้พัดลมด้วย เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการทดลองในครั้งต่อไป สำหรับการทดลองนี้ ได้ทำการวัดความเร็วลมด้วยเครื่องวัด



ความเร็วลมแบบ Thermal Anemometers ยี่ห้อ AIRFLOW รุ่น TA2-30/6k แสดงผลด้วยเข็ม ที่มี ความละเอียด 0.05 m/s

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการวัดค่าความเร็วลมทั้ง 7 ค่า และตรวจสอบความสม่ำเสมอ ของความเร็วลมของแต่ละความเร็วลม ดังแสดงผลการวัด และวิธีการวัด ในภาคผนวก ก

### 3.3 ขอบเขตและเงื่อนไขการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ ทำการทดลองภายใต้ขอบเขตและเงื่อนไข ในส่วนของผู้ร่วมทดลอง สภาวะ แวดล้อม และตัวแปรอื่น ๆ ดังนี้

#### 3.3.1 ผู้ร่วมทดลอง

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ทำการทดลองที่ห้องทดลองที่ตั้งอยู่ที่ตึกโคลัมโบ ภาควิชาวิศวกรรม เครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังนั้นผู้ร่วมทดลองส่วนใหญ่จึงเป็นนัก ศึกษาอาสาสมัคร โดยผู้ร่วมทดลองมีคุณสมบัติ ดังนี้

1. ผู้ร่วมทดลองอาศัยอยู่ในกรุงเทพมหานคร เป็นเวลาอย่างน้อย 6 เดือนก่อนวันทำการ ทดลอง
2. ผู้ร่วมทดลองมีอายุระหว่าง 17 ถึง 30 ปี
3. ผู้ร่วมทดลองไม่มีอาการป่วยไข้ในขณะที่ทำการทดลอง
4. ก่อนการทดลองผู้ร่วมทดลอง ได้รับประทานอาหารอย่างปกติ มีกิจกรรมอย่างปกติ และมีการนอนหลับพักผ่อนอย่างเพียงพอ
5. ในขณะที่ทดลองผู้ร่วมทดลองจะสวมใส่เสื้อผ้าที่มีค่าความต้านทานความร้อนรวม ประมาณ 0.48 clo (ประกอบด้วยเสื้อเชิ้ตแขนยาว กางเกงผ้าขายาว ชุดชั้นใน ถุงเท้าแบบยาว และรองเท้าหุ้มส้น ดังแสดงรูปตัวอย่างในภาคผนวก ง)
6. ในขณะที่ทดลองผู้ร่วมทดลองจะนั่งทำงานที่โต๊ะที่จัดไว้ให้ โดยงานที่ทำจะมีลักษณะ คล้ายคลึงกับการทำงานในสำนักงาน เช่น ใช้คอมพิวเตอร์ อ่านหนังสือ เขียนหนังสือ เป็นต้น (มีค่า กิจกรรมประมาณ 1.2 met)
7. ในขณะที่ทดลองไม่อนุญาตให้ผู้ร่วมทดลองรับประทานอาหาร แต่สามารถดื่มน้ำ หรือรับ ประทานลูกอม ที่ผู้วิจัยได้เตรียมไว้ให้ได้

8. ในขณะที่ทดลอง ผู้ร่วมทดลองถูกขอให้อยู่ภายในห้องทดลองตลอดช่วงเวลากการทดลอง เพื่อความต่อเนื่องของการทดลอง และเป็นการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของห้องทดลองให้มีค่าคงที่

### 3.3.2 สภาวะแวดล้อม

ในการทดลอง จะทำการควบคุมตัวแปรสภาวะแวดล้อมทั้ง 4 ที่มีผลต่อภาวะสบายเชิงความร้อน ดังนี้

1. ทดลองที่อุณหภูมิห้อง 26, 28, 30 และ 32 °C
2. ทดลองที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50, 60, 70 และ 80 %
3. ควบคุมอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิห้อง
4. ทดลองที่ความเร็วลมต่างกัน 7 ค่า คือ 0.10, 0.25, 0.90, 1.64, 1.74, 1.94 และ 2.47 m/s

### 3.3.3 ตัวแปรอื่น ๆ

ตัวแปรอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ตัวแปรที่มีผลต่อภาวะสบายเชิงความร้อน เช่น ระดับเสียงและระดับความเข้มแสง ในการทดลองจะทำการควบคุมตัวแปรดังกล่าวให้มีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ของผู้ร่วมทดลอง เพื่อมิให้มีผลต่อการโหวตในคำถามที่เกี่ยวข้องกับการยอมรับได้ของสภาวะแวดล้อมในคำถามข้อ 10 ของแบบสอบถามเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมภายในห้องทดลอง ที่ผู้ร่วมทดลองจะตอบในระหว่างการทดลอง

การตรวจสอบการยอมรับได้ของระดับเสียง และระดับความเข้มแสง ได้แสดงวิธีการวัดเครื่องมือวัด และผลในภาคผนวก จ

## 3.4 แบบสอบถาม

ในการทดลองนี้ ผู้ร่วมทดลองจะถูกขอให้ตอบแบบสอบถาม 2 แบบ คือแบบสอบถามทั่วไปมีจำนวน 1 ชุด ตอบก่อนเข้าห้องทดลอง และแบบสอบถามเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมภายในห้องทดลอง มีจำนวน 15 ชุด ตอบระหว่างทำการทดลอง ซึ่งแบบสอบถามแต่ละแบบมีรายละเอียด ดังนี้

### 3.4.1 แบบสอบถามทั่วไป

ในแบบสอบถามนี้จะใช้คำถามที่เกี่ยวกับข้อมูลทั่วไปของผู้ร่วมทดลอง ประกอบด้วยคำถามเกี่ยวกับเรื่องต่าง ๆ ดังนี้ ข้อมูลทางสรีระ (เพศ อายุ น้ำหนัก และส่วนสูง) ความพร้อมของร่างกายของผู้ร่วมทดลองก่อนการทดลอง (ไม่ป่วยไข้ การนอนหลับพักผ่อนเพียงพอหรือไม่ อาหารที่รับประทานก่อนการทดลอง และกิจกรรมที่ทำก่อนการทดลอง) และรายละเอียดของเสื้อผ้าที่ผู้ร่วมทดลองสวมใส่ ดังแสดงตัวอย่างแบบสอบถามในรูปที่ 3.5

### 3.4.2 แบบสอบถามเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมภายในห้องทดลอง

ในแบบสอบถามนี้จะใช้คำถามที่ถามถึงความรู้สึกของผู้ร่วมทดลองต่อสภาวะแวดล้อมภายในห้องทดลอง ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.6 ซึ่งประกอบด้วยคำถามในเรื่องต่าง ๆ ดังนี้

1. คำถามเกี่ยวกับความรู้สึกต่ออุณหภูมิอากาศ (Thermal Sensation Vote) ใช้การโหวตแบบ Seven-point Scale ของ ASHRAE

- 3 = หนาว
- 2 = เย็น
- 1 = เย็นเล็กน้อย
- 0 = พอดี
- 1 = ร้อนเล็กน้อย
- 2 = ร้อน
- 3 = ร้อนมาก

2. คำถามเกี่ยวกับความต้องการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิอากาศ (Thermal Preference Vote) ใช้การโหวตจาก Three-point Scale ของ McIntyre

- 1 = อุณหภูมิลดลง
- 0 = ไม่เปลี่ยนแปลง
- 1 = อุณหภูมิสูงขึ้น

3. คำถามเกี่ยวกับความรู้สึกต่อความเร็วลม (Air Velocity Sensation Vote) ใช้การโหวตดังนี้

- 0 = ไม่รบกวน
- 1 = รบกวนเล็กน้อย

-2 = รบกวน

-3 = รบกวนมาก

4. คำถามเกี่ยวกับความต้องการปรับเปลี่ยนความเร็วลม (Air Velocity Preference Vote) ใช้การโหวต ดังนี้

-1 = ลดความเร็วลม

0 = ไม่เปลี่ยนแปลง

1 = เพิ่มความเร็วลม

5. คำถามเกี่ยวกับความรู้สึกต่อระดับเสียงภายในห้องทดลอง ใช้การโหวต ดังนี้

-2 = เจ็บมาก

-1 = เจ็บ

0 = ดังเล็กน้อย

1 = เสียงดัง

2 = ดังมาก

6. คำถามเกี่ยวกับการยอมรับระดับเสียงภายในห้องทดลอง ใช้การโหวต ดังนี้

1 = ได้

-1 = ไม่ได้

7. คำถามเกี่ยวกับความรู้สึกต่อระดับแสงสว่างภายในห้องทดลอง ใช้การโหวต ดังนี้

-2 = มีด

-1 = ค่อนข้างมีด

0 = พอดี

1 = ค่อนข้างสว่าง

2 = สว่างมาก

8. คำถามเกี่ยวกับการยอมรับระดับแสงสว่างภายในห้องทดลอง ใช้การโหวต ดังนี้

1 = ได้

-1 = ไม่ได้

9. คำถามเกี่ยวกับความรู้สึกต่อภาวะสบายเชิงความร้อน (Comfort Sensation Vote) ใช้การโหวต ดังนี้

- 0 = สบาย
- 1 = ไม่สบายเล็กน้อย
- 2 = ไม่สบาย
- 3 = ไม่สบายมาก

10. คำถามเกี่ยวกับการยอมรับภาวะสบายเชิงความร้อน (Thermal Acceptability Vote) ใช้การโหวต ดังนี้

- 1 = ได้
- 1 = ไม่ได้

### 3.5 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้ แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงเตรียมความพร้อมก่อนการทดลอง และช่วงทำการทดลอง โดยแต่ละช่วงมีรายละเอียด ดังนี้

#### 3.5.1 ช่วงเตรียมความพร้อมก่อนการทดลอง

ช่วงเตรียมความพร้อมนี้ใช้เวลาประมาณ 30 นาที ผู้ร่วมทดลองจะอยู่ในห้อง Control Room เพื่อรับฟังคำอธิบายถึงวิธีการทดลอง รายละเอียดของแบบสอบถาม พร้อมทั้งตอบแบบสอบถามทั่วไป นอกจากนี้ จะมีการวัดส่วนสูงและชั่งน้ำหนักผู้ร่วมทดลอง และประเด็นสำคัญของการที่ผู้ร่วมทดลองอยู่ในห้องเตรียมการทดลองก่อนการทดลองจริงนี้ จะช่วยให้ผู้ร่วมทดลองมีความคุ้นเคยกับสภาวะอากาศที่ใช้ในการทดลองนั้นก่อนการทดลองรวมถึงช่วยทำไม่ให้เกิดความกังวลในระหว่างการทดลอง

#### 3.5.2 ช่วงทำการทดลอง

ช่วงทำการทดลองจะใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง ประกอบด้วยการทดลอง 3 ช่วง คือ ช่วงไม่เปิดพัดลม (ความเร็วลมประมาณ 0.10 m/s) ช่วงความเร็วลมแปรเปลี่ยน และช่วงหาความเร็วลมที่เหมาะสม โดยแต่ละช่วงมีวิธีการดังนี้

1. ช่วงไม่เปิดพัดลม ใช้เวลาทดลองประมาณ 30 นาที ในช่วงนี้ผู้ร่วมทดลองจะถูกขอให้ตอบแบบสอบถามเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมภายในห้องทดลอง 3 ชุด ในนาทีที่ 5, 15 และ 25 ของการทดลอง โดยผู้ควบคุมการทดลองจะให้สัญญาณจากห้องควบคุมการทดลอง (ห้องนี้เป็นห้องที่ติดกับห้องทดลอง ผนังกันระหว่างสองห้องมีการเจาะช่องกระจกขนาดกว้าง 75 เซนติเมตร สูง 60 เซนติเมตร ไว้เพื่อให้ผู้ควบคุมการทดลองและผู้ร่วมทดลองสามารถสื่อสารกันด้วยการส่งสัญญาณด้วยการยกป้ายแสดงข้อความที่ต้องการสื่อสารได้) สำหรับการตอบแบบสอบถามในแต่ละชุด

2. ช่วงความเร็วลมแปรเปลี่ยนใช้เวลาทดลองประมาณ 120 นาที ในการทดลองช่วงนี้จะมีการจ่ายลมที่ความเร็วลมอย่างสุ่ม 6 ค่า คือ 0.25, 0.90, 1.64, 1.74, 1.94 และ 2.47 m/s โดยแต่ละความเร็วลมใช้เวลาประมาณ 20 นาที ระหว่างการทดลองผู้ร่วมทดลองจะถูกขอให้ตอบแบบสอบถามในนาทีที่ 35, 45, 55, 65, 75, 85, 95, 105, 115, 125, 135 และ 145 ของการทดลอง โดยผู้ควบคุมการทดลองจะส่งสัญญาณให้ผู้ร่วมทดลองตอบแบบสอบถามแต่ละชุดด้วยการยกป้ายสัญญาณผ่านช่องกระจก

3. ช่วงหาความเร็วลมที่เหมาะสม เป็นการทดลองเพื่อหาความเร็วลมที่ผู้ร่วมทดลองพึงพอใจที่สภาวะอากาศที่ทำการทดลองนั้น ๆ ในช่วงนี้ผู้ควบคุมการทดลองที่อยู่ในห้องควบคุมการทดลอง จะขอให้ผู้ร่วมทดลองแสดงความต้องการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม โดยยกป้ายสัญญาณผ่านช่องกระจกให้ผู้ควบคุมการทดลองทราบว่าต้องการ “เพิ่มความเร็วลม” หรือ “ลดความเร็วลม” หรือ “พอดี” ถ้าผู้ร่วมทดลองมีความต้องการเพิ่มหรือลดความเร็วลม ผู้ควบคุมการทดลองจะปรับค่าความเร็วลมตามนั้น หลังจากปรับความเร็วลมประมาณ 2 นาที ผู้ควบคุมการทดลองจะถามผู้ร่วมทดลองซ้ำอีกครั้งหนึ่งว่าต้องการปรับเปลี่ยนความเร็วลมภายในห้องทดลองอย่างไรด้วยการยกป้ายสัญญาณ ผู้ควบคุมการทดลองจะทำการปรับความเร็วลมตามที่ต้องการ และทำการถามซ้ำจนผู้ร่วมทดลองตอบว่า “พอดี” ติดกันสามครั้ง จึงจะจบการทดลองในช่วงนี้ โดยค่าของความเร็วลมที่ผู้ร่วมทดลองตอบว่า “พอดี” นี้ถือเป็นค่าความเร็วลมที่ผู้ร่วมทดลองพึงพอใจที่สภาวะอากาศในการทดลองนั้น

จากขั้นตอนการทดลอง และการปรับเปลี่ยนความเร็วลมในการทดลองตามที่กล่าวมาข้างต้น เราสามารถสรุปให้เห็นได้อย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8



## แบบสอบถามทั่วไป

วันเดือนปี ..... เวลา..... (ที่ทำการทดลอง)

โปรดให้ข้อมูลเกี่ยวกับตัวท่านโดยการตอบแบบสอบถามต่อไปนี้ (หากคำถามในแบบสอบถามเป็นการล่วงเกินสิทธิส่วนตัว แต่เพื่อประโยชน์ทางวิชาการ โปรดกรอกข้อมูลที่เป็นจริงด้วย และขอขอบพระคุณ ณ ที่นี้)

1. ชื่อ-นามสกุล .....
2. เพศ ชาย หญิง
3. อายุ ..... ปี..... เดือน .... วัน
4. น้ำหนัก .....กก. ส่วนสูง..... ซม.
5. ขณะนี้สภาพร่างกายของท่านเป็นอย่างไร
  - ปกติดี
  - ไม่ปกติเป็นไข้
  - ไม่ปกติเนื่องจาก.....
6. เมื่อคืนท่านนอนหลับพักผ่อนอย่างเพียงพอหรือไม่
  - เพียงพอ ( โปรดระบุจำนวนเวลาที่นอนหลับ.....ชั่วโมง)
  - ไม่เพียงพอ ( โปรดระบุจำนวนเวลาที่นอนหลับ.....ชั่วโมง)
7. กิจกรรมที่ท่านทำก่อนการทดลอง ( 3 ชั่วโมงก่อนการทดลอง )
  - เรียนหนังสือในห้องเรียน
  - อ่านหนังสือ
  - เดินทาง
  - อื่น ๆ ( โปรดระบุ .....
8. อาหารที่ท่านรับประทานก่อนการทดลอง ( 3 ชั่วโมงก่อนการทดลอง )
 

.....(โปรดระบุ)
9. ท่านสวมใส่เสื้อผ้าอย่างไรในวันทดลอง (โปรดระบุรายละเอียดแต่ละข้อ)
 

<u>สภาพบุรุษ</u>	<u>สภาพสตรี</u>
1) เสื้อ .....	1) เสื้อ .....
2) กางเกง .....	2) กางเกง หรือ กระโปรง.....
3) รองเท้า .....	3) รองเท้า .....
4) ถุงเท้า.....	4) ถุงเท้า.....
5) ชุดชั้นใน.....	5) ชุดชั้นใน.....
6) อื่น ๆ .....	6) อื่น ๆ .....

รูปที่ 3.5 แสดงตัวอย่างแบบสอบถามทั่วไป

### แบบสอบถามเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมภายในห้องทดลอง

วัน/เดือน/ปี ..... เวลาวันที่ ..... แบบสอบถามชุดที่ .....

โปรดกรอกแบบสอบถามเกี่ยวกับความรู้สึกของท่านกับสภาวะแวดล้อมในห้องทดลองในขณะนี้

1. ท่านมีความรู้สึกอย่างไรเกี่ยวกับอุณหภูมิภายในห้องทดลองในขณะนี้

หนาว      เย็น      เย็นเล็กน้อย      พอดี      ร้อนเล็กน้อย      ร้อน      ร้อนมาก

2. ท่านต้องการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิภายในห้องทดลองในขณะนี้หรือไม่อย่างไร

อุณหภูมิลดลง     ไม่เปลี่ยนแปลง     อุณหภูมิสูงขึ้น

3. ท่านมีความรู้สึกอย่างไรเกี่ยวกับความเร็วลมในห้องทดลองในขณะนี้

ไม่รบกวน       รบกวนเล็กน้อย       รบกวน       รบกวนมาก

4. ท่านต้องการปรับเปลี่ยนความเร็วลมภายในห้องทดลองในขณะนี้หรือไม่อย่างไร

ลดความเร็วลม     ไม่เปลี่ยนแปลง     เพิ่มความเร็วลม

5. ท่านมีความรู้สึกอย่างไรเกี่ยวกับระดับเสียงในห้องทดลองในขณะนี้

เสียงเบา       เสียง       ดังเล็กน้อย       เสียงดัง       ดังมาก

6. ท่านสามารถยอมรับระดับเสียงในห้องทดลองขณะนี้หรือไม่

ได้       ไม่ได้

7. ท่านรู้สึกว่าระดับแสงสว่างภายในห้องทดลองขณะนี้เป็นอย่างไรมากน้อย

มืด       ค่อนข้างมืด       พอดี       ค่อนข้างสว่าง       สว่างมาก

8. ท่านสามารถยอมรับระดับแสงสว่างในห้องทดลองขณะนี้หรือไม่

ได้       ไม่ได้

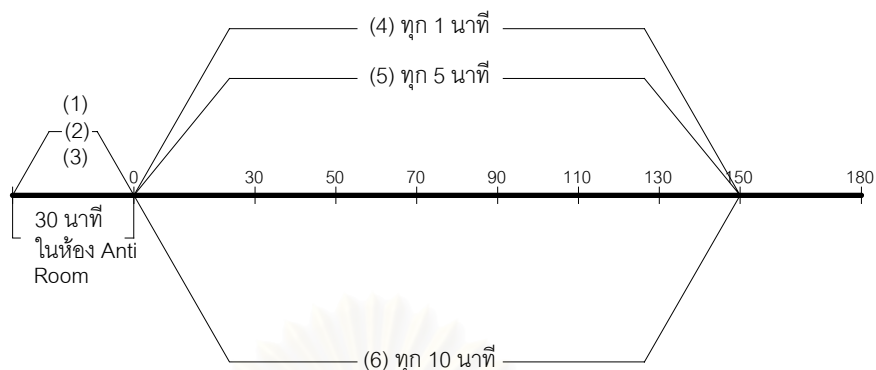
9. ท่านมีความรู้สึกอย่างไรเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมเชิงความร้อน ( สบาย หรือ ไม่สบาย )

สบาย       ไม่สบายเล็กน้อย       ไม่สบาย       ไม่สบายมาก

10. ท่านสามารถยอมรับสภาวะแวดล้อมเชิงความร้อนภายในห้องทดลองขณะนี้หรือไม่

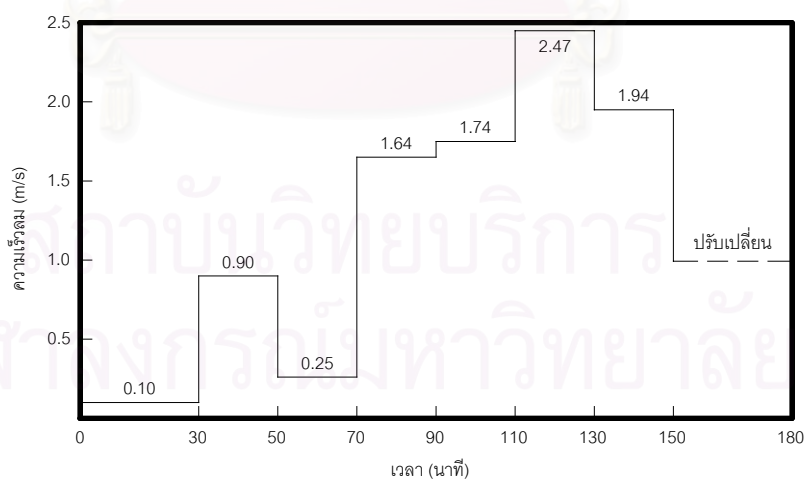
ได้       ไม่ได้ (เนื่องจาก.....)

รูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างแบบสอบถามเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมภายในห้องทดลอง



- (1) ผู้ร่วมทดลองรับฟังคำอธิบายวิธีการทดลอง และรายละเอียดแบบสอบถาม
- (2) ผู้ร่วมทดลองซ้มน้ำหนัก และวัดส่วนสูง
- (3) ผู้ร่วมทดลองตอบแบบสอบถามทั่วไป
- (4) วัดอุณหภูมิผิวหนังห้องทดลอง
- (5) วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องทดลอง
- (6) ผู้ร่วมทดลองตอบแบบสอบถามเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมภายในห้องทดลอง

รูปที่ 3.7 แสดงสรุปขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างการปรับความเร็วลมในการทดลอง

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ทำการทดลองในช่วงเดือนเมษายน ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2545 โดยได้ทำการทดลองทั้งหมด 185 การทดลอง จากผลการทดลองทั้งหมดผู้วิจัยได้นำมาคัดเลือกเฉพาะข้อมูลที่เป็นไปตามเงื่อนไขการทดลอง และเป็นข้อมูลที่น่าเชื่อถือ มาใช้ทำการวิเคราะห์ผล ดังนั้น จะใช้ข้อมูลจากการทดลองทั้งสิ้น 128 การทดลอง ที่ประกอบด้วยข้อมูลจาก 16 สภาวะอากาศตามเงื่อนไขการทดลอง แต่ละสภาวะอากาศประกอบด้วยข้อมูลจากผู้ร่วมทดลองเพศชาย 4 คน และหญิง 4 คน โดยผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลมีรายละเอียด ดังนี้

#### 4.1 ข้อมูลทางสรีระของผู้ร่วมทดลอง

จากการทดลองทั้งหมด 185 การทดลอง เลือกเฉพาะการทดลองที่เป็นไปตามเงื่อนไขการทดลอง และเป็นข้อมูลที่น่าเชื่อถือ จำนวน 128 การทดลอง โดยมีข้อมูลทางสรีระของผู้ร่วมทดลองแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดทางด้านสรีระของผู้ร่วมทดลอง

เพศ	จำนวน		อายุ (ปี)	ความสูง (เมตร)	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	พื้นที่ผิวร่างกาย <sup>(2)</sup> (ตารางเมตร)
หญิง	64	ค่าเฉลี่ย	25.87	1.61	55.93	1.57
		SD <sup>(1)</sup>	2.93	0.06	11.35	0.17
ชาย	64	ค่าเฉลี่ย	25.44	1.69	65.39	1.72
		SD	2.05	0.22	12.16	0.34
ชาย และหญิง	128	ค่าเฉลี่ย	25.66	1.65	60.66	1.65
		SD	2.54	0.17	12.67	0.27

<sup>(1)</sup> Standard Deviation

<sup>(2)</sup> คำนวณโดยใช้สมการของ DuBois equation:

$$\text{พื้นที่ผิวร่างกาย} = 0.202 \times (\text{น้ำหนัก})^{0.425} \times (\text{ความสูง})^{0.725}$$

#### 4.2 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของห้องทดลอง

เราสามารถหาอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของห้องทดลองที่แต่ละสภาวะอากาศที่ทดลองได้ โดยนำค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องที่ได้จากการบันทึกค่าทุก ๆ ชั่วโมง

นาที่ มาคำนวณค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation , SD) ที่แต่ละสภาวะอากาศที่ทำการทดลองได้ค่าแสดงในตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาค่าดังกล่าวที่แต่ละสภาวะอากาศพบว่ามีการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องทดลองเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้น ผู้วิจัยจึงใช้ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องทดลองเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ผลต่อไป

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของอากาศภายในห้องทดลองจากการวัดในการทดลอง

อุณหภูมิ ( °C)	ค่าเฉลี่ย	25.8	27.8	29.8	31.8
	SD <sup>(1)</sup>	0.14	0.12	0.36	0.15
ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ค่าเฉลี่ย	50	60	70	80
	SD	2.35	2.12	2.16	2.39

<sup>(1)</sup> Standard Deviation

#### 4.3 การยอมรับได้ของระดับเสียงและระดับความเข้มแสงภายในห้องทดลองขณะทำการทดลอง

ระดับเสียงและระดับความเข้มแสงภายในห้องทดลองขณะทำการทดลองต้องเป็นที่ยอมรับได้ของผู้ร่วมทดลอง เพื่อให้มั่นใจได้ว่าคำตอบของผู้ร่วมทดลองในคำถามข้อที่ 10 ของแบบสอบถาม (ถามว่า “ท่านสามารถยอมรับสภาวะแวดล้อมเชิงความร้อนภายในห้องทดลองขณะนี้ได้หรือไม่”) เป็นความรู้สึกที่ได้มาจากสภาวะแวดล้อมเชิงความร้อนภายในห้องทดลองอย่างเดียว ไม่ได้เป็นผลมาจากระดับเสียงและระดับความเข้มแสง การตรวจสอบความยอมรับได้ของระดับเสียงและระดับความเข้มแสงในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยทำการตรวจสอบ 2 วิธี คือ ตรวจสอบจากการวัดเทียบกับค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ และตรวจสอบจากแบบสอบถามที่ผู้ร่วมทดลองตอบในขณะทำการทดลอง (ตรวจสอบความยอมรับของระดับเสียงจากคำถามข้อที่ 5 และข้อที่ 6 และความยอมรับได้ของระดับความเข้มแสงในคำถามข้อที่ 7 และข้อที่ 8) จากการตรวจสอบความยอมรับได้ของระดับเสียงและระดับความเข้มแสงภายในห้องทดลองทั้งสองวิธี (รายละเอียดการตรวจสอบแสดงในภาคผนวก ๑) พบว่าระดับเสียงและระดับความเข้มแสงภายในห้องทดลองเป็นที่ยอมรับได้ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าระดับเสียงและระดับความเข้มแสงภายในห้องทดลองขณะทำการทดลองไม่มีผลต่อคำตอบที่เกี่ยวกับการยอมรับได้ของสภาวะแวดล้อมเชิงความร้อนในห้องทดลอง

#### 4.4 ความรู้สึกทางด้านความร้อนของเพศชายและเพศหญิงไม่มีความแตกต่าง

เมื่อนำคำตอบจากคำถามข้อที่ 1 ในแบบสอบถามที่ถามว่า “ท่านมีความรู้สึกอย่างไรเกี่ยวกับอุณหภูมิภายในห้องทดลองในขณะนี้” มาแปรเป็นตัวเลข โดยที่ “หนาว” คือ -3 “เย็น” คือ -2 “เย็นเล็กน้อย” คือ -1 “พอดี” คือ 0 “ร้อนเล็กน้อย” คือ 1 “ร้อน” คือ 2 และ “ร้อนมาก” คือ 3 แล้วนำตัวเลขที่ได้มาใช้ในการพิจารณาความแตกต่างของค่าความรู้สึกทางความร้อน (Thermal Sensation Vote) ของเพศชายและเพศหญิง ที่สภาวะต่าง ๆ โดยใช้การวิเคราะห์สถิติ (t-test) พบว่าไม่มีความแตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังแสดงรายละเอียดการคำนวณใน ภาคผนวก ข-1 ดังนั้น ต่อไปจะใช้ค่าเฉลี่ยของการตอบคำถามของเพศชายและเพศหญิงในการวิเคราะห์ผล

#### 4.5 การทำนายค่าความรู้สึกทางความร้อน (Thermal Sensation)

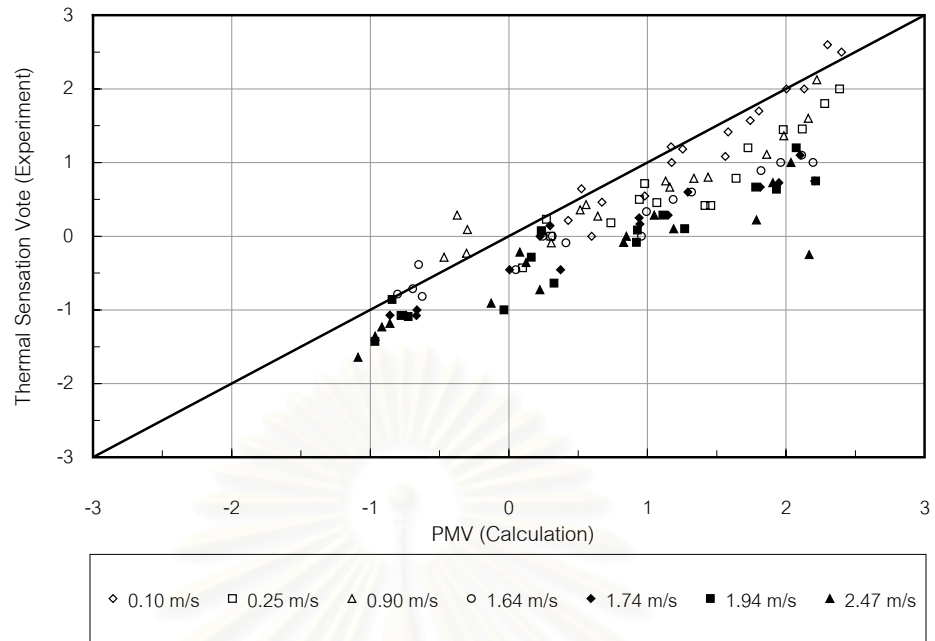
##### ในสภาวะที่มีความเร็วลมสูง

จากคำถามข้อที่ 1 ในแบบสอบถามที่ถามว่า “ท่านมีความรู้สึกอย่างไรเกี่ยวกับอุณหภูมิภายในห้องทดลองในขณะนี้” นำคำตอบที่ได้มาแปรให้เป็นตัวเลข โดยที่ถ้าตอบว่า “หนาว” คือ -3 “เย็น” คือ -2 “เย็นเล็กน้อย” คือ -1 “พอดี” คือ 0 “ร้อนเล็กน้อย” คือ 1 “ร้อน” คือ 2 และ “ร้อนมาก” คือ 3 แล้วนำตัวเลขมาใช้ในการวิเคราะห์ผล เพื่อหาดัชนีที่เหมาะสมที่จะใช้ทำนายค่าความรู้สึกทางความร้อน (Thermal Sensation) ในสภาวะที่มีความเร็วลมสูง ดังนี้

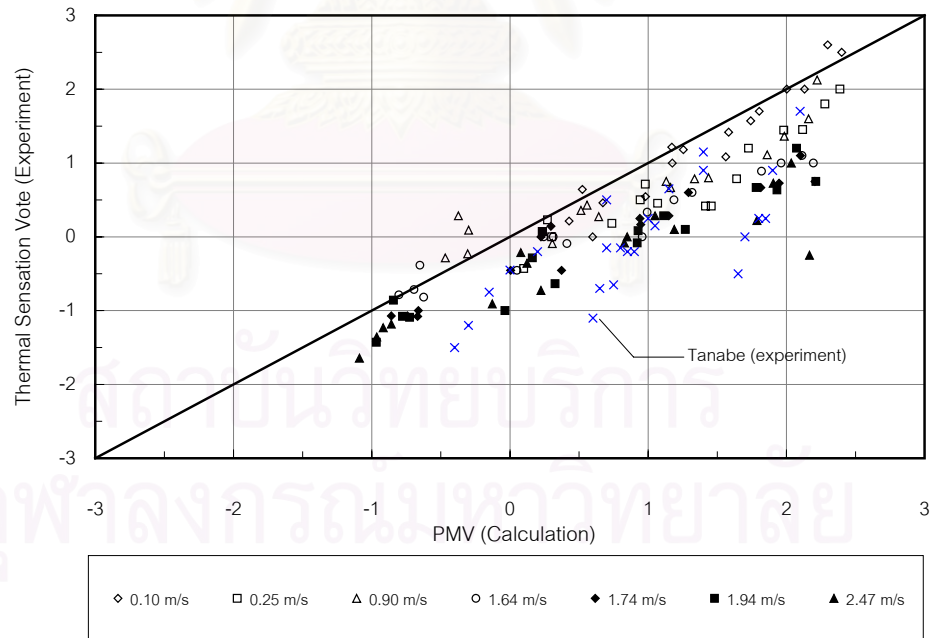
##### 4.5.1 การใช้ค่า PMV ทำนายค่าความรู้สึกทางความร้อนในสภาวะที่มีความเร็วลมสูง

เริ่มแรกลองใช้ค่า PMV ทำนายค่า Thermal Sensation Vote ของผู้ร่วมทดลอง โดยนำค่าที่ได้จากการตอบคำถามในข้อ 1 ของแบบสอบถามมาพล็อตกับค่า PMV ที่ความเร็วลม 0.10, 0.25, 0.90, 1.64, 1.74, 1.94 และ 2.47 m/s ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จุดแต่ละจุดในกราฟได้มาจากค่าเฉลี่ยของคำตอบของผู้ร่วมทดลอง 8 คน (เพศชาย 4 คน และเพศหญิง 4 คน) และค่า PMV ได้จากการคำนวณด้วยสมการ PMV ด้วยค่าสภาวะแวดล้อมจากการทดลองในขณะนั้น และเส้นทแยงมุมจากซ้ายไปขวา คือ ค่า Thermal Sensation Vote ที่ทำนายด้วยสมการ PMV เมื่อพิจารณากราฟดังกล่าวพบว่าค่า Thermal Sensation Vote ที่ได้จากการตอบแบบสอบถามของผู้ร่วมทดลองส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ PMV ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Tanabe และคณะ (Tanabe et al, 1994) ดังแสดงการเปรียบเทียบในรูปที่ 4.2





รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Thermal Sensation Vote กับค่า PMV ที่ความเร็วลม 0.10, 0.25, 0.90, 1.64, 1.74 1.94 และ 2.47 m/s

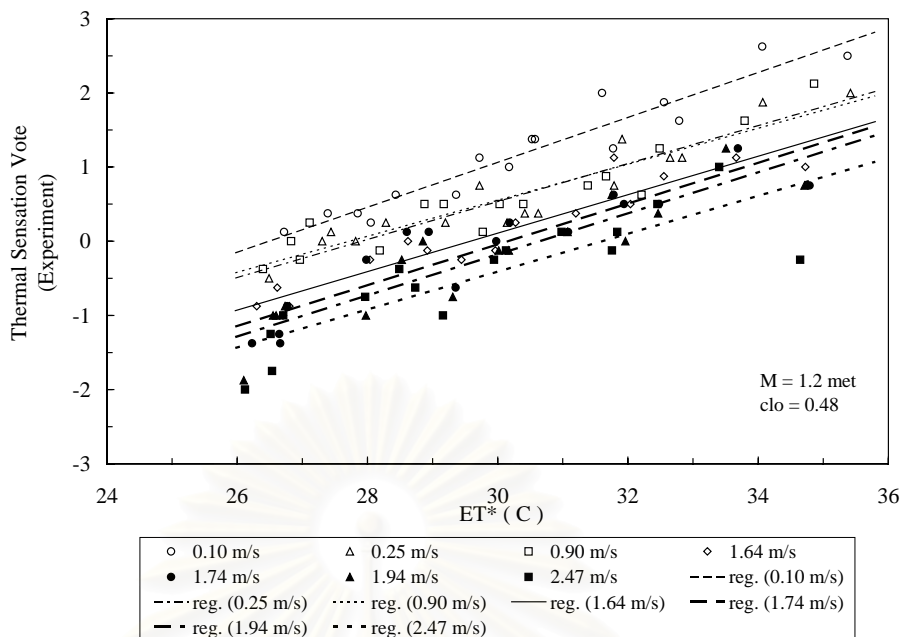


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Thermal Sensation Vote กับค่า PMV ที่ความเร็วลม 0.10, 0.25, 0.90, 1.64, 1.74 1.94 และ 2.47 m/s เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Tanabe

โดยถ้าความเร็วลมสูงขึ้นค่า Thermal Sensation Vote ที่ได้จากการทดลองจะมีความแตกต่างจากการทำนายด้วยสมการ PMV มากขึ้น Tanabe ได้อธิบายว่าสมการที่ใช้ในการคำนวณค่า PMV ไม่ได้รวมผลของการสูญเสียความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากผิวหนังเมื่อมีความเร็วลมสูงขึ้น จึงทำให้ค่า Thermal Sensation Vote ที่ได้จากการทดลองที่ความเร็วลมสูงมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ PMV ซึ่งเมื่อพิจารณาการคำนวณค่าการสูญเสียความร้อนที่ผิวหนังจากการระเหยของเหงื่อในสมการ PMV พบว่า คำนวณจากสมการที่เป็นตัวแปรของระดับกิจกรรมเท่านั้น [จากสมการ  $E_{rs} = 0.42(M-W-58.2)$ ] ซึ่งไม่ได้รวมถึงผลของความเร็วม ดังนั้น ดัชนีตัวอื่นน่าจะมีความเหมาะสมในการทำนายค่าความรู้สึกทางความร้อนในสภาวะที่มีความเร็วลมสูงมากกว่า

#### 4.5.2 การใช้ค่า ET\* ทำนายค่าความรู้สึกทางความร้อนในสภาวะที่มีความเร็วลมสูง

การใช้ค่า ET\* ทำนายค่า Thermal Sensation Vote ของผู้ร่วมทดลอง ทำได้โดยนำค่าที่ได้จากการตอบคำถามในข้อ 1 ของแบบสอบถามมาพล็อตกับค่า ET\* ที่ความเร็วลม 0.10, 0.25, 0.90, 1.64, 1.74, 1.94 และ 2.47 m/s ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยจุดแต่ละจุดที่พล็อตได้มาจากค่าเฉลี่ยของคำตอบของผู้ร่วมทดลอง 8 คน (เพศชาย 4 คน และเพศหญิง 4 คน) และค่า ET\* ได้จากการคำนวณด้วยค่าสภาวะแวดล้อมจากการทดลองในขณะนั้น กราฟแต่ละเส้นได้มาจากสมการถดถอยระหว่างค่า Thermal Sensation Vote กับค่า ET\* ที่ความเร็วลมนั้น ๆ ซึ่งสมการถดถอยและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 จากกราฟและสมการดังกล่าวเราสามารถนำไปใช้ในการทำนายค่า Thermal Sensation Vote ที่ความเร็วลมสูง สำหรับการทำงานในลักษณะงานแบบสำนักงานได้ (ระดับกิจกรรม 1.2 met) และสวมใส่เสื้อผ้าที่มีความต้านทานความร้อน 0.48 clo (ชุดมาตรฐานสำหรับชุดทำงานในสำนักงานในประเทศไทย ประกอบด้วย เสื้อผ้าแขนยาว กางเกงผ้าขายาว ชุดชั้นใน ถุงเท้าบาง และรองเท้าหุ้มส้น) ซึ่งค่าทั้งสองดังกล่าวได้มาจากการคำนวณตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 55-1992 การใช้สมการดังกล่าวทำนายค่า Thermal Sensation Vote จะต้องอยู่ในช่วงที่กำหนด เท่านั้น เนื่องจากค่า ET\* เป็นค่าดัชนีที่ได้มาจากการคำนวณที่รวมเฉพาะผลของอุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ย และความชื้นสัมพัทธ์ โดยไม่ได้รวมผลของระดับกิจกรรม ค่าความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้า และความเร็วลม



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Thermal Sensation Vote กับค่า ET\* ที่ความเร็วลม 0.10, 0.25, 0.90, 1.64, 1.74, 1.94 และ 2.47 m/s

ตารางที่ 4.3 แสดงสมการถดถอยระหว่างค่า Thermal Sensation Vote กับค่า ET\* และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ที่แต่ละความเร็วลม

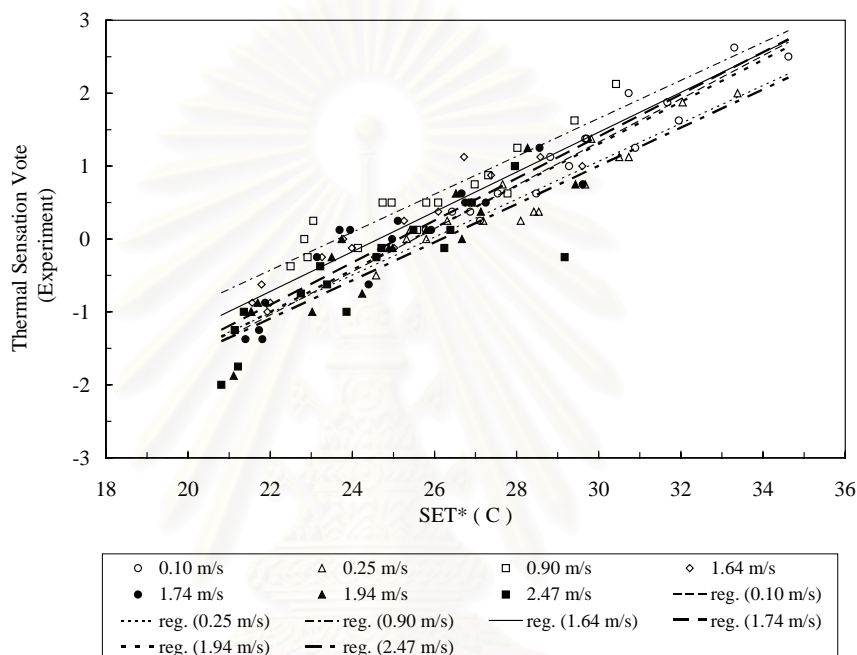
ความเร็วลม (m/s)	สมการถดถอย	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R <sup>2</sup> )
0.10	$TSV^{(1)} = 0.3028 ET^* - 8.0213$	0.9175
0.25	$TSV = 0.2560 ET^* - 7.1450$	0.8925
0.90	$TSV = 0.2427 ET^* - 6.7294$	0.8633
1.64	$TSV = 0.2591 ET^* - 7.6656$	0.9030
1.74	$TSV = 0.2748 ET^* - 8.2881$	0.8301
1.94	$TSV = 0.2764 ET^* - 8.4702$	0.8312
2.47	$TSV = 0.2552 ET^* - 8.0664$	0.7206

<sup>(1)</sup> TSV คือ Thermal Sensation Vote จากการทดลอง

#### 4.5.3 การใช้ค่า SET\* ทำนายค่าความรู้สึกทางความร้อนในสภาวะที่มีความเร็วลมสูง

จากสมการถดถอยเชิงเส้นระหว่างค่า Thermal Sensation Vote กับค่า ET\* ของแต่ละความเร็วลม ให้ค่า Thermal Sensation Vote ที่มีความแตกต่างกัน จึงไม่สามารถหาสมการที่สามารถใช้ได้กับทุกความเร็วลม ผู้วิจัยจึงลงนาค่า Thermal Sensation Vote ของผู้ร่วมทดลองที่ได้จากการตอบคำถามในข้อ 1 ของแบบสอบถาม มาพล็อตกับค่า SET\* ที่ความเร็วลม 0.10, 0.25, 0.90, 1.64, 1.74, 1.94 และ 2.47 m/s ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยจุดแต่ละจุดที่พล็อตได้มา

จากค่าเฉลี่ยของคำตอบของผู้ร่วมทดลอง 8 คน (เพศชาย 4 คน และเพศหญิง 4 คน) และค่า SET\* ได้จากการคำนวณด้วยค่าสภาวะแวดล้อมจากการทดลองในขณะนั้น กราฟแต่ละเส้น คือ เส้นสมการถดถอยระหว่างค่า Thermal Sensation Vote กับค่า SET\* ที่ความเร็วลมนั้น ๆ เมื่อพิจารณากราฟแต่ละเส้นจะเห็นว่าค่า Thermal Sensation Vote ที่ค่า SET\* เดียวกันของแต่ละความเร็วลมมีแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากค่า SET\* ได้มาจากการคำนวณด้วยสมการที่รวมผลของความเร็วมไไว้ด้วยแล้ว



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Thermal Sensation Vote กับค่า SET\* ที่ความเร็วลม 0.10, 0.25, 0.90, 1.64, 1.74, 1.94 และ 2.47 m/s

การคำนวณค่า SET\* สามารถปรับการคำนวณ เพื่อให้สมการถดถอยแต่ละเส้นในรูปที่ 4.4 มีความใกล้เคียงกันมากยิ่งขึ้น โดยเมื่อพิจารณาถึงสมการที่ใช้ในการคำนวณค่า SET\* พบว่ามีตัวแปรที่สามารถปรับปรุงการคำนวณ ซึ่งอาจจะมีผลทำให้กราฟแต่ละเส้นมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น คือ ค่าความเปียกชื้นของผิวหนัง (Skin Wettedness) และค่าความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้าที่สวมใส่ (clo-value)

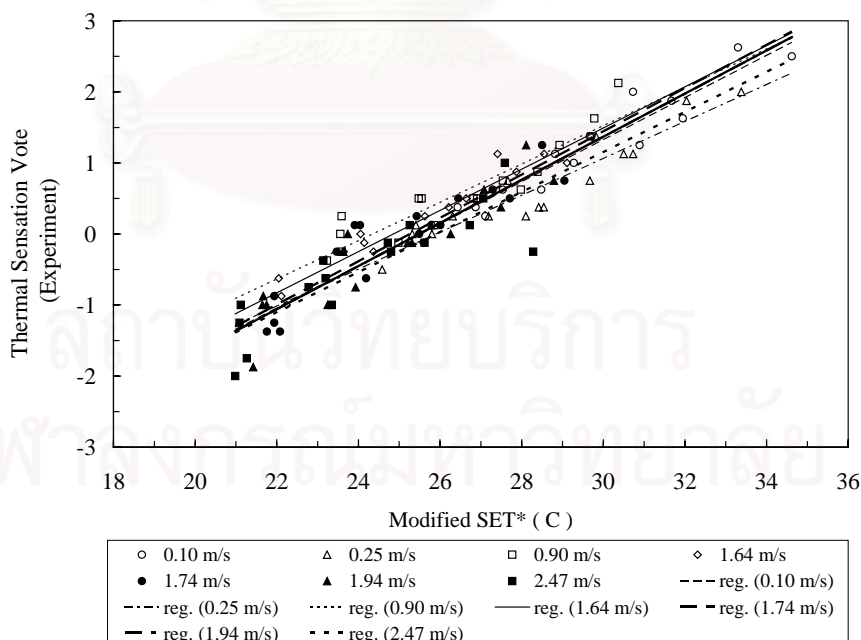
การปรับปรุงการคำนวณค่า SET\* เริ่มโดยใช้ค่า Skin Wettedness ที่ลดตามความเร็วลม จากคำแนะนำของ Tanabe (1994) พบว่า ไม่มีผลทำให้กราฟแต่ละเส้นมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ

ต่อมาทำการปรับค่าความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้าที่สวมใส่ (clo-value) ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า ค่า clo-value จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากเก้าอี้ที่ผู้ร่วมทดลองนั่งระหว่างการทดลอง (McCullough E.A. et al, 1993 และจะมีค่าลดลงเป็นฟังก์ชันกับความเร็วลม (Tanabe S. and K. Kimura, 1994) ดังนั้น จะใช้ค่า clo-value ตามสมการ 4.1

$$I_{cl} = (a + 0.48) - b \cdot \log(v) \quad (4.1)$$

เมื่อ	$I_{cl}$	คือ ค่าความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้าที่สวมใส่ , clo
	a	คือ ค่าความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้าที่สวมใส่ที่เพิ่มขึ้นจากเก้าอี้ที่นั่ง
	$b \cdot \log(v)$	คือ ค่าความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้าที่สวมใส่ที่ลดลงเนื่อง ความเร็วลม
	v	คือ ความเร็วลม , m/s

มาปรับปรุงการคำนวณค่า SET\* ทำการปรับค่า a และค่า b ไปเรื่อย ๆ พบว่า ที่ค่า a เท่ากับ 0.0584 และค่า b เท่ากับ 0.1721 เป็นค่าที่ทำให้กราฟแต่ละเส้นมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ดังแสดงในรูปที่ 4.5

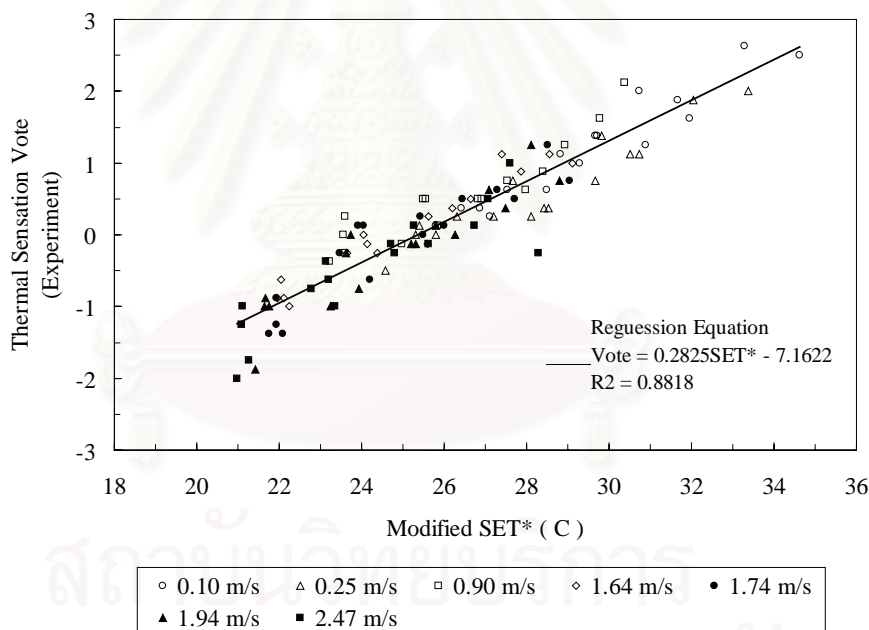


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Thermal Sensation Vote กับค่า Modified SET\* ที่ความเร็วลม 0.10, 0.25, 0.90, 1.64, 1.74, 1.94 และ 2.47 m/s

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 จะพบว่าความกว้างของกราฟในรูปที่ 4.5 (คือ ความแตกต่างของค่า Thermal Sensation Vote ของกราฟเส้นบนสุด และกราฟเส้นล่างสุด ที่ค่า Modified SET\* เท่ากับ 24 °C) จะมีค่าน้อยลงอย่างมาก คือ จากเดิมในรูปที่ 4.4 กว้างประมาณ 0.82 มาเป็น 0.44 ในรูปที่ 4.5 จากความกว้างที่ลดลงหนึ่งเท่าตัว จะทำให้ค่า SET\* มีความถูกต้องเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า ดังนั้น จากความกว้างของกราฟที่น้อยมากในรูปที่ 4.5 ทำให้เราค่อนข้างมั่นใจที่จะหาสมการถดถอยเส้นเดียว เพื่อใช้ในการประมาณค่าความรู้สึกทางความร้อน (Thermal Sensation) ได้ที่ทุกความเร็วลม ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และได้สมการถดถอย ดังนี้

$$TSV = 0.2655 SET^* - 6.5745, R^2 = 0.8666 \quad (4.2)$$

เมื่อ TSV คือ Thermal Sensation Vote  
SET\* คือ ค่า Modified SET\*

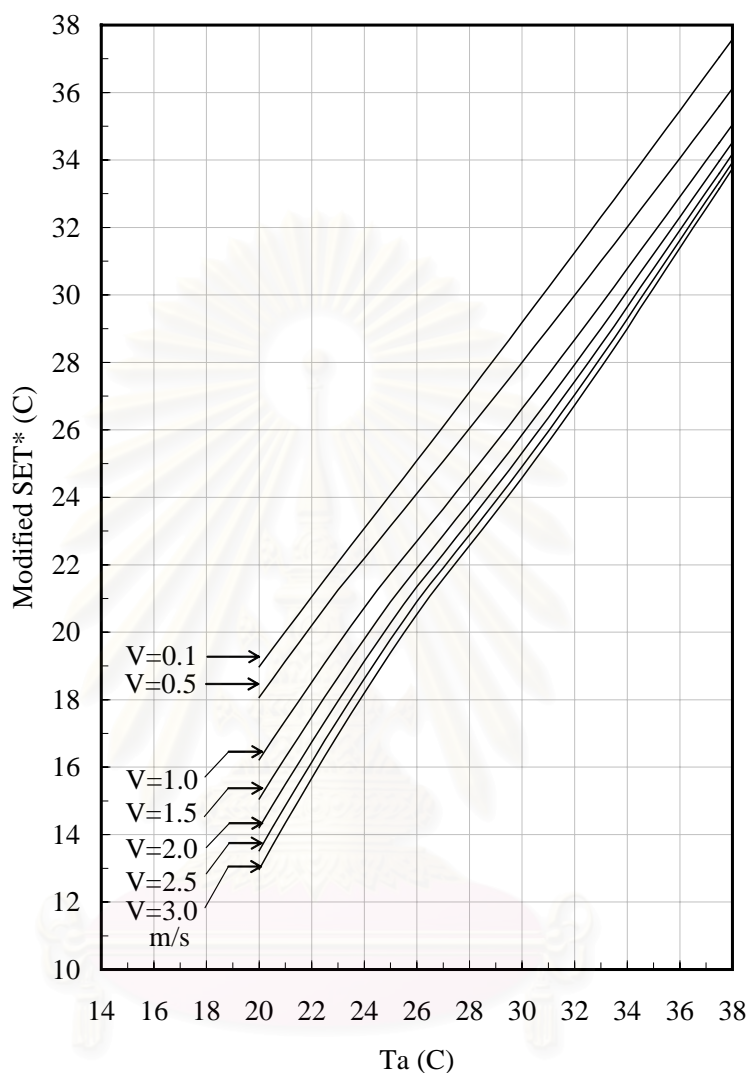


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Thermal Sensation Vote กับค่า Modified SET\* และเส้นสมการถดถอย

เพื่อให้สมการถดถอย 4.2 ง่ายต่อการใช้งาน ผู้วิจัยได้จัดทำกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modified SET\* และ อุณหภูมิอากาศ สำหรับ ความชื้นสัมพัทธ์ 65 เปอร์เซ็นต์ (เป็นความชื้นโดยเฉลี่ยของอากาศในประเทศไทย) ระดับกิจกรรม และความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้าที่สวมใส่มาตรฐานสำหรับคนไทย แสดงรูปที่ 4.7 และสำหรับที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์อื่นสามารถ



หาได้จากกราฟในภาคผนวก ซี กราฟดังกล่าวจะใช้ในการแปลงค่า Modified SET\* เป็นอุณหภูมิอากาศ ซึ่งอุณหภูมิอากาศนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบได้เลย



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modified SET\* กับ อุณหภูมิ ที่  $rh = 65\%$

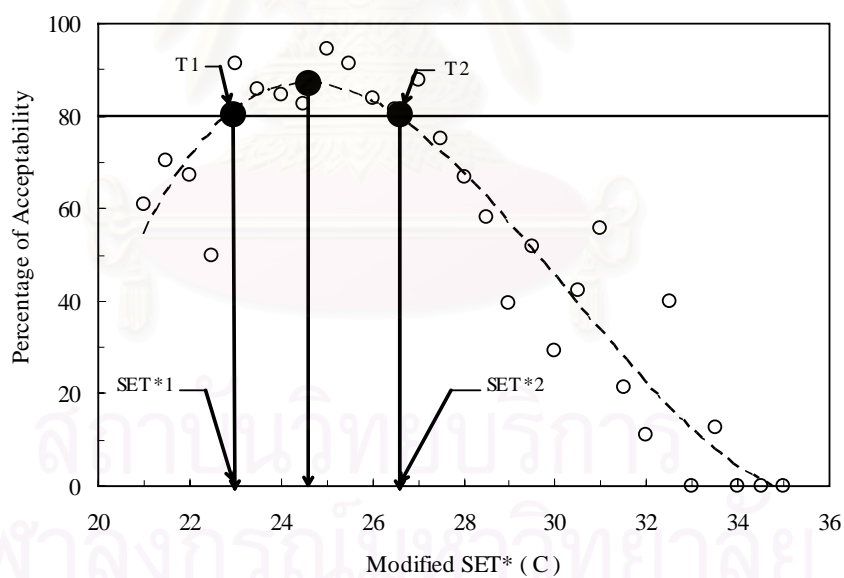
$$M = 1.2 \text{ met} \quad clo = 0.48 \quad \text{และ} \quad T_{mt} = T_a$$

#### 4.6 ช่วงที่ยอมรับสำหรับการออกแบบในสภาวะที่มีความเร็วลม

##### 4.6.1 การหาช่วงที่ยอมรับได้จากคำถามข้อที่ 10 ของแบบสอบถาม

ช่วงที่ยอมรับสำหรับการออกแบบในสภาวะที่มีความเร็วลมหาได้จากการนำคำตอบของคำถามในข้อ 10 ของแบบสอบถาม (ถามว่า “ท่านสามารถยอมรับสภาวะแวดล้อมเชิงความร้อนภายในห้องทดลองขณะนี้ได้หรือไม่”) พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Percentage of

Acceptability กับ ค่า Modified SET\* ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยที่ค่า Percentage of Acceptability คือ เปอร์เซนต์ของคำตอบที่ตอบว่า “ ได้ (1) “ ที่ค่า Modified SET\* การหาช่วงที่ยอมรับจะใช้เกณฑ์การยอมรับของมาตรฐาน ASHRAE Standard 55-1992 (Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy) คือ การยอมรับสภาวะแวดล้อมใดต้องเป็นที่ยอมรับอย่างน้อย 80 เปอร์เซนต์ เมื่อลากเส้นที่ 80 เปอร์เซนต์การยอมรับ (percentage of satisfy) ขนานกับแกน X ตัดกราฟสมการถดถอย (Regression line) ที่สองจุดคือที่จุด T1 และจุด T2 และลากเส้นจากจุดตัดขนานกับแกน Y มาตัดแกน X ที่จุด SET\*1 และจุด SET\*2 ตามลำดับ ช่วงระหว่างค่า Modified SET\* ทั้งสองนี้คือช่วงที่ผู้อาศัยยอมรับสภาวะแวดล้อมได้อย่างน้อย 80 เปอร์เซนต์ โดยที่จุดทั้งสองมีค่าประมาณ Modified SET\* = 23.0 °C และ Modified SET\* = 26.3 °C ตามลำดับ และที่จุดสูงสุดของกราฟคือจุดที่ผู้ร่วมทดลองมีการยอมรับสภาวะแวดล้อมสูงสุดค่า Modified SET\* ของจุดนี้ก็คือ Acceptable Temperature จากการลากเส้นจากจุดสูงสุดดังกล่าวขนานกับแกน Y มาตัดแกน X ที่ค่า Modified SET\* ประมาณ 24.3 °C ดังนั้น เราสามารถใช้ค่า Modified SET\* ทั้งสามในการออกแบบ เพื่อให้เกิดภาวะสบายเชิงความร้อนด้วยการใช้ความเร็วลมสูงได้

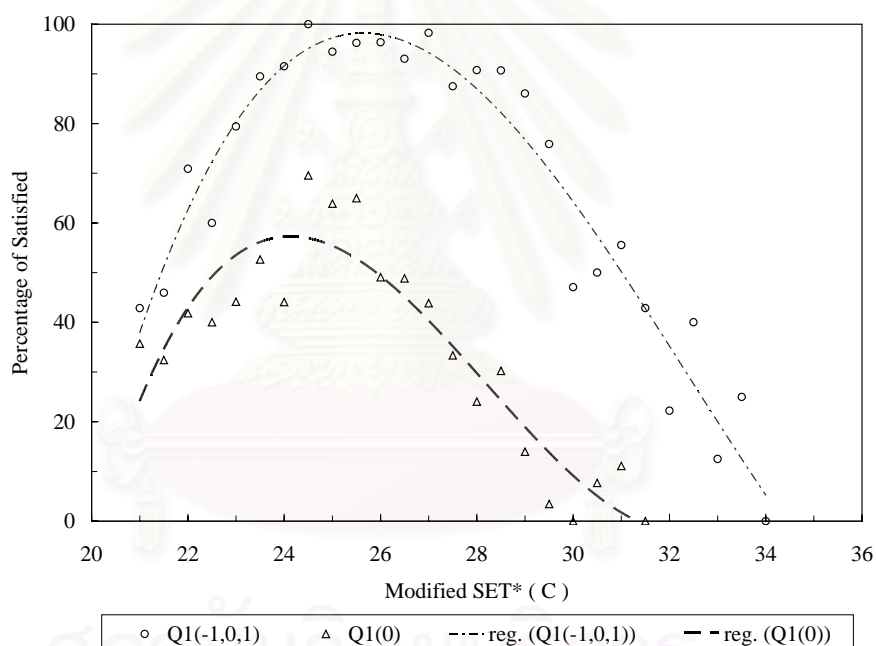


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Percentage of Acceptability กับ ค่า Modified SET\*

#### 4.6.2 การหาช่วงที่ยอมรับได้จากคำถามข้อที่ 1 และข้อที่ 9 ของแบบสอบถาม

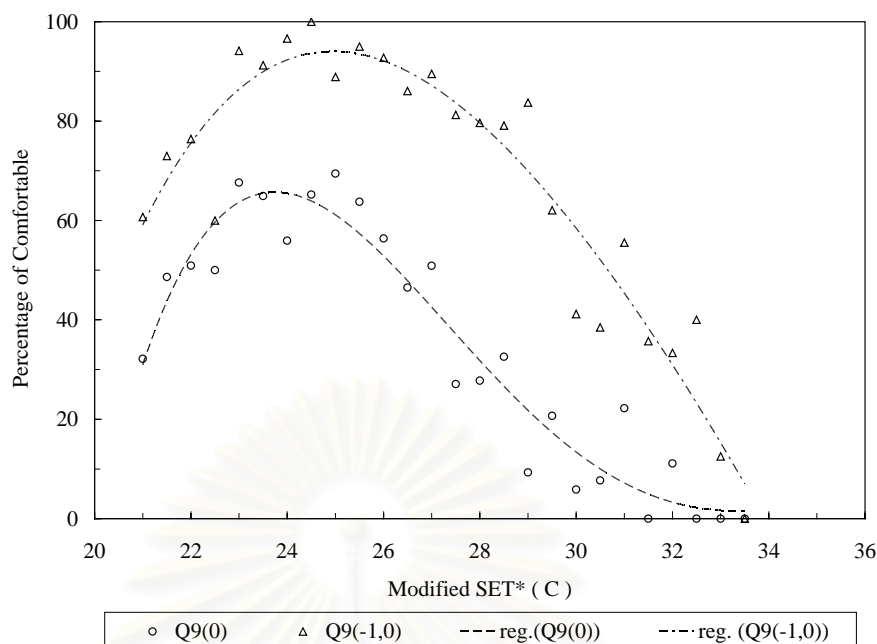
นอกจากการหาช่วงที่ยอมรับได้จากคำถามข้อที่ 10 แล้ว เรายังสามารถตรวจสอบช่วงดังกล่าวจากการหาจากคำถามข้อที่ 1 และข้อที่ 9 ของแบบสอบถามด้วยวิธีเดียวกันกับที่ใช้ในคำถามข้อที่ 10

จากคำถามข้อที่ 1 ของแบบสอบถาม (ถามว่า “ท่านมีความรู้สึกอย่างไรเกี่ยวกับอุณหภูมิภายในห้องทดลองในขณะนี้”) พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Percentage of Satisfied กับ ค่า Modified SET\* ดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยค่า Percentage of Satisfied คือ เปอร์เซนต์ของคำตอบที่ตอบว่า “พอดี (0)” และตอบว่า “เย็นเล็กน้อย (-1) หรือ พอดี (0) หรือ ร้อนเล็กน้อย (1)” ที่ค่า Modified SET\* นั้น ๆ



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระหว่าง Percentage of Satisfied กับค่า Modified SET\*

และจากคำถามข้อที่ 9 ของแบบสอบถาม [ถามว่า “ท่านมีความรู้สึกอย่างไรเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมเชิงความร้อน (สบาย หรือ ไม่สบาย)”) พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Percentage of Comfortable กับ ค่า Modified SET\* ดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยค่า Percentage of Comfortable คือ เปอร์เซนต์ของคำตอบที่ตอบว่า “สบาย (0)” และตอบว่า “สบาย (0) หรือ ไม่สบายเล็กน้อย (-1)” ที่ค่า Modified SET\* นั้น ๆ



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Percentage of Comfortable กับค่า Modified SET\*

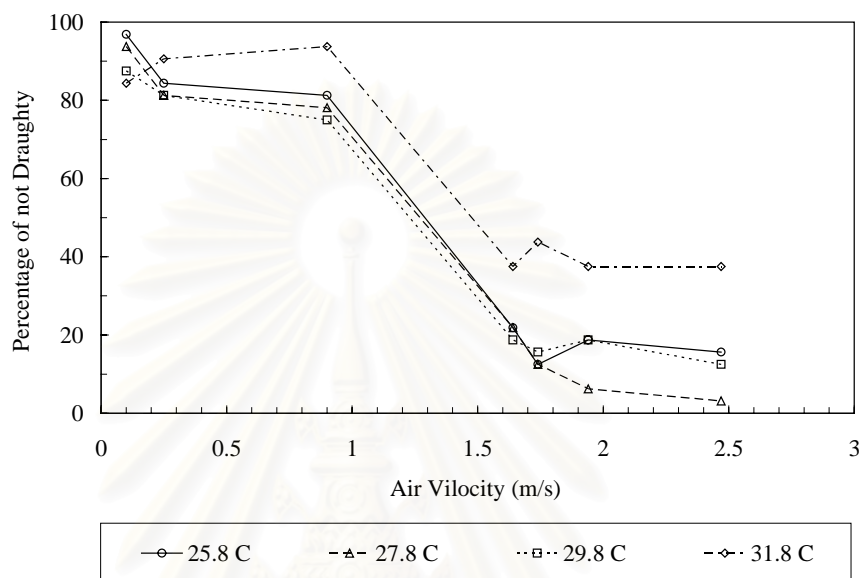
ช่วง Modified SET\* ของกราฟเส้นบนคือช่วงกว้างที่สุด หรือ ค่าสูงสุดและต่ำสุดที่ยอมรับได้สำหรับภาวะสบายเชิงความร้อนภายใต้ความเร็วลมสูง ที่ค่า Modified SET\* ต่ำสุดจะทำให้รู้สึกเย็นเล็กน้อยหรือไม่สบายเล็กน้อย และที่ค่า Modified SET\* สูงสุดจะทำให้รู้สึกร้อนเล็กน้อยหรือไม่สบายเล็กน้อย

ค่าทั้งสองเป็นการตรวจสอบค่าสูงสุดและต่ำสุดของค่า Modified SET\* ที่ยอมรับได้จากรูปที่ 4.8 และเมื่อลากเส้นจากจุดสูงสุดของกราฟเส้นล่างของทั้งสองรูปมาตัดแกน X ก็จะได้ค่า Neutral SET\* คือ ค่า SET\* ที่ทำให้รู้สึกทางความร้อน (Thermal Sensation) มีค่าพอดี (ไม่ร้อนไม่เย็น) และค่า Comfortable SET\* คือ SET\* ที่ทำให้มีความรู้สึกสบาย ค่าทั้งสองดังกล่าวเป็นค่าที่ได้รับการตอบมากที่สุดจึงเป็นค่าที่ยอมรับมากที่สุดของแต่ละคำถาม

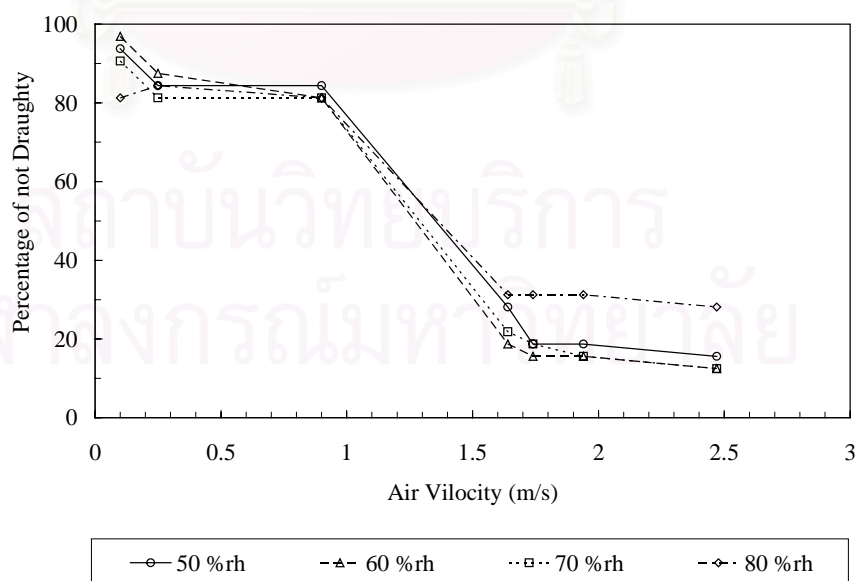
#### 4.7 ความเร็วลมที่ไม่รบกวน (Air Velocity for Not Draughty)

จากคำถามข้อที่ 3 ในแบบสอบถามที่ถามว่า “ ท่านมีความรู้สึกอย่างไรเกี่ยวกับความเร็วลมในห้องทดลองในขณะนี้ ” พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Percentage of not Draughty กับ ค่าความเร็วลม ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 โดยค่า Percentage of not Draughty คือ เปอร์เซ็นต์ของคำตอบที่ตอบว่า “ไม่รบกวน (0)”ที่ค่าความเร็วลม นั้น ๆ

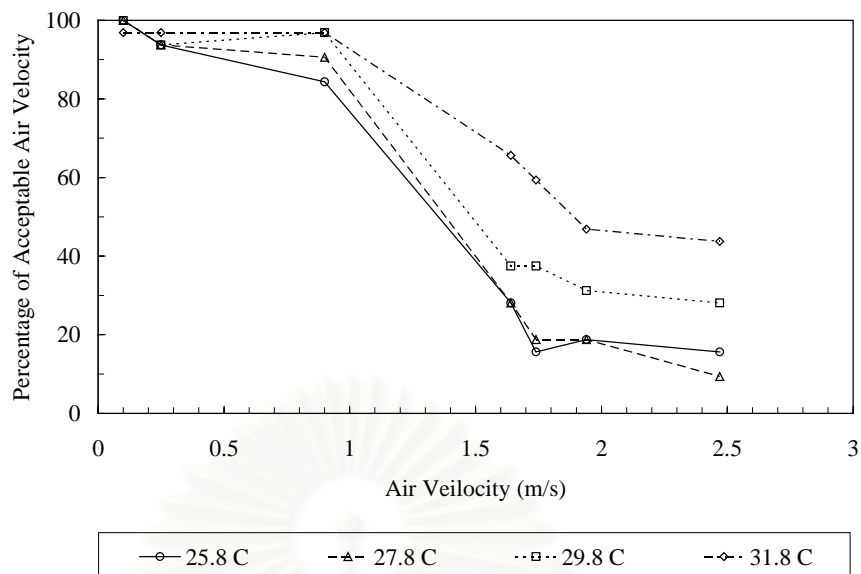
และจากคำถามข้อที่ 4 ในแบบสอบถามที่ถามว่า “ท่านต้องการปรับเปลี่ยนความเร็วลมภายในห้องทดลองในขณะนี้หรือไม่” พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Percentage of Acceptable Air Velocity กับ ค่าความเร็วลม ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 โดยค่า Percentage of Acceptable Air Velocity คือ เปอร์เซ็นต์ของคำตอบที่ตอบว่า “ไม่เปลี่ยนแปลง (0) หรือ เพิ่มความเร็วลม (1)” ที่ค่าความเร็วลม นั้น ๆ



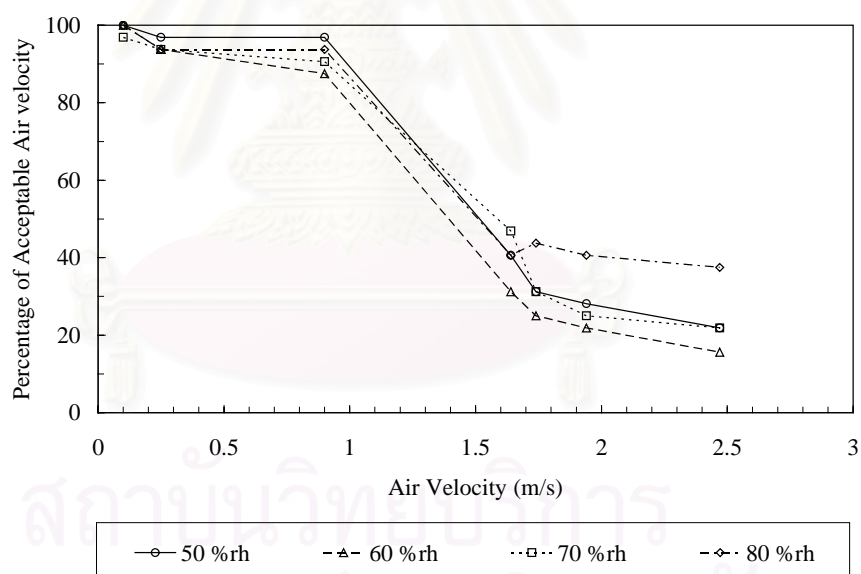
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Percentage of not Draughty กับ ค่าความเร็วลม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Percentage of not Draughty กับ ค่าความเร็วลม ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Percentage of Acceptable Air Velocity กับ ค่าความเร็วลม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Percentage of Acceptable Air Velocity กับ ค่าความเร็วลม ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความเร็วลมที่ไม่รบกวนจะมีค่าสูงขึ้นด้วย และจากรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อค่าความเร็วลมที่ไม่รบกวนน้อยค่อนข้างน้อย ถ้าทำการหาความเร็วสูงสุดที่ไม่รบกวนจากค่า



80 เปอร์เซ็นต์ ของ Not Draughty และ Acceptable Air Velocity จากรูปที่ 4.10 ถึง รูปที่ 4.13 พบว่า ความเร็วสูงสุดที่ไม่รบกวนมีค่าประมาณ 0.9 m/s

#### 4.8 ความเร็วลมที่พึงพอใจ (Preferred Air Velocity)

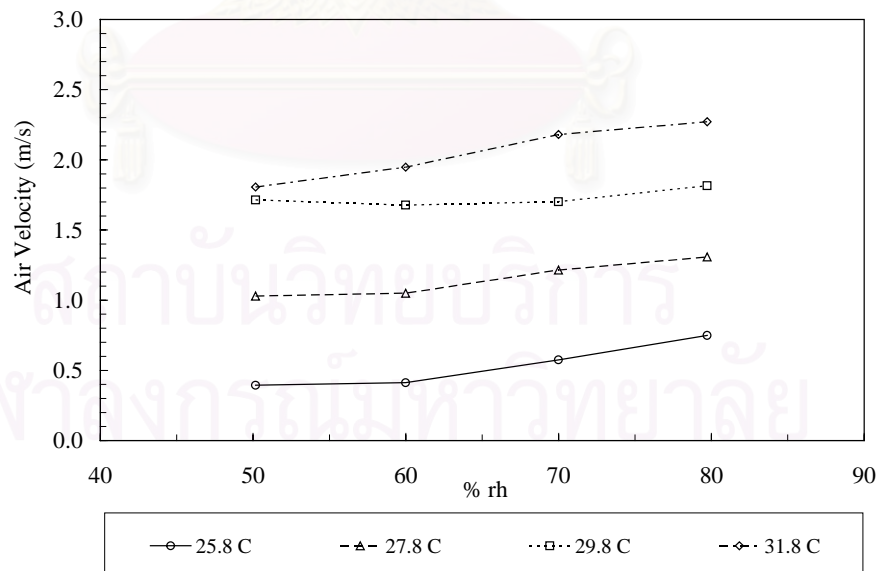
จากการทดลองช่วงสุดท้าย จะได้ความเร็วลมที่ผู้ร่วมทดลองพึงพอใจแสดงในตารางที่ 4.4 ค่าในตารางแยกความเร็วที่พึงพอใจของแต่ละเพศ ซึ่งได้มาจากค่าเฉลี่ยของความเร็วลมที่ผู้ร่วมทดลองแต่ละคนพึงพอใจ ความเร็วลมที่พึงพอใจระหว่างเพศชาย และเพศหญิง มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อทำการวิเคราะห์สถิติ (t-test) พบว่าไม่มีความแตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังแสดงรายละเอียดการคำนวณใน ภาคผนวก ข-2 และเมื่อนำความเร็วลมที่พึงพอใจเฉลี่ยของเพศหญิงและเพศชายจากตารางที่ 4.4 มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วลมที่พึงพอใจ กับ ความชื้นสัมพัทธ์ แสดงในรูปที่ 4.15 และพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วลมที่พึงพอใจ กับ อุณหภูมิอากาศ แสดงในรูปที่ 4.16

พิจารณารูปที่ 4.15 พบว่าเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นความเร็วลมที่พึงพอใจจะมีค่ามากขึ้นด้วย โดยเฉพาะช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 60 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ และในรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อความเร็วลมที่พอใจน้อยกว่าอุณหภูมิมาก

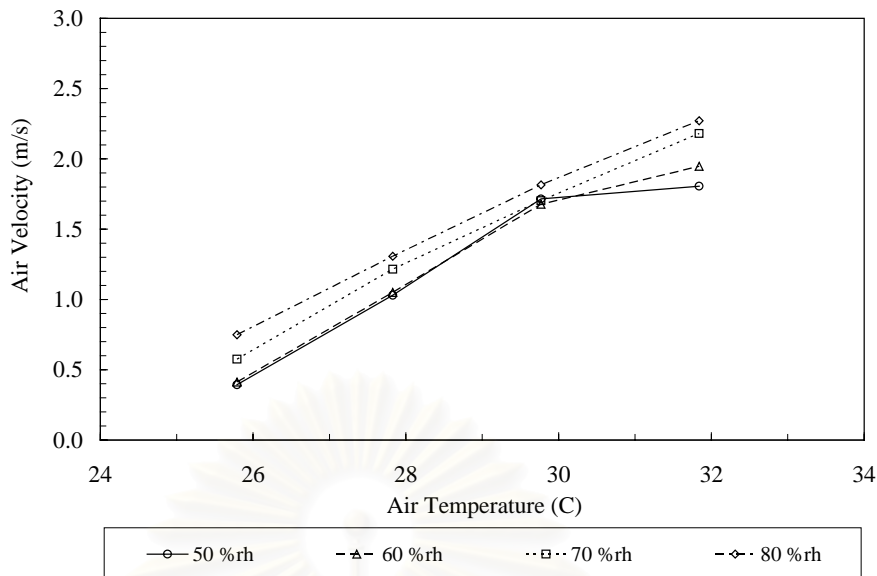
ค่าความเร็วลมที่พึงพอใจในตารางที่ 4.4 มีค่าสูงกว่าค่าความเร็วลมสูงสุดที่ไม่รบกวน (ค่าสูงสุดประมาณ 0.9 m/s) จากการวิเคราะห์ในข้อ 4.5 เนื่องมาจากการทดลองช่วงหาความเร็วที่พึงพอใจ ผู้ร่วมทดลองทำการตอบคำถามด้วยป้ายสัญญาณ ไม่ได้ทำงานอย่างอื่นด้วยเหมือนในขณะตอบคำถามในแบบสอบถามที่มีลักษณะการทำงานเหมือนงานในสำนักงาน ดังนั้น ในช่วงทดลองหาความเร็วลมที่พึงพอใจผู้ร่วมทดลองจึงมีลักษณะกิจกรรมที่เรียกว่า No Stress Condition ความเร็วลมที่พึงพอใจที่ได้จากตารางที่ 4.4 จึงเหมาะสมที่จะใช้ออกแบบสำหรับสภาวะที่ผู้อยู่อาศัยทำกิจกรรมแบบ No Stress Condition เช่น นั่งพักผ่อน เดินเล่น นั่งดูโทรทัศน์ เป็นต้น

ตารางที่ 4.4 Preferred Air Velocity

อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	เพศหญิง	เพศชาย	เพศหญิง และเพศชาย
25.8	50	0.38	0.41	0.39
	60	0.41	0.41	0.41
	70	0.58	0.58	0.58
	80	0.74	0.76	0.75
27.8	50	0.98	1.09	1.03
	60	1.05	1.05	1.05
	70	1.27	1.16	1.22
	80	1.35	1.27	1.31
29.8	50	1.74	1.69	1.72
	60	1.64	1.72	1.68
	70	1.72	1.69	1.70
	80	1.79	1.84	1.82
31.8	50	1.87	1.74	1.81
	60	1.92	1.97	1.95
	70	2.16	2.21	2.18
	80	2.21	2.34	2.27

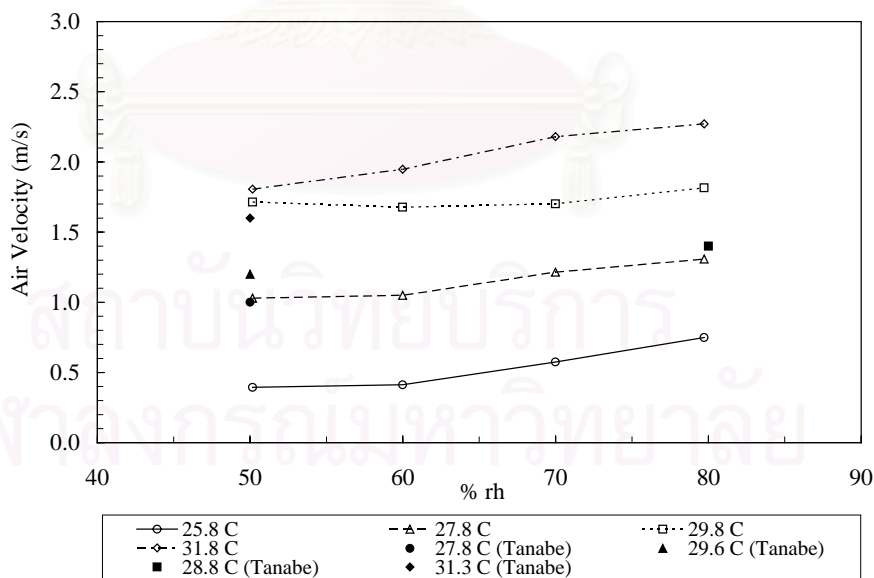


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Preferred Air Velocity กับ ความชื้นสัมพัทธ์

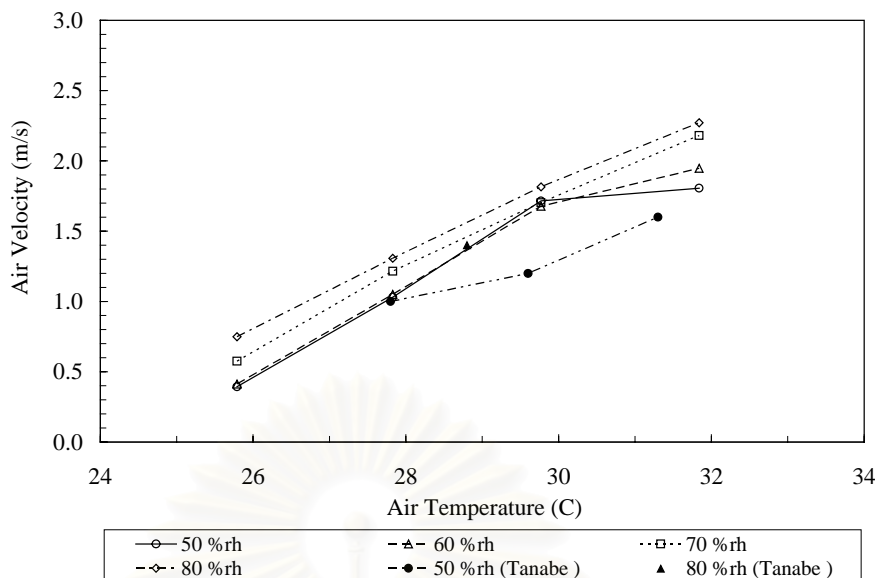


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Preferred Air Velocity กับ อุณหภูมิอากาศ

เมื่อนำค่าความเร็วลมที่พึงพอใจที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Tanabe และคณะ (1994) พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกันอย่างมาก ดังแสดงการเปรียบเทียบในรูปที่ 4.17 และ รูปที่ 4.18



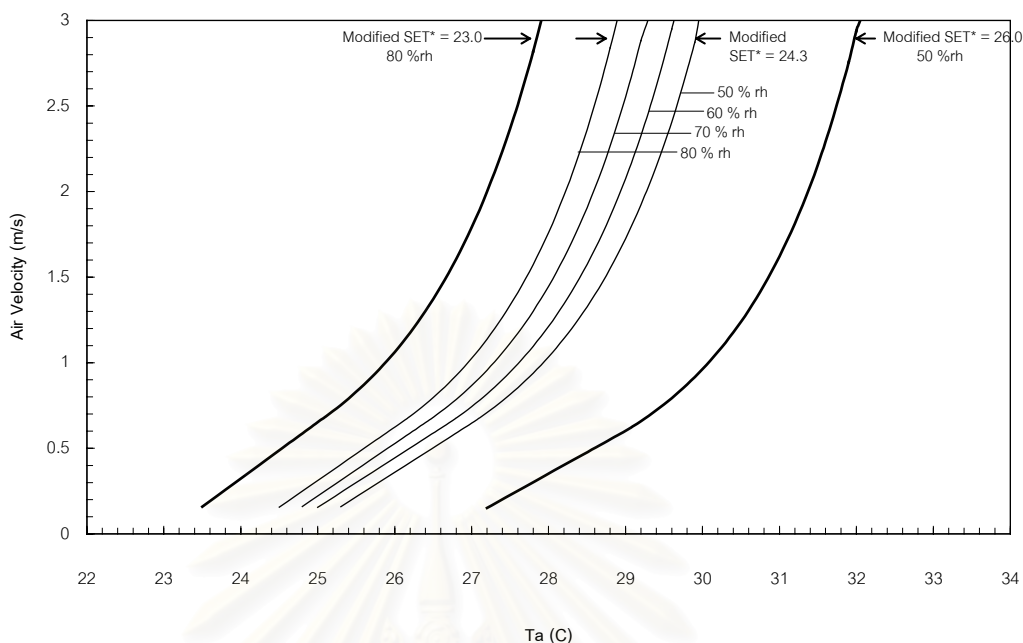
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Preferred Air Velocity กับ ความชื้นสัมพัทธ์ เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Tanabe และคณะ (1994)



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Preferred Air Velocity กับ อุณหภูมิอากาศ  
เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Tanabe และคณะ (1994)

#### 4.9 Comfort Chart under High Air Velocity in Hot and Humid Climate

สำหรับช่วงที่ยอมรับได้สำหรับการออกแบบในสภาวะที่มีความเร็วลมของค่า Modified SET\* คือ มีค่าระหว่าง  $23.0^{\circ}\text{C}$  และ  $26.3^{\circ}\text{C}$  โดยมีค่า Modified SET\* เท่ากับ 24.3 เป็นค่าที่ผู้ร่วมทดลองยอมรับมากที่สุด เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้สะดวกผู้วิจัยได้ทำการคำนวณย้อนกลับที่ค่า Modified SET\* แต่ละค่าเพื่อพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับอุณหภูมิอากาศ และขอบเขตของภาวะสบายเชิงความร้อน โดยกำหนดให้ระดับกิจกรรมมีค่าเท่ากับ 1.2 met ความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้ามีค่าเท่ากับ 0.48 clo และอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยเท่ากับอุณหภูมิอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 โดยเส้นกราฟทางด้านซ้ายสุดของรูป คือ เส้นกราฟที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับจากค่า Modified SET\* เท่ากับ  $23.0^{\circ}\text{C}$  ที่ความชื้น 80 เปอร์เซ็นต์ เส้นกราฟดังกล่าวเป็นเส้นขอบเขตที่ทำให้รู้สึกเย็นที่ยังยอมรับได้ ส่วนเส้นกราฟทางด้านขวาสุดของรูป คือ เส้นกราฟที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับจากค่า Modified SET\* เท่ากับ  $26.3^{\circ}\text{C}$  ที่ความชื้น 50 เปอร์เซ็นต์ เส้นกราฟดังกล่าวเป็นเส้นขอบเขตที่ทำให้รู้สึกร้อนที่ยังยอมรับได้ และสำหรับเส้นกราฟ 4 เส้น บริเวณกลางรูป คือ เส้นกราฟที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับจากค่า Modified SET\* เท่ากับ  $24.3^{\circ}\text{C}$  ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80, 70, 60 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับจากซ้ายมาขวา เส้นกราฟดังกล่าวเป็นบริเวณที่ทำให้ผู้ร่วมทดลองยอมรับสภาวะแวดล้อมได้มากที่สุด



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมที่สบาย กับ อุณหภูมิอากาศ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50 60 70 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ที่  $M = 1.2 \text{ met}$   $\text{clo-value} = 0.48$  และ  $T_{\text{mrt}} = T_a$

จากรูปที่ 4.18 เมื่อลากเส้นขนานแกน X ที่ความเร็วลม 0.2 m/s ตัดเส้นกราฟที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์ จากจุดตัดดังกล่าวลากเส้นขนานกับแกน Y มาตัดแกน X ได้ค่าอุณหภูมิประมาณ  $25.5^{\circ}\text{C}$  ค่าอุณหภูมิที่ได้นี้ คือ ค่าอุณหภูมิสบาย เมื่อนำค่าอุณหภูมิสบายดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิสบายจากงานวิจัยของ คุณประพนธ์ วงษ์ท่าเรือ (2535) (ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 8.4 ในวิทยานิพนธ์ของคุณประพนธ์) คือ อุณหภูมิสบาย ที่ได้จากการโหวตจากสถานที่จริงในประเทศไทยมีค่าเท่ากับ  $25.4^{\circ}\text{C}$  จากการทดลองของ Fanger ในห้องทดลองประเทศเดนมาร์กมีค่าเท่ากับ  $25.7^{\circ}\text{C}$  จากการทดลองของ Nevins ในห้องทดลองประเทศสหรัฐอเมริกา มีค่าเท่ากับ  $25.6^{\circ}\text{C}$  และจากการทดลองของ Tanabe ในห้องทดลองประเทศญี่ปุ่นมีค่าเท่ากับ  $26.3^{\circ}\text{C}$  พบว่าค่าอุณหภูมิสบายที่ได้จากกราฟมีค่าใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิสบายที่ได้จากการวิจัยในอดีต

และจากรูปที่ 4.18 เช่นกัน ถ้าลากเส้นขนานแกน X ที่ความเร็วลม 0.9 m/s (ความเร็วลมที่ไม่รบกวน) ตัดเส้นกราฟที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์ จากจุดตัดดังกล่าวลากเส้นขนานกับแกน Y มาตัดแกน X จะได้ค่าอุณหภูมิประมาณ  $27.8^{\circ}\text{C}$  ค่าอุณหภูมิที่ได้นี้ คือ อุณหภูมิที่ทำให้เกิดสภาวะสบายเชิงความร้อนที่มีความเร็วลม 0.9 m/s จะเห็นได้ว่าถ้ามีความเร็วลมเพียง 0.9

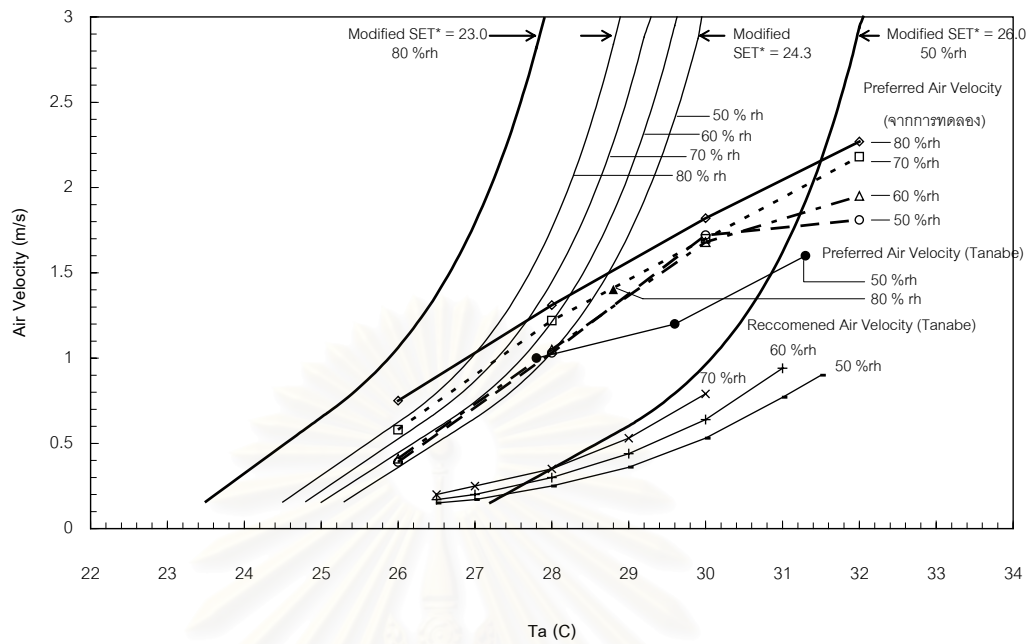
m/s จะช่วยทำให้สามารถตั้งอุณหภูมิของเทอร์โมสแตทของเครื่องปรับอากาศสูงกว่าอุณหภูมิสบายได้ถึงประมาณ  $2^{\circ}\text{C}$  โดยที่ผู้อยู่อาศัยยังรู้สึกสบายเหมือนเดิม ซึ่งการเพิ่มค่าอุณหภูมิของเทอร์โมสแตทของเครื่องปรับอากาศจะทำให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมาก

แต่อย่างไรก็ตามการใช้กราฟจากรูปที่ 4.19 ในการออกแบบพึงระลึกเสมอว่าต้องใช้อย่างรอบคอบ โดยคำนึงถึงความเร็วลมที่ไม่รบกวนที่มีค่าสูงสุดประมาณ 0.9 m/s ด้วย ถ้าจะใช้ความเร็วลมสูงกว่า 0.9 m/s อาจทำให้ผู้อยู่อาศัยรำคาญได้ ซึ่งอาจจะเหมาะสำหรับการใช้งานกับบางสถานที่ เช่น บริเวณทางเดิน บริเวณนั่งเล่น เป็นต้น

และถ้านำความเร็วลมที่สบายจากรูปที่ 4.19 มาเปรียบเทียบกับ ค่า Preferred Air Velocity ที่ได้จากการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4.4 ค่า Preferred Air Velocity จากการทดลองและค่าความเร็วลมที่แนะนำ จากงานวิจัย Tanabe และคณะ (1994) ด้วยพล็อตกราฟเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่า ค่าความเร็วลมที่แนะนำจากงานวิจัยของ Tanabe อยู่นอกช่วงสบาย เนื่องจากค่าความเร็วลมดังกล่าวเป็นค่าความเร็วลมที่ Tanabe บอกว่าจะทำให้รู้สึกร้อนเล็กน้อย และถ้าพิจารณาค่า Preferred Air Velocity พบว่า ในบริเวณที่ความเร็วลมเริ่มสูงมากค่าที่พล็อตได้จากค่า Preferred Air Velocity เริ่มมีการเบี่ยงเบนออกจากขอบเขตของความเร็วลมที่คนรู้สึกพึงพอใจ เมื่อเทียบกับค่าที่คำนวณย้อนกลับจากค่า Modified SET\* สาเหตุของความเบี่ยงเบนคาดเดาน่าจะเกิดจากรวมชาติของการถ่ายเทความร้อน เมื่อความเร็วลมมีค่าสูงกว่าค่าหนึ่ง ที่ความเร็วสูงมาก ๆ ความร้อนจะถ่ายเทออกจากบริเวณผิวหนังได้เร็ว แต่ความร้อนในบริเวณแกนกลางของร่างกายอาจจะยังไม่สามารถคายออกมาได้ทัน อิทธิพลดังกล่าว จึงทำให้ค่าที่ได้จาก ค่าของ Modified SET\* ใช้ไม่ได้ดี เมื่อเทียบกับค่า Preferred Air Velocity

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมที่สบาย กับ อุณหภูมิอากาศ ที่ความชื้น 50 60 70 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ที่  $M = 1.2 \text{ met}$   $\text{clo-value} = 0.48$  และ  $T_{\text{mrt}} = T_a$  เปรียบเทียบกับค่า Preferred Air Velocity จากการทดลอง ค่า Preferred Air Velocity และค่าความเร็วลมที่แนะนำ จากงานวิจัยของ Tanabe (1994)

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ผลจากการวิจัย และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยที่น่าจะมีการดำเนินการศึกษาต่อไป มีดังต่อไปนี้ คือ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. จากการทดลองพบว่า ค่า PMV ไม่สามารถทำนายความรู้สึกทางความร้อน (Thermal Sensation) ที่สภาวะความเร็วลมสูงได้ดีพอ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการทดลองของ Tanabe และคณะ (Tanabe et al., 1994) Tanabe ได้อธิบายว่า สมการที่ใช้คำนวณค่า PMV ไม่ได้รวมผลของการสูญเสียความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากผิวหนังเมื่อความเร็วลมมีค่าสูงขึ้น
2. ค่าดัชนีภาวะสบายเชิงความร้อน SET\* สามารถใช้ทำนายความรู้สึกทางความร้อน ที่สภาวะความเร็วลมสูงได้ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลการใช้ดัชนีดังกล่าวในรูปแบบเดิม ยังไม่สามารถให้ผลการทำนายได้ถูกต้องในระดับที่น่าพอใจ จากการศึกษพบว่า หากทำการปรับปรุงค่าสมการที่ใช้คำนวณค่า SET\* ดังกล่าว โดยกำหนดค่าความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้าที่สวมใส่มีค่าลดลง เมื่อความเร็วลมมีค่าสูงขึ้น จะสามารถทำให้การทำนายมีความถูกต้องสูงขึ้นในระดับที่น่าพอใจ นอกจากนั้นแล้ว ผลการศึกษาถึงอิทธิพลของการปรับแก้ความเปียกชื้นของผิวหนังให้มีค่าลดลงจากสมการที่ใช้อยู่แล้วในแบบจำลองดั้งเดิมของ SET\* ไม่ช่วยให้ผลการทำนายดีขึ้นแต่อย่างใด (มีผลน้อยมาก)
3. ผลจากการวิเคราะห์ในข้อ 4.5.3 พบว่า แบบจำลองสมการ SET\* ที่ทำการพัฒนาขึ้นมาใหม่ (Modified SET\*) ทำให้ค่าการโหวตภาวะสบายเชิงความร้อนที่ได้จากการทดลองเมื่อนำมาพล็อตในเทอมของ Modified SET\* ปรับตัวเกือบจะเรียงเป็นแนวเส้นตรง ทำให้สามารถสร้างสมการถดถอยแบบเส้นตรงที่เป็นตัวแทนของข้อมูลได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 4.6 สมการดังกล่าว สามารถนำไปใช้ในการทำนายภาวะสบายเชิงความร้อน ที่สภาวะความเร็วลมสูงได้
4. ผลจากการทดลองหาค่าความเร็วลมสูงสุด บ่งชี้ว่า คนส่วนใหญ่จะไม่รู้สึกรำคาญมากนักถ้าความเร็วลมมีค่าโดยประมาณไม่เกิน 0.9 m/s ส่วนความเร็วลมที่มีค่าโดยประมาณสูงกว่า 0.9 m/s จะยอมรับได้ในกรณีที่ไม่สามารถสร้างภาวะสบายได้ด้วย

วิธีอื่น และผู้ร่วมทดลองทำงานในสภาวะที่ไม่มีความเครียด อาทิเช่น อยู่ระหว่างการเล่น กีฬา หรือนั่งพักผ่อน เป็นต้น

5. ค่าความเร็วลมในตารางที่ 4.4 สามารถนำไปใช้เพิ่มสภาวะสบายเชิงความร้อน สำหรับสถานที่ที่ไม่ติดตั้งเครื่องปรับอากาศ รูปที่ 4.15 และ รูปที่ 4.16 บ่งชี้ว่า คนส่วนใหญ่มีความต้องการความเร็วลมสูงขึ้นเล็กน้อย ถ้าความชื้นสูงขึ้น ผลของความชื้นที่สูงขึ้นนี้มีอิทธิพลน้อยกว่าผลจากการเพิ่มอุณหภูมิมาก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น คนส่วนใหญ่จะต้องการลมที่มีความเร็วลมเพิ่มขึ้นมาก แต่อย่างไรก็ตาม ต้องระวังด้วยว่าความเร็วลมที่สูงกว่า 0.9 m/s จะทำให้คนส่วนมากรู้สึกรำคาญได้
6. ผลจากการทดสอบโดยตรงเพื่อหาค่า Modified SET\* ที่ทำให้คนส่วนมากพึงพอใจพบว่า ค่า Modified SET\* ควรอยู่ระหว่าง 23.0 °C ถึง 26.3 °C และค่าที่ดีที่สุดอยู่ที่ 24.3 °C ค่า Modified SET\* ดังกล่าว สามารถเปลี่ยนให้กลับไปสู่ค่าอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม ที่เข้าใจได้ง่าย โดยการใช้ รูปที่ 4.7 และรูป ๗1 ถึง รูป ๗4 ในภาคผนวก ๗ รูปที่ 4.20 แสดงผลการเปรียบเทียบ ค่าความเร็วลมที่คนส่วนมากพึงพอใจจากตารางที่ 4.4 กับค่าความเร็วลมที่คนพอใจ ที่พล็อตจากค่า Modified SET\* ที่กล่าวมาข้างต้น ผลการเปรียบเทียบ พบว่า ในบริเวณที่ความเร็วลมเริ่มสูงมาก ค่าที่พล็อตได้จากตารางที่ 4.4 เริ่มมีการเบี่ยงเบนออกจากขอบเขตของความเร็วลมที่คนรู้สึกพึงพอใจ เมื่อเทียบกับค่าที่คำนวณย้อนกลับจากค่า Modified SET\* สาเหตุของความเบี่ยงเบนคาดว่าจะเป็นที่เกิดจากธรรมชาติของการถ่ายเทความร้อน เมื่อความเร็วลมมีค่าสูงกว่าค่าค่าหนึ่ง ที่ความเร็วสูงมาก ๆ ความร้อนจะถ่ายเทออกจากบริเวณผิวหนังได้เร็ว แต่ความร้อนในบริเวณแกนกลางของร่างกายอาจจะยังไม่สามารถคายออกมาได้ทัน อิทธิพลดังกล่าวจึงทำให้ค่าที่ได้จาก ค่าของ Modified SET\* ใช้ไม่ได้ดี เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากตารางที่ 4.4

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากการศึกษา พบว่า ความเร็วลมช่วยทำให้เกิดภาวะสบายเชิงความร้อนได้อย่างมาก โดยเฉพาะในสภาวะที่ทำให้คนมีเหงื่อมาก เช่น สภาวะอากาศร้อนชื้น ที่ระดับกิจกรรมสูงเป็นต้น ดังนั้น งานวิจัยที่น่าจะทำการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับผลของความเร็วลมต่อภาวะสบายเชิงความร้อนต่อไปในอนาคตควรจะเน้นที่ สภาวะอากาศร้อนชื้น หรือ ที่ระดับกิจกรรมสูง เช่น ทำการปรับปรุง Thermal Comfort Chart ของ ASHRAE ให้ครอบคลุมผลของความเร็วลม โดยเฉพาะสำหรับ สภาวะอากาศร้อนชื้น การศึกษาถึงผลของความเร็วลมต่อภาวะสบายเชิงความร้อนที่ระดับกิจกรรม

กรรมอื่น ๆ โดยเฉพาะที่ระดับกิจกรรมสูงจะทำให้มีเหงื่อมาก ซึ่งความเร็วลมจะช่วยทำให้รู้สึกสบายขึ้นได้อย่างมาก เป็นต้น

2. งานวิจัยอีกหัวข้อ ที่น่าจะมีการศึกษาต่อไป คือ สาเหตุของการเบี่ยงเบนของค่าความเร็วลมที่พึงพอใจจากตารางที่ 4.4 นอกจากขอบเขตขอบเขตของความเร็วลมที่คนรู้สึกพึงพอใจจากค่าที่คำนวณย้อนกลับจากค่า Modified SET\* ตามที่แสดงในรูปที่ 4.20



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

ประพนธ์ วงษ์ท่าเรือ. การศึกษาภาวะสบายเชิงความร้อนของคนในอาคาร. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,  
2535.

### ภาษาอังกฤษ

American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers . ASHRAE  
Handbook Fundamentals 1993. Atlanta : ASHRAE, 1993.

American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers . ASHRAE  
Handbook Fundamentals 1997. Atlanta : ASHRAE, 1997.

American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers . ASHRAE  
Standard 55-1992: Thermal environmental conditions for human occupancy.  
Atlanta : ASHRAE, 1992.

Awbi, H.B. Ventilation of Buildings. London : E&FN SPON, 1991.

Fanger, P.O. Thermal Comfort (Analysis and Applications in Environmental Engineering).  
New York: McGraw-Hill, 1970.

Fountain, M.; Arens, E.; de Dear, R.; Bauman, F.; and Miura, K. Locally controlled air  
movement preferred in warm isothermal environments. ASHRAE Transactions  
100 (1994) : 937-952.

Gagge, A.P.; Fobelets, A.P.; and Berglund, L.G. A standard predictive index of human  
response to the thermal environment. ASHRAE Transactions 92 (1986) : 709-  
731.

McCullough, E.A.; Olesen, B.W.; and Hong, S. Thermal insulation provided by chairs.  
ASHRAE Transactions 99 (1993) Part 2 : 795-802

Olgay, V. Design with Climate : Bioclimate Approach to Architectural Regionalism. New  
Jersey: Princeton University Press, 1973.

Rohles, F.H.; Konz, S.A.; and Jones, B.W. Ceiling fans as extenders of the summer  
comfort envelope. ASHRAE Transactions 89 (1983) : 245-263.

Tanabe, S.; and Kimura, K. Importance of air movement for thermal comfort under hot and humid conditions. ASHRAE Far East Conference on Air Conditioning in Hot Climates, pp. 95-103. Kuala Lumpur Malaysia, October 25-28,1989.

Tanabe, S.; and Kimura, K. Effects of air temperature humidity, and air movement on thermal comfrot under hot and humid conditions. ASHRAE Transactions 100 (1994) : 953-969.

Wu, H. The Use of oscillating fans to extend the summer comfort envelope in hot arid Climates. ASHRAE Far East Conference on Air Conditioning in Hot Climates. pp. 5-14. Kuala Lumpur Malaysia, October 25-28,1989.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก การวัดความเร็วลมในการทดลอง

ในการทดลองนี้จะใช้ความเร็วลมที่ต่างกัน 7 ระดับความเร็วลม โดยความเร็วลม 6 ระดับ จะได้มาจากการจ่ายลมของ Wind Box ร่วมกับเครื่องปรับอากาศ และอีกหนึ่งระดับความเร็วลม ได้จากการจ่ายลมของเครื่องปรับอากาศเพียงอย่างเดียว การวัดค่าความเร็วลมที่ได้มาจากแต่ละ แหล่งจ่ายลมมีวิธีการ ดังนี้

ความเร็วลมที่ได้มาจากการจ่ายลมของ Wind Box ร่วมกับเครื่องปรับอากาศจะมีความแปรปรวนค่อนข้างมาก ดังนั้น ความเร็วลมที่ใช้ในการคำนวณในส่วนนี้จะได้มาจากการวัดความเร็วเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัดกว้าง 90 เซนติเมตร และ สูง 150 เซนติเมตร ซึ่งเป็นขนาดพื้นที่ที่ความเร็วลมสัมผัสทั่วทั้งร่างกายของผู้ร่วมทดลองขณะทำการทดลอง โดยทำการวัดความเร็วลมที่จุดตัดของเส้นแนวตั้ง และเส้นแนวนอน ซึ่งแต่ละเส้นจะมีระยะห่างกัน 10 เซนติเมตร ดังแสดงในรูป ก1 ที่ระยะห่างจาก Wind Box เท่ากับระยะห่างที่ผู้ร่วมทดลองนั่งทดลอง คือ 2.5 เมตร ด้วยอุปกรณ์วัดความเร็วลม แบบ Thermal Anemometers ยี่ห้อ AIRFLOW รุ่น TA2-30/6k แสดงผลด้วยเข็ม ที่มีความละเอียด 0.05 m/s แล้วนำค่าความเร็วลมที่วัดได้ทั้ง 91 จุด มาหาค่าเฉลี่ย การวัดความเร็วลมจะทำการวัด 2 ครั้ง คือ วัดก่อนการทดลองครั้งแรก และวัดหลังการทดลองครั้งสุดท้ายแล้วเสร็จ เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าความเร็วลมที่ได้การเปิดพัดลมที่สวิตช์ความเร็วลมและปรับค่าแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ จะมีค่าที่ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการทดลอง

	1	2	3	4	5	6	7
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							

รูป ก1 แสดงตำแหน่งการวัดความเร็วลมเพื่อหาความเร็วลมเฉลี่ย

จากการวัดความเร็วลมที่ระดับความเร็วทั้ง 6 ก่อนการทดลองแรก และหลังการทดลอง ครั้งสุดท้าย พบว่ามีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อย และมีค่าที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ ดังแสดงในตาราง ก1 ถึง ตาราง ก6 ดังนั้น ผู้วิจัยจึงใช้ค่าความเร็วลมเฉลี่ยในการคำนวณต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้

ในส่วนของความเร็วลมที่ได้มาจากการจำลองของเครื่องปรับอากาศเพียงอย่างเดียวจะมีค่าค่อนข้างต่ำและสม่ำเสมอ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงทำการวัดความเร็วลมในตำแหน่งที่ผู้ทดลองนั่งทำการทดลองที่ระดับสูง 60 เซนติเมตร พบว่าความเร็วมีความสม่ำเสมอ และมีค่าประมาณ 0.10 m/s

โดยสรุปแล้วจากการวัดความเร็วลม และตรวจสอบความสม่ำเสมอ ผู้วิจัยจะได้ค่าความเร็วลมเท่ากับ 0.10, 0.25, 0.90, 1.64, 1.74, 1.94 และ 2.47 m/s เป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณในงานวิจัยนี้

ตาราง ก1 แสดงความเร็วลมที่ตำแหน่งต่าง ๆ ก่อน และหลังการทดลอง เมื่อเปิดพัดลมที่ สวิตช์ความเร็วลมระดับ 1 และปรับค่าแรงดันไฟฟ้า 110 โวลต์

ก่อนการทดลอง								หลังการทดลอง							
ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7	ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	0.25	0.25	0.25	0.25	0.20	0.15	0.15	1	0.20	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
2	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.25	0.25	2	0.20	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
3	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.25	0.25	3	0.20	0.25	0.25	0.25	0.25	0.30	0.30
4	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	4	0.20	0.25	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30
5	0.30	0.30	0.25	0.30	0.30	0.25	0.25	5	0.15	0.20	0.25	0.30	0.30	0.30	0.30
6	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	6	0.15	0.20	0.25	0.30	0.30	0.30	0.30
7	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	7	0.15	0.20	0.25	0.30	0.30	0.25	0.25
8	0.25	0.25	0.25	0.30	0.30	0.25	0.25	8	0.15	0.20	0.25	0.30	0.30	0.30	0.30
9	0.25	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30	0.25	9	0.15	0.20	0.25	0.30	0.30	0.25	0.25
10	0.20	0.20	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30	10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.30	0.25	0.25
11	0.20	0.20	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30	11	0.15	0.20	0.25	0.30	0.30	0.25	0.25
12	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	12	0.15	0.20	0.25	0.30	0.30	0.25	0.25
13	0.10	0.10	0.10	0.10	0.15	0.20	0.20	13	0.15	0.20	0.20	0.30	0.25	0.25	0.25

เฉลี่ย 0.246 m/s sd = 0.0487

เฉลี่ย 0.248 m/s sd = 0.0462

ความเร็วลมเฉลี่ยก่อนและหลังการทดลอง คือ 0.25 m/s

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก2 แสดงความเร็วมวลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ก่อน และหลังการทดลอง เมื่อเปิดพัดลมที่ สวิตช์ความเร็วมวลระดับ 1 และปรับค่าแรงดันไฟฟ้า 140 โวลต์

ก่อนการทดลอง								หลังการทดลอง							
ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7	ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	0.80	0.80	0.80	0.80	0.70	0.50	0.40	1	0.60	0.60	0.70	0.70	0.70	0.70	0.60
2	0.80	0.80	0.70	0.60	0.60	0.60	0.50	2	0.60	0.80	0.90	1.00	0.90	0.80	0.80
3	0.90	0.80	0.80	0.80	0.80	0.70	0.70	3	0.70	0.80	1.00	1.00	0.90	0.90	0.80
4	0.90	1.00	1.00	1.00	0.90	0.90	0.80	4	0.70	0.90	1.00	1.00	1.00	0.90	0.90
5	0.90	1.00	1.10	1.00	1.00	0.90	0.90	5	0.70	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	0.90
6	0.90	1.00	1.10	1.00	1.00	0.90	1.00	6	0.70	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
7	0.90	1.00	1.20	1.20	1.20	1.20	1.00	7	0.70	1.00	1.00	1.00	1.10	1.00	1.00
8	0.80	1.00	1.00	1.00	1.20	1.20	1.10	8	0.70	1.00	1.00	1.10	1.10	1.00	1.00
9	0.70	0.80	1.00	1.00	1.00	1.10	1.10	9	0.80	0.90	1.00	1.10	1.00	1.00	1.00
10	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	1.10	1.10	10	0.80	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
11	0.80	0.80	0.90	1.00	1.00	0.90	0.90	11	0.70	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	0.90
12	0.80	0.80	0.80	0.90	0.90	0.90	0.90	12	0.70	0.90	1.00	1.00	1.00	0.90	0.80
13	0.80	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	13	0.70	0.80	0.80	0.80	0.80	0.90	0.70

เฉลี่ย 0.901 m/s sd = 0.1572

เฉลี่ย 0.896 m/s sd = 0.1325

ความเร็วมวลเฉลี่ยก่อนและหลังการทดลอง คือ 0.90 m/s

ตาราง ก3 แสดงความเร็วมวลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ก่อน และหลังการทดลอง เมื่อเปิดพัดลมที่ สวิตช์ความเร็วมวลระดับ เบอร์ 1 และปรับค่าแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์

ก่อนการทดลอง								หลังการทดลอง							
ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7	ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	1.40	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.60	1	1.00	1.30	1.40	1.40	1.40	1.50	1.60
2	1.40	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.70	2	1.20	1.50	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60
3	1.50	1.60	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	3	1.40	1.60	1.80	1.80	1.70	1.70	1.70
4	1.50	1.60	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	4	1.50	1.70	1.80	1.80	1.80	1.70	1.70
5	1.50	1.60	1.80	1.90	1.90	1.90	1.80	5	1.50	1.70	1.90	1.90	1.80	1.70	1.70
6	1.50	1.60	1.80	1.90	1.90	1.90	1.80	6	1.50	1.60	1.90	1.90	1.90	1.80	1.80
7	1.50	1.60	1.80	1.80	2.00	2.00	1.80	7	1.50	1.70	1.90	1.90	1.90	1.80	1.80
8	1.40	1.60	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	8	1.50	1.60	1.70	1.80	1.80	1.80	1.80
9	1.40	1.60	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	9	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.80	1.80
10	1.40	1.60	1.70	1.70	1.80	1.80	1.80	10	1.30	1.40	1.70	1.70	1.80	1.80	1.80
11	1.40	1.40	1.60	1.60	1.60	1.60	1.80	11	1.30	1.40	1.70	1.70	1.80	1.80	1.70
12	1.40	1.40	1.50	1.50	1.60	1.60	1.70	12	1.20	1.50	1.60	1.70	1.70	1.70	1.60
13	1.20	1.30	1.30	1.30	1.40	1.40	1.40	13	1.10	1.20	1.50	1.60	1.60	1.50	1.40

เฉลี่ย 1.647 m/s sd= 0.1806

เฉลี่ย 1.632 m/s sd= 0.196

ความเร็วมวลเฉลี่ยก่อนและหลังการทดลอง คือ 1.64 m/s

ตาราง ก4 แสดงความเร็วมวลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ก่อน และหลังการทดลอง เมื่อเปิดพัดลมที่สวิตช์ความเร็วมวลระดับ 2 และปรับค่าแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์

ก่อนการทดลอง								หลังการทดลอง							
ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7	ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	1.20	1.20	1.40	1.40	1.50	1.70	1.80	1	1.00	1.20	1.50	1.50	1.70	1.70	1.70
2	1.40	1.40	1.60	1.70	1.70	1.90	2.00	2	1.30	1.60	1.80	2.00	2.00	1.80	1.80
3	1.40	1.60	1.70	1.90	1.90	2.00	2.00	3	1.30	1.60	1.80	1.80	1.80	2.00	2.00
4	1.50	1.70	1.80	1.90	2.00	2.00	2.00	4	1.30	1.70	1.80	1.80	2.00	2.00	2.00
5	1.70	1.80	1.90	2.00	2.00	2.00	2.00	5	1.10	1.40	1.80	2.00	2.00	2.10	2.10
6	1.70	1.80	1.90	2.00	2.00	2.00	2.00	6	1.20	1.50	1.80	2.00	2.00	2.10	2.10
7	1.70	1.80	1.90	2.00	2.00	2.00	2.00	7	1.20	1.50	1.50	1.80	2.00	2.10	2.10
8	1.80	1.80	1.90	2.00	2.00	2.10	2.10	8	1.20	1.50	1.80	1.80	2.00	2.00	2.00
9	1.60	1.60	1.80	1.90	2.00	2.00	2.00	9	1.20	1.50	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80
10	1.40	1.60	1.80	1.80	2.00	2.00	2.00	10	1.20	1.50	1.70	1.80	1.80	2.00	1.80
11	1.30	1.60	1.90	1.90	2.00	2.00	2.00	11	1.10	1.40	1.50	1.80	1.80	1.80	1.80
12	1.20	1.40	1.40	1.60	1.60	1.80	1.80	12	1.20	1.50	2.00	2.00	2.00	2.00	1.80
13	1.10	1.40	1.40	1.60	1.60	1.60	1.60	13	1.10	1.40	1.50	1.70	1.80	1.80	1.70

เฉลี่ย 1.764 m/s sd= 0.2456      เฉลี่ย 1.708 m/s sd= 0.2883

ความเร็วมวลเฉลี่ยก่อนและหลังการทดลองคือ 1.74 m/s

ตาราง ก5 แสดงความเร็วมวลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ก่อน และหลังการทดลองจากการเปิดพัดลมที่สวิตช์ความเร็วมวลระดับ 3 และปรับค่าแรงดันไฟฟ้า 200 โวลต์

ก่อนการทดลอง								หลังการทดลอง							
ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7	ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	1.20	1.40	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1	1.30	1.50	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70
2	1.20	1.60	2.00	2.00	2.00	2.10	2.00	2	1.40	1.70	2.00	2.00	2.00	2.10	2.00
3	1.20	1.60	2.00	2.10	2.10	2.10	2.00	3	1.50	2.00	2.20	2.20	2.00	2.10	2.00
4	1.20	1.80	2.00	2.20	2.20	2.20	2.10	4	1.60	1.90	2.20	2.20	2.20	2.10	2.00
5	1.30	1.80	2.00	2.20	2.20	2.20	2.00	5	1.80	2.10	2.20	2.30	2.10	2.20	2.00
6	1.30	1.80	1.80	2.00	2.20	2.20	2.20	6	1.70	2.00	2.30	2.30	2.20	2.10	2.00
7	1.30	1.80	2.00	2.20	2.20	2.20	2.20	7	1.50	1.90	2.30	2.30	2.30	2.20	2.20
8	1.40	1.80	1.80	2.20	2.20	2.20	2.00	8	1.70	1.90	2.30	2.20	2.20	2.10	2.00
9	1.40	1.80	2.00	2.00	2.20	2.20	2.00	9	1.60	1.80	2.30	2.30	2.20	2.20	2.00
10	1.40	1.80	2.20	2.20	2.20	2.20	2.00	10	1.60	1.90	2.20	2.20	2.20	2.20	2.00
11	1.40	1.60	1.80	2.00	2.00	2.20	2.00	11	1.50	1.70	1.90	2.20	2.10	2.20	2.00
12	1.30	1.60	1.80	2.20	2.20	2.20	2.00	12	1.60	1.60	1.80	2.20	2.20	2.20	2.00
13	1.30	1.60	1.80	2.00	2.00	2.00	2.00	13	1.50	1.80	1.80	2.00	2.00	2.00	2.00

เฉลี่ย 1.891 m/s sd= 0.3066      เฉลี่ย 1.979 m/s sd= 0.2509

ความเร็วมวลเฉลี่ยก่อนและหลังการทดลองคือ 1.94 m/s

ตาราง ก6 แสดงความเร็วลมที่ตำแหน่งต่าง ๆ ก่อน และหลังการทดลอง เมื่อเปิดพัดลมที่  
 สวิตช์ความเร็วลมระดับ 3 และปรับค่าแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์

ก่อนการทดลอง								หลังการทดลอง							
ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7	ตำแหน่ง	1	2	3	4	5	6	7
1	1.90	1.90	2.00	2.20	2.20	2.50	2.50	1	1.40	1.60	2.00	2.20	2.20	2.20	2.30
2	1.90	2.00	2.00	2.20	2.50	2.80	2.80	2	1.80	2.00	2.40	2.60	2.60	2.60	2.60
3	2.00	2.30	2.50	2.50	2.80	2.80	2.80	3	1.90	2.20	2.50	2.50	2.70	2.80	2.80
4	2.40	2.50	2.70	3.00	3.00	3.00	3.00	4	1.90	2.30	2.60	2.80	2.80	3.00	3.00
5	2.50	2.50	2.70	3.00	3.00	3.00	3.00	5	2.10	2.50	2.70	2.80	3.00	3.00	3.00
6	2.50	2.50	2.80	3.00	3.00	3.00	3.00	6	2.40	2.60	2.80	3.00	3.00	3.00	3.00
7	2.50	2.50	2.70	3.00	3.00	3.00	3.00	7	2.40	2.70	2.70	2.80	3.00	2.80	2.80
8	2.30	2.40	2.70	3.00	3.00	3.00	3.00	8	2.10	2.60	2.70	2.80	2.80	2.80	2.90
9	2.30	2.30	2.50	2.80	2.80	2.80	2.80	9	1.90	2.60	2.80	2.80	2.80	2.70	2.60
10	2.40	2.30	2.50	2.50	2.50	2.70	2.80	10	1.90	2.60	2.80	2.80	2.80	2.60	2.60
11	2.20	2.20	2.20	2.20	2.40	2.50	2.50	11	1.80	2.30	2.60	2.70	2.60	2.50	2.50
12	1.90	2.00	2.00	2.20	2.20	2.20	2.20	12	1.60	1.90	2.00	2.20	2.20	2.30	2.10
13	1.60	1.60	1.80	1.80	1.80	2.00	2.20	13	1.40	1.60	1.80	1.80	1.90	1.90	2.00

เฉลี่ย 2.495 m/s sd= 0.3892

เฉลี่ย 2.452 m/s sd= 0.4197

ความเร็วลมเฉลี่ยก่อนและหลังการทดลอง คือ 2.47 m/s

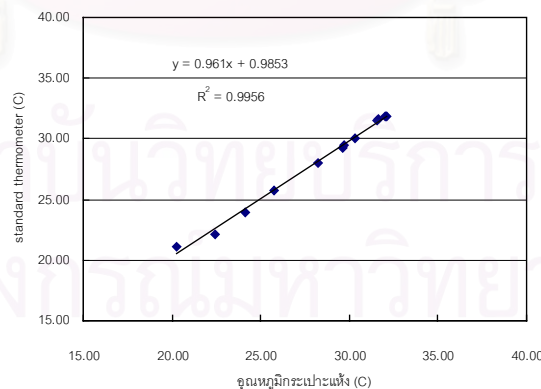
สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



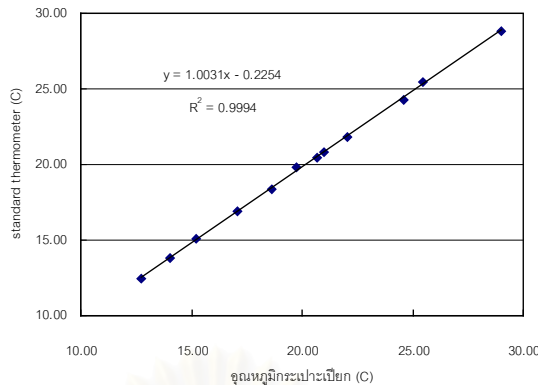
## ภาคผนวก ข การสอบเทียบเครื่องมือวัด

### การสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

การวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องทดลองที่ใช้ในการทดลองนี้ จะใช้เครื่องมือที่มีลักษณะเป็น Probe ที่สามารถวัดทั้งค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ได้ในเวลาเดียวกัน โดย Probe นี้ ผู้วิจัยได้ทำการสอบเทียบกับ thermo meter มาตรฐาน ASTM 63C Precision  $-8 + 32^{\circ}\text{C}$   $0.1^{\circ}\text{C}$  โดยใช้ห้องทดสอบเครื่องปรับอากาศเป็นตัวควบคุมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการสอบเทียบ การสอบเทียบอุณหภูมิกระเปาะแห้งทำได้โดยนำ probe ที่ใช้มาวัดค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศในห้องทดสอบเครื่องปรับอากาศ มาสอบเทียบกับค่าที่อ่านได้จาก thermo meter มาตรฐาน ในส่วนของการสอบเทียบความชื้นสัมพัทธ์ของค่าที่อ่านได้จาก probe นั้น ทำได้โดย เริ่มต้นจากการคำนวณอุณหภูมิกระเปาะเปียกจากอุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้จริง ต่อมานำค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกที่ได้คำนวณได้มาสอบเทียบกับค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกที่อ่านค่าได้จาก thermo meter มาตรฐาน และในขั้นตอนสุดท้ายนำค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก และอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่สอบเทียบแล้ว มาคำนวณหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ ความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จะเป็นความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้รับการสอบเทียบแล้ว ผลของการสอบเทียบ และสมการ Calibration Curve ของอุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียก ได้แสดงไว้ใน รูป ข1 รูป ข2 และตาราง ข1 ตามลำดับ



รูป ข1 กราฟแสดง calibration curve ของอุณหภูมิกระเปาะแห้ง



รูป ข2 กราฟแสดง calibration curve ของอุณหภูมิกะเปาะเปียก

ตาราง ข1 แสดงการสอบเทียบอุณหภูมิกะเปาะแห้งและอุณหภูมิกะเปาะเปียก

ครั้งที่	Probe			standard thermometer	
	DB ( C )	%RH	WB ( C )	DBS ( C )	WTS ( C )
1	20.30	39.60	12.76	21.10	12.50
2	22.41	39.55	14.04	22.10	13.80
3	24.15	39.11	15.20	23.90	15.10
4	25.73	41.30	17.05	25.70	16.90
5	28.21	39.82	18.61	28.00	18.40
6	30.31	38.01	19.73	30.10	19.80
7	31.63	38.06	20.71	31.60	20.50
8	31.60	38.48	20.97	31.50	20.80
9	32.14	41.60	22.05	31.90	21.80
10	29.61	67.01	24.57	29.30	24.30
11	29.74	71.38	25.44	29.50	25.50
12	32.04	80.03	29.02	31.80	28.80

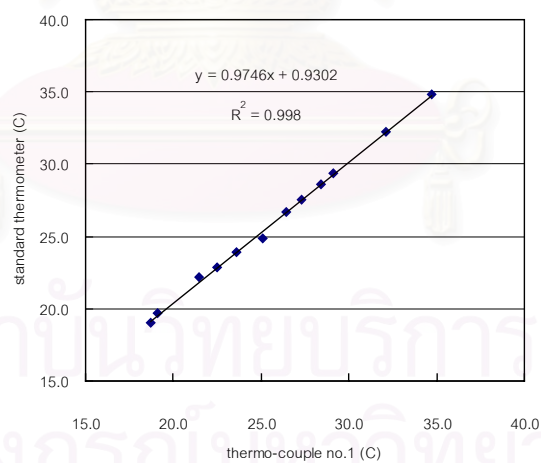
**การสอบเทียบ thermo-couple**

ในการทดลองนี้ใช้ thermo-couple ชนิด type K เพื่อวัดอุณหภูมิของผนัง และฝ้าเพดาน จำนวน 9 จุด โดยอุณหภูมิกะเปาะแห้งในช่วงระหว่าง 20-35 °C จึงทำการสอบเทียบกับ thermometer มาตรฐาน ASTM-56F BOMB CAL 138 SO 48 (ช่วงอุณหภูมิ 66-96 °F หรือ 18.9-35.6 °C) โดยใช้ชุดทดลองระบบปรับอากาศของ P.A. HILTON รุ่น A770 เป็นเครื่องจ่ายลมที่อุณหภูมิต่าง ๆ ผลการสอบเทียบ และสมการ Calibration Curve ของ thermo-couple แต่ละเส้นมีผล ดังนี้

## thermo-couple no.1

ตาราง ข2 แสดงการสอบเทียบ thermo-couple no.1

ครั้งที่	อุณหภูมิ		
	thermocouple C	standard thermometer	
		F	C
1	18.7	66.2	19.0
2	19.1	67.5	19.7
3	21.5	72.0	22.2
4	22.5	73.2	22.9
5	23.6	75.0	23.9
6	25.1	76.7	24.8
7	26.4	80.0	26.7
8	27.3	81.6	27.6
9	28.4	83.5	28.6
10	29.1	84.9	29.4
11	32.1	90.0	32.2
12	34.7	94.7	34.8

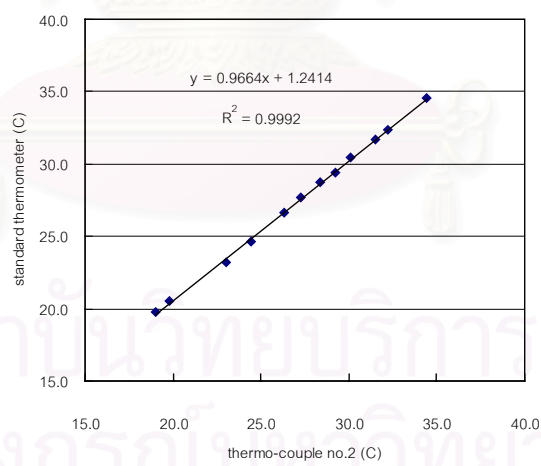


รูป ข3 กราฟแสดง calibration curve ของ thermo-couple no.1

## thermo-couple no.2

ตาราง ข3 แสดงการสอบเทียบ thermo-couple no.2

ครั้งที่	อุณหภูมิ		
	thermocouple C	standard thermometer	
		F	C
1	19.0	67.6	19.8
2	19.8	68.9	20.5
3	23.0	73.7	23.2
4	24.4	76.4	24.7
5	26.3	79.9	26.6
6	27.3	81.8	27.7
7	28.4	83.8	28.8
8	29.2	84.9	29.4
9	30.1	86.8	30.4
10	31.5	89.0	31.7
11	32.2	90.2	32.3
12	34.4	94.2	34.6

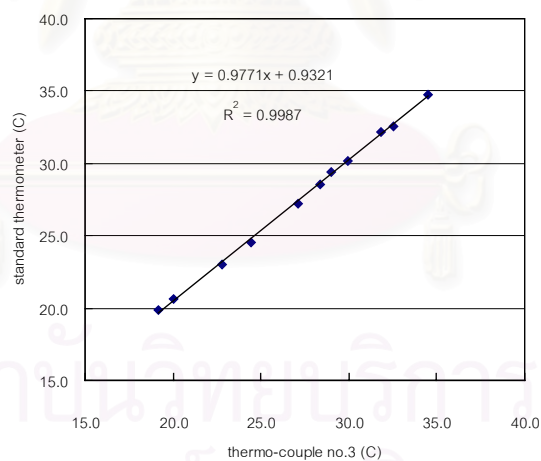


รูป ข4 กราฟแสดง calibration curve ของ thermo-couple no.2

## thermo-couple no.3

ตาราง ข4 แสดงการสอบเทียบ thermo-couple no.3

ครั้งที่	อุณหภูมิ		
	thermocouple C	standard thermometer	
		F	C
1	19.2	67.8	19.9
2	20.0	69.2	20.7
3	22.8	73.4	23.0
4	24.4	76.2	24.6
5	27.1	81.0	27.2
6	28.4	83.4	28.6
7	29.0	84.9	29.4
8	29.9	86.3	30.2
9	31.8	90.0	32.2
10	32.5	90.6	32.6
11	34.5	94.6	34.8

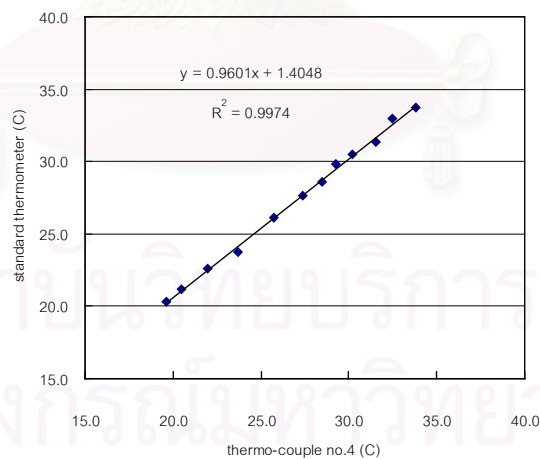


รูป ข5 กราฟแสดง calibration curve ของ thermo-couple no.3

## thermo-couple no.4

ตาราง ข5 แสดงการสอบเทียบ thermo-couple no.4

ครั้งที่ ที่	อุณหภูมิ		
	thermocouple  C	standard thermometer	
		F	C
1	19.6	68.5	20.3
2	20.5	70.2	21.2
3	22.0	72.7	22.6
4	23.7	74.8	23.8
5	25.7	79.0	26.1
6	27.4	81.8	27.7
7	28.5	83.4	28.6
8	29.3	85.7	29.8
9	30.2	86.9	30.5
10	31.5	88.4	31.3
11	32.5	91.4	33.0
12	33.8	92.7	33.7



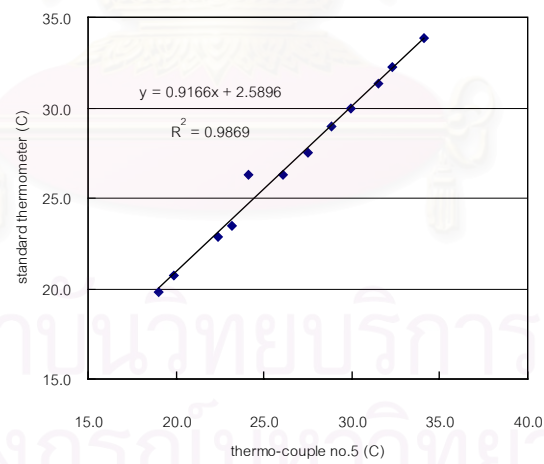
รูป ข6 กราฟแสดง calibration curve ของ thermo-couple no.4



thermo-couple no.5

ตาราง ข6 แสดงการสอบเทียบ thermo-couple no.5

ครั้งที่	จุดหมุ่มี		
	thermocouple C	standard thermometer	
		F	C
1	19.0	67.6	19.8
2	19.9	69.3	20.7
3	22.4	73.2	22.9
4	23.2	74.2	23.4
5	24.1	79.3	26.3
6	26.1	79.4	26.3
7	27.5	81.5	27.5
8	28.8	84.1	28.9
9	29.9	86.0	30.0
10	31.5	88.4	31.3
11	32.3	90.0	32.2
12	34.1	92.9	33.8

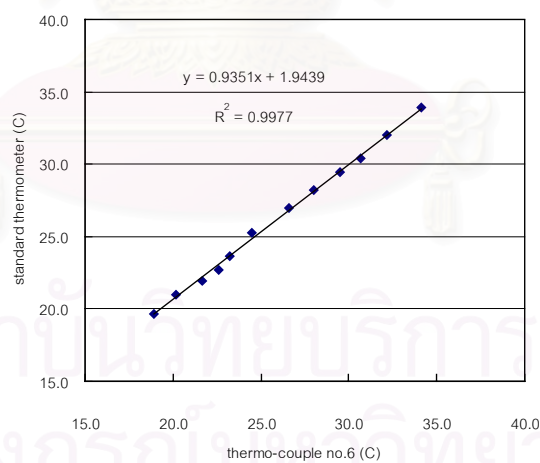


รูป ข7 กราฟแสดง calibration curve ของ thermo-couple no.5

## thermo-couple no.6

ตาราง ข7 แสดงการสอบเทียบ thermo-couple no.6

ครั้งที่	อุณหภูมิ		
	thermocouple C	standard thermometer	
		F	C
1	18.9	67.4	19.7
2	20.2	69.8	21.0
3	21.7	71.5	21.9
4	22.6	72.9	22.7
5	23.2	74.6	23.7
6	24.5	77.5	25.3
7	26.6	80.6	27.0
8	28.0	82.7	28.2
9	29.5	85.0	29.4
10	30.7	86.7	30.4
11	32.2	89.7	32.1
12	34.1	93.1	33.9

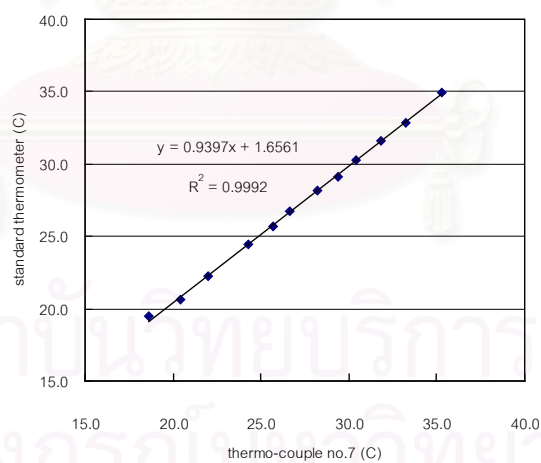


รูป ข8 กราฟแสดง calibration curve ของ thermo-couple no.6

## thermo-couple no.7

ตาราง ข8 แสดงการสอบเทียบ thermo-couple no.7

ครั้งที่	อุณหภูมิ		
	thermocouple C	standard thermometer	
		F	C
1	18.6	67.0	19.4
2	20.4	69.1	20.6
3	22.0	72.1	22.3
4	24.3	76.0	24.4
5	25.7	78.3	25.7
6	26.6	80.1	26.7
7	28.2	82.7	28.2
8	29.4	84.4	29.1
9	30.4	86.5	30.3
10	31.8	88.8	31.6
11	33.2	91.1	32.8
12	35.3	94.9	34.9

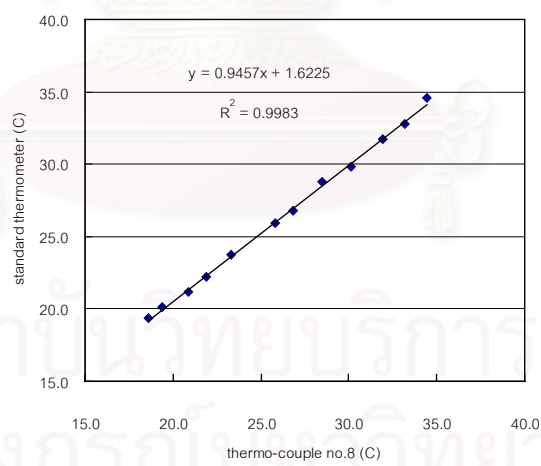


รูป ข9 กราฟแสดง calibration curve ของ thermo-couple no.7

## thermo-couple no.8

ตาราง ข9 แสดงการสอบเทียบ thermo-couple no.8

ครั้งที่	อุณหภูมิ		
	thermocouple C	standard thermometer	
		F	C
1	18.6	66.8	19.3
2	19.4	68.3	20.2
3	20.9	70.2	21.2
4	21.9	72.0	22.2
5	23.3	74.7	23.7
6	25.8	78.7	25.9
7	26.8	80.3	26.8
8	28.5	83.8	28.8
9	30.1	85.7	29.8
10	31.9	89.1	31.7
11	33.2	91.0	32.8
12	34.4	94.3	34.6

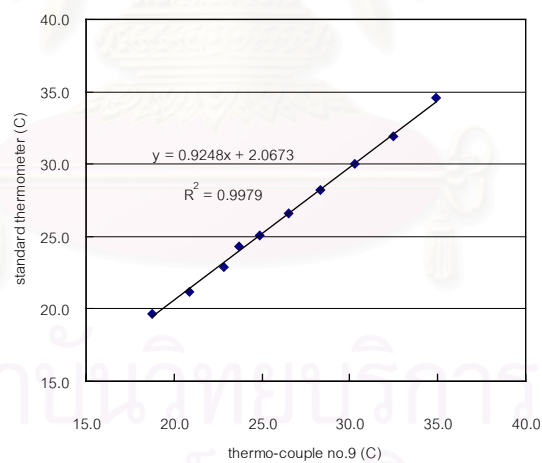


รูป ข10 กราฟแสดง calibration curve ของ thermo-couple no.8

## thermo-couple no.9

ตาราง ข10 แสดงการสอบเทียบ thermo-couple no.9

ครั้งที่ ที่	อุณหภูมิ		
	thermocouple C	standard thermometer	
		F	C
1	18.8	67.4	19.7
2	20.9	70.1	21.2
3	22.8	73.2	22.9
4	23.7	75.8	24.3
5	24.9	77.2	25.1
6	26.5	79.9	26.6
7	28.3	82.7	28.2
8	30.3	86.0	30.0
9	32.5	89.4	31.9
10	34.9	94.3	34.6

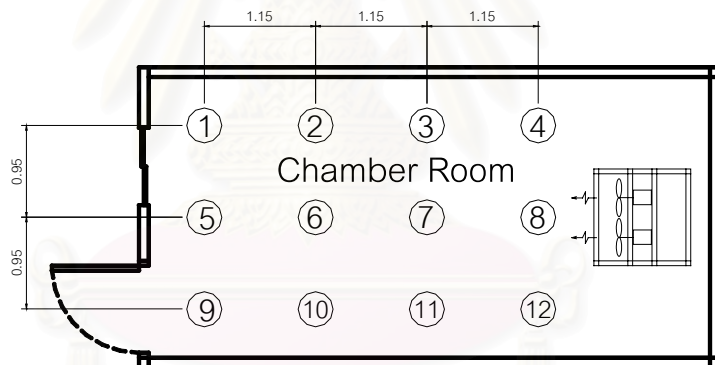


รูป ข11 กราฟแสดง calibration curve ของ thermo-couple no.9

## ภาคผนวก ค

### การตรวจสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดลอง

การตรวจสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ สามารถทำได้ด้วยการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดลองที่ตำแหน่งต่าง ๆ 12 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูป ค 1 โดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดลองที่กล่าวมาแล้วในภาคผนวก ข สำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการตรวจสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของห้องทดลองที่ 2 สภาวะอากาศ และที่ 2 ความเร็วลมดังนี้ คือ ที่สภาวะอากาศ  $26^{\circ}\text{C}$  50 %rh และ  $30^{\circ}\text{C}$  70%rh และที่ระดับความเร็วลม 0.25 และ 1.64 m/s ตามลำดับ ซึ่งผลการวัดได้แสดงไว้ในตารางที่ ค1-ค4 และเมื่อพิจารณาผลของการวัดดังกล่าวนี้พบว่าแต่ละตำแหน่งมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย จึงยอมรับได้ในความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องทดลอง



รูป ค1 แสดงตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์



ตาราง ค1 แสดงค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดลองที่ตำแหน่งต่าง ๆ  
ที่สภาวะอากาศ 26°C 50 %rh ความเร็วลม 0.25 m/s

ตำแหน่งที่	อุณหภูมิ (C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
1	26.38	51.98
2	26.32	51.74
3	26.24	51.83
4	26.29	51.76
5	26.31	52.04
6	26.27	51.93
7	26.19	51.86
8	26.20	51.79
9	26.29	51.68
10	26.21	51.76
11	26.27	51.88
12	26.30	51.94
เฉลี่ย	26.27	51.85
sd	0.05	0.10

ตาราง ค2 แสดงค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดลองที่ตำแหน่งต่าง ๆ  
ที่สภาวะอากาศ 26°C 50 %rh ความเร็วลม 1.64 m/s

ตำแหน่งที่	อุณหภูมิ (C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
1	26.44	51.76
2	26.40	51.85
3	26.38	51.96
4	26.30	52.04
5	26.40	51.82
6	26.31	51.99
7	26.29	51.84
8	26.21	52.03
9	26.28	51.91
10	26.20	51.87
11	26.26	51.76
12	26.15	51.73
เฉลี่ย	26.30	51.88
sd	0.09	0.10

ตาราง ค3 แสดงค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดลองที่ตำแหน่งต่าง ๆ  
ที่สภาวะอากาศ 30°C 70 %rh ความเร็วลม 0.25 m/s

ตำแหน่งที่	อุณหภูมิ (C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
1	30.44	69.66
2	30.39	69.80
3	30.32	69.74
4	30.41	69.81
5	30.35	69.76
6	30.29	69.69
7	30.25	69.73
8	30.19	69.80
9	30.31	69.70
10	30.29	69.68
11	30.22	69.74
12	30.27	69.86
เฉลี่ย	30.31	69.75
sd	0.07	0.06

ตาราง ค4 แสดงค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดลองที่ตำแหน่งต่าง ๆ  
ที่สภาวะอากาศ 30°C 70 %rh ความเร็วลม 1.64 m/s

ตำแหน่งที่	อุณหภูมิ (C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
1	30.34	69.71
2	30.30	69.77
3	30.21	69.89
4	30.33	69.76
5	30.30	69.81
6	30.24	69.88
7	30.19	69.93
8	30.11	70.01
9	30.22	70.08
10	30.17	69.97
11	30.10	69.91
12	30.21	69.84
เฉลี่ย	30.23	69.88
sd	0.08	0.10

## ภาคผนวก ง

### แสดงตัวอย่างการแต่งกายของผู้ร่วมทดลอง

ในการทดลองผู้ร่วมทดลองจะถูกร้องขอให้สวมใส่เสื้อผ้าในลักษณะของชุดทำงานในสำนักงาน สำหรับเพศชาย ประกอบด้วย เสื้อเชิ้ตแขนยาว กางเกงผ้า กางเกงใน ถุงเท้าแบบบาง และรองเท้าหุ้มส้น (ค่า clo-value คำนวณจาก  $0.25 + 0.15 + 0.04 + 0.02 + 0.02 = 0.48 \text{ clo}$ ) ดังแสดงรูปตัวอย่างในรูป ง1 และ สำหรับเพศหญิง ประกอบด้วย เสื้อเชิ้ตแขนยาว กางเกงผ้า เสื้อใน กางเกงใน ถุงเท้าแบบบาง และรองเท้าหุ้มส้น (ค่า clo-value คำนวณจาก  $0.25 + 0.15 + 0.01 + 0.03 + 0.02 + 0.02 = 0.48 \text{ clo}$ ) ดังแสดงรูปตัวอย่างในรูป ง2 การคำนวณค่า clo-value ดังกล่าวคำนวณตาม ASHRAE Standard 55-1992



รูป ง1 แสดงตัวอย่างชุดแต่งกายของผู้ร่วมทดลองเพศชาย



รูป ง1 แสดงตัวอย่างชุดแต่งกายของผู้ร่วมทดลองเพศหญิง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก จ

### การตรวจสอบระดับเสียง และระดับความเข้มแสง

#### การตรวจสอบระดับเสียง

##### 1. การตรวจสอบจากการวัดระดับเสียงภายในห้องทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองที่ความเร็วลม 7 ระดับความเร็วลม ดังนั้น การตรวจสอบระดับเสียงภายในห้องทดลองจึงต้องการวัดระดับเสียงที่ทุกระดับความเร็วลม การวัดระดับเสียงในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัดระดับเสียง ยี่ห้อ EXTECH รุ่น Model 407740 แสดงผลด้วยตัวเลข ที่ความละเอียด 0.1 dB โดยทำการวัดระดับเสียงภายในห้องทดลองที่บริเวณกึ่งกลางโต๊ะที่จัดไว้ให้ผู้ร่วมทดลอง ซึ่งค่าที่วัดได้แสดงไว้ในตาราง จ1 เมื่อนำค่าที่วัดได้มาทำการเปรียบเทียบกับค่าระดับเสียงที่แนะนำไว้ในหนังสือ Mechanical and Electrical Equipment for Building สำหรับการดำเนินงานในสำนักงาน คือ มีค่าอยู่ระหว่าง 45-60 dbA พบว่าระดับเสียงห้องทดลองบางส่วนเกินมาตรฐานเพียงเล็กน้อย ซึ่งสามารถยอมรับได้

ตาราง จ1 แสดงค่าระดับเสียงที่ความเร็วลมต่าง ๆ

ความเร็วลม (m/s)	ระดับเสียง (dbA)
0.10	51.3
0.25	51.4
0.90	51.4
1.64	61.0
1.74	62.5
1.94	64.1
2.47	66.1

##### 2. การตรวจสอบจากแบบสอบถามที่ผู้ร่วมทดลองตอบในขณะที่ทดลอง

การตรวจสอบระดับเสียงในห้องทดลองจากแบบสอบถามทำได้โดยนำคำตอบจากคำถามข้อที่ 5 (ถามว่า “ท่านมีความรู้สึกอย่างไรเกี่ยวกับระดับเสียงในห้องทดลองในขณะนี้”) และข้อที่ 6 (ถามว่า “ท่านสามารถยอมรับระดับเสียงในห้องทดลองขณะนี้ได้หรือไม่”) จากแบบสอบถาม มาสรุปเป็นตารางแจกแจงความถี่ของแต่ละคำตอบแสดงไว้ในตารางที่ จ2 และตาราง จ3 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาตาราง จ2 ในส่วนของเปอร์เซ็นต์ของคนที่ตอบว่า “เจียบ” หรือ “ดังเล็กน้อย” ที่แต่ละ

ความเร็วลม พบว่าส่วนใหญ่จะมีค่าสูงกว่า 80 % โดยที่ค่าเฉลี่ยสูงถึง 87 % และถ้าพิจารณาตาราง จ3 ในส่วนของเปอร์เซ็นต์ของคนที่ตอบว่า"ได้" พบว่าส่วนใหญ่จะมีค่าสูงกว่า 80 % โดยที่ค่าเฉลี่ยสูงถึง 90 % ดังนั้นจากคำตอบของคำถามทั้งสองข้อนี้สรุปได้ว่าผู้ร่วมทดลองยอมรับระดับเสียงในห้องทดลองขณะทำการทดลองได้

ตาราง จ2 ตารางแจกแจงความถี่ของคำตอบในคำถามข้อที่ 5 ของแบบสอบถามที่แต่ละความเร็วลม

ความเร็วลม (m/s)	เงียบมาก	เงียบ	ดังเล็กน้อย	ดัง	ดังมาก	รวม	เปอร์เซ็นต์ของคนที่ตอบว่า เงียบ หรือ ดังเล็กน้อย
0.10	7	38	79	4	0	128	91
0.25	4	45	76	3	0	128	95
0.90	3	38	85	2	0	128	96
1.64	1	19	94	13	1	128	88
1.74	2	14	93	16	3	128	84
1.94	0	15	92	18	3	128	84
2.47	2	11	84	25	6	128	74
รวม	19	180	603	81	13	896	87

ตาราง จ3 ตารางแจกแจงความถี่ของคำตอบในคำถามข้อที่ 6 ของแบบสอบถามที่แต่ละความเร็วลม

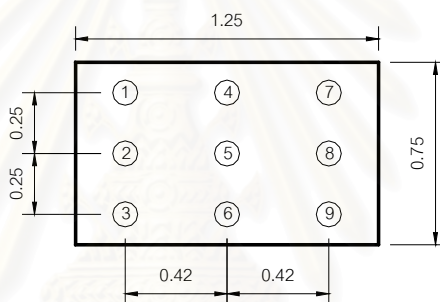
ความเร็วลม (m/s)	ไม่ได้	ได้	รวม	เปอร์เซ็นต์ที่ตอบว่า ได้
0.10	3	125	128	98
0.25	0	128	128	100
0.90	1	127	128	99
1.64	13	115	128	90
1.74	15	113	128	88
1.94	12	116	128	91
2.47	44	105	149	70
รวม	88	829	917	90

ดังนั้น การตรวจสอบจากการวัดระดับเสียงภายในห้องทดลอง และการตรวจสอบจากแบบสอบถามที่ผู้ร่วมทดลองตอบในขณะทดลอง สรุปได้ว่าผู้ร่วมทดลองยอมรับได้กับระดับเสียงภายในห้องทดลองขณะทำการทดลอง

## การตรวจสอบระดับความเข้มแสง

### 1. การตรวจสอบจากการวัดระดับความเข้มแสงภายในห้องทดลอง

ในการทดลองนี้ใช้เครื่องวัดระดับความเข้มแสง ยี่ห้อ DIGICON รุ่น LX-50 แสดงผลด้วยตัวเลข ที่ความละเอียด 1 lux โดยทำการวัดระดับความเข้มแสงบริเวณโต๊ะที่จัดไว้ให้ผู้ร่วมห้องทดลองนั่ง ในขณะที่ทำการทดลองที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของโต๊ะ 9 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูป จ1 และแสดงค่าที่วัดในตาราง จ4 เมื่อนำค่าเฉลี่ยของระดับความเข้มแสงที่วัดจากตำแหน่งทั้ง 9 มาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานระดับความเข้มแสงที่ยอมรับได้ของ ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA ในหนังสือ IES LIGHTING HANDBOOK ได้แนะนำค่าระดับความเข้มแสงที่เหมาะสมสำหรับการทำงานในสำนักงานมีค่าระหว่าง 300-750 lux<sup>1</sup> พบว่าระดับความเข้มแสงในห้องทดลองอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้



รูป จ1 แสดงตำแหน่งที่วัดระดับความเข้มแสง

ตาราง จ4 แสดงค่าระดับความเข้มแสงที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของโต๊ะทดลอง

ตำแหน่งที่	ระดับความเข้มแสง (lux)
1	325
2	316
3	307
4	386
5	378
6	342
7	365
8	351
9	311
ค่าเฉลี่ย	342

<sup>1</sup> John E. Kaufman, IES LIGHTING HANDBOOK-1981: Reference Volume (Meryland : Waverly Press, 1981) p. A-3



## 2. การตรวจสอบจากแบบสอบถามที่ผู้ร่วมทดลองตอบในขณะทดลอง

การตรวจสอบระดับความเข้มแสงในห้องทดลองจากแบบสอบถามทำได้โดยนำคำตอบจากคำถามข้อที่ 7 (ถามว่า “ท่านรู้สึกว่ารระดับแสงสว่างภายในห้องทดลองขณะนี้เป็นอย่างไร”) และข้อที่ 8 (ถามว่า “ท่านสามารถยอมรับระดับแสงสว่างในห้องทดลองขณะนี้ได้หรือไม่”) ในแบบสอบถาม มาสรุปเป็นตารางแจกแจงความถี่ของแต่ละคำตอบแสดงไว้ในตาราง ๑5 และตาราง ๑6 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาตาราง ๑5 ในส่วนของเปอร์เซ็นต์ของคนที่ตอบว่า “พอดี” หรือ “สว่างเล็กน้อย” ที่แต่ละความเร็วลม พบว่าที่ทุกความเร็วลมมีค่าสูงกว่า 95 % โดยที่ค่าเฉลี่ยสูงถึง 96 % และถ้าพิจารณาตาราง ๑6 ในส่วนของเปอร์เซ็นต์ของคนที่ตอบว่า “ได้” พบว่ายอมรับได้เกือบทั้งหมด โดยที่ค่าเฉลี่ยสูงถึง 99 % ดังนั้น จากคำตอบของคำถามทั้งสองข้อนี้สรุปได้ว่าผู้ร่วมทดลองยอมรับระดับความเข้มแสงในห้องทดลองขณะทำการทดลองได้

ดังนั้น การตรวจสอบจากการวัดระดับความเข้มแสงภายในห้องทดลอง และการตรวจสอบจากแบบสอบถามที่ผู้ร่วมทดลองตอบในขณะทดลอง สรุปได้ว่าผู้ร่วมทดลองยอมรับได้กับระดับความเข้มแสงภายในห้องทดลองขณะทำการทดลอง

ตาราง ๑5 ตารางแจกแจงความถี่ของคำตอบในคำถามข้อที่ 7 ของแบบสอบถามที่แต่ละความเร็วลม

ความเร็วลม (m/s)	ค่อนข้างมืด	พอดี	ค่อนข้างสว่าง	รวม	เปอร์เซ็นต์ที่ตอบว่า พอดี หรือ ค่อนข้างสว่าง
0.10	7	110	11	128	95
0.25	5	110	13	128	96
0.90	6	109	13	128	95
1.64	5	109	14	128	96
1.74	5	109	14	128	96
1.94	5	107	16	128	96
2.47	5	109	14	128	96
รวม	38	763	95	896	96

ตาราง ๑6 ตารางแจกแจงความถี่ของคำตอบในคำถามข้อที่ 8 ของแบบสอบถามที่แต่ละความเร็วลม

ความเร็วลม (m/s)	ไม่ได้	ได้	รวม	เปอร์เซ็นต์ที่ตอบว่า ได้
0.10	1	127	128	99
0.25	1	127	128	99
0.90	1	127	128	99
1.64	1	127	128	99
1.74	1	127	128	99
1.94	3	125	128	98
2.47	1	127	128	99
รวม	7	887	896	99

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ภาคผนวก จ**  
**การวิเคราะห์ทางสถิติ**

จ-1 การตรวจสอบความแตกต่างของค่า Thermal Senasation Vote ของเพศชาย และเพศหญิง

จากค่าเฉลี่ยของการตอบคำถามข้อที่ 1 ในแบบสอบถาม ดังแสดงในตาราง จ1 นำมาพิจารณาความแตกต่างของค่า Thermal Senasation Vote ของเพศชาย และเพศหญิง ที่สภาวะต่าง ๆ โดยใช้ค่าสถิติ t-test ในการทดสอบ โดยมีขั้นตอนการทดสอบ ดังนี้

- ตั้งสมมติฐาน

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$
$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

จากสมการ

$$t = \frac{\bar{d}}{s_d / \sqrt{n}} \quad (จ-1)$$

$$s_d = \sqrt{\frac{n \sum d^2 - (\sum d)^2}{n(n-1)}} \quad (จ-2)$$

และ จากตาราง จ1

$$\sum d = 55.25$$
$$\bar{d} = 0.493$$
$$\sum d^2 = 84.188$$
$$n = 112$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าจะได้

$$s_d = 0.7162$$
$$t = 7.28$$

ทำการตรวจสอบความแตกต่างของค่า Thermal Senasation Vote ของเพศชาย และเพศหญิง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในการทดสอบสองทาง จากการเปิดตารางสถิติ<sup>1</sup>

$$t_{0.25(111)} = 1.98 \text{ และ } -t_{0.25(111)} = -1.98$$

---

<sup>1</sup> กานดา พูนลาภทวี, สถิติเพื่อการวิจัย. (กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์พิสิกส์เซ็นเตอร์, 2530) หน้า. 497

ดังนั้น ค่า  $t$  ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่า 1.98 และมากกว่า -1.98 จึงยอมรับ  $H_0$   
หรือ ปฏิเสธ  $H_1$

นั่นคือ ค่า Thermal Sensation Vote ของเพศชาย และเพศหญิง ที่สภาวะต่าง ๆ  
ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข1 แสดงค่าเฉลี่ยของการตอบคำถามข้อที่ 1 ในแบบสอบถาม ของเพศชาย และเพศหญิง  
ที่สภาวะอากาศต่าง ๆ

Ta	%rh	Vel	M	F	dif	dif^2	Ta	%rh	Vel	M	F	dif	dif^2
25.8	50	0.10	0.25	0.00	0.250	0.063	29.8	50	0.1	1.00	1.00	0.00	0.00
25.8	50	0.25	-0.50	-0.50	0.000	0.000	29.8	50	0.25	0.25	0.25	0.00	0.00
25.8	50	0.90	-0.25	-0.50	0.250	0.063	29.8	50	0.9	0.50	0.50	0.00	0.00
25.8	50	1.64	-1.00	-0.75	-0.250	0.063	29.8	50	1.64	0.00	-0.25	0.25	0.06
25.8	50	1.74	-1.50	-1.25	-0.250	0.063	29.8	50	1.74	0.00	0.00	0.00	0.00
25.8	50	1.94	-2.00	-1.75	-0.250	0.063	29.8	50	1.94	0.00	-0.25	0.25	0.06
25.8	50	2.47	-2.00	-2.00	0.000	0.000	29.8	50	2.47	-0.25	-0.25	0.00	0.00
25.8	60	0.10	0.50	0.25	0.250	0.063	29.8	60	0.1	1.25	1.50	-0.25	0.06
25.8	60	0.25	0.00	0.00	0.000	0.000	29.8	60	0.25	0.25	0.50	-0.25	0.06
25.8	60	0.90	0.00	0.00	0.000	0.000	29.8	60	0.9	0.50	0.50	0.00	0.00
25.8	60	1.64	-1.00	-1.00	0.000	0.000	29.8	60	1.64	0.25	0.25	0.00	0.00
25.8	60	1.74	-1.25	-1.50	0.250	0.063	29.8	60	1.74	0.25	0.25	0.00	0.00
25.8	60	1.94	-1.00	-1.00	0.000	0.000	29.8	60	1.94	0.00	-0.25	0.25	0.06
25.8	60	2.47	-1.75	-1.75	0.000	0.000	29.8	60	2.47	0.00	-0.25	0.25	0.06
25.8	70	0.10	0.50	0.25	0.250	0.063	29.8	70	0.1	1.25	1.25	0.00	0.00
25.8	70	0.25	0.25	0.00	0.250	0.063	29.8	70	0.25	0.75	0.75	0.00	0.00
25.8	70	0.90	-0.25	-0.25	0.000	0.000	29.8	70	0.9	0.75	0.75	0.00	0.00
25.8	70	1.64	-0.75	-0.50	-0.250	0.063	29.8	70	1.64	0.50	0.25	0.25	0.06
25.8	70	1.74	-1.25	-1.25	0.000	0.000	29.8	70	1.74	0.25	0.00	0.25	0.06
25.8	70	1.94	-1.00	-1.00	0.000	0.000	29.8	70	1.94	0.25	0.00	0.25	0.06
25.8	70	2.47	-1.50	-1.00	-0.500	0.250	29.8	70	2.47	0.25	0.00	0.25	0.06
25.8	80	0.10	0.25	0.25	0.000	0.000	29.8	80	0.1	1.75	1.50	0.25	0.06
25.8	80	0.25	0.00	0.00	0.000	0.000	29.8	80	0.25	1.25	1.00	0.25	0.06
25.8	80	0.90	0.25	0.25	0.000	0.000	29.8	80	0.9	0.50	0.75	-0.25	0.06
25.8	80	1.64	-1.00	-0.75	-0.250	0.063	29.8	80	1.64	0.50	0.50	0.00	0.00
25.8	80	1.74	-0.75	-1.00	0.250	0.063	29.8	80	1.74	0.50	0.50	0.00	0.00
25.8	80	1.94	-0.75	-1.00	0.250	0.063	29.8	80	1.94	0.00	0.00	0.00	0.00
25.8	80	2.47	-1.00	-1.00	0.000	0.000	29.8	80	2.47	0.00	-0.25	0.25	0.06
27.8	50	0.10	0.50	0.75	-0.250	0.063	31.8	50	0.1	2.00	2.00	0.00	0.00
27.8	50	0.25	0.25	0.25	0.000	0.000	31.8	50	0.25	1.50	1.25	0.25	0.06
27.8	50	0.90	0.00	-0.25	0.250	0.063	31.8	50	0.9	0.75	1.00	-0.25	0.06
27.8	50	1.64	-0.25	-0.25	0.000	0.000	31.8	50	1.64	1.00	1.25	-0.25	0.06
27.8	50	1.74	0.25	-0.75	1.000	1.000	31.8	50	1.74	0.50	0.75	-0.25	0.06
27.8	50	1.94	-1.00	-1.00	0.000	0.000	31.8	50	1.94	0.50	0.75	-0.25	0.06
27.8	50	2.47	-0.75	-0.75	0.000	0.000	31.8	50	2.47	0.00	0.25	-0.25	0.06
27.8	60	0.10	0.75	0.50	0.250	0.063	31.8	60	0.1	1.75	2.00	-0.25	0.06
27.8	60	0.25	0.50	0.00	0.500	0.250	31.8	60	0.25	1.00	1.25	-0.25	0.06
27.8	60	0.90	0.75	0.25	0.500	0.250	31.8	60	0.9	1.25	1.25	0.00	0.00
27.8	60	1.64	0.00	0.00	0.000	0.000	31.8	60	1.64	1.00	0.75	0.25	0.06
27.8	60	1.74	0.25	0.00	0.250	0.063	31.8	60	1.74	0.50	0.50	0.00	0.00
27.8	60	1.94	-0.25	-0.25	0.000	0.000	31.8	60	1.94	0.50	0.25	0.25	0.06
27.8	60	2.47	-0.25	-0.50	0.250	0.063	31.8	60	2.47	0.50	0.50	0.00	0.00
27.8	70	0.10	1.25	1.00	0.250	0.063	31.8	70	0.1	2.50	2.75	-0.25	0.06
27.8	70	0.25	0.75	0.75	0.000	0.000	31.8	70	0.25	1.75	2.00	-0.25	0.06
27.8	70	0.90	0.50	0.50	0.000	0.000	31.8	70	0.9	1.50	1.75	-0.25	0.06
27.8	70	1.64	-0.25	0.00	-0.250	0.063	31.8	70	1.64	1.25	1.00	0.25	0.06
27.8	70	1.74	0.25	0.00	0.250	0.063	31.8	70	1.74	1.25	1.25	0.00	0.00
27.8	70	1.94	0.00	0.00	0.000	0.000	31.8	70	1.94	1.25	1.25	0.00	0.00
27.8	70	2.47	-0.50	-0.75	0.250	0.063	31.8	70	2.47	1.00	1.00	0.00	0.00
27.8	80	0.10	1.50	1.25	0.250	0.063	31.8	80	0.1	2.50	2.50	0.00	0.00
27.8	80	0.25	0.25	0.50	-0.250	0.063	31.8	80	0.25	2.00	2.00	0.00	0.00
27.8	80	0.90	0.25	0.00	0.250	0.063	31.8	80	0.9	2.25	2.00	0.25	0.06
27.8	80	1.64	-0.25	-0.25	0.000	0.000	31.8	80	1.64	1.00	1.00	0.00	0.00
27.8	80	1.74	-0.75	-0.50	-0.250	0.063	31.8	80	1.74	0.75	0.75	0.00	0.00
27.8	80	1.94	-0.75	-0.75	0.000	0.000	31.8	80	1.94	0.75	0.75	0.00	0.00
27.8	80	2.47	-1.00	-1.00	0.000	0.000	31.8	80	2.47	-0.25	-0.25	0.00	0.00
											sum	4.250	5.188
											mean	0.038	

## จ-2 การตรวจสอบความแตกต่างของค่า Preferred Air Velocity ของเพศชาย และเพศหญิง

จากค่า Preferred Air Velocity ที่ได้จากการทดลองในช่วงหาค่าความเร็วลมที่เหมาะสม ดังแสดงในตาราง จ1 นำมาพิจารณาความแตกต่างของค่า Preferred Air Velocity ของเพศชาย และเพศหญิง ที่สภาวะต่าง ๆ โดยใช้ค่าสถิติ t-test ในการทดสอบ โดยมีขั้นตอนการทดสอบ ดังนี้

- ตั้งสมมติฐาน

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

จากสมการ

$$t = \frac{\bar{d}}{s_d / \sqrt{n}} \quad (จ-1)$$

$$s_d = \sqrt{\frac{n \sum d^2 - (\sum d)^2}{n(n-1)}} \quad (จ-2)$$

และ จากตาราง จ1

$$\sum d = -0.1200$$

$$\bar{d} = -0.0075$$

$$\sum d^2 = 0.0830$$

$$n = 16$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าในสมการ จ-1 และสมการ จ-2 จะได้

$$s_d = 0.07398$$

$$t = -0.4055$$

ทำการตรวจสอบความแตกต่างของค่า Preferred Air Velocity ของเพศชาย และเพศหญิง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในการทดสอบสองทาง จากการเปิดตารางสถิติ

$$t_{0.25(15)} = 2.131 \text{ และ } -t_{0.25(15)} = -2.131$$

ดังนั้น ค่า t ที่คำนวณได้น้อยกว่า 2.131 และมากกว่า -2.131 จึงยอมรับ  $H_0$  หรือ ปฏิเสธ  $H_1$

นั่นคือ ค่า Preferred Air Velocity ของเพศชาย และเพศหญิง ที่สภาวะต่าง ๆ ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ๑2 แสดงค่า Preferred Air Velocity ของเพศชาย และเพศหญิง

อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	เพศหญิง	เพศชาย	d (เพศหญิง-เพศชาย)	d <sup>2</sup>
25.8	50	0.38	0.41	-0.0300	0.0009
	60	0.41	0.41	0.0000	0.0000
	70	0.58	0.58	0.0000	0.0000
	80	0.74	0.76	-0.0200	0.0004
27.8	50	0.98	1.09	-0.1100	0.0121
	60	1.05	1.05	0.0000	0.0000
	70	1.27	1.16	0.1100	0.0121
	80	1.35	1.27	0.0800	0.0064
29.8	50	1.74	1.69	0.0500	0.0025
	60	1.64	1.72	-0.0800	0.0064
	70	1.72	1.69	0.0300	0.0009
	80	1.79	1.84	-0.0500	0.0025
31.8	50	1.87	1.74	0.1300	0.0169
	60	1.92	1.97	-0.0500	0.0025
	70	2.16	2.21	-0.0500	0.0025
	80	2.21	2.34	-0.1300	0.0169
sum				-0.1200	0.0830
mean				-0.0075	

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



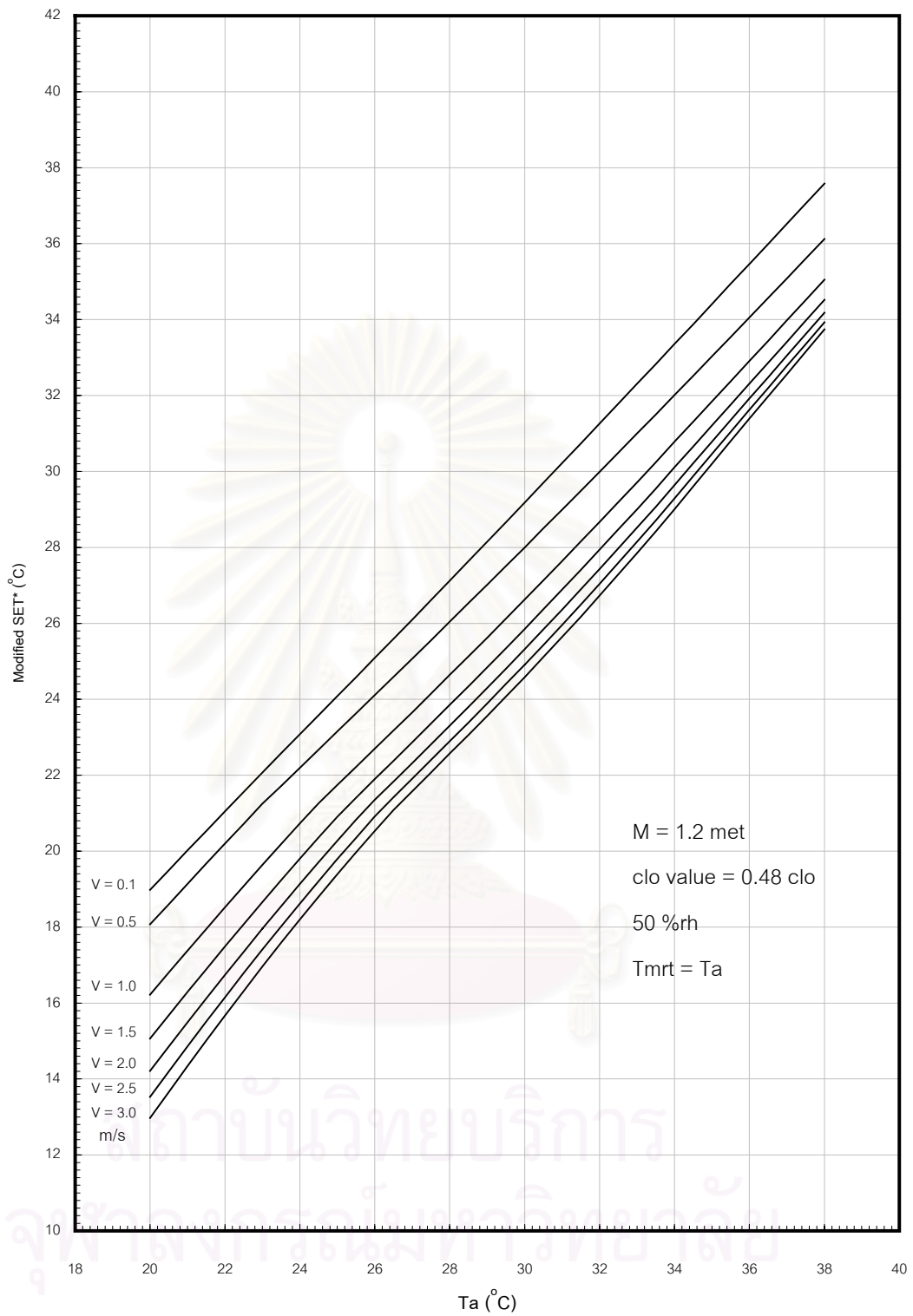
## ภาคผนวก ข

### กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modified SET\* กับ อุณหภูมิอากาศ

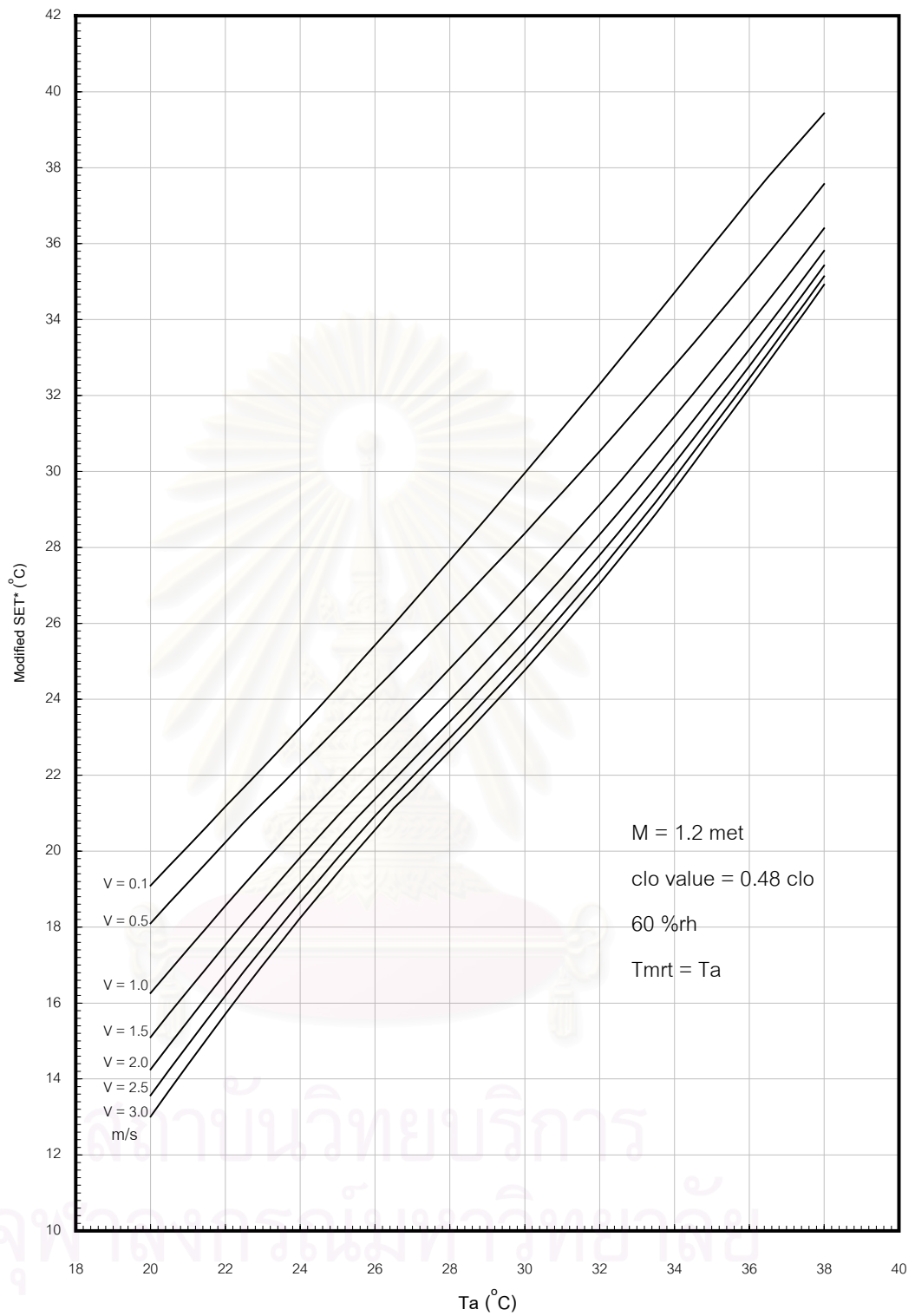
ในส่วนนี้จะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modified SET\* และ อุณหภูมิอากาศ สำหรับ ความชื้นสัมพัทธ์ 50 60 70 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้าที่สวมใส่ 0.48 clo (ชุดมาตรฐานสำหรับชุดทำงานในสำนักงานของประเทศไทย ประกอบด้วย เสื้อผ้าแขนยาว กางเกงผ้าขายาว ชุดชั้นใน ถุงเท้าบาง และรองเท้าหุ้มส้น) ที่ระดับกิจกรรม 1.2 met (งานในลักษณะเหมือนกันงานสำนักงาน) ซึ่งค่าทั้งสองดังกล่าวได้มาจากการคำนวณตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 55-1992 โดยแสดงในรูป ข1 ข2 ข3 และ ข4 ตามลำดับ



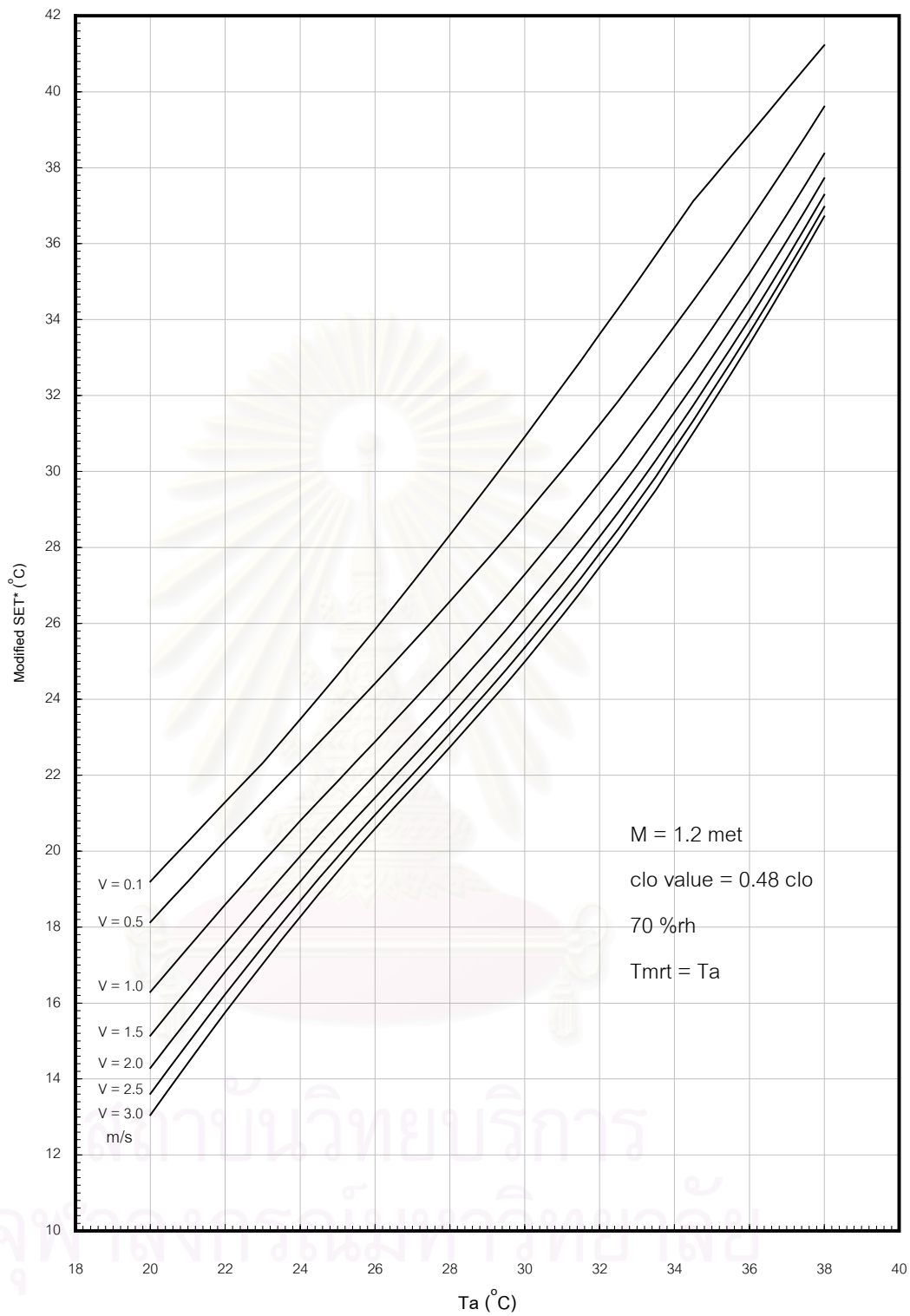
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



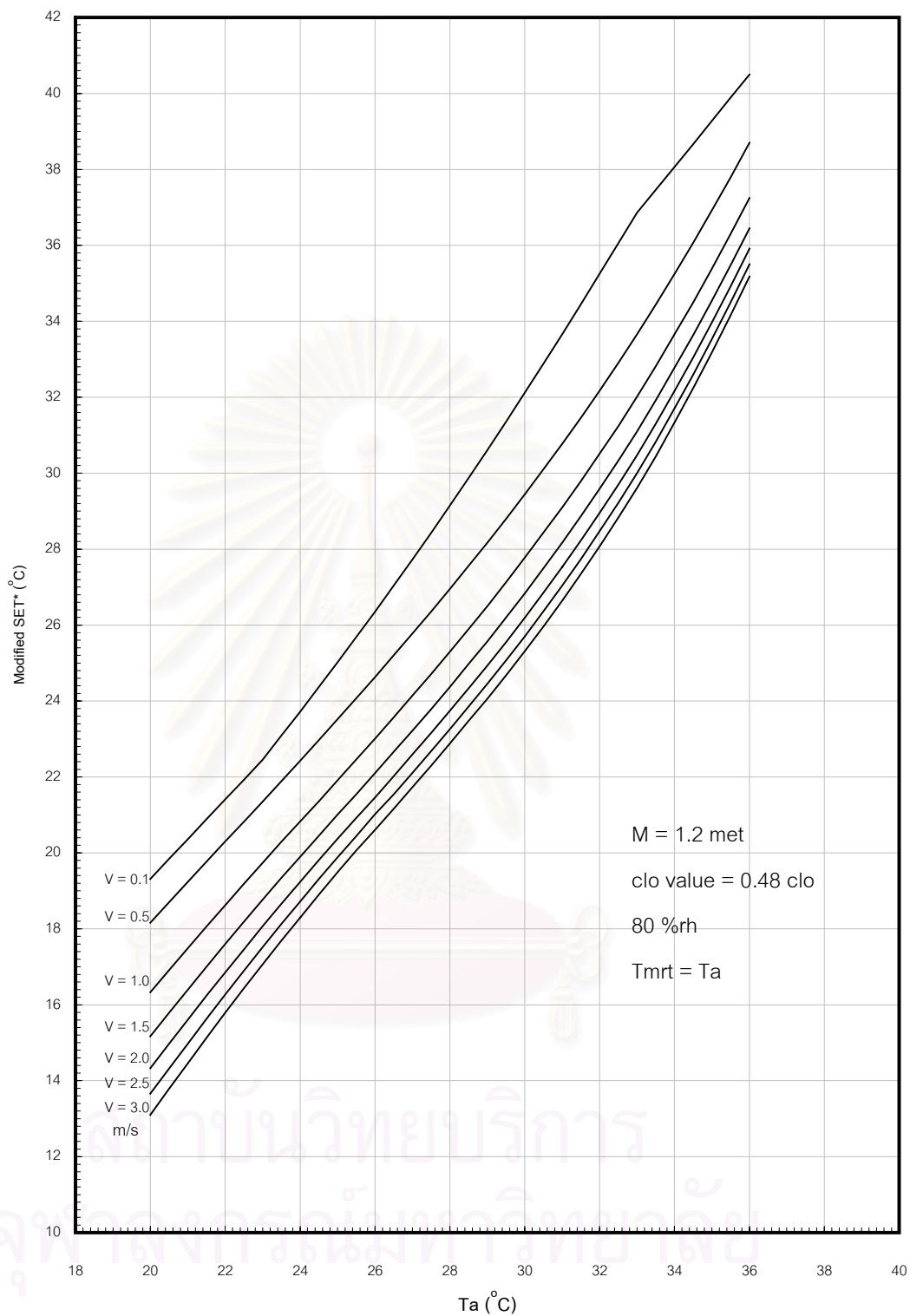
รูป ช1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modified SET\* และ อุณหภูมิอากาศ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์ ระดับกิจกรรม 1.2 met และความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้า 0.48 clo ที่ความเร็วลม 0.1-3.0 m/s



รูป ข2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modified SET\* และ อุณหภูมิอากาศ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์  
 ระดับกิจกรรม 1.2 met และความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้า 0.48 clo ที่ความเร็วลม 0.1-3.0 m/s



รูป ช3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modified SET\* และ อุณหภูมิอากาศ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์  
 ระดับกิจกรรม 1.2 met และความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้า 0.48 clo ที่ความเร็วลม 0.1-3.0 m/s



รูป ๔4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modified SET\* และ อุณหภูมิอากาศ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80 เปอร์เซ็นต์  
ระดับกิจกรรม 1.2 met และความต้านทานความร้อนของเสื้อผ้า 0.48 clo ที่ความเร็วลม 0.1-3.0 m/s

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

- ชื่อ** นายวัฒนา ศรีวาจนะ
- เกิดวันที่** 19 มีนาคม พ.ศ. 2514
- ประวัติการศึกษา**
- สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา
  - สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2535
  - สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2539
  - เข้าศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย