

การออกแบบอาคาร เพื่อการประหยัดพลังงาน

Energy Conscious Building Design

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



รองศาสตราจารย์ ดร. พันธดา พุฒิไพบโรจน์

LEED AP (BD+C, O+M, ID+C, Homes, ND)

WELL AP / DGNB Consultant

การออกแบบอาคาร
เพื่อการประหยัดพลังงาน

Energy Conscious Building Design

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

รองศาสตราจารย์ ดร.พันธุ์ดา พุฒิไพโรจน์

LEED AP (BD+C, O+M, ID+C, HOMES, ND)

WELL AP / DGNB Consultant

ASEAN ARCHITECT

ชื่อหนังสือ การออกแบบอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน
 (Energy Conscious Building Design)
ผู้เขียน รองศาสตราจารย์ ดร.พันธุ์ดา พุฒิไพโรจน์
พิมพ์ครั้งที่ 1 สิงหาคม 2563
จำนวน 300 เล่ม
จัดพิมพ์โดย คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
 31 ถนนหน้าพระลาน แขวงพระบรมมหาราชวัง
 เขตพระนคร กรุงเทพฯ 10200
 โทรศัพท์ 02-223-9288
พิมพ์ที่ บริษัท อีเลฟแวนส์เคอเลอร์ จำกัด
 718/5-8, 20-23 ซอยพญานาค ถนนเพชรบุรี
 เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400
 โทรศัพท์ 0-2215-8452
ออกแบบปกโดย ยุณสิทธิ์ พุฒิพิริยะ

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

พันธุ์ดา พุฒิไพโรจน์. การออกแบบอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน (Energy Conscious Building Design). กรุงเทพฯ : คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2563.
315 หน้า.
ISBN 978-974-641-750-1

คำนิยม

งานสถาปัตยกรรมเป็นงานสร้างสรรค์ที่ต้องประสานความรู้ความเข้าใจในงานวิชาชีพ วิชาการ ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทางสังคม เศรษฐกิจ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ทำให้นักศึกษา สถาปนิก หรือผู้ที่สนใจในศาสตร์ดังกล่าว ต้องเฝ้าหาความรู้ตลอดเวลา ตำรา “การออกแบบอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน (Energy Conscious Building Design)” นี้ รองศาสตราจารย์ ดร.พันธุ์ดา พุฒิไพโรจน์ ซึ่งถือเป็นผู้เชี่ยวชาญและมีประสบการณ์ทางด้านการออกแบบอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน การออกแบบ สถาปัตยกรรมยั่งยืน การอนุรักษ์พลังงานในอาคาร ได้เขียนขึ้นจากการรวบรวมองค์ความรู้และประสบการณ์ ในการทำงานจริง การค้นคว้า และการเป็นครูผู้สอนมาตลอดระยะเวลาที่ท่านปฏิบัติงานอยู่ที่ภาควิชา สถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตำราเล่มนี้ มีเนื้อหาครอบคลุมตั้งแต่ความรู้ขั้นพื้นฐานจนถึงการนำไปใช้งาน โดยเริ่มจากการให้ความรู้เกี่ยวกับความร้อนและอุณหภูมิ วิธีการวิเคราะห์สภาพภูมิอากาศ เครื่องมือที่ใช้สำหรับการศึกษาด้านการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร การศึกษาและวิเคราะห์สภาวะสบาย รวมถึงการออกแบบสถาปัตยกรรม เพื่ออนุรักษ์พลังงาน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานในอาคาร ทำให้เกิดการประหยัดพลังงาน ตลอดจนถึงการลดภาวะโลกร้อน

ในนามคณบดี ผมมีความภาคภูมิใจและชื่นชมในผลงานของ รองศาสตราจารย์ ดร.พันธุ์ดา พุฒิไพโรจน์ ที่ท่านได้นำความรู้ประสบการณ์ที่สั่งสมมายาวนาน มาประมวลเป็นตำรา “การออกแบบอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน (Energy Conscious Building Design)” เล่มนี้ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า หนังสือจะเป็นประโยชน์กับนักศึกษา สถาปนิก ผู้ประกอบการด้านวงการก่อสร้าง และประชาชนผู้สนใจทั่วไป เพื่อเป็นจุดเริ่มต้นและแนวทางในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อมต่อไป

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนท์ คุณคำชู
คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

คำนำ

หนังสือการออกแบบอาคารเพื่อการประหยัดพลังงานเล่มนี้ ได้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ใช้เป็นตำรา สำหรับรายวิชาการออกแบบอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน ซึ่งเป็นรายวิชาบังคับ ระดับปริญญาโท ในหลักสูตรการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร ของคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในขณะเดียวกัน ผู้เขียนเห็นว่า สารในหนังสือเล่มนี้น่าจะมีประโยชน์สำหรับผู้ที่ไม่ได้ศึกษาในสาขานี้โดยตรง หากเขียนด้วยภาษาที่เข้าใจง่าย และใช้ภาพประกอบการอธิบายจำนวนมาก ไม่ใช่ศัพท์เทคนิคจนเกินไป เพื่อให้เข้าใจหลักการออกแบบ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในการทำงานจริง

เนื่องจากเป็นรายวิชาการออกแบบอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน บังคับสำหรับผู้แรกเข้าก่อนที่จะศึกษารายวิชาด้านพลังงานอื่น ๆ เพื่อให้มีความเชี่ยวชาญเฉพาะด้านตามความสนใจ หนังสือเล่มนี้ จึงเริ่มด้วยการอธิบายตั้งแต่ความรู้พื้นฐาน ไปจนถึงทิศทางการออกแบบงานสถาปัตยกรรมในปัจจุบัน ที่ให้ความสำคัญต่อการพัฒนาที่ยั่งยืน โดยแบ่งเนื้อหาในหนังสือนี้ได้เป็น 11 บท ได้แก่

บทที่ 1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับความร้อน เป็นการทบทวนความรู้ซึ่งอาจเคยเรียนมาแล้ว เช่น วิธีการถ่ายเทความร้อน และคุณสมบัติของวัสดุที่บดบังแสงและโปร่งแสงเมื่อได้รับรังสีอาทิตย์ หลักการคำนวณการถ่ายเทความร้อน

บทที่ 2 การวิเคราะห์ข้อมูลสภาพภูมิอากาศ โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อให้สามารถกำหนดกลยุทธ์ในการออกแบบได้เหมาะสมกับสภาพอากาศ

บทที่ 3 เครื่องมือสำหรับศึกษาและวิจัยด้านพลังงาน ในการศึกษาวิชานี้เพื่อเปิดโอกาสให้ผู้เรียนได้ค้นคว้าทดลองในหัวข้อที่สนใจ จึงจำเป็นต้องรู้จักเครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ซึ่งอาจต้องใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ต่อไป

บทที่ 4 แผนภูมิไซโครเมตริก เป็นการอธิบายให้เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและความร้อนของน้ำในอากาศ ซึ่งเป็นพื้นฐานของงานระบบปรับอากาศ และความเข้าใจการออกแบบให้เกิดความเย็น โดยใช้การระเหยของน้ำ

บทที่ 5 สภาวะสบาย เพื่อให้เข้าใจปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะสบาย ความแตกต่างระหว่างขอบเขตสภาวะสบาย ในสภาพปรับอากาศและไม่ปรับอากาศ และมาตรฐานสากลที่ใช้ในการออกแบบ

บทที่ 6 การออกแบบที่พึงพาธรรมชาติ เพื่อทำให้เห็นภาพรวมของวิธีการต่าง ๆ ในการออกแบบที่ช่วยลดความร้อนที่เข้าสู่อาคาร รวมทั้งวิธีการวิเคราะห์เพื่อการออกแบบแผงบังแดด และการใช้การระบายอากาศธรรมชาติ

บทที่ 7 กฎหมายอนุรักษ์พลังงาน การออกแบบให้ถูกต้องกับกฎหมายอนุรักษ์พลังงาน เป็นความรู้ที่จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับผู้ที่ยังศึกษาด้านการประหยัดพลังงานในอาคาร โดยเป็นการอธิบายภาพรวมของกฎหมายและสมการในการคำนวณ

บทที่ 8 ระบบเปลือกอาคาร แนวทางการออกแบบผนังภายนอกและหลังคา ให้สอดคล้องตามกฎหมายอนุรักษ์พลังงาน สมการในการคำนวณตามที่กฎหมายกำหนด และการออกแบบเปลือกอาคารให้มีประสิทธิภาพพลังงานสูงกว่าเกณฑ์ตามกฎหมาย

บทที่ 9 ระบบปรับอากาศและระบายอากาศ ส่วนประกอบของเครื่องปรับอากาศ ประสิทธิภาพพลังงานของระบบปรับอากาศตามกฎหมาย เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับระบบปรับอากาศและการระบายอากาศ และผลกระทบของระบบปรับอากาศต่อสิ่งแวดล้อม

บทที่ 10 ระบบไฟฟ้าแสงสว่างและการใช้แสงธรรมชาติ ประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าแสงสว่างตามกฎหมาย แนวทางการออกแบบที่ใช้แสงธรรมชาติ

บทที่ 11 สถาปัตยกรรมยั่งยืนและระบบประเมินอาคาร ทิศทางการออกแบบสถาปัตยกรรมที่มีการนำมาตรฐานอาคารเขียวที่เน้นด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม และมาตรฐานอาคารที่เน้นด้านสุขภาวะ มาใช้ในการออกแบบสถาปัตยกรรมในประเทศไทยมากขึ้น ความจำเป็นของการบูรณาการ เรื่องการออกแบบอาคารประหยัดพลังงานควบคู่ไปกับเรื่องอื่น ๆ

ผู้เขียนได้จัดทำหนังสือเล่มนี้ในรูปแบบไฟล์ pdf ด้วย เพื่อสะดวกต่อการเรียนออนไลน์ และสามารถเชื่อมโยงไปยังเว็บไซต์ต่าง ๆ ได้โดยตรง

ผู้เขียนขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชญา รังสิรักษ์ รองศาสตราจารย์ พาสินี สุนากร รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชญา มหัทธนะวิ ที่ได้อ่านตรวจทาน และให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ เพื่อให้ตำราเล่มนี้มีความครบถ้วนสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า หนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อ สถาปนิก และผู้ที่สนใจในการดำเนินงานด้านการออกแบบสถาปัตยกรรมให้ดียิ่งขึ้น

รองศาสตราจารย์ ดร.พันธุ์ดา พุฒิไพโรจน์
LEED AP (B+D, O+M, ID+C, Homes, ND)

WELL AP

DGNB Consultant

ASEAN ARCHITECT

Line ID: pantuda

Email: drpantuda@gmail.com

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

สารบัญ

หน้า

คำนำ	ก
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูป	ฐ
1. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับความร้อน	1
1.1 ความร้อน (Heat)	1
1.2 อุณหภูมิ (Temperature)	2
1.3 ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity) และความร้อนจำเพาะ (Heat Capacity)	3
1.4 ประเภทของความร้อน	5
1.5 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)	6
1.6 ผลของรังสีอาทิตย์ที่มีต่อวัตถุ	9
1.7 เรือนกระจก (Greenhouse)	11
1.8 ภาวะโลกร้อนและก๊าซเรือนกระจก	11
1.9 แหล่งถ่ายเทความร้อน (Heat Source) และแหล่งดูดซับความร้อน (Heat Sink)	12
1.10 การระเหยเป็นไอ (Evaporation)	12
1.11 องค์ประกอบของรังสีดวงอาทิตย์	13
1.12 การวัดปริมาณของรังสีอาทิตย์	14
1.13 ประเภทของรังสีอาทิตย์	15
1.14 ประเภทของวิธีการคำนวณการถ่ายเทความร้อน	15
1.15 Sol Air Temperature	17
1.16 สรุป	17
เอกสารอ้างอิง	19
แบบฝึกหัด	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2. การวิเคราะห์สภาพภูมิอากาศ	21
2.1 การวิเคราะห์สภาพภูมิอากาศ.....	21
2.2 ข้อมูลสถิติภูมิอากาศที่ใช้ในการออกแบบอาคาร.....	21
2.3 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์สถิติภูมิอากาศ.....	24
2.4 การใช้ Web Application.....	40
2.5 การพิจารณาสภาพภูมิอากาศโดยใช้ Degree Days	42
2.6 การแบ่งเขตภูมิอากาศโดย ASHRAE.....	44
2.7 สภาพภูมิอากาศในพื้นที่ขนาดเล็ก (Micro Climate).....	46
2.8 สรุป	48
เอกสารอ้างอิง	49
3. เครื่องมือสำหรับการศึกษาด้านการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร.....	51
สรุป	61
เอกสารอ้างอิง	62
4. แผนภูมิไชโครเมตริก (Psychrometric Chart)	63
4.1 แผนภูมิไชโครเมตริก (Psychrometric Chart)	63
4.2 วิธีการทำให้อากาศร้อนขึ้นหรือเย็นลง (Heating or Cooling)	72
4.3 การใช้แผนภูมิไชโครเมตริกเพื่อการวิเคราะห์สภาพภูมิอากาศ	76
4.4 การวิเคราะห์สภาวะสบายและแนวทางการออกแบบ.....	77
4.5 ข้อสังเกตเพิ่มเติม (Notes)	78
4.6 สรุป	79
เอกสารอ้างอิง	80
แบบฝึกหัด	80
5. สภาวะสบาย (Thermal Comfort).....	83
5.1 กลไกการทำงานของร่างกาย	83
5.2 ความหมายของสภาวะสบาย (Thermal Comfort – Definition)	83

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3	ปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะสบาย.....	84
5.4	การหาค่าปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะสบาย.....	84
5.5	การหาสภาวะสบายจาก Bioclimatic Chart.....	94
5.6	การหาสภาวะสบายโดยใช้อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายนอก.....	95
5.7	มาตรฐานในการออกแบบเพื่อให้เกิดสภาวะสบาย	96
5.8	สภาวะสบายตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 55.....	96
5.9	การวิเคราะห์หาสภาวะสบาย.....	98
5.10	การวิเคราะห์สภาวะสบายในสภาพปรับอากาศ.....	98
5.10.1	Graphic Comfort Zone Method - วิเคราะห์หาสภาวะสบายจากแผนภูมิ	98
5.10.2	Analytical Comfort Zone Method – วิเคราะห์ขอบเขตสภาวะสบายโดยการ คำนวณ.....	101
5.10.3	Elevated Air Speed Comfort Zone Method - วิเคราะห์หาสภาวะสบายเมื่อมีลม	103
5.10.4	สภาวะไม่สบายที่บางส่วนของร่างกาย (Local Thermal Discomfort).....	107
5.10.5	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงเวลา (Temperature Variation with Time)..	108
5.11	การวิเคราะห์สภาวะสบายสำหรับการระบายอากาศตามธรรมชาติ (Comfort Zone for Natural Ventilation)	108
5.11.1	อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายนอกอาคารที่ส่งผลกระทบต่อช่วงที่พิจารณา (Prevailing Mean Outdoor Air Temperature).....	109
5.11.2	การขยายขอบเขตสภาวะสบายในสภาพไม่ปรับอากาศ	110
5.12	แนวคิดในการออกแบบให้เกิดสภาวะสบายในอาคารเขียว.....	117
5.13	สรุป.....	118
	เอกสารอ้างอิง	119
	แบบฝึกหัด.....	120
6.	การออกแบบโดยพึ่งพาธรรมชาติ (Passive Cooling).....	121
6.1	ภาพรวมของวิธีการออกแบบโดยใช้การพึ่งพาธรรมชาติ	121
6.2	แนวทางการออกแบบอุปกรณ์บังแดด.....	127

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.3 การหาระยะยื่นของแผงบังแดด	134
6.4 แนวทางการเลือกใช้อุปกรณ์บังแดด	140
6.5 แผงบังแดดที่สามารถปรับตามสภาพแสงแดด	141
6.6 แนวทางการออกแบบโดยใช้การระบายอากาศตามธรรมชาติ	143
6.7 หลักการพื้นฐานเกี่ยวกับเคลื่อนที่ของอากาศ	146
6.8 แนวทางการออกแบบที่ใช้การระบายอากาศธรรมชาติ	151
6.9 ข้อพิจารณาเพิ่มเติมในการใช้ลมธรรมชาติ	157
6.10 กฎหมายและมาตรฐานในการระบายอากาศ	157
6.11 สรุป	158
เอกสารอ้างอิง	158
แบบฝึกหัด	159
7. กฎหมายอนุรักษ์พลังงาน	161
7.1 ประเภทและขนาดอาคาร	161
7.2 ระบบของอาคารที่ควบคุม	161
7.3 วิธีการพิจารณาการผ่านเกณฑ์ตามกฎหมาย	164
7.4 การใช้พลังงานหมุนเวียน	165
7.5 หลักการคำนวณค่าการใช้พลังงานรวม	166
7.6 การประมาณค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์	168
7.7 ข้อควรพิจารณาในการใช้ค่าพลังงานรวม	168
เอกสารอ้างอิง	169
8. ระบบเปลือกอาคาร (Building Envelope)	171
8.1 ระบบการถ่ายเทความร้อนของอาคารกับสภาพแวดล้อม	171
8.2 หลักการออกแบบอาคารปรับอากาศให้ประหยัดพลังงาน	172
8.3 การลดภาระความร้อนของระบบปรับอากาศ	173
8.4 เกณฑ์การออกแบบเปลือกอาคารตามกฎหมายอนุรักษ์พลังงาน	175

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

8.5	วิธีการคำนวณค่า OTTV.....	178
8.6	วิธีการคำนวณค่า RTTV	179
8.7	การคำนวณค่า OTTV และ RTTV ของอาคารที่มีการใช้สอยหลายประเภท	180
8.8	การคำนวณค่า OTTV และ RTTV โดยใช้โปรแกรม BEC.....	180
8.9	ตัวแปรในสมการ OTTV	181
8.10	ตัวแปรการคำนวณค่า RTTV	194
8.11	แนวทางการออกแบบเปลือกอาคารให้สอดคล้องกับกฎหมาย	197
8.12	แนวทางการออกแบบผนังทึบ.....	198
8.13	ประเภทของฉนวนกันความร้อน	200
8.14	ข้อพิจารณาในการเลือกฉนวน.....	204
8.15	อิทธิพลของผนังมวลสารในการหน่วงความร้อน	205
8.16	แนวทางการออกแบบหน้าต่างหรือผนังโปร่งแสง.....	207
8.17	ชนิดของกระจกที่ใช้ในงานออกแบบอาคารประหยัดพลังงาน	209
8.18	การลดสะพานความร้อน	213
8.19	การลดการรั่วซึมของอากาศ (Infiltration).....	215
8.20	แนวทางการออกแบบเพื่อลดความร้อนของหลังคา	216
8.21	ปัจจัยที่ไม่ได้รวมในการคำนวณ OTTV และ RTTV	220
8.22	สรุป.....	221
	เอกสารอ้างอิง	222
	แบบฝึกหัด.....	224
9.	ระบบปรับอากาศและระบบระบายอากาศ	227
9.1	ส่วนประกอบของเครื่องปรับอากาศ และวงจรการทำงาน.....	227
9.2	ประเภทของระบบปรับอากาศ	228
9.3	ค่าประสิทธิภาพพลังงานของระบบปรับอากาศ.....	234
9.4	ประเภทของระบบปรับอากาศที่มีการควบคุมตามกฎหมาย.....	236

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

9.5 เทคโนโลยีในระบบปรับอากาศและระบายอากาศที่ช่วยประหยัดพลังงานและสุขภาวะ	240
9.5.1 เทคโนโลยีในการระบายอากาศ.....	240
9.5.2 เทคโนโลยีในการบำบัดอากาศ	242
9.5.3 เทคโนโลยีในการจ่ายความเย็น	245
9.6 ระบบปรับอากาศกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม.....	248
9.7 สรุป	249
เอกสารอ้างอิง	250
10. ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง และการใช้แสงธรรมชาติ	251
10.1 กฎหมายและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่าง	251
10.2 วิธีการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่างให้ประหยัดพลังงาน.....	253
10.3 คุณภาพของหลอดไฟ LED.....	261
10.4 การใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติ.....	263
10.5 วิธีการออกแบบเพื่อใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติ	265
10.5.1 การให้แสงจากด้านข้าง	265
10.5.2 การให้แสงจากด้านบน.....	269
10.3 การใช้ท่อนำแสง (Light Pipe, Light Tube).....	272
10.4 ประโยชน์ของแสงธรรมชาติที่มีต่อสุขภาพ	272
10.5 สรุป	274
เอกสารอ้างอิง	275
แบบฝึกหัด	276
11. สถาปัตยกรรมยั่งยืนและระบบประเมินอาคาร	277
11.1 องค์ประกอบของการพัฒนาที่ยั่งยืน	277
11.2 ระบบประเมินอาคารเขียวในประเทศไทย	278
11.3 เกณฑ์การประเมินอาคารเขียวในระบบ LEED.....	280
11.4 เกณฑ์การประเมินอาคารเขียวในระบบ TREES.....	292

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

11.5 ระบบประเมินอาคารที่เน้นสุขภาวะตามมาตรฐาน WELL	293
11.6 สรุป.....	302
เอกสารอ้างอิง	303
แบบฝึกหัด.....	304
บรรณานุกรม	305
ดัชนีคำค้น.....	311
ประวัติผู้เขียน	315

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1-1 ตัวอย่างค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ.....	3
ตารางที่ 1-2 ค่าสัมประสิทธิ์ในการแผ่รังสีความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของผิววัสดุ.....	9
ตารางที่ 5-1 ค่า A ที่แต่ละ V_a	100
ตารางที่ 5-2 ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิแผ่รังสีที่ยอมรับได้	107
ตารางที่ 5-3 ข้อจำกัดในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลงหรือเพิ่มขึ้น (Drifts or Ramps)	108
ตารางที่ 5-4 การเพิ่มขีดจำกัดที่ยอมรับได้ของ Operative Temperature เมื่อความเร็วลม > 0.3 m/s	110
ตารางที่ 5-5 การเปรียบเทียบวิธีการหาสถานะสบายทั้ง 4 วิธี และขอบเขตของค่าตัวแปร.....	111
ตารางที่ 6-1 ภาพรวมของวิธีการออกแบบโดยการพึ่งพาธรรมชาติ	122
ตารางที่ 6-2 ความเร็วลมและสถานะสบาย	145
ตารางที่ 7-1 เกณฑ์ค่า OTTV, RTTV และ LPD ตามกฎหมายอนุรักษ์พลังงาน	162
ตารางที่ 7-2 เกณฑ์ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำและหม้อต้มน้ำร้อน	163
ตารางที่ 7-3 เกณฑ์ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนชนิดฮีตปั๊ม	163
ตารางที่ 7-4 ค่าสัมประสิทธิ์สัดส่วนความร้อนที่เป็นภาระแก่ระบบปรับอากาศ และจำนวนชั่วโมง.....	167
ตารางที่ 8-1 ค่า OTTV และ RTTV ของอาคารแต่ละประเภท.....	176
ตารางที่ 8-2 ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศสำหรับผนังอาคาร.....	183
ตารางที่ 8-3 ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ในการนำความร้อนของวัสดุ (k) ค่าความหนาแน่น (ρ) (อ่านว่า โร) และค่าความจุความร้อนจำเพาะ (C_p) (ดูเพิ่มเติมในประกาศฯ กระทรวงพลังงาน).....	184
ตารางที่ 8-4 ค่าความต้านทานความร้อนของช่องว่างอากาศที่อยู่ภายในผนังอาคาร	185
ตารางที่ 8-5 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของวัสดุผนังและสียภายนอกของผนังชนิดต่าง ๆ	187
ตารางที่ 8-6 ตัวอย่างตารางหาค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเทียบเท่า	188
ตารางที่ 8-7 ค่าความต้านทานความร้อนของช่องว่างอากาศที่อยู่ระหว่างแผ่นกระจกหรือผนังโปร่งแสง	190
ตารางที่ 8-8 ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคารสำหรับอาคารแต่ละประเภท	190
ตารางที่ 8-9 ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (ESR) สำหรับอาคารประเภทสถานศึกษา	193
ตารางที่ 8-10 ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (ESR) สำหรับอาคารประเภทโรงแรม	193
ตารางที่ 8-11 ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (ESR) สำหรับอาคารประเภทโรงแรม	194
ตารางที่ 8-12 ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศสำหรับหลังคาอาคาร	195
ตารางที่ 8-13 ค่าความต้านทานความร้อนของช่องว่างอากาศที่อยู่ภายในหลังคาอาคาร	196
ตารางที่ 8-14 ค่าความต้านทานความร้อนของช่องว่างอากาศระหว่างหลังคาและเพดาน.....	196

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 8-15	ความเชื่อมโยงระหว่างแนวทางการออกแบบอาคารและตัวแปรในสมการ	197
ตารางที่ 8-16	ค่า U ของผนังทึบสำหรับอาคารแต่ละประเภทตามคู่มือแบบประเมินอาคารฯ	198
ตารางที่ 8-17	ค่า U ของผนังทึบแบบต่าง ๆ.....	199
ตารางที่ 8-18	ตัวอย่างการห้วงความร้อน และ Decrement Factor ของผนังแบบต่าง ๆ	206
ตารางที่ 9-1	ส่วนประกอบที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าของระบบปรับอากาศแบบ Chiller	231
ตารางที่ 9-2	เกณฑ์ระดับประสิทธิภาพพลังงานเครื่องปรับอากาศ ชนิด Fixed Speed ปี ค.ศ. 2019 ..	235
ตารางที่ 9-3	เกณฑ์ระดับประสิทธิภาพพลังงานเครื่องปรับอากาศ ชนิด Variable Speed/Inverter ปี ค.ศ. 2019	235
ตารางที่ 9-4	เครื่องทำน้ำเย็นสำหรับระบบปรับอากาศต้องมีค่าพลังงานไฟฟ้าต่อตันความเย็นไม่เกินกว่า ที่กำหนดไว้	237
ตารางที่ 9-5	กำหนดภาวะพิกัดโดยระบุอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่อง ควบแน่น.....	239
ตารางที่ 9-6	กำหนดภาวะพิกัดโดยระบุอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าและออกจากเครื่องควบแน่น...	239
ตารางที่ 10-1	ค่ากำลังไฟฟ้าส่องสว่างสูงสุดตามกฎหมาย (วัดต่อตารางเมตรของพื้นที่ใช้งาน)	252
ตารางที่ 10-2	เกณฑ์ระดับประสิทธิภาพพลังงานหลอดแอลอีดี (เริ่มใช้ตั้งแต่ 1 มกราคม 2562)	254
ตารางที่ 10-3	ค่า Daylight Factor ขั้นต่ำที่แนะนำสำหรับพื้นที่ต่าง ๆ.....	264
ตารางที่ 11-1	หมวดเนื้อหาของ LEED เวอร์ชัน 4	280

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1-1	การเปรียบเทียบสเกลของการวัดอุณหภูมิแบบต่าง ๆ	3
รูปที่ 1-2	การเปรียบเทียบปริมาตรของน้ำและคอนกรีตที่มีความจุความร้อนเท่ากัน	4
รูปที่ 1-3	การเปรียบเทียบปริมาณความร้อนสัมผัสขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและขนาดของมวล	5
รูปที่ 1-4	การเปรียบเทียบความร้อนแฝงกับความร้อนสัมผัสที่ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น	6
รูปที่ 1-5	ปริมาณการนำความร้อนขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ในการนำความร้อน พื้นที่หน้าตัด และความแตกต่างของอุณหภูมิ	7
รูปที่ 1-6	ปริมาณความร้อนจากการพาความร้อนขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ ความแตกต่างของอุณหภูมิ และสัมประสิทธิ์ในการพาความร้อน	8
รูปที่ 1-7	หลังคาที่ได้รับรังสีอาทิตย์ถ้ามีค่า Solar Reflectance สูง จะดูดกลืนความร้อนต่ำทำให้ความร้อน เข้าสู่อาคารน้อย และการมีค่า Emittance สูงจะทำให้คายความร้อนสู่ภายนอกได้เร็ว	10
รูปที่ 1-8	อะลูมิเนียมพอยล์ที่มีผิวมันเงาทั้ง 2 ด้าน ด้านบนมี Reflectance สูง จะสะท้อนความร้อน ส่วนด้านล่างที่ค่า Emittance ต่ำ จะทำให้แผ่ความร้อนเข้ามาในอาคารได้น้อย	10
รูปที่ 1-9	การเกิดความร้อนสะสมในเรือนกระจกจากคลื่นอินฟราเรดยาว ที่ไม่สามารถสะท้อนและแผ่รังสี (Reflect) ออกไปได้ ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น แล้วจึงแผ่ความร้อน (Emit) ให้กับสภาพแวดล้อม ที่เย็นกว่าอีกทีหนึ่ง	11
รูปที่ 1-10	ปรากฏการณ์ก๊าซเรือนกระจกและภาวะโลกร้อน	12
รูปที่ 1-11	องค์ประกอบของแถบคลื่นรังสีอาทิตย์	14
รูปที่ 1-12	ความเข้มของรังสีอาทิตย์ (Irradiance) และปริมาณรังสีอาทิตย์ (Irradiation)	14
รูปที่ 1-13	มิติในการถ่ายเทความร้อน	16
รูปที่ 1-14	การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังแบบ Periodic Heat Flow	16
รูปที่ 2-1	ผังลมรายเดือนของกรุงเทพมหานคร แบ่งเป็น 8 ทิศ	22
รูปที่ 2-2	ผังลมรายเดือนของกรุงเทพมหานคร แบ่งเป็น 16 ทิศ	23
รูปที่ 2-3	หน้าแรกเข้าสู่โปรแกรม	25
รูปที่ 2-4	หน้าทีเลือก “Start a New Project”	25
รูปที่ 2-5	การเลือกประเภทอาคาร หน่วยวัด และไฟล์ภูมิอากาศ	26
รูปที่ 2-6	การติดตั้งไฟล์ภูมิอากาศ	26
รูปที่ 2-7	ตารางสรุปข้อมูลภูมิอากาศทั้งหมดเป็นรายเดือน	27
รูปที่ 2-8	การเลือกเกณฑ์มาตรฐานสภาวะสบายที่จะใช้	28
รูปที่ 2-9	ปรับเงื่อนไขเกี่ยวกับสภาวะสบายและค่าอื่น ๆ หรือ ใช้ค่า Default	28
รูปที่ 2-10	อุณหภูมิอากาศ เปรียบเทียบกับ Adaptive Comfort Zone (แถบสีเทา)	29

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2-11	อุณหภูมิอากาศเปรียบเทียบกับสภาวะสบายในสภาพปรับอากาศซึ่งแบ่งเป็นฤดูร้อนและฤดูหนาว	30
รูปที่ 2-12	แสดงอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยในรอบ 1 วัน ของแต่ละเดือน	30
รูปที่ 2-13	การวิเคราะห์รังสีอาทิตย์บนผนังทิศตะวันตกแบบกราฟแท่ง	31
รูปที่ 2-14	การวิเคราะห์รังสีอาทิตย์บนผนังทิศตะวันตกแบบตารางเวลา	32
รูปที่ 2-15	การวิเคราะห์อุณหภูมิอากาศระหว่างวันกับขอบเขตสภาวะสบาย (แถบสีเทา) และรังสีอาทิตย์ พร้อมกัน	33
รูปที่ 2-16	อุณหภูมิดินในรอบปี	34
รูปที่ 2-17	ผังลมรวม 1 ปี เดือนมกราคม-ธันวาคม	35
รูปที่ 2-18	ผังลมที่แสดงข้อมูลเฉพาะในเวลา 18.00-24.00 น. ของเดือนเมษายน	35
รูปที่ 2-19	ความเร็วลมรายเดือน ค่าต่ำสุดเฉลี่ย ค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุดเฉลี่ย	36
รูปที่ 2-20	ภาพรวมของความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลาตลอดทั้งปี	36
รูปที่ 2-21	แสงสว่างภายนอกอาคาร	37
รูปที่ 2-22	ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศ	38
รูปที่ 2-23	การสร้างกราฟจากตัวแปรที่ต้องการ คือ อุณหภูมิอากาศสูงสุด (เส้นสีแดง) - ต่ำสุด (เส้นสีน้ำเงิน) (อ่านค่าที่แกนด้านซ้าย) และความเร็วลม (เส้นสีดำ) (อ่านค่าที่แกนด้านขวา)	38
รูปที่ 2-24	ผังการโคจรของดวงอาทิตย์และเวลาที่เกิดการบังแดดจากจากอาคารอื่น	39
รูปที่ 2-25	การปลูกต้นไม้ 1 ต้น ที่สูง 5 ม. และห่างจากตัวอาคาร 5 ม. จะบังแดดได้ช่วง 14.00-16.00 น.	39
รูปที่ 2-26	การวิเคราะห์อุณหภูมิอากาศระหว่าง 08.00-18.00 น. ตลอดปี	40
รูปที่ 2-27	การวิเคราะห์ความเร็วลมรายชั่วโมงตลอดปี โดยเว็บไซต์ http://andrewmarsh.com/software/	41
รูปที่ 2-28	รูปตัดข้อมูลความเร็วลมในรอบ 24 ชั่วโมง (สีน้ำเงิน) ของวันที่กำหนด และรูปตัดความเร็วลม ในรอบ 12 เดือน (สีแดง) ของเวลาที่กำหนด คือ 01:00 น.	41
รูปที่ 2-29	การวิเคราะห์ปริมาณรังสีอาทิตย์ (Global Radiation) ผ่าน Web Application	42
รูปที่ 2-30	แผนที่ภูมิอากาศแสดงด้วย Heating Degree Days	43
รูปที่ 2-31	ตัวอย่างการแสดงผลภูมิอากาศโดยใช้ Cooling Degree Days	44
รูปที่ 2-32	การแบ่งโซนภูมิอากาศโดยใช้ Degree Days ของ ASHRAE	45
รูปที่ 2-33	การแบ่งเขตภูมิอากาศในโลกโดยใช้ Degree Days ตาม ASHRAE Standard 169	46
รูปที่ 2-34	อุณหภูมิพื้นผิวจากดาวเทียมแสดงให้เห็นเกาะความร้อนในเมืองของกรุงเทพมหานคร	47
รูปที่ 2-35	การวิเคราะห์เงาเพื่อหาบริเวณที่เหมาะสมของการสร้างอาคาร ที่จะมีการติดตั้งแผงเซลล์ แสงอาทิตย์	48

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3-1	เครื่องวัดสภาพภูมิอากาศแบบไร้สาย (Wireless Weather Station).....	51
รูปที่ 3-2	เครื่องมือวัดความชื้น และอุณหภูมิอากาศ	52
รูปที่ 3-3	เครื่องวัดความเร็วลมชนิดรูปถ้วย	52
รูปที่ 3-4	เครื่องวัดความเร็วลมชนิดรูปถ้วย และศรลม	53
รูปที่ 3-5	เครื่องวัดความเร็วลมชนิดใบพัด (Vane Anemometer)	53
รูปที่ 3-6	เครื่องมือวัดความเร็วลมชนิดขดลวดร้อน	53
รูปที่ 3-7	เครื่องวัดอุณหภูมิชนิดอินฟราเรด.....	54
รูปที่ 3-8	กล้องถ่ายภาพความร้อน	54
รูปที่ 3-9	เครื่องมือวัดความชื้นในวัสดุ	55
รูปที่ 3-10	กล้องถ่ายภาพความชื้น.....	55
รูปที่ 3-11	Data Logger สำหรับบันทึกอุณหภูมิอากาศและความชื้นแบบไร้สาย.....	56
รูปที่ 3-12	Thermocouple Type-T.....	57
รูปที่ 3-13	วิธีการดูประเภทของสาย Thermocouple จากตารางสี.....	57
รูปที่ 3-14	Data Logger ที่ใช้ต่อกับ Thermocouple.....	57
รูปที่ 3-15	Pyranometer ชนิด Thermopile.....	58
รูปที่ 3-16	Silicon Photocell Pyranometer	58
รูปที่ 3-17	Globe Thermometer	59
รูปที่ 3-18	Globe Thermometer แบบพกพา.....	59
รูปที่ 3-19	เครื่องมือวัดความส่องสว่าง (Illuminance).....	59
รูปที่ 3-20	เครื่องมือวัดสภาวะสบาย.....	60
รูปที่ 3-21	เครื่องมือวัดเสียง อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม ความส่องสว่าง ในเครื่องเดียวกัน	60
รูปที่ 3-22	เครื่องมือวัดระบบ Green Roof.....	61
รูปที่ 4-1	แผนภูมิไซโครเมตริกที่แสดงข้อมูลครบทั้ง 7 ค่า	64
รูปที่ 4-2	แผนภูมิไซโครเมตริกแบบ Interactive ที่สามารถกำหนดสีของแต่ละเส้น	65
รูปที่ 4-3	เส้นความชื้นสัมบูรณ์ ความชื้นสัมพัทธ์ (เส้นโค้ง) และอุณหภูมิกระเปาะแห้ง.....	66
รูปที่ 4-4	เส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียก (เส้นทะแยง) เส้นความชื้นสัมพัทธ์ (เส้นโค้ง)	67
รูปที่ 4-5	อุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศอุณหภูมิ 33 °C (DB) ค่า RH = 60% อ่านได้ 24.5 °C	68
รูปที่ 4-6	เส้น Enthalpy อ่านค่าที่ขอบเส้นโค้งบนสุด	69
รูปที่ 4-7	เส้นแรงดันไอน้ำ (เส้นแนวนอน) อ่านค่าที่ขอบเส้นโค้งบนสุด	70
รูปที่ 4-8	เส้นปริมาตรจำเพาะของอากาศ (เส้นทะแยง) อ่านค่าที่ขอบเส้นโค้งบนสุด	71

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4-9	การเพิ่ม หรือ ลดอุณหภูมิ ที่ทำให้ความร้อนรวมเปลี่ยนแปลง.....	72
รูปที่ 4-10	การเพิ่ม หรือ ลดอุณหภูมิ โดยที่ความร้อนรวมเท่าเดิม.....	73
รูปที่ 4-11	การเพิ่ม-ลดอุณหภูมิ พร้อมกับการเพิ่ม-ลดความชื้นและความร้อนรวมของอากาศ.....	74
รูปที่ 4-12	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้น.....	75
รูปที่ 4-13	การวิเคราะห์อุณหภูมิและความชื้นในแผนภูมิไซโครเมตริก	76
รูปที่ 4-14	การประยุกต์ใช้แผนภูมิไซโครเมตริก ในการวิเคราะห์ แนวทางการออกแบบเปรียบเทียบกับ สภาวะสบาย	77
รูปที่ 4-15	การประยุกต์ใช้แผนภูมิไซโครเมตริกเปรียบเทียบกับ Outdoor Work Heat Index	78
รูปที่ 5-1	ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย	85
รูปที่ 5-2	วิธีการหาค่า Angle Factor โดยใช้แผนภูมิ.....	86
รูปที่ 5-3	การหาค่า Mean Radiant Temperature (MRT) โดยใช้โปรแกรม ASHRAE Thermal Comfort Tool.....	87
รูปที่ 5-4	การหาค่า Mean Radiant Temperature (MRT) โดยใช้โปรแกรม CBE Thermal Comfort Tool	87
รูปที่ 5-5	การใช้ค่า clo จากการจัดเสื้อผ้าเป็นชุดของ ASHRAE	89
รูปที่ 5-6	ค่า Clo ของเสื้อผ้าแต่ละชิ้น กำหนดใน ASHRAE 55-2017.....	90
รูปที่ 5-7	แผนภูมิการหาค่า clo ของเสื้อผ้าจากอุณหภูมิอากาศในเวลา 6.00 น.	91
รูปที่ 5-8	การให้หุ่นจำลองคน (Manikin) เพื่อหาค่า clo ในห้องทดสอบสภาวะสบาย	91
รูปที่ 5-9	ค่า Clo-Value ของเก้าอี้	92
รูปที่ 5-10	ตัวอย่างบางส่วนของค่า Met สำหรับกิจกรรมต่าง ๆ.....	93
รูปที่ 5-11	การเปรียบเทียบค่า met ของกิจกรรมต่าง ๆ	93
รูปที่ 5-12	แผนภูมิ Bioclimatic Chart ของ Victor Olgyay (1963).....	95
รูปที่ 5-13	การตรวจสอบเงื่อนไขก่อนใช้ ASHRAE Standard 55	97
รูปที่ 5-14	วิธีการวิเคราะห์หาสภาวะสบาย 4 วิธี	98
รูปที่ 5-15	ASHRAE Thermal Comfort Zone.....	99
รูปที่ 5-16	แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่า PPD และ PMV.....	102
รูปที่ 5-17	โปรแกรม CBE Thermal Comfort Tool.....	103
รูปที่ 5-18	ขีดจำกัดความเร็วลมสูงสุดในแต่ละช่วงอุณหภูมิที่จะทำให้เกิดความสบาย	105
รูปที่ 5-19	แผนภูมิการหาสภาวะสบายเมื่อมีลมและผู้ใช้อาคารควบคุมความเร็วลมได้	106

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5-20	อาคาร Zero Energy ของมหาวิทยาลัยแห่งชาติประเทศสิงคโปร์ ที่ใช้พัดลมร่วมกับตั้งค่า อุณหภูมิในการปรับอากาศให้สูงขึ้นกว่าปกติ	107
รูปที่ 5-21	อาคารสนามบินสุวรรณภูมิ ออกแบบให้อุณหภูมิที่พื้นต่ำกว่าอากาศ	108
รูปที่ 5-22	แผนภูมิสภาวะสบายในสภาพไม่ปรับอากาศ	109
รูปที่ 5-23	Operative Temperature ที่ 31.5 °C ไม่อยู่ในสภาวะสบายที่ 0.3 m/s.....	110
รูปที่ 5-24	Operative Temperature ที่ 31.5 °C อยู่ในขอบเขตสภาวะสบายได้ เมื่อเพิ่มความเร็วลม เป็น 0.9 m/s.....	111
รูปที่ 5-25	การเลือกวิธีประเมินสภาวะสบาย	112
รูปที่ 5-26	การระบุตัวแปรที่มีผลต่อสภาวะสบาย	112
รูปที่ 5-27	การแสดงผลเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASHRAE 55, ค่า PMV, PPD.....	113
รูปที่ 5-28	การเปรียบเทียบค่า Input 2 ชุด กับสภาวะสบาย	113
รูปที่ 5-29	การประเมินความไม่สบายที่เกิดขึ้นที่บางส่วนของร่างกาย	114
รูปที่ 5-30	การคำนวณปรับค่า MRT ถ้ามีแดดส่องมาถูกร่างกาย	115
รูปที่ 5-31	การกำหนดค่า clo จากอุณหภูมิอากาศภายนอกเวลา 06.00 น.	115
รูปที่ 5-32	การคำนวณ MRT จากค่า Globe Thermometer	116
รูปที่ 5-33	การคำนวณหา MRT	117
รูปที่ 5-34	ตัวอย่างการออกแบบพื้นที่ทำงานแบบ Free Space ของสำนักงานแห่งหนึ่งในประเทศ สหรัฐอเมริกา	118
รูปที่ 6-1	การวิเคราะห์อุณหภูมิและความชื้นรายเดือนเปรียบเทียบกับกลยุทธ์ต่าง ๆ	121
รูปที่ 6-2	การวิเคราะห์อุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วลมรายชั่วโมงกับขอบเขตสภาวะสบาย ในสภาพไม่ปรับอากาศ (Adaptive Thermal Comfort).....	122
รูปที่ 6-3	สถาปัตยกรรมพื้นถิ่นในประเทศโมร็อกโก ซึ่งสร้างชิดกันทำให้บังแดดกันเอง.....	124
รูปที่ 6-4	ทางเดินระหว่างอาคารที่บังแดด เพื่อลดความร้อนในประเทศโมร็อกโก	124
รูปที่ 6-5	การใช้น้ำเพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าอาคารในงานออกแบบภูมิทัศน์	125
รูปที่ 6-6	การทำงานเมื่อมีการใช้ Evaporative Cooling Pad.....	125
รูปที่ 6-7	อาคารที่ทำการติดตั้ง Evaporative Cooling Pads ที่ผนัง.....	125
รูปที่ 6-8	รูปตัดของการทำ Earth Coupling	126
รูปที่ 6-9	ตัวอย่างอาคารใช้ดินแบบ Earth Coupling เพื่อลดความร้อนและความหนาวเย็น.....	126
รูปที่ 6-10	ตัวอย่างอาคารที่ใช้ท่ออากาศฝังดินเพื่อแลกเปลี่ยนความเย็นกับดินก่อนเข้าสู่อาคาร	126
รูปที่ 6-11	มุม Azimuth และมุม Altitude ที่วัดจากทิศใต้	127

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6-12	Spherical หรือ Orthographic Sun Path Diagram	129
รูปที่ 6-13	Stereographic Sun Path Diagram	129
รูปที่ 6-14	ผังการโคจรของดวงอาทิตย์แบบ Spherical Sun Path.....	129
รูปที่ 6-15	ผังแบบ Stereographic Sun Path อ่านค่า Solar Azimuth ได้ = 108.67° จากศูนย์กลางวงกลมตัดผ่านเวลา 10.00 น. ของเดือน มาที่เส้นรอบรูป Solar Altitude = 54.81° อ่านได้จากเส้นวงแหวนสีเทาอ่อนข้างใน และอ่านได้จาก Solar Information มุมขวาล่าง.....	130
รูปที่ 6-16	ผังการโคจรของดวงอาทิตย์แบบ Equidistant Sun Path	130
รูปที่ 6-17	การใช้โปรแกรม Polar Solar Path Chart ของ University of Oregon เพื่อสร้าง Sun Path Diagram แบบ Equidistant.....	131
รูปที่ 6-18	การใช้ Sun Path Diagram วิเคราะห์เงาของอาคารโดยรอบ จะเห็นว่าอาคารทางทิศตะวันตกเฉียงใต้จะบังแดดในช่วงเช้า ประมาณเดือนตุลาคมถึงธันวาคม แต่อาคารอื่นจะไม่มีผล	132
รูปที่ 6-19	อ่านเดือนที่ต้องการทราบตำแหน่งดวงอาทิตย์ตามเส้นโค้ง Analemma	133
รูปที่ 6-20	ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในชั่วโมงเดียวกันของแต่ละเดือนที่เปลี่ยนแปลง บนเส้น Analemma	133
รูปที่ 6-21	การฉายภาพการโคจรของดวงอาทิตย์ให้อยู่ในแนวตั้งของรูปทรงกระบอก	133
รูปที่ 6-22	ผังทางโคจรของดวงอาทิตย์แสดงในแนวตั้ง เวลา 10.00 น. 21 กันยายน Solar Azimuth = 108.67° (อ่านจากแกน X) Solar Altitude = 54.81° (อ่านจากแกน Y)	134
รูปที่ 6-23	แสดงตำแหน่งดวงอาทิตย์ มุม Altitude มุม VSA และมุม HSA สำหรับออกแบบแผงบังแดด..	134
รูปที่ 6-24	แผงบังแดดที่มีทั้งแนวนอนและแนวตั้ง	135
รูปที่ 6-25	Shading Mask ที่ใช้หามุม VSA (อ่านตามเส้นโค้ง) และมุม HSA (อ่านตามเส้นรัศมี)	136
รูปที่ 6-26	Shading Mask แบบแยกมุม VSA (เส้นโค้ง) และ HSA (เส้นรัศมี) คนละซีก	136
รูปที่ 6-27	ตัวอย่างการใช้ Shading Mask เพื่อหามุม VSA และมุม HSA	137
รูปที่ 6-28	แสดงการโคจรของโลกและการเกิด Summer Solstice, Winter Solstice และ Equinox.....	138
รูปที่ 6-29	ตัวอย่าง การใช้โปรแกรม SketchUp และ Plug-in Sefaira จำลองเงาของวันที่ 21 กันยายน (Equinox) เวลา 10.00 น.....	139
รูปที่ 6-30	ตัวอย่างการใช้โปรแกรม SketchUp และ Plug-in Sefaira จำลองเงาของวันที่ 21 ธันวาคม (Winter Solstice) เวลา 10.00 น.	139
รูปที่ 6-31	แผงแนวตั้งปรับมุมได้ด้วยมอเตอร์ เหมาะกับทิศตะวันออก-ตะวันตก ที่ต้องการกันแดดทั้งปี ...	141
รูปที่ 6-32	แผงบังแดดแนวนอนซ้อนกัน เพื่อบังมุมดวงอาทิตย์ที่ต่ำ และใช้แผงโปร่ง เพื่อให้แสงสว่างเข้าในอาคาร	141
รูปที่ 6-33	การใช้กระจก 2 ชั้นพร้อมมู่ลี่ระหว่างกระจกช่วยบังแดดทิศตะวันตกและตะวันออกได้ดี	141
รูปที่ 6-34	การใช้มู่ลี่ในกระจกบานกระทุ้งบังแดดและรับลม และปรับแสงสว่างได้	141

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6-35	แผงบังแดดอะลูมิเนียมปรับมุมบังแดดได้ตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ ที่อาคาร Esplanade ประเทศสิงคโปร์	142
รูปที่ 6-36	แผงบังแดดปรับรูปร่างอัตโนมัติตามปริมาณแสงแดด ทำด้วย Micro Perforated Glass Fibre ที่อาคาร Al Bahar Tower ประเทศสหรัฐอาหรับเอมิเรตส์	142
รูปที่ 6-37	แสดงอุณหภูมิอากาศภายนอกที่ 33.5°C สามารถทำให้เกิดสภาวะสบายได้	143
รูปที่ 6-38	บ้านพักอาศัยในอดีตในประเทศกาตาร์ ที่มีช่องเปิดในระดับที่ลมผ่านตัวน้อยมาก	144
รูปที่ 6-39	การปรับลมให้เย็นลง โดยใช้การระเหยของน้ำช่วย	144
รูปที่ 6-40	แสดงความเร็วลม (เส้นสีน้ำเงิน) และอุณหภูมิลม (เส้นสีแดง) ของกรุงเทพมหานคร ในรอบปี (เส้นบน คือ ค่าเฉลี่ยสูงสุด เส้นกลาง คือ ค่าเฉลี่ยทั้งเดือน เส้นล่าง คือ ค่าเฉลี่ยต่ำสุด)	144
รูปที่ 6-41	ในเขตอากาศร้อนชื้นที่อุณหภูมิไม่สูงมากจะออกแบบให้ลมผ่านในระดับที่สัมผัสร่างกาย โดยตรง	145
รูปที่ 6-42	ลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศซึ่งเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิหรือแรงดัน	146
รูปที่ 6-43	รูปแบบการไหลของลม	147
รูปที่ 6-44	แรงดันด้านรับลมจะเป็นบวกส่วนด้านใต้ลมจะเป็นลบ	147
รูปที่ 6-45	แรงดันที่หลังคาจะเป็นบวกหรือลบขึ้นกับมุมเอียง	148
รูปที่ 6-46	การเกิดแรงดูดผ่านรูที่ส่วนแคบ ของท่อ Venturi Tube เพราะมีแรงดันเป็นลบ	149
รูปที่ 6-47	ลมที่ผ่านหลังคาจะคล้ายกับในท่อ Venturi ผ่าครึ่ง จึงเกิดแรงดันเป็นลบ ให้ลมไหลออก ตรงสันหลังคา	149
รูปที่ 6-48	การระบายอากาศแบบปล่อง (Stack Ventilation) จะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิ ในปล่องและภายนอก	149
รูปที่ 6-49	การใช้ Stack Effect ร่วมกับ Bernoulli Effect	150
รูปที่ 6-50	แรงดันในปล่องที่เป็นบวก ลบ และแกนที่เป็นกลาง	150
รูปที่ 6-51	แรงดันบวกช่วงบนของโถง ดันอากาศร้อนกลับมาในห้อง	150
รูปที่ 6-52	ต้องยกแกนที่เป็นกลาง ให้สูงกว่าชั้นบนสุด	150
รูปที่ 6-53	การใช้ Solar Chimney	151
รูปที่ 6-54	การใช้ Solar Chimney ที่ Environmental Building Research Establishment (BRE) ของประเทศอังกฤษ	151
รูปที่ 6-55	กระแสนลมในทิศเฉียงทำให้การผสมของอากาศในห้องดีกว่าเข้าตั้งฉากกับผนัง	151
รูปที่ 6-56	การทำช่องลมเข้าและออก ตรงกันข้ามจะดีที่สุด	152
รูปที่ 6-57	มีตำแหน่งช่องเปิดในทิศตรงกันข้าม แต่ถ้าตำแหน่งช่องเปิดไม่เหมาะสม ลมไม่สามารถเข้ามา ในพื้นที่ส่วนใหญ่ของห้องได้	152

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6-58	ช่องลมเข้าและออกจะต้องมีแรงดันไม่เท่ากันลมจึงจะไหลเข้าสู่อาคาร	152
รูปที่ 6-59	การระบายอากาศของห้องที่มีผนังติดภายนอกด้านเดียว	153
รูปที่ 6-60	ช่องลมด้านทางเข้าเล็กจะช่วยเพิ่มความเร็วลมในอาคารได้ดีกว่าช่องลมทางด้านออกเล็ก	153
รูปที่ 6-61	ระดับความสูงของช่องเปิดตอนล่างเพื่อให้เกิดความสบาย และตอนบนเพื่อระบายความร้อน ในอาคาร	154
รูปที่ 6-62	การยื่นแผงบังแดดแนวนอน จะทำให้กระแสลมเป่าขึ้นบน	155
รูปที่ 6-63	การจำลองการไหลของลม เมื่อมีแผงบังแดดแนวนอน	155
รูปที่ 6-64	การไหลของลม เมื่อเลื่อนแผงบังแดดแนวนอนให้สูงขึ้น	155
รูปที่ 6-65	การจำลองการไหลของลม เมื่อเลื่อนแผงบังแดดแนวนอนให้สูงขึ้น	155
รูปที่ 6-66	การไหลของลม เมื่อเว้นระยะของแผงบังแดดแนวนอนให้ห่างผนัง	155
รูปที่ 6-67	การจำลองการไหลของลม เมื่อเว้นระยะของแผงบังแดดแนวนอนให้ห่างผนัง	155
รูปที่ 6-68	การใช้ Wing Wall ด้านเดียวกันของหน้าต่าง	156
รูปที่ 6-69	การจำลองการไหลของลม ที่ใช้ Wing Wall ด้านเดียวกันของหน้าต่าง	156
รูปที่ 6-70	การใช้ Wing Wall คนละด้านของหน้าต่าง	156
รูปที่ 6-71	การจำลองการไหลของลม ที่ใช้ Wing Wall คนละด้านของหน้าต่าง	156
รูปที่ 6-72	ความลึกของห้องที่มีหน้าต่างด้านเดียว ที่สามารถระบายอากาศธรรมชาติได้อย่างมี ประสิทธิภาพ	157
รูปที่ 6-73	ความลึกของห้องที่มีหน้าต่าง 2 ด้านตรงกันข้าม ที่สามารถระบายอากาศธรรมชาติได้อย่างมี ประสิทธิภาพ	157
รูปที่ 7-1	วิธีการผ่านเกณฑ์ตามกฎหมาย	164
รูปที่ 7-2	การแยกสวิตช์ควบคุมหลอดไฟ ที่อยู่ตามแนวริมหน้าต่าง	165
รูปที่ 7-3	หลอดไฟต้องอยู่ในระยะ 1.5 เท่า ของความสูงหน้าต่าง	165
รูปที่ 8-1	การถ่ายเทความร้อนระหว่างอาคารกับสภาพแวดล้อม	172
รูปที่ 8-2	การใช้ Grass Paver ซึ่งสามารถรับน้ำฝนได้แทนลานคอนกรีตเพื่อลดความร้อน	173
รูปที่ 8-3	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Recovery Ventilator)	174
รูปที่ 8-4	ส่วนประกอบของเปลือกอาคาร	175
รูปที่ 8-5	ร้อยละของอาคารที่สามารถออกแบบผ่านเกณฑ์ OTTV	177
รูปที่ 8-6	ร้อยละของอาคารที่สามารถผ่านเกณฑ์ RTTV	177
รูปที่ 8-7	การคิด OTTV และ RTTV ของอาคารที่มีการใช้สอยหลายประเภท	180
รูปที่ 8-8	โปรแกรม BEC v.1.0.6 ที่ใช้ในการคำนวณหาค่า OTTV และ RTTV	181

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 8-9 องค์ประกอบของความร้อน 3 ส่วนที่ผ่านผนังอาคาร	181
รูปที่ 8-10 ค่า R ของช่องว่างอากาศที่มีผิวด้านในแผ่รังสีต่ำที่ระดับความหนาต่าง ๆ	186
รูปที่ 8-11 องค์ประกอบของความร้อนที่ผ่านกระจก	191
รูปที่ 8-12 SC ของกระจกเป็นการเปรียบเทียบกับกระจกใส 3 มม.	192
รูปที่ 8-13 คอนกรีตมวลเบาและฉนวนใยแก้ว ที่ได้รับฉลากประหยัดพลังงานเบอร์ 5	200
รูปที่ 8-14 ฉนวนใยแก้วแบบแผ่นสำหรับผนัง และแบบม้วนปูบนฝ้าเพดาน	200
รูปที่ 8-15 ฉนวนใยหินแบบม้วนและแบบแผ่น	201
รูปที่ 8-16 ฉนวนเยื่อกระดาษแบบพ่นเปียก	201
รูปที่ 8-17 เยื่อกระดาษแบบแห้ง	201
รูปที่ 8-18 ฉนวนโพลีเอสเตอร์แบบม้วน	202
รูปที่ 8-19 ฉนวนโพลีเอสเตอร์สำเร็จรูปสำหรับติดดานีไลท์	202
รูปที่ 8-20 ฉนวนโฟมโพลียูรีเทนแบบพ่น	202
รูปที่ 8-21 ฉนวนโฟมโพลียูรีเทนแบบแผ่น	202
รูปที่ 8-22 แผ่น EPS ทำฉนวนผนัง	202
รูปที่ 8-23 แผ่น EPS ในหลังคา Sandwich Panel	202
รูปที่ 8-24 ฉนวน XPS แบบแผ่นปูบนดาดฟ้า	203
รูปที่ 8-25 ฉนวน XPS ใช้เป็นฉนวนภายนอกผนังและวางบนดิน	203
รูปที่ 8-26 ฉนวนโฟมโพลีเอทิลีนแบบม้วน	203
รูปที่ 8-27 ฉนวนโฟมโพลีเอทิลีนแบบติดใต้แผ่นหลังคา	203
รูปที่ 8-28 ฉนวนโฟมโพลีไอโซไซยานูเรต ใช้ปูบนหลังคา	204
รูปที่ 8-29 ฉนวนโฟมโพลีไอโซไซยานูเรต แบบหุ้มพอลิใช้ทำท่อลม	204
รูปที่ 8-30 Time Lag และ Decrement Factor	206
รูปที่ 8-31 อาคาร Enco ได้รับรางวัล Thailand Energy Award ด้านนอกเป็นกระจก Curtain Wall ทั้งหมด ส่วนผนังด้านในทำบางส่วนทึบและใส่ฉนวนกันความร้อน	207
รูปที่ 8-32 การใส่ฉนวนไว้ที่ด้านหลังของแผ่นกระจกทึบแสง (Spandrel) ของ Curtain Wall	207
รูปที่ 8-33 การใช้วงกบและบานกรอบที่มี Thermal Break	209
รูปที่ 8-34 กระจกเขียวอมให้ช่วงคลื่นที่ตามองเห็นหรือแสงสว่าง ผ่านมากกว่ากระจกสีเทาและสีชา และกันรังสีในช่วงอินฟราเรดหรือความร้อนได้มากกว่า	209
รูปที่ 8-35 โครงสร้างของกระจก IGU	210
รูปที่ 8-36 ตำแหน่งของผิว Low-e ในกระจก 2 ชั้น	210

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 8-37	ด้านนอกและด้านในอาคารที่ใช้กระจก Digital Print	211
รูปที่ 8-38	การเคลือบผิวกระจกด้วย UV ทำให้สามารถแยกได้ระหว่างกระจกและท้องฟ้า	212
รูปที่ 8-39	กระจกสามารถปรับเป็นกระจกฝ้าเมื่อแดดมากระทบ	212
รูปที่ 8-40	กระจกปรับค่า SHGC และ VT ได้ ทำงานผ่านระบบ IOT เพื่อเชื่อมต่อกับข้อมูลสภาพอากาศ และมือถือ	213
รูปที่ 8-41	สะพานความร้อน (Thermal Bridge) ผ่านโครงคร่าวผนัง.....	213
รูปที่ 8-42	ระบบผนัง EIFS ซึ่งมีชั้นฉนวนอยู่นอกโครงคร่าวเพื่อลดสะพานความร้อน	214
รูปที่ 8-43	ตัวอย่างอาคารที่ใช้ผนังระบบ EIFS - ศูนย์ราชการแจ้งวัฒนะ.....	214
รูปที่ 8-44	ผนัง EIT ที่มีฉนวนภายนอกผนังหลักผิวเป็นโลหะ	215
รูปที่ 8-45	การรั่วซึมของอากาศผ่านตามขอบของหน้าต่าง	215
รูปที่ 8-46	การพ่นบนหลังคาด้วย Ceramic Coating	216
รูปที่ 8-47	ค่า R (Reflectivity) และ SRI (Solar Reflectance Index) ของหลังคาโลหะสีต่าง ๆ	217
รูปที่ 8-48	ความหนาของดินกับขนาดต้นไม้ที่สามารถปลูกได้	218
รูปที่ 8-49	อาคาร Kampung Admiralty ประเทศสิงคโปร์ ได้รับรางวัล World Architecture Festival 2018 ใช้ Intensive Green Roof ปลูกต้นไม้ที่เป็นอาหาร เช่น ลำไย ผักสวนครัว สำหรับคนในโครงการ	218
รูปที่ 8-50	หลังคาแบบ Intensive Green Roof ของอาคาร Marina Barrage ประเทศสิงคโปร์	219
รูปที่ 8-51	การใช้พื้นที่สวน Intensive Green Roof ของอาคาร Marina Barrage ประเทศสิงคโปร์ สำหรับกิจกรรมนอกประสงค์	219
รูปที่ 8-52	อาคารซูเปอร์มาร์เก็ตในประเทศอิตาลี ใช้ Extensive Green Roof น้ำหนักประมาณ 60 กก./ตร.ม.....	219
รูปที่ 8-53	Decrement Factor กับตำแหน่งของฉนวน	221
รูปที่ 8-54	ข้อมูลกระจกสีชั้นเดียว	224
รูปที่ 8-55	ข้อมูลกระจกลามิเนต	224
รูปที่ 9-1	วงจรการทำงานของเครื่องปรับอากาศ	228
รูปที่ 9-2	ระบบปรับอากาศแบบ VRF	229
รูปที่ 9-3	Package Rooftop Unit	230
รูปที่ 9-4	Package Rooftop Unit ที่ต่อท่อลมจ่ายและลมกลับไปยังพื้นที่ปรับอากาศ	230
รูปที่ 9-5	เครื่องทำน้ำเย็นชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ	231
รูปที่ 9-6	เครื่องทำน้ำเย็นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ.....	231

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 9-7 Primary Chilled Water Pump	232
รูปที่ 9-8 Secondary Chilled Water Pump.....	232
รูปที่ 9-9 Air Handling Unit	232
รูปที่ 9-10 Fan Coil Unit	232
รูปที่ 9-11 Condenser Pump	232
รูปที่ 9-12 Cooling Tower.....	232
รูปที่ 9-13 วงจรการทำน้ำเย็นระบบดูดซึม ซึ่งใช้ความร้อนป้อนให้กับ Generator เพื่อแยกสาร ทำความเย็นออกจากสารละลายคู่ผสม เพื่อนำไปดูดความร้อนจากน้ำเย็น	233
รูปที่ 9-14 Absorption Chiller แบบชั้นเดียว	234
รูปที่ 9-15 Absorption Chiller แบบสองชั้น.....	234
รูปที่ 9-16 Absorption Chiller แบบ Triple Effect.....	234
รูปที่ 9-17 ฉลากแสดงประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องปรับอากาศ Split Type แสดงด้วยจำนวนดาว	236
รูปที่ 9-18 เครื่องอัดแบบลูกสูบ (Reciprocating Compressor)	238
รูปที่ 9-19 เครื่องอัดแบบสกรู (Screw Compressor).....	238
รูปที่ 9-20 เครื่องอัดแบบสกรอลล์ (Scroll Compressor)	238
รูปที่ 9-21 เครื่องอัดแบบแรงเหวี่ยง (Centrifugal Compressor).....	238
รูปที่ 9-22 การใช้ ERV เติมอากาศในห้อง.....	241
รูปที่ 9-23 เครื่อง ERV	241
รูปที่ 9-24 Carbon Dioxide Sensor สำหรับติดในห้อง.....	242
รูปที่ 9-25 Carbon Dioxide Transmitter สำหรับท่อลม.....	242
รูปที่ 9-26 แผ่นกรองอากาศ MERV 7	242
รูปที่ 9-27 แผ่นกรองอากาศ MERV 13	242
รูปที่ 9-28 การใช้งานของ Heat Pipe ในเครื่องส่งลมเย็นเพื่อลดความชื้นของอากาศ	243
รูปที่ 9-29 การใช้ UVGI ที่ AHU.....	244
รูปที่ 9-30 การใช้ UVGI ที่ Fan Coil.....	244
รูปที่ 9-31 การใช้ UVGI ในเครื่อง Split Type	244
รูปที่ 9-32 หลอด UVGI แบบ Ribbon	244
รูปที่ 9-33 Activated Carbon Filter สำหรับดูดซับสาร VOC ในเครื่อง AHU	244
รูปที่ 9-34 การออกแบบจ่ายลมจากพื้นที่ใกล้ตำแหน่งคนทำงาน และให้ลมกลับที่เพดาน	245
รูปที่ 9-35 การเดินท่อน้ำเย็นในพื้นที่ Radiant Cooling.....	246

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 9-36	การทำงานของ Passive Chilled Beam	247
รูปที่ 9-37	การทำงานของ Active Chilled Beam	247
รูปที่ 9-38	การใช้ Active Chilled Beam แบบฝังในฝ้า	247
รูปที่ 9-39	การใช้ Active Chilled Beam แบบไม่มีฝ้า ทำให้ได้ความสูงห้องเพิ่มขึ้น	247
รูปที่ 9-40	Multi Service Chilled Beam ที่รวมระบบอุปกรณ์อาคารอื่นด้วย	248
รูปที่ 10-1	ค่าเฉลี่ย LPD ของอาคารในกลุ่มที่ 1, 2 และ 3 (สีแดง คือ เกณฑ์ปัจจุบันตามกฎหมาย สีเขียว คือ เกณฑ์ในอนาคต).....	253
รูปที่ 10-2	การแสดงค่า Lumen (= 1800) และ Watt (= 14.5) ที่กล่องผลิตภัณฑ์.....	253
รูปที่ 10-3	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหลอดไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ	254
รูปที่ 10-4	ตัวอย่างหลอดไฟแอลอีดี	255
รูปที่ 10-5	ลักษณะการให้แสงจากโคม	255
รูปที่ 10-6	การเปรียบเทียบทิศทางการให้แสงและบรรยากาศในพื้นที่ (Space).....	256
รูปที่ 10-7	หลอดไฟ 1,000 Lumen ได้แสงออกจากโคมเพียง 400 Lumen ประสิทธิภาพโคมเท่ากับ 40%	256
รูปที่ 10-8	ค่าประสิทธิภาพของแสงที่ได้จากโคม LOR, ULOR และ DLOR.....	257
รูปที่ 10-9	ความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งกำเนิดแสง ระยะห่าง และความสว่าง.....	258
รูปที่ 10-10	ระยะห่างของหลอดไฟจากบริเวณริมหน้าต่างที่ควรแยกสวิตช์เปิด-ปิด.....	258
รูปที่ 10-11	การใช้ Daylight Sensor เพื่อให้หลอดไฟแนวริมหน้าต่าง เปิด-ปิด อัตโนมัติ.....	259
รูปที่ 10-12	PIR Sensor แบบติดเพดาน.....	260
รูปที่ 10-13	Ultrasonic Switch แบบติดผนัง.....	260
รูปที่ 10-14	PIR และ Ultrasonic Switch แบบติดผนัง.....	260
รูปที่ 10-15	เปรียบเทียบการให้ความสว่างเท่ากันทั้งห้อง และการให้ความสว่างเฉพาะบริเวณโต๊ะทำงาน โดยใช้โคม.....	261
รูปที่ 10-16	ค่า MacAdam Ellipses ซึ่งแสดงความแตกต่างระหว่างสีของ LED ยังมี Step น้อย ความคงเส้นคงวาของสีจะยิ่งมาก.....	262
รูปที่ 10-17	สีที่แตกต่างกันของแต่ละ Diode.....	262
รูปที่ 10-18	สี R1-R8 ที่ใช้ในการคำนวณ Ra และสีพิเศษ R9-R14	262
รูปที่ 10-19	การเปรียบเทียบสเปกตรัมของหลอดไฟ LED และหลอดไฟประเภทอื่น ซึ่งมีผลต่อ ความถูกต้องของสีแต่ละสีแตกต่างกัน.....	263
รูปที่ 10-20	แสงสว่างภายในอาคารจะประกอบด้วยรังสีตรงจากดวงอาทิตย์และส่วนอื่น ๆ	265

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 10-21 ระยะที่แสงเข้าในอาคารจะสัมพันธ์กับความสูงของหน้าต่าง	266
รูปที่ 10-22 การให้แสงสว่างทางด้านข้างโดยใช้ผนังโปร่งแสงที่สูง เพื่อให้แสงเข้ามาในอาคารได้ลึกขึ้น และมีบรรยากาศที่สว่างโปร่งตา.....	266
รูปที่ 10-23 การลดความร้อนและแสงจ้าโดยใช้แผงบังแดดทำด้วยกระจก Frit ที่ National Art Center Tokyo (NACT) ประเทศญี่ปุ่น.....	267
รูปที่ 10-24 กรณีไม่มี Light Shelf ความสว่างที่ริมหน้าต่างและด้านในจะแตกต่างกันมาก	267
รูปที่ 10-25 Light Shelf ช่วยลดความสว่างจ้าที่ริมอาคารและทำให้แสงเข้าด้านในมากขึ้น.....	267
รูปที่ 10-26 การใช้ Light Shelf แบบภายนอกทางทิศใต้เพื่อช่วยบังแดดและสะท้อนแสงเข้าสู่อาคาร	268
รูปที่ 10-27 การใช้ Light Shelf แบบภายในสำเร็จรูปซึ่งสามารถหมุนแผ่นลงมาเช็ดทำความสะอาดได้ เวลาฝุ่นเกาะ	268
รูปที่ 10-28 การสะท้อนแสงของผิวหลังคา สามารถเพิ่มความสว่างในอาคาร	268
รูปที่ 10-29 พื้นที่ซึ่งสามารถได้รับแสงธรรมชาติจะขึ้นกับรูปร่างของผังพื้น	269
รูปที่ 10-30 การเจาะช่องหน้าต่างและเส้น Contour ที่มีค่าความส่องสว่างเท่ากัน หน้าต่างที่ติดกับผนัง จะทำให้ผนังด้านข้างสว่างขึ้น ทำให้ลดแสงบาดตา	269
รูปที่ 10-31 การให้แสงจากส่วนบนของผนัง (Clearstories) ใช้ได้ดีกับอาคารที่เพดานสูง เช่น โถงในศูนย์การค้า หรือ สนามบิน	270
รูปที่ 10-32 การให้แสงจาก Skylight เหมาะกับพื้นที่ซึ่งห่างจากผนังภายนอก ทำให้รู้สึกโปร่ง ภายในสนามบินอินซอน ประเทศเกาหลี	270
รูปที่ 10-33 การให้แสงผ่านหลังคาแบบฟันเลื่อย (Sawtooth) และมีการออกแบบส่วนหลังคาให้ช่วย สะท้อนแสงในอาคารศูนย์ราชการ	270
รูปที่ 10-34 การให้แสงจากหลังคาโปร่งแสงขนาดใหญ่ ซึ่งออกแบบเพื่อลดแสงจ้าและความร้อน โดยใช้โลหะฉลุลาย ที่ National Gallery of Singapore	271
รูปที่ 10-35 ระยะห่างของช่องแสงที่ตอนบนของหลังคา ถ้าช่องแสงอยู่ในแนวตั้ง	271
รูปที่ 10-36 ระยะห่างของช่องแสงที่บนของหลังคา กรณีไม่มีหน้าต่าง และมีหน้าต่าง	271
รูปที่ 10-37 หัวท่อนำแสงส่วนที่อยู่นอกอาคาร สสส.....	272
รูปที่ 10-38 ปลายท่อนำแสงในที่จอดรถใต้ดินอาคาร สสส.....	272
รูปที่ 10-39 ตัวอย่างการออกแบบห้องเรียนให้ปรับแสงได้ โดยตอนเช้าจะใช้แสงสีขาวเย็น สำหรับกิจกรรม ที่ต้องการสมาธิ และตอนบ่ายใช้แสงสีขาวอุ่น สำหรับกิจกรรมการสนทนาที่ต้องการความ ผ่อนคลาย.....	273
รูปที่ 11-1 คู่มือประเมินอาคารเขียวภาครัฐ	279
รูปที่ 11-2 การทำรั้วป้องกันตะกอนดินและเศษวัสดุต่าง ๆ เข้าไปยังที่ดินข้างเคียง ในโครงการที่ใช้ มาตรฐาน LEED	282

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 11-3	สวนรับน้ำฝน (Rain Garden) และทางเดินลาดแข็งที่น้ำสามารถซึมได้	283
รูปที่ 11-4	การลดเกาะความร้อนซึ่งเกิดจากที่จอดรถขนาดใหญ่โดยทำหลังคาคลุม และติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	283
รูปที่ 11-5	การทำ Roof Garden ช่วยลดเกาะความร้อนในเมือง ช่วยลดน้ำฝนที่ไหลออกนอกพื้นที่ ลดความร้อนเข้าสู่อาคาร ทำให้คนได้ใกล้ชิดธรรมชาติ และยังสามารถเป็นแหล่งอาหาร ช่วยด้านเศรษฐกิจได้ด้วย	284
รูปที่ 11-6	มุมของแสงจากโคมที่แบ่งเป็น Backlight Uplight Glare (BUG).....	284
รูปที่ 11-7	ตัวอย่างการแสดงผลการกระจายแสง จากโคม ที่มีค่า BUG Rating = B1 U1 G0.....	284
รูปที่ 11-8	ลักษณะเปลือกอาคารของอาคารฐาน (Baseline Case) ใน Section 5 สำหรับการจำลองพลังงานตาม Appendix G ของ ASHRAE 90.1-2016	287
รูปที่ 11-9	ตัวอย่างการแบ่งพื้นที่ในประเทศไทยเป็นเขต 0A และ 1A ใน ASHRAE 90.1-2016	287
รูปที่ 11-10	ทางเลือกในการประเมินประสิทธิภาพพลังงานขั้นต่ำ (Minimum Energy Performance) ของ LEED v 4.1	288
รูปที่ 11-11	ทางเลือกในการประเมินประสิทธิภาพพลังงานขั้นสูง (Optimized Energy Performance) ตาม LEED v 4.1.....	290
รูปที่ 11-12	การนำวัสดุใช้แล้ว (กระจกบานเกล็ด และไม้) มาดัดแปลงทำแผงบังแดดปรับมุม ที่อาคารห้องสมุด HSBC ที่ได้ LEED PLatinum v.3 (2009)	291
รูปที่ 11-13	ระบบของร่างกาย 11 ระบบ ที่เชื่อมโยงกับทุกเกณฑ์ในการประเมินอาคาร.....	294
รูปที่ 11-14	การแสดงผลประเมินจะแสดงระดับที่ได้พร้อมคะแนนของแต่ละ Concept.....	295
รูปที่ 11-15	สัดส่วนของคะแนนในแต่ละ Concept.....	296
รูปที่ 11-16	การติดตั้ง Sensor และระบบเฝ้าติดตามคุณภาพอากาศในอาคารให้ผู้ใช้อาคารทราบตามเกณฑ์ข้อ Feature 18: Air Quality Monitoring and Feedback	298
รูปที่ 11-17	การจัดผลไม้และเครื่องดื่มที่น้ำตาลน้อยให้พนักงานรับประทาน และอ่างล้างมือตามเกณฑ์หมวดโภชนาการ (Nourishment).....	298
รูปที่ 11-18	การออกแบบบันไดให้น่าเดิน แทนการใช้ลิฟต์ ทำให้ร่างกายแข็งแรง (และประหยัดพลังงาน) หัวข้อ 64: Interior Fitness Circulation ตามหมวด Fitness.....	299
รูปที่ 11-19	โต๊ะที่สามารถปรับให้ยืนทำงานได้ ตามเกณฑ์ข้อ 73 Ergonomics : Visual and Physical ในหมวดความสบาย (Comfort).....	299
รูปที่ 11-20	การนำต้นไม้ที่ปลูกในกระถางวางในอาคาร ตามเกณฑ์ข้อ 100: Biophilia II-Qualitative หมวดสภาวะทางใจ (Mind).....	300
รูปที่ 11-21	แนวคิดในการประเมินอาคารมาตรฐาน WELL v2. ทั้ง 10 หมวดและจำนวนเกณฑ์	300

1. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับความร้อน

ในการศึกษาด้านการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร จะมีเนื้อหาส่วนหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนระหว่างอาคารกับสภาพแวดล้อม วิธีการลดความร้อนที่เข้าสู่อาคารเพื่อลดพลังงานในการปรับอากาศ และการถ่ายเทความร้อนระหว่างร่างกายมนุษย์กับสภาพแวดล้อม ดังนั้น วัตถุประสงค์ของบทนี้ คือ

- (1) เพื่อให้เข้าใจความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับความร้อน และวิธีการถ่ายเทความร้อน
- (2) เพื่อให้เข้าใจปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทในแต่ละวิธี
- (3) เพื่อให้เข้าใจผลของวัสดุทึบแสงและโปร่งแสงเมื่อได้รับรังสีอาทิตย์
- (4) เพื่อให้เข้าใจองค์ประกอบของรังสีอาทิตย์
- (5) เพื่อให้เข้าใจประเภทของวิธีการคำนวณการถ่ายเทความร้อน และหลักการคิดอุณหภูมิอากาศภายนอกเมื่อผนังหรือหลังคาได้รับรังสีอาทิตย์

1.1 ความร้อน (Heat)

ความร้อนเป็นพลังงานรูปหนึ่ง ซึ่งเกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในสสาร หรือ เกิดจากการแผ่รังสีผ่านที่ว่าง ในระบบ SI (The International System of Units) ความร้อน มีหน่วยเป็น จูล (Joule, J)

ซึ่งเป็นหน่วยเดียวกับที่ใช้วัดพลังงานอื่น ๆ คือ พลังงานกล (Mechanical Energy) พลังงานไฟฟ้า (Electrical Energy) พลังงานเคมี (Chemical Energy)

1 กิโลจูล (kJ) = 1000 จูล (J), 1 เมกะจูล (MJ) = 1,000,000 จูล (J)

นอกจากนี้ ความร้อนยังสามารถวัดได้ เป็นหน่วย แคลอรี (calorie, cal) (เขียนด้วย c ตัวเล็ก) 1 calorie คือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 กรัม มีอุณหภูมิสูงขึ้น 1 องศาเซลเซียส ในช่วงจาก 14.5 °C ถึง 15.5 °C

1 cal = 4.187 J

1 C (เขียนด้วย C ตัวใหญ่) = 1000 calories = 1 kcal

ในระบบอเมริกัน (U.S System) ความร้อน มีหน่วยเป็น บีทียู (British thermal unit, Btu)
1 บีทียู = ปริมาณความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 ปอนด์ มีอุณหภูมิสูงขึ้น 1 องศาฟาเรนไฮต์ (°F) ในช่วง 58.1 °F ถึง 59.1 °F

1 Btu = 1055 J

1 Btu = 252 cal

พลังงานเป็นสิ่งที่ไม่สามารถสร้าง หรือ ทำลายได้ แต่สามารถเปลี่ยนรูปจากพลังงานอย่างหนึ่งไปเป็นอีกอย่างหนึ่งได้ เช่น พลังงานกลที่ทำให้วัตถุเคลื่อนที่ จะเกิดความร้อนจากแรงเสียด (Friction) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำจะทำให้เกิดความร้อน และการเผาไหม้จะเปลี่ยนพลังงานเคมีซึ่งอยู่ในวัตถุนั้น เกิดเป็นพลังงานความร้อน โดยสรุป คือ พลังงานที่เข้า (Energy Input) จะเท่ากับ พลังงานที่ออก (Energy Output) เสมอ ยกเว้นแต่จะมีการเก็บสะสม

พลังงานความร้อน มักเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นในระหว่างการผลิตพลังงานในรูปอื่น เช่น การผลิตพลังงานไฟฟ้า จากการเผาเชื้อเพลิงจะเกิดพลังงานความร้อน พลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ ถือเป็นต้นกำเนิดของพลังงานส่วนใหญ่ในโลกนี้ ซึ่งรวมพลังงานฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน ซึ่งมาจากต้นไม้ที่เติบโตได้เพราะแสงอาทิตย์

ความร้อนจะถ่ายเทในทิศทางเดียวจากอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ การถ่ายเทจะเกิดขึ้นที่เมื่อมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ และจะหยุดถ่ายเทเมื่ออุณหภูมิเท่ากัน การที่จะให้ความร้อนถ่ายเทกลับทิศทางจากอุณหภูมิต่ำไปยังอุณหภูมิสูงจะทำได้ต่อเมื่อมีการใช้พลังงานจากภายนอก หรือ เครื่องยนต์มาบังคับ

กำลัง (Power)

คือ การวัดปริมาณงานที่ทำต่อหน่วยเวลา หรือ พลังงานที่ได้เปลี่ยนรูปจากอย่างหนึ่งไปเป็นอีกอย่างหนึ่ง

$$\text{Power} = \text{Heat Energy} / \text{Time}$$

กำลัง มีหน่วยเป็น **วัตต์ (Watt, W)**

การวัดการถ่ายเทความร้อน (Heat Flow)

สามารถวัดได้ 2 วิธี คือ

(1) **อัตราการถ่ายเทความร้อน (Heat Flow Rate หรือ Heat Flux)** เป็นความร้อนที่ไหลผ่านพื้นที่ที่กำหนดต่อหน่วยเวลา มีหน่วยเป็น **วัตต์ (W) หรือ จูล (J) ต่อวินาที (s)**

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

อัตราการไหลของความร้อน 1 วัตต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง คือ 1 วัตต์-ชั่วโมง (watt-hour, Wh)

$$1 \text{ Wh} = (1 \text{ J/s} \times 3600 \text{ s}) = 3600 \text{ J} = 3.6 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ} = 3.6 \text{ MJ (megajoule)}$$

ในระบบอเมริกัน อัตราการถ่ายเทความร้อน มีหน่วยเป็น **บีทียูต่อชั่วโมง (Btu/h)**

(2) **ความหนาแน่นของการถ่ายเทความร้อน (Heat Flux Density)** เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่มีหน่วยเป็น **วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)** ซึ่งอาจจะเป็นตารางเมตรของผนัง หรือ ตารางเมตรของผิวถ่ายเทความร้อนไหลผ่าน

1.2 อุณหภูมิ (Temperature)

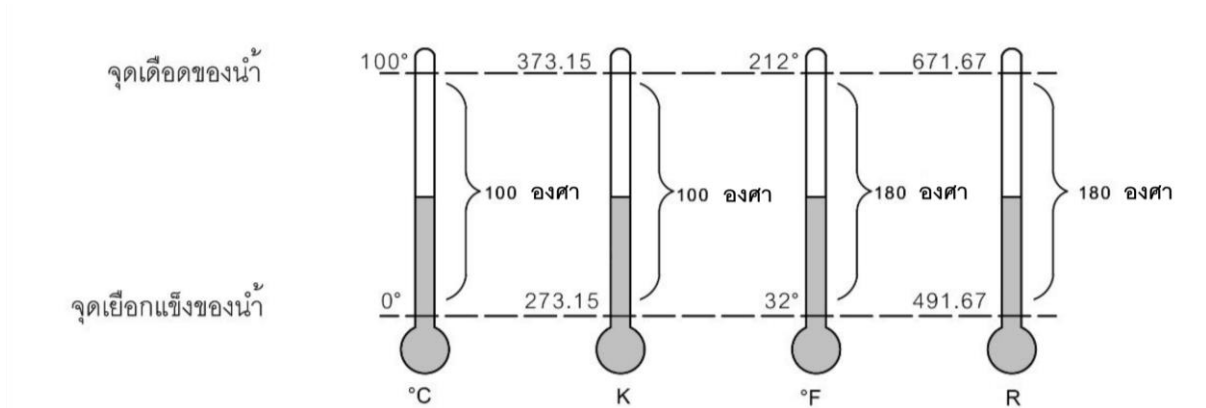
เป็นสิ่งที่แสดงการมีอยู่ของความร้อนในสสาร และ ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงความร้อนในสสาร หน่วยวัดอุณหภูมิ สามารถวัดได้ 4 แบบ คือ (รูปที่ 1-1)

(1) **Celcius ($^{\circ}\text{C}$)** องศาเซลเซียส มีจุดเยือกแข็งของน้ำที่ 0°C และจุดเดือดที่ 100°C

(2) **Kelvin (K)** เคลวิน เป็นอุณหภูมิองศาสัมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 0 K คือ จุดที่ไม่มีความร้อน มีจุดเยือกแข็งของน้ำ = 273.15 K และมีจุดเดือดของน้ำ = 373.15 K ดังนั้น จากจุดเยือกแข็งถึงจุดเดือดของน้ำแบ่งเป็น 100 องศา เหมือนองศาเซลเซียส ในการคำนวณด้านความร้อนบางที่ใช้หน่วย K เพื่อไม่ให้มีค่าติดลบ

(3) **Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$)** องศาฟาเรนไฮต์ มีจุดเยือกแข็งของน้ำที่ 32°F และจุดเดือดของน้ำที่ 212°F หรือ แตกต่างกัน 180 องศา

(4) **Rankine (R)** แร็งคิน เป็น อุณหภูมิองศาสัมบูรณ์ โดยมีจุดเยือกแข็งของน้ำที่ 491.67 R และจุดเยือกแข็งที่ 671.67 R แตกต่างกัน 180 องศา เท่ากับ องศาฟาเรนไฮต์ Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$)



รูปที่ 1-1 การเปรียบเทียบสเกลของการวัดอุณหภูมิแบบต่าง ๆ

1.3 ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity) และความร้อนจำเพาะ (Heat Capacity)

วัตถุที่มีมวลเท่ากัน จะสามารถเก็บความร้อนไว้ในตัวได้ไม่เท่ากัน ซึ่งขึ้นอยู่กับความจุความร้อนจำเพาะ

ความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการทำให้วัสดุที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม มีอุณหภูมิสูงขึ้น 1 องศาเซลเซียส มีหน่วยเป็น จูลต่อกิโลกรัม องศาเซลเซียส (J/kg °C)

ตารางที่ 1-1 ตัวอย่างค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ

วัสดุ	ความจุความร้อนจำเพาะ (J/kg °C)
น้ำ	4,190
คอนกรีต อิฐ	1,000
น้ำมันพาราฟิน	2,100
ไม้	1,700
แผ่นโพลีโพลีสไตรีนแบบขยายตัว	1400
อะลูมิเนียม	910
หินอ่อน	880
กระจก	700
เหล็ก	450
ทองแดง	390

ที่มา: McMullan, 1983, p.8 และ Szokolay, 1987, p.63

จากตารางที่ 1-1 จะเห็นว่าน้ำเป็นวัตถุที่มีความจุความร้อนจำเพาะสูงกว่าวัตถุส่วนใหญ่ น้ำจึงทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการกักเก็บความร้อนที่ดี น้ำช่วยให้อุณหภูมิในโลกไม่เปลี่ยนแปลงขึ้นลงมาก โดยในฤดูร้อนจะทำหน้าที่ดูดซับและเก็บความร้อนไว้ ทำให้อุณหภูมิบนโลกไม่สูงมาก และในฤดูหนาวความร้อนที่น้ำเก็บไว้ช่วยให้ในโลกไม่หนาวจัด อุปกรณ์ในการแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ จึงมักใช้ประโยชน์ของน้ำที่มีความจุความร้อนจำเพาะสูง เป็นตัวกลางในการส่งความร้อนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง

ความหนาแน่น (ρ) ความจุความร้อนจำเพาะของวัตถุต่าง ๆ จะเปรียบเทียบบนพื้นฐานของมวลสาร (Mass) ที่เท่ากัน วัตถุแต่ละชนิดที่มีน้ำหนัก (m) เท่ากัน จะมีปริมาตร (V) ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ซึ่งมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) ดังนี้

$$\text{ความหนาแน่น } (\rho) = \text{มวลสาร } (m) / \text{ปริมาตร } (V)$$

วัสดุในการก่อสร้าง ประเภท คอนกรีต อิฐ หิน จะมีความหนาแน่นสูง ซึ่งหมายถึงการมีน้ำหนักที่มากในปริมาตรที่เล็ก ดังนั้นวัสดุเหล่านี้เมื่อนำมาก่อสร้าง จึงทำหน้าที่เป็นแหล่งกักเก็บความร้อน และมีผลต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของอาคาร

ความร้อนจำเพาะ (Heat Capacity) ของวัสดุ จะเท่ากับ ผลคูณระหว่างมวล กับ ความจุความร้อนจำเพาะ มีหน่วยเป็น จูลต่อเคลวิน (J/K) หรือ จูลต่อองศาเซลเซียส ($\text{J/}^{\circ}\text{C}$)

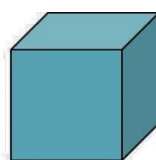
$$\text{ความร้อนจำเพาะ} = \text{มวล} \times \text{ความจุความร้อนจำเพาะ}$$

ความจุความร้อนจำเพาะเชิงปริมาตร (Volumetric Specific Heat)

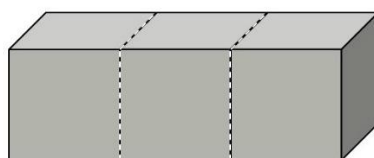
มีความหมายคล้ายคลึงกับ ความจุความร้อนจำเพาะที่อธิบายข้างต้น แต่เป็นปริมาณความร้อนที่ทำให้วัตถุที่มีปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร มีอุณหภูมิสูงขึ้น 1 เคลวิน หรือ 1 องศาเซลเซียส

หน่วย : $\text{J/m}^3\text{K}$, $\text{J/m}^3\text{ }^{\circ}\text{C}$

ตัวอย่าง น้ำ 1 ลบ.ม. จะมีความจุความร้อนเท่ากับคอนกรีต หรือ หิน 3 ลบ.ม.



WATER



CONCRETE, STONE, OR BRICK

รูปที่ 1-2 การเปรียบเทียบปริมาตรของน้ำและคอนกรีตที่มีความจุความร้อนเท่ากัน

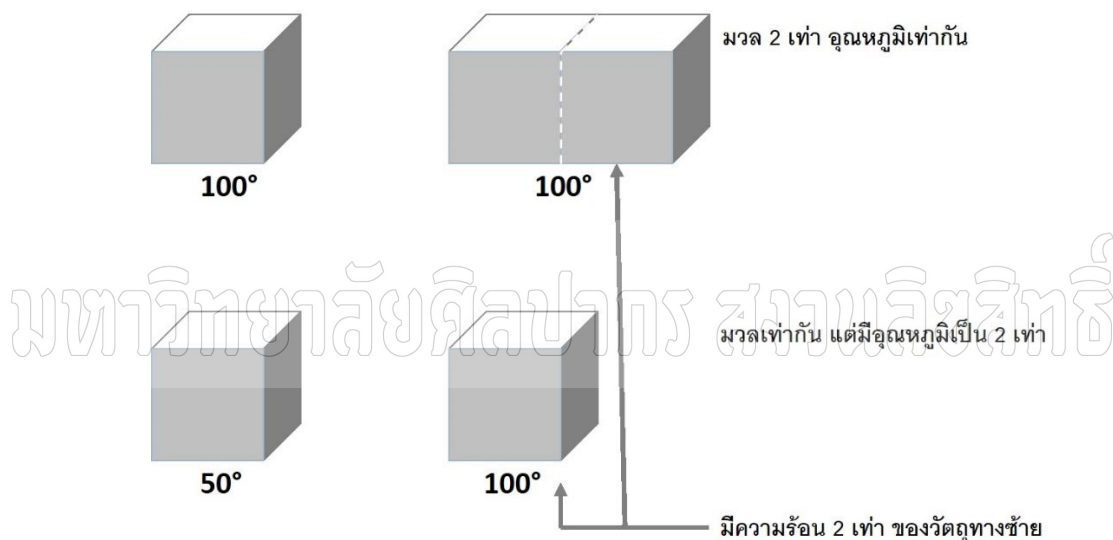
1.4 ประเภทของความร้อน

ความร้อน สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

(1) ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat)

เป็นพลังงานความร้อนที่สสารปล่อยออกมา หรือดูดกลืนเข้าไป เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดลง ความร้อนสัมผัสเป็นความร้อนที่เราสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงได้โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ หรือสามารถรู้สึกได้จากการสัมผัสที่ผิวหนัง เราไม่สามารถตัดสินปริมาณความร้อนที่มีอยู่ในวัตถุ ว่าวัตถุใดจะมีความร้อนมากกว่ากันได้โดยดูจากอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว เพราะอุณหภูมิและความร้อนไม่ใช่สิ่งเดียวกัน ปริมาณความร้อนที่มีอยู่ในวัตถุจะขึ้นกับอุณหภูมิและขนาดของมวล

ตัวอย่าง วัตถุ 2 ชิ้น มีอุณหภูมิ 100°C เท่ากัน วัตถุที่มีมวลเป็น 2 เท่า ของวัตถุที่อุณหภูมิเดียวกัน จะมีปริมาณความร้อนเป็น 2 เท่า (รูปที่ 1-3) ส่วนวัตถุที่มีอุณหภูมิ 100°C ก็มีปริมาณความร้อนเป็น 2 เท่า ของวัตถุที่มีอุณหภูมิ 50°C ที่มีมวลเท่ากัน

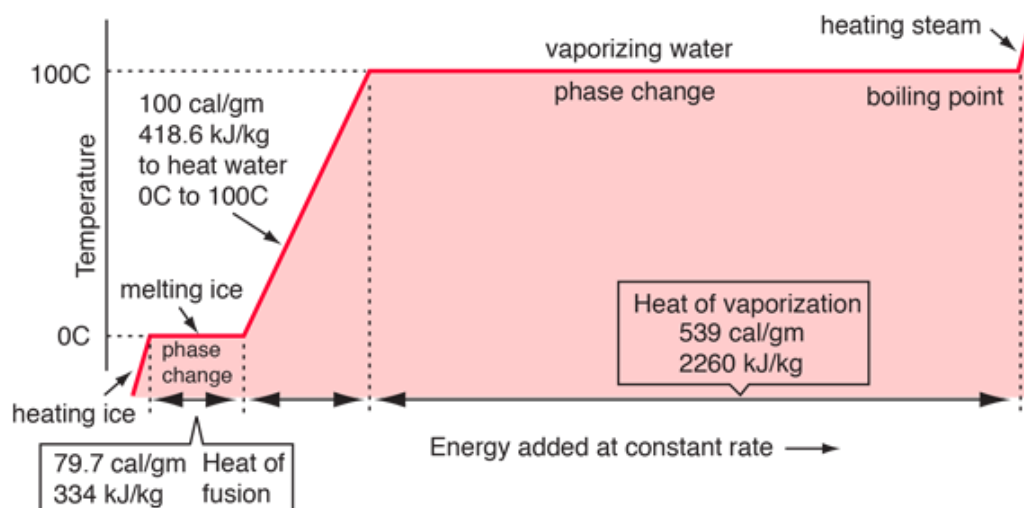


รูปที่ 1-3 การเปรียบเทียบปริมาณความร้อนสัมผัสขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและขนาดของมวล

(2) ความร้อนแฝง (Latent Heat)

เป็นพลังงานความร้อนที่สสารปล่อยออกมา หรือ ดูดกลืนเข้าไปในระหว่างการเปลี่ยนสถานะ โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือ อีกนัยหนึ่ง คือ เทอร์โมมิเตอร์ ไม่สามารถวัดการเพิ่มหรือลดความร้อนส่วนนี้ได้ (เหมือนสิ่งแอบแฝง) ซึ่งได้แก่ ความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว (Heat of Fusion) และความร้อนที่ใช้เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ (Heat of Vaporization) ในการทำให้น้ำ 1 kg มีอุณหภูมิสูงขึ้นจาก 0°C เป็น 100°C ต้องใช้ความร้อน 418.6 kJ/kg แต่การทำให้น้ำ 100°C เปลี่ยนเป็นไอน้ำที่ 100°C ต้องใช้ความร้อนถึง 2260 kJ/kg (รูปที่ 1-4)

ของเหลวอาจจะเปลี่ยนสถานะ กลายเป็นก๊าซได้โดยที่ไม่มีการเติมความร้อนเข้าไปโดยตรง เช่น การต้มน้ำให้เดือด แต่ใช้การระเหย (Evaporation) โดยการดึงความร้อนจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบมาใช้ เป็นผลทำให้โดยรอบนั้นเกิดความเย็น



รูปที่ 1-4 การเปรียบเทียบความร้อนแฝงกับความร้อนสัมผัสที่ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น

(ที่มา: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/phase.html>)

1.5 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

เมื่อมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเกิดขึ้น จะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำจนอุณหภูมิเท่ากัน การถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งได้ 3 วิธี คือ

(1) **การนำความร้อน (Conduction)** เป็นการถ่ายเทความร้อนที่ต้องใช้ตัวกลาง โดยโมเลกุลของตัวกลางนั้นยังอยู่ในตำแหน่งเดิม ตัวกลางนี้อาจเป็น ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ การถ่ายเทความร้อนอาจเกิดในวัสดุชิ้นเดียวกัน หรือ วัสดุ 2 ชิ้น ที่มาสัมผัสกัน ปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านโดยการนำความร้อน จะขึ้นอยู่กับ

1) คุณสมบัติในการนำความร้อนของวัสดุ เรียกว่า **k-value** หรือ **Conductivity** หรือ **ค่าสัมประสิทธิ์ในการนำความร้อน** ซึ่งคืออัตราการไหลของความร้อนต่อหน่วยเวลาต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยความหนาของ 2 ด้านที่มีการถ่ายเทความร้อนกัน 1 °C มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส (W/m °C) ค่า k ของวัสดุจะแตกต่างกันได้ ตั้งแต่ 0.03 สำหรับวัสดุที่เป็นฉนวน จนถึง 388 W/m °C สำหรับทองแดงซึ่งเป็นวัสดุนำความร้อนสูง สำหรับคุณสมบัติในการนำความร้อนของวัสดุที่มีความหนาตามที่พิจารณา หรือ ตามที่ออกแบบ เช่น 0.10 ม. จะเรียกว่า ค่า **Conductance (C)** ส่วนกลับของค่า k เรียกว่า **Resistivity** และค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุที่พิจารณา เรียกว่า **Resistance** หรือ **R-value**

โดยค่า R = ความหนาของวัสดุหน่วยเป็นเมตรหารด้วยค่า k

หน่วยของค่า R คือ m²K/W (= m x m·K/W) หรือ m²·°C/W

ค่า C คุณสมบัติในการนำความร้อนของวัสดุที่มีความหนาตามที่พิจารณา จะเป็นส่วนกลับของค่า R มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร-องศาเซลเซียส (W/m²·°C)

$$C = 1/R$$

(__ivity จะหมายถึงคุณสมบัติหรือความสามารถ (Ability) ของวัสดุที่มีความหนามาตรฐาน เช่น 1 ม. ส่วน __ance เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่มีความหนาตามที่พิจารณา)

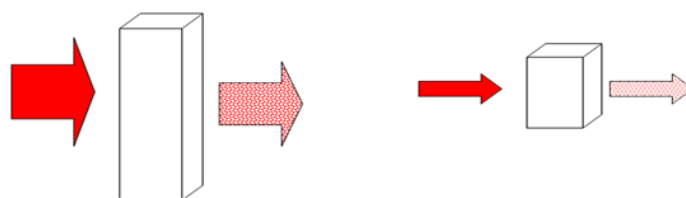
(1) ขนาดพื้นที่หน้าตัด (A) หรือ พื้นที่ในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางที่ความร้อนไหลผ่าน มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

(2) ความหนาของวัตถุในทิศทางที่ความร้อนไหลผ่าน มีหน่วยเป็น เมตร (m)

(3) ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่าง 2 จุดที่ถ่ายเทความร้อน (ΔT) เช่น ด้านที่อยู่ตรงข้ามกันของวัตถุ หรือ ผนังภายนอกและภายใน



ความแตกต่างของอุณหภูมิ หรือ ΔT



ขนาดของพื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน หรือ A

รูปที่ 1-5 ปริมาณการนำความร้อนขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ในการนำความร้อน

พื้นที่หน้าตัด และความแตกต่างของอุณหภูมิ

ดังนั้น ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านวัตถุ โดยการนำความร้อน (Conduction Heat Flow, Q_c) จึงหาได้จากสมการ

$$Q_c = C \times A \times \Delta T$$

(2) การพาความร้อน (Convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนที่โมเลกุลของตัวกลางมีการเคลื่อนที่ ผ่านตัวกลางที่เป็น ของเหลว หรือ ก๊าซ ซึ่งอาจจะเป็น Natural Convection ซึ่งเป็นการพาความร้อนที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ เมื่อก๊าซ เช่น อากาศได้รับความร้อนก็จะขยายตัว อากาศที่ขยายตัวจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าอากาศที่อยู่โดยรอบจึงลอยสูงขึ้น อากาศจะเย็นไหลเข้ามาแทนที่ เช่น การไหลของลมในลักษณะที่เรียกว่า Stack Effect หรือ การระบายอากาศแบบปล่อง ซึ่งอากาศร้อนในอาคารจะลอยจากชั้นล่างขึ้นสู่ชั้นบน ส่วน Forced Air Ventilation เป็นการใช้พลังงาน เช่น ในเครื่องสูบน้ำ ทำให้ของเหลวไหลเร็วขึ้น ปริมาณความร้อนโดยการพาความร้อน จะขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้

1) พื้นที่ ที่สัมผัสระหว่างวัตถุและของไหล (A) มีหน่วยเป็น m^2

2) ค่าสัมประสิทธิ์ในการพาความร้อน (h_c) มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตรองศาเซลเซียส ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) ซึ่งขึ้นอยู่กับ

- ความหนืด (Viscosity)

- ความเร็วของของไหล
- ลักษณะกายภาพของวัตถุ ซึ่งทำให้เกิดการไหลแบบราบเรียบ (Laminar) หรือ แบบปั่นป่วน (Turbulent)
- ค่าสัมประสิทธิ์ในการพาความร้อนระหว่างอากาศกับผิวของอาคาร ซึ่งแตกต่างกันตามทิศทาง (Szokolay, 1987, p.9)

$hc = 3.0 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ สำหรับผิวในแนวดิ่ง

$hc = 4.3 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ สำหรับความร้อนที่ไหลขึ้นข้างบน จากอากาศถึงเพดาน หรือจากพื้นถึงอากาศ

$hc = 1.5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ สำหรับความร้อนที่ไหลลงข้างล่าง จากเพดานลงมาถึงอากาศ หรือ จากอากาศลงมาสู่พื้น

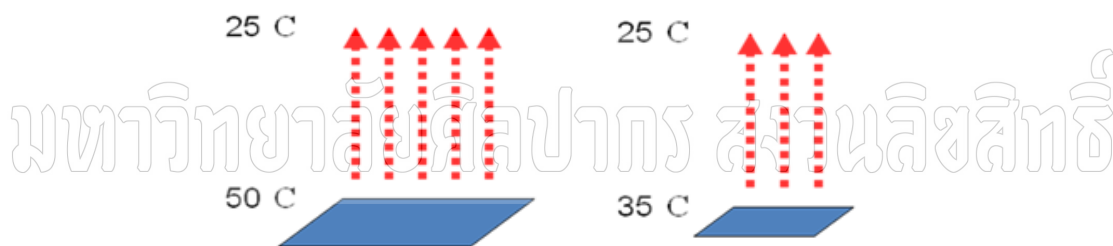
สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ในการพาสำหรับผิวที่ได้รับลม จะมีค่า คือ

$hc = 5.8 + 4.1 v$ (เมื่อ v = ความเร็วลม เมตร/วินาที)

3) ความแตกต่างของอุณหภูมิ ระหว่างวัตถุและของไหล (ΔT) มีหน่วยเป็น $^\circ\text{C}$

ปริมาณความร้อนจากการพาความร้อน (Q_{cv}) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q_{cv} = hc \times A \times \Delta T$$



รูปที่ 1-6 ปริมาณความร้อนจากการพาความร้อนขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ ความแตกต่างของอุณหภูมิ และสัมประสิทธิ์ในการพาความร้อน

(3) การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยไม่ใช้ตัวกลาง เป็นการแผ่รังสีอินฟราเรดซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) สามารถแบ่งได้เป็น

- รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น มีความยาวคลื่นประมาณ 700 - 2,300 นาโนเมตร (nm) เป็นรังสีจากดวงอาทิตย์
- รังสีอินฟราเรดคลื่นยาว มีความยาวคลื่นประมาณ 2,300 - 10,000 นาโนเมตร (nm) เป็นรังสีความร้อนที่แผ่มาจากวัตถุทั่วไป

ความยาวคลื่นที่แผ่รังสีจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ถ้าวัตถุยิ่งมีอุณหภูมิสูงมาก การแผ่รังสีจะมีสัดส่วนของคลื่นสั้นที่มากขึ้น คลื่นสั้นจะมีความสามารถในการส่องผ่าน หรือ ทะลุวัตถุได้มากกว่า

1.6 ผลของรังสีอาทิตย์ที่มีต่อวัตถุ

- **วัตถุทึบแสง** เมื่อรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบวัตถุทึบแสงที่พิจารณา ส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืนและอีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนออกมาขึ้นอยู่กับคุณสมบัติในการดูดกลืนของผิวที่เรียกว่า **Absorptance** และคุณสมบัติในการสะท้อน เรียกว่า **Reflectance** ของวัสดุที่พิจารณา โดยผลรวมของค่าทั้งสองจะเท่ากับ 1

$$\text{Absorptance} + \text{Reflectance} = 1$$

- **วัตถุโปร่งแสง** เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบวัตถุโปร่งแสงจะมีรังสีอาทิตย์ส่วนหนึ่งที่ทะลุผ่านวัตถุโปร่งแสงไป คุณสมบัติของวัตถุในการยอมให้รังสีอาทิตย์ผ่านของวัตถุที่พิจารณา เรียกว่า **Transmittance** ซึ่งขึ้นอยู่กับความใส และความหนาของวัสดุ สำหรับวัตถุโปร่งแสง ผลรวมของค่าทั้ง 3 จะเท่ากับ 1

$$\text{Absorptance} + \text{Reflectance} + \text{Transmittance} = 1$$

ค่าทั้ง 3 นี้ อาจแสดงเป็นทศนิยม ที่มีผลรวมกันเป็น 1 หรือ อาจแสดงในรูปเปอร์เซ็นต์ที่รวมเป็น 100

- **คุณสมบัติในการแผ่รังสีความร้อน** เรียกว่า **Emittance** หรือ **Emissivity** ที่ ณ ความยาวคลื่นเดียวกัน (หรือ อุณหภูมิเดียวกัน) ค่า **Emittance = Absorptance** แต่ค่าทั้งสองนี้จะเปลี่ยนไปที่แต่ละอุณหภูมิ ค่า **Emittance** ของวัสดุจะแตกต่างกันได้มาก ขึ้นกับลักษณะผิว ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ในการแผ่รังสีสูง คือ วัสดุที่มีผิวด้านทั่วไป และวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ในการแผ่รังสีต่ำ คือ วัสดุที่มีผิวมันเงา (ตารางที่ 1-2)

ตารางที่ 1-2 ค่าสัมประสิทธิ์ในการแผ่รังสีความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของผิววัสดุ

ประเภท	ค่าสัมประสิทธิ์ในการแผ่รังสี (แผ่รังสีที่อุณหภูมิต่ำ)	ค่าสัมประสิทธิ์ในการดูดกลืน (รังสีอาทิตย์)
อะลูมิเนียม	0.05	0.2
แอสฟัลต์	0.95	0.9
อิฐ (dark)	0.9	0.6
ผิวทาสีขาว	0.9	0.3
ผิวทาสีดำ	0.9	0.9

ที่มา: McMullan, 1983, p.27.

ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทโดยการแผ่รังสี (Q_r) ขึ้นกับปัจจัย คือ

- ความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิที่ผิววัตถุที่แผ่รังสีความร้อน และผิววัตถุที่ดูดกลืนความร้อน (ΔT)

- พื้นที่ซึ่งดูดกลืนหรือแผ่รังสี (A)

- ค่าสัมประสิทธิ์ในการแผ่รังสี (Radiation Coefficient, hr) ค่าที่ใช้ คือ

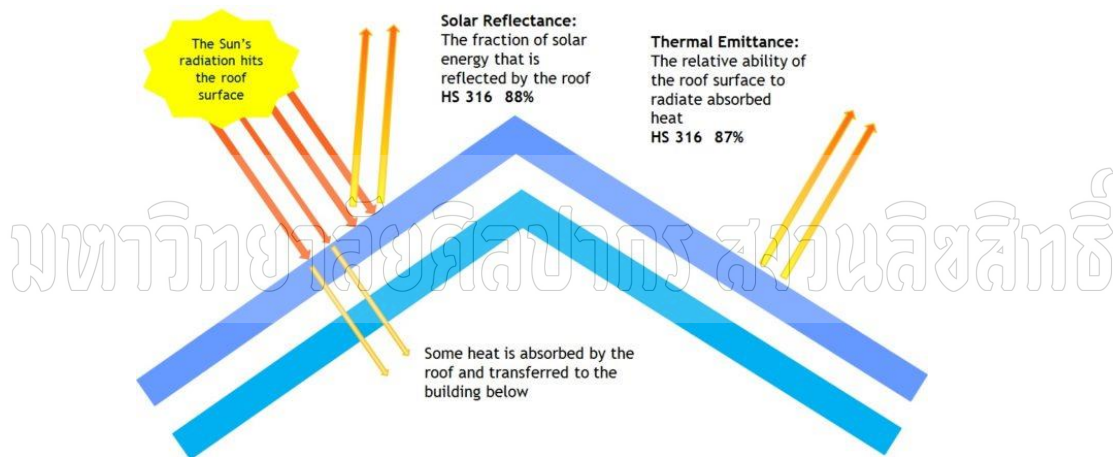
$hr = 5.7 \times \text{emittance}$ ที่อุณหภูมิประมาณ 20°C

$hr = 4.6 \times \text{emittance}$ ที่ 0°C

โดยค่า Emittance นี้เป็นค่า **Effective Emittance** คือ เป็นค่าเฉลี่ยระหว่างผิวที่แผ่รังสี และผิวที่ดูดกลืนรังสี

ดังนั้น ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากการแผ่รังสี ของวัตถุที่วางหันหน้าขนานกันจะสามารถคำนวณได้จากสมการ คือ

$$Q_{rd} = hr \times A \times \Delta T$$



รูปที่ 1-7 หลังคาที่ได้รับรังสีอาทิตย์ถ้ามีค่า Solar Reflectance สูง จะดูดกลืนความร้อนต่ำทำให้ความร้อนเข้าสู่อาคารน้อย และการมีค่า Emittance สูงจะทำให้คายความร้อนสู่ภายนอกได้เร็ว

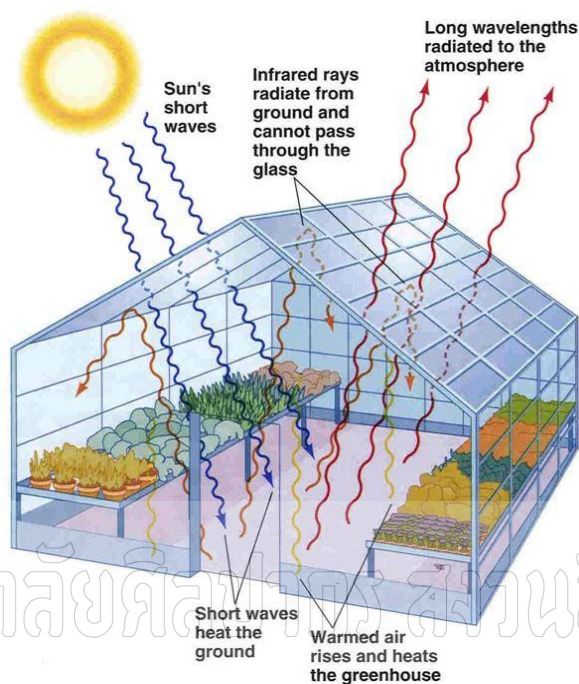
(ที่มา: <http://g2silicones.com/solar-reflectance/>)



รูปที่ 1-8 อะลูมิเนียมพอยล์ที่มีผิวมันเงาทั้ง 2 ด้าน ด้านบนมี Reflectance สูง จะสะท้อนความร้อน ส่วนด้านล่างที่มีค่า Emittance ต่ำ จะทำให้แผ่ความร้อนเข้ามาในอาคารได้น้อย

1.7 เรือนกระจก (Greenhouse)

เรือนกระจก เป็นตัวอย่างของผลจากรังสีความร้อนที่มีความยาวคลื่นต่างกัน โดยรังสีความร้อนที่แผ่จากดวงอาทิตย์ที่อุณหภูมิสูงมาก จึงเป็นรังสีคลื่นสั้นสามารถทะลุชั้นบรรยากาศและทะลุกระจกเข้ามาได้ และเมื่อถูกดูดกลืนโดยต้นไม้และวัตถุต่าง ๆ ที่อยู่ภายในเรือนต้นไม้ วัตถุเหล่านี้ก็จะแผ่รังสีความร้อนออกมาอีก (re-radiate) แต่เป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าความยาวคลื่นจึงยาวกว่า คลื่นยาวเหล่านี้ไม่สามารถที่จะทะลุกระจกและบรรยากาศกลับออกไปได้



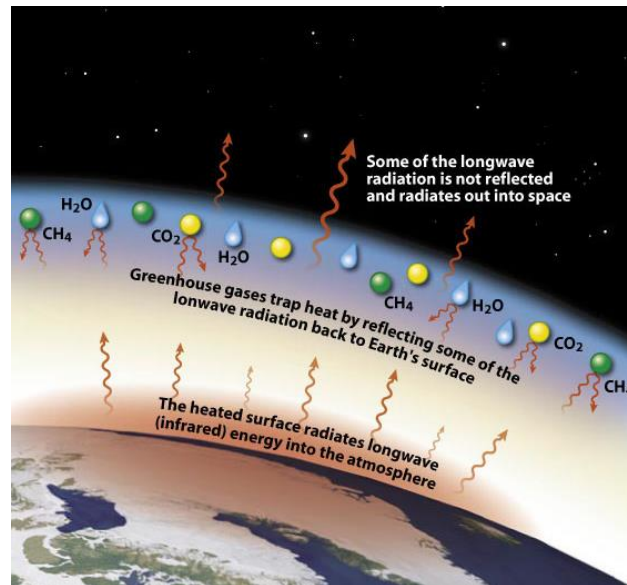
รูปที่ 1-9 การเกิดความร้อนสะสมในเรือนกระจกจากคลื่นอินฟราเรดยาวที่ไม่สามารถสะท้อนและแผ่รังสี (Reflect) ออกไปได้ ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น แล้วจึงแผ่ความร้อน (Emit) ให้กับสภาพแวดล้อมที่เย็นกว่าอีกทีหนึ่ง

(ที่มา: <http://www.earthlyissues.com/greenhouseeffect.htm>)

1.8 ภาวะโลกร้อนและก๊าซเรือนกระจก

ปัญหาการเกิดภาวะโลกร้อนที่เป็นปัญหาสำคัญของโลกในปัจจุบัน ก็เป็นอีกตัวอย่างของผลจากการแผ่รังสีความร้อนที่มีความยาวคลื่นไม่เท่ากัน และมีความสามารถในการทะลุผ่านต่างกัน ซึ่งเกิดจากการที่ดวงอาทิตย์แผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นทะลุผ่านชั้นบรรยากาศมายังโลก เมื่อโลกดูดซับความร้อนแล้ว ก็คายความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าเป็นรังสีอินฟราเรดคลื่นยาวกลับออกไป ในสภาพชั้นบรรยากาศจะมีไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) และอีกหลายชนิดปกคลุมอยู่ในชั้นบรรยากาศ ทำให้โลกอบอุ่น รังสีอินฟราเรดคลื่นยาวบางส่วนจะแผ่กลับออกไปได้ แต่เนื่องจากการใช้พลังงานฟอสซิล น้ำมัน ก๊าซ เมื่อเผาไหม้จะเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ และเมื่อมีการใช้มาก ทำให้ก๊าซเหล่านี้เพิ่มมากขึ้นจนความพอดิ ทำให้รังสีอินฟราเรดคลื่นยาวไม่สามารถกลับออกไปได้อย่างที่เคยเป็น ทำให้ความร้อนสะสม อุณหภูมิอากาศของโลกจึงสูงขึ้นเรื่อย ๆ เหมือนปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเรือนกระจก จึงเรียกก๊าซที่เป็นสาเหตุว่า “ก๊าซเรือนกระจก”

ในการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นี้ ส่วนหนึ่งเกิดจากการผลิตไฟฟ้า เพื่อรองรับความต้องการใช้งานในอาคาร เพื่อทำให้เกิดความสบายโดยการปรับอากาศ การใช้แสงสว่าง และอุปกรณ์ต่าง ๆ ในอาคาร ดังนั้น การใช้พลังงานในอาคารอย่างไม่ประหยัด หรือ ไม่มีประสิทธิภาพ ก็นับต้นเหตุสำคัญของปัญหาโลกร้อน ที่ผู้ออกแบบควรตระหนัก



รูปที่ 1-10 ปรากฏการณ์ก๊าซเรือนกระจกและภาวะโลกร้อน

(ที่มา: <http://www.earthlyissues.com/greenhouseeffect.htm>)

มหาวิทยาลัยศิลปากร ส่วนลิขสิทธิ์

1.9 แหล่งถ่ายเทความร้อน (Heat Source) และแหล่งดูดซับความร้อน (Heat Sink)

ดังที่ได้กล่าวข้างต้นว่า การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีไม่ต้องอาศัยตัวกลาง ดังนั้น การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี จึงเกิดขึ้นตลอดเวลาระหว่างอาคารกับสภาพแวดล้อม จากอุณหภูมิสูงสู่อุณหภูมิต่ำ ในเวลากลางวัน ดวงอาทิตย์จะเป็นแหล่งถ่ายความร้อน (Heat Source) แผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นมายังพื้นโลก หรือ อาคารซึ่งทำหน้าที่เป็นที่รับความร้อน (Heat Sink) ส่วนในเวลากลางคืน โลก หรือ อาคารจะทำหน้าที่เป็น Heat Source ที่คายความร้อนเป็นคลื่นอินฟราเรดยาวให้ท้องฟ้าซึ่งทำหน้าที่เป็น Heat Sink โดยเฉพาะท้องฟ้าโปร่งที่ไม่มีเมฆจะเย็นจัด

ในเวลากลางวัน อาคารที่มีมวลสารมากมีความจุความร้อนสูง จะทำหน้าที่ดูดกลืนความร้อนเป็น Heat Sink และหน่วยความร้อนที่เข้าสู่อาคาร และคายความร้อนออกมาในเวลากลางคืน ซึ่งเหมาะกับภูมิอากาศร้อนแห้ง ซึ่งอุณหภูมิกลางวันร้อนจัดและกลางคืนเย็นจัด

1.10 การระเหยเป็นไอ (Evaporation)

ในการถ่ายเทความร้อนระหว่างร่างกายหรืออาคารกับสภาพแวดล้อม นอกจากการถ่ายเทโดยวิธีการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนแล้ว ยังสามารถถ่ายเทความร้อนให้อากาศได้โดยการระเหยของน้ำ เช่น ความร้อนจากร่างกายลดลงได้โดยการระเหยของเหงื่อที่ผิวหนัง ความร้อนในอาคารลดลง เพราะการระเหยของน้ำฝนบนหลังคา

ถ้าการระเหยเกิดในห้องปิด อุณหภูมิอากาศจะลดลงแต่ความร้อนแฝงในอากาศจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเป็นห้องเปิดที่มีการระบายอากาศ ลมจะช่วยพัดพาอากาศที่มีความร้อนแฝงเพิ่มขึ้นออกไป

1.11 องค์ประกอบของรังสีดวงอาทิตย์

รังสีดวงอาทิตย์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves) ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก (รูปที่ 1-11) ซึ่งแต่ละส่วนมีผลกระทบต่อโลกต่างกัน คือ

(1) รังสีอุลตราไวโอเล็ต (Ultra Violet) มีความยาวคลื่น ประมาณ 200-380 นาโนเมตร (Nanometer, nm) ($1\text{ nm}=10^{-9}\text{m}$) มีประมาณ 7 % แบ่งเป็น

- UV 'C' ความยาวคลื่น < 280 nm เป็นส่วนที่จะถูกกรองไว้ในชั้นบรรยากาศ ส่วนใหญ่ไม่ลงมาถึงพื้นโลก เพราะถูกดูดซับโดยโอโซน เป็นช่วงรังสีที่มีอันตรายมากต่อสิ่งมีชีวิต สามารถนำมาใช้ในการฆ่าเชื้อโรค

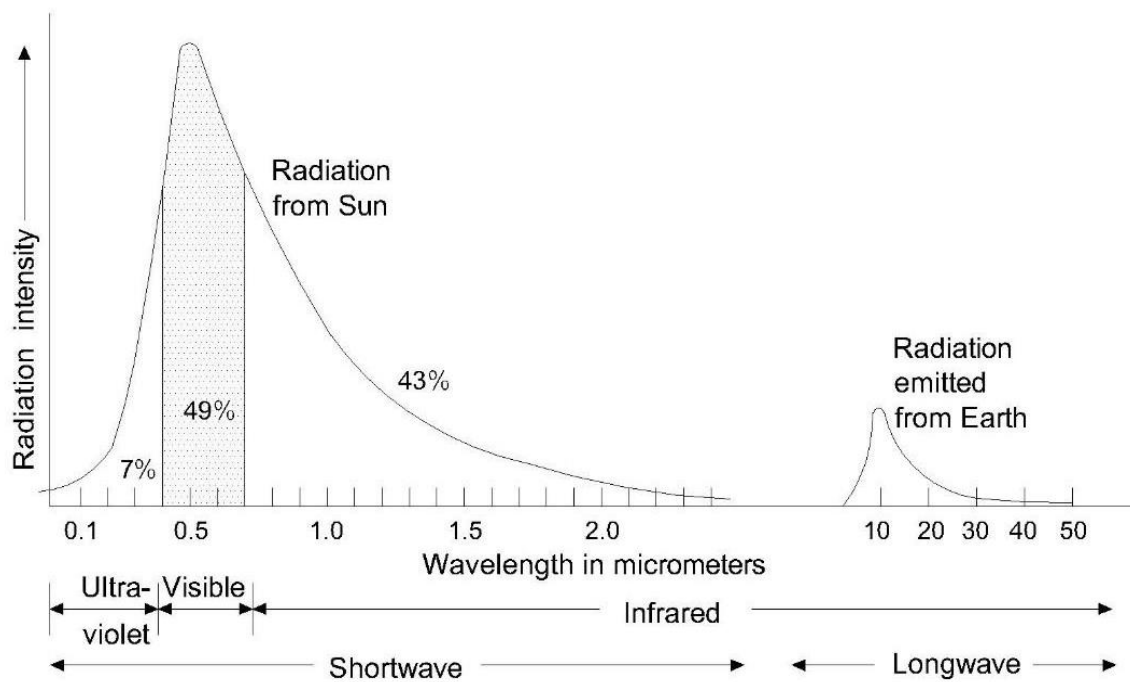
- UV 'B' ความยาวคลื่นประมาณ 280 - 315 nm มีประมาณ 5% ไม่สามารถทะลุกระจกได้ เป็นส่วนที่ทำให้ผิวหนังดำคล้ำไหม้เกรียม ทำให้เป็นมะเร็งผิวหนัง ทำให้ขบวนการสังเคราะห์แสงของพืชเสียหาย

- UV 'A' ความยาวคลื่น 315 - 380 nm มีประมาณ 95% สามารถทะลุกระจกธรรมดาได้เกือบ 100% ทำให้ผิวหนังคล้ำ อันตรายต่อสายตา ทำให้วัสดุเสียหาย เช่น ซีตฉาง การป้องกัน UV ที่ผ่านกระจกส่วนใหญ่ใช้การติดฟิล์มชนิดกัน UV ที่กระจก หรือใช้กระจกพิเศษที่กัน UV

รังสี UV มีผลต่อการเสื่อมสภาพของวัสดุในการก่อสร้าง หลายชนิด เช่น ประเภทไม้ พลาสติก โพลีเมอร์ กระดาษ ผ้า สี น้ำยาเคลือบผิว

(2) รังสีที่ตามองเห็น หรือ แสงสว่าง (Visible Light) มีความยาวคลื่นประมาณ 380-760 nm มีประมาณ 43% เป็นส่วนที่เป็นประโยชน์ในการออกแบบอาคารประหยัดพลังงาน ช่วยลดพลังงานจากการใช้แสงประดิษฐ์

(3) รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น (Short Wave Infrared) มีความยาวคลื่นประมาณ 760-2,300 nm ซึ่งเป็นความร้อน มีประมาณ 49% รังสีอินฟราเรดไม่ได้ทำให้อากาศร้อน แต่เมื่อมากระทบพื้นโลกซึ่งดูดซับรังสีแล้ว พื้นโลกจึงคายความร้อนให้อากาศที่อยู่ใกล้ทำให้อากาศร้อนขึ้น กระจกแต่ละชนิดจะยอมให้รังสีอินฟราเรดผ่านได้ไม่เท่ากัน กระจกที่ใช้ในประเทศเขตร้อนจะต้องกันรังสีส่วนนี้ออกไปให้ได้มากที่สุด เพื่อประหยัดพลังงานในการปรับอากาศ ส่วนในประเทศเขตหนาวจะยอมให้รังสีส่วนนี้ผ่านกระจกเข้ามาเพื่อความอบอุ่น



รูปที่ 1-11 องค์ประกอบของแถบคลื่นรังสีอาทิตย์

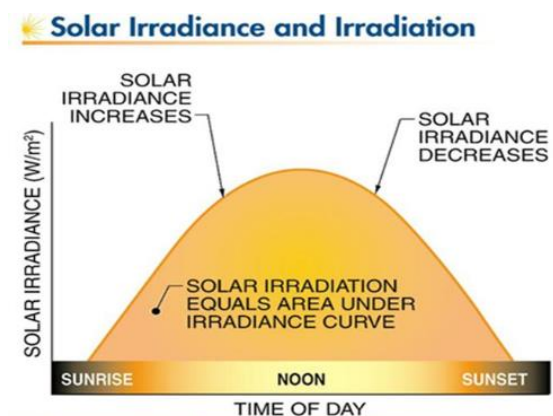
(ที่มา: <http://faculty.icc.edu/easc111lab/labs/lab1/waveradi.jpg>)

1.12 การวัดปริมาณของรังสีอาทิตย์

สามารถวัดได้ 2 วิธี คือ

Irradiance เป็นการวัดความเข้มของรังสีอาทิตย์ ณ จุดหนึ่งของเวลา มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)

Irradiation เป็นการวัดปริมาณรังสีอาทิตย์ที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เช่น ชั่วโมง วัน เดือน ปี มีหน่วยเป็น จูลต่อตารางเมตร (J/m^2) หรือ วัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร (Wh/m^2) ถ้านำค่ารังสีอาทิตย์มาพล็อตในกราฟ ค่าที่อ่านได้ ณ จุดหนึ่งบนเส้นกราฟ คือ Irradiance แต่พื้นที่ใต้เส้นกราฟจะแสดงค่า Irradiation (รูปที่ 1-12)



รูปที่ 1-12 ความเข้มของรังสีอาทิตย์ (Irradiance) และปริมาณรังสีอาทิตย์ (Irradiation)

(ที่มา: <https://slideplayer.com/slide/2466475/>)

1.13 ประเภทของรังสีอาทิตย์

รังสีอาทิตย์รวมทุกความยาวคลื่นที่มาตกกระทบตั้งฉากบนพื้นที่ 1 ตารางเมตร วัดที่ขอบบนของชั้นบรรยากาศจะมีความเข้มของรังสีประมาณ $1,367 \text{ W/m}^2$ เรียกว่า "ค่าคงที่สุริยะ" (Solar Constant) ค่านี้จะอาจแตกต่างกันไปได้ในช่วงประมาณ 3.5% เนื่องจากระยะทางระหว่างโลกและดวงอาทิตย์ที่มีความแตกต่างกันในวงโคจร เมื่อรังสีอาทิตย์ผ่านชั้นบรรยากาศ บางส่วนจะสะท้อนออกไป บางส่วนจะถูกดูดกลืนในชั้นบรรยากาศ ความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่ส่องลงมาพื้นโลก (Global Irradiance) จะเหลือประมาณ 50% (Szokolay, 1987, p.15)

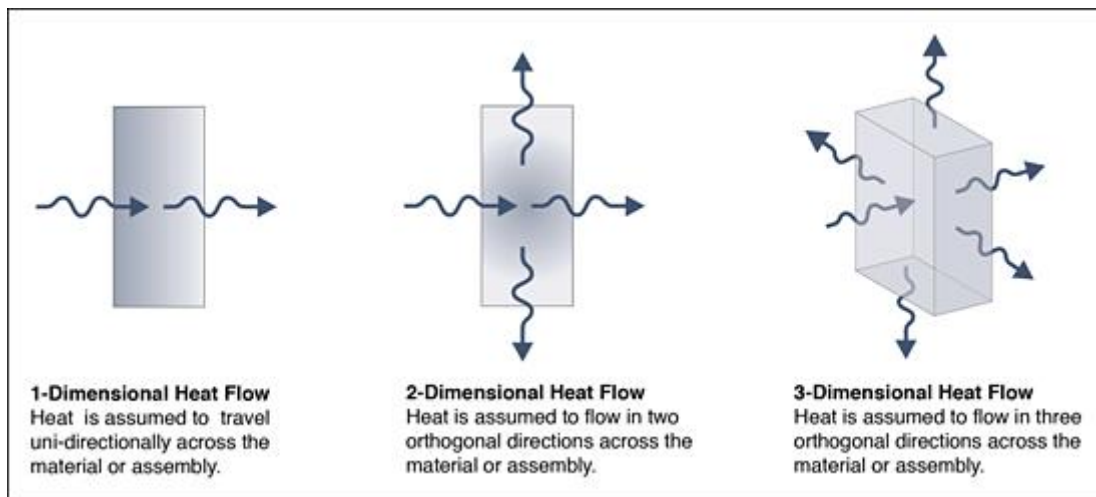
รังสีอาทิตย์ที่โลกได้รับ ถ้าวัดบนพื้นราบจะประกอบเป็น 2 ส่วน คือ **รังสีตรง** ซึ่งเป็นลำแสง หรือ แดด (Direct or Beam Irradiance) และ **รังสีกระจาย** (Diffuse Irradiance) ซึ่งเป็นส่วนของรังสีที่กระทบเมฆ ไอน้ำ ในบรรยากาศ กระจายมาจากทั้งท้องฟ้า แต่ถ้าวัดรังสีรวมในแนวเอียง ก็จะได้รับ **รังสีสะท้อน** จากพื้นดิน (Reflected Irradiance) ด้วย

$$\text{Global Irradiance} = \text{Direct Irradiance} + \text{Diffuse Irradiance} (+ \text{Reflected Irradiance})$$

ค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ (Irradiance) สูงสุดบนผิวโลกจะมีค่าประมาณ $1,000 \text{ W/m}^2$ โดยจะมีค่าปริมาณรังสีอาทิตย์ทั้งปี (Irradiation) ที่ได้รับในพื้นที่แตกต่างกันไปตามตำแหน่งที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ อาจตั้งแต่ $400 \text{ kWh/m}^2 \text{ y}$ ที่ใกล้ขั้วโลก ถึงมากที่สุดประมาณ $2,500 \text{ kWh/m}^2 \text{ y}$ ในทะเลทรายซาฮารา รังสีอาทิตย์มีผลโดยตรงต่อการเพิ่มความร้อนเข้าสู่อาคาร และทำให้อาคารต้องใช้พลังงานในการปรับอากาศเพื่อให้เกิดความสบาย แต่ในขณะเดียวกันก็สามารถเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่เป็นพลังงานสะอาดให้กับอาคารด้วย

1.14 ประเภทของวิธีการคำนวณการถ่ายเทความร้อน

มิติในการถ่ายเทความร้อน การคำนวณการถ่ายเทความร้อนที่ผ่านเข้าหรือออกจากอาคารโดยการนำความร้อน การพาความร้อน หรือ การแผ่รังสีความร้อน ในอดีตก่อนที่จะมีการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์อย่างกว้างขวาง จะเป็นการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในมิติเดียว (One Dimensional Heat Flow Model) (รูปที่ 1-13) เช่น ความร้อนถ่ายเทจากอากาศภายนอกสู่อากาศภายในอาคารผ่านผนัง ต่อมาได้มีการพัฒนาการคำนวณถ่ายเทความร้อนในลักษณะของ 2 มิติ (Two Dimensional Heat Flow Model) เช่น การคำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่าง นอกจากจะคิดความร้อนผ่านกระจกแล้ว ก็คำนวณความร้อนที่มีการถ่ายเทระหว่างกระจกและบานกรอบที่ติดกันทางด้านข้างมาพิจารณาด้วย ส่วนการถ่ายเทความร้อนแบบ 3 มิติ (Three Dimensional Heat Flow Model) เป็นการคำนวณการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นใน 3 ทิศทางระหว่างส่วนประกอบของอาคารทั้งหมด คือ ผนัง หน้าต่าง และหลังคา ซึ่งเป็นการคำนวณที่ซับซ้อนมาก



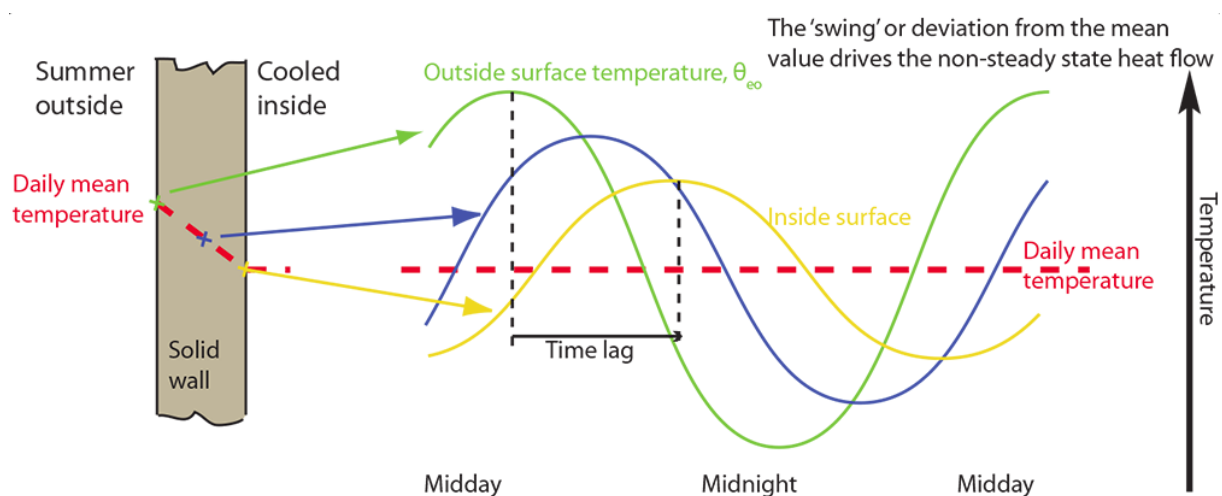
รูปที่ 1-13 มิติในการถ่ายเทความร้อน

(ที่มา: <https://www.wbdg.org/resources/managing-enclosure-heat-flows>)

การคำนวณที่อุณหภูมิคงที่ และ อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา การคำนวณการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน ผ่านผนังหรือหลังคาอาคาร สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ

Steady State Heat Flow เป็นการกำหนดให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านนอกและด้านในอาคารที่มีการถ่ายเทความร้อนมีค่าคงที่ตลอดเวลา เป็นวิธีที่สามารถคำนวณได้จากสูตรโดยใช้เครื่องคิดเลข หรือ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เป็นการคิดการถ่ายเทความร้อนเข้าหรือออกผ่านผนัง หลังคาในมิติเดียว (One Dimensional Heat Flow)

Periodic Heat Flow เป็นการคำนวณการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิอากาศภายนอกและภายในอาคารเปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลาในรอบวัน ซึ่งการคำนวณในลักษณะนี้จะมีความซับซ้อนมาก เพราะมวลสารของอาคารจะมีผลต่อพฤติกรรมในการถ่ายเทความร้อน โดยจะต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ



รูปที่ 1-14 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังแบบ Periodic Heat Flow

(ที่มา: <https://www.cibsejournal.com/cpd/modules/2013-01/>)

1.15 Sol Air Temperature

เป็นอุณหภูมิสมมติของอากาศภายนอกในสถานะที่ไม่มีแดด ที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังอาคารจากภายนอกสู่ภายใน ในปริมาณที่เท่ากับตอนที่ผนังได้รับแดด โดยคิดการถ่ายเทความร้อนจากฟิล์มอากาศด้านนอก ผ่านผนังอาคาร ผ่านฟิล์มอากาศด้านใน

ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังอาคารที่ปรับอากาศ เพื่อหาภาระการทำความเย็น (Cooling Load) จะนำค่า Sol Air Temperature มาคิดเพื่อหาความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกและภายใน เรียกว่า ความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศที่เทียบเท่า (Temperature Difference Equivalent)

Sol Air Temperature (T_s) ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ อุณหภูมิอากาศภายนอก (T_o) ปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนผนัง (G) คุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของผนังซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มของสี (abs) ค่าการนำความร้อนของฟิล์มอากาศที่ผนังภายนอก (h) (หรือ ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศที่ผนังภายนอก (R_{so}) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ ดังนี้ (Szokolay, 1987, p.22)

$$T_s = T_o + (G \times \text{abs}) / h$$

หรือ

$$T_s = T_o + (G \times \text{abs}) \times R_{so} \quad (\text{เมื่อ } 1/h = R_{so})$$

สำหรับกรณีที่เป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคา ซึ่งสามารถแผ่รังสีความร้อนให้กับท้องฟ้า จะมี การนำความร้อนส่วนที่แผ่ออกไป (Radiant Emission, E) มาหักลบในสมการ คือ

$$T_s = T_o + (G \times \text{abs} - E) / h$$

หรือ

$$T_s = T_o + (G \times \text{abs} - E) \times R_{so} \quad (\text{เมื่อ } 1/h = R_{so})$$

ค่า Radiant Emission หรือ E สำหรับหลังคา มักจะใช้ 50 W/m^2 สำหรับท้องฟ้าโปร่งไม่มีเมฆ และ 20 W/m^2 สำหรับท้องฟ้าที่มีเมฆ

ส่วนผนังไม่ต้องคิดค่า Radiant Emission เพราะวาระนาบผนังมักจะหันไปยังสิ่งโดยรอบที่มีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน

ความเข้าใจในหลักการของ Sol Air Temperature จะเป็นพื้นฐานของความเข้าใจในหลักเกณฑ์และวิธีการคำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคาร

1.16 สรุป

ความร้อนแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง อุณหภูมิเป็นสิ่งที่บอกให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของความร้อนสัมผัส ความร้อนแฝงไม่สามารถวัดได้โดยเทอร์โมมิเตอร์ ความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ เป็นสิ่งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุ ความร้อนจะไหลทิศทางเดียวจากอุณหภูมิสูงสู่อุณหภูมิต่ำ โดยสามารถถ่ายเทได้ 3 วิธี คือ การนำความร้อน การพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อน นอกจากนี้ ความร้อนจากอาคารสามารถถ่ายเทให้อากาศได้โดยการระเหยของน้ำ ทำให้ความร้อนของอาคารลดลง

คุณสมบัติของวัสดุที่บดแสงเมื่อได้รับรังสีอาทิตย์จะมีการดูดกลืน การสะท้อน และการคายความร้อน หรือ แผ่รังสีความร้อน ส่วนวัสดุโปร่งแสงจะมีคุณสมบัติในการดูดกลืน การสะท้อน การยอมให้รังสีส่องผ่าน และการแผ่รังสีความร้อน วัสดุผิวทั่วไปที่มีผิวด้าน จะแผ่รังสีสูง ส่วนวัสดุผิวมันเงา จะแผ่รังสีต่ำ

รังสีอาทิตย์ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ แฉกคลื่นอุลตราไวโอเล็ต แสงสว่างที่ตามองเห็น และรังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น ซึ่งแต่ละส่วนมีผลต่ออาคารต่างกัน การวัดรังสีอาทิตย์ อาจวัดในรูปความเข้มของรังสี ณ จุดหนึ่งของเวลา หรือ วัดปริมาณรังสีในช่วงระยะเวลา

การคำนวณการถ่ายเทความร้อนที่ผ่านเข้าสู่อาคาร สามารถแบ่งเป็น 2 แบบ วิธีการคำนวณโดยกำหนดให้อุณหภูมิอากาศภายนอกและภายในมีค่าคงที่ คิดความร้อนผ่านในมิติเดียว เป็นวิธีการคำนวณที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และวิธีการคำนวณที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา

การคำนวณในสถานะที่ผนังได้รับรังสีอาทิตย์ ก็จะต้องนำอิทธิพลของรังสีอาทิตย์มารวมไว้ในค่าของอุณหภูมิของอากาศภายนอกที่ใช้ในการคำนวณ

มหาวิทยาลัยศิลปากร สแกนลิขสิทธิ์

เอกสารอ้างอิง

- Effects of Solar UV and Climate Change on Materials. Available from
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2011/pp/c0pp90038a#!divAbstract>
- Effects of UV radiation. Available from <http://kippzonen-brewer.com/uv/effect-uv-radiation/>
- Kesik, Ted J. Managing Enclosure Heat Flows. Whole Building Design Guide. Available from
<https://www.wbdg.org/resources/managing-enclosure-heat-flows>
- Lechner, Norbert. Heating, Cooling, Lighting – Sustainable Design Methods for Architects. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- McMullan, Randall. **Environmental Science in Building**. Sixth edition, New York: Palgrave, 2007.
- Solar Radiation & Photosynthetically Active Radiation. Available from
<https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/weather/photosynthetically-active-radiation/>
- Szokolay, S.V. Introduction to Architectural Science – The Basis of Sustainable Design. Amsterdam : Elsevier, 2010.
- Szokolay, S.V. **Thermal Design of Building**. Canberra: RAIA Education, 1983.
- Thermal Admittance of Building Materials. Available from
https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Thermal_admittance_of_building_materials
- Thermal Admittance. Available from <http://performativedesign.com/definitions/heat/thermal-admittance/>

แบบฝึกหัด

- 1) ให้อธิบายความหมายของคุณสมบัติของวัสดุ คือ Absorptance, Reflectance, Transmittance, Emittance
- 2) ให้ยกตัวอย่างวัสดุที่มีค่า Emittance ต่ำ
- 3) ให้ยกตัวอย่างองค์ประกอบ หรือ ส่วนของอาคาร ที่มีการถ่ายเทความร้อนกับสภาพแวดล้อมภายนอก โดยวิธี Conduction, Convection, Radiation, Evaporation
- 4) ให้อธิบายปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทโดยวิธี Conduction Convection และ Radiation และเราจะสามารถนำปัจจัยเหล่านี้มาประยุกต์ในการออกแบบเพื่อลดการถ่ายเทความร้อนที่เข้าสู่อาคารได้อย่างไรบ้าง
- 5) ให้อธิบายความแตกต่างระหว่าง Irradiance และ Irradiation
- 6) ให้ยกตัวอย่างวัสดุที่มีค่าความจุความร้อนจำเพาะสูง และให้อธิบายว่าเราสามารถนำคุณสมบัติของวัสดุที่มีค่าความจุความร้อนจำเพาะสูงมาใช้ในการออกแบบได้อย่างไร



มหาวิทยาลัยศิลปากร งามเลิศ

2. การวิเคราะห์สภาพภูมิอากาศ

2.1 การวิเคราะห์สภาพภูมิอากาศ

ในการออกแบบอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน มีความจำเป็นอย่างยิ่ง ที่จะต้องเข้าใจสภาพภูมิอากาศของพื้นที่ซึ่งอาคารตั้งอยู่ โดยวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ คือ

(1) เพื่อให้เข้าใจลักษณะภูมิอากาศในที่ตั้ง ว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร ในรอบปี และในรอบหนึ่งวัน มีปัจจัยใดบ้างที่ไม่อยู่ในขอบเขตสภาวะสบาย เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ที่จะต้องพิจารณาเพื่อแก้ปัญหาในการออกแบบ

(2) เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ที่จะใช้วิธีการ Passive Design หรือ การใช้ประโยชน์จากธรรมชาติในการออกแบบ เช่น การใช้ลมธรรมชาติให้เกิดความสบาย จำเป็นต้องทราบค่าความเร็วลม ทิศทางลม ส่วนการออกแบบที่ใช้หลักการระเหยของน้ำ จะต้องทราบความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ เป็นต้น

(3) เพื่อหาศักยภาพของการใช้พลังงานหมุนเวียน และความคุ้มค่าในการลงทุน เช่น การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต้องทราบความเข้มของรังสีอาทิตย์ ที่ตกลงมาบนระนาบต่าง ๆ และสภาพเมฆปกคลุม เป็นต้น

(4) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ข้อมูลปริมาณน้ำฝน สามารถนำมาใช้คำนวณขนาดพื้นที่หนองน้ำฝน และพื้นที่ซึมน้ำ เพื่อลดการไหลนองออกนอกพื้นที่ หรือ เก็บน้ำฝนไว้ใช้ประโยชน์ทดแทนการใช้น้ำประปา เป็นต้น

การวิเคราะห์ข้อมูลภูมิอากาศ จะแบ่งเป็น 2 ระดับ คือ

(1) **Macro Climate** เป็นข้อมูลสถิติภูมิอากาศในระดับจังหวัด หรือ อำเภอ ซึ่งรวบรวมโดยกรมอุตุนิยมวิทยา หรือ หน่วยงานที่รับผิดชอบของแต่ละประเทศ

(2) **Micro Climate** ข้อมูลสภาพอากาศในพื้นที่ขนาดเล็ก หรือ บริเวณโดยรอบที่ตั้งโครงการ ซึ่งอาจจะแตกต่างจากภูมิอากาศโดยรวมของเมืองนั้น อันเกิดจากสภาพแวดล้อมบางอย่าง เช่น การอยู่ใกล้แหล่งน้ำขนาดใหญ่ การมีอาคารสูงอยู่ใกล้ที่ตั้ง การตั้งอยู่บนเนินดิน ซึ่งมีผลทำให้บริเวณนั้นมีอุณหภูมิอากาศ ความชื้น ทิศทาง และความเร็วลม แตกต่างไปจากที่อื่น

ดังนั้น การศึกษาข้อมูลภูมิอากาศของที่ตั้งโครงการ ทั้งในระดับภาพรวมใหญ่ และระดับที่ตั้งโครงการ จึงจัดเป็นงานขั้นแรกของการออกแบบอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน สำหรับในบทนี้ จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ข้อมูลสถิติภูมิอากาศในภาพรวมทั้งระดับจังหวัด และระดับที่ตั้งโครงการ

2.2 ข้อมูลสถิติภูมิอากาศที่ใช้ในการออกแบบอาคาร

ผู้ออกแบบอาคารจะนำสถิติภูมิอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาที่จำแนกข้อมูลเป็นรายเดือน มาใช้ประโยชน์ โดยพิจารณาความเกี่ยวข้องกับการออกแบบอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน ในลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

- **อุณหภูมิอากาศ** หน่วย องศาเซลเซียส
 - อุณหภูมิอากาศมีผลโดยตรงต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคาร และโหลดในการปรับอากาศ และมีผลโดยตรงต่อสภาวะสบายในอาคารไม่ปรับอากาศ
 - มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ เช่น การระบายความร้อนจากคอยล์ร้อนของเครื่องปรับอากาศ ประสิทธิภาพการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- **ความชื้นสัมพัทธ์** หน่วย เปอร์เซ็นต์

- มีผลโดยตรงต่อโหลดในการปรับอากาศ เพราะเป็นความร้อนแฝง ที่รั่วซึมเข้าผ่านเปลือกอาคาร หรือ การเปิดประตูเข้าออก

- มีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์ เช่น การระเหยของน้ำใน Cooling Tower
- มีผลให้อุณหภูมิอากาศโดยรอบเย็นลง ถ้ามีการระเหยของน้ำ เช่น น้ำพุ
- มีผลต่อโดยตรงต่อสภาวะสบาย ในอาคารไม่ปรับอากาศ

- **ความเร็วลม** ข้อมูลจากการมอดูนิยมหาวิทยาลัยส่วนใหญ่จะใช้หน่วย น็อต (knot) หรือ กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในการออกแบบอาคารจะใช้หน่วย เมตรต่อวินาที (m/s)

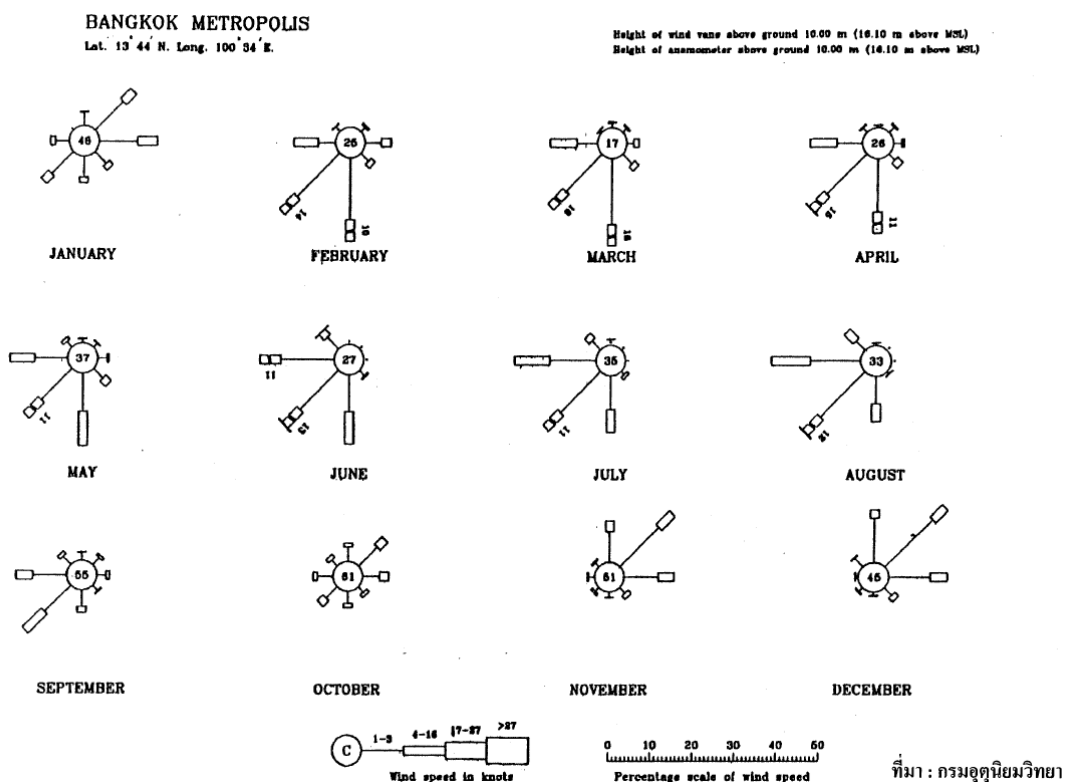
- ความเร็วลมมีผลต่อสภาวะสบายในการระบายอากาศธรรมชาติ
- สามารถช่วยลดความร้อนในที่ต้งโครงการ ลดความร้อนให้เปลือกอาคาร และลดความร้อนภายในอาคาร โดยเฉพาะในเวลากลางวัน

- ความเร็วลมมีผลต่อการรั่วซึมของอากาศผ่านเปลือกอาคาร ประตูทางเข้า ทำให้เพิ่มโหลดให้ระบบปรับอากาศ

- สามารถช่วยลดความชื้นที่สะสมโดยรอบอาคาร และในอาคาร

- **ทิศทางลม** มักแสดงเป็นผังลม เรียกว่า **Wind Rose Diagram** หรือ **Wind Wheel** โดยแบ่งเป็น 8 ทิศ หรือ 16 ทิศ เป็นผังที่แสดงข้อมูลทั้งทิศทาง ความเร็วลม เปอร์เซนต์ความถี่ของลมในแต่ละความเร็ว รวมทั้งเปอร์เซนต์ลมสงบ ซึ่งมักจะบุทึบในวงกลมตรงศูนย์กลางของผังลม (รูปที่ 2-1, 2-2) การบอกทิศทางลม บางทีใช้ค่าองศา จาก 1-360° โดยนับทิศทางตามเข็มนาฬิกา คือ ทิศเหนือ = 0 หรือ 360° ทิศตะวันออก = 90° ทิศใต้ = 180° และทิศตะวันตก = 270°

- ทิศทางลมใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบตำแหน่งช่องเปิดเพื่อรับลม หรือ ป้องกันลมที่อาจรั่วเข้าสู่อาคาร ในกรณีเป็นอาคารปรับอากาศ



รูปที่ 2-1 ผังลมรายเดือนของกรุงเทพมหานคร แบ่งเป็น 8 ทิศ

- ใช้ในการจำลองแสงธรรมชาติ
- **อุณหภูมิดิน** หน่วย องศาเซลเซียส
 - ใช้ในการออกแบบที่ใช้หลักแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอาคารและดิน การออกแบบท่อฝังดิน (Earth Tube)
- **ปริมาณน้ำฝน** หน่วย มิลลิเมตร
 - มีผลต่อความเปียกชื้นที่จะเกิดกับผนัง และผลของความชื้นที่เปลือกอาคารต่อการใช้พลังงานในการปรับอากาศ
 - ใช้ในการเลือกพืชพรรณที่เหมาะสมในการปลูก เพื่อช่วยปรับบริเวณให้เย็น
 - ใช้คำนวณปริมาณการให้น้ำฝน เพื่อลดการไหลนองออกนอกพื้นที่
 - ใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณานำน้ำฝนมาใช้แทนน้ำประปา เช่น ในระบบ Cooling Tower ในสุขภัณฑ์ รดน้ำต้นไม้

การนำสถิติภูมิอากาศมาใช้โดยปราศจากเครื่องมือในการวิเคราะห์ จะสามารถเข้าใจข้อมูลได้ในระดับหนึ่ง แต่ปัจจุบันมีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ข้อมูลภูมิอากาศ และสามารถแสดงผลเป็นภาพกราฟิกได้ง่ายและรวดเร็ว โดยการใช้ไฟล์ภูมิอากาศที่มีข้อมูลเป็นรายชั่วโมง ซึ่งจะทำให้ผู้ออกแบบสามารถเข้าใจสภาพภูมิอากาศของพื้นที่นั้นได้ดีขึ้นกว่าเดิมมาก โดยสามารถเลือกดูเฉพาะข้อมูลในช่วงเวลาที่กำหนดได้

2.3 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์สถิติภูมิอากาศ

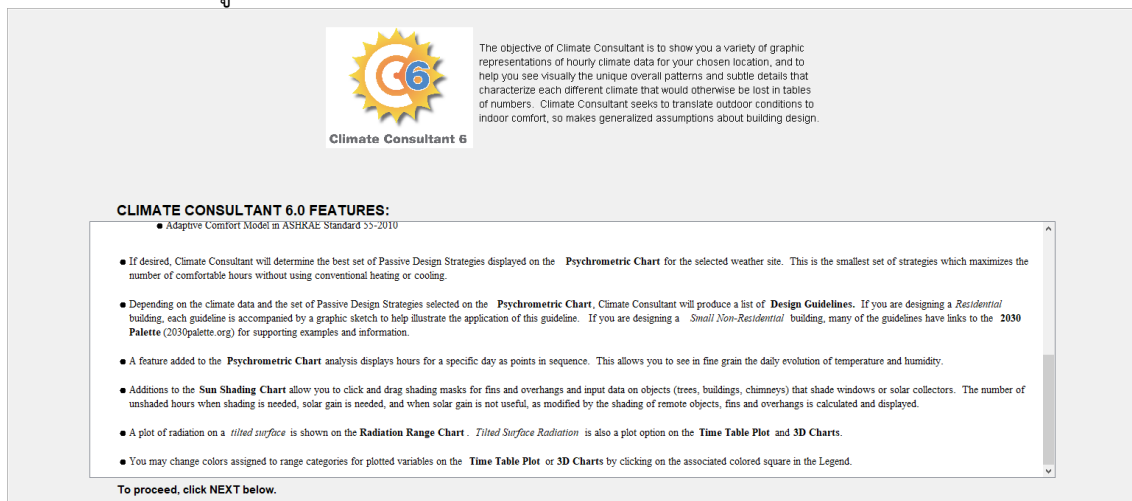
โปรแกรม Climate Consultant เป็นโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์สถิติภูมิอากาศ ของ University of California, Los Angeles (UCLA) ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่ใช้ไฟล์ข้อมูลสถิติภูมิอากาศ .epw (EnergyPlus Weather Data File) ซึ่งมีข้อมูลรายชั่วโมงตลอดทั้งปี หรือ 8,760 ชั่วโมงต่อปี เป็นโปรแกรมฟรี แสดงผลเป็นภาพกราฟิก และมีข้อแนะนำแนวทางการใช้ Passive Design ในสภาพภูมิอากาศแบบต่าง ๆ สามารถดาวน์โหลดโปรแกรมได้จาก <https://climate-consultant.informer.com/6.0/>

สำหรับไฟล์ข้อมูลสถิติภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร สามารถดาวน์โหลดได้ฟรีจาก website ของ EnergyPlus เข้าถึงได้ที่ https://energyplus.net/weather-region/asia_wmo_region_2/THA%20%20 ข้อมูลสถิติภูมิอากาศ ที่สามารถวิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Climate Consultant มีดังนี้

- อุณหภูมิอากาศ กระเปาะแห้ง อุณหภูมิจุดน้ำค้าง
- ความชื้นสัมพัทธ์
- ความเร็วลม
- ทิศทางลม
- ปริมาณรังสีอาทิตย์ (รังสีรวม รังสีตรง รังสีกระจาย)
- ปริมาณเมฆปกคลุม
- อุณหภูมิดิน
- แสงสว่างภายนอกอาคาร
- ตำแหน่งการโคจรของดวงอาทิตย์

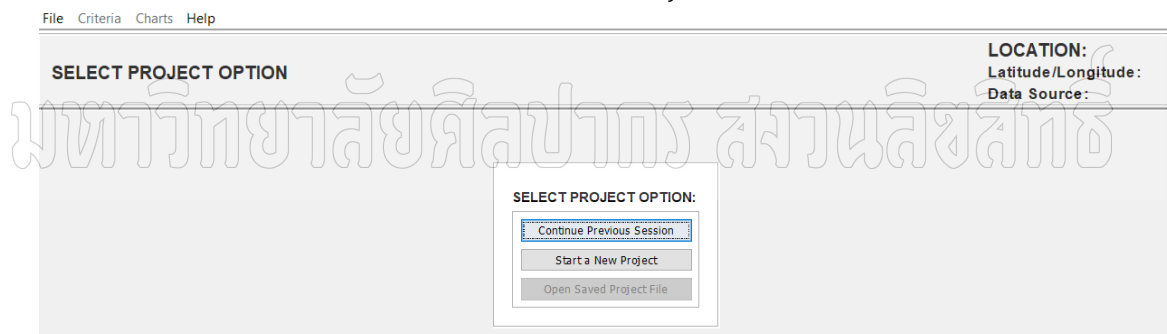
ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม Climate Consultant

(1) การเข้าสู่โปรแกรม



รูปที่ 2-3 หน้าแรกที่เข้าสู่โปรแกรม

(2) สร้างโครงการใหม่ เลือก “Start a New Project”



รูปที่ 2-4 หน้าทีเลือก “Start a New Project”

(3) เลือกประเภทโครงการ เป็น Residential หรือ Small Non-Residential เลือกหน่วย Metric และเลือกโหลดไฟล์ภูมิอากาศ EPW ถ้ายังไม่มี หรือ เปิดไฟล์ภูมิอากาศเดิมถ้ามีอยู่แล้ว

SELECT WEATHER DATA

LOCATION: Latitude/Longitude: Data Source:

SELECT BUILDING TYPE:

☐ Residential ☒ Small Non-Residential

SELECT UNITS:

☐ Imperial ☒ Metric

SELECT WEATHER DATA:

Select California Climate Zone Data File

Open Existing EPW Weather Data File

Download New EPW Weather Data File

If you want to download and install a new weather data file from the Energy Plus web site, select the Download New EPW Weather Data File button. Once the data file has been successfully downloaded and installed, it will open automatically.

รูปที่ 2-5 การเลือกประเภทอาคาร หน่วยวัด และไฟล์ภูมิอากาศ

(4) กรณียังไม่มีไฟล์ภูมิอากาศ ให้กด “Install from Weather Data Site” แล้วเลือก Asia ->Thailand->Bangkok ->epw กดคลิกขวาที่ epw เลือก copy link address แล้วกลับมาที่โปรแกรม Climate Consultant กดตรง “Paste Link” แล้วกด Install

Install Weather Data

Climate Consultant can now install EPW Weather Data files directly from the Energy Plus web site.

Follow these steps to install a weather data file:

1. Click the Install from Weather Data Site button below
2. When the Weather Data web page opens, find the location whose data you want to install and RIGHT-CLICK on the "epw" link (do not Left-Click).
3. Choose the Copy Link command from the pop-up menu (the command may be named Copy Link, Copy Link Location, Copy Shortcut, or something similar).
4. Close your browser to return to Climate Consultant, then click the Paste Link button below to paste the link into the Weather Data box.
5. Click the Install button and Climate Consultant will do the rest.

Install from Weather Data Site

Weather Data:

Paste Link

Install Cancel

รูปที่ 2-6 การติดตั้งไฟล์ภูมิอากาศ

(5) จากนั้นโปรแกรมจะแสดงรายการสรุปผลตัวแปรทั้งหมด เป็นรายเดือน

Climate Consultant 6.0 (Build 16, Jan 23, 2020)

FileCriteriaChartsHelp

WEATHER DATA SUMMARY

LOCATION: BANGKOK, -, THA

Latitude/Longitude: 13.92° North, 100.6° East, Time Zone from Greenwich 7

Data Source: IWE C Data 484560 WMO Station Number, Elevation 12 m

MONTHLY MEANS	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	
Global Horiz Radiation (Avg Hourly)	417	449	491	453	399	397	375	348	381	377	414	410	Wh/sq.m
Direct Normal Radiation (Avg Hourly)	327	313	365	249	167	172	144	109	131	155	307	355	Wh/sq.m
Diffuse Radiation (Avg Hourly)	195	222	219	258	268	262	261	262	280	262	207	177	Wh/sq.m
Global Horiz Radiation (Max Hourly)	865	933	1030	1028	949	973	974	988	866	920	842	821	Wh/sq.m
Direct Normal Radiation (Max Hourly)	840	831	897	885	645	825	773	763	594	784	825	879	Wh/sq.m
Diffuse Radiation (Max Hourly)	473	523	491	557	566	540	536	568	551	523	486	429	Wh/sq.m
Global Horiz Radiation (Avg Daily Total)	4708	5183	5870	5588	5049	5084	4785	4340	4611	4400	4701	4592	Wh/sq.m
Direct Normal Radiation (Avg Daily Total)	3687	3614	4364	3079	2113	2204	1837	1358	1581	1815	3477	3980	Wh/sq.m
Diffuse Radiation (Avg Daily Total)	2201	2567	2616	3182	3396	3360	3334	3267	3389	3058	2362	1991	Wh/sq.m
Global Horiz Illumination (Avg Hourly)	46240	49660	54792	50800	45026	44891	42429	39530	43081	42475	45909	44944	lux
Direct Normal Illumination (Avg Hourly)	29047	28350	32802	21527	14095	14567	12209	9418	10783	13094	27572	33023	lux
Dry Bulb Temperature (Avg Monthly)	26	28	29	30	29	29	29	28	28	27	27	26	degrees C
Dew Point Temperature (Avg Monthly)	20	20	22	23	23	24	23	23	23	24	21	16	degrees C
Relative Humidity (Avg Monthly)	68	66	69	68	71	76	72	75	76	80	68	57	percent
Wind Direction (Monthly Mode)	0	190	180	190	180	180	240	210	260	0	30	20	degrees
Wind Speed (Avg Monthly)	1	3	2	3	3	4	3	3	2	2	2	2	m/s
Ground Temperature (Avg Monthly of 3 Depths)	26	26	26	27	28	28	29	29	29	29	28	27	degrees C

Back

Next

รูปที่ 2-7 ตารางสรุปข้อมูลภูมิอากาศทั้งหมดเป็นรายเดือน

(6) เลือก Comfort Model ซึ่งมีให้เลือกทั้งหมด 4 แบบ สำหรับการออกแบบอาคารปรับอากาศในประเทศไทย ให้เลือก ASHRAE 55 and Current Handbook of Fundamentals Model ถ้าเป็นอาคารไม่ปรับอากาศ ให้เลือก Adaptive Comfort Model in ASHRAE 55-2010 โดยทั้ง 2 แบบ นี้ มีขอบเขตสภาวะสบายที่ต่างกัน คือ แบบ Adaptive Comfort จะมีอุณหภูมิอากาศภายในอาคารที่สามารถอยู่ในสภาวะสบายได้สูงกว่า และสัมพันธ์กับอุณหภูมิอากาศภายนอก

COMFORT MODEL	LOCATION: BANGKOK, -, THA Latitude/Longitude: 13.92° North, 100.6° East, Time Zone from Greenwich 7 Data Source: IVEC Data 484560 WMO Station Number, Elevation 12 m
----------------------	---

COMFORT MODELS:

Human Thermal comfort can be defined primarily by dry bulb temperature and humidity, although different sources have slightly different definitions. Select the model you wish to use:

☐ **California Energy Code Comfort Model, 2013 (DEFAULT)**

For the purpose of sizing residential heating and cooling systems the indoor Dry Bulb Design Conditions should be between 68°F (20°C) to 75°F (23.9°C). No Humidity limits are specified in the Code, so 80% Relative Humidity and 66°F (18.9°C) Wet Bulb is used for the upper limit and 27°F (-2.8°C) Dew Point is used for the lower limit (but these can be changed on the Criteria screen).

☒ **ASHRAE Standard 55 and Current Handbook of Fundamentals Model**

Thermal comfort is based on dry bulb temperature, clothing level (clo), metabolic activity (met), air velocity, humidity, and mean radiant temperature. Indoors it is assumed that mean radiant temperature is close to dry bulb temperature. The zone in which most people are comfortable is calculated using the PMV (Predicted Mean Vote) model. In residential settings people adapt clothing to match the season and feel comfortable in higher air velocities and so have wider comfort range than in buildings with centralized HVAC systems.

☐ **ASHRAE Handbook of Fundamentals Comfort Model up through 2005**

For people dressed in normal winter clothes, Effective Temperatures of 68°F (20°C) to 74°F (23.3°C) (measured at 50% relative humidity), which means the temperatures decrease slightly as humidity rises. The upper humidity limit is 64°F (17.8°C) Wet Bulb and a lower Dew Point of 36°F (2.2°C). If people are dressed in light weight summer clothes then this comfort zone shifts 5°F (2.8°C) warmer.

☐ **Adaptive Comfort Model in ASHRAE Standard 55-2010**

In naturally ventilated spaces where occupants can open and close windows, their thermal response will depend in part on the outdoor climate, and may have a wider comfort range than in buildings with centralized HVAC systems. This model assumes occupants adapt their clothing to thermal conditions, and are sedentary (1.0 to 1.3 met). There must be no mechanical Cooling System, but this method does not apply if a Mechanical Heating System is in operation.

รูปที่ 2-8 การเลือกเกณฑ์มาตรฐานสภาวะสบายที่จะใช้

(7) จากนั้นอาจจะปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้ เช่น ค่าความเป็นฉนวนของเสื้อผ้า หรือ กิจกรรม ใน ส่วนของสภาวะสบาย และค่าอื่น ๆ หรือ ใช้ค่า Default ตามโปรแกรม

CRITERIA: (Metric Units)	LOCATION: BANGKOK, -, THA Latitude/Longitude: 13.92° North, 100.6° East, Time Zone from Greenwich 7 Data Source: IVEC Data 484560 WMO Station Number, Elevation 12 m
---------------------------------	---

ASHRAE Standard 55, current Handbook of Fundamentals Comfort Model (select Help for definitions)

1. COMFORT: (using ASHRAE Standard 55) 1.0 Winter Clothing Indoors (1.0 Clo=long pants,sweater) 0.5 Summer Clothing Indoors (.5 Clo=shorts,light top) 1.1 Activity Level Daytime (1.1 Met=sitting,reading) 90.0 Predicted Percent of People Satisfied (100 - PPD) 20.3 Comfort Lowest Winter Temp calculated by PMV model(ET* C) 24.3 Comfort Highest Winter Temp calculated by PMV model(ET* C) 26.7 Comfort Highest Summer Temp calculated by PMV model(ET* C) 84.6 Maximum Humidity calculated by PMV model (%) 2. SUN SHADING ZONE: (Defaults to Comfort Low) 23.8 Min. Dry Bulb Temperature when Need for Shading Begins (°C) 315.5 Min. Global Horiz. Radiation when Need for Shading Begins (Wh/sq.m) 3. HIGH THERMAL MASS ZONE: 8.3 Max. Outdoor Temperature Difference above Comfort High (°C) 1.7 Min. Nighttime Temperature Difference below Comfort High (°C) 4. HIGH THERMAL MASS WITH NIGHT FLUSHING ZONE: 16.7 Max. Outdoor Temperature Difference above Comfort High (°C) 1.7 Min. Nighttime Temperature Difference below Comfort High (°C) 5. DIRECT EVAPORATIVE COOLING ZONE: (Defined by Comfort Zone) 20.0 Max. Wet Bulb set by Max. Comfort Zone Wet Bulb (°C) 6.6 Min. Wet Bulb set by Min. Comfort Zone Wet Bulb (°C) 6. TWO-STAGE EVAPORATIVE COOLING ZONE: 50.0 % Efficiency of Indirect Stage	7. NATURAL VENTILATION COOLING ZONE: 2.0 Terrain Category to modify Wind Speed (2=suburban) 0.2 Min. Indoor Velocity to Effect Indoor Comfort (m/s) 1.5 Max. Comfortable Velocity (per ASHRAE Std. 55) (m/s) 8. FAN-FORCED VENTILATION COOLING ZONE: 0.8 Max. Mechanical Ventilation Velocity (m/s) 3.0 Max. Perceived Temperature Reduction (°C) (Min Vel, Max RH, Max WB match Natural Ventilation) 9. INTERNAL HEAT GAIN ZONE (lights, people, equipment): 12.8 Balance Point Temperature below which Heating is Needed (°C) 10. PASSIVE SOLAR DIRECT GAIN LOW MASS ZONE: 157.7 Min. South Window Radiation for 5.56°C Temperature Rise (Wh/sq.m) 3.0 Thermal Time Lag for Low Mass Buildings (hours) 11. PASSIVE SOLAR DIRECT GAIN HIGH MASS ZONE: 157.7 Min. South Window Radiation for 5.56°C Temperature Rise (Wh/sq.m) 12.0 Thermal Time Lag for High Mass Buildings (hours) 12. WIND PROTECTION OF OUTDOOR SPACES: 8.5 Velocity above which Wind Protection is Desirable (m/s) 11.1 Dry Bulb Temperature Above or Below Comfort Zone (°C) 13. HUMIDIFICATION ZONE: (defined by and below Comfort Zone) 14. DEHUMIDIFICATION ZONE: (defined by and above Comfort Zone)
--	---

รูปที่ 2-9 ปรับเงื่อนไขเกี่ยวกับสภาวะสบายและค่าอื่น ๆ หรือ ใช้ค่า Default

(8) จากนั้นสามารถดูการแสดงผลวิเคราะห์ทั้งหมด โดยกด NEXT หรือเลือกคำสั่งภายใต้แถบ Charts

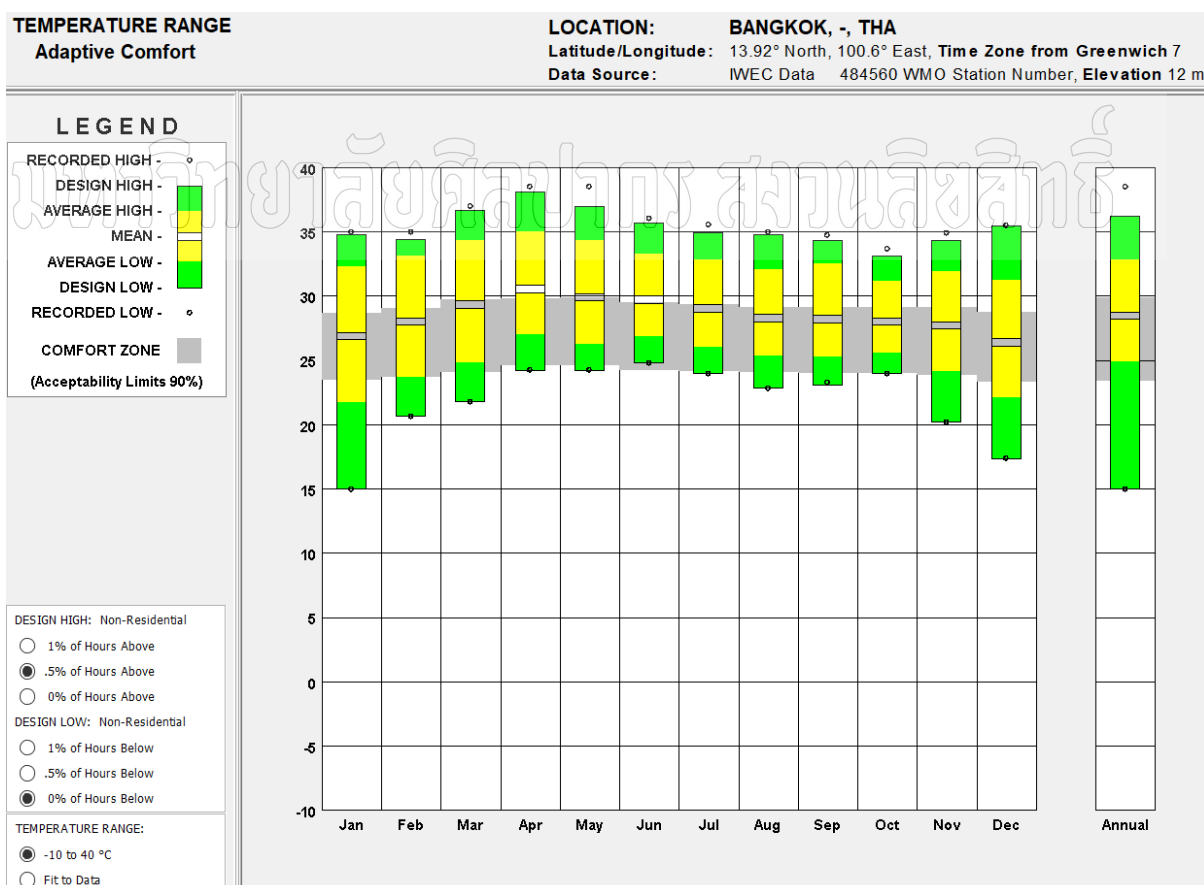
ตัวอย่าง การวิเคราะห์ภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร

อุณหภูมิอากาศ

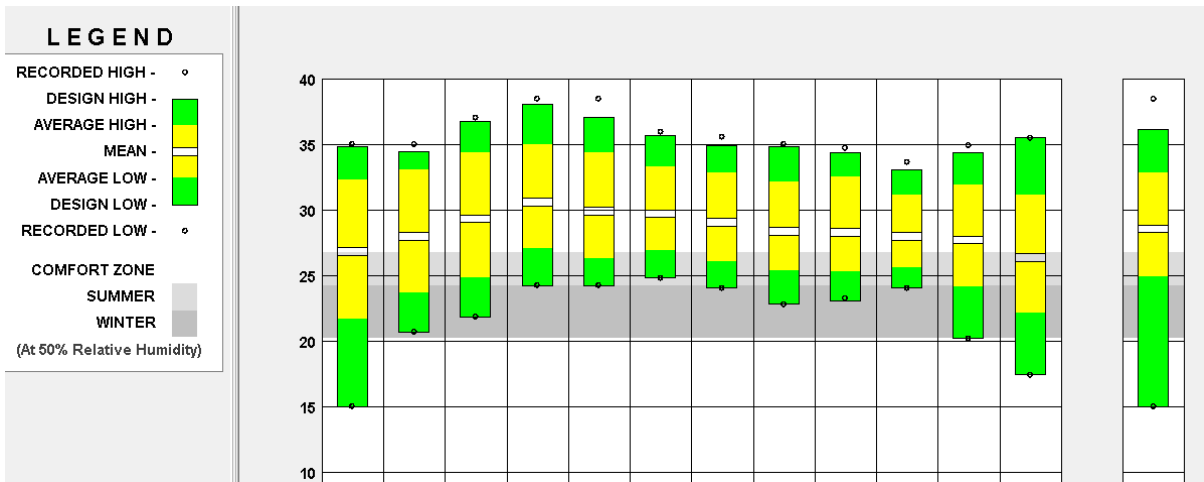
จากข้อมูลภูมิอากาศตลอดทั้งปี โปรแกรมจะแสดงค่าอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยเวลากลางวัน และอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยเวลากลางคืน อุณหภูมิเฉลี่ยของทั้งกลางวันและกลางคืน

การเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศกับขอบเขตสภาวะสบาย (Comfort Zone) ไม่ควรนำอุณหภูมิเวลากลางวันและกลางคืนมาเฉลี่ยกัน เพราะอาจจะทำให้เข้าใจผิดว่า พื้นที่นั้นมีอุณหภูมิที่อยู่ในสภาวะสบาย แต่ความจริงแล้วอาจจะมีอุณหภูมิที่ทั้งร้อนและหนาวเกินไปจากขอบเขตสภาวะสบาย ดังนั้น ควรใช้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดและเฉลี่ยต่ำสุด มาเปรียบเทียบกับขอบเขตสภาวะสบาย

ให้สังเกตว่า แถบสภาวะสบายของแบบ Adaptive Thermal Comfort จะขึ้นลง สัมพันธ์กับอากาศภายนอก ซึ่งแตกต่างจาก Thermal Comfort Zone ของสภาวะปรับอากาศ ซึ่งคงที่ แต่แบ่งเป็น 2 แถบ คือ ฤดูหนาว สำหรับการแต่งกายด้วยเสื้อผ้าหนา และฤดูร้อนใส่เสื้อผ้าบาง

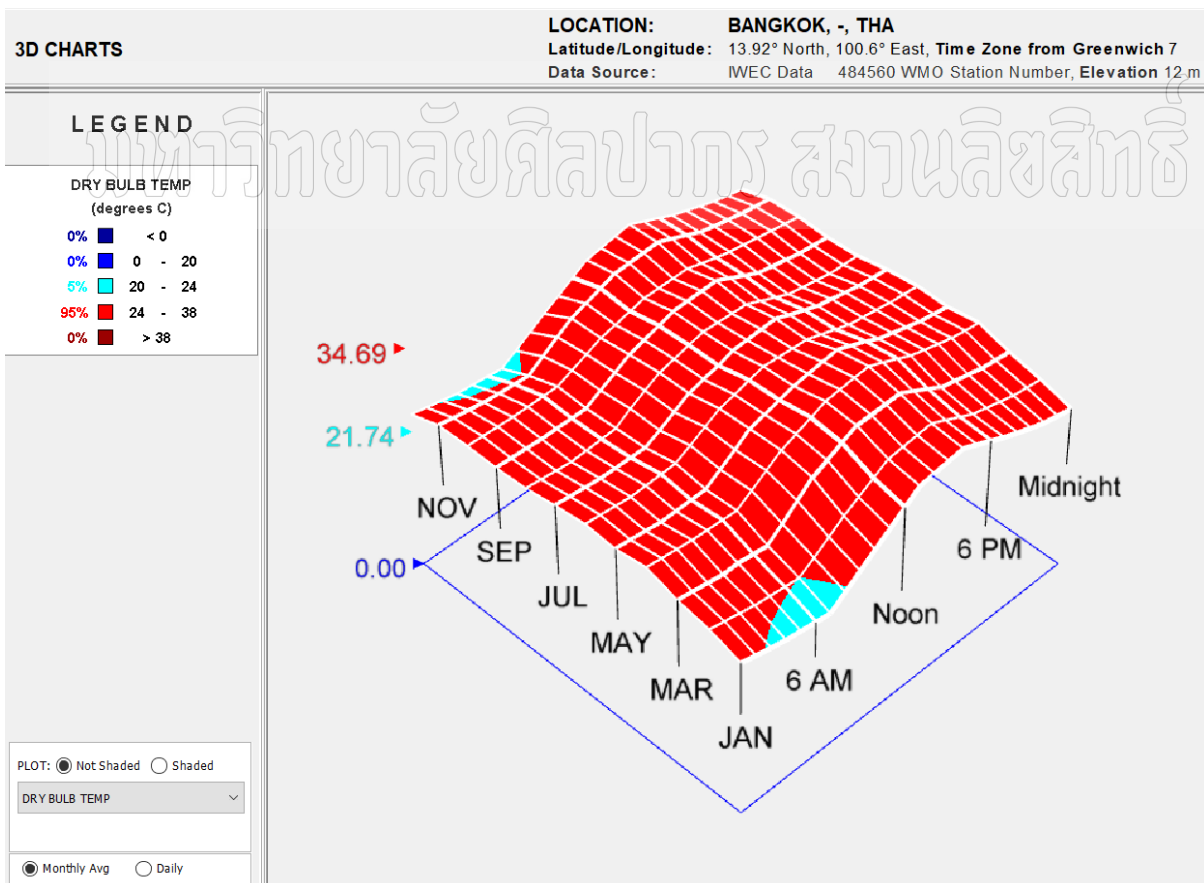


รูปที่ 2-10 อุณหภูมิอากาศ เปรียบเทียบกับ Adaptive Comfort Zone (แถบสีเทา)



รูปที่ 2-11 อุณหภูมิอากาศเปรียบเทียบกับสภาวะสบายในสภาพปรับอากาศซึ่งแบ่งเป็นฤดูร้อนและฤดูหนาว

นอกจากยังสามารถวิเคราะห์อุณหภูมิทั้งปีเป็นภาพ 3 มิติ แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยรายชั่วโมง รายเดือน ซึ่งมีค่ามีอุณหภูมิรายชั่วโมงสูงสุด และต่ำสุด อยู่ในช่วง 21.74 - 34.69 °C

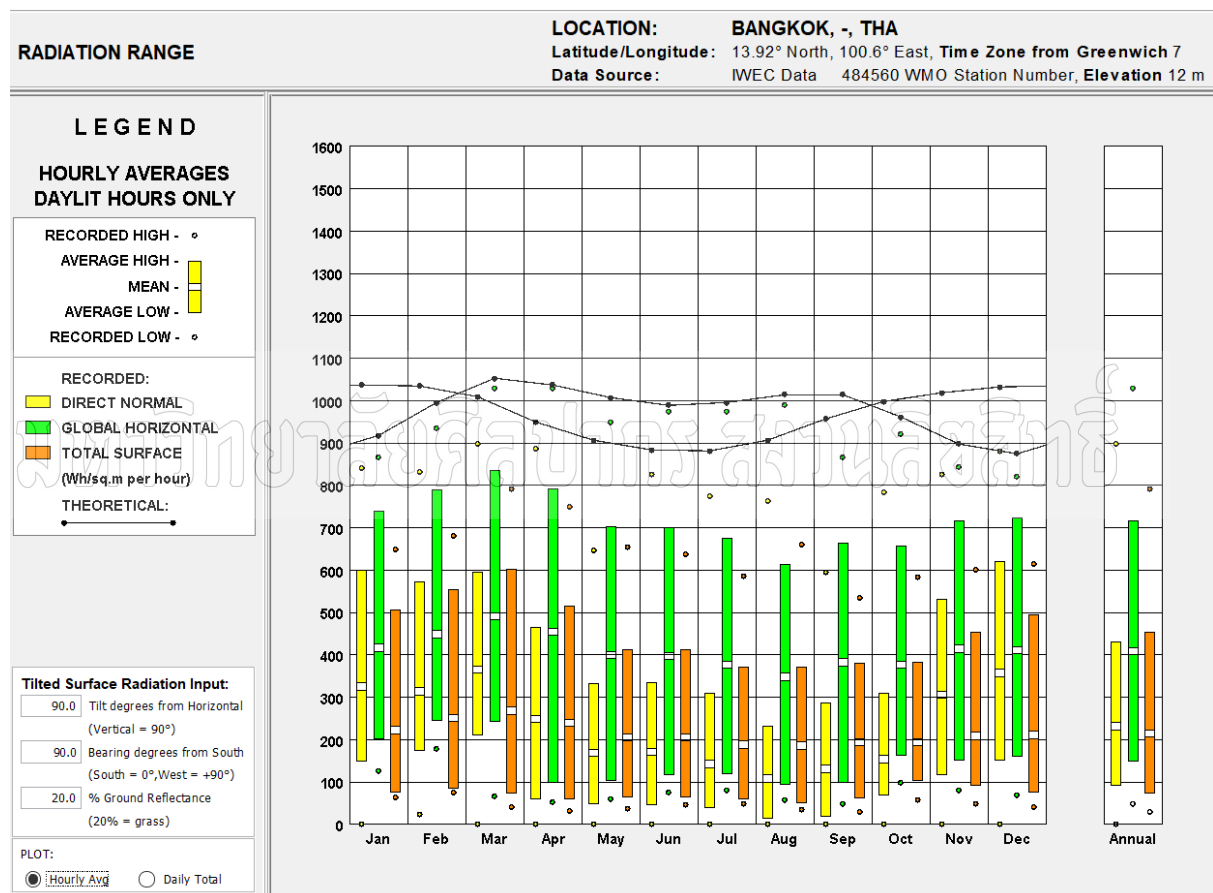


รูปที่ 2-12 อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยในรอบ 1 วัน ของแต่ละเดือน

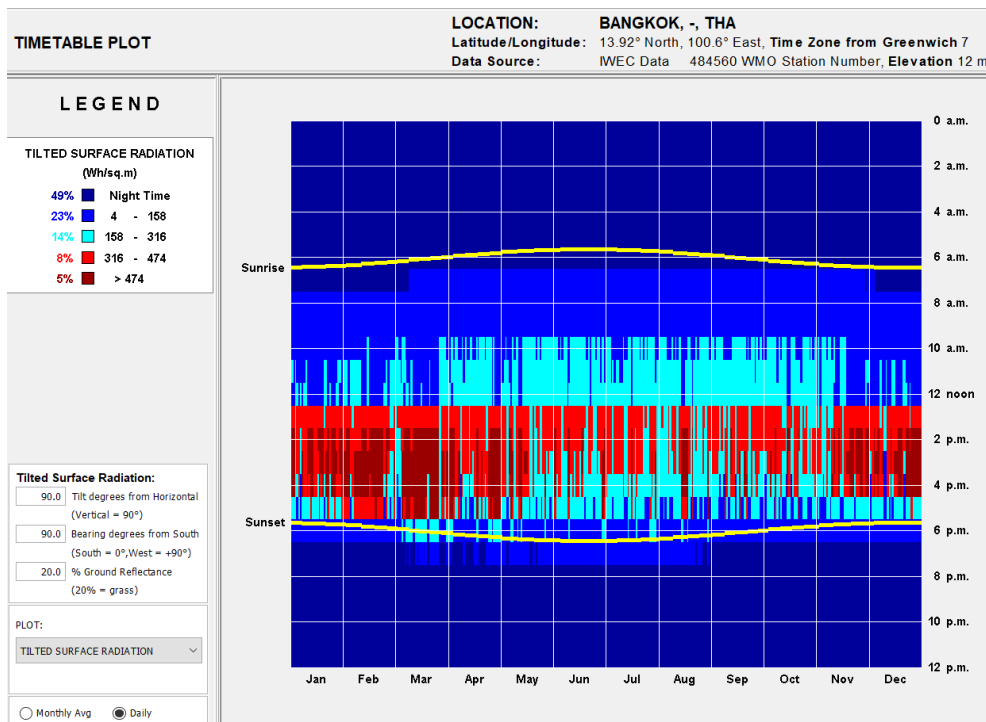
ปริมาณรังสีอาทิตย์

โปรแกรมสามารถแสดงผลแบ่งเป็น รังสีรวมบนพื้นราบ (Global Horizontal) รังสีตรง (Direct Normal) และรังสีที่ตกบนพื้นผิวที่พิจารณา (Total Surface) W/m^2 โดยแสดงผลเป็น W/m^2 หรือ Wh/m^2 ในหนึ่งวัน และยังสามารถกำหนดมุมลาดเอียง (Tilt) และทิศได้ เช่น ต้องการทราบรังสีอาทิตย์ที่ตกบนหลังคา มุมเอียงต่าง ๆ หรือ บนผนังที่ต้องการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 2-13 และ รูปที่ 2-14 แสดงการวิเคราะห์รังสีอาทิตย์บนผนังทิศตะวันตกเหมือนกัน แต่อาจจะเห็นว่ารูปที่ 14 สามารถแสดงข้อมูลรังสีอาทิตย์บนผนังได้ชัดเจน เป็นช่วงเวลาในแต่ละเดือน แต่รูปที่ 2-13 ก็สามารถแสดงค่ารังสีอาทิตย์สูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ย บนผนัง และเปรียบเทียบกับรังสีอาทิตย์บนพื้นราบหรือ ดาดฟ้า ซึ่งทำให้การวิเคราะห์ได้หลากหลายมิติมากขึ้น



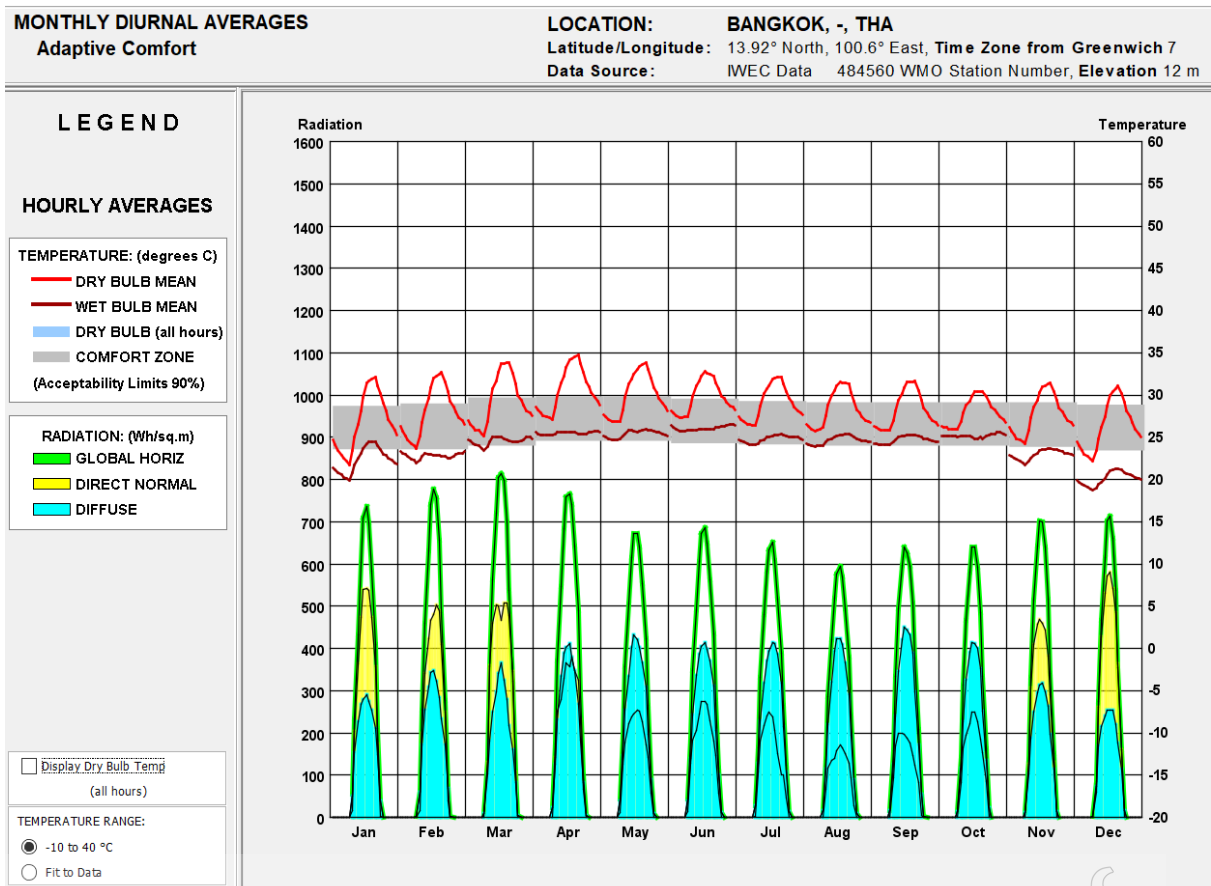
รูปที่ 2-13 การวิเคราะห์รังสีอาทิตย์บนผนังทิศตะวันตกแบบกราฟแท่ง



รูปที่ 2-14 การวิเคราะห์รังสีอาทิตย์บนผนังทิศตะวันตกแบบตารางเวลา

การเปลี่ยนแปลงในช่วงกลางวัน-กลางคืน

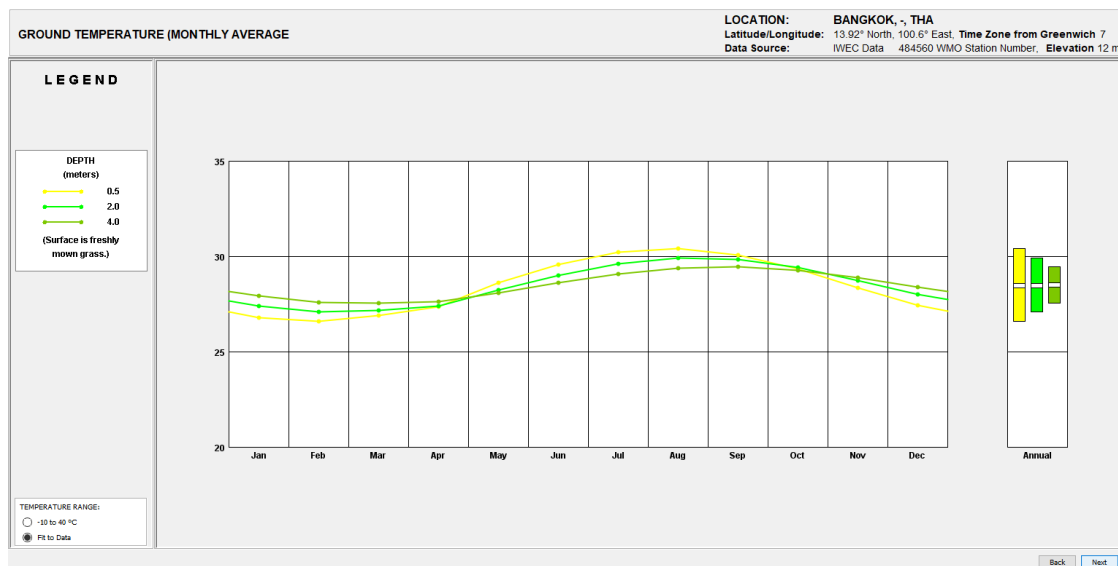
โปรแกรมสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่างกลางวัน-กลางคืน และรังสีอาทิตย์ โดยเปรียบเทียบรังสีรวม รังสีตรง และรังสีกระจาย (รูปที่ 2-15) ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงฤดูฝน ท้องฟ้ามีเมฆมาก การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศในระหว่างวันจะน้อยกว่าในฤดูหนาว และในฤดูฝนรังสีกระจายจะมีสัดส่วนมากกว่ารังสีตรง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศและรังสีอาทิตย์มีผลโดยตรงต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคาร เช่น การใช้มวลสารเพื่อหน่วงเวลา และลักษณะของรังสีอาทิตย์ที่มีส่วนของรังสีกระจายมาก หรือ น้อย ก็สามารถใช้ประโยชน์ในการเลือกประเภทของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำงานได้ดีต่างกันในสภาพท้องฟ้าโปร่ง หรือ มีเมฆแตกต่างกัน และใช้ในการศึกษาเรื่องแสงธรรมชาติ



รูปที่ 2-15 การวิเคราะห์อุณหภูมิอากาศระหว่างวันกับขอบเขตสภาวะสบาย (แถบสีเทา) และรังสีอาทิตย์พร้อมกัน

อุณหภูมิดิน

อุณหภูมิดินสามารถนำมาใช้พิจารณาการแลกเปลี่ยนความร้อนกับดิน เช่น การทำท่อฝังดินให้อากาศผ่านก่อนที่จะเข้าสู่อาคาร โดยเป็นข้อมูลที่ความลึก 0.5, 2.0, 4.0 ม. ให้สังเกตเห็นว่าอุณหภูมิดินที่ยิ่งลึกลงไป อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดจะยิ่งเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยน้อย และอุณหภูมิดินสูงสุด จะเกิดห่างจากอุณหภูมิอากาศ และรังสีอาทิตย์ที่มีค่าสูงสุดในเดือนเมษายน ไปประมาณ 4 เดือน ซึ่งเป็นผลของการหน่วงเวลา (Time Lag) ของมวลสารดิน หรือ ผิวดิน



รูปที่ 2-16 อุณหภูมิดินในรอบปี

ทิศทางลม

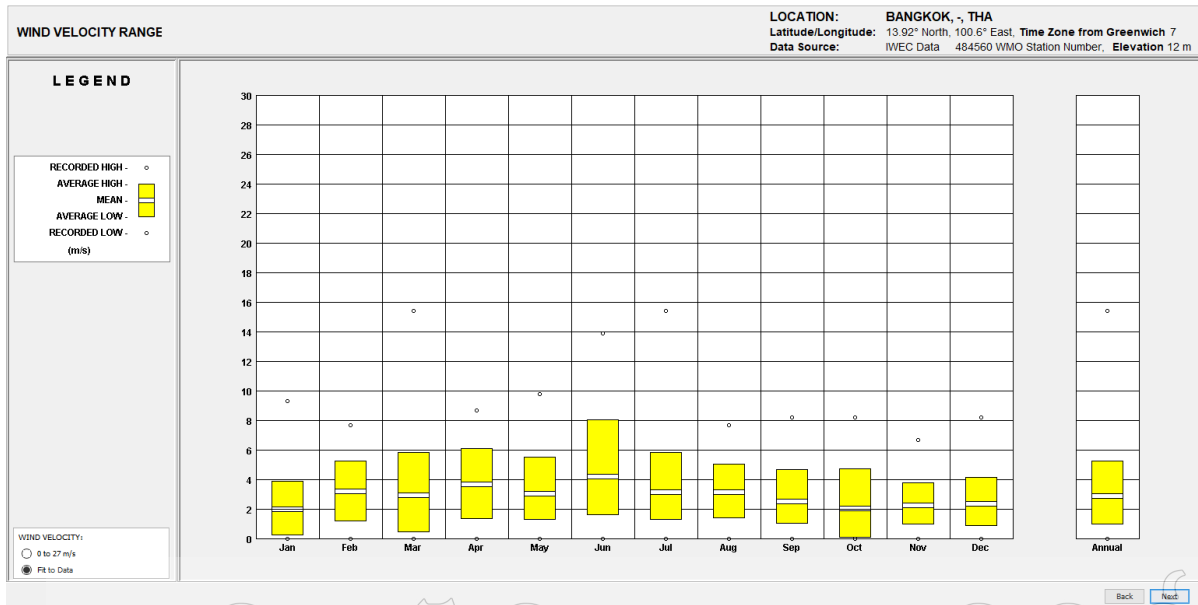
การวิเคราะห์ทิศทางลมของโปรแกรม Climate Consultant มีข้อดีกว่าผังลมทั่วไป คือ สามารถแสดงทั้งทิศทาง ความเร็ว ความถี่ของลม อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ในภาพเดียวกัน และยังสามารถกำหนดให้การแสดงผลเป็น เดือน วัน และชั่วโมง ที่ต้องการ และเป็นภาพเคลื่อนไหว

ข้อมูลลมใช้ในการหาความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดสภาวะสบาย หรือ ใช้ในกังหันลมขนาดเล็กติดตั้งอาคารเพื่อผลิตไฟฟ้า จากภาพจะเห็นว่า ลมส่วนใหญ่มีอุณหภูมิในช่วง 27-38 °C ลมที่มีอุณหภูมิสูงกว่าผิวกาย หรือ สูงกว่า 32 °C จะทำให้รู้สึกร้อนไม่สบาย และเป็นลมที่มีความเร็วต่ำ และไม่ค่อยสม่ำเสมอที่ใช้ประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้า กังหันลมจะเริ่มทำงานที่ความเร็วระหว่าง 2.5-5 m/s (ณัฐพงษ์ ประพฤติ, 2558)

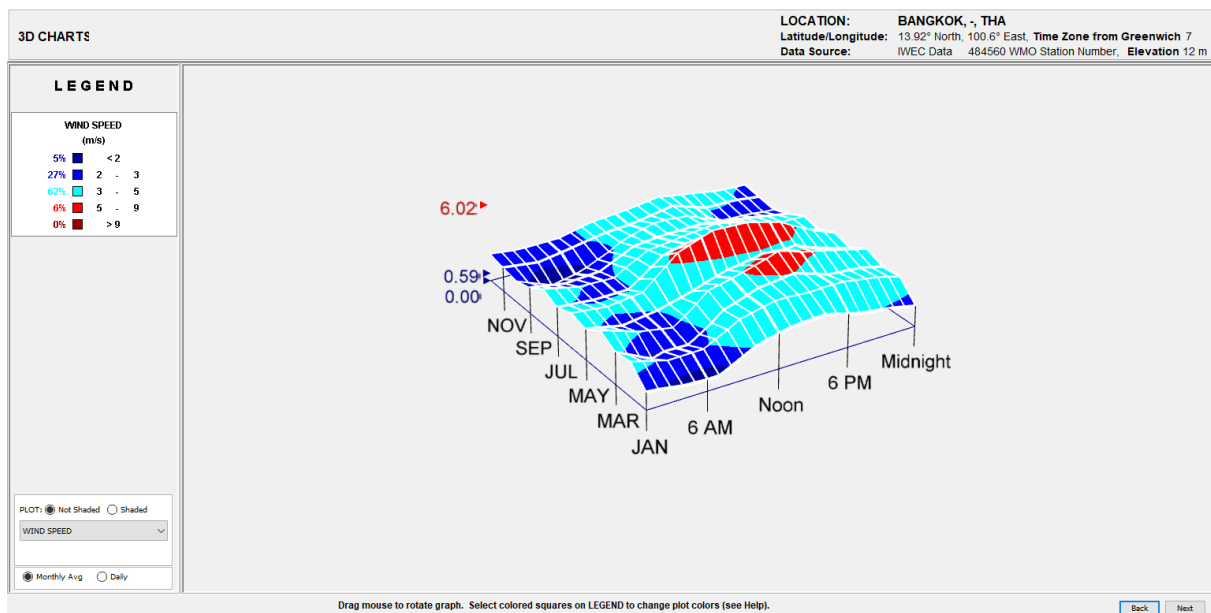
จากภาพจะเห็นว่า มีลมมาจากรอบทิศทาง แต่ทิศใต้และทิศเหนือจะมีความถี่มากกว่าทิศอื่น โดยลมทางทิศเหนือจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าทิศอื่น ๆ (สีฟ้า)

ความเร็วลม

การวิเคราะห์ความเร็วลม สามารถกำหนดให้แสดงผลความเร็วสูงสุด เฉลี่ย และต่ำสุด เป็นรายเดือน หรือแสดงผลแยกตามเวลาในรอบวันได้ เป็นกราฟ 3 มิติ ทำให้เห็นได้ชัดเจนว่าความเร็วลมในช่วงกลางคืนจะต่ำกว่าเวลากลางวัน และบางเดือนน้อยกว่า 2 m/s ซึ่งอาจจะไม่สูงมากพอที่จะทำให้เกิดความสบายได้ในบางเวลา เพราะเมื่อลมเข้าสู่อาคารความเร็วจะลดลงไปอีก



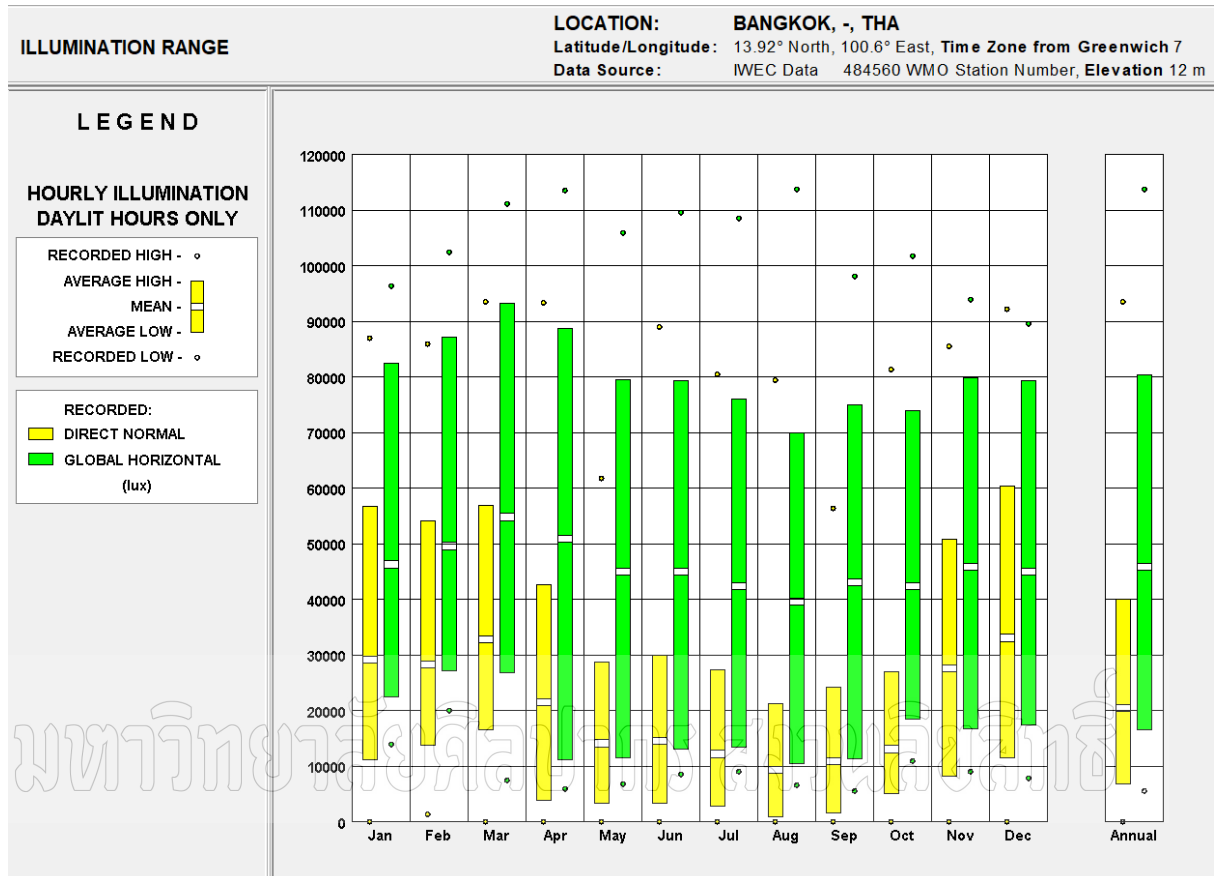
รูปที่ 2-19 ความเร็วลมรายเดือน ค่าต่ำสุดเฉลี่ย ค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุดเฉลี่ย



รูปที่ 2-20 ภาพรวมของความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลาตลอดทั้งปี

แสงสว่างภายนอกอาคาร

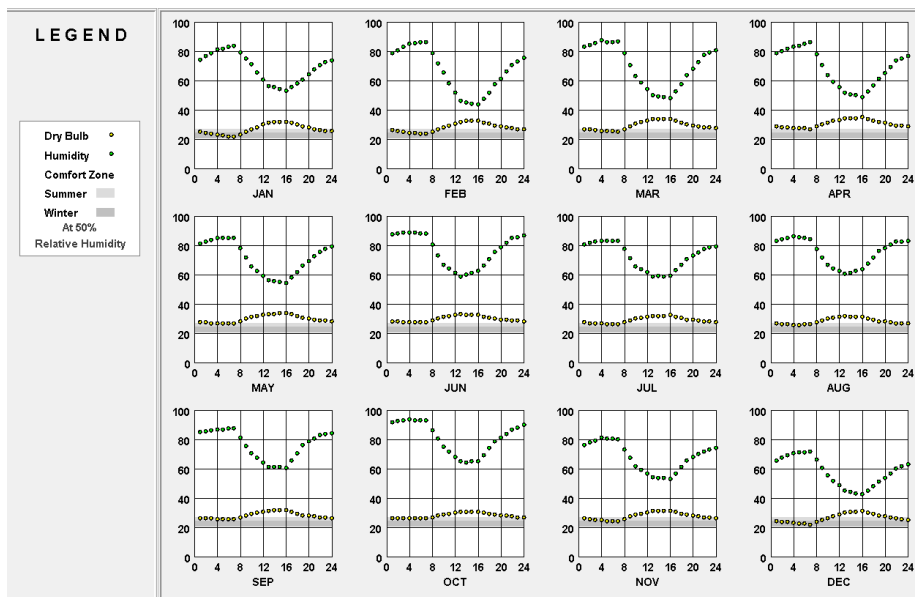
แสงสว่างภายนอกอาคาร หน่วยเป็น ลักซ์ (Lux) ใช้สำหรับการออกแบบที่ต้องการใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติ เพราะความสว่างภายในอาคารจะสัมพันธ์โดยตรงกับความสว่างภายนอก



รูปที่ 2-21 แสงสว่างภายนอกอาคาร

ความชื้นสัมพัทธ์

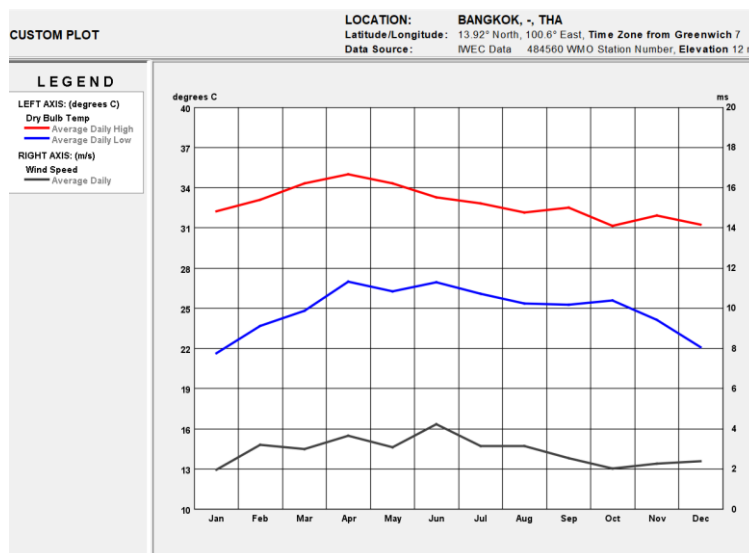
ความชื้นสัมพัทธ์ มักจะนำมาวิเคราะห์ร่วมกับอุณหภูมิอากาศ โดยถ้าอุณหภูมิอากาศสูงขึ้นความชื้นสัมพัทธ์จะต่ำลง ทั้งนี้ เพราะอากาศร้อนสามารถรับปริมาณไอน้ำไว้ในตัวได้มากกว่าอากาศเย็น



รูปที่ 2-22 ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศ

การสร้างกราฟจากตัวแปรที่ต้องการ

การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มีข้อดี คือ สามารถเลือกตัวแปรที่สนใจมาสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบได้ เช่น อุณหภูมิอากาศสูงสุด-ต่ำสุด และความเร็วลม ทำให้มิติในการวิเคราะห์มีความลึกและรอบคอบยิ่งขึ้น เช่น ในกรณีนี้จะเห็นว่าในเดือนเมษายนสูง ลมมีความเร็วค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับเดือนอื่น ๆ แต่มีอุณหภูมิสูง เป็นลมร้อนไม่สามารถทำให้เกิดความสบายได้ จึงควรหาวิธีปรับสภาพอากาศให้เย็นลง เช่น การให้ลมพัดผ่านผิวน้ำ ผิวหญ้า ต้นไม้ใหญ่ เพื่อให้การระเหยของน้ำดึงความร้อนจากอากาศ ทำให้อุณหภูมิลดลง เป็นต้น

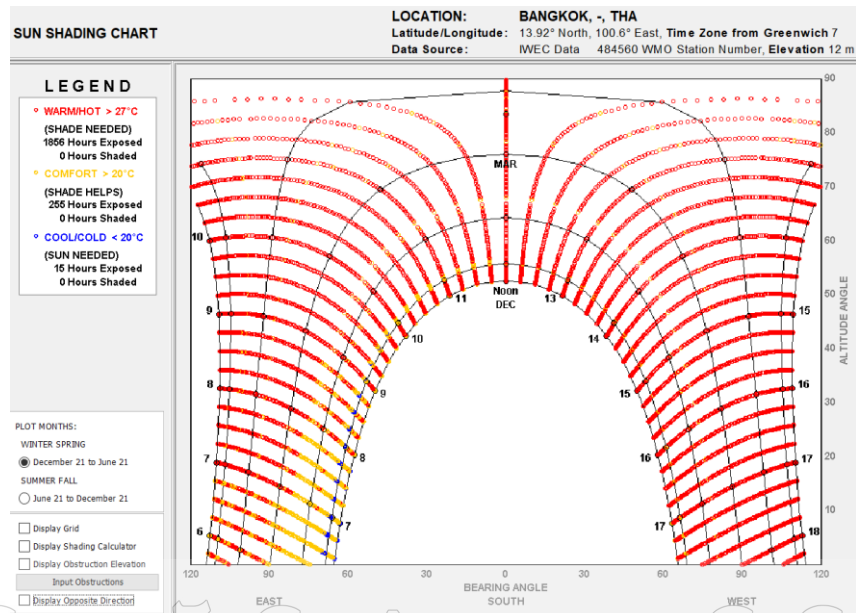


รูปที่ 2-23 การสร้างกราฟจากตัวแปรที่ต้องการ

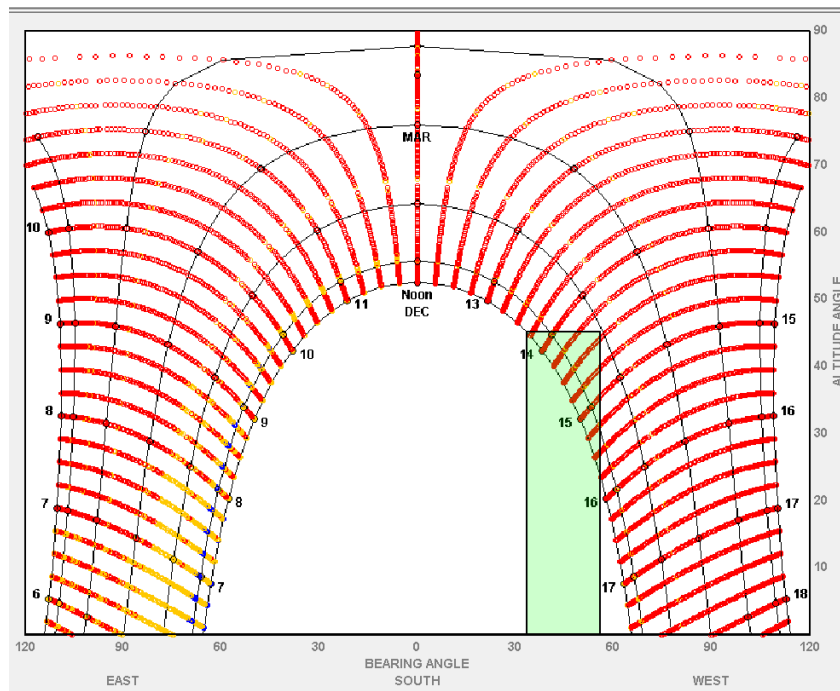
คือ อุณหภูมิอากาศสูงสุด (เส้นสีแดง) - ต่ำสุด (เส้นสีน้ำเงิน) (อ่านค่าที่แกนด้านซ้าย) และความเร็วลม (เส้นสีดำ) (อ่านค่าที่แกนด้านขวา)

ตำแหน่งการโคจรของดวงอาทิตย์ (Sun Path Diagram)

โปรแกรมสามารถแสดงตำแหน่งดวงอาทิตย์ในแต่ละชั่วโมงของเดือนต่าง ๆ พร้อมกับแสดงอุณหภูมิอากาศในเวลานั้นด้วยสี ว่าเป็นอากาศร้อน (สีแดง) กำลังอยู่ในสภาวะสบาย (สีเหลือง) หรือ เย็น (สีน้ำเงิน) นอกจากนี้ ยังสามารถหาระยะยื่นของแผงบังแดด ที่สามารถบังแดดให้หน้าต่างได้พอดี ในช่วงเวลาที่ต้องการ รวมทั้งหาตำแหน่งที่จะปลูกต้นไม้เพื่อช่วยบังแดด หรือ การบังแดดให้ตัวอาคารที่เกิดจากอาคารข้างเคียง



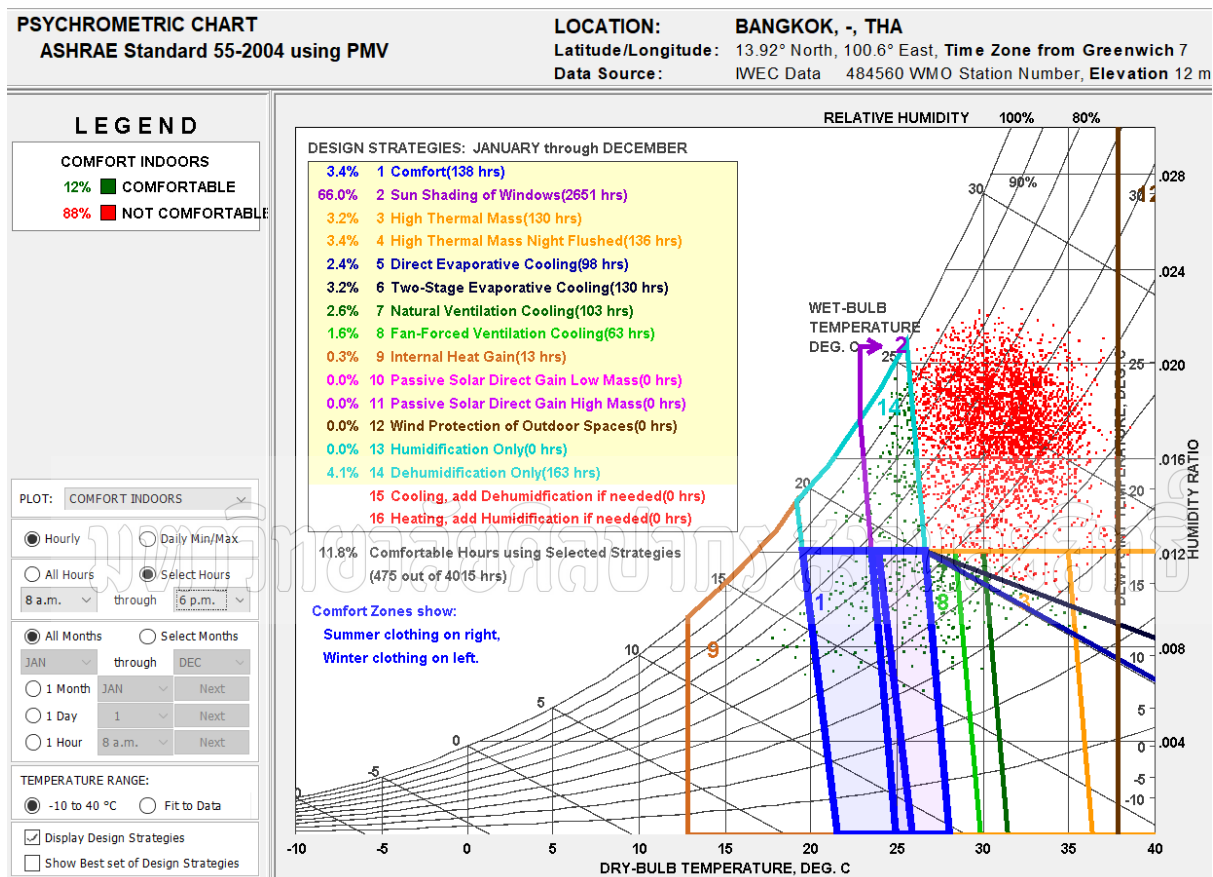
รูปที่ 2-24 ผังการโคจรของดวงอาทิตย์และเวลาที่เกิดการบังแดดจากจากอาคารอื่น



รูปที่ 2-25 การปลูกต้นไม้ 1 ต้นที่สูง 5 ม. และห่างจากตัวอาคาร 5 ม. จะบังแดดได้ช่วง 14.00 -16.00 น.

การวิเคราะห์แนวทางในการออกแบบ

โปรแกรม Climate Consultant สามารถนำข้อมูลอุณหภูมิและความชื้น มาแสดงใน Psychrometric Chart และเปรียบเทียบกับขอบเขตสภาวะสบาย (ขอบสีน้ำเงิน) ตามมาตรฐาน ASHRAE 55 โดยสามารถเลือกข้อมูลตลอดทั้งปี หรือ บางช่วงเวลาที่ต้องการได้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2-26 เป็นอุณหภูมิอากาศตั้งแต่ 8.00-18.00 น. ของทุกเดือน ซึ่งพบว่า ถ้าหากไม่มีการปรับอากาศ จะมีเพียง 12% ของเวลาที่อยู่ในสภาวะสบาย โดยกลยุทธ์ในการออกแบบที่แนะนำ สำหรับ Passive Design ที่ได้ผลมากที่สุด คือ ใช้การบังแดด (Shading)

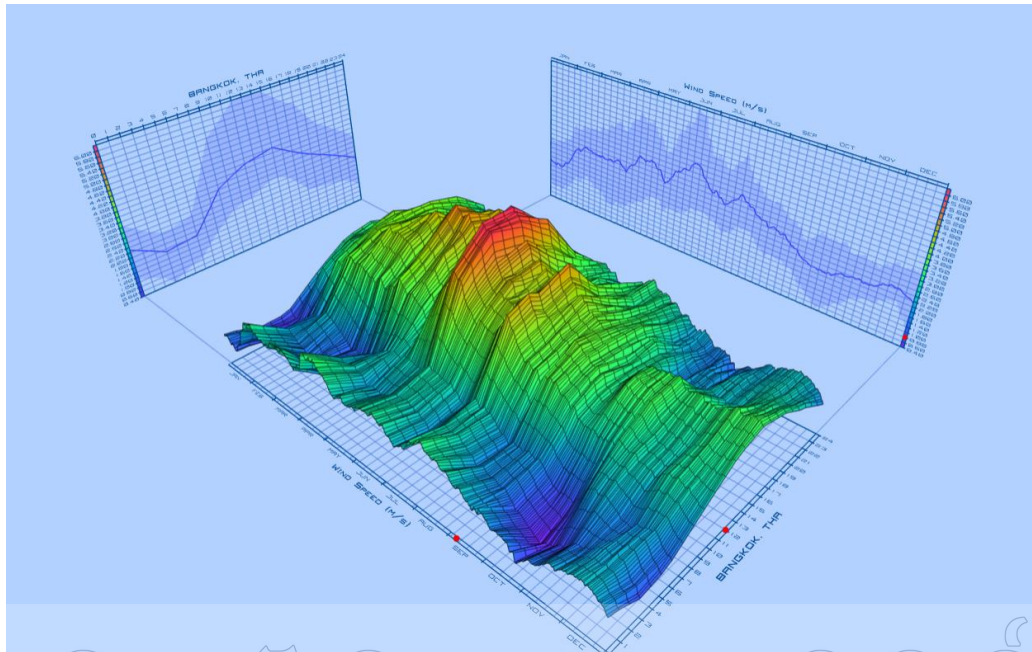


รูปที่ 2-26 การวิเคราะห์อุณหภูมิอากาศระหว่าง 08.00-18.00 น. ตลอดปี

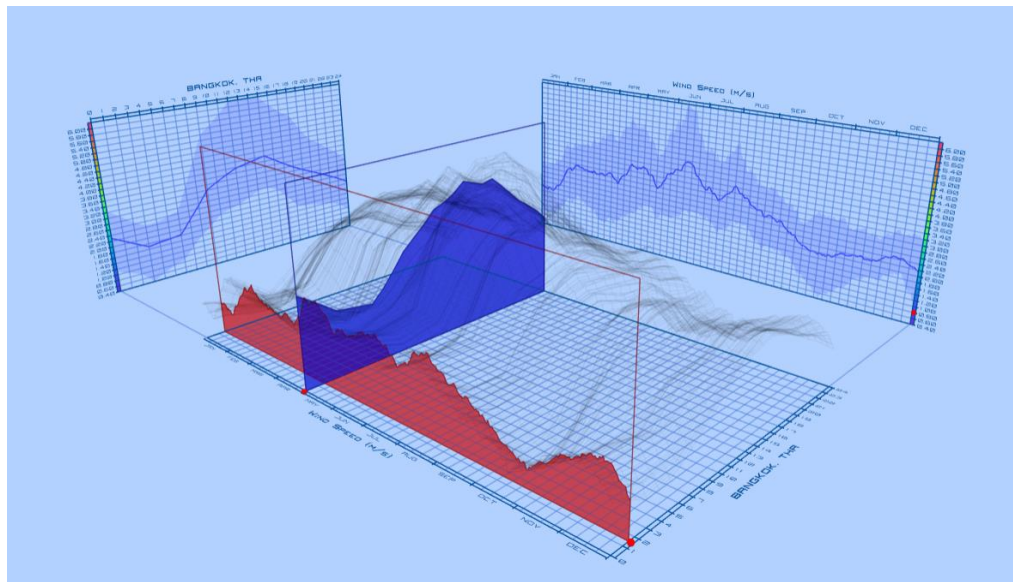
2.4 การใช้ Web Application

ในปัจจุบันนอกจากการใช้โปรแกรม Climate Consultant ซึ่งต้องดาวน์โหลดมาใช้ ยังมีการพัฒนา Web Application ที่สามารถวิเคราะห์ไฟล์ข้อมูลสถิติภูมิอากาศ .epw ได้ฟรี เช่น Weather Data จาก Website ของ <http://andrewmarsh.com> ซึ่งเคยเป็นผู้พัฒนาโปรแกรม ECOTECT สำหรับ Web Application - Weather Data จะสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลในบางเรื่องได้ดีกว่า โปรแกรม Climate Consultant ดังในรูปที่ 2-27 เป็นการวิเคราะห์ความเร็วลมตลอดปี โดยการใช้ไฟล์เดียวกับในโปรแกรม Climate Consultant โดย Weather Data สามารถกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์ได้มากกว่า เช่น ให้ความเร็วลมรายชั่วโมงของทุกวัน จำนวน 8,760 ชั่วโมงในรูปแบบเดียวกัน (เปรียบเทียบกับรูปที่ 2-20)

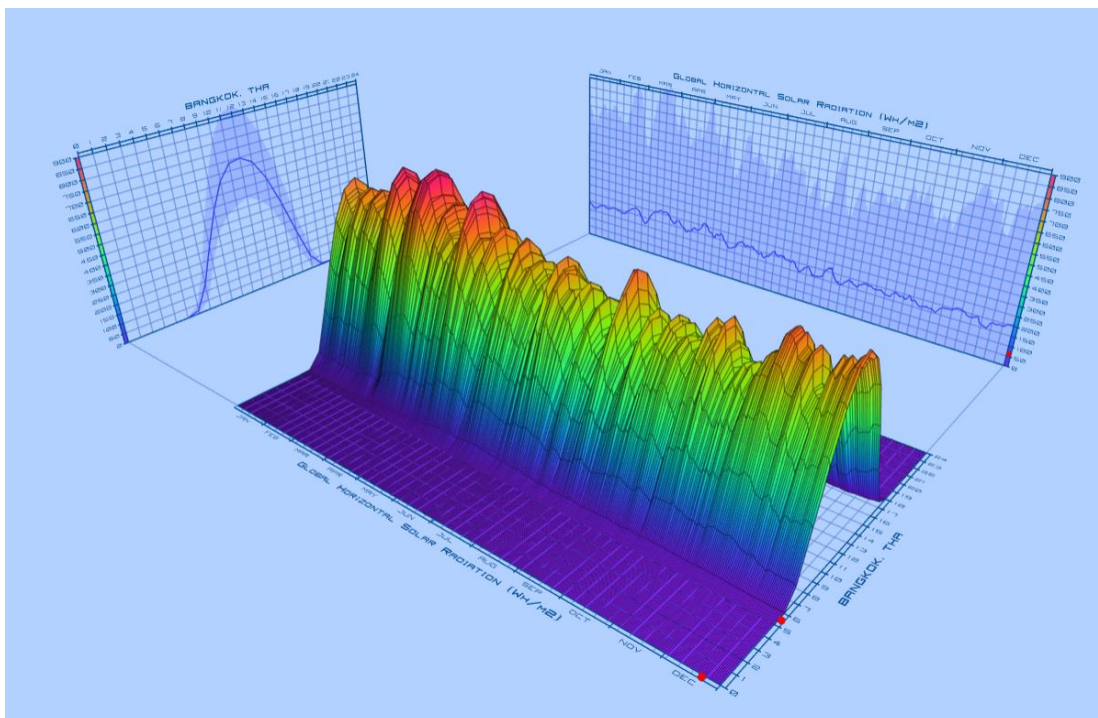
หรือ จะให้แสดงผลที่หายากกว่า เป็นข้อมูลเฉลี่ยของทุก 7 วัน เป็นต้น นอกจากนี้ ยังสามารถตัด Section ข้อมูลได้ทั้งตามยาวและตามขวาง ดังรูปที่ 2-28 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ความเร็วลมในเวลากลางคืนส่วนใหญ่จะต่ำกว่ากลางวัน ดังนั้น การนำข้อมูลความเร็วลมในเวลากลางวันมาใช้ในการออกแบบอาคารที่ใช้งานกลางคืนเป็นหลักอาจไม่เหมาะสม เป็นต้น



รูปที่ 2-27 การวิเคราะห์ความเร็วลมรายชั่วโมงตลอดปี โดยเว็บไซต์ <http://andrewmarsh.com/software/>



รูปที่ 2-28 รูปตัดข้อมูลความเร็วลมในรอบ 24 ชั่วโมง (สีน้ำเงิน) ของวันที่กำหนด และรูปตัดความเร็วลมในรอบ 12 เดือน (สีแดง) ของเวลาที่กำหนด คือ 01:00 น.



รูปที่ 2-29 การวิเคราะห์ปริมาณรังสีอาทิตย์ (Global Radiation) ผ่าน Web Application

2.5 การพิจารณาสภาพภูมิอากาศโดยใช้ Degree Days

Degree Days เป็นการแสดงข้อมูลภูมิอากาศในระดับเมือง โดยเชื่อมโยงข้อมูลอุณหภูมิอากาศภายนอกที่มีผลต่อการใช้พลังงานในอาคาร แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

Heating Degree Days (HDDs) คือ การหาจำนวน องศา (Degree) และจำนวนวัน (Days) ของอุณหภูมิอากาศภายนอกที่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่กำหนดให้เป็นค่าฐาน (Base Temperature) หรือ จุดที่สมดุล (Balance Point) หมายถึง ถ้าอากาศที่อุณหภูมิที่จุดนี้ ก็ไม่จำเป็นต้องทำความร้อนให้กับอาคาร เพราะอุณหภูมิภายในอาคารกำลังพอดี Heating Degree Days จึงใช้ในการบอกความรุนแรงของสภาพอากาศ ซึ่งทำให้ต้องการใช้พลังงานเพื่อทำความร้อนให้กับอาคาร

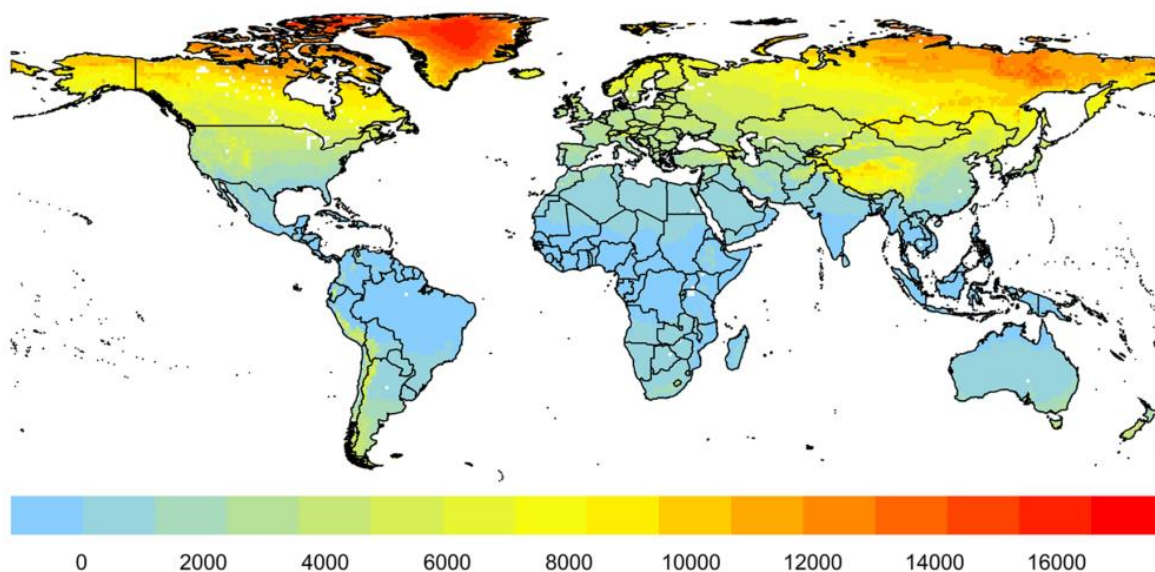
ค่าอุณหภูมิฐานของ HDDs สำหรับในประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้ค่าที่ 18.3 °C (65 °F) แต่ค่านี้อาจแตกต่างกันได้ในแต่ละประเทศ

การคำนวณ คือ การนำอุณหภูมิฐาน (Tbase) ลบด้วย อุณหภูมิเฉลี่ย (Ti) ของแต่ละวัน จากวันที่ 1 ถึง วันที่ 365 โดยอุณหภูมิเฉลี่ยสามารถคิดจากอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด

$$\text{HDDs} = \text{ผลรวมของ } (T_{\text{base}} - T_i)$$

$$T_i = (T_{\text{imax}} + T_{\text{imin}})/2$$

$$i = 1 \text{ ถึง } 365$$



รูปที่ 2-30 แผนที่ภูมิอากาศแสดงด้วย Heating Degree Days

(ที่มา: <http://www.energy-a.eu/cooling-degree-days-and-heating-degree-days/?cn-reloaded=1>)

Cooling Degree Days (CDDs) มีความหมายคล้ายกับ HDDs แต่เป็นการหาจำนวนองศา และจำนวนวัน ของอุณหภูมิอากาศภายนอกที่สูงกว่าค่าอุณหภูมิฐาน คือ ถ้าอุณหภูมิอากาศภายนอกเฉลี่ย (T_i) อยู่ต่ำกว่าค่าอุณหภูมิฐาน (T_{base}) จะหมายถึงว่า ไม่มีความจำเป็นต้องปรับอากาศ เพราะอาคารจะได้รับความร้อนจากส่วนต่าง ๆ ภายในอาคาร เช่น อุปกรณ์ไฟฟ้า คน และความร้อนจากรังสีอาทิตย์ ทำให้อุณหภูมิอากาศภายในอาคารกำลังพอดี ค่า CDDs จึงใช้แสดงความต้องการพลังงานในการปรับอากาศ สำหรับประเทศสหรัฐอเมริกา จะใช้ค่าอุณหภูมิฐานของ CDDs ที่ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($50\text{ }^{\circ}\text{F}$) ค่าอุณหภูมิฐานของ CDDs ก็สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

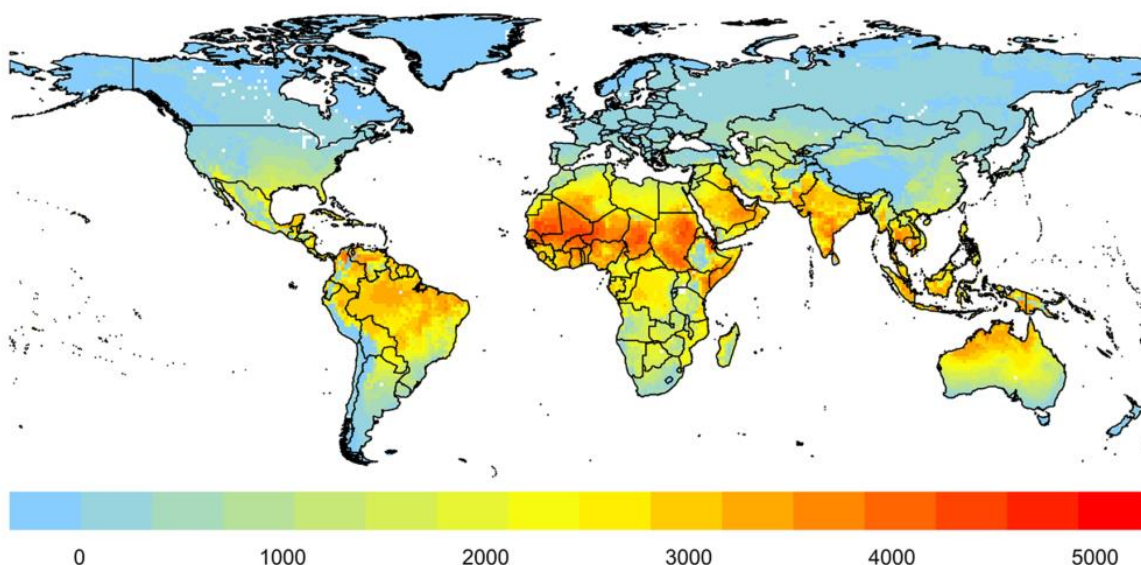
$$\text{CDDs} = \text{ผลรวมของ } (T_i - T_{base})$$

$$T_i = (T_{\text{imax}} + T_{\text{imin}})/2$$

$$i = 1 \text{ ถึง } 365$$

สำหรับการใช้ Cooling Degree Days เพื่อประเมินความต้องการในการทำความเย็น ค่าอุณหภูมิฐานมักใช้ที่ $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Szokolay, 1987)

$$\text{CDDs} = \text{ผลรวมของ } (T_i - 26) \text{ (จากวันที่ 1 ถึง 365)}$$



รูปที่ 2-31 ตัวอย่างการแสดงผลภูมิอากาศโดยใช้ Cooling Degree Days

(ที่มา: <http://www.energy-a.eu/cooling-degree-days-and-heating-degree-days/?cn-reloaded=1>)

นอกจากนี้ยังอาจพบการใช้ Degree Hours (DHs) ซึ่งคล้ายกับ Degree Days โดยเอาอุณหภูมิของแต่ละชั่วโมงที่แตกต่างจากค่าของอุณหภูมิฐานมาบวกกันจนครบชั่วโมงที่ 8,760 เป็น Cooling Degree Hours (CDHs) หรือ Heating Degree Hours (HDSs) ที่ต่างจากค่าอุณหภูมิฐานในรอบหนึ่งปี

ตัวอย่างการใช้ประโยชน์ของค่า Degree Days เช่น ถ้าสงสัยว่าหลังจากที่ได้ปรับปรุงอาคารโดยการใส่ฉนวนแล้วแต่ทำไมการใช้พลังงานของอาคารไม่ได้ลดลง อาจจะนำข้อมูล CDDs ของปีนี้และปีที่ผ่านมา มาเปรียบเทียบกัน ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่า เพราะจำนวน CDDs ในปีนี้สูงกว่าปีที่ผ่านมา หรือ อาจนำไปใช้เปรียบเทียบความรุนแรงของอากาศระหว่างพื้นที่ ว่าพื้นที่ใดน่าจะใช้พลังงานในการปรับอากาศมากกว่ากันได้โดยพิจารณาจากค่า CDDs

2.6 การแบ่งเขตภูมิอากาศโดย ASHRAE

ASHRAE (American Society of Heating, Air-Conditioning and Refrigerating Engineers) หรือสมาคมวิศวกรรมปรับอากาศ ของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้แบ่งเขตภูมิอากาศของประเทศต่าง ๆ ในโลก ตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 169-2013: Climatic Data for Building Design Standards ออกเป็น 9 โซนความร้อน (Thermal Zone) ด้วยค่า HDDs และ CDDs จากโซน 0 ถึง โซน 8 (เดิมมีโซน 1-8 มาแบ่งเพิ่มโซน 0 ภายหลัง) และมีการแบ่งแต่ละโซนย่อย ตามปริมาณฝน (Precipitation) คือ A = สภาพอากาศชื้น B = สภาพอากาศแห้ง ทำให้รวมกันทั้งหมดเป็น 19 โซนย่อย

Table Annex1-4 ASHRAE Standard 169-2013, Table A-3: Thermal Climate Zone Definitions

Thermal Zone	Name	I-P Units	SI Units
0	Extremely hot	$10,800 < \text{CDD}50^{\circ}\text{F}$	$6000 < \text{CDD}10^{\circ}\text{C}$
1	Very hot	$9000 < \text{CDD}50^{\circ}\text{F} \leq 10,800$	$5000 < \text{CDD}10^{\circ}\text{C} \leq 6000$
2	Hot	$6300 < \text{CDD}50^{\circ}\text{F} \leq 9000$	$3500 < \text{CDD}10^{\circ}\text{C} \leq 5000$
3	Warm	$\text{CDD}50^{\circ}\text{F} \leq 6300$ and $\text{HDD}65^{\circ}\text{F} \leq 3600$	$\text{CDD}10^{\circ}\text{C} < 3500$ and $\text{HDD}18^{\circ}\text{C} \leq 2000$
4	Mixed	$\text{CDD}50^{\circ}\text{F} \leq 6300$ and $3600 < \text{HDD}65^{\circ}\text{F} \leq 5400$	$\text{CDD}10^{\circ}\text{C} < 3500$ and $2000 < \text{HDD}18^{\circ}\text{C} \leq 3000$
5	Cool	$\text{CDD}50^{\circ}\text{F} \leq 6300$ and $5400 < \text{HDD}65^{\circ}\text{F} \leq 7200$	$\text{CDD}10^{\circ}\text{C} \leq 3500$ and $3000 < \text{HDD}18^{\circ}\text{C} \leq 4000$
6	Cold	$7200 < \text{HDD}65^{\circ}\text{F} \leq 9000$	$4000 < \text{HDD}18^{\circ}\text{C} \leq 5000$
7	Very cold	$9000 < \text{HDD}65^{\circ}\text{F} \leq 12600$	$5000 < \text{HDD}18^{\circ}\text{C} \leq 7000$
8	Subarctic/arctic	$12600 < \text{HDD}65^{\circ}\text{F}$	$7000 < \text{HDD}18^{\circ}\text{C}$

รูปที่ 2-32 การแบ่งโซนภูมิอากาศโดยใช้ Degree Days ของ ASHRAE

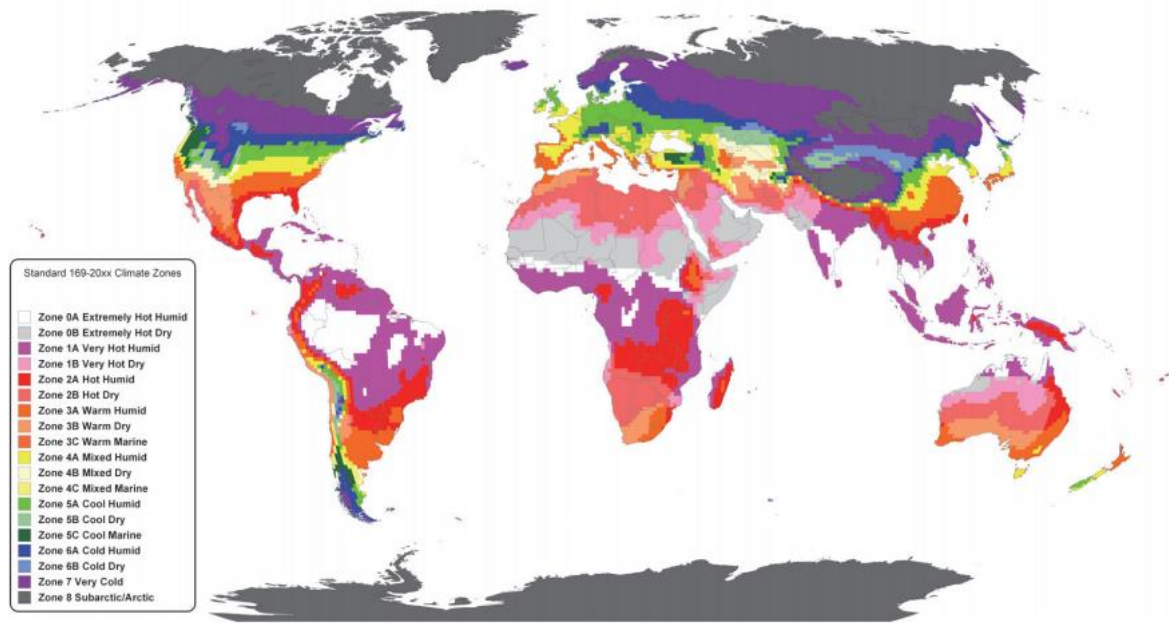
สำหรับประเทศไทยจะอยู่ใน 2 โซน คือ

- โซน 0A = ร้อนสุดขีด (Extremely Hot) เช่น กรุงเทพฯ และกลุ่มจังหวัดอื่น ๆ เป็นส่วนใหญ่
- โซน 1A = ร้อนมาก (Very Hot) กลุ่มจังหวัดทางภาคเหนือ เช่น เชียงใหม่ เชียงราย

จากการแบ่งโซนดังกล่าว ASHRAE ได้นำมากำหนดเกณฑ์การออกแบบอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน สำหรับแต่ละโซนความร้อน เช่น ค่า SHGC ของกระจก และ ค่า R ของฉนวนของอาคารฐาน (Baseline) ในมาตรฐาน ASHRAE 90.1: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในการจำลองพลังงานสำหรับอาคารเขียวตามมาตรฐาน LEED ของประเทศสหรัฐอเมริกา และมาตรฐาน ASHRAE 90.1 นี้ยังใช้เป็นทางเลือกหนึ่ง ในการประเมินประสิทธิภาพทางพลังงานของอาคารเขียว ที่ออกแบบตามเกณฑ์ของสถาบันอาคารเขียวไทย หรือ TREES ด้วย

การจำแนกรายชื่อจังหวัดต่าง ๆ ในประเทศไทยและโซนภูมิอากาศ สามารถหาได้จากภาคผนวกในมาตรฐาน ASHRAE 90.1-2016

ส่วนค่า Degree Days ปัจจุบัน มีเว็บไซต์ที่สามารถคำนวณได้โดยเลือกสถานีภูมิอากาศและกำหนดค่าอุณหภูมิฐานตามที่ต้องการ เช่น <https://www.degreedays.net/>



รูปที่ 2-33 การแบ่งเขตภูมิอากาศในโลกโดยใช้ Degree Days ตาม ASHRAE Standard 169

(ที่มา: <http://static1.1.sqspcdn.com/static/f/1510094/26984887/1461205789587/previews-ASHRAE-D-9013>)

2.7 สภาพภูมิอากาศในพื้นที่ขนาดย่อม (Micro Climate)

สภาพภูมิอากาศในพื้นที่ตั้งโครงการ หรือ พื้นที่ขนาดย่อมอาจจะแตกต่างไปจากสถิติภูมิอากาศในระดับจังหวัด หรือ อำเภอ ดังนั้น ผู้ออกแบบ จึงควรให้ความสนใจต่อสภาพแวดล้อมจริงของที่ตั้งด้วย เพราะอาจจะมีปัจจัยที่ทำให้สภาพอากาศของที่ตั้งแตกต่างไปจากส่วนอื่น ซึ่งสามารถเกิดจากปัจจัย ดังนี้ (Lechner, 2009)

(1) **ความสูงของที่ตั้ง** พื้นที่ซึ่งอยู่สูงจากระดับน้ำทะเล อากาศจะเย็นลง พื้นดินที่ดูดซับความร้อนจะคายความร้อนให้กับอากาศที่อยู่ใกล้พื้นผิวโลก อากาศที่อยู่ห่างผิวโลกจะได้รับความร้อนที่คายออกมา น้อยกว่า จึงเย็นกว่า ยิ่งมีความสูงชัน อุณหภูมิอากาศจะยิ่งลดลงรวดเร็ว โดยมีอัตราการลดลงประมาณ 2 °C ต่อความสูง 300 ม. (Lechner, 2009)

(2) **รูปทรงลักษณะของที่ดิน** ในพื้นที่ซึ่งเป็นภูเขา หรือ เนินดิน อุณหภูมิแต่ละด้านของพื้นที่ลาดเอียงจะแตกต่างกัน โดยพื้นดินที่ลาดเอียงหันมาทางทิศใต้จะได้รับอิทธิพลของรังสีอาทิตย์มากกว่า จะมีอุณหภูมิอากาศสูงกว่าพื้นดินซึ่งลาดเอียงไปทางทิศเหนือ (สำหรับประเทศในซีกโลกเหนือ)

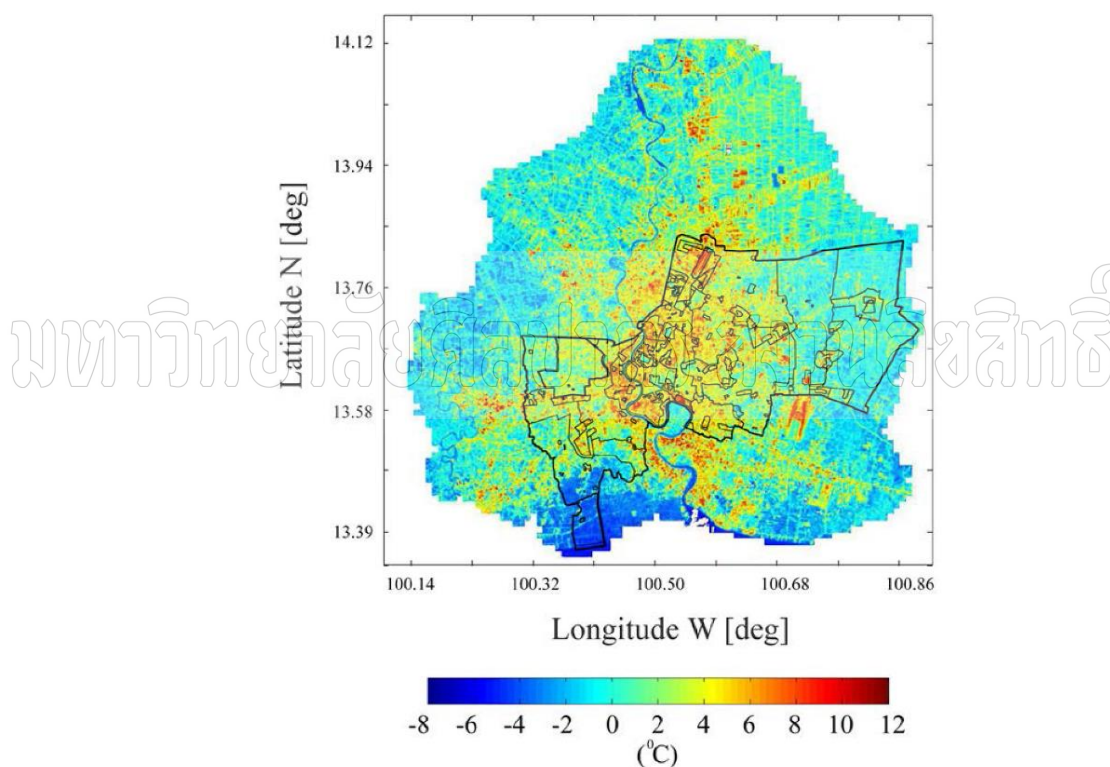
(3) **แหล่งน้ำ** น้ำมีความจุความร้อนสูงกว่าพื้นดิน ดังนั้น อุณหภูมิของน้ำและดินจะแตกต่างกัน ทำให้อากาศที่อยู่ใกล้ผิวน้ำ และผิวดินแตกต่างกันไปด้วย เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศ การมีแหล่งน้ำขนาดใหญ่ใกล้เคียง จึงมักจะมีความเร็วลมมากกว่าพื้นที่ทั่วไป และมีความชื้นสูง

(4) **ชนิดของดิน** ดินในแต่ละพื้นที่จะมีองค์ประกอบ หรือ ส่วนผสมเนื้อดิน สี และความชื้นแตกต่างกัน ดินที่มีความชื้นจะมีการระเหยของน้ำทำให้อุณหภูมิอากาศบริเวณนั้นเย็นลง พื้นทรายที่เป็นสีขาว จะสามารถสะท้อนความร้อนได้มากกว่าดินสีดำ ทำให้มีอุณหภูมิอากาศต่ำกว่า แต่ก็สามารถสะท้อนรังสีจากพื้นไปยังอาคารใกล้เคียงได้มากกว่า บริเวณที่พื้นดินส่วนใหญ่เป็นหิน หินมีความจุความร้อนสูง ดังนั้น จึงดูดซับความ

ร้อนไวกวายเป็นจำนวนมาก และคายความร้อนกลับออกมาในเวลากลางคืน ทำให้อากาศในพื้นที่นั้นอุ่นกว่าพื้นดินทั่วไป เป็นต้น

(5) **พืชพรรณ (Vegetation)** การมีต้นไม้ทำให้มีกระบวนการ Evapotranspiration ซึ่งรวมการระเหยของน้ำจากดิน (Evaporation) และการคายน้ำจากใบไม้ (Transpiration) จึงช่วยทำให้อากาศในบริเวณนั้นเย็นลง และการมีต้นไม้สูงที่ให้ร่มเงายังช่วยลดความร้อนให้กับพื้นดิน ทำให้ดินมีความชุ่มชื้น แต่ถ้าเนื้อที่ได้ต้นไม้ใหญ่มีความโล่ง ให้ลมพัดผ่านผิวดินได้ ก็จะช่วยลดความชื้นที่สะสมในพื้นที่นั้น

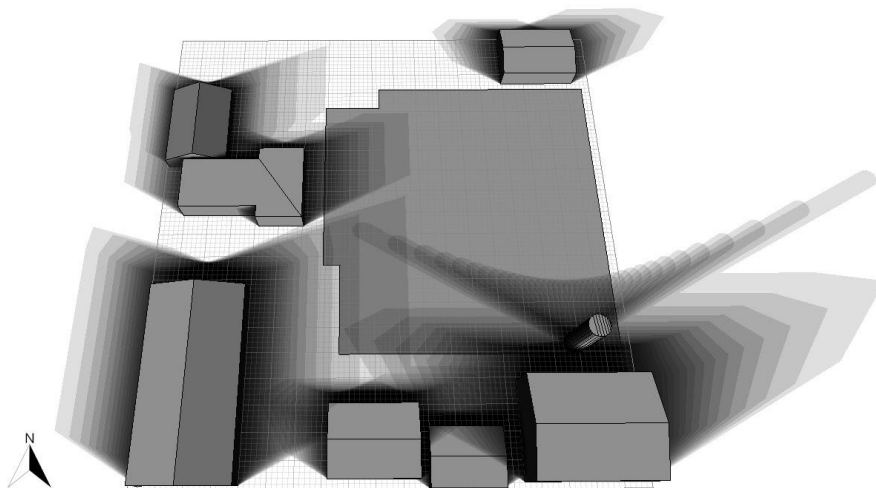
(6) **อาคารและสิ่งก่อสร้าง (Manmade Structures)** ผิวตาดแข็ง เช่น ลานจอดรถขนาดใหญ่ ผนัง และหลังคาของตัวอาคาร สามารถดูดซับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ได้จำนวนมาก โดยเฉพาะการใช้สีเข้ม และคายความร้อนออกสู่อากาศ ทำให้อากาศในบริเวณนั้นร้อน ซึ่งพบว่า ในเขตเมืองใหญ่ที่มีถนนและอาคารหนาแน่น จะมีอุณหภูมิอากาศสูงกว่าพื้นที่ชานเมืองที่ยังไม่มีการพัฒนาได้ตั้งแต่ 1 - 5.5 °C (USGBC, 2009) ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดเกาะความร้อนในเมือง (Urban Heat Island)



รูปที่ 2-34 อุณหภูมิพื้นผิวจากดาวเทียมแสดงให้เห็นเกาะความร้อนในเมืองของกรุงเทพมหานคร

(ที่มา: Chayapon, 2018)

ผู้ออกแบบจะต้องนำข้อมูลสภาพแวดล้อมในระดับที่ตั้ง ที่พบว่าอาจมีผลต่อสภาพอากาศ เช่น ความร้อนจากพื้นที่ตาดแข็งใหญ่ หรือ การมีอาคารสูงบังทำให้ไม่ได้รับแดด มาพิจารณาในขั้นการวิเคราะห์ที่ตั้ง (Site Analysis) ด้วย ซึ่งอาจทำได้โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น การจำลองเงา (รูปที่ 2-35) หรือ การจำลองการไหลของลม เป็นต้น เพื่อให้ได้อาคารที่สอดคล้องกับสภาพภูมิอากาศและสภาพแวดล้อมโดยรอบที่ตั้งมากที่สุด



รูปที่ 2-35 การวิเคราะห์เงาเพื่อหาบริเวณที่เหมาะสมของการสร้างอาคาร
ที่จะมีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2.8 สรุป

ในการออกแบบอาคารเพื่อการประหยัดพลังงานจำเป็นต้องศึกษาข้อมูลสภาพอากาศทั้งในระดับ Macro Climate และ Micro Climate โดยนำข้อมูลมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับขอบเขตสภาพสบาย และวิเคราะห์หาโอกาสในการพึ่งพาสภาพแวดล้อมธรรมชาติ หรือ Passive Design ในการออกแบบให้ได้มากที่สุดก่อน จากนั้น จึงหาแนวทางการประหยัดพลังงานด้วยวิธีการ Active Design คือ การปรับอากาศและใช้แสงประดิษฐ์ การวิเคราะห์สภาพภูมิอากาศโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ หรือ Web Application ที่หลากหลาย เป็นเครื่องมือที่ช่วยทำให้สถาปนิกสามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้ลึกซึ้งและรวดเร็ว ทำให้เข้าใจปัญหา และสามารถออกแบบอาคารที่ตอบรับกับภูมิอากาศ (Climate Responsive Design) ได้ดียิ่งขึ้น และลดการใช้พลังงาน การใช้ Degree Days สามารถช่วยในการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของภูมิอากาศที่มีต่อการใช้พลังงานในโครงการที่อยู่คนละที่ตั้ง หรือ เปรียบเทียบผลภูมิอากาศที่มีต่อการใช้พลังงานในโครงการเดียวกันแต่คนละปี

เอกสารอ้างอิง

กรมอุตุนิยมวิทยา. เอกสารวิชาการ พังลมของประเทศไทยในคาบ ๒๐ ปี (พ.ศ. ๒๕๒๔ - ๒๕๔๓) เล่ม ๓ ภาคกลาง และภาคตะวันออก. เข้าถึงจาก

http://www.arcims.tmd.go.th/Research_files/WindRoseVol3..pdf

ณัฐพงษ์ ประพฤติ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. พลังงานลมและกังหันลมเบื้องต้น. เข้าถึงจาก

<http://www.mut.ac.th/research-detail-82>

สถาบันอาคารเขียวไทย. คู่มือเกณฑ์การประเมินความยั่งยืนทางพลังงานและสิ่งแวดล้อมไทย – สำหรับการก่อสร้างและปรับปรุงโครงการใหม่ และอาคารประเภท พื้นที่ส่วนกลางและกรอบอาคาร.

ASHRAE. Proposed Addendum b to Standard 169, Climate Data for Building Design Standard. First Public Review (July 2012). Available from <https://docplayer.net/41029164-Proposed-addendum-b-to-standard-169-climatic-data-for-building-design-standards.html>

Athalye, Rahul A., Todd Taylor and Bing Liu. Impact of ASHRAE Standard 169-2013 on Building Energy Codes and Energy Efficiency. Available from <https://cutt.ly/6yv8LaO>
Climate Consultant Download Page. Available from <http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/climate-consultant/request-climate-consultant.php>

Climate Consultant V6.10. (Video). Available from <https://www.youtube.com/watch?v=bc0dIPP0SBg>

Chayapon Keeratikasikorn and Stefania Bonafoni. Urban Heat Island Analysis over the Land Use Zoning Plan of Bangkok by Means of Landsat 8 Imagery. Available from <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/3/440>

Cooling Degree Days and Heating Degree Days. Available from <http://www.energy-a.eu/cooling-degree-days-and-heating-degree-days/?cn-reloaded=1>

Drury B. Crawley. Climatic Data for Energy Efficiency and Building Performance. 27 April 2016. Available from <https://cutt.ly/Ayv1v1G>

Instructions on Using Climate Consultant. Available from https://courseworks2.columbia.edu/files/616106/download?download_frd=1

Lechner, Norbert. Heating, Cooling, Lighting - Sustainable Design Methods for Architects. Third edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.

Szokolay, S.V. Thermal Design of Buildings. Canberra: RIA Education, 1987.

USGBC. LEED Reference Guide for Green Building Design and Construction 2009 Edition. Washington, D.C.: 2009.

Weather Data Web Application. Available from <http://andrewmarsh.com/software/>



มหาวิทยาลัยศิลปากร งามเลิศ

3. เครื่องมือสำหรับการศึกษาด้านการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร

ในการรวบรวมข้อมูลเพื่อการออกแบบ หรือ การวิจัยทางด้านการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร จำเป็นจะต้องเข้าใจปัจจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับเรื่องที่ต้องการศึกษา เช่น การศึกษาสภาวะสบาย จะต้องเข้าใจว่ามีปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม คือ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และอุณหภูมิของผนังเพดาน และพื้นที่ แผ่รังสีมายังตัวผู้ใช้อาคาร ซึ่งต้องทำการวัดทั้งหมด และจำเป็นต้องรู้จักเครื่องมือสำหรับการวัดตัวแปรแต่ละประเภท

วัตถุประสงค์ ของหัวข้อนี้คือเพื่อให้รู้จักประเภทของเครื่องมือและอุปกรณ์ ที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูลสภาพแวดล้อม โดยผู้ใช้ต้องศึกษาวิธีการใช้งาน ตามคู่มือของเครื่องมือแต่ละชนิด ก่อนใช้ทุกครั้ง

3.1 ประเภทเครื่องมือ

- **เครื่องวัดสภาพภูมิอากาศ (Weather Station)** สำหรับวัดอุณหภูมิอากาศภายนอก ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม ทิศทางลม ปริมาณน้ำฝน เครื่องวัดฯ บางรุ่น สามารถส่งสัญญาณแบบไร้สายมายังเครื่องรับและบันทึกข้อมูลภายในอาคารได้ (รูปที่ 3-1)



รูปที่ 3-1 เครื่องวัดสภาพภูมิอากาศแบบไร้สาย (Wireless Weather Station)

(ที่มา: <https://www.globaltestsupply.com/product>)

- **เครื่องวัดอุณหภูมิอากาศ (Thermometer)** แสดงค่าของอุณหภูมิกระเปาะแห้ง ควรใช้เครื่องมือที่แสดงทศนิยมอย่างน้อย 1 ตำแหน่ง ปัจจุบันเครื่องวัดอุณหภูมิส่วนใหญ่ จะสามารถวัดค่าอื่นได้ด้วย เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ หรือ ความเร็วลม หรือ วัดได้ทั้งอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม ในเครื่องเดียวกัน เพื่อความสะดวกในการรวบรวมข้อมูล (รูปที่ 3-2)

- **เครื่องมือวัดความชื้นของอากาศ (Hygrometer/Psychrometer/Humidity Meter)** เครื่องมือวัดความชื้นของอากาศ ส่วนใหญ่อ่านค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ แต่บางเครื่องสามารถอ่านค่าอื่นที่เกี่ยวกับความชื้นได้ด้วย เช่น อุณหภูมิกระเปาะเปียก ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute Humidity) และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (รูปที่ 3-2)



รูปที่ 3-2 เครื่องมือวัดความชื้น และอุณหภูมิอากาศ

(ที่มา: <https://www.indiamart.com/proddetail/digital-psychrometer-8453298088.html>)

- เครื่องมือวัดความเร็วลม (Anemometer) มีหัววัด (Probe) หลายแบบ การเลือกใช้แต่ละแบบขึ้นอยู่กับช่วงความเร็วลม ขั้นต่ำ-ขั้นสูง ที่สามารถวัดได้ และความละเอียดในการวัด (Resolution) แบ่งเป็น

- เครื่องวัดความเร็วลมชนิดรูปถ้วย (Three-cup Anemometer) ใช้วัดลมภายนอกอาคาร ซึ่งไม่ทราบทิศทางลม หรือ อาจใช้ติดตั้งกับตัวอาคารในที่สูงลมแรง บางที่คู่กับศรลม ช่วงความเร็วลมเริ่มต้นที่วัดได้ประมาณ 0.9 m/s (รูปที่ 3-3 และรูป 3-4)

- เครื่องวัดความเร็วลมชนิดใบพัด (Vane Anemometer) วัดความเร็วลมได้ในช่วงประมาณ 0.4-30.0 m/s จึงใช้วัดลมภายนอกได้ดี การใช้ต้องหันใบพัดไปด้านที่รับลม ดังนั้น ถ้าใช้วัดภายในอาคารที่ลมอ่อนมากจะไม่สามารถใช้ได้ (รูปที่ 3-5)

- เครื่องวัดความเร็วลมชนิดขดลวดร้อน (Hot Wire Anemometer) สามารถใช้วัดลมความเร็วต่ำมากที่ 0.1 m/s - 25 m/s จึงสามารถใช้วัดได้ทั้งภายใน และภายนอกอาคาร และสามารถวัดลมที่ออกมาจากเครื่องปรับอากาศ เป็นค่า Air Flow Rate มีหน่วยเป็น ลบ.ม./ชม. หรือ ลิตร/นาที่ (รูปที่ 3-6)



รูปที่ 3-3 เครื่องวัดความเร็วลมชนิดรูปถ้วย

(ที่มา: <https://www.sangchaimeter.com>)



รูปที่ 3-4 เครื่องวัดความเร็วลมชนิดรูปถ้วย และศรลม

(ที่มา: <https://cutt.ly/iyv82jC>)



รูปที่ 3-5 เครื่องวัดความเร็วลมชนิดใบพัด (Vane Anemometer)

(ที่มา: <https://www.fishersci.fi/shop/products/rotating-vane-anemometer/10427173>)



รูปที่ 3-6 เครื่องมือวัดความเร็วลมชนิดขดลวดร้อน

(ที่มา: <https://cutt.ly/Myv8310>)

- เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (Infrared Thermometer) สำหรับวัดอุณหภูมิผิว โดยไม่ต้องสัมผัส เช่น พื้น หรือ ฝ้าเพดาน ซึ่งอยู่สูง เข้าถึงพื้นที่ซึ่งต้องการวัดโดยตรงได้ยาก การใช้จะต้องตั้งค่า Emissivity ซึ่งเป็นคุณสมบัติในการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ ให้ตรงกับประเภทของวัสดุนั้น เช่น วัสดุทั่วไป Emissivity = 0.95 อะลูมิเนียมพอยล์ = 0.05 (รูปที่ 3-7)



รูปที่ 3-7 เครื่องวัดอุณหภูมิชนิดอินฟราเรด

(ที่มา: <https://www.globaltestsupply.com/product>)

- กล้องถ่ายภาพความร้อน (Infrared Camera) วัดอุณหภูมิของอาคาร หรือ ส่วนของอาคารในภาพรวม สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายอย่าง เช่น การตรวจสอบจุดที่เป็นสะพานความร้อน (Thermal Bridge) หรือ จุดบกพร่อง (Defect) ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้โดยตรง เช่น การปูนฉาบในฝ้าเพดาน ซึ่งอาจแห้งหายไป เป็นต้น (รูปที่ 3-8)



รูปที่ 3-8 กล้องถ่ายภาพความร้อน

(ที่มา: <https://atticinspector.com/how-infrared-cameras-are-changing-attic-inspections/>)

- **เครื่องมือวัดความชื้นของวัสดุ (Moisture Meter)** สำหรับวัดความชื้นที่ส่วนของอาคาร เช่น ผนัง ซึ่งต้องเลือกเครื่องที่วัดได้ตรงกับประเภทวัสดุที่ต้องการวัด เช่น ปูน อิฐ ไม้ คอนกรีต บางเครื่องใช้วัดได้กับวัสดุเพียงชนิดเดียว บางเครื่องใช้วัดได้หลายวัสดุ (รูปที่ 3-9)



รูปที่ 3-9 เครื่องมือวัดความชื้นในวัสดุ

(ที่มา: <https://www.richmoto.net>)

- **กล้องถ่ายภาพความชื้น (Imaging Moisture Meter)** เป็นกล้องที่นำเอาเทคโนโลยีการถ่ายภาพความร้อนมาใช้ ทำให้สามารถตรวจพบจุดที่มีปัญหาความชื้นในอาคารได้ง่ายขึ้น สามารถเห็นภาพรวมของขอบเขตที่เกิดความชื้น ข้อแตกต่างจากเครื่องถ่ายภาพความร้อน คือ เครื่องสามารถวัดความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศได้ด้วย และสามารถเปลี่ยนหัววัด (Probe) สำหรับวัดความชื้นที่วัสดุได้ (รูปที่ 3-10)

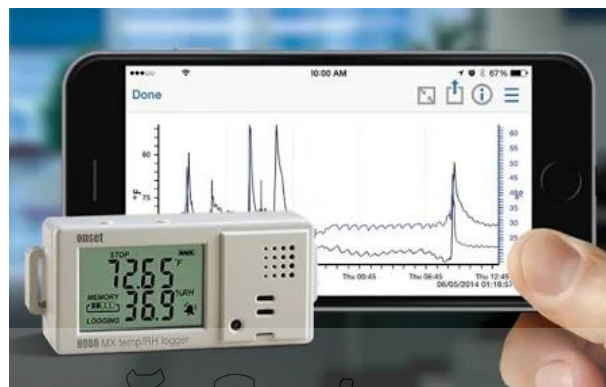


รูปที่ 3-10 กล้องถ่ายภาพความชื้น

(ที่มา: <https://www.instrumentasia.com/product>)

- **เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger)** แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ แบบ State Data Logger และ

Interval Data Logger แบบ State Data Logger จะบันทึกการทำงานที่เป็นลักษณะ 0 หรือ 1 หรือ on-off เช่น การที่มีคนอยู่ หรือ ไม่มีคนอยู่ในห้องทำงาน จากการเดินเข้า-ออก ส่วนแบบ Interval Data Logger คือ การบันทึกข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงในช่วงระยะเวลาหนึ่งที่กำหนด เครื่องบันทึกข้อมูลต้องใช้คู่กับเซ็นเซอร์ที่ต้องการวัด เช่น เซ็นเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิ หรือ ความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งอาจจะรวมกับตัวเครื่อง (Built-in) หรือ แยกอิสระ แล้วนำมาต่อกับเครื่อง จากนั้นจะถ่ายโอนข้อมูลที่บันทึกไว้ใน Data Logger เข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ เซ็นเซอร์ที่ใช้บ่อยในการศึกษาด้านพลังงาน คือ สายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) แต่ Data Logger สามารถบันทึกข้อมูลได้หลากหลายชนิด เช่น ปริมาณแสงสว่าง ค่า CO₂ วิธีการถ่ายโอนข้อมูลสามารถทำได้ทั้ง การต่อกับคอมพิวเตอร์โดยตรง เชื่อมต่อผ่าน Bluetooth การต่อไร้สายผ่าน Internet ไปยัง Cloud ที่เก็บข้อมูล (รูปที่ 3-11)



รูปที่ 3-11 Data Logger สำหรับบันทึกอุณหภูมิอากาศและความชื้นแบบไร้สาย

(ที่มา: <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/mx1101/>)

- **เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)** เป็นหัววัดอุณหภูมิซึ่งทำจากลวดโลหะที่ต่างชนิดกัน 2 เส้น โดยปลายข้างหนึ่งของลวดโลหะทั้ง 2 เส้น จะต้องเชื่อมติดกัน และใช้สัมผัสหรือ ติดกับวัตถุที่ต้องการวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกด้านที่ไม่ได้เชื่อมจะนำไปต่อกับ Data Logger (รูปที่ 3-14) หรือ บางทีทำเป็นปลั๊กสำเร็จรูปที่พร้อมจะนำมาต่อเข้ากับ Data Logger สายเทอร์โมคัปเปิล แบ่งเป็นหลายชนิด (Type) ตามประเภทของโลหะที่นำมาใช้ (รูปที่ 3-12) ซึ่งมีผลทำให้ช่วงอุณหภูมิที่สามารถวัดได้แตกต่างกัน การที่จะทราบว่าเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้เป็นแบบใด จะดูได้จากสีของสายเทอร์โมคัปเปิลในตารางสีมาตรฐาน (รูปที่ 3-13) สำหรับงานอาคาร ระดับอุณหภูมิของตัวอาคารที่ต้องการวัด เช่น ที่เปลือกอาคาร ไม่ถือว่าเป็นอุณหภูมิที่สูงมาก ดังนั้นจึงมักใช้ประเภท Type-T ซึ่งทำจากลวดทองแดงและลวดคอนสแตนตัน (Constantan คือ โลหะผสมของทองแดง 60% และนิกเกิล 40%) สามารถวัดในย่านอุณหภูมิประมาณตั้งแต่ -185 °C ถึง 300 °C (สายภายนอกสีน้ำตาล)



รูปที่ 3-12 Thermocouple Type-T

(ที่มา: <https://www.tequipment.net/Oakton/WD-08505-85/Temperature-Probes/>)

T/C Type	Conductor		T/C Junction Continuous Temperature range °C	INTERNATIONAL IEC 584-3 1989 BS 4937 PD02/1993	UNITED KINGDOM BS 1843 1993	FRANCE NFE 13001	GERMANY DIN43714	JAPAN JIS C 1602 1981	USA ANSI MC 96.1	Cable Code
	+	-								
E	Ni-CR	Cu-Ni Constantan	0 to +800							EX
J	Fe	Cu-Ni Constantan	0 to +750							JX
K	Ni-Cr	Ni-Al	0 to +1100							KX
N	Ni-Cr-Si Nicrosil	Ni-Si-Mg Nisil	0 to +1100							NX NC
R	Pt-13Rh	Pt	0 to +1600							RCA
S	Pt-10Rh	Pt	0 to +1600							SCA
T	Cu	Cu-Ni Constantan	-185 to +300							TX
B	Pt-30Rh	Pt-6Rh	+200 to +1700							BX

รูปที่ 3-13 วิธีการดูประเภทของสาย Thermocouple จากตารางสี

(ที่มา: <https://instrumentationforum.com/t/thermocouple-colour-codes/5784>)



รูปที่ 3-14 Data Logger ที่ใช้ต่อกับ Thermocouple

(ที่มา: www.indiamart.com)

นอกจากหัววัดอุณหภูมิที่เป็นเทอร์โมคัปเปิลแล้ว ยังมีหัววัดอุณหภูมิอีก 2 ประเภท ที่อาจพบ คือ เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) และ RTD (Resistance Temperature Detecture) ทั้ง 2 ประเภท นี้มีราคาสูง แต่ความแม่นยำสูงกว่า

- **ไพราโนมิเตอร์ (Pyranometer)** อุปกรณ์วัดความเข้มของรังสีอาทิตย์ (Irradiance) หน่วยวัด เป็น วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) ในกรณีที่วัดความเข้มรังสีอาทิตย์บนพื้นราบ ปริมาณรังสีรวมที่วัดได้ เรียก Global Radiation จะเป็นผลรวมของรังสีตรงจากท้องฟ้า (Direct Beam Radiation) กับรังสีกระจายจากท้องฟ้า (Diffuse Radiation) แต่ถ้ามีเงามาบัง Pyranometer ค่าที่อ่านได้จะเป็นรังสีกระจายอย่างเดียว และถ้าวาง Pyranometer ให้เอียง ค่าที่อ่านได้จะเป็นผลรวมของ รังสีตรง รังสีกระจาย และรังสีที่สะท้อนจากพื้นดิน หรือ อาคารใกล้เคียง เรียก Total Radiation โดย Pyranometer จะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

- Thermopile Pyranometer วัดความเข้มของรังสีอาทิตย์ได้ในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 3,200 นาโนเมตร (nm) (รูปที่ 3-15)

- Silicon Photocell Pyranometer ราคาถูกกว่า แบบ Thermopile สามารถวัดความเข้มของรังสีอาทิตย์ได้ ในช่วงความยาวคลื่นที่ประมาณ 400 - 1,100 นาโนเมตร ในสภาพแดดจัดจะสามารถวัดได้ดี แต่ถ้ามีเมฆ หรือ เงาบังจะมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าแบบ Thermopile (รูปที่ 3-16)



รูปที่ 3-15 Pyranometer ชนิด Thermopile

(ที่มา: <https://www.explainthatstuff.com/how-pyranometers-work.html>)



รูปที่ 3-16 Silicon Photocell Pyranometer

(ที่มา: <https://www.tradeindia.com/fp3817469/Silicon-Pyranometer.html>)

- **เครื่องมือวัดอุณหภูมิแผ่รังสี (Globe Thermometer)** ใช้วัดอุณหภูมิที่ได้จากการแผ่รังสีความร้อนของสิ่งต่าง ๆ ที่อยู่โดยรอบเครื่องมือ ได้แก่ ผนัง เพดาน พื้น หรือ วัตถุอื่น ๆ ภายใน Globe Thermometer ที่ทำด้วยโลหะทำสีดำด้าน ที่ตรงศูนย์กลางของทรงกลมจะมีหัววัดอุณหภูมิ หรือ เทอร์โมคัปเปิล (รูปที่ 3-17 และรูปที่ 3-18)



รูปที่ 3-17 Globe Thermometer

(ที่มา: <https://www.bappu.de/en/components-bappu/globe>)



รูปที่ 3-18 Globe Thermometer แบบพกพา

(ที่มา: <https://www.mrclab.com/productDetails.aspx?pid=82544>)

- **เครื่องมือวัดความส่องสว่าง (Lux Meter / Illuminance Meter / Light Meter)** วัดแสงที่ตกลงมาบนระนาบที่พิจารณา เช่น พื้นโต๊ะทำงาน หน่วย ลักซ์ (lux) (รูปที่ 3-19)



รูปที่ 3-19 เครื่องมือวัดความส่องสว่าง (Illuminance)

(ที่มา: <https://www.nanagarden.com/product/184211>)

- เครื่องมือวัดสภาวะสบาย (Thermal Comfort Data Logger) เป็นเครื่องมือที่สามารถวัดค่าตัวแปรสภาพแวดล้อมที่มีผลกับสภาวะสบาย ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม อุณหภูมิที่แผ่รังสีมาจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบ แล้วคำนวณผลแสดงเป็นค่า PMV (Predicted Mean Vote) หรือ ความรู้สึกร้อน-หนาว และ PPV (Predicted Percentage of Dissatisfied) หรือ ร้อยละของจำนวนผู้ไม่พอใจเนื่องจากไม่สบาย ที่ร้อน หรือ หนาวไป ตามมาตรฐาน ASHRAE 55 (รูปที่ 3-20)



รูปที่ 3-20 เครื่องมือวัดสภาวะสบาย

(ที่มา: <https://www.deltaohm.com/en/product/hd32-3tc-thermal-microclimate-pmv-ppd-wbgt/>)

- เครื่องมือวัดสภาพแวดล้อมในอาคาร (Multifunctional Environment Meter) เป็นเครื่องมือที่สามารถวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม ความส่องสว่าง และความดังของเสียง ในเครื่องเดียวกัน (รูปที่ 3-21)



รูปที่ 3-21 เครื่องมือวัดเสียง อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม ความส่องสว่าง ในเครื่องเดียวกัน

(ที่มา: <https://www.waterindex.com>)

- **เครื่องมือวัดระบบหลังคาเขียว (Green Roof Monitoring System)** เนื่องจากการทำหลังคา Green Roof มีประโยชน์หลายอย่าง ทั้งการลดเกาะความร้อนในเมือง ลดน้ำฝนไหลนอง (Stormwater Runoff) ลดความร้อนที่เข้าสู่อาคาร แต่การทำ Green Roof ได้สวยงาม จะต้องมียอดประกอบทางสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมหลายอย่าง เครื่องมือนี้ใช้วัดปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของ Green Roof คือ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ รังสีอาทิตย์ ความส่องสว่าง ความเร็วลม ปริมาณฝน ความชื้นของดิน อุณหภูมิดิน (รูปที่ 3-22)



รูปที่ 3-22 เครื่องมือวัดระบบ Green Roof

(ที่มา: <https://www.onsetcomp.com/products/kits/sys-rx-grms-a/>)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สแกนลิขสิทธิ์

3.2 สรุป

ในการศึกษาและวิจัยทางด้านการออกแบบอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน ผู้วิจัยจะต้องเข้าใจว่า มีตัวแปรใดที่ต้องการวัดบ้าง และจำเป็นต้องรู้จักชนิดของเครื่องมือที่สามารถใช้วัดข้อมูลแต่ละประเภทได้อย่างถูกต้อง โดยต้องศึกษาวิธีการใช้งาน ข้อจำกัด ช่วงของข้อมูลที่เครื่องมือสามารถวัด หรือ บันทึกค่าได้ การตั้งค่าต่าง ๆ ก่อนใช้ วิธีการดูแลรักษา ความจำเป็นในการสอบเทียบความถูกต้องของเครื่องมือก่อนการใช้งาน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องน่าเชื่อถือในการนำมาวิเคราะห์ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

เทอร์โมคัปเปิล. เข้าถึงจาก <https://cutt.ly/eybEI3m>

Campbell Scientific. What is the difference between a thermopile pyranometer and a silicon photocell pyranometer? Available from <https://www.campbellsci.com/faqs?v=2322>

PennState University, Department of Energy and Mineral Engineering. Available Solar Radiation and How It Is Measured. Available from <https://www.e-education.psu.edu/eme812/node/644>

RTD vs Thermocouple. Available from https://www.youtube.com/watch?v=3atbFRXTN_I

Thermocouple vs RTD vs Thermistor - Learn the differences. Available from <https://www.youtube.com/watch?v=YugXyuTfXtk>

Types of Thermocouples. Available from <https://www.omega.com/en-us/resources/thermocouple-types>

Thermocouple Colour Code. Available from <https://instrumentationforum.com/t/thermocouple-colour-codes/5784>

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

4. แผนภูมิไซโครเมตริก (Psychrometric Chart)

วัตถุประสงค์ ในการศึกษาแผนภูมิไซโครเมตริก (Psychrometric chart) สำหรับงานทางด้านสถาปัตยกรรม คือ

- 1) เพื่อให้เข้าใจความหมายของค่าต่าง ๆ ในแผนภูมิ และนำไปสู่ความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความชื้น ความร้อนของอากาศ และ ตัวแปรอื่น ๆ
- 2) เพื่อให้เข้าใจความสำคัญของความชื้นที่มีผลต่อโหลดในระบบปรับอากาศ
- 3) เพื่อให้เข้าใจวิธีการลดอุณหภูมิโดยใช้การระเหยของน้ำ เช่น การทำน้ำพุ น้ำตก
- 4) สามารถใช้แผนภูมิในการวิเคราะห์ลักษณะภูมิอากาศของที่ตั้งโครงการ และขอบเขตสภาวะสบาย
- 5) สามารถประยุกต์ใช้แผนภูมิในการวิเคราะห์ เพื่อเลือกแนวทางการออกแบบที่เหมาะสม

Psychrometric มาจากคำว่า Psychrometry ซึ่งเป็นการศึกษาที่ว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาวะของอากาศชื้น (Psychro ในภาษากรีกแปลว่า เย็น) ซึ่งความเข้าใจในการเปลี่ยนแปลงนี้ เป็นพื้นฐานของการศึกษาเรื่องสภาวะน่าสบาย การออกแบบอาคารปรับอากาศและไม่ปรับอากาศ และการป้องกันความชื้นเข้าสู่ในอาคาร

4.1 แผนภูมิไซโครเมตริก (Psychrometric Chart)

แผนภูมิไซโครเมตริก เป็นแผนภูมิที่แสดงค่าที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลง ความร้อน และความชื้นของอากาศ โดยเมื่อรู้ค่าตัวแปร 2 ตัว จะสามารถหาค่าตัวแปรตัวที่ 3 ได้ ในแผนภูมิจะประกอบด้วย เส้นที่แสดงค่าต่าง ๆ ดังนี้

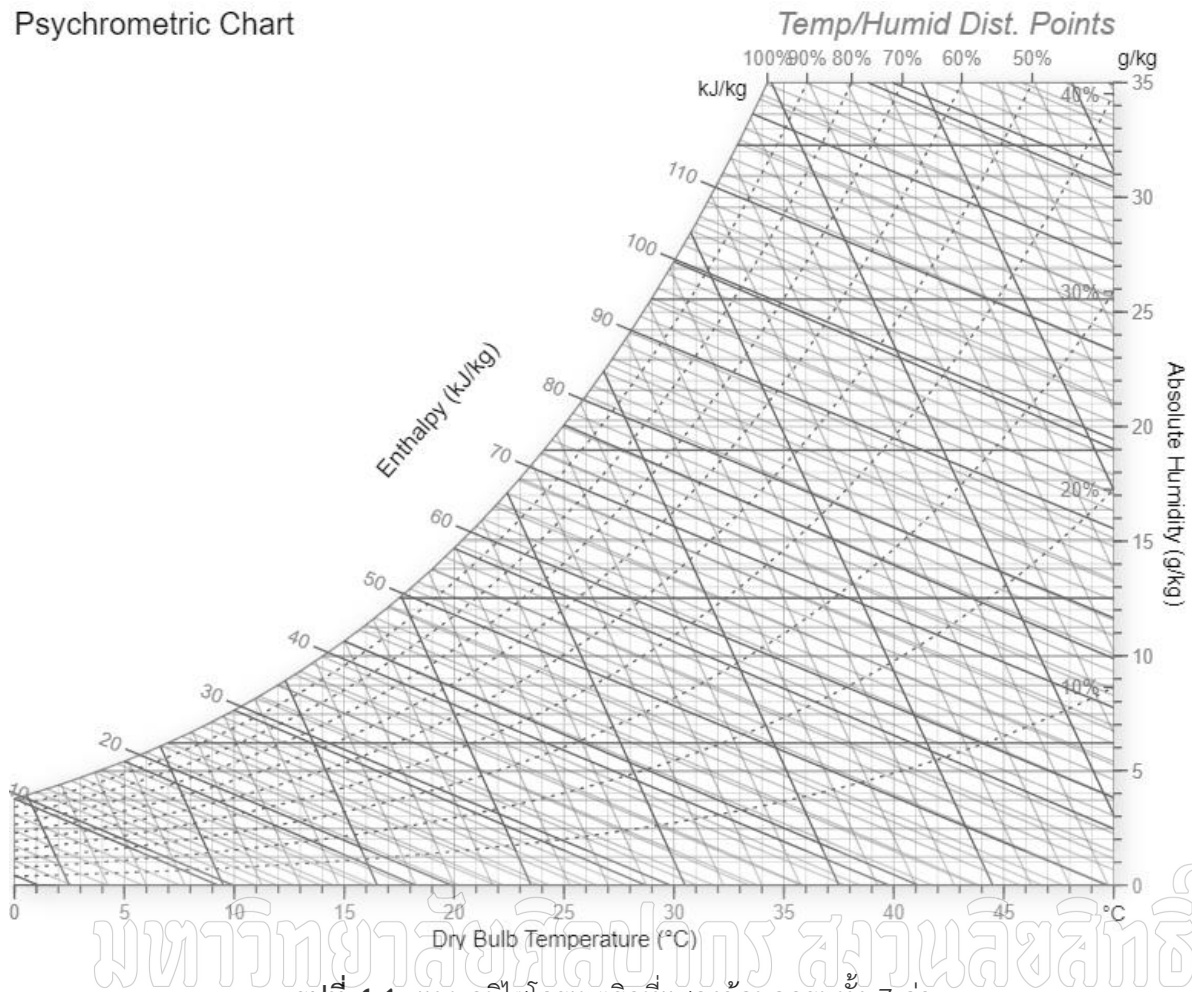
- 1) ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute Humidity)
- 2) ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)
- 3) อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry Bulb Temperature)
- 4) อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet Bulb Temperature)
- 5) ความร้อนรวม (Enthalpy)
- 6) แรงดันไอน้ำ (Vapour Pressure)
- 7) ปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume)

ดังนั้น แผนภูมิไซโครเมตริกที่แสดงข้อมูลครบทุกเส้น และเป็นภาพขาว-ดำ จึงยากแก่การอ่านและทำความเข้าใจ (รูปที่ 4-1) ปัจจุบันได้มีผู้พัฒนา แผนภูมิไซโครเมตริก ที่เป็น Interactive ในเว็บไซต์ต่าง ๆ ที่สามารถใช้ได้ฟรี โดยกำหนดให้แสดงเฉพาะค่าที่สนใจ หรือในบางเว็บไซต์ยังเลือกสีของเส้นต่าง ๆ ได้ด้วย ทำให้สามารถอ่านและทำความเข้าใจได้ง่ายขึ้น (รูปที่ 4-2) ดังในบทนี้ ได้ใช้แผนภูมิไซโครเมตริก จากเว็บไซต์

<https://hvac-eng.com/interactive-psychrometric-chart/> และ

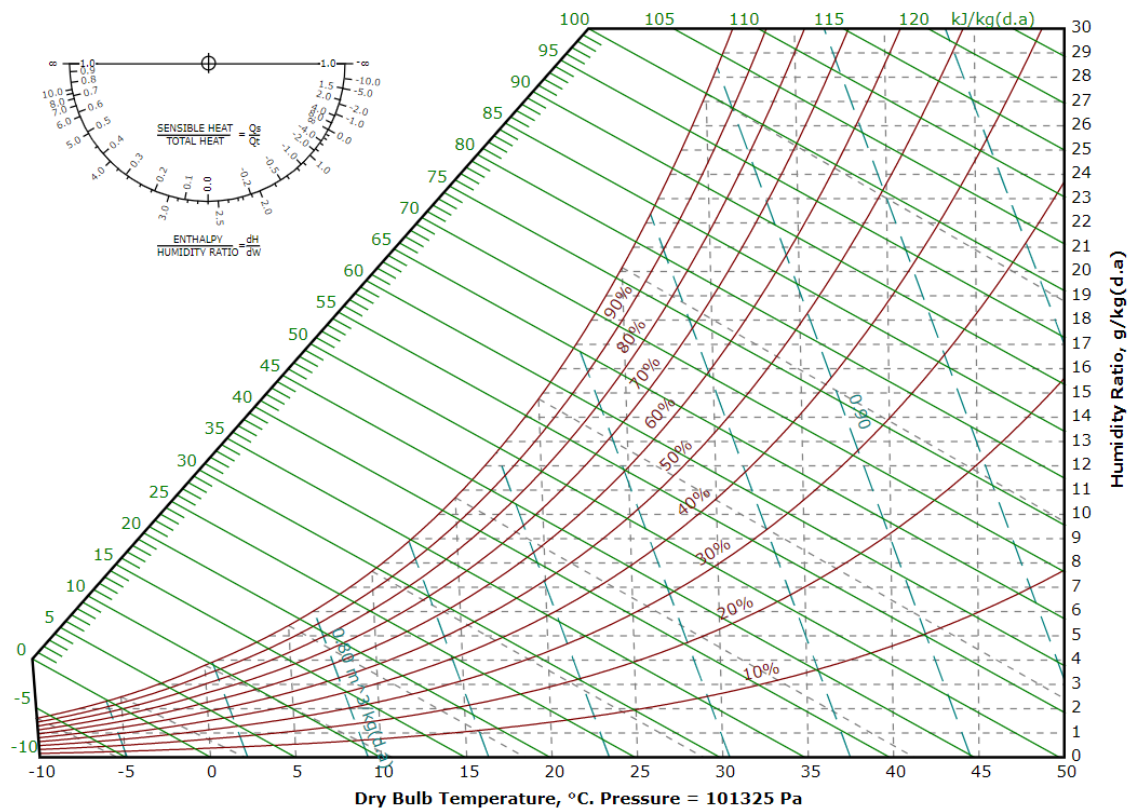
<http://www.flycarpet.net/en/PsyOnline> ซึ่งผู้ที่สนใจสามารถดูภาพจากเว็บไซต์ดังกล่าวควบคู่ไปด้วย

Psychrometric Chart



รูปที่ 4-1 แผนภูมิไซโครเมตริกที่แสดงข้อมูลครบทั้ง 7 ค่า

(ที่มา: <https://hvac-eng.com/interactive-psychrometric-chart/>)



รูปที่ 4-2 แผนภูมิใช้โครเมตริกแบบ Interactive ที่สามารถกำหนดสีของแต่ละเส้น
(ที่มา: <http://www.flycarpet.net/en/PsyOnline>)

ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute Humidity, AH)

ความชื้นสัมบูรณ์ เป็นค่าที่บอกถึงความชื้นในอากาศ โดยแสดงปริมาณไอน้ำ (Vapour Content) ที่มีในอากาศต่อน้ำหนักของอากาศแห้ง มีหน่วยวัดเป็น กรัมของไอน้ำต่อกิโลกรัมของอากาศแห้ง (g/kg) ในบางแผนภูมิใช้คำว่า อัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio)

ค่าความชื้นสัมบูรณ์ เป็นเส้นในแนวนอนที่อ่านค่าได้จากแกนแนวดิ่งทางด้านขวาของแผนภูมิ (รูปที่ 4-3) เป็นค่าที่นำมาใช้คำนวณหาปริมาณน้ำที่ต้องการเติมเข้าไป หรือนำออกมาจากห้องในงานระบบปรับอากาศ

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH)

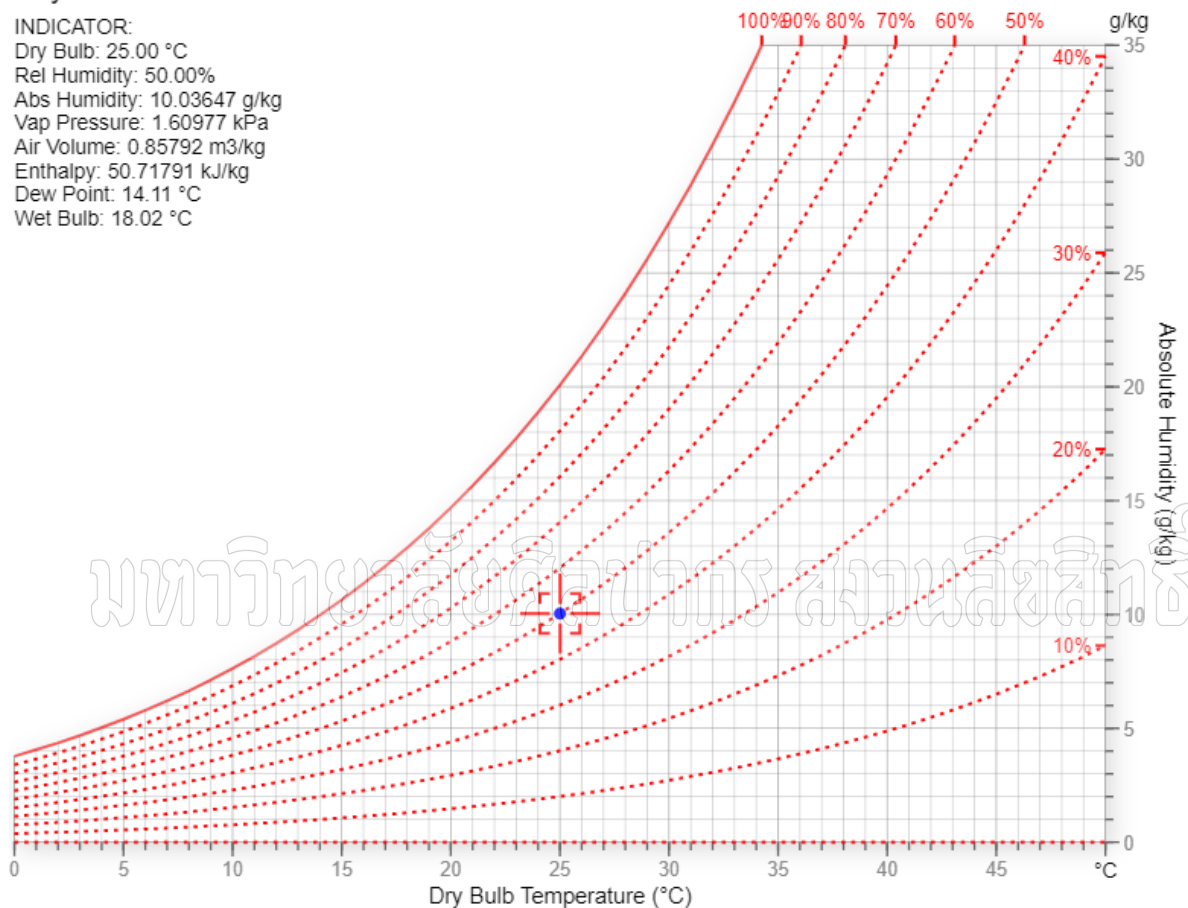
ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นค่าที่แสดงปริมาณความชื้นของอากาศ โดยหมายถึง ปริมาณความชื้นที่มีในอากาศในขณะนั้น เปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นสูงสุดที่อากาศสามารถมีได้เต็มที่ ณ อุณหภูมิเดียวกัน มีหน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์ (%) อากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะสามารถจุปริมาณไอน้ำสูงได้มากกว่าอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ ดังนั้น ถ้าทำให้อากาศร้อนขึ้น โดยไม่มีการเติมน้ำ หรือ ความชื้นเข้าไปเพิ่ม ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะลดลง (เพราะตัวหาร คือ ปริมาณไอน้ำสูงสุดมีจำนวนมากขึ้น) ในทางกลับกัน การทำให้อากาศเย็นลง ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะเพิ่มขึ้น

ค่าความชื้นสัมพัทธ์ สามารถอ่านได้จากเส้นโค้งในแผนภูมิ แต่ละเส้นโค้งแสดงค่าความชื้นสัมพัทธ์ตั้งแต่ 10% ถึง 100% สำหรับเส้นความชื้นสัมพัทธ์ 100% ซึ่งอยู่บนสุดในแผนภูมิ จะเรียกเส้นนี้ว่า **เส้นความชื้นอิ่มตัว (Saturation Line)**

ตัวอย่าง (รูปที่ 4-3) อากาศที่อุณหภูมิ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50% จะมีไอน้ำอยู่ 10 g/kg และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% จะมีจำนวนไอน้ำ 20 g/kg ($RH = (10/20) \times 100 = 50\%$)

Psychrometric Chart

INDICATOR:
 Dry Bulb: 25.00 °C
 Rel Humidity: 50.00%
 Abs Humidity: 10.03647 g/kg
 Vap Pressure: 1.60977 kPa
 Air Volume: 0.85792 m³/kg
 Enthalpy: 50.71791 kJ/kg
 Dew Point: 14.11 °C
 Wet Bulb: 18.02 °C



รูปที่ 4-3 เส้นความชื้นสัมบูรณ์ ความชื้นสัมพัทธ์ (เส้นโค้ง) และอุณหภูมิกระเปาะแห้ง

(ที่มา: <https://hvac-eng.com/interactive-psychrometric-chart/>)

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry Bulb Temperature, DB)

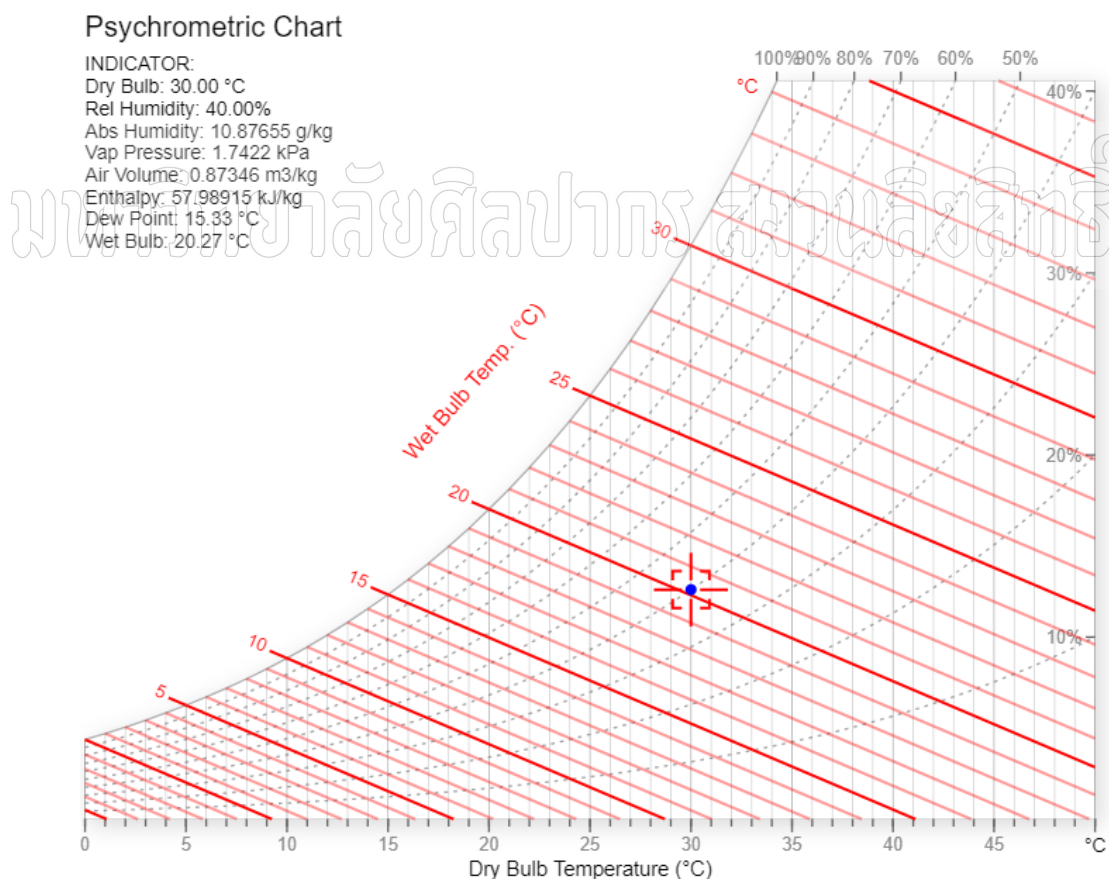
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง เป็นค่าอุณหภูมิอากาศที่สามารถอ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ทั่วไป แสดงด้วยเส้นในแนวดิ่ง โดยอ่านค่าได้จากแกนแนวนอนที่ขอบด้านล่างของแผนภูมิ (รูปที่ 4-3)

อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet Bulb Temperature, WB)

อุณหภูมิกระเปาะเปียก เป็นอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ที่ปลายกระเปาะหุ้มด้วยผ้าเปียก เพื่อใช้บ่งชี้ความชื้นในอากาศ ส่วนใหญ่ค่าที่อ่านได้จากอุณหภูมิกระเปาะเปียกจะต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้ง โดยถ้าอากาศมีความชื้นต่ำ น้ำจะระเหยเป็นไอน้ำได้ง่าย อุณหภูมิกระเปาะเปียกจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งมาก แต่ถ้าอากาศมีความชื้นสูง น้ำจะระเหยได้ยาก อุณหภูมิกระเปาะเปียกจะต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งไม่มาก และถ้าความชื้นสัมพัทธ์มีค่า 100% อุณหภูมิกระเปาะเปียกและอุณหภูมิกระเปาะแห้งจะมีค่าเท่ากัน

ค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก แสดงด้วยเส้นทะแยงที่มีปลายด้านหนึ่งต่อกับเส้นโค้งของความชื้นสัมพัทธ์ 100% ส่วนปลายอีกด้านต่อกับเส้นความชื้นสัมบูรณ์

ถ้าทราบค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียก จะสามารถหาความชื้นสัมพัทธ์ได้ ตัวอย่าง (รูปที่ 4-4) อากาศที่ 30 °C (DB) และ 20 °C (WB) จะตัดกันที่จุดความชื้นสัมพัทธ์ = 40%



รูปที่ 4-4 เส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียก (เส้นทะแยง) เส้นความชื้นสัมพัทธ์ (เส้นโค้ง)

(ที่มา: <https://hvac-eng.com/interactive-psychrometric-chart/>)

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew Point Temperature)

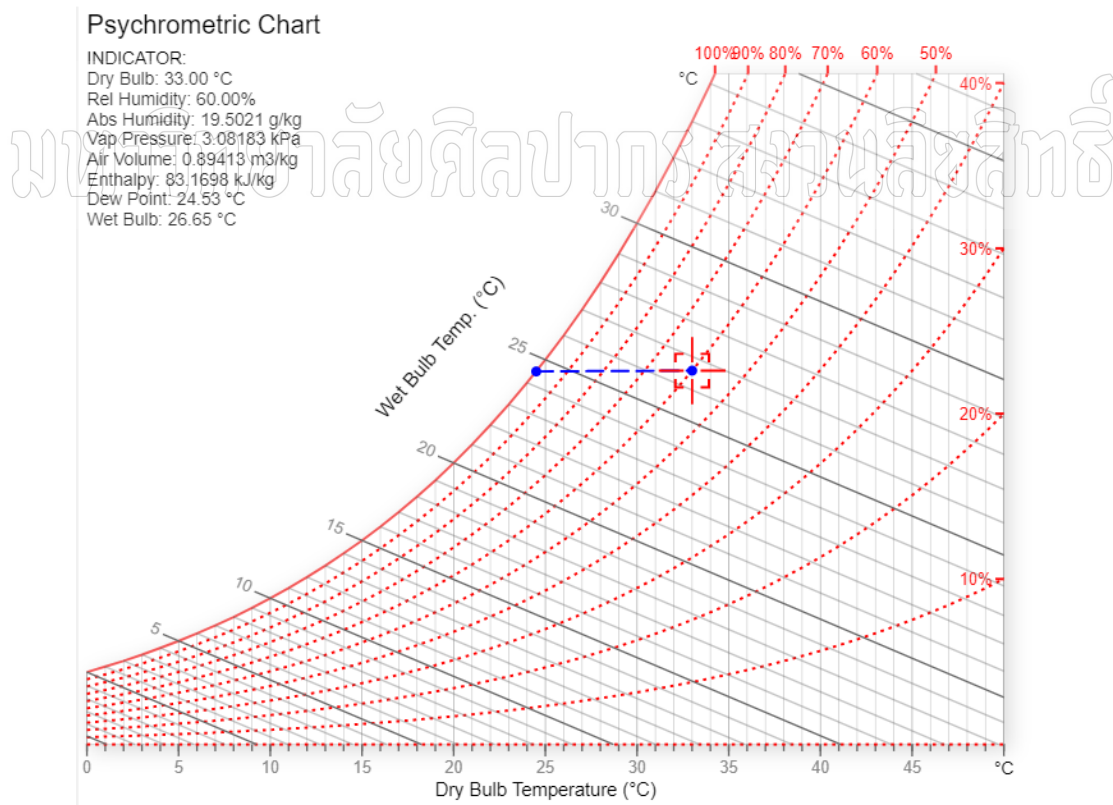
อุณหภูมิจุดน้ำค้าง คือ อุณหภูมิที่ไอน้ำในอากาศเกิดการควบแน่น หรือ กลั่นตัวเป็นหยดน้ำ (Condensation) ถ้าอากาศนั้นสัมผัสกับวัสดุที่มีอุณหภูมิจุดน้ำค้าง หรือ ต่ำกว่า ก็จะควบแน่นเป็นละอองน้ำ บาง ๆ บนผิววัสดุ หรือ ถ้าเกิดภายนอกอาคารในเวลากลางคืนจะเป็นน้ำค้าง (Dew)

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง สามารถวัดได้โดยตรงโดยใช้เครื่องมือ โดยอาจนำมาใช้พิจารณาความเป็นไปได้ที่จะเกิดการควบแน่นของไอน้ำภายในอาคาร เช่น เกิดหยดน้ำที่ผิวฉนวนกันความร้อน ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ โอกาสที่จะเกิดความชื้นที่ผิวผนัง หรือ ฝ้าเพดาน และทำให้เกิดเชื้อรา เป็นต้น

การหาอุณหภูมิจุดน้ำค้างจากแผนภูมิ ทำได้โดยการลากเส้นจากจุดอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ที่กำหนด ขนานกับแกนแนวนอนของอุณหภูมิกระเปาะแห้ง จนชนกับเส้นความชื้นสัมพัทธ์ที่ 100% แล้วอ่านค่า

ตัวอย่าง (รูปที่ 4-5) อุณหภูมิอากาศ 33 °C ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60% จากจุดนี้ลากเส้นตามแนวนอนไปยังเส้นความชื้นสัมพัทธ์ 100% จะอ่านค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง = 24.5 °C หรือ ลากเส้นต่อมาตามแนวตั้งจากเส้นความชื้นสัมพัทธ์ 100% ลงมาหาอุณหภูมิกระเปาะแห้งก็จะอ่านค่าได้ = 24.5 °C เช่นเดียวกัน

ดังนั้น หากมีการลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 24.5 °C ($AH = 19.5 \text{ g/kg}$) ลงมาที่ 20 °C ($AH = 15 \text{ g/kg}$) ก็จะมีน้ำกลั่นตัวออกมาจากอากาศ เป็นจำนวน $19.5 - 15 = 4.5 \text{ g/kg}$



รูปที่ 4-5 อุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศอุณหภูมิ 33 °C (DB) ค่า RH = 60% อ่านได้ 24.5 °C

(ที่มา: <https://hvac-eng.com/interactive-psychrometric-chart/>)

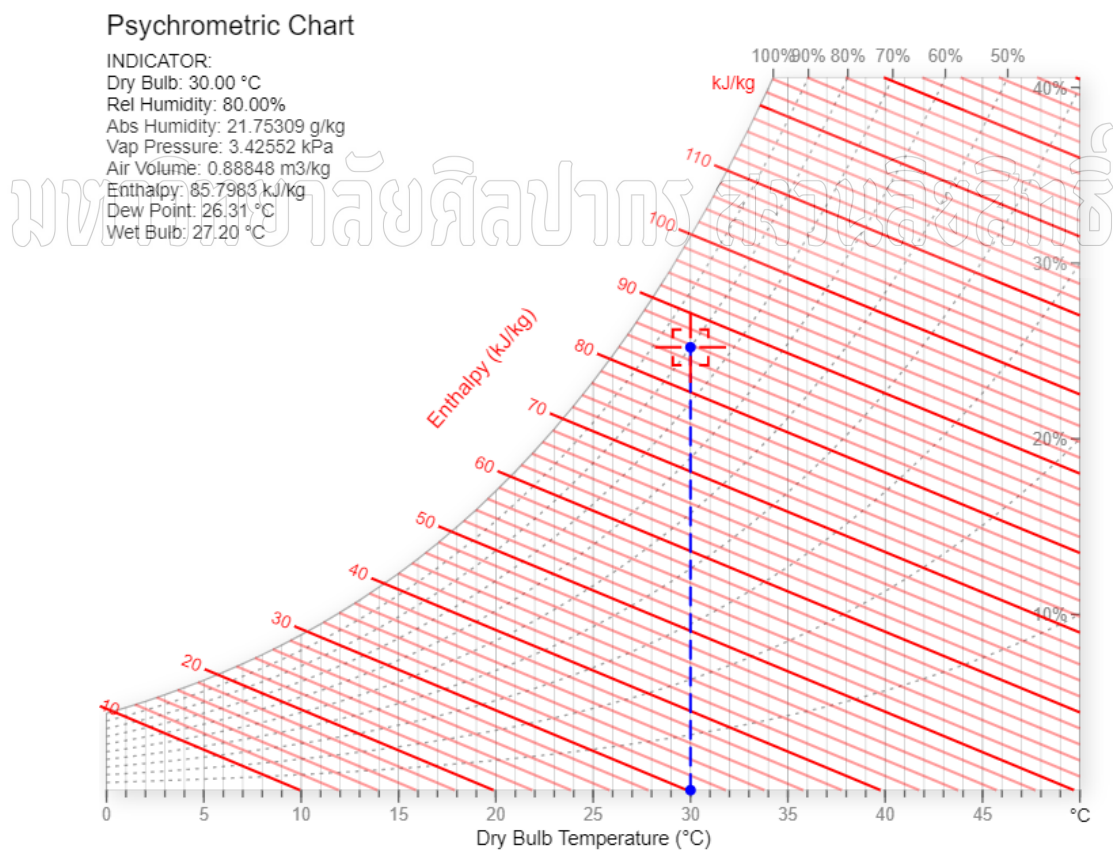
เอนทัลปี (Enthalpy, H)

เอนทัลปี เป็นค่าปริมาณความร้อน (Heat Content) ของอากาศ ที่รวมความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงเข้าด้วยกัน มีหน่วยเป็น กิโลจูลต่อกิโลกรัม (kJ/kg) ในแผนภูมิจะแสดงด้วยเส้นทะแยงคล้ายกับเส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียก

ปริมาณความร้อนสัมผัส สามารถอ่านได้บนเส้น Enthalpy เมื่ออากาศมีความชื้นสัมบูรณ์เป็นศูนย์ คือ เป็นอากาศแห้งที่ไม่มีไอน้ำ หรือ ความชื้นอยู่เลย

ตัวอย่าง (รูปที่ 4-6) อากาศที่ 30 °C ความชื้นสัมบูรณ์ = 0 จะมีค่า Enthalpy = 30 kJ/kg แต่ อากาศชื้นที่ 30 °C ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 80% จะมีค่า Enthalpy = 85.8 kJ/kg ดังนั้น จึงเป็น**ปริมาณความร้อนแฝง** = $85.8 - 30 = 55.8$ kJ/kg ซึ่งจะเห็นว่า สัดส่วนของความร้อนแฝงในอากาศนั้นสูงกว่าความร้อนสัมผัส

จากแผนภูมินี้ จะทำให้เข้าใจได้ว่า **อากาศที่มีอุณหภูมิเท่ากันแต่ปริมาณความชื้นต่างกัน จะมีค่าความร้อนรวมไม่เท่ากัน** โดยอากาศที่มีความชื้นสูง จะมีค่าความร้อนรวมสูงกว่าอากาศที่มีความชื้นต่ำ ดังนั้น ในสภาพอากาศร้อนชื้น เช่น ประเทศไทย การออกแบบอาคารที่อากาศภายนอก สามารถรั่วไหลเข้าสู่ภายในอาคารได้โดยง่าย **จึงทำให้เกิดโหลดความร้อนจำนวนมหาศาล และสิ้นเปลืองพลังงานในการปรับอากาศ**



รูปที่ 4-6 เส้น Enthalpy อ่านค่าที่ขอบเส้นโค้งบนสุด

(ที่มา: <https://hvac-eng.com/interactive-psychrometric-chart/>)

แรงดันไอน้ำ (Vapour Pressure)

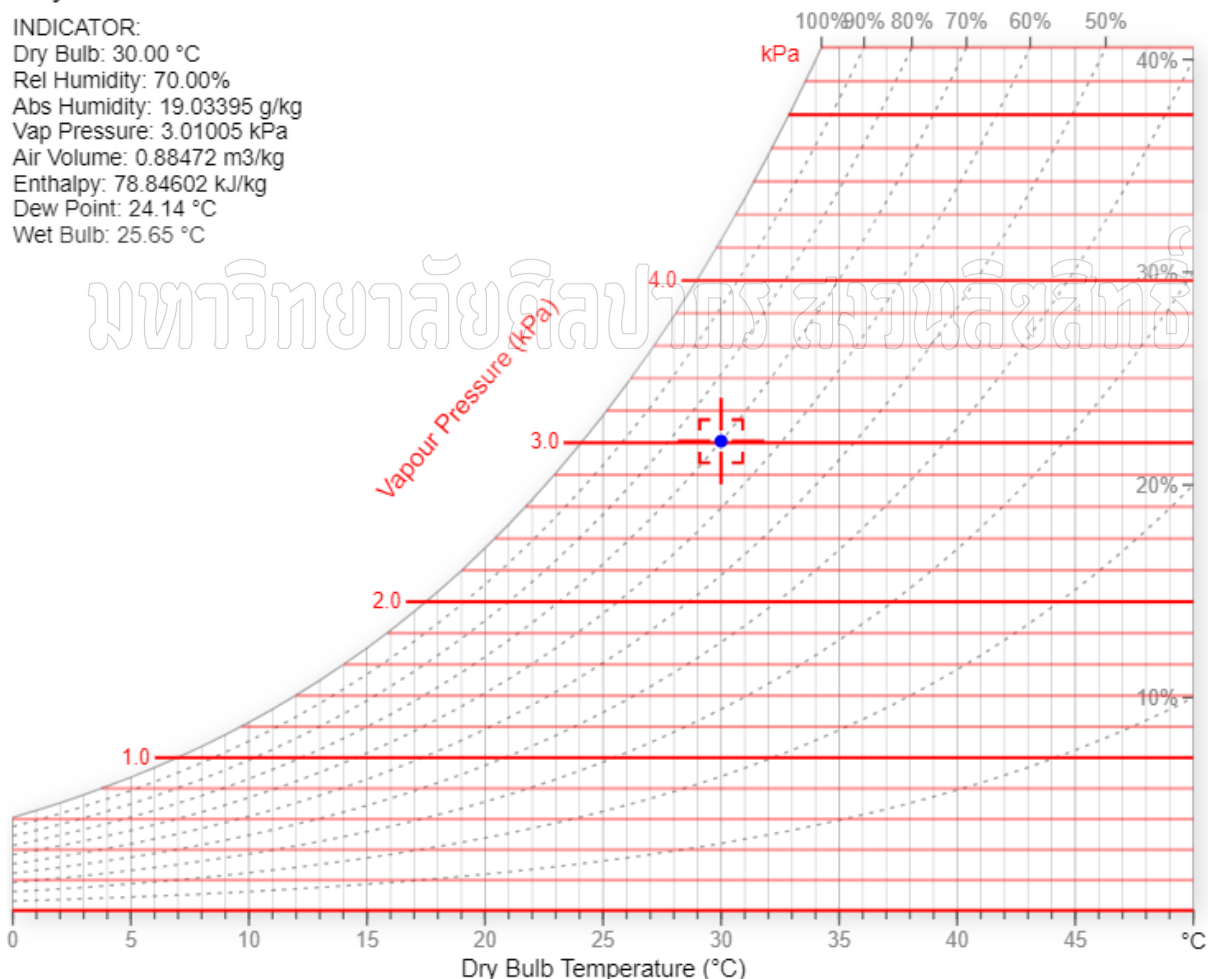
แรงดันไอน้ำ เป็นค่าแรงดันที่เกิดจากโมเลกุลของไอน้ำที่มีอยู่ในบรรยากาศ ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute Humidity) อากาศที่มีความชื้นมากจะมีแรงดันไอน้ำสูงกว่าอากาศที่มีความชื้นต่ำ เส้น Vapour Pressure จะขนานกับเส้น Absolute Humidity โดยอ่านค่าที่ขอบเส้นโค้งความชื้นสัมพัทธ์ 100% มีหน่วยวัดเป็นกิโลปาสกาล (kilo-Pascal, kPa) ซึ่งมีค่าตั้งต้นที่ 0 kPa สำหรับ Absolute Humidity ที่ 0 g/kg

ในแผนภูมิบางอัน จะใช้ค่าแรงดันไอน้ำที่มีหน่วยเป็นมิลลิบาร์ (Millibars) (1 mb = 101 kPa) หรือ มิลลิเมตรปรอท (1 mm = 133 kPa) ซึ่งข้อดีของการใช้ Interactive Psychrometric Chart คือ สามารถเปลี่ยนหน่วยที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว

ค่าแรงดันไอน้ำ มีประโยชน์ในการออกแบบเพื่อป้องกันความชื้นแทรกซึมผ่านเนื้อวัสดุเข้าในอาคาร ตัวอย่าง (รูปที่ 4-7) อากาศที่ 30 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 70% อ่านค่าแรงดันไอน้ำได้ 3.0 kPa

Psychrometric Chart

INDICATOR:
Dry Bulb: 30.00 °C
Rel Humidity: 70.00%
Abs Humidity: 19.03395 g/kg
Vap Pressure: 3.01005 kPa
Air Volume: 0.88472 m3/kg
Enthalpy: 78.84602 kJ/kg
Dew Point: 24.14 °C
Wet Bulb: 25.65 °C



รูปที่ 4-7 เส้นแรงดันไอน้ำ (เส้นแนวนอน) อ่านค่าที่ขอบเส้นโค้งบนสุด

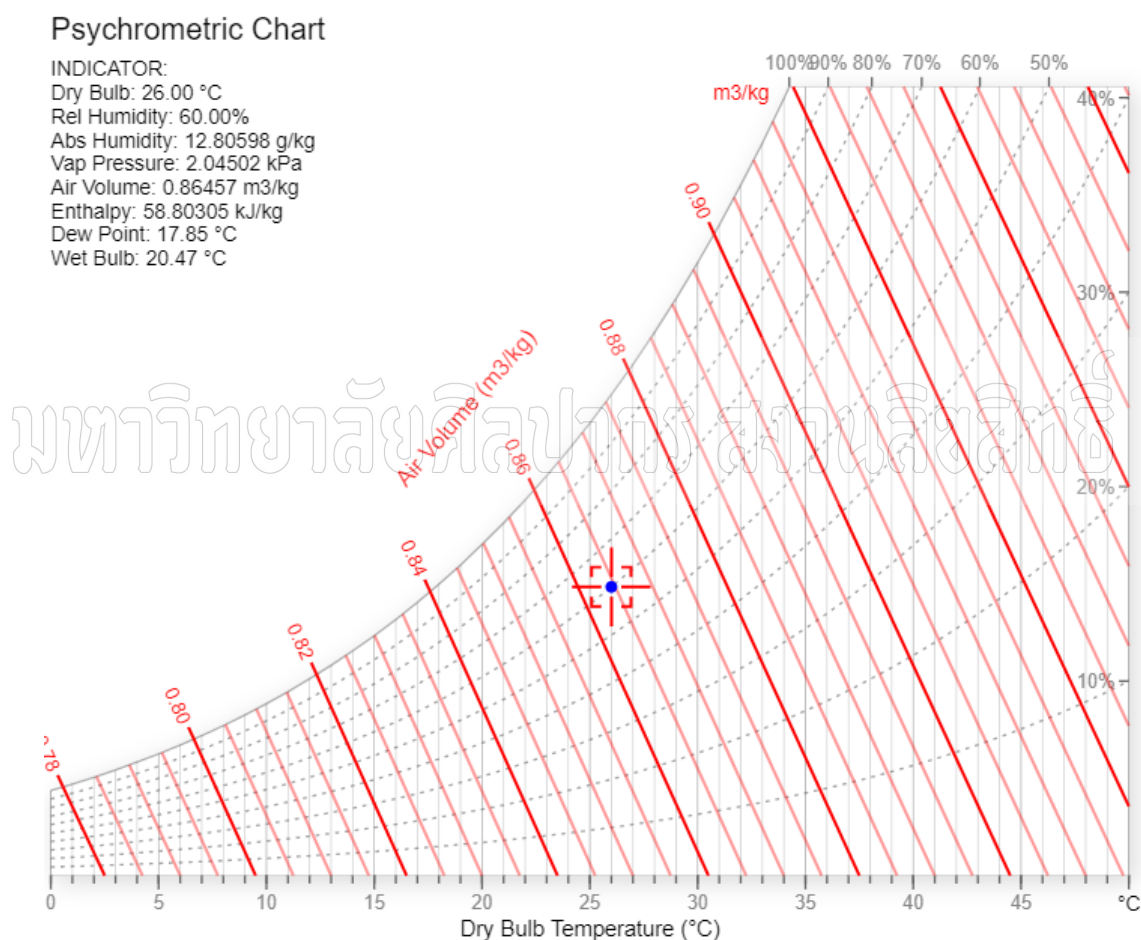
(ที่มา: <https://hvac-eng.com/interactive-psychrometric-chart/>)

ปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume)

ปริมาตรจำเพาะของอากาศ เป็นค่าที่แสดงว่าอากาศที่อุณหภูมิและความชื้นที่กำหนดที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม มีปริมาตรกี่ลูกบาศก์เมตร มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม (m^3/kg) ในบางแผนภูมิใช้คำว่า **ปริมาตรอากาศ (Air Volume)** ซึ่งเป็นส่วนกลับของความหนาแน่น ในการคำนวณระบบปรับอากาศ จำเป็นต้องทราบปริมาตรอากาศ

ปริมาตรจำเพาะ เป็นเส้นเฉียงค่อนข้างชันในแผนภูมิ อ่านค่าที่ขอบบนเส้นโค้งความชื้นสัมพัทธ์ 100%

ตัวอย่าง (รูปที่ 4-8) อากาศที่ 26°C ความชื้นสัมพัทธ์ 60% อ่านค่าปริมาตรจำเพาะได้ $0.865 \text{ m}^3/\text{kg}$



รูปที่ 4-8 เส้นปริมาตรจำเพาะของอากาศ (เส้นทะแยง) อ่านค่าที่ขอบเส้นโค้งบนสุด

(ที่มา: <https://hvac-eng.com/interactive-psychrometric-chart/>)

4.2 วิธีการทำให้อากาศร้อนขึ้นหรือเย็นลง (Heating or Cooling)

การทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้นหรือต่ำลง สามารถเกิดขึ้นได้ 3 ลักษณะ คือ

1) การทำให้อุณหภูมิอากาศสูงขึ้นหรือต่ำลง โดยที่ค่า Absolute Humidity คงที่ ซึ่งจะทำให้ความชื้นสัมพัทธ์และค่าความร้อนรวมของอากาศ (Enthalpy) เปลี่ยนแปลง อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงอยู่ในแนวนอน (รูปที่ 4-9) โดยถ้าลดอุณหภูมิอากาศลงจนถึงอุณหภูมิจุดน้ำค้าง ไอน้ำในอากาศจะเริ่มกลั่นตัว และถ้ายังคงลดอุณหภูมิต่อไปอีก ไอน้ำในอากาศจะกลั่นตัวออกมาเพิ่ม เส้นกราฟจะเปลี่ยนไปตามแนวเส้นความชื้นอิ่มตัว ซึ่งเป็นวิธีการรีดความชื้นออกจากอากาศ โดยการทำให้อากาศเย็น (Dehumidification by Cooling)

Psychrometric Chart

INDICATOR:

Dry Bulb: 30.00 °C

Rel Humidity: 49.28%

Abs Humidity: 13.4 g/kg

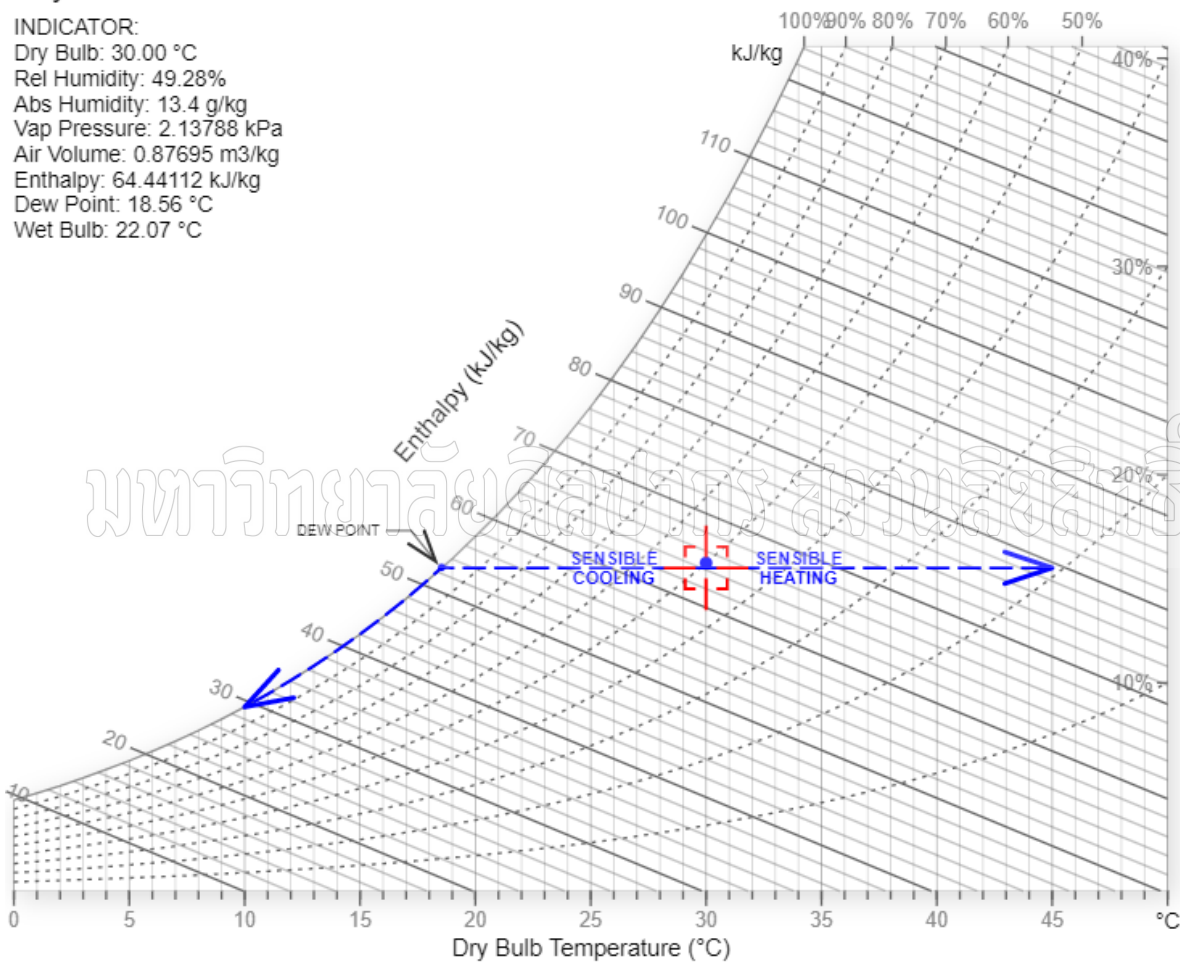
Vap Pressure: 2.13788 kPa

Air Volume: 0.87695 m³/kg

Enthalpy: 64.44112 kJ/kg

Dew Point: 18.56 °C

Wet Bulb: 22.07 °C



รูปที่ 4-9 การเพิ่ม หรือ ลดอุณหภูมิ ที่ทำให้ความร้อนรวมเปลี่ยนแปลง

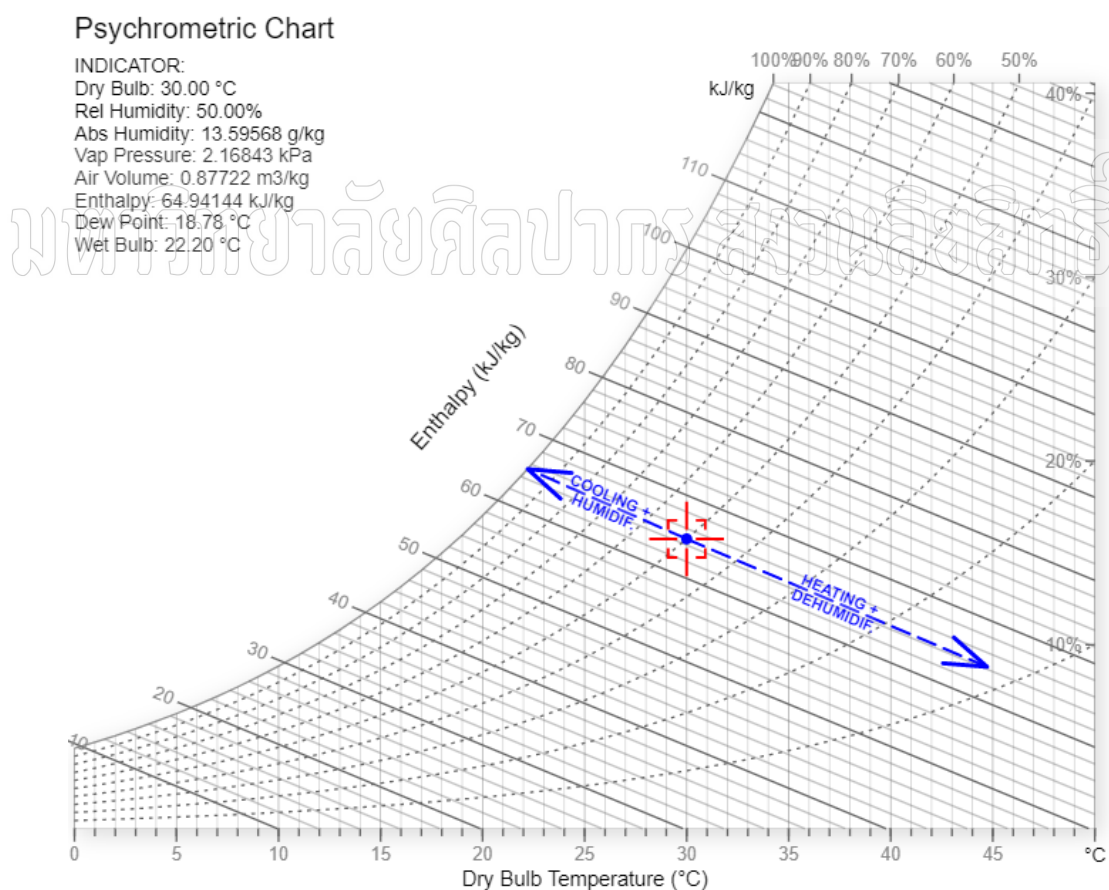
(ที่มา: <https://hvac-eng.com/interactive-psychrometric-chart/>)

2) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศให้สูงขึ้น หรือ ต่ำลง โดยค่า Enthalpy คงที่ วิธีนี้ค่า Absolute Humidity จะเปลี่ยนแปลงไป ตามแนวทะแยงของเส้น Enthalpy (รูปที่ 4-10)

วิธีการทำให้อากาศเย็นลง โดยใช้การระเหยของน้ำ (Evaporative Cooling) การเปลี่ยนแปลงอากาศในลักษณะนี้ ความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิอากาศลดลง เนื่องจากความร้อนในอากาศถูกนำไปใช้ในการระเหย กลายเป็นความร้อนแฝง ดังนั้น ความร้อนรวมจึงเท่าเดิม การเพิ่มความชื้นในอากาศโดยไม่ต้องใช้ความร้อนจากภายนอกนี้ เรียกว่า **Adiabatic Humidification**

ในทางกลับกัน ถ้านำอากาศมาผ่านสารเคมีที่ดูดความชื้น เช่น Silica Gel จะทำให้ความชื้นในอากาศลดลง และความร้อนแฝงในอากาศจะถูกปล่อยออกมา จะทำให้อุณหภูมิอากาศสูงขึ้น โดยที่ค่า Enthalpy คงเดิม เส้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลักษณะนี้ จะอยู่ในแนวทะแยงของเส้น Enthalpy การลดความชื้นโดยวิธีนี้เรียกว่า **Adiabatic Dehumidification**

การออกแบบที่ใช้หลักการของ Passive Design เช่น การให้ลมพัดผ่านน้ำเพื่อปรับลดอุณหภูมิลงให้เย็นลง เป็นการเปลี่ยนแปลงในลักษณะ **Adiabatic Humidification** ซึ่ง*ไม่ได้ช่วยลดโหลดให้กับระบบปรับอากาศ เพราะความร้อนรวมของอากาศไม่ได้ลดลง*



รูปที่ 4-10 การเพิ่ม หรือ ลดอุณหภูมิ โดยที่ความร้อนรวมเท่าเดิม

(ที่มา: <https://hvac-eng.com/interactive-psychrometric-chart/>)

3) การเพิ่ม-ลดอุณหภูมิอากาศ พร้อมกับการเพิ่ม-ลดปริมาณน้ำ เพื่อให้ได้อากาศที่มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมกับการใช้งาน การเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้จะมีทิศทางของเส้นดังใน (รูปที่ 4-11)

สำหรับการทำให้อากาศมีความชื้นเพิ่มขึ้น หรือ ลดลง โดยที่อุณหภูมิเท่าเดิม เส้นการเปลี่ยนแปลงจะอยู่ในแนวตั้ง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่า **อากาศที่อุณหภูมิเดียวกันไม่ได้มีความร้อนในตัวเท่ากันเพราะขึ้นอยู่กับความชื้น** ดังใน (รูปที่ 4-12) ซึ่งได้รวมลักษณะของกระบวนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้น ความร้อนรวม ของวิธีต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น

Psychrometric Chart

INDICATOR:

Dry Bulb: 30.00 °C

Rel Humidity: 50.00%

Abs Humidity: 13.59568 g/kg

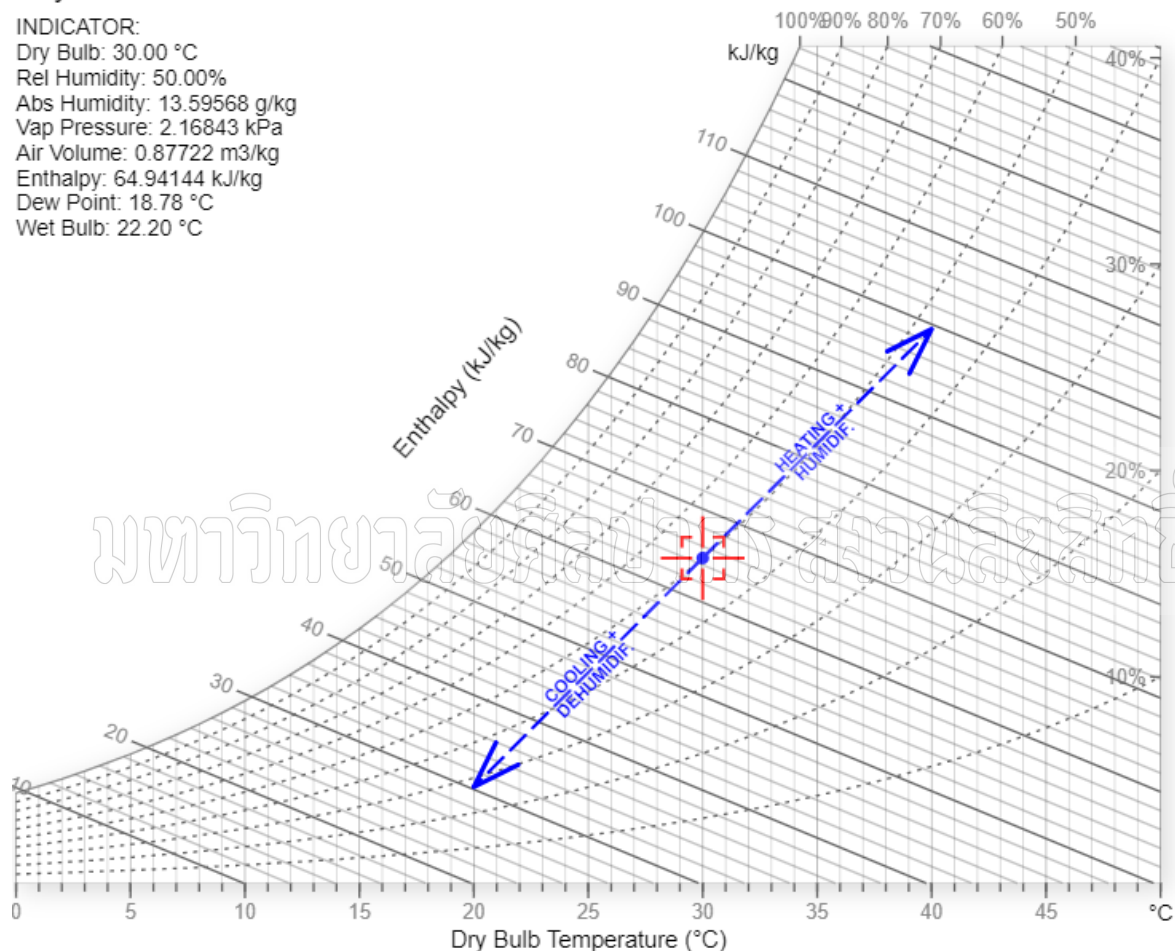
Vap Pressure: 2.16843 kPa

Air Volume: 0.87722 m³/kg

Enthalpy: 64.94144 kJ/kg

Dew Point: 18.78 °C

Wet Bulb: 22.20 °C



รูปที่ 4-11 การเพิ่ม-ลดอุณหภูมิ พร้อมกับการเพิ่ม-ลดความชื้นและความร้อนรวมของอากาศ

(ที่มา: <https://hvac-eng.com/interactive-psychrometric-chart/>)

Psychrometric Chart

INDICATOR:

Dry Bulb: 30.00 °C

Rel Humidity: 50.00%

Abs Humidity: 13.59568 g/kg

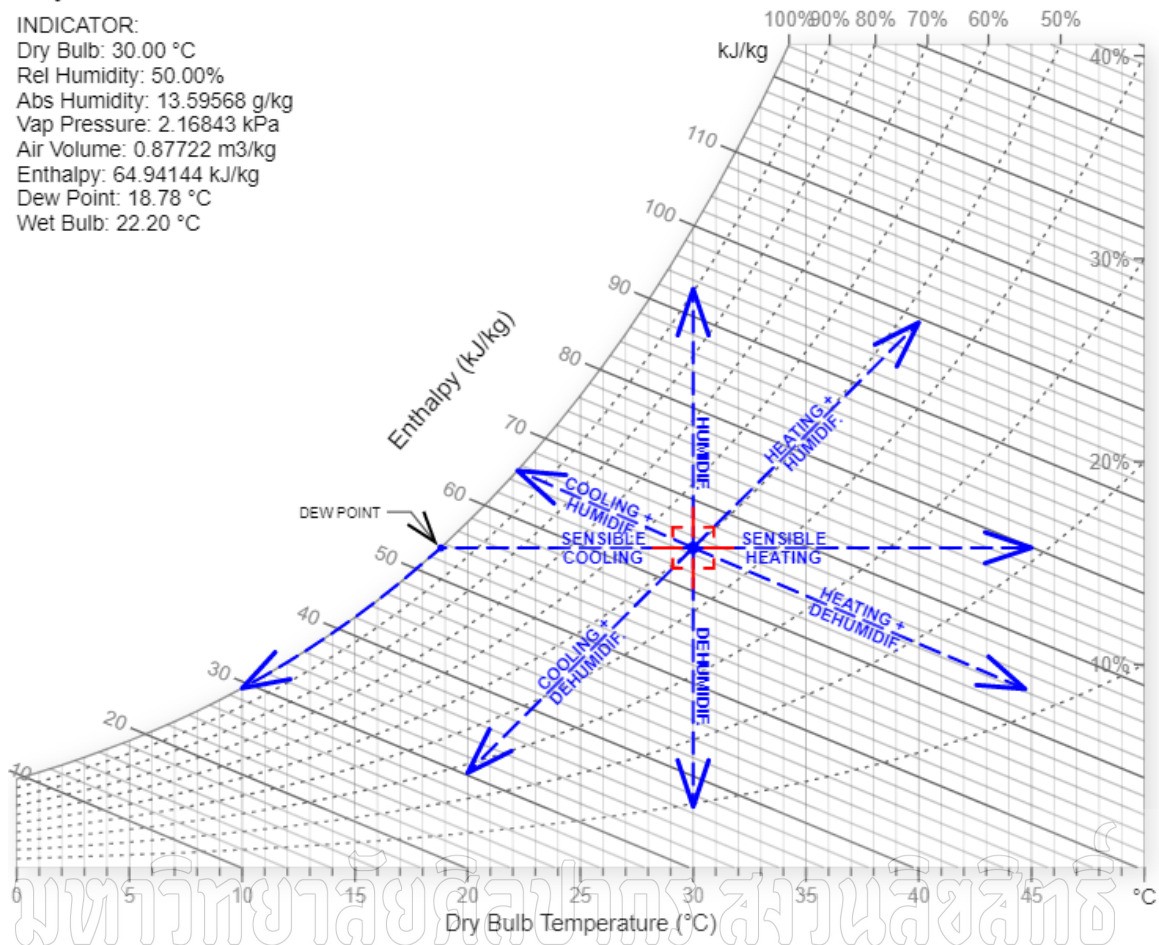
Vap Pressure: 2.16843 kPa

Air Volume: 0.87722 m³/kg

Enthalpy: 64.94144 kJ/kg

Dew Point: 18.78 °C

Wet Bulb: 22.20 °C



รูปที่ 4-12 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้น

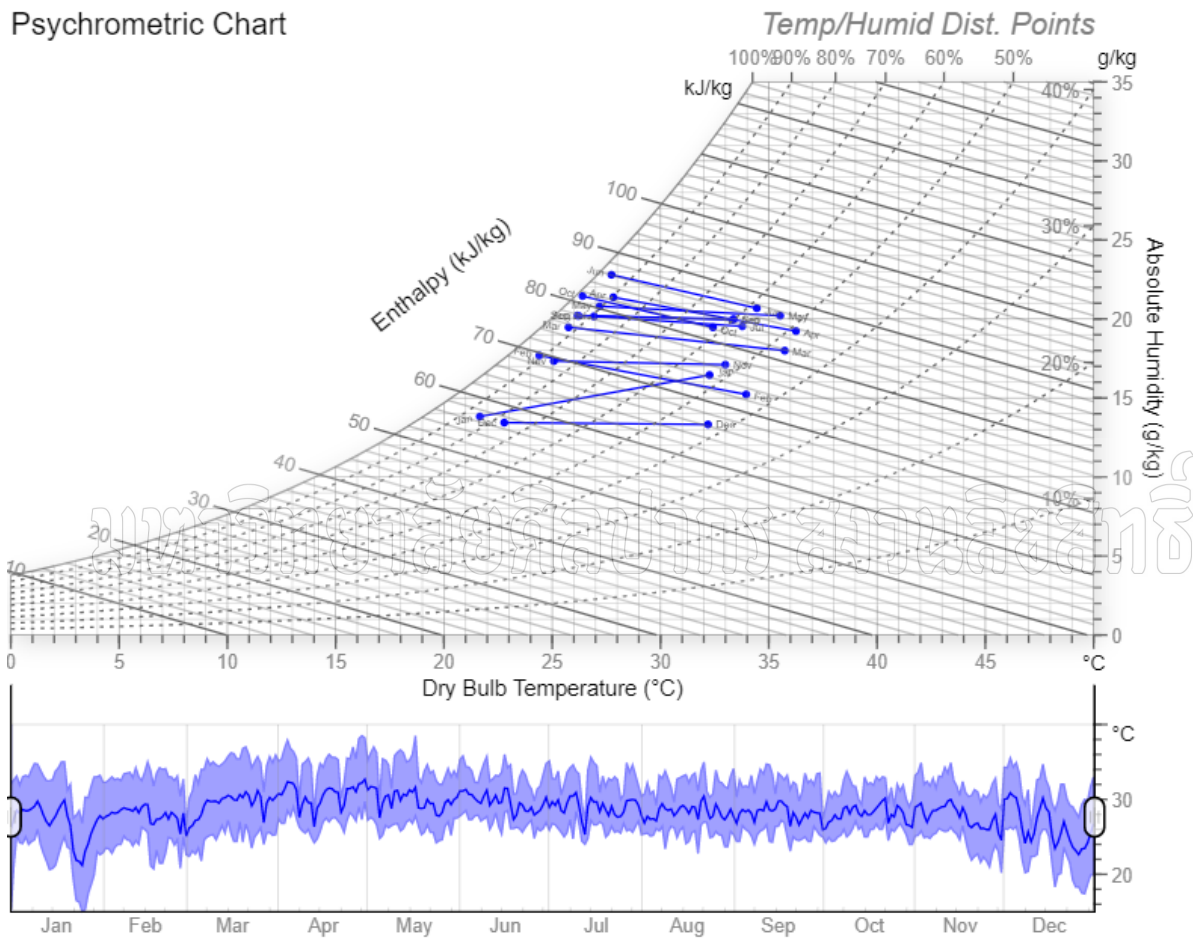
(ที่มา: <https://hvac-eng.com/interactive-psychrometric-chart/>)

4.3 การใช้แผนภูมิไฮโครเมตริกเพื่อการวิเคราะห์สภาพภูมิอากาศ

ในแผนภูมิไฮโครเมตริกแบบ Interactive มักจะมีข้อดี คือ สามารถนำเข้าไฟล์ข้อมูลภูมิอากาศ มาวิเคราะห์อุณหภูมิและความชื้นของอากาศในพื้นที่ซึ่งจะทำการออกแบบได้โดยตรง

ตัวอย่างใน (รูปที่ 4-13) เป็นการแสดงข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นของอากาศในกรุงเทพมหานคร โดยใช้ไฟล์ .epw (EnergyPlus Weather File) โดยเลือกให้แสดงผลทั้ง 12 เดือน แต่ละเส้นจะแสดงจุดที่ อุณหภูมิสูงสุด-ความชื้นต่ำสุด และอุณหภูมิต่ำสุด-ความชื้นสูงสุด ของแต่ละเดือน ซึ่งจะเห็นว่าส่วนใหญ่เป็น อากาศร้อนชื้น มีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างกลางวันและกลางคืนในแต่ละเดือน ประมาณ 7-10 °C

Psychrometric Chart



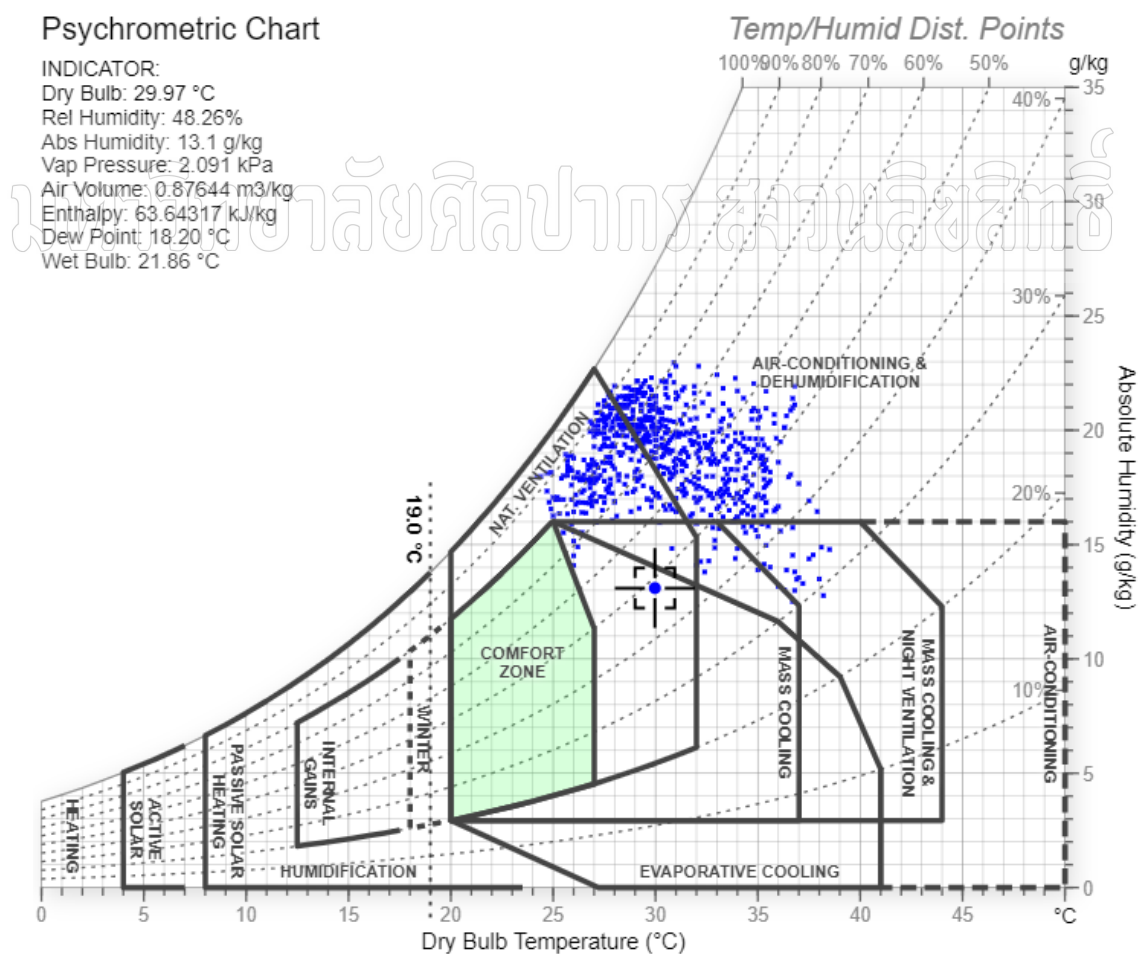
รูปที่ 4-13 การวิเคราะห์อุณหภูมิและความชื้นในแผนภูมิไฮโครเมตริก

(ที่มา: Interactive Psychrometric Chart - HVAC)

4.4 การวิเคราะห์สภาวะสบายและแนวทางการออกแบบ

นอกจากนี้ ข้อดีของแผนภูมิไซโครเมตริก แบบ Interactive คือ มีการทำขอบเขตสภาวะสบาย เพื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิและความชื้นของอากาศในเมืองที่พิจารณาไว้ด้วย ซึ่งบางเว็บไซต์จะมีขอบเขตสภาวะสบายให้เลือกหลายแบบ เช่น Bioclimatic Chart ของ Givoni หรือ มาตรฐาน ASHRAE 55 ซึ่งใช้ในการออกแบบอาคารเขียวมาตรฐาน LEED ของประเทศสหรัฐอเมริกา และมาตรฐาน TREES ของประเทศไทย หรือ มาตรฐาน Outdoor Work Heat Index ซึ่งเป็นมาตรฐานการทำงานภายนอกอาคาร ในสภาวะอากาศร้อนและชื้น เป็นต้น

ตัวอย่างใน (รูปที่ 4-14) เป็นการเลือกเฉพาะอากาศในเดือนเมษายน มาเปรียบเทียบกับขอบเขตสภาวะสบายแบบ Givoni Bioclimatic Chart จะเห็นว่า อุณหภูมิและความชื้นสูงอยู่นอกขอบเขตสภาวะสบาย ซึ่งแนวทางการออกแบบที่ใช้ Passive Design ที่แนะนำ คือ ใช้ลมธรรมชาติ ถ้าอากาศภายนอกมีอุณหภูมิต่ำกว่า 32 °C ส่วนแนวทางการออกแบบที่ใช้ Active Design คือ การใช้วิธีปรับอากาศเข้ามาช่วยให้เกิดความสบายร่วมกับการลดความร้อน เป็นต้น แต่ถ้าเป็นสภาพอากาศที่ร้อนแต่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำไม่เกิน 30% ซึ่งเป็นอากาศแบบร้อนแห้ง แนวทางการออกแบบที่แนะนำ คือ การใช้การระเหยของน้ำ การใช้มวลสารของเปลือกอาคารเพื่อหน่วงความร้อน ร่วมกับการระบายอากาศร้อนในเวลากลางคืน เป็นต้น



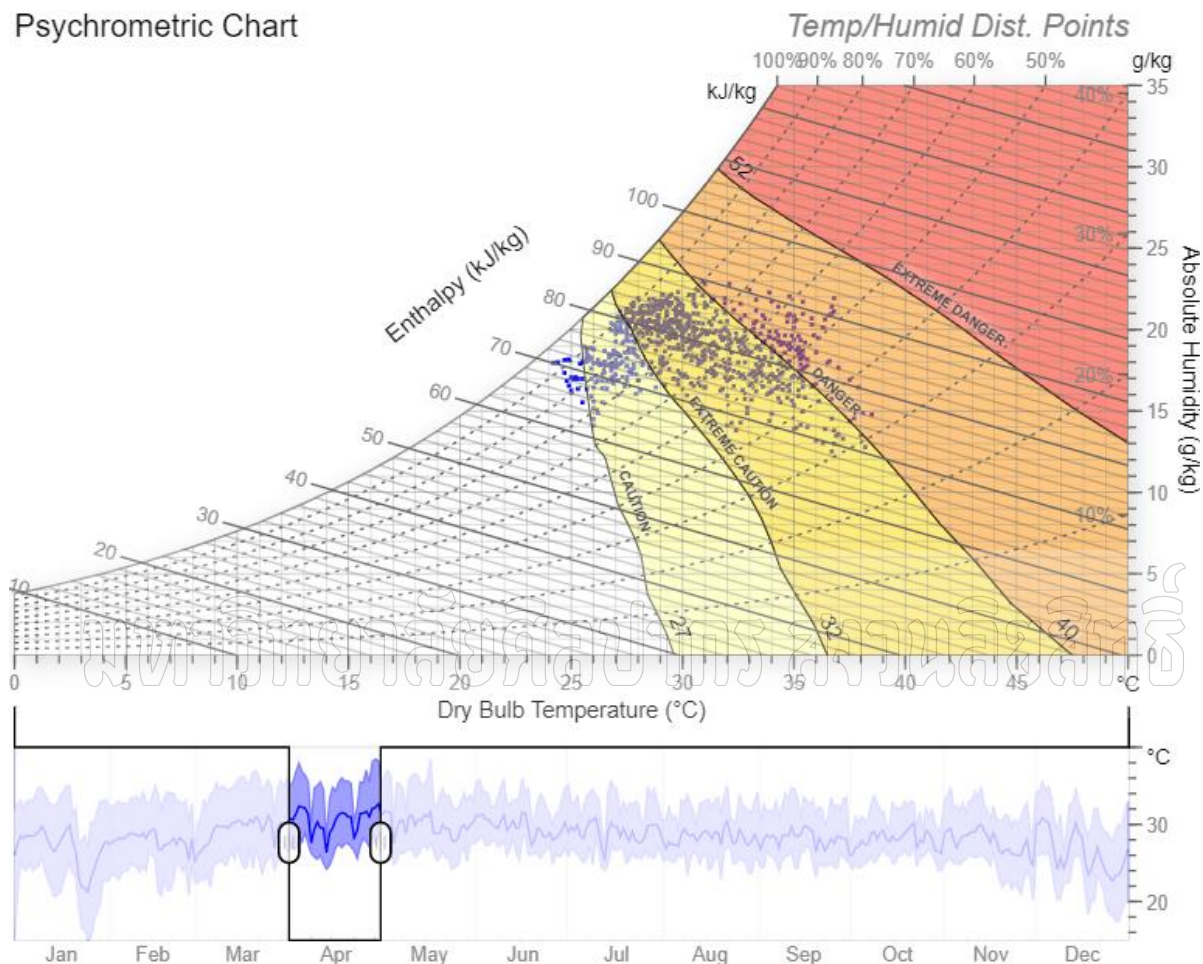
รูปที่ 4-14 การประยุกต์ใช้แผนภูมิไซโครเมตริก ในการวิเคราะห์

แนวทางการออกแบบเปรียบเทียบกับสภาวะสบาย

(ที่มา: Interactive Psychrometric Chart - HVAC)

สำหรับตัวอย่างใน (รูปที่ 4-15) แสดงการวิเคราะห์ความเสี่ยงในการทำงานภายนอกอาคารตาม เกณฑ์ Outdoor Work Heat Index ของ Occupational Safety and Health Administration (OSHA) หน่วยงาน ภายใต้กระทรวงแรงงานของประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่า ภายใต้อุณหภูมิและความชื้นของอากาศ ในกรุงเทพมหานคร ในเดือนเมษายน เช่น ที่อุณหภูมิ 35 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50% ผู้ที่ทำงานภายนอกจะรู้สึก เหมือนกับอากาศมีอุณหภูมิ 40 °C เพราะเหงื่อระเหยยาก

Psychrometric Chart



รูปที่ 4-15 การประยุกต์ใช้แผนภูมิไซโครเมตริกเปรียบเทียบกับ Outdoor Work Heat Index

4.5 ข้อสังเกตเพิ่มเติม (Notes)

จากการทบทวนหนังสือ ตำรา Psychrometric Chart หลายเล่ม พบว่า ค่าบนแกนแนวตั้งทางด้าน ขวาของแผนภูมิจะแสดง มวลของไอน้ำที่มีอยู่ในมวลของอากาศแห้ง หน่วย : กรัมต่อกิโลกรัมของอากาศแห้ง (g/kg. dry air) หรือ kg/kg ตรงกันทุกเล่ม แต่มีการใช้ศัพท์ในภาษาอังกฤษ ที่แตกต่างกัน ดังนี้

ใน *Thermal Design of Buildings* โดย Szokolay (1987, p.10) ใช้คำว่า **Absolute Humidity** โดยหมายถึง ปริมาณไอน้ำ (Vapor Content) ในอากาศ มีหน่วยเป็น กรัมของไอน้ำต่อกิโลกรัมของอากาศแห้ง (g/kg)

แต่ใน *ASHRAE Handbook - Fundamentals* (2017, p1.8) ได้อธิบายศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับความชื้นแตกต่างกันออกไป คือ

- **Humidity Ratio** คือ อัตราส่วนมวลของไอน้ำต่อมวลของอากาศแห้ง (Dry Air) หน่วย : g/kg
- **Absolute Humidity** คือ อัตราส่วนมวลของไอน้ำต่อปริมาตรของอากาศ หน่วย : g/m³
- **Specific Humidity** คือ อัตราส่วนมวลของไอน้ำต่อมวลของอากาศชื้น (Moist Air) หน่วย : g/kg

และใช้คำว่า **Humidity Ratio** ในแผนภูมิ ASHRAE Psychrometric Chart (p.1.11)

ส่วนใน *เอกสาร ตำราฝึกอบรมผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน* ของ กระทรวงพลังงาน (p.1-6) ได้อธิบายคำว่า อัตราส่วนความชื้น “หมายถึง มวลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศแห้ง 1 kg หรือ มวลของไอน้ำที่มีอยู่ต่อมวลของอากาศแห้ง จะเรียกว่า อัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio) หรือ ความชื้นจำเพาะ (Specific Humidity) หรือ ความชื้นสมบูรณ์ (Absolute Humidity)” และใช้คำว่า **Specific Humidity** สำหรับแกนในแนวดิ่ง ของแผนภูมิ (p.1-10)

ในบทความวิชาการ ของสมาคมวิศวกรรมปรับอากาศ (สุริชัย ภัทรกิจนรินทร์ และ รวี งามโชคชัย เจริญ, 2546) ใช้แผนภูมิไซโครเมตริก ที่แสดงด้วยค่า Humidity Ratio โดยอธิบายคำว่า **Humidity Ratio** ว่า “หมายถึงน้ำหนักปอนด์ของความชื้น ต่อน้ำหนักปอนด์ของอากาศแห้ง หรือ จะแสดงเป็น เกรนส์ (grains) ของความชื้นต่อปอนด์ของอากาศแห้งก็ได้” (grain คือ หน่วยวัดน้ำหนัก 7,000 grains = 1 ปอนด์)

นอกจากนี้ ในแผนภูมิ Interactive Psychrometric Chart ที่มีผู้พัฒนาขึ้น ก็มีทั้งการใช้คำว่า Absolute Humidity (รูปที่ 4-1) และ Humidity Ratio (รูปที่ 4-2)

อย่างไรก็ตาม แม้จะมีการใช้ศัพท์ที่แตกต่างกัน ดังกล่าวข้างต้นในแผนภูมิไซโครเมตริก แต่ในทุกแผนภูมิ ก็หมายถึงสิ่งเดียวกัน คือ ค่าอัตราส่วนของมวลไอน้ำต่อมวลของอากาศแห้ง ซึ่งมีหน่วย คือ g/kg (dry air) หรือ kg/kg หรือ lb/lb หรือ grains/lb

4.6 สรุป

แผนภูมิไซโครเมตริก เป็นเครื่องมือที่ช่วยให้เกิดความเข้าใจในตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความร้อนและความชื้นของอากาศ ทำให้สามารถเข้าใจหลักการออกแบบอาคารประหยัดพลังงาน ทั้งวิธีการ Passive Design และ Active Design สามารถใช้แผนภูมิเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ภูมิอากาศของสถานที่ซึ่งจะออกแบบเปรียบเทียบกับสภาวะสบาย และเลือกกลยุทธ์ในการออกแบบได้อย่างเหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร.รวี งามโชคชัยเจริญ วิศวกรปรับอากาศดีเด่น ของสมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการอ่าน และให้ข้อคิดเห็นในการเขียนเนื้อหาบทนี้

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน. **ความร้อนเบื้องต้น - ตำราฝึกอบรมผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (ผขพ) ด้านความร้อน** หลักสูตร "ผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน อาวุโส ภาควิชา (ความร้อน)" เข้าถึงได้จาก
http://www2.dede.go.th/bhrd/old/file_handbook.html
- สุริชัย ภัทรกิจนรินทร์ และ รวี งามโชคชัยเจริญ. **มารู้จักกับ Psychrometric Chart กันเถอะ!** บทความวิชาการชุดที่ 8 ของ สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศ, หน้า 42-94. 2546. เข้าถึงได้จาก
<http://www.acat.co.th>
- ASHRAE. **2017 ASHRAE Handbook Fundamentals**. SI Edition. Atlanta, GA.
- Cowan Henry J. and Smith Peter R. **Environmental Systems**. New York : Van Nostrand Reinhold, 1983.
- Interactive Psychrometric chart. Available from <http://andrewmarsh.com/software/psychro-chart-web/>
- Interactive Psychrometric chart. Available from <https://hvac-eng.com/interactive-psychrometric-chart/>
- Lechner, Norbert. **Heating, Cooling, Lighting Design Methods for Architects**. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- McMullan R. **Environmental Science in Building**. London : The Macmillan Press, 1983.
- Online Psychrometric chart. Available from <http://www.flycarpet.net/en/PsyOnline>.
- Szokolay S.V. **Thermal Design of Buildings**. Canberra: RAIA Education division, 1987.

แบบฝึกหัด

การอ่านค่าต่าง ๆ จาก Psychrometric Chart

ให้หาค่าจากแผนภูมิไซโครเมตริกแบบกระดาษ หรือใช้ Interactive Psychrometric Chart

โจทย์ข้อ 1 เทอร์โมมิเตอร์อ่านอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่ 20°C และอุณหภูมิกระเปาะเปียกอ่าน 15°C ให้หาค่าความชื้นสัมพัทธ์และความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ

(อ่านค่าความชื้นสัมพัทธ์ได้ 59% และความชื้นสัมบูรณ์ได้ 8.6 g/kg)

โจทย์ข้อ 2 อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศอ่านได้ 20°C และอุณหภูมิกระเปาะเปียกอ่านได้ 15°C เมื่อนำอากาศมาทำให้ร้อนถึง 26°C โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น หรือ Absolute Humidity ค่าของอุณหภูมิกระเปาะเปียกและความชื้นสัมพัทธ์จะเปลี่ยนแปลงเป็นเท่าใด

(เมื่ออุณหภูมิกระเปาะแห้งอ่านได้ 26°C อ่านค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกได้ 17°C ความชื้นสัมพัทธ์จาก 59% ลดลงเป็น 41%)

โจทย์ข้อ 3 ถ้านำอากาศที่ 20°C DB และ 15°C WB มาทำให้เย็นลงที่ 10°C DB จะเกิดการควบแน่นของไอน้ำเกิดขึ้นหรือไม่

(อากาศที่ 20°C DB และ 15°C WB จะมีความชื้นสัมพัทธ์ 100% ที่ประมาณ 11.5°C ถ้ายังลดอุณหภูมิต่อไปอีก ไอน้ำจะกลั่นตัวที่อุณหภูมิ 10°C จะมีค่าความชื้นสัมบูรณ์ 7.6 g/kg)

โจทย์ข้อ 4 ให้หาค่าการเปลี่ยนแปลงของ Enthalpy เมื่ออากาศมีอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่ 20°C และอุณหภูมิกระเปาะเปียกที่ 15°C ถ้าถูกนำมาทำให้ร้อนถึง 26°C โดยไม่เปลี่ยนแปลงความชื้น

(ค่าความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศที่ 20°C DB และ 15°C WB จะมีค่าความชื้นสัมบูรณ์ 8.6 g/kg ค่า Enthalpy จาก 42 kJ/kg จะเพิ่มเป็น 48 kJ/kg ที่ 26°C ดังนั้น ต้องเพิ่มความร้อน 6 kJ/kg)

โจทย์ข้อ 5 ให้หาค่าการเปลี่ยนแปลง Enthalpy ของอากาศที่ 20°C DB และ 15°C WB ถ้าทำให้อากาศเย็นลงเป็น 10°C

(ความชื้นจะถูกกลั่นตัวออกมาเป็นหยดน้ำ เมื่ออากาศเย็นลงถึง 10°C ค่า Enthalpy ของอากาศที่ 10°C DB และ 10°C WB มีค่า 29 kJ/kg ดังนั้น จะมีความร้อนที่ถูกปล่อยออกมา 13 kJ/kg)

โจทย์ข้อ 6 ถ้านำอากาศที่ 0°C DB ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 80% มาทำให้ร้อนที่ 26°C DB ความชื้นสัมพัทธ์จะเปลี่ยนเป็นเท่าใด และถ้าต้องการทำให้อากาศ 26°C DB มีความชื้นสัมพัทธ์ที่ 25% เพื่อให้เกิดสภาวะน่าสบาย จะต้องเติมน้ำเข้าไปในอากาศเท่าใด

(อากาศ 0°C DB ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 80% มีค่าความชื้นสัมบูรณ์ที่ 3 g/kg และที่อุณหภูมิ 26°C DB ค่าความชื้นสัมพัทธ์จะเป็น 14% ถ้าต้องการความชื้นสัมพัทธ์ที่ 25% ต้องเพิ่มความชื้นเป็น 5.3 g/kg ดังนั้น ต้องเติมน้ำเข้าไปอีก 2.3 g/kg)



มหาวิทยาลัยศิลปากร งามเลิศ

5. สภาวะสบาย (Thermal Comfort)

การออกแบบให้เกิดสภาวะสบาย คือ ไม่ร้อนหรือหนาวเกินไปนั้นเป็นเป้าหมายที่สำคัญอันหนึ่งใน การออกแบบสถาปัตยกรรม เพราะเกี่ยวข้องกับคุณภาพชีวิต ความสบายสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน และเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานในการปรับอากาศโดยตรง ดังนั้น วัตถุประสงค์ของบทนี้ คือ

- (1) เพื่อให้เข้าใจปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะสบาย และวิธีการหาค่าสภาวะสบาย
- (2) เพื่อให้รู้จักมาตรฐานต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบเพื่อให้เกิดสภาวะสบาย
- (3) เพื่อให้สามารถประเมินความสอดคล้องของงานที่ออกแบบเปรียบเทียบกับมาตรฐาน

ASHRAE 55

- (4) เพื่อให้ทราบแนวคิดในการออกแบบสภาวะสบายในอาคารเขียว

5.1 กลไกการทำงานของร่างกาย

ร่างกายมนุษย์จะผลิตความร้อนอย่างต่อเนื่องจากขบวนการเผาผลาญในร่างกาย (Metabolism) ซึ่งมีปริมาณความร้อนมากน้อยขึ้นอยู่กับกิจกรรมที่กระทำ โดยทั่วไป อาจจะประมาณ 100 W ในขณะนอนหลับ จะมีค่าประมาณ 70 W และขณะนั่งทำงานที่โต๊ะ จะประมาณ 130 W โดยร่างกายจะต้องรักษาความสมดุลของอุณหภูมิภายในให้คงที่ ที่ระดับ 37 °C ความร้อนที่ร่างกายผลิตขึ้นจะต้องถ่ายเทออกสู่สภาพแวดล้อม โดยวิธีการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) การพาความร้อน (Convection) การนำความร้อน (Conduction) และการระเหยกลายเป็นไอ (Evaporation) เพื่อรักษาสมดุล

$$\text{Metabolism} \pm \text{Radiation} \pm \text{Convection} \pm \text{Conduction} \pm \text{Evaporation} = 0$$

ถ้าผลรวมของการถ่ายเทความร้อนมีค่าเป็นบวก จะมีความร้อนสะสมในร่างกาย ทำให้อุณหภูมิในร่างกายสูงขึ้น ซึ่งจะสูงได้ไม่เกิน 1 °C อุณหภูมิที่ผิวของร่างกาย จะไม่เท่ากันทุกส่วน แต่ทั่วไปอยู่ประมาณ 31-34 °C ถ้ามีแนวโน้มว่าอุณหภูมิในร่างกายจะสูงเกิน ร่างกายจะทำงานอัตโนมัติ โดยหลอดเลือดที่ไปเลี้ยงที่ผิวหนังจะขยาย (Vasodilation) ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นและระบายความร้อนออกไป ในทางกลับกันถ้าผลของการถ่ายเทความร้อนเป็นลบ หลอดเลือดจะหดตัว (Vasoconstriction) เพื่อลดการถ่ายเทความร้อน แต่ถ้ายังไม่รักษาสมดุลได้พอ ในสภาพร้อนจัด ร่างกายจะระบายความร้อนด้วยการขับเหงื่อออกมา เพื่อให้ระเหยเป็นไอ ช่วยลดความร้อน และถ้าอากาศเย็นจัด ร่างกายจะเพิ่มการทำงานของกล้ามเนื้อโดยการทำให้สั่น

การระบายความร้อนจากร่างกายสู่สภาพแวดล้อม จึงขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิอากาศ การเคลื่อนที่ของอากาศ ความชื้นในอากาศ และการแผ่รังสีไปยังสิ่งที่อยู่โดยรอบ โดยกลไกในการแผ่รังสี

5.2 ความหมายของสภาวะสบาย (Thermal Comfort – Definition)

American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineering (ASHRAE) หรือ สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทยได้ให้คำอธิบายว่า สภาวะสบาย คือ สภาวะของจิตใจที่แสดงถึงความพึงพอใจต่อสภาพแวดล้อมนั้น ในด้านความร้อนหนาว ซึ่งเป็นการประเมินจากความรู้สึก

“Thermal Comfort is that condition of mind that expresses satisfaction with the thermal environment and is accessed by subjective evaluation” (ASHRAE, ASHRAE 55-2017, p3.)

5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะสบาย

แม้จะมีงานวิจัยจำนวนมากพยายามค้นหาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสภาวะสบาย มาเป็นเวลานาน แต่ปัจจัยหลัก (Primary Factors) ที่ยังคงได้รับการยอมรับว่า มีผลต่อสภาวะสบายจนถึงปัจจุบัน ประกอบด้วย 6 ปัจจัย ได้แก่

- 1) อุณหภูมิอากาศ (Air Temperature)
- 2) ความชื้นในอากาศ (Humidity)
- 3) ความเร็วลม (Air Speed)
- 4) อุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย (Mean Radiant Temperature)
- 5) ความเป็นฉนวนของเสื้อผ้าที่สวมใส่ (Clothing Insulation)
- 6) อัตราการเผาผลาญของร่างกาย (Metabolic Rate)

โดยปัจจัยที่ 1-4 เป็นปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม (Environmental Factors) ส่วนปัจจัยที่ 5 และ 6 เป็นปัจจัยด้านบุคคล (Personal Factors)

ปัจจัยรอง (Secondary Factors) ที่มีผลต่อสภาวะสบาย

ได้มีการศึกษาเพื่อหาปัจจัยอื่นที่มีผลต่อสภาวะสบาย เช่น ความคาดหวังต่อสภาวะร้อนหนาวภายในสถานที่นั้น ร่ายกาย อาหาร ความเคยชิน หรือ ปรับตัวกับสภาพอากาศ (Acclimatization) รูปร่างของร่างกาย (Body Build) ช่วงเวลากลางวัน-กลางคืน (Diurnal Rhythm) ความแตกต่างของเผ่าพันธุ์ หรือ สีผิว เช่น คนผิวดำ ผิวขาว ที่อาจมีผลต่อการดูดกลืนความร้อนต่างกัน เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยพบว่ามีผลแต่ในงานวิจัยไม่สามารถยืนยันได้ แต่อย่างไรก็ตาม การออกแบบเพื่อให้เกิดสภาวะสบายในปัจจุบันยังคงเน้นที่ปัจจัยหลัก 6 ตัว ข้างต้น

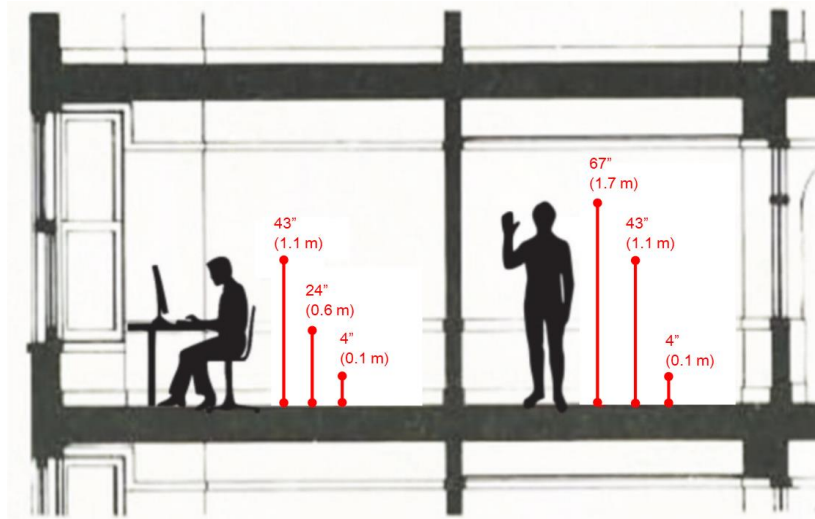
5.4 การหาค่าปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะสบาย

ในการออกแบบอาคารใหม่ ผู้ออกแบบสามารถกำหนดค่าของปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะสบายได้ตามต้องการ เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แล้วนำค่าเหล่านี้มาเปรียบเทียบกับแผนภูมิสภาวะสบาย หรือ ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ประเมินผลก็จะสามารถทราบได้ แต่ในอาคารเดิมที่ต้องการทราบว่าผู้อยู่ในสภาวะสบายหรือไม่ จำเป็นต้องหาข้อมูลของปัจจัยทั้ง 6 ที่มีผลต่อสภาวะสบาย เพื่อนำมาใช้ประกอบการพิจารณา และใช้ในการแก้ไขปัญหา หากพบว่าผู้อยู่อาคารรู้สึกไม่สบาย

(1) อุณหภูมิอากาศ (Air Temperature)

หน่วยวัดเป็น องศาเซลเซียส จะเป็นอุณหภูมิอากาศของตำแหน่งหนึ่งที่กำหนด ซึ่งได้แก่จุดที่อยู่ใกล้ ๆ หรือ รอบตัวของผู้ที่เป็นตัวแทนในการศึกษา (Representative Occupant) หมายความว่า ถ้ามีคนนั่งอยู่ใกล้แนวหน้าต่าง 5 คน อาจไม่มีความจำเป็นต้องวัดอุณหภูมิที่โต๊ะของทั้ง 5 คน แต่วัดที่ตำแหน่งของคนเดียว ซึ่งสามารถเป็นตัวแทนของคนที่นั่งบริเวณใกล้เคียงหน้าต่าง และวัดต่อไปที่ตำแหน่งของผู้ที่เป็นตัวแทนของคนทำงานในโซนกลางห้อง เป็นต้น กล่าวคือ การวัดอุณหภูมิอากาศ ต้องวัด ณ ตำแหน่งที่คนทำกิจกรรม

การวัดค่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย (Average Air Temperature, T_a) ใน ASHRAE 55-2017 ได้กำหนดให้ต้องวัดอุณหภูมิที่ความสูง 3 ระดับ คือ ที่ข้อเท้า ที่เอว และที่ศีรษะ 3 ตำแหน่ง แล้วมาเฉลี่ยกัน (รูปที่ 5-1) สำหรับคนนั่ง วัดที่ 0.1, 0.6, 1.1 ม. จากพื้น สำหรับคนยืน วัดที่ 0.1, 1.1, 1.7 ม. จากพื้น และจะต้องเป็นค่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยของช่วงเวลานานกว่า 3 นาที แต่ไม่เกิน 15 นาที



รูปที่ 5-1 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย

(ที่มา: ASHRAE 55-2013 User's Manual)

(2) ความชื้นในอากาศ (Humidity)

ความชื้นในอากาศ สามารถวัดโดยใช้ค่าที่เกี่ยวข้องกับความชื้นได้หลายแบบ เช่น อุณหภูมิกระเปาะเปียก ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิจุดน้ำค้าง เป็นต้น แต่ที่นิยมใช้ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ หน่วยวัดเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยจะต้องวัดมาจากตำแหน่งเดียวกันกับที่วัดอุณหภูมิอากาศ หรือ วัดพร้อมกับอุณหภูมิอากาศ แล้วนำมาเฉลี่ย

(3) ความเร็วลม (Air Speed)

เป็นการวัดค่าความเร็วลมเฉลี่ย (Average Air Speed, V_a) ของจุดเดียวกันกับอุณหภูมิอากาศข้างต้น คือ ที่ความสูง 3 ระดับ คือ ที่ข้อเท้า ที่เอว และที่ศีรษะของคนนั่ง หรือ คนยืน โดยจะต้องเฉลี่ยความเร็วลมในช่วงเวลามากกว่า 1 นาที แต่ไม่เกิน 3 นาที

(4) อุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย (Mean Radiant Temperature, $\overline{T}_r$)

โดยนิยามความหมายของ Mean Radiant Temperature ($\overline{T}_r$) ใน ASHRAE 55-2017 คือ อุณหภูมิของห้องที่ปิดล้อมด้วยระนาบสีดำ อุณหภูมิที่ระนาบทั้งหมดเท่ากัน และมีการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการแผ่รังสีกับผู้ที่อยู่ในห้องนั้น ในปริมาณเดียวกับการอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง แสดงหน่วยเป็น องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) หรือ องศาเคลวิน (K)

ค่าของ Mean Radiant Temperature ได้จากการนำอุณหภูมิของแต่ละระนาบที่อยู่โดยรอบตัวคน (ที่กำลังศึกษา) มาคูณถ่วงน้ำหนักกับค่าของ Angle Factor (ซึ่งเป็น Solid Angle) ด้วยสมการ ดังนี้ (2017 ASHRAE Handbooks - Fundamentals, p 9.11)

$$\overline{T}_r^4 = T_1^4 F_{p-1} + T_2^4 F_{p-2} + \dots + T_N^4 F_{p-N}$$

$$\overline{T}_r = \text{Mean Radiant Temperature, K}$$

$$T_N = \text{อุณหภูมิที่ผนัง ของผนัง N, K}$$

$$F_{p-N} = \text{Angle Factor ระหว่างคนไปที่ผนัง N}$$

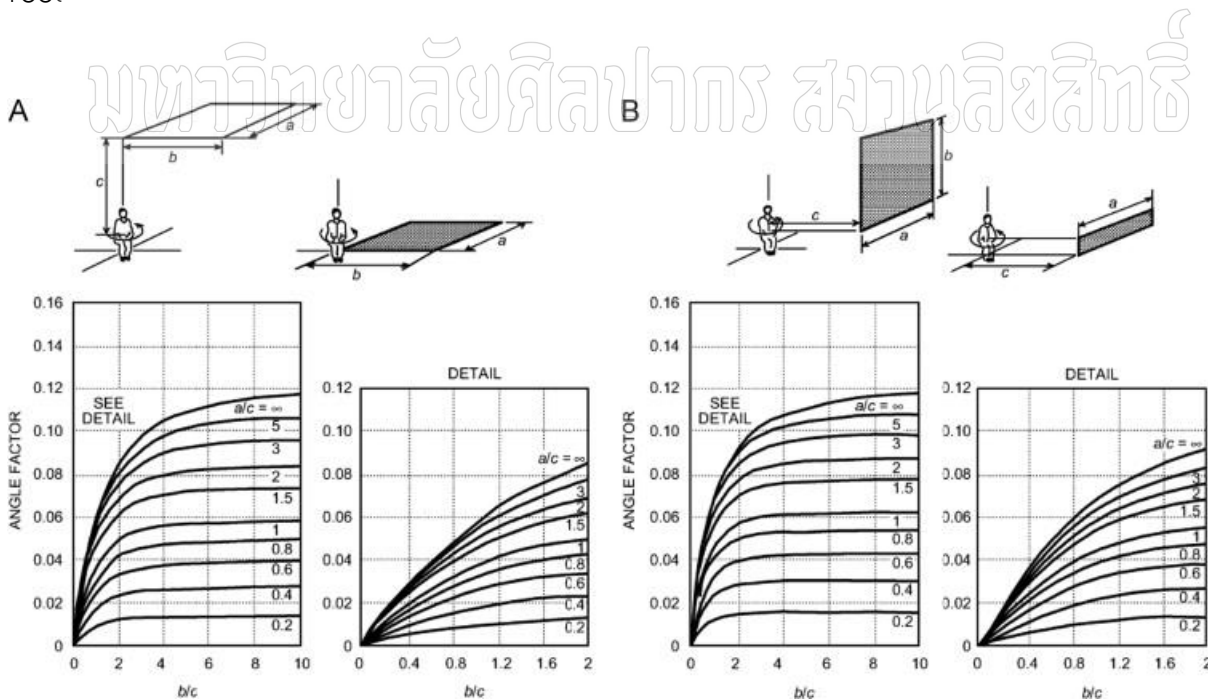
แต่เนื่องจากค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ระนาบต่าง ๆ ในห้อง เช่น ผนัง เพดาน ไม่ได้แตกต่างกันมาก เช่น อาจจะมีเพียง 5 องศาเซลเซียส (K) (หรือ = 5 °C) ผลลัพธ์ที่คำนวณได้จึงมีความแตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้น สมการจึงได้ปรับให้ง่ายขึ้นเป็นดังนี้

$$\overline{T_r} = T_1 F_{p-1} + T_2 F_{p-2} + \dots + T_N F_{p-N}$$

อย่างไรก็ตาม ก็ต้องนำ Angle Factor มาคูณถ่วงน้ำหนักกับอุณหภูมิของแต่ละระนาบ เพื่อสะท้อนอิทธิพลในด้านความร้อน-เย็นของแต่ละระนาบที่มีผู้ใช้อาคาร

Angle Factor เป็นค่าที่ขึ้นกับระยะห่างระหว่างตำแหน่งผู้ใช้อาคารกับระนาบต่าง ๆ ที่พิจารณา (รูปที่ 5-2) กับท่าทางของคน เช่น นั่ง หรือ ยืน (เพราะจะมีพื้นที่ผิวกาย ที่การแลกเปลี่ยนความร้อนกับโดยรอบไม่เท่ากัน เช่น แขน ขา) คนที่นั่งใกล้ผนังที่ร้อน จะได้รับอิทธิพลจากความร้อนของผนังนั้น (Angle Factor จะมีค่ามาก) มากกว่าคนที่นั่งห่างออกไป (Angle Factor มีค่าต่ำ) โดยค่าของ Angle Factor ที่นำไปคูณถ่วงน้ำหนักกับทุกระนาบ เมื่อรวมกันแล้วจะต้องเท่ากับ 1

ดังนั้น จะเห็นว่าการคำนวณหา Mean Radiant Temperature ด้วยเครื่องคิดเลข ค่อนข้างยุ่งยาก จึงมักใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยการระบุระยะห่างจากคนไปยังระนาบต่าง ๆ และท่าทางนั่งหรือยืน ก็จะได้ค่า Mean Radiant Temperature (รูปที่ 5-3, 5-4) เช่น การใช้โปรแกรม ASHRAE Thermal Comfort Tool



รูปที่ 5-2 วิธีการหาค่า Angle Factor โดยใช้แผนภูมิ

MRT Calculator

Room dimensions

Room width (x) m

Room length (y) m

Room height m

Occupant

x m

y m

Facing

Azimuth

☒ Seated ☐ Standing

	Temperature °C	Emis	Wall view factor
Wall 1	23.8	0.90	0.050
	☒ window/panel		
Wall 2	24	0.90	0.049
	☐ window/panel		
Wall 3	24	0.90	0.156
	☐ window/panel		
Wall 4	24	0.90	0.049
	☐ window/panel		
Ceiling	24	0.90	0.145
	☐ window/panel		
Floor	28	0.90	0.403
	☐ panel		

View factor total

MRT °C

☒ Set MRT

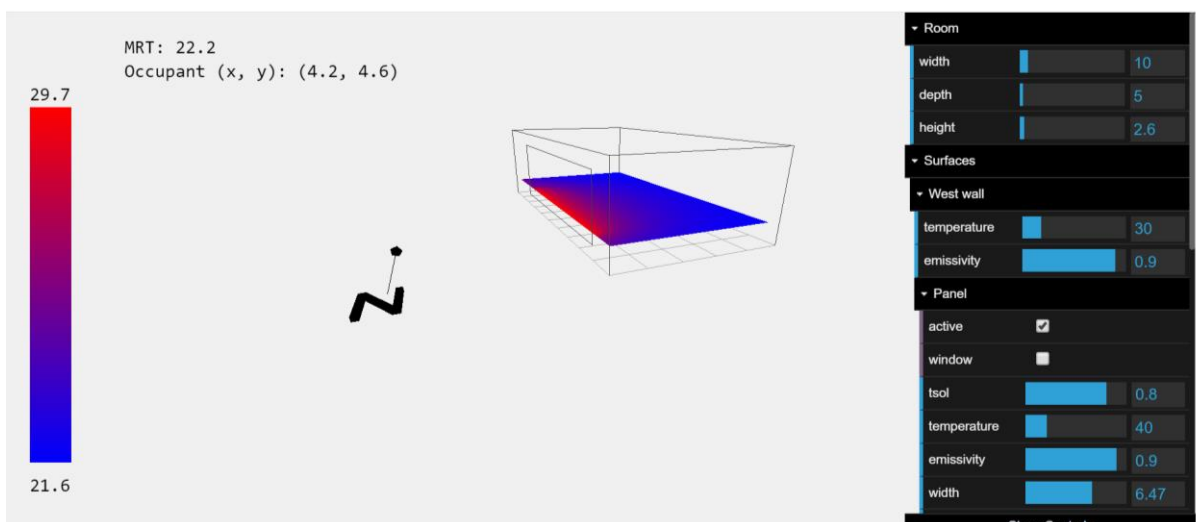
Glass/panel data

Temperature °C	Emis	Width m	Height m	Centered	Sill m	L. Jamb* m	Window view factor
12.5	0.84	8	3	☒	0.50	1.00	0.1413

*distance from left edge of wall to left jamb when viewed from inside the room

View factors are calculated based on Fanger, P.O., "Thermal Comfort", McGraw-Hill, 1972

มหาวิทยาลัยศิลปากร งามนิตยสิทธิ์
รูปที่ 5-3 การหาค่า Mean Radiant Temperature (MRT)
โดยใช้โปรแกรม ASHRAE Thermal Comfort Tool



รูปที่ 5-4 การหาค่า Mean Radiant Temperature (MRT)
โดยใช้โปรแกรม CBE Thermal Comfort Tool

สำหรับการสำรวจอาคารเดิมเพื่อหา Operative Temperature โดยใช้ Globe Thermometer จะต้องนำค่าอุณหภูมิที่วัดได้มาคำนวณหา Mean Radiant Temperature ด้วยสมการ ดังนี้ (2017 (ASHRAE Handbook -Fundamentals (SI), p 37.32)

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + \frac{1.10 \times 10^8 v_a^{0.6}}{\epsilon D^{0.4}} (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273$$

$\bar{t}_r$ = mean radiant temperature, °C

t_g = globe temperature, °C

V_a = air velocity, m/s

t_a = air temperature, °C

D = globe diameter, m

ϵ = emissivity (0.95 for black globe)

หรือ ใช้อุณหภูมิของแต่ละระนาบโดยรอบที่วัดได้ (ผนัง หน้าต่าง เพดาน พื้น) กับระยะห่างระหว่างตำแหน่งคนที่เป็นตัวแทนผู้ใช้อาคารกับแต่ละระนาบ มาคำนวณหา Mean Radiant Temperature ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น ASHRAE Thermal Comfort Tool หรือ CBE Thermal Comfort Tool

(5) ความเป็นฉนวนของเสื้อผ้า (Clothing Insulation, I_{cl})

ความเป็นฉนวนของเสื้อผ้าที่สวมใส่ มีผลต่อความรู้สึกร้อนหนาวโดยตรง มีหน่วยวัด เป็น clo
1 clo = 0.155 ตารางเมตรองศาเซลเซียสต่อวัตต์ ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)

ASHRAE 55 ได้กำหนด วิธีการหา ค่า clo ไว้หลายวิธี เช่น

- ใช้ค่า clo ของเสื้อผ้าที่ ASHRAE จัดไว้เป็นชุด เช่น (รูปที่ 5-5)

ชุดเสื้อแขนสั้น + กางเกงขาสั้น = 0.57 clo

ชุดเสื้อแขนยาว + กางเกงขาสั้น = 0.61 clo

ชุดเสื้อแขนยาว + กางเกงขาสั้น + เสื้อกันหนาวแขนยาว = 1.01 clo

Table 5.2.2.2A Clothing Insulation I_{cl} Values for Typical Ensembles

Clothing Description	Garments Included ^a	I_{cl} , clo
Trousers	(1) Trousers, short-sleeve shirt	0.57
	(2) Trousers, long-sleeve shirt	0.61
	(3) #2 plus suit jacket	0.96
	(4) #2 plus suit jacket, vest, t-shirt	1.14
	(5) #2 plus long-sleeve sweater, t-shirt	1.01
	(6) #5 plus suit jacket, long underwear bottoms	1.30
Skirts/dresses	(7) Knee-length skirt, short-sleeve shirt (sandals)	0.54
	(8) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, full slip	0.67
	(9) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, half slip, long-sleeve sweater	1.10
	(10) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, half slip, suit jacket	1.04
	(11) Ankle-length skirt, long-sleeve shirt, suit jacket	1.10
Shorts	(12) Walking shorts, short-sleeve shirt	0.36
Overalls/coveralls	(13) Long-sleeve coveralls, t-shirt	0.72
	(14) Overalls, long-sleeve shirt, t-shirt	0.89
	(15) Insulated coveralls, long-sleeve thermal underwear tops and bottoms	1.37
Athletic	(16) Sweat pants, long-sleeve sweatshirt	0.74
Sleepwear	(17) Long-sleeve pajama tops, long pajama trousers, short 3/4 length robe (slippers, no socks)	0.96

a. All clothing ensembles, except where otherwise indicated in parentheses, include shoes, socks, and briefs or panties. All skirt/dress clothing ensembles include pantyhose and no additional socks.

รูปที่ 5-5 การใช้ค่า clo จากการจัดเสื้อผ้าเป็นชุดของ ASHRAE

(ที่มา: ASHRAE 55-2017)

- ใช้ค่า clo ของเสื้อผ้าแต่ละชิ้นนำมาบวกรวมกัน เช่น กางเกงในชาย (0.04) เสื้อเชิ้ตแขนสั้น (0.19) กางเกงขาสั้นผ้าหนา (0.24) ถุงเท้า (0.03) รองเท้า (0.02) รวมกันจะได้ 0.52 (รูปที่ 5-6)

- ใช้การหาค่า clo จากสภาพอากาศภายนอกในเวลา 6.00 น. โดยอ่านจากแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอากาศภายนอกและการแต่งกาย (รูปที่ 5-7) ซึ่งเป็นการคิดว่าคนจะแต่งกายก่อนออกจากบ้านมาทำงานตามสภาพอากาศข้างนอกในเวลาเช้า

- ใช้การทดสอบค่าจากหุ่นจำลองคนที่ปล่อยความร้อนออกมาผ่านผิวหนังเสมือนคนจริง (Manikin) (รูปที่ 5-8)

Table 5.2.2.2B Garment Insulation I_{clu}

Garment Description ^a	I_{clu} , clo	Garment Description ^a	I_{clu} , clo
Underwear		Dress and Skirts ^b	
Bra	0.01	Skirt (thin) mm	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), i.e., jumper	0.27
Half slip	0.14	Short-sleeve shirtdress (thin)	0.29
Long underwear bottoms	0.15	Long-sleeve shirtdress (thin)	0.33
Full slip	0.16	Long-sleeve shirtdress (thick)	0.47
Long underwear top	0.20	Sweaters	
Footwear		Sleeveless vest (thin)	0.13
Ankle-length athletic socks	0.02	Sleeveless vest (thick)	0.22
Panty hose/stockings	0.02	Long-sleeve (thin)	0.25
Sandals/thongs	0.02	Long-sleeve (thick)	0.36
Shoes	0.02	Suit Jackets and Vests ^c	
Slippers (quilted, pile lined)	0.03	Sleeveless vest (thin)	0.10
Calf-length socks	0.03	Sleeveless vest (thick)	0.17
Knee socks (thick)	0.06	Single-breasted (thin)	0.36
Boots	0.10	Single-breasted (thick)	0.44
Shirts and Blouses		Double-breasted (thin)	0.42
Sleeveless/scoop-neck blouse	0.12	Double-breasted (thick)	0.48
Short-sleeve knit sport shirt	0.17	Sleepwear and Robes	
Short-sleeve dress shirt	0.19	Sleeveless short gown (thin)	0.18
Long-sleeve dress shirt	0.25	Sleeveless long gown (thin)	0.20
Long-sleeve flannel shirt	0.34	Short-sleeve hospital gown	0.31
Long-sleeve sweatshirt	0.34	Short-sleeve short robe (thin)	0.34
Trousers and Coveralls		Short-sleeve pajamas (thin)	0.42
Short shorts	0.06	Long-sleeve long gown (thick)	0.46
Walking shorts	0.08	Long-sleeve short wrap robe (thick)	0.48
Straight trousers (thin)	0.15	Long-sleeve pajamas (thick)	0.57
Straight trousers (thick)	0.24	Long-sleeve long wrap robe (thick)	0.69
Sweatpants	0.28		
Overalls	0.30		
Coveralls	0.49		

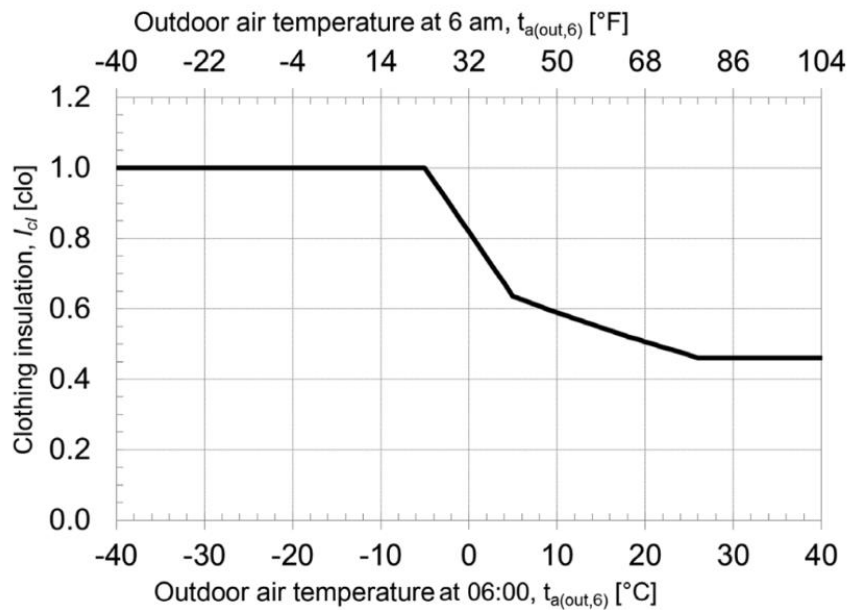
a. "Thin" refers to garments made of lightweight, thin fabrics often worn in the summer; "thick" refers to garments made of heavyweight, thick fabrics often worn in the winter.

b. Knee-length dresses and skirts

c. Lined vests

รูปที่ 5-6 ค่า Clo ของเสื้อผ้าแต่ละชิ้น กำหนดใน ASHRAE 55-2017

(ที่มา: ASHRAE 55-2017, p. 8)



รูปที่ 5-7 แผนภูมิการหาค่า clo ของเสื้อผ้าจากอุณหภูมิอากาศในเวลา 6.00 น.

(ที่มา: Standard 55-2013 User's Manual, p.29)



รูปที่ 5-8 การใช้หุ่นจำลองคน (Manikin) เพื่อหาค่า clo ในห้องทดสอบสภาวะสบาย

(ที่มา: <https://cutt.ly/oyW9gCi>)

ความเป็นฉนวนของเก้าอี้ ในกรณีที่คนนั่ง การคิดค่า clo ยังสามารถนำความเป็นฉนวนของเก้าอี้มารวมกับค่า clo เสื้อผ้าได้ด้วย เพราะเก้าอี้ที่ใช้ทดสอบค่า clo ต่าง ๆ นั้น เป็นค่าที่ได้จากการนั่งบนเก้าอี้ที่สานเป็นตาข่ายโปร่ง (Net Chair) เช่น (รูปที่ 5-9)

เก้าอี้สำนักงานมาตรฐาน + 0.10 clo

เก้าอี้ผู้บริหาร + 0.15 clo

แต่ทั้งนี้ มาตรฐาน ASHRAE 55 ก็ระบุไม่ได้บังคับ และการที่จะสามารถบอกความเป็นฉนวนของเก้าอี้เพิ่มได้ เมื่อคนนั่งสวมเสื้ออยู่ระหว่าง 0.5-1.2 clo เท่านั้น

การหาค่า clo ทุกวิธีดังกล่าวข้างต้น สามารถหาได้จากโปรแกรม CBE Thermal Comfort Tool แต่สิ่งที่ควรตระหนัก คือ ถ้ามีผู้ใช้อาคารที่แต่งกายหลากหลาย โดยมีความแตกต่างกันมากกว่า 0.15 clo จะนำค่า clo มาเฉลี่ยกันไม่ได้ ต้องคิดเป็นคนละค่ากัน หรือ คนละกลุ่ม

Table 5.2.2.2C Added Insulation when Sitting on a Chair

(Applicable to Clothing Ensembles with Standing Insulation Values of $0.5 \text{ clo} < I_{cl} < 1.2 \text{ clo}$)

Net chair ^a	0.00 clo
Metal chair	0.00 clo
Wooden side-arm chair ^b	0.00 clo
Wooden stool	+0.01 clo
Standard office chair	+0.10 clo
Executive chair	+0.15 clo

a. A chair constructed from thin, widely spaced cords that provide no thermal insulation.

b. *Informative Note:* This chair was used in most of the basic studies of thermal comfort that were used to establish the PMV-PPD index.

รูปที่ 5-9 ค่า Clo-Value ของเก้าอี้

(ที่มา: ASHRAE 55-2017, p.8)

มหาวิทยาลัยศิลปากร งามลิขสิทธิ์

(6) ค่าอัตราการเผาผลาญของร่างกาย (Metabolic Rate)

กิจกรรมที่กระทำจะเป็นตัวกำหนดอัตราการเผาผลาญของร่างกาย มีหน่วยเป็น met

1 met = 58.2 วัตต์ต่อตารางเมตรของผิวกาย (W/m^2)

พื้นที่ผิวกายของมนุษย์ เรียกว่า DuBois Surface Area ผู้ใหญ่ทั่วไปที่สูง 1.73 m น้ำหนัก 70 kg จะมีพื้นที่ผิวกาย หรือ DuBois Surface Area = 1.8 m^2

ดังนั้น ถ้าคนนั่งมีอัตราการเผาผลาญ เท่ากับ 1.3 met ความร้อนที่ปล่อยออกมาจะ เท่ากับ $1.3 \times 58.2 \times 1.8 = 136$ วัตต์

ค่า Metabolic Rates สามารถหาได้จากตารางที่ ASHRAE จัดทำไว้ (รูปที่ 5-10) หรือ หาจากโปรแกรม CBE ถ้ายังทำกิจกรรมที่ใช้แรงมาก อัตราการเผาผลาญก็จะยิ่งสูง (รูปที่ 5-11)

ในกรณีที่ผู้อยู่ในอาคารคนเดียวกัน ทำกิจกรรมมากกว่า 1 อย่าง การคิดค่า met ต้องมาคูณกับสัดส่วนเวลาที่ใช้ เช่น ยกของ (2.1 met) เท่ากับ 30 นาที ยืนจัดแฟ้ม (1.4 met) เท่ากับ 15 นาที เดินไปมา (1.7 met) เท่ากับ 15 นาที กิจกรรมที่ทำในเวลา 1 ชั่วโมงจะมีค่าเท่ากับ $(2.1 \times 0.5) + (1.4 \times 0.25) + (1.7 \times 0.25) = 1.825 \text{ met}$ หรือ 1.8 met

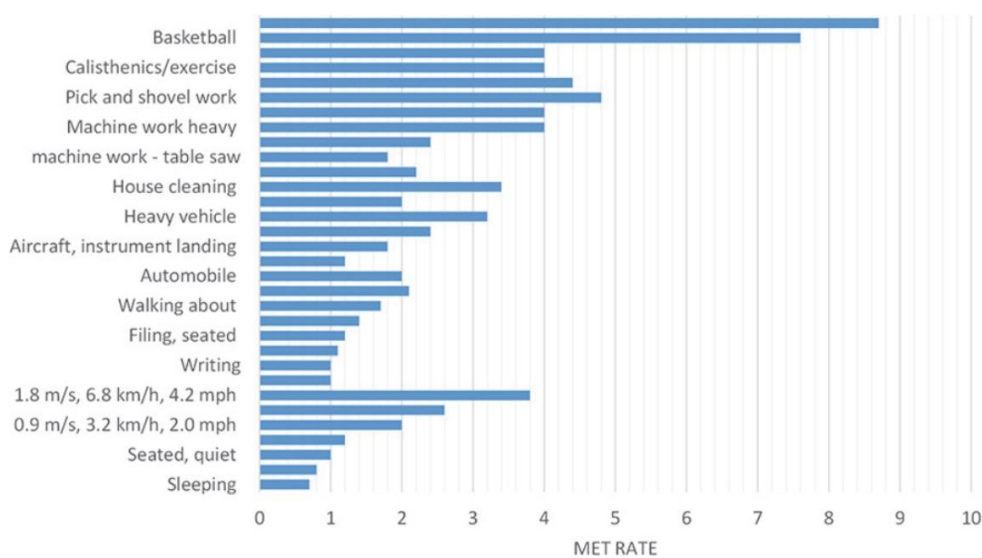
และในกรณีที่กลุ่มคนที่ทำกิจกรรมที่มีค่า met ไม่เท่ากัน จะนำมาหาค่าเฉลี่ยไม่ได้ ต้องแยกเป็นคนละค่า เช่น กลุ่มเดินเล่นพักผ่อน กับกลุ่มนั่งรับประทานอาหาร

Table 5.2.1.2 Metabolic Rates for Typical Tasks

Activity	Metabolic Rate	
	Met Units	W/m ²
Resting		
Sleeping	0.7	40
Reclining	0.8	45
Seated, quiet	1.0	60
Standing, relaxed	1.2	70
Walking (on level surface)		
0.9 m/s, 3.2 km/h, 2.0 mph	2.0	115
1.2 m/s, 4.3 km/h, 2.7 mph	2.6	150
1.8 m/s, 6.8 km/h, 4.2 mph	3.8	220
Office Activities		
Reading, seated	1.0	55
Writing	1.0	60
Typing	1.1	65
Filing, seated	1.2	70
Filing, standing	1.4	80
Walking about	1.7	100
Lifting/packing	2.1	120

รูปที่ 5-10 ตัวอย่างบางส่วนของค่า Met สำหรับกิจกรรมต่าง ๆ

(ที่มา: ASHRAE 55-2017, p. 6)



รูปที่ 5-11 การเปรียบเทียบค่า met ของกิจกรรมต่าง ๆ

(ที่มา: Standard 55-2013 User's Manual, p.26)

5.5 การหาสภาวะสบายจาก Bioclimatic Chart

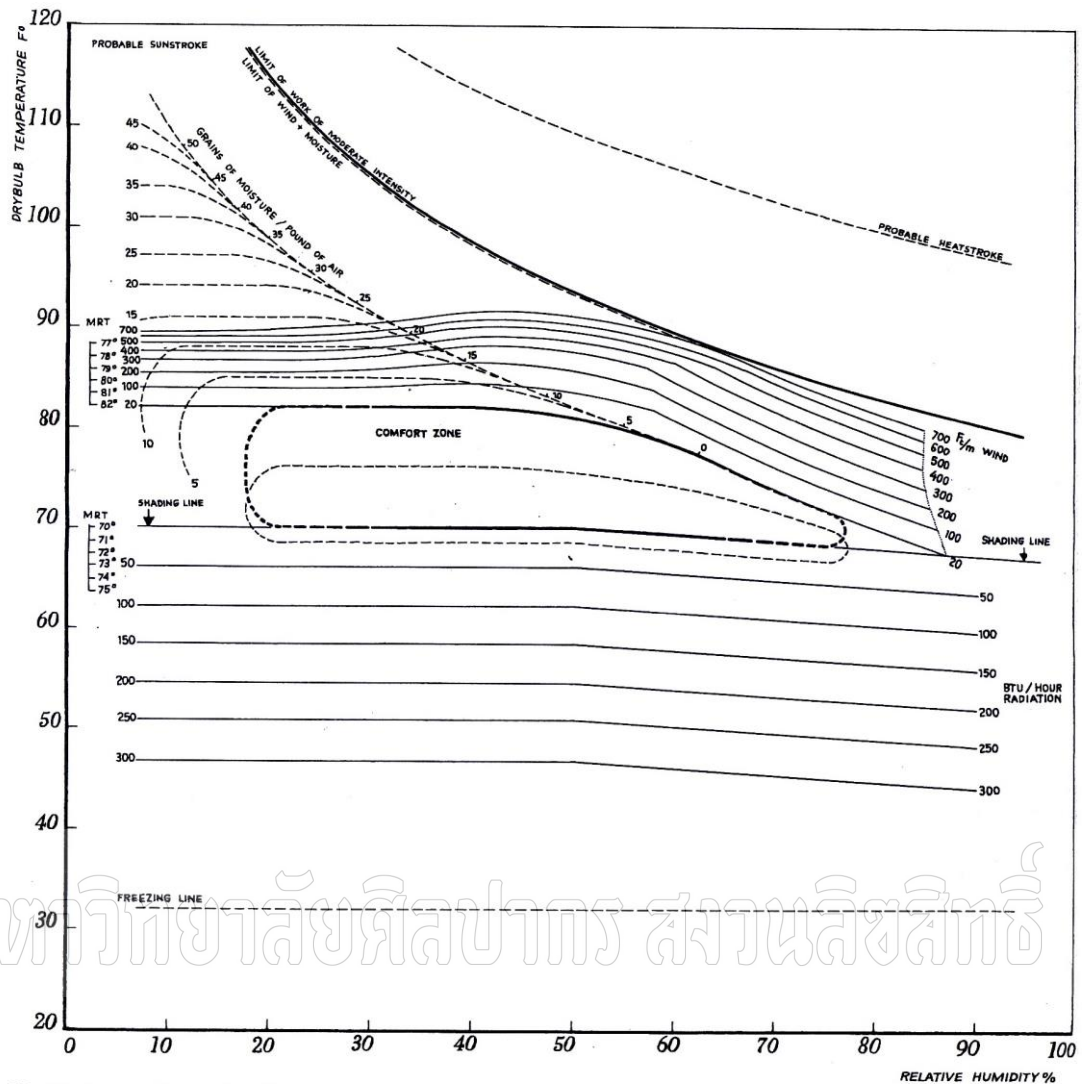
Bioclimatic Chart เป็นแผนภูมิสภาวะสบายที่พัฒนาโดย Victor Olgyay ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1963 ในหนังสือ Design with Climate โดยได้กำหนดขอบเขตสภาวะสบาย จากการใช้แกนแนวดิ่งแสดงอุณหภูมิอากาศ และแกนแนวนอนแสดงความชื้นสัมพัทธ์ โดยมีขอบเขตสภาวะสบายอยู่ที่อุณหภูมิอากาศประมาณ 70-82 °F (21.1 - 27.7 °C) และความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 18-77% (รูปที่ 5-12)

ขณะเดียวกัน ก็ได้แสดงว่าขอบเขตสภาวะสบายนี้อาจปรับได้ โดยถ้าอุณหภูมิอากาศสูงขึ้นก็สามารถชดเชยด้วยการเพิ่มความเร็วลมในช่วง จาก 20 ถึง 700 ฟุตต่อนาที (f/m) หรือ ถ้าอุณหภูมิอากาศต่ำลง ก็ต้องชดเชยอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย (Mean Radiant Temperature, MRT) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในแผนภูมินี้ได้รวมปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม 4 ตัว คือ 1) อุณหภูมิอากาศ 2) ความชื้นสัมพัทธ์ 3) ความเร็วลม และ 4) อุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย

Olgyay ได้กล่าวว่า แผนภูมินี้ทำขึ้นสำหรับใช้กับคนในประเทศสหรัฐอเมริกา ที่อยู่ในเขตอากาศแบบปานกลาง (U.S. Moderate Zone Inhabitants) ซึ่งสวมใส่ชุดแบบอยู่ในอาคาร และนั่งทำงาน หรือ ทำงานเบา ๆ ในอาคาร อยู่สูงจากระดับน้ำทะเลไม่เกิน 1,000 ฟุต (304.8 เมตร) ในกรณีที่นำแผนภูมินี้ไปใช้ที่อื่นนอกเหนือจากที่ละติจูดประมาณ 40° ขีดจำกัดล่างของอุณหภูมิที่สบายจะต้องเพิ่มขึ้น $\frac{3}{4}$ °F (0.4 °C) ต่อทุก ๆ 5 ละติจูดที่ต่ำลงมา และขีดจำกัดบนต้องขยับเพิ่มขึ้นเท่ากัน แต่ทั้งนี้ต้องไม่สูงกว่า 85 °F (27.7 °C) (Olgyay, 1963, p.19)

ดังนั้น หากพิจารณาตามวิธีการดังกล่าว ที่ละติจูด 15° ซึ่งใกล้เคียงกับกรุงเทพมหานคร ขอบเขตสภาวะสบายจะมี ขีดจำกัดล่างที่ 23.2 °C และขีดจำกัดบนที่ 27.7 °C

แผนภูมิ Bioclimatic ของ Victor Olgyay ได้ถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง ในการศึกษาวิจัยด้านสภาวะสบายเป็นจำนวนมาก และบางครั้งได้มีการนำแผนภูมินี้มาเป็นฐาน และปรับขอบเขตสภาวะสบายขึ้นใหม่ เมื่อเงื่อนไขด้านปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อมและปัจจัยที่เกี่ยวกับบุคคลที่เปลี่ยนไป แต่ปัจจุบันการออกแบบอาคารเพื่อให้เกิดสภาวะสบายส่วนใหญ่โดยเฉพาะอาคารเขียวมักนิยมใช้มาตรฐาน ASHRAE 55 เป็นเกณฑ์



45. Bioclimatic Chart, for U.S. moderate zone inhabitants.

รูปที่ 5-12 แผนภูมิ Bioclimatic Chart ของ Victor Olgyay (1963)

(ที่มา: Olgyay, Design with Climate, p.22)

5.6 การหาสภาวะสบายโดยใช้อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายนอก

ในหนังสือ Thermal Design of Buildings (Szokolay, 1987, p.13) ได้กล่าวว่า สภาวะสบายเป็นความรู้สึกด้านความร้อนหนาวที่อยู่ตรงกลาง (Thermal Neutrality, T_n) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เฉลี่ยมาจากกลุ่มตัวอย่างขนาดใหญ่ สภาวะที่รู้สึกไม่ร้อน หรือ หนาว ซึ่งความรู้สึกนี้จะได้รับอิทธิพลจากสภาพอากาศภายนอกที่เคยชิน (Acclimatisation) รวมทั้งพฤติกรรมที่เคยชิน (Habits) ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่รู้สึกกลาง ๆ กับอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายนอกได้ ดังนี้

$$T_n = 17.6 + 0.31 \times T_{av}$$

โดยเงื่อนไข คือ ค่า T_n จะต้องอยู่ในช่วง $18.5^\circ\text{C} < T_n < 28.5^\circ\text{C}$

ความกว้างของแถบสภาวะสบายจะอยู่ที่ ± 2 K ถ้าค่า T_{av} = อุณหภูมิเฉลี่ยรายปี หรือ ± 1.75 K ถ้า T_{av} = อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน

5.7 มาตรฐานในการออกแบบเพื่อให้เกิดสภาวะสบาย

โดยทั่วไปในการออกแบบอาคารให้อยู่ในสภาวะสบาย จะมีการกำหนดว่าจะใช้มาตรฐานใดสำหรับประเทศไทยจะมีมาตรฐาน วสท. 031001-59: มาตรฐานระบบปรับอากาศและระบายอากาศ (Air Conditioning and Ventilation Standard) ซึ่งได้ให้คำแนะนำในการออกแบบสภาวะภายในอาคาร คือ อุณหภูมิการปรับอากาศของอาคารพักอาศัย โรงแรม สำนักงาน โรงเรียน ที่ $24\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ ที่ $55\% \pm 5$ โดยในกรณี มีการควบคุม Mean Radiant Temperature ของพื้นผิวในพื้นที่ปรับอากาศ หรือ ความเร็วกระแสลมในพื้นที่ปรับอากาศ ให้นำผลดังกล่าวมาประกอบการพิจารณาด้วย เลือกใช้ตามความจำเป็น

สำหรับมาตรฐานต่างประเทศที่มักพบ ได้แก่

ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy เป็นมาตรฐานการออกแบบสภาวะสบายของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งสภาพปรับอากาศและไม่ปรับอากาศ แต่มีการใช้แพร่หลายทั่วโลก รวมทั้งในประเทศไทย

ISO 7730: 2005 Ergonomics of the Thermal Environment - Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort เป็นมาตรฐานสากลซึ่งใช้ค่า PMV และ PPD เป็นตัวชี้วัดสภาวะสบาย

EN 16798-3:2017 Energy Performance of Buildings - Ventilation for Buildings - Part 3: For Nonresidential Buildings - Performance Requirements for Ventilation and Room-Conditioning Systems เป็นมาตรฐานในการออกแบบสภาวะสบายตามมาตรฐานยุโรป

CEN Standard EN 15251: 2007 Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings เป็นมาตรฐานในการออกแบบสภาพแวดล้อมภายในอาคาร ที่ครอบคลุมทั้งสภาพแวดล้อมด้านความร้อน แสงสว่าง เสียง

ISO 17772-2017 Energy Performance of Buildings - Indoor Environmental Quality - Part 1. Indoor Environmental Input Parameters for the Design and Assessment of Energy Performance of Building Section A2 เป็นมาตรฐานการออกแบบสภาพแวดล้อมในอาคาร ซึ่งรวมสภาวะสบายเป็นส่วนหนึ่งในมาตรฐานนี้

5.8 สภาวะสบายตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 55

ANSI/ASHRAE Standard 55 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy เป็นมาตรฐานสากลในการออกแบบให้เกิดสภาวะสบายที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง และใช้ในการประเมินอาคารเขียวในระบบ LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) ของประเทศสหรัฐอเมริกา และระบบ TREES (Thai's Rating for Energy and Environmental Sustainability) ของประเทศไทย รวมทั้งมาตรฐานเกี่ยวกับสุขภาวะภายในอาคาร เช่น WELL ของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กำลังได้รับความสนใจในการออกแบบอาคารเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

มาตรฐาน ASHRAE 55 ได้จัดพิมพ์ครั้งแรกใน ปี ค.ศ. 1966 และพิมพ์เผยแพร่อีกในปี ค.ศ. 1974, 1981 และ 1992 และต่อมาในปี ค.ศ. 2004 ได้เริ่มกำหนดให้มีการปรับปรุงเนื้อหาอย่างต่อเนื่อง โดยในการปรับปรุงแต่ละครั้งจะมีการนำภาคผนวกที่ได้เผยแพร่หลังจากออกมาตราฐานแล้วมารวมไว้ในมาตรฐานฉบับต่อไป ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2004 ได้มีการจัดพิมพ์เวอร์ชัน 2004, 2010, 2013 และฉบับล่าสุด คือ 2017

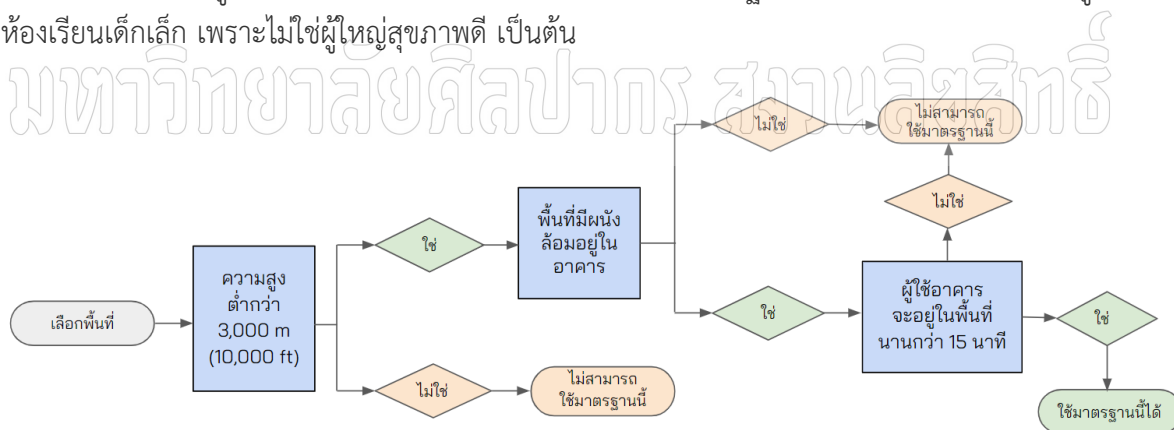
ขอบเขตของการใช้มาตรฐาน ASHRAE 55

ในการใช้มาตรฐานนี้ จะอยู่ภายใต้เงื่อนไข คือ (รูปที่ 5-13)

- ต้องเป็นพื้นที่ซึ่งอยู่สูงจากน้ำทะเลไม่เกิน 3,000 เมตร
- ต้องเป็นพื้นที่ภายในอาคารที่มีผนังปิดล้อม
- ผู้ใช้อาคารต้องอยู่ในพื้นที่นั้นไม่น้อยกว่า 15 นาที
- ผู้ใช้อาคารต้องเป็นผู้ใหญ่ที่สุขภาพดี
- กิจกรรมต้องอยู่ในช่วง 1.0-2.0 met
- เสื้อผ้าต้องมีค่าความเป็นฉนวนน้อยกว่า 1.5 clo และไม่ใช่เสื้อผ้าที่ความชื้นจากผิวกายไม่สามารถระบายได้

สามารถระบายได้

ดังนั้น จะเห็นว่าจะมีหลายสภาวะในการออกแบบที่ไม่สามารถใช้มาตรฐานนี้ได้ เช่น การออกแบบพื้นที่นอกอาคาร หรือ อาคารที่ไม่มีผนัง เช่น ตลาด ศาลา รวมทั้งการออกแบบอาคาร หรือ พื้นที่ใช้สอยบางประเภท เช่น ห้องนอน เพราะการนอนค่า met เท่ากับ 0.7 และโรงกีฬาในร่ม (Gymnasium) เพราะผู้เล่นกีฬาจะมีค่า met สูงกว่าขอบเขตของค่า met ที่ใช้ได้ตามมาตรฐานนี้ การออกแบบห้องพักผู้ป่วย หรือ ห้องเรียนเด็กเล็ก เพราะไม่ใช่ผู้ใหญ่สุขภาพดี เป็นต้น



รูปที่ 5-13 การตรวจสอบเงื่อนไขก่อนใช้ ASHRAE Standard 55

(ที่มา: ASHRAE, Standard 55-2013 User's Manual, p.20)

สภาพแวดล้อมที่ยอมรับว่าสบาย (Acceptable Thermal Comfort Environment)

ASHRAE ได้กำหนดนิยามของ Acceptable Thermal Comfort Environment หรือ สภาพแวดล้อมที่ยอมรับว่าสบาย คือ สภาพแวดล้อมที่คนมากกว่า 80% ในพื้นที่นั้นยอมรับต่อความรู้สึกร้อน-หนาวที่เกิดขึ้น

ทั้งนี้ เพราะร่างกายมนุษย์แต่ละคนจะมีการตอบสนองต่อความรู้สึกร้อน-หนาวไม่เหมือนกันทีเดียว ดังนั้น จึงเป็นไปได้ที่จะมีคน 100% พอใจในสภาพแวดล้อมแบบเดียวกัน

สภาพแวดล้อมที่ยอมรับว่าสบาย เกิดจากอิทธิพลของ 6 ปัจจัย ที่ได้กล่าวข้างต้นรวมกัน

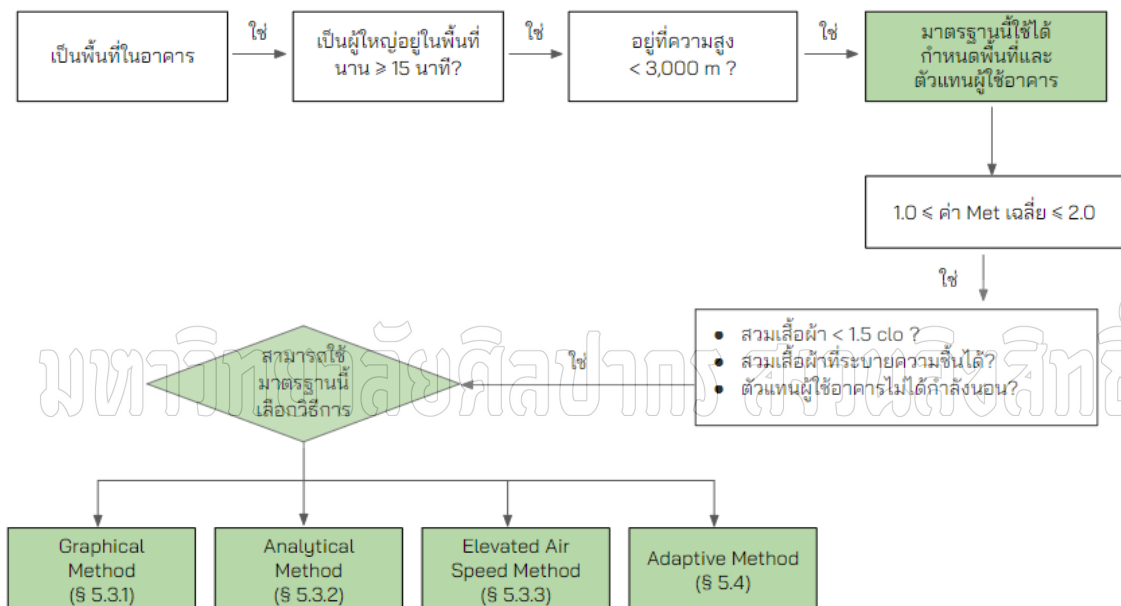
5.9 การวิเคราะห์หาสภาวะสบาย

การวิเคราะห์เพื่อหาว่า อาคารที่ออกแบบจะมีความน่าสบายหรือไม่ ตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 55-2017 สามารถแบ่งได้เป็น 4 วิธี โดยวิธีที่ 1-3 ใช้กับสภาพปรับอากาศ ส่วนวิธีที่ 4 ใช้กับ สภาพไม่ปรับอากาศ (รูปที่ 5-14) ดังนี้

- (1) Graphic Comfort Zone Model
- (2) Analytical Comfort Zone Model
- (3) Elevated Air Speed Comfort Zone Method

ทั้งนี้ในวิธีที่ 1-3 ข้างต้น จะต้องคำนึงถึงการเกิดสภาวะไม่สบายที่บางส่วนของร่างกาย (Local Discomfort) ด้วย

- (4) Adaptive Method



รูปที่ 5-14 วิธีการวิเคราะห์หาสภาวะสบาย 4 วิธี

(ที่มา: Standard 55-2013 User's Manual, p.23)

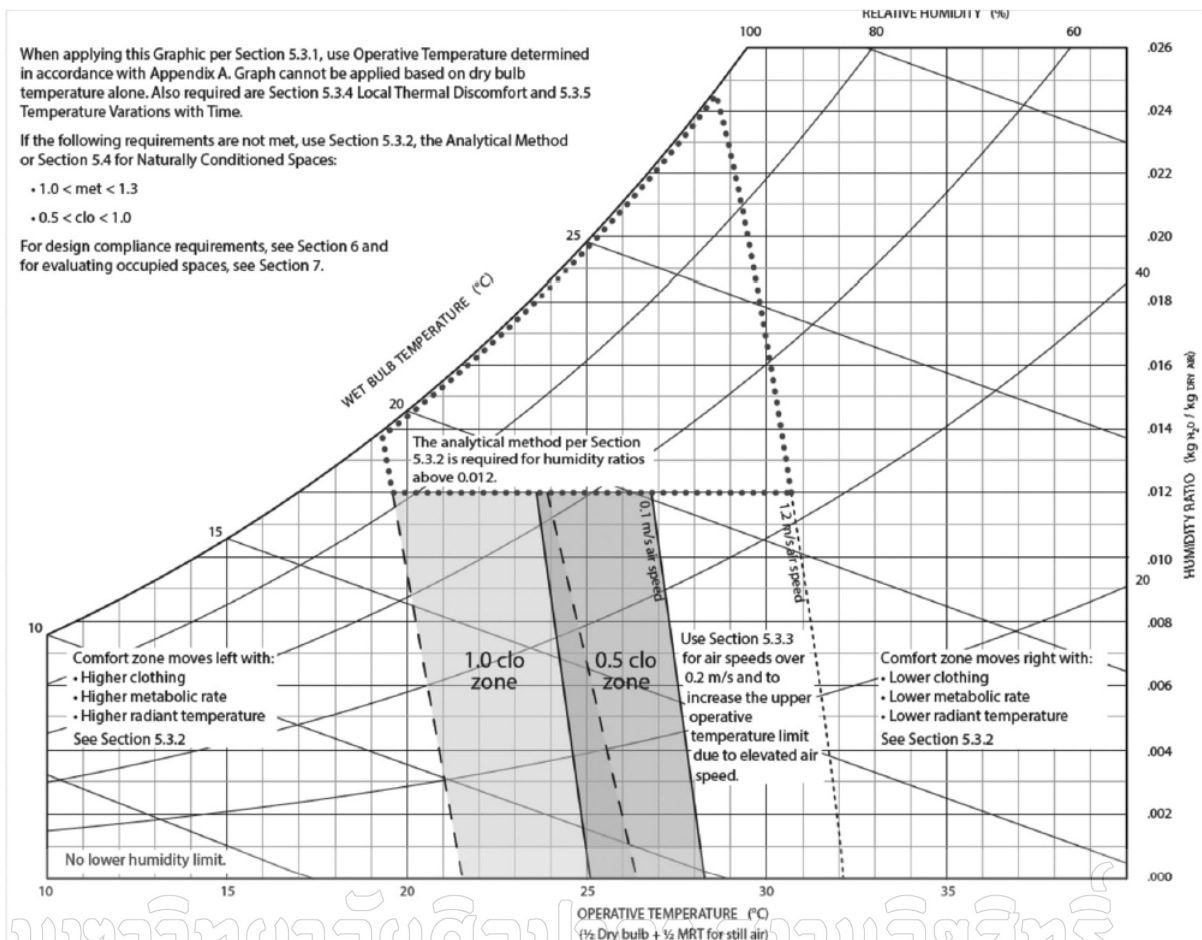
5.10 การวิเคราะห์สภาวะสบายในสภาพปรับอากาศ

ในการวิเคราะห์ จำเป็นต้องเข้าใจเงื่อนไขในการใช้งานของแต่ละวิธี โดยละเอียด ดังนี้

5.10.1 Graphic Comfort Zone Method - วิธีหาสภาวะสบายจากแผนภูมิ

ข้อดีของวิธีการนี้ คือ เป็นวิธีที่ง่ายเพียงนำค่า Operative Temperature และ ความชื้นสัมพัทธ์ มาพล็อตจุดลงในแผนภูมิ ASHRAE Thermal Comfort Zone (รูปที่ 5-15) และดูว่าอยู่ในขอบเขตสภาวะสบายหรือไม่ แต่ข้อเสีย คือ ใช้ได้กับกิจกรรมและเสื้อผ้าในช่วงที่จำกัด ดังนี้

- กิจกรรมต้องมีค่า ระหว่าง 1.0 - 1.3 met ซึ่งได้แก่ การนั่งทำงานในสำนักงาน
- เสื้อผ้าต้องมีค่าระหว่าง 0.5 - 1.0 clo
- ความเร็วลมต้อง < 0.2 m/s (ลมอ่อนมาก จนไม่ค่อยรู้สึก)



รูปที่ 5-15 ASHRAE Thermal Comfort Zone

(ที่มา: ASHRAE 55-2017, p.10)

ขอบเขตสภาวะสบายในแผนภูมิ จะมี 2 โซน คือ โซนสำหรับผู้แต่งกายมีค่า $clo = 0.5$ (ใส่ชุดฤดูร้อน แสดงด้วยแถบสีเทาเข้ม) และ โซนค่า $clo = 1.0$ (ใส่ชุดฤดูหนาว แสดงด้วยแถบสีเทาอ่อน)

ให้สังเกตว่า แผนภูมิที่ใช้แสดงขอบเขตสภาวะสบายนี้ คล้ายแผนภูมิไซโครเมตริก (Psychrometric Chart) แต่แกนในแนวนอน คือ **Operative Temperature (t_o)** (ในขณะที่ Psychrometric Chart คือ Air Temperature)

โซนสภาวะสบายของผู้สวมเสื้อผ้า 0.5 clo และ 1.0 clo จะทับซ้อนที่ประมาณ 25 °C ดังนั้น ในอาคารซึ่งมีคนแต่งกายทั้ง 2 แบบ การปรับอุณหภูมิที่ 25 °C จะทำให้เกิดความสบายได้ดีทั้ง 2 กลุ่ม

นอกจากนี้ ให้สังเกตว่า ขีดจำกัดสูงสุดของความชื้นในอากาศที่แสดงด้วยค่า Humidity Ratio ที่แนวแกนทางด้านขวาที่ = 0.012 กิโลกรัมของน้ำต่อกิโลกรัมของอากาศแห้ง (kg.H₂O/kg.dry air) แต่ไม่มีขีดจำกัดขั้นต่ำของความชื้น ซึ่งแตกต่างจากใน Bioclimatic Chart ของ Victor Olgye ใน Design with Climate ซึ่งกำหนดความชื้นสัมพัทธ์ของสภาวะสบายที่ประมาณ 20-80% rh

สภาวะสบายตามแผนภูมินี้ หมายถึง สภาวะซึ่งผู้ใช้อาคาร $\geq 80\%$ ยอมรับ โดยในจำนวน 20% ที่ไม่พอใจนั้น จะเป็นคนจำนวน 10% ที่ไม่พอใจต่อความรู้สึกร้อน-หนาวที่เกิดขึ้นโดยรวมกับทั้งร่างกาย บวกกับอีก 10% ที่ไม่พอใจเพราะรู้สึกไม่สบาย (เช่น ร้อน หรือ หนาวไป) เฉพาะบางจุดของร่างกาย เช่น ที่ศีรษะ

แผนภูมินี้ไม่สามารถใช้ได้ ถ้าความเร็วลมเฉลี่ย (Average Air Speed, V_a) > 0.2 เมตรต่อวินาที (m/s) โดยจะต้องใช้วิธีที่ 3 แทน

Operative Temperature (t_o) โดยนิยามความหมายของ ASHRAE คือ อุณหภูมิของห้องปิดล้อมสี่ด้านที่สมมติขึ้น ซึ่งมีอากาศและผู้ใช้อาคารที่อยู่ภายในได้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อนเท่ากับเวลาที่อยู่ในสภาพแวดล้อมจริง

อธิบายอย่างง่าย คือ Operative Temperature เป็นอุณหภูมิที่รวมผลของอุณหภูมิอากาศ (Air Temperature, T_a) กับอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย (Mean Radiant Temperature, T_{mrt}) ที่มีต่อผู้ใช้อาคารเข้าด้วยกัน

ในสภาพอากาศนิ่งไม่มีลม Operative Temperature (t_o) จะเท่ากับค่าเฉลี่ยระหว่าง Mean Radiant Temperature (T_{mrt}) และ Air Temperature (T_a)

$$t_o = (T_a + T_{mrt})/2$$

แต่ถ้ามีผิวด้านใดด้านหนึ่งของห้องมีอุณหภูมิสูง หรือ ต่ำกว่าอากาศ จะต้องคำนวณหา t_o โดยนำเอาความเร็วลม (V_a) มาพิจารณา โดยการใช้สมการ ดังนี้ (ASHRAE 55-2017, p.19)

$$t_o = At_a + (1 - A) \bar{t}_r$$

เมื่อ t_o = operative temperature

t_a = average air temperature

$\bar{t}_r$ = mean radiant temperature

โดยค่า A จะขึ้นกับค่าความเร็วลม (ตารางที่ 5-1) ดังนี้

ตารางที่ 5-1 ค่า A ที่แต่ละ V_a

V_a	< 0.2 m/s	0.2 to 0.6 m/s	0.6 to 1.0 m/s
A	0.5	0.6	0.7

จากสมการ จะเห็นว่า ถ้าความเร็วลมสูง อุณหภูมิอากาศจะมีผลมากกว่าอุณหภูมิของผิวโดยรอบห้องที่แผ่รังสี

ตัวอย่าง : ความเร็วลม < 0.2 m/s, A = 0.5

$$\begin{aligned} t_o &= 0.5(26) + (1-0.5)(28) \\ &= 13 + 14 \\ &= 27 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

ความเร็วลม 1.0 m/s, A = 0.7

$$\begin{aligned} t_o &= 0.7 (26) + (1-0.7) (28) \\ &= 18.2 + 8.4 \\ &= 26.6 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

5.10.2 Analytical Comfort Zone Method - วิธีหาขอบเขตสภาวะสบายโดยการคำนวณ

ข้อดีของวิธีที่ 2 คือ มีความยืดหยุ่นสูงกว่าวิธีที่ 1 สามารถใช้ได้กับกิจกรรมและเสื้อผ้าที่หลากหลายมากขึ้น คือ

- ค่า Metabolic Rate ระหว่าง 1.0 - 2.0 met (วิธีที่ 1 ค่า met = 1.0 - 1.3 met)
- ค่า clo-value ไม่เกิน 1.5 clo (ซึ่งเป็นเงื่อนไขในการใช้มาตรฐานนี้) (วิธีที่ 1, 0.5 และ 1.0 clo)
- ความเร็วลมเฉลี่ย (V_a) ภายในห้องต้อง < 0.2 m/s

วิธีนี้ไม่สามารถใช้ได้ถ้าความเร็วลมเฉลี่ย มีค่า > 0.2 m/s จะต้องใช้วิธีที่ 3

การวิเคราะห์โดยวิธีนี้ ต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาว่าผู้ใช้อาคารจะมีความรู้สึกอย่างไรเกี่ยวกับความร้อนหรือหนาว โดยได้ผลการคำนวณมาเป็น **ค่าคาดการณ์ความรู้สึกร้อนหนาว** เรียกว่าค่า **Predicted Mean Vote (PMV)** ซึ่งแบ่งเป็น 7 ระดับ แทนด้วยตัวเลข ดังนี้

- +3 ร้อน (Hot)
- +2 อุ่น (Warm)
- +1 อุ่นเล็กน้อย (Slightly Warm)
- 0 กลาง (Neutral)
- 1 เย็นเล็กน้อย (Slightly Cool)
- 2 เย็น (Cool)
- 3 หนาว (Cold)

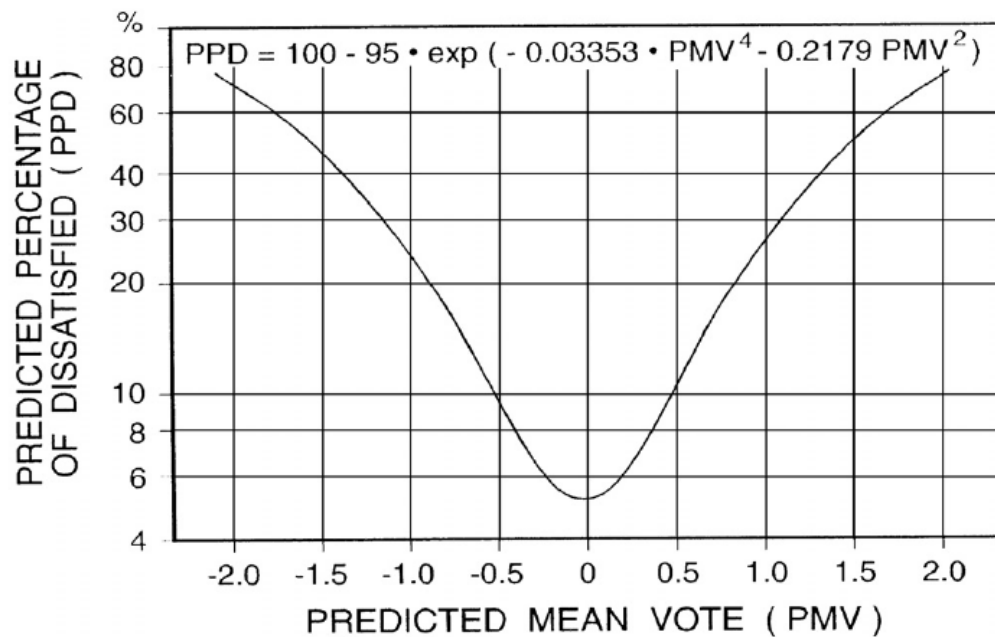
ถ้าวัดได้ค่า PMV = -1 แสดงว่ารู้สึกเย็นเล็กน้อย โปรแกรมก็จะคำนวณแปลงความรู้สึกนั้นออกมาเป็นร้อยละของผู้ที่ไม่พอใจต่อสภาพแวดล้อมนั้น เรียกว่า **Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)** หรือ ค่าคาดการณ์จำนวนร้อยละของผู้ที่ไม่พอใจ โดยค่า PMV และ PPD จะมีความสัมพันธ์ต่อกัน ดังแสดงใน (รูปที่ 5-16)

แผนภูมิ PMV-PPD พัฒนาขึ้นโดยศาสตราจารย์ P.O. Fanger จาก Technical University of Denmark ซึ่งเป็นผลจากการใช้สมการ Heat Balance และการวิจัยที่ทดลองในคนจำนวนมาก ในประเทศเดนมาร์ก และอาจกล่าวได้ว่า ผลการศึกษาของ Fanger ได้กลายเป็นรากฐานของมาตรฐานและการศึกษาเรื่องสภาวะสบายในปัจจุบัน

จากแผนภูมิ PMV-PPD จะเห็นว่า แม้ PMV = 0 คือ รู้สึกกลาง ๆ PPD ก็ยังมีค่า = 5% คือ ยังมีคนไม่พอใจ 5% (ไม่มี PPD = 0% หรือ สภาวะที่ทุกคนพอใจหมด)

ในสภาวะสบายค่า PPD จะต้องไม่เกิน 10% หรือ ค่า PMV = -0.5 ถึง +0.5

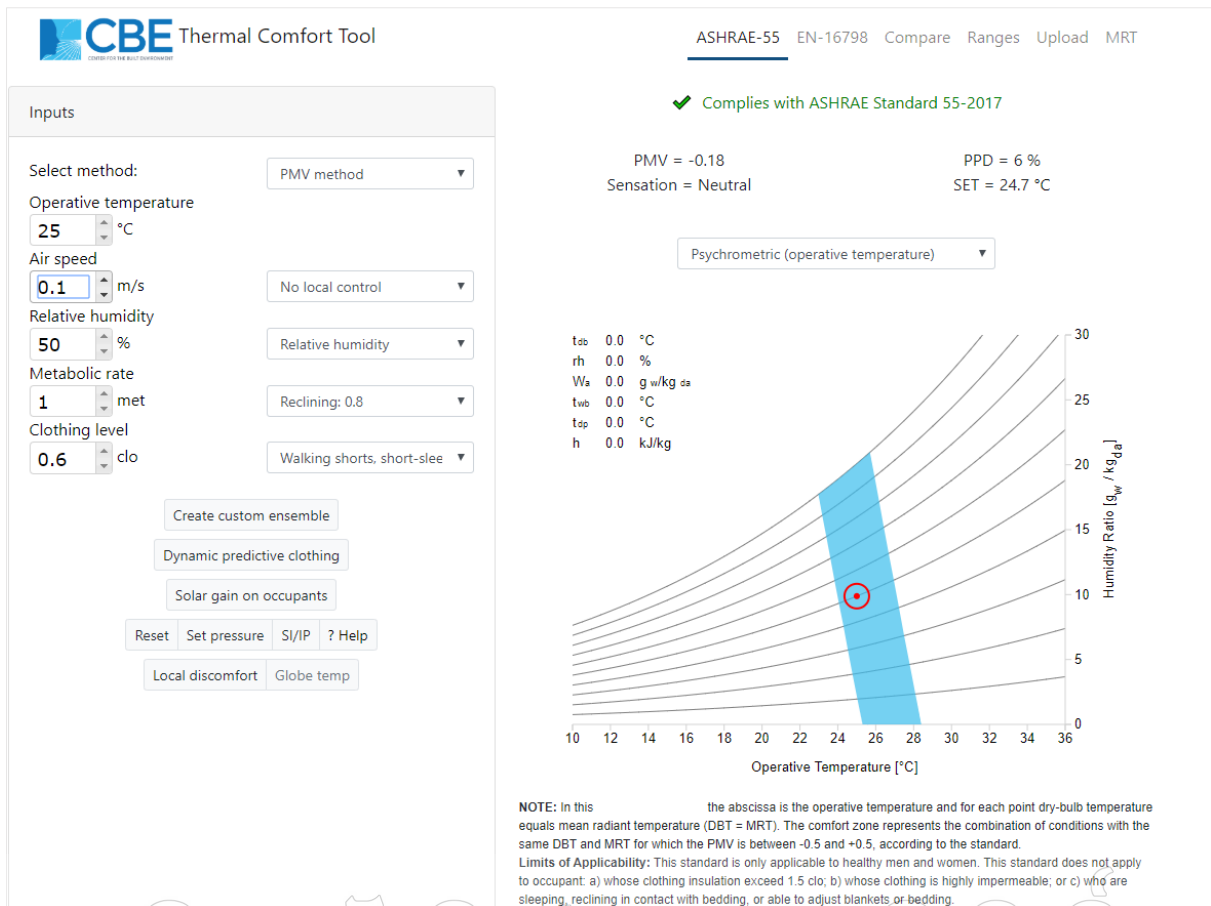
ในนิยามของ สภาพแวดล้อมที่ยอมรับได้ หรือ สบาย คือ ต้องมีผู้พอใจ $\geq 80\%$ หรือ อีกนัยหนึ่งคือ มีคนไม่พอใจได้สูงสุด 20% ในจำนวนดังกล่าว 10% เป็นความไม่สบายที่เกิดขึ้นโดยรวมทั้งร่างกาย และอีก 10% คือ ความไม่สบายที่อาจเกิดขึ้นที่บางส่วนของร่างกาย (Local Discomfort)



รูปที่ 5-16 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่า PPD และ PMV

(ที่มา: ASHRAE 55-2017, p.39)

การวิเคราะห์สภาวะสบาย โดยการใช้ PMV-PPD สามารถทำได้โดยใช้โปรแกรม ASHRAE Thermal Comfort Tool หรือ โปรแกรม CBE Thermal Comfort Tool ซึ่งเป็นโปรแกรมฟรี ใช้งานง่าย พัฒนาโดย Center for the Built Environment, University of California Berkeley ร่วมกับ ASHRAE ซึ่งสามารถใช้ผ่านเว็บไซต์ <https://comfort.cbe.berkeley.edu/> (รูปที่ 5-17)



รูปที่ 5-17 โปรแกรม CBE Thermal Comfort Tool

5.10.3 Elevated Air Speed Comfort Zone Method - วิธีหาสภาวะสบายเมื่อมีลม

ดังได้กล่าวข้างต้นว่า วิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 จะไม่สามารถใช้ได้ถ้าความเร็วลมเฉลี่ย (V_a) > 0.2 m/s โดยจะต้องใช้วิธีที่ 3 นี้ และวิธีนี้มีเงื่อนไข คือ

- กิจกรรมต้องมีค่าระหว่าง 1.0 - 2.0 met
- เสื้อผ้าต้องมีค่าระหว่าง 0.0 - 1.5 clo
- ความเร็วลมเฉลี่ย (V_a) > 0.2 m/s

สิ่งสำคัญที่จะต้องเข้าใจ คือ คำว่า **ความเร็วลมเฉลี่ย (Average Air Speed, V_a)** ในมาตรฐาน ASHRAE 55 เป็น**ศัพท์ที่มีความหมายเฉพาะ** คือ เป็นค่าเฉลี่ยของความเร็วลมโดยรอบตัวบุคคลที่เป็นตัวแทน (Representative Occupant) ของตำแหน่งห้องและเวลาที่พิจารณา ที่วัดจากความสูง 3 ระดับ คือ ที่ระดับข้อเท้า เอว และศีรษะ และจะต้องเฉลี่ยจากช่วงเวลาซึ่งมากกว่า 1 นาที แต่ไม่เกิน 3 นาที ความเร็วลมที่เกิดในระยะเวลาสั้นกว่า 3 นาที จะต้องคิดแยกออกมาเป็นคนละค่ากัน (Multiple Different Air Speeds)

ในแผนภูมินี้มีโซนสภาวะสบาย 2 โซน สำหรับเสื้อผ้า = 0.5 clo และ 1.0 clo เหมือนวิธีที่ 1 แต่เส้นขอบเขตสภาวะสบายได้ถูกปรับเป็นเส้นโค้ง การวิเคราะห์ในวิธีนี้ คือ ใช้การคำนวณตามวิธีที่ 2 รวมกับการใช้ค่า **Standard Effective Temperature (SET)** คือ นำเอาผลที่ทำให้รู้สึกเย็นเสมือนว่าอุณหภูมิอากาศขณะนั้นมีค่าต่ำกว่าที่เป็นจริง (Cooling Effect) ของความเร็วลมที่มากกว่า 0.2 มาคิดด้วย

SET คือ อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมที่สมมติให้มีค่าต่าง ๆ คือ

- ความชื้นสัมพัทธ์ 50%
- ความเร็วลมเฉลี่ย (V_a) < 0.1 m/s
- อุณหภูมิอากาศภายใน = อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวโดยรอบที่แผ่รังสี (T_{mrt})
- ทำกิจกรรม = 1 met
- สวมเสื้อผ้า = 0.6 clo

ณ อุณหภูมิ SET ของสภาพแวดล้อมที่สมมติ ผู้ใช้อาคารจะสูญเสียความร้อนจากผิวกาย เท่ากับในสภาพแวดล้อมจริงที่พิจารณา

การวิเคราะห์สภาวะสบายเมื่อมีลม สามารถทำได้ 2 วิธี คือ การอ่านจากแผนภูมิ และการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณ

1) การอ่านจากแผนภูมิ ตาม (รูปที่ 5-19) ซึ่งมีโซนสภาวะสบาย 2 โซน สำหรับการแต่งกาย 0.5 และ 1.0 clo เหมือนกับวิธีที่ 1 แต่ขอบเขตสภาวะสบายถูกปรับเป็นเส้นโค้งตามค่า SET โดยถ้าจุดตัดของ Operative Temperature และความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ภายในพื้นที่สีเทา แสดงว่าอยู่ขอบเขตสภาวะสบาย คือ มีค่า PMV ระหว่าง -0.5 ถึง +0.5

กิจกรรมกับขีดจำกัดความเร็วลม

แต่ทั้งนี้ในการอ่านจากแผนภูมิจะต้องดูค่า met และขีดจำกัดบน หรือ ความเร็วลมสูงสุดที่ยอมรับได้ประกอบด้วย คือ

- ถ้ากิจกรรม > 1.3 met จะไม่มีขีดจำกัดของความเร็วลมเฉลี่ยสูงสุด
- ถ้ากิจกรรมไม่มากกว่า 1.3 met ขีดจำกัดของความเร็วลมสูงสุดจะขึ้นกับว่า ผู้ใช้อาคาร

สามารถควบคุมความเร็วลมได้ หรือ ไม่ได้

กรณีที่สามารถควบคุมความเร็วลมเฉลี่ยได้

คำว่า **ควบคุมความเร็วลมได้** คือ ต้องมีลักษณะตามข้อใดข้อหนึ่ง ดังนี้

- สามารถควบคุมความเร็วลมได้อย่างน้อย 1 วิธี/ผู้ใช้ไม่เกิน 6 คน
- สามารถควบคุมความเร็วลมได้อย่างน้อย 1 วิธี/พื้นที่ทุก 84 ตารางเมตร
- ในพื้นที่ซึ่งใช้งานรวมกันหลายคน เช่น ห้องเรียน ห้องประชุม ทุกห้องต้องมีจุดที่สามารถควบคุมความเร็วลมได้อย่างน้อย 1 จุด ถ้ามีผนังเดียวกันเป็นพื้นที่ย่อย ๆ ในทุกพื้นที่ย่อยจะต้องสามารถควบคุมความเร็วลมได้อย่างน้อย 1 จุด เช่นกัน

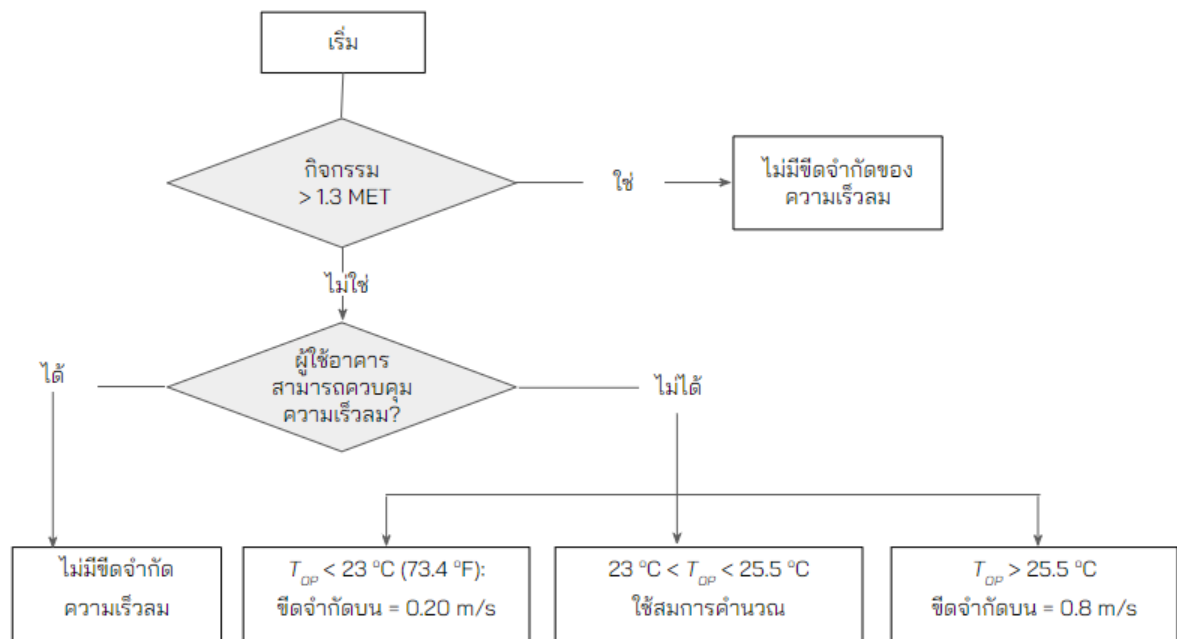
ถ้าสามารถควบคุมได้ตามข้างต้น จะไม่มีขีดจำกัดของความเร็วลมสูงสุด

กรณีไม่สามารถควบคุมความเร็วลมเฉลี่ยได้

ความเร็วลมเฉลี่ยสูงสุดที่ยอมรับได้ จะแบ่งเป็น 3 ช่วง (รูปที่ 5-18) คือ

1.1) Operative Temperature (t_o) มีค่า < 23.0 °C ความเร็วลมเฉลี่ยสูงสุดมีค่าได้

= 0.2 m/s ยกเว้นถ้าสวมเสื้อผ้าหนา > 0.7 clo หรือ กิจกรรมมีค่า > 1.3 met ขีดจำกัดนี้อ่านจากแกนความเร็วลมที่ 0.2 m/s เหนือพื้นที่สีเทาอ่อน (รูปที่ 5-19)



รูปที่ 5-18 ขีดจำกัดความเร็วลมสูงสุดในแต่ละช่วงอุณหภูมิที่จะทำให้เกิดความสบาย

1.2) Operative Temperature (t_o) มีค่าระหว่าง 23.0 °C - 25.5 °C ขีดจำกัดบนของความเร็วมเฉลี่ยให้อ่านที่เส้นโค้ง Equal SET Contour คือ แนวเส้นโค้งระหว่างพื้นที่สีเทาเข้ม และสีเทาอ่อน ใน (รูปที่ 5-19)

ตัวอย่าง ถ้า $t_o = 25$ °C ลากเส้นตั้งขึ้นไปชนเส้นโค้ง แล้วลากเส้นตามแนวนอนมาหาแกนความเร็วมเฉลี่ยจะอ่านได้ประมาณ 0.6 m/s

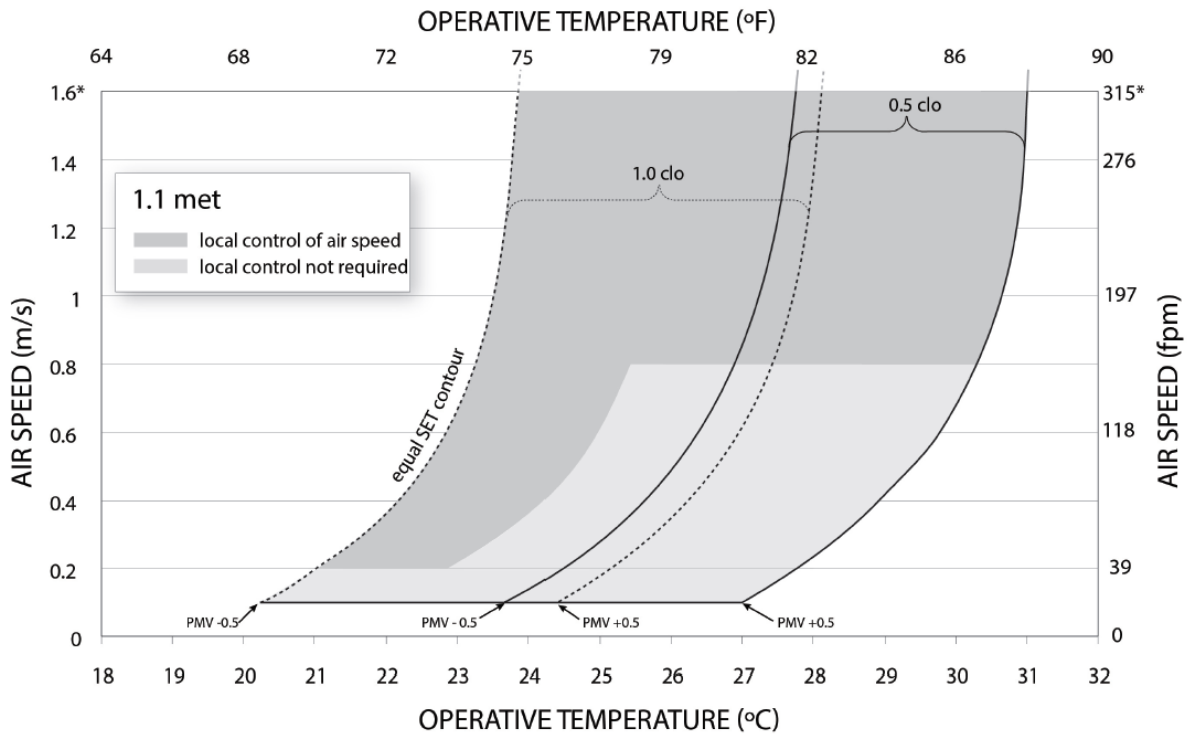
หรือ หาค่าได้จากสมการ

$$V_a = 50.49 - 4.404 (t_o) + 0.096425 (t_o)^2 \quad \text{m/s}$$

ถ้า $t_o = 25$ °C

$$V_a = 50.49 - 4.404 (25) + 0.096425 (25)^2 = 0.66 \quad \text{m/s}$$

1.3) Operative Temperature (t_o) มีค่า > 25.5 °C ความเร็วมเฉลี่ยสูงสุดจะมีค่า = 0.8 m/s



* There is no upper limit to air speed when occupants have local control.

รูปที่ 5-19 แผนภูมิการหาสภาวะสบายเมื่อมีลมและผู้ใช้อาคารควบคุมความเร็วลมได้

(ที่มา: ASHRAE 55-2017, p.13)

2) การวิเคราะห์สภาวะสบายเมื่อมีลม โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น การใช้ ASHRAE

Thermal Comfort Tool คำนวณ หรือ CBE Thermal Comfort Tool เหมือนวิธีที่ 2 แต่เพิ่มความเร็วลมให้สูงขึ้น และทดลองปรับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อสภาวะสบายโดยง่าย

ตัวอย่างของการออกแบบอาคารประหยัดพลังงานที่ได้นำวิธีการเพิ่มความเร็วลมมาใช้ในการออกแบบ และตั้งอุณหภูมิในการปรับอากาศให้สูงกว่าปกติ เช่น อาคาร SD4 ของ National University of Singapore (NUS) ที่ออกแบบเป็นอาคารที่ใช้พลังงานต่ำมาก เป็น Zero Energy Building โดยการใช้พัดลมในห้องปรับอากาศ (รูปที่ 5-20)



รูปที่ 5-20 อาคาร Zero Energy ของมหาวิทยาลัยแห่งชาติประเทศสิงคโปร์
ที่ใช้พัฒนาร่วมกับตั้งค่าอุณหภูมิในการปรับอากาศให้สูงขึ้นกว่าปกติ

5.10.4 สภาวะไม่สบายที่บางส่วนของร่างกาย (Local Thermal Discomfort)

การออกแบบในสภาพปรับอากาศ จะต้องพิจารณาโอกาสเกิดสภาวะไม่สบายที่บางส่วนของร่างกาย ด้วย ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะเมื่อมีกรณีดังนี้ คือ

ผู้ใช้อาคารสวมใส่เสื้อผ้าที่มีค่า $< 0.7 \text{ clo}$

กิจกรรมที่มีค่า $< 1.3 \text{ met}$ หรือ นั่งทำงานในสำนักงาน (ถ้ายืนทำงาน = 1.4 met)

สาเหตุของความไม่สบายที่บางส่วนของร่างกาย อาจแบ่งได้เป็น

1) ความไม่สมมาตรจากอุณหภูมิแผ่รังสี (Radiant Temperature Asymmetry) ซึ่งอาจเกิดจากการนั่งใกล้หน้าต่างที่ร้อนหรือเย็นมากกว่าอุณหภูมิอากาศในห้อง หรือ มีอุณหภูมิที่เพดานและพื้นต่างกันมาก โดยค่าที่ยอมรับได้จะต้องเป็นไปตามตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2 ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิแผ่รังสีที่ยอมรับได้

อุณหภูมิแผ่รังสีที่ไม่สมมาตร ($^{\circ}\text{C}$)			
เพดานร้อนกว่าพื้น	เพดานเย็นกว่าพื้น	ผนังร้อนกว่าอากาศ	ผนังเย็นกว่าอากาศ
< 5	< 14	< 23	< 10

2) ความแตกต่างของอุณหภูมิในแนวดิ่ง ระหว่างศีรษะและข้อเท้าจะต้องไม่เกิน 3°C สำหรับคนนั่ง หรือ ไม่เกิน 4°C สำหรับคนยืน

3) อุณหภูมิที่พื้น เมื่อคนนั่งที่สวมรองเท้าและเท้าสัมผัสพื้น อุณหภูมิที่พื้นจะต้องอยู่ในช่วงระหว่าง 19°C ถึง 29°C มาตรฐานข้อนี้ไม่ได้ใช้กับผู้ไม่สวมรองเท้า หรือ นั่งบนพื้น ตัวอย่างอาคารในประเทศไทยที่ออกแบบให้พื้นมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศ คือ สนามบินสุวรรณภูมิ (รูปที่ 5-21) โดยการเดินท่อน้ำเย็นใน

พื้น เพื่อชดเชยกับการตั้งอุณหภูมิในการปรับอากาศให้สูงกว่าปรกติเพื่อประหยัดพลังงาน เรียก ระบบ Radiant Floor หรือ Radiant Cooling



รูปที่ 5-21 อาคารสนามบินสุวรรณภูมิ ออกแบบให้อุณหภูมิที่พื้นต่ำกว่าอากาศ

5.10.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงเวลา (Temperature Variation with Time)

การเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิเป็นวงรอบ (Cycle Variation) ในกรณีผู้ใช้อาคารไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ การเปลี่ยนแปลง Operative Temperature ที่ขึ้นลงเป็นวงรอบ ในช่วงเวลาไม่เกิน 15 นาที ต้องมีอุณหภูมิสูงสุดถึงต่ำสุด แตกต่างกันไปไม่เกิน 1.1°C

การลดหรือเพิ่มอุณหภูมิ (Drifts or Ramps) ในช่วงเวลาที่นานกว่า 15 นาที จะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกินค่าในตารางที่ 5-3 เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเวลา 1 ชั่วโมง จะต้องไม่เกิน 2.2°C และภายในเวลา 15 นาที จะต้องไม่เกิน 1.1°C ของช่วงเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 5-3 ข้อจำกัดในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลดลงหรือเพิ่มขึ้น (Drifts or Ramps)

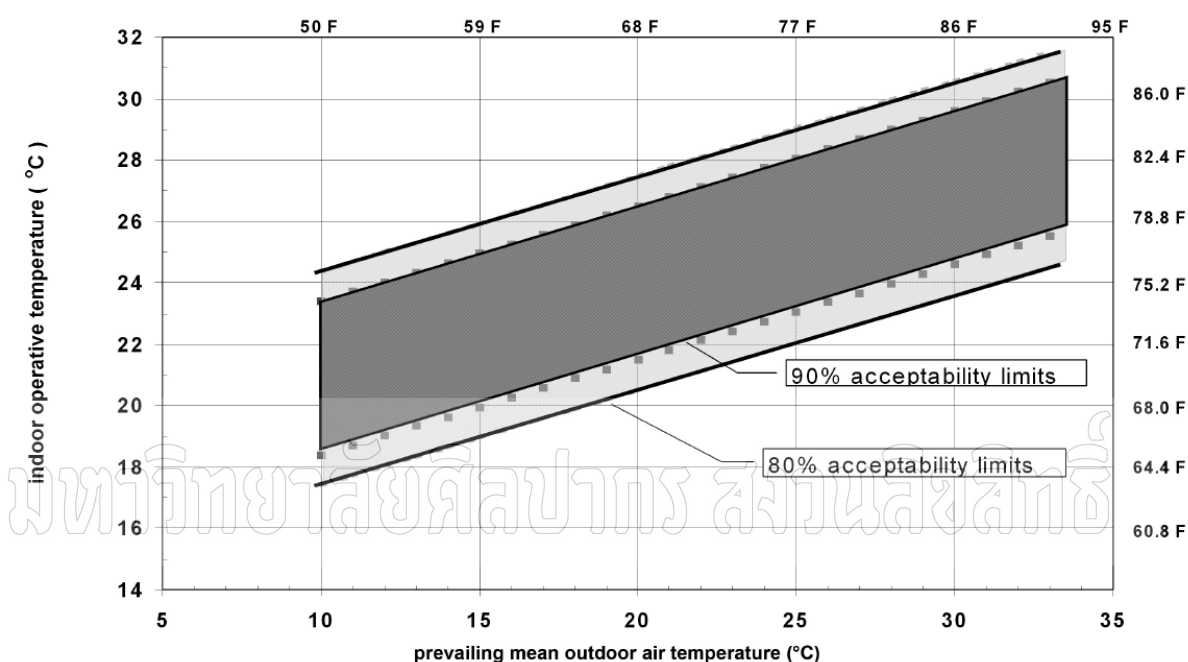
ช่วงเวลา (ชั่วโมง)	0.25	0.5	1	2	4
การเปลี่ยนแปลง Operative Temperature สูงสุดที่ยอมรับได้ ($^{\circ}\text{C}$)	1.1	1.7	2.2	2.8	3.3

5.11 การวิเคราะห์สภาวะสบายสำหรับการระบายอากาศตามธรรมชาติ (Comfort Zone for Natural Ventilation)

วิธีนี้เรียก Adaptive Method เพราะผู้ใช้อาคารจะต้องสามารถเปิด-ปิดหน้าต่างได้ตามต้องการ และยังต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

- ไม่มีการใช้ระบบเครื่องกล เช่น การปรับอากาศ การทำพื้นเย็นแผ่รังสี (Radiant Cooling) หรือ การทำความเย็นโดยใช้สารดูดความชื้น (Desiccant Cooling) ไม่มีระบบทำความร้อน

- ผู้ใช้ทำกิจกรรมมีค่า 1.0 - 1.3 met
 - มีอิสระในการปรับเสื้อผ้าให้เกิดความสบาย เช่น ใส่หรือถอดเสื้อคลุม พับแขนเสื้อ ระดับความเป็นฉนวนของเสื้อผ้าอยู่ในช่วง 0.5-1.0 clo
 - อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายนอกในช่วงเวลาที่กำหนด (Prevailing Mean Outdoor Air Temperature) มากกว่า 10 °C และน้อยกว่า 33.5 °C
- การหาสภาวะสบายในสภาพไม่ปรับอากาศ สามารถทำได้โดยใช้แผนภูมิตาม (รูปที่ 5-22) โดยต้องทราบค่า อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายนอกอาคารที่ส่งผลต่อช่วงที่พิจารณา (Prevailing Mean Outdoor Air Temperature)



รูปที่ 5-22 แผนภูมิสภาวะสบายในสภาพไม่ปรับอากาศ

(ที่มา: ASHRAE 55-2017, p.15)

5.11.1 อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายนอกอาคารที่ส่งผลต่อช่วงที่พิจารณา (Prevailing Mean Outdoor Air Temperature)

เป็นค่าที่มีความหมายเฉพาะใน ASHRAE Standard 55 คือ เป็นค่าเฉลี่ย (Arithmetic Mean) ของอุณหภูมิอากาศแต่ละวันในช่วงเวลาไม่น้อยกว่า 7 วัน และไม่มากกว่า 30 วัน ก่อนวันที่ต้องการหาสภาวะสบาย โดยต้องเป็นข้อมูลของวันที่ต่อเนื่องกัน

ข้อมูลอุณหภูมิอากาศรายวัน จะต้องใช้อย่างน้อย 2 ค่า โดยถ้าใช้เพียง 2 ค่า ควรเป็นค่าอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละวัน แต่ถ้าใช้ข้อมูล 3 ค่า ควรเก็บจากช่วงเวลาที่ห่างเท่า ๆ กัน

ข้อมูลอุณหภูมิภายนอกนี้ จะต้องได้จากสถานีตรวจวัดอากาศที่ใกล้ที่สุด หรือ ใช้ไฟล์ข้อมูลสถิติภูมิอากาศประจำปี แต่ถ้าหาไม่ได้ สามารถนำค่าเฉลี่ยของข้อมูลภูมิอากาศรายเดือนที่มีการเผยแพร่มาใช้ และนำมาประมาณค่ากลาง (Interpolate) จากข้อมูลรายเดือนที่ทราบค่า

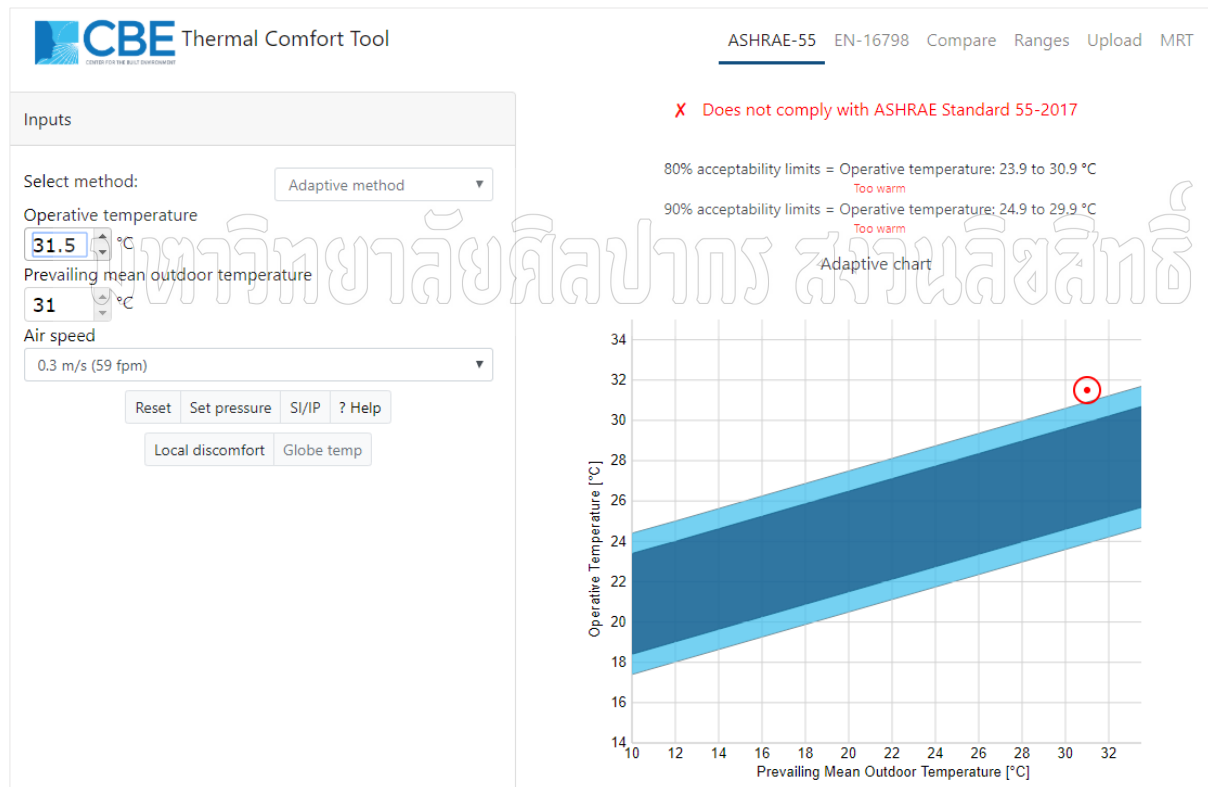
ในแผนภูมิรูปที่ 5-22 จะแสดงสภาวะสบาย เป็น 2 ขอบเขต คือ ขอบเขตอุณหภูมิที่มีผู้ยอมรับ 80% (ขอบชั้นนอก) และขอบเขตที่มีผู้ยอมรับได้ 90% (ขอบชั้นใน) สำหรับงานที่ต้องการมาตรฐานความสบายขั้นสูง

5.11.2 การขยายขอบเขตสภาวะสบายในสภาพไม่ปรับอากาศ

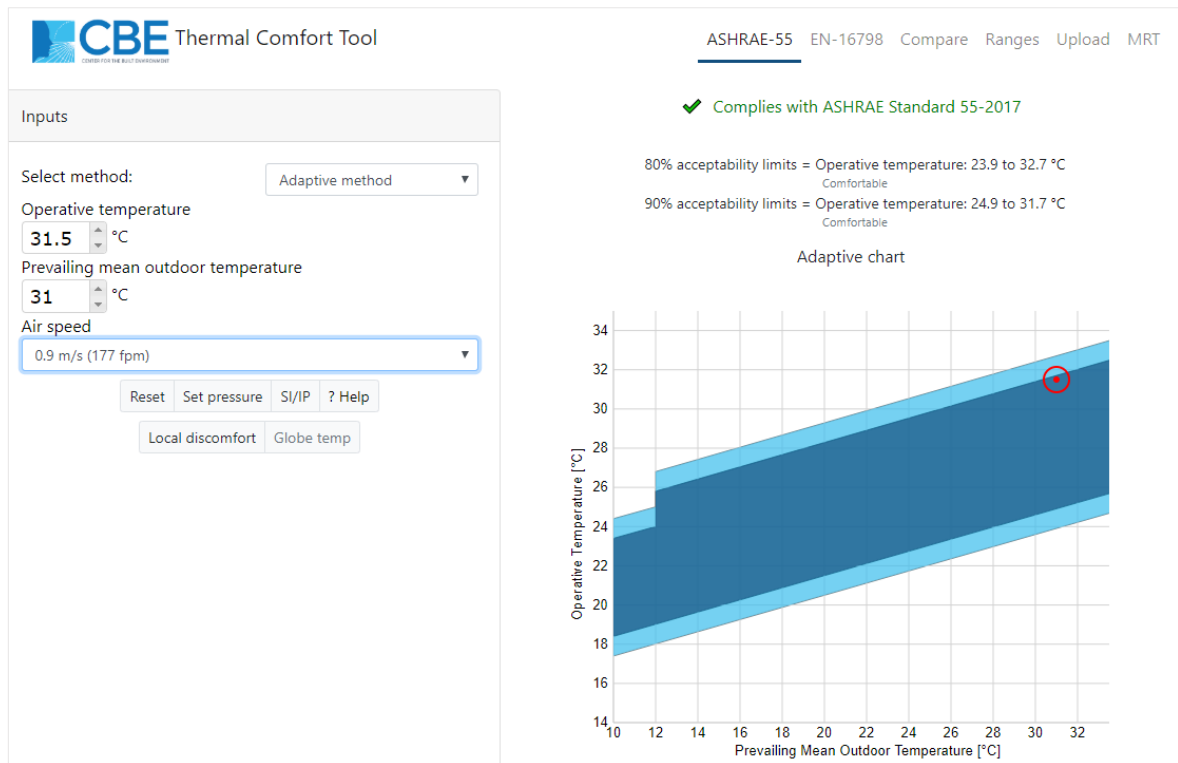
ในกรณีที่ Operative Temperature มีค่า $> 25^{\circ}\text{C}$ และความเร็วมวลเฉลี่ย (V_a) มีค่า $> 0.3\text{ m/s}$ อุณหภูมิสูงสุดในสภาพไม่ปรับอากาศที่อยู่ในขอบเขตสภาวะสบาย จะสามารถปรับสูงกว่าเดิมได้อีกตามตารางที่ 5-4 (เปรียบเทียบขอบเขตสภาวะสบายระหว่าง รูปที่ 5-23 และ รูปที่ 5-24)

ตารางที่ 5-4 การเพิ่มขีดจำกัดที่ยอมรับได้ของ Operative Temperature เมื่อความเร็วลม $> 0.3\text{ m/s}$

$V_a > 0.6\text{ m/s}$	$V_a > 0.9\text{ m/s}$	$V_a > 1.2\text{ m/s}$
1.2°C	1.8°C	2.2°C



รูปที่ 5-23 Operative Temperature ที่ 31.5°C ไม่อยู่ในสภาวะสบายที่ 0.3 m/s



รูปที่ 5-24 Operative Temperature ที่ 31.5 °C อยู่ในขอบเขตสภาวะสบายได้
เมื่อเพิ่มความเร็วลมเป็น 0.9 m/s

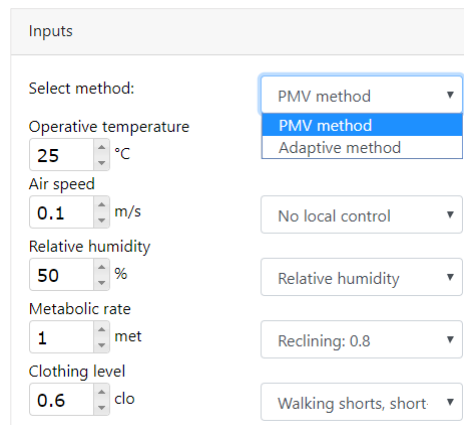
มหาวิทยาลัยศิลปากร-สวนจิตรลดา
สำหรับวิธีการหาความสอดคล้องของงานที่ออกแบบทั้ง 4 วิธี ตามมาตรฐาน ASHRAE 55 สามารถ
สรุปข้อกำหนดของค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องได้ ดังตารางที่ 5-5

ตารางที่ 5-5 การเปรียบเทียบวิธีการหาสภาวะสบายทั้ง 4 วิธี และขอบเขตของค่าตัวแปร

Comfort Zone Method	Air Speed (m/s)	Humidity Ratio (kg H ₂ O/kg dry air)	Metabolic Rate (Met)	Clo-Value (clo)
Graphical Method	< 0.2	< 0.012	1.0 - 1.3	0.5 - 1.0
Analytical Method	< 0.2	-	1.0 - 2.0	0 - 1.5
Elevated Air Speed Method	> 0.2	-	1.0 - 2.0	0 - 1.5
Adaptive Method	ไม่ได้จำกัด	-	1.0 - 1.3	0.5 - 1.0

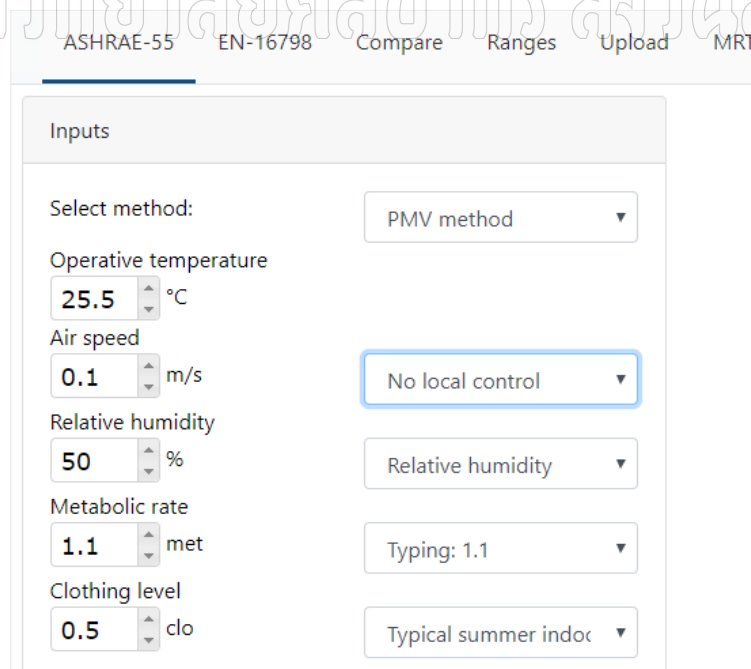
ตัวอย่าง การวิเคราะห์สภาวะสบาย โดยใช้โปรแกรม CBE Thermal Comfort Tool

(1) ขั้นแรกเลือกวิธีการประเมิน ถ้าปรับอากาศเลือกวิธี PMV Method ถ้าไม่ปรับอากาศเลือก Adaptive Method



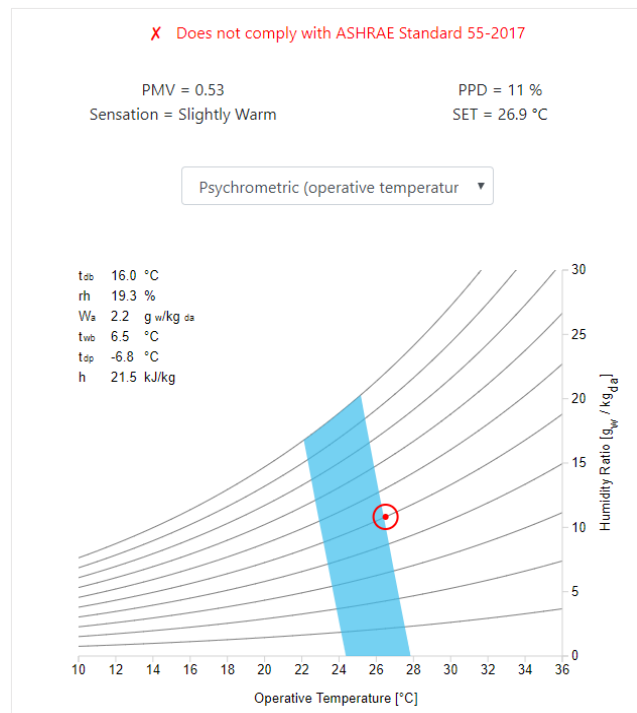
รูปที่ 5-25 การเลือกวิธีประเมินสภาวะสบาย

(2) กำหนดค่าของตัวแปรด้านสภาพแวดล้อม คือ Operative Temperature ความเร็วลม (Air Speed) ความชื้นสัมพัทธ์ และตัวแปรด้านบุคคล คือ กิจกรรม เลือกชุดเสื้อผ้า หรือ Upload Data จากไฟล์ที่มีข้อมูลเหล่านี้



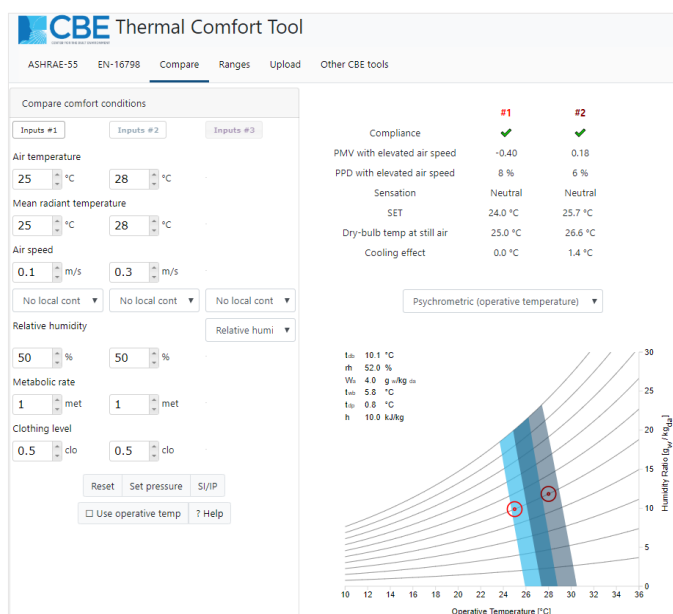
รูปที่ 5-26 การระบุตัวแปรที่มีผลต่อสภาวะสบาย

(3) สามารถอ่านค่า PMV, PPD และผลสรุปว่าผ่านมาตรฐาน ASHRAE 55 หรือไม่ ตามรูป สังเกตว่า ถ้า PMV ไม่อยู่ในช่วง - 0.5 ถึง + 0.5 ค่า PPD จะ > 10% แสดงว่าไม่อยู่ในสภาวะสบาย



รูปที่ 5-27 การแสดงผลเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASHRAE 55, ค่า PMV, PPD

(4) สามารถเปรียบเทียบชุดค่านำเข้าได้พร้อมกัน 3 แบบ เช่น (รูปที่ 5-28) ในกรณีนี้ที่ต้องการเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบอุณหภูมิในการปรับอากาศที่ 25 °C ความเร็วลมต่ำมากคือ 0.1 m/s กับการออกแบบให้อุณหภูมิสูงขึ้นที่ 28 °C และเพิ่มความเร็วลมเป็น 0.3 m/s ซึ่งพบว่ายังอยู่ในสภาวะสบายได้



รูปที่ 5-28 การเปรียบเทียบค่า Input 2 ชุด กับสภาวะสบาย

(5) การประเมินสภาวะไม่สบายที่อาจเกิดที่บางส่วนของร่างกาย ให้เลือกแถบ Local Discomfort และใส่ค่าต่าง ๆ ที่ออกแบบเพื่อประเมิน เช่น ในภาพออกแบบอุณหภูมิที่พื้นแผ่รังสีที่ 18 °C ซึ่งเย็นเกินไป (รูปที่ 5-29)

The screenshot shows the CBE Thermal Comfort Tool interface. The 'Local discomfort assessment' panel is open, displaying various input fields and calculated values. The 'Inputs' section on the left includes: Select method: PMV method, Operative temperature: 25 °C, Air speed: 0.1 m/s, Relative humidity: 50 %, Metabolic rate: 1 met, Clothing level: 0.6 clo. The 'Local discomfort assessment' panel on the right shows: Ankle level air speed: 0.1 m/s, Humidity: 50 %, Metabolic rate: 1.2 met, Clothing level: 0.5 clo, PMV #: 0.08, PPD AD: 9 %. Below this, the 'Vertical air temperature difference' section shows Head level temperature: 25 °C and Ankle level temperature: 25 °C. The 'CBE vertical temperature gradient' section shows Air temperature *: 25 °C, Mean radiant temperature: 25 °C, Relative humidity: 50 %, Air speed (0 - 0.2m/s) *: 0.1 m/s, Clothing: 0.5 clo, Metabolic Rate: 1.2 met, Vertical temp gradient: 3 °C/m, and PPD_{VT}: 0 %. The 'Floor surface temperature' section shows Floor temperature: 18 °C, which is marked with a red 'X' indicating it is outside the acceptable range. A note at the bottom explains that the air temperature and speed averaged are the average value over two heights, and not three as in the rest of the standard.

รูปที่ 5-29 การประเมินความไม่สบายที่เกิดขึ้นที่บางส่วนของร่างกาย

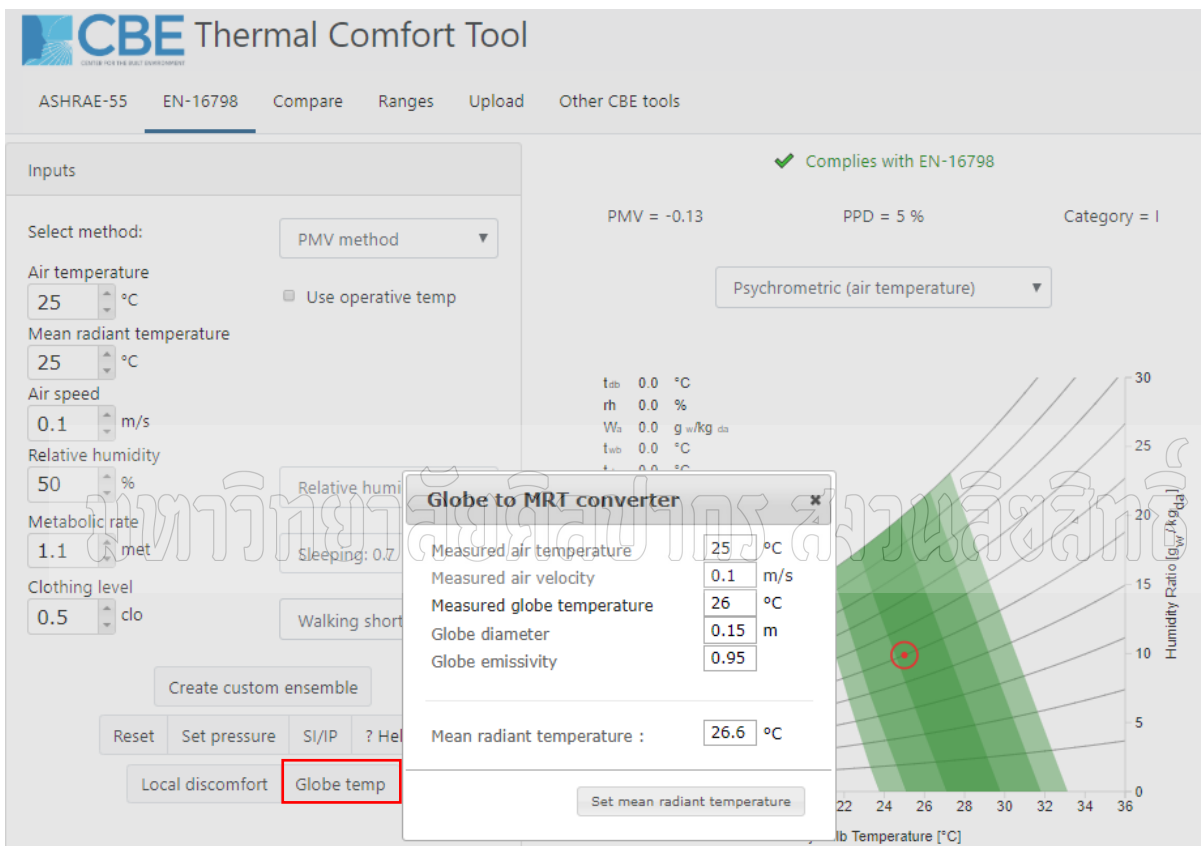
(6) ในกรณีของประเทศหนาว อาจจะมีการออกแบบให้แสงแดดส่องเข้าในอาคารถูกร่างกายของผู้ใช้อาคาร ซึ่งถ้าเป็นเช่นนั้น ต้องคำนวณอิทธิพลจากแสงแดดซึ่งเป็น Shortwave Radiation โดยเลือกแถบ Solar Gain on Occupants ซึ่งจะมีผลทำให้ค่า Mean Radiant Temperature สูงขึ้น ต้องใส่ค่าแล้ว กด Calculate และ Adjust MRT

รูปที่ 5-30 การคำนวณปรับค่า MRT ถ้ามีแดดส่องมาถูกร่างกาย

(7) แถบ Dynamic Predictive Clothing หมายถึงการที่ไม่ทราบว่าคุณใช้อาคารจะแต่งตัวอย่างไร จึงให้หาจากสภาพอากาศภายนอก ตัวอย่างใน (รูปที่ 5-31) คือถ้าอุณหภูมิ 0 °C คนจะใส่เสื้อผ้าที่มีค่า clo = 0.82

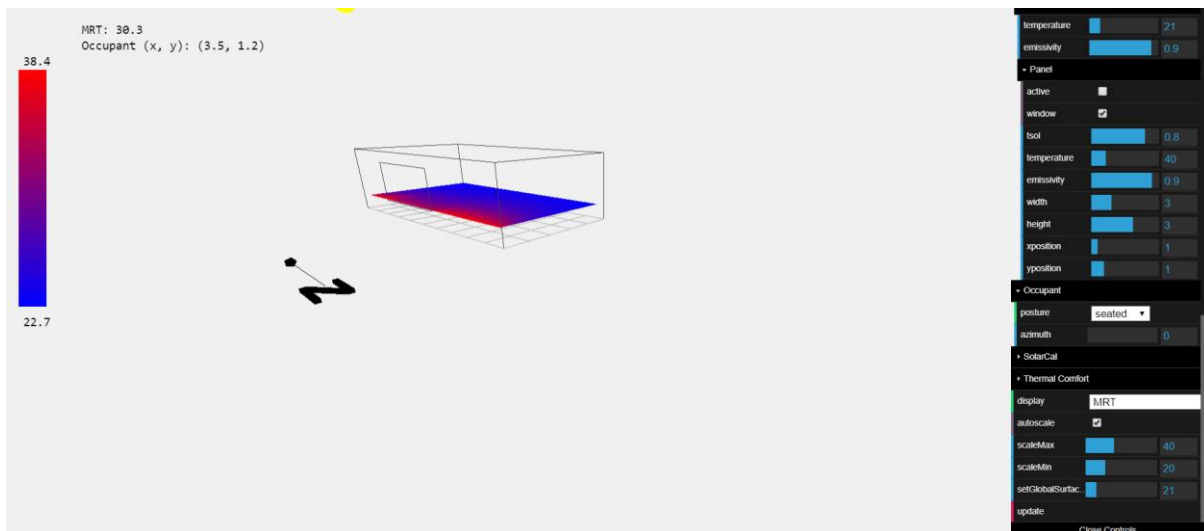
รูปที่ 5-31 การกำหนดค่า clo จากอุณหภูมิอากาศภายนอกเวลา 06.00 น.

(8) ในกรณีที่ใช้ Globe Thermometer วัดค่า เพื่อนำมาคำนวณหาค่า Mean Radiant Temperature ต้องเลือกแถบ EN-16798 (เพราะ ASHRAE-55 ใช้ Operative Temperature ซึ่งได้รวมอิทธิพลของ Mean Radiant Temperature แล้ว จึงเลือกแถบ Globe Temp ไม่ได้) เมื่อเลือก EN-16798 แล้วให้เลือกแถบ Globe Temp เพื่อคำนวณหา Mean Radiant Temperature ได้ โดยต้องใส่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัว Globe สีดำที่ใช้วัด และค่าอุณหภูมิที่อ่านได้ ความเร็วลม เช่น (รูปที่ 5-32) อากาศอุณหภูมิ 25 °C Globe Temperature วัดได้ 26 °C ความเร็วลม 0.1 m/s ค่า Emissivity ของวัตถุดำด้านส่วนใหญ่จะ = 0.95 จะได้ค่า MRT = 26.6 °C จากนั้นนำไปใช้กำหนดรวมกับค่าตัวแปรอื่น ๆ เพื่อหาสภาวะสบาย



รูปที่ 5-32 การคำนวณ MRT จากค่า Globe Thermometer

(9) สำหรับการคำนวณหา MRT ต้องไปที่แถบ MRT ใส่ค่าขนาดห้องแต่ละทิศ ขนาดหน้าต่างในแต่ละทิศ กดปุ่ม Update แล้วนำเมาส์ไปวางในรูปห้อง อ่านค่าตำแหน่ง x,y ของผู้ใช้อาคาร และค่า MRT ของจุดนั้น ๆ ที่มุมซ้ายบนของรูป (รูปที่ 5-33)

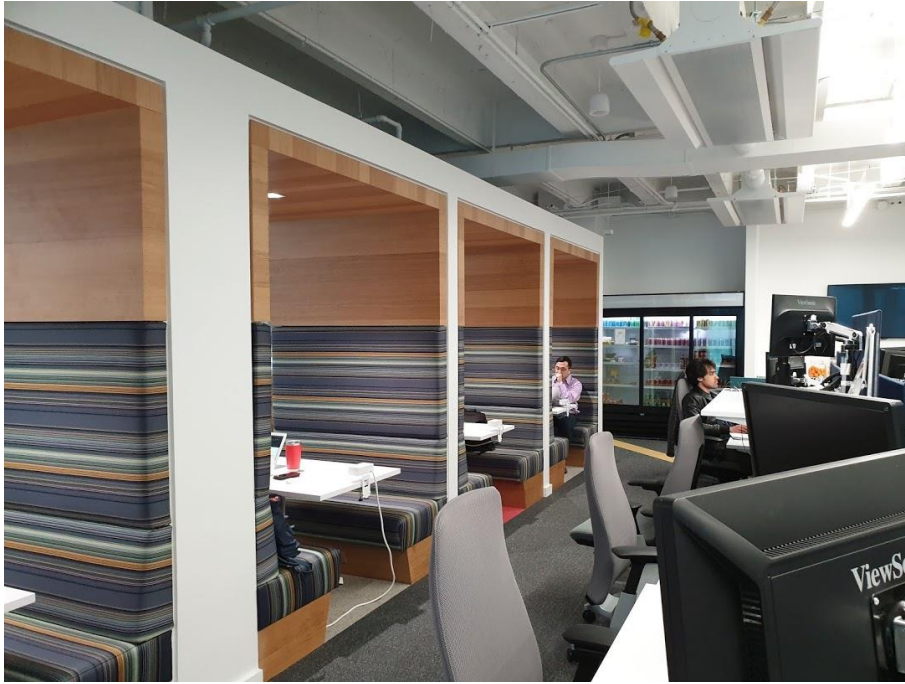


รูปที่ 5-33 การคำนวณหา MRT

5.12 แนวคิดในการออกแบบให้เกิดสภาวะสบายในอาคารเขียว

นอกจากการออกแบบให้มีค่าปัจจัยของสภาพแวดล้อม คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีที่เหมาะสมกับลักษณะกิจกรรมและการแต่งกายของผู้ใช้อาคาร ดังอธิบายข้างต้นแล้ว ในมาตรฐานอาคารเขียว เช่น LEED หรือ WELL ยังมีข้อกำหนดในการออกแบบเพิ่มเติม เพื่อให้ผู้ใช้อาคารมีสภาวะสบายยิ่งขึ้น เช่น ในเรื่องของวิธีการควบคุมสภาพแวดล้อม ซึ่งผู้ออกแบบควรศึกษาเกณฑ์การออกแบบเพิ่มเติม เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานนั้น ๆ ตัวอย่าง ข้อกำหนดในการออกแบบให้เกิดสภาวะสบาย ในมาตรฐาน WELL เช่น

- **การควบคุม** - การออกแบบห้องที่ผู้ทำงานในห้องคนเดียว ทุกห้องต้องสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมนั้นได้ เช่น ควบคุมอุณหภูมิ หรือ ความเร็วลม
- **การแบ่งโซนควบคุม** - ในห้องทำงานใหญ่ที่มีผู้ใช้หลายคนควรแบ่งโซนความร้อนที่สามารถควบคุมได้แต่ละโซนไม่ให้ใหญ่เกินไป คือ ไม่เกิน 60 ตารางเมตร หรือ ถ้าทำได้ไม่เกิน 30 ตารางเมตรต่อโซน ก็จะได้คะแนนเพิ่มขึ้น เป็นต้น
- **การจัดพื้นที่อิสระซึ่งมีอุณหภูมิต่างกัน** - การออกแบบให้มีพื้นที่อิสระ (Free Space) ที่มีอุณหภูมิในพื้นที่เหล่านี้แตกต่างกัน เพื่อให้ผู้ใช้อาคารสามารถเลือกนั่งทำงานได้ในอุณหภูมิที่แต่ละคนรู้สึกสบาย
- **การควบคุมความชื้น** - เครื่องปรับอากาศส่วนใหญ่จะไม่ได้ออกแบบให้ควบคุมความชื้น จึงมีข้อกำหนดให้ออกแบบให้มีความชื้นสัมพัทธ์ที่ 30-60%



รูปที่ 5-34 ตัวอย่างการออกแบบพื้นที่ทำงานแบบ Free Space
ของสำนักงานแห่งหนึ่งในประเทศสหรัฐอเมริกา

5.13 สรุป

การศึกษาเรื่องสภาวะสบายมีความจำเป็นต้องเข้าใจปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสภาวะสบาย เข้าใจวิธีการหาค่าที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีทั้งวิธีการวัด การคำนวณ การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ รวมทั้งเข้าใจขอบเขตสภาวะสบายของอาคารที่ปรับอากาศและไม่ปรับอากาศว่ามีความแตกต่างกัน วิธีการประเมินหาสภาวะสบายสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะมีเงื่อนไขของการนำไปใช้ จึงจำเป็นต้องเข้าใจเงื่อนไขเหล่านี้ให้ถูกต้อง มิฉะนั้นผลการประเมินจะไม่สามารถใช้ได้ รวมทั้งในกรณีที่เป็นการศึกษาเกณฑ์การออกแบบสภาวะสบายของแต่ละมาตรฐานเพิ่มเติม

เอกสารอ้างอิง

- Air Humidity and Indoor Air Quality. Available from <https://www.epfl.ch/labs/hobel/air-humidity-and-indoor-air-quality/>
- Arens, E., Hoyt, T., Zhou, X., Huang, L., Zhang, H., & Schivalon, S. (2015). Modeling the Comfort Effects of Short-wave Solar Radiation Indoors. *Building and Environment*, 88-3-9. Available from <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.004>.
- ASHRAE. ASHRAE Thermal Comfort Tool. CD-Rom. Version 2.
- ASHRAE. (2017). **ANSI/ASHRAE Standard 55-2017**. Atlanta
- ASHRAE. (2017). **ASHRAE Handbook – Fundamentals**. Chapter 9: Thermal Comfort. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2013.
- CBE Thermal Comfort Tool. Center for the Built Environment. University of California Berkeley. Available from <http://comfort.cbe.berkeley.edu/>
- Inside the Apparel Innovation Centre. Available from <https://www.avenuecalgary.com/shopping-style/inside-the-apparel-innovation-centre/>
- Lechner, Norbert. (2008). **Heating, Cooling, Lighting : Design Methods for Architects**. 3rd Edition. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Liu, S. et al. (2016). Predicted Percentage Dissatisfied with Ankle Draft. Available from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ina.12364>
- Mazzarella, Livio and Jaap Hogeling. **CEN Standard EN 16798-3:2017 on Ventilation for Non-Residential Buildings: Performance Requirements**. REHVA Journal – April 2018
- Olgay, Victor. (1963). **Design with Climate - Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism**. Princeton, New Jersey: Princeton University Press. Available from Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism - PDF Free Download
- Szokolay, S.V. **Thermal Design of Buildings**. Canberra: RAI Education Division, 1987.
- The WELL Building Standards. v1. Available from <https://resources.wellcertified.com/tools/well-building-standard-v1-q1-2019/>
- The WELL Building Standards. v2. Thermal Comfort. Available from <http://v2.wellcertified.com/v/en/thermal%20comfort>

แบบฝึกหัด

- 1) ให้วิเคราะห์ว่าสามารถออกแบบห้องปรับอากาศ โดยให้มีอุณหภูมิอากาศที่ 27°C สำหรับห้องอ่านหนังสือ ผู้ใช้อาคารสวมเสื้อแขนสั้นกางเกงขาสั้น จะต้องปรับความเร็วลมเท่าไร ให้อยู่ในสภาวะสบาย โดยโปรแกรม CBE Thermal Comfort Tool
- 2) ให้วิเคราะห์ว่าในอาคารไม่ปรับอากาศถ้าความเร็วลมเฉลี่ยภายนอก มีค่า 32°C อากาศภายใน 30°C จะสามารถอยู่ในสภาวะสบายหรือไม่
- 3) ให้สมมติสถานการณ์ในการออกแบบในห้องปรับอากาศ ที่มีปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมต่าง ๆ กัน โดยประเมินหาสภาวะสบายเปรียบเทียบระหว่างการใช้มาตรฐาน ASHRAE 55 การใช้ Bioclimatic Chart และการใช้สูตรใน หนังสือ Thermal Design of Buildings ที่ใช้ค่าอุณหภูมิอากาศภายนอกเพียงอย่างเดียวว่าสามารถประเมินผลสภาวะสบายได้สอดคล้องกันหรือไม่

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

6. การออกแบบโดยพึ่งพาธรรมชาติ (Passive Cooling)

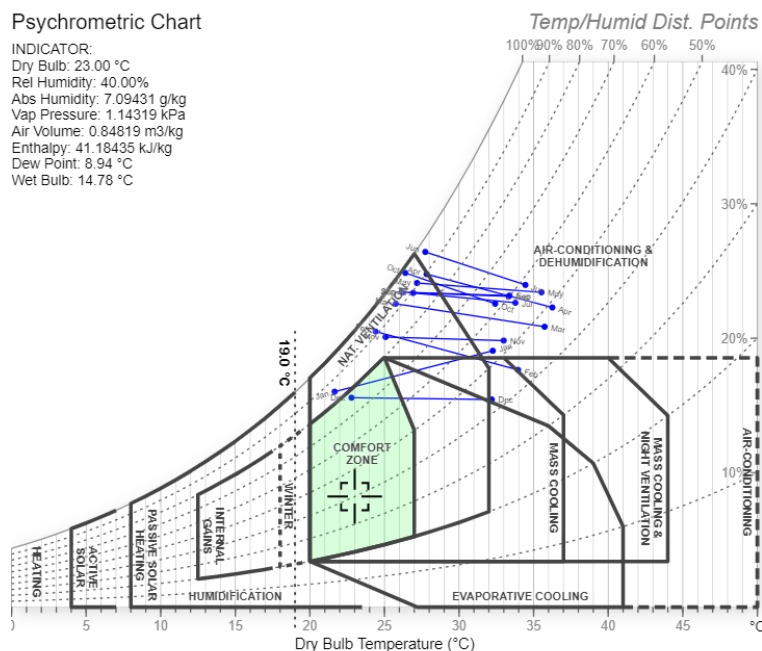
Passive Cooling หรือ การออกแบบโดยพึ่งพาธรรมชาติ หมายถึง วิธีการออกแบบที่พยายามลดความร้อนที่เข้าสู่อาคาร หรือ ระบายความร้อนในอาคารสู่ภายนอก หรือปรับความรู้สึกเพื่อให้ผู้อยู่ในขอบเขตสภาวะสบาย หรือ เข้าใกล้สภาวะสบายให้ได้มากที่สุดโดยไม่ต้องใช้พลังงาน หรืออาจจะมีการใช้พลังงานบ้างแต่อยู่ในระดับต่ำ เช่น การใช้พัดลมเพื่อให้อากาศหมุนเวียนในเวลาที่เหมาะสม เพื่อช่วยทำให้เกิดความเย็นสบาย แทนการปรับอากาศ วัตถุประสงค์ของบทนี้ คือ

- (1) เพื่อให้เข้าใจภาพรวมของวิธีการออกแบบโดยใช้การพึ่งพาธรรมชาติ
- (2) เพื่อให้เข้าใจแนวทางการออกแบบอุปกรณ์บังแดด
- (3) เพื่อให้เข้าใจแนวทางการออกแบบโดยใช้การระบายอากาศตามธรรมชาติ

6.1 ภาพรวมของวิธีการออกแบบโดยพึ่งพาธรรมชาติ

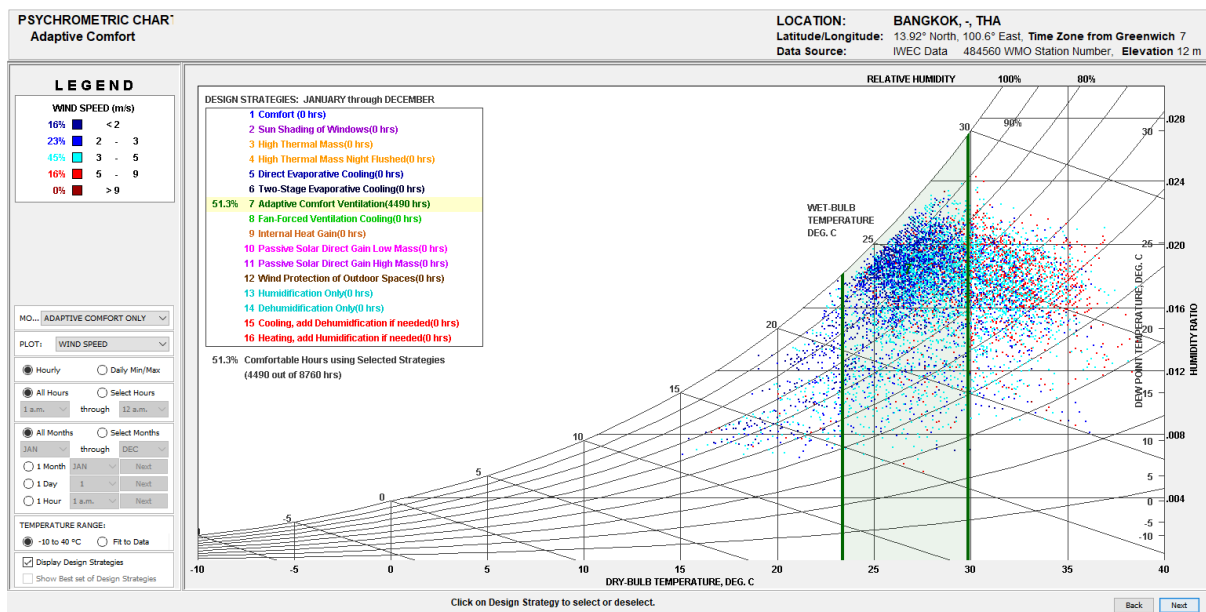
แนวทางการดำเนินงาน ควรเริ่มด้วยการวิเคราะห์สภาพอากาศและสภาพแวดล้อมของที่ตั้งโครงการ ทั้งในระดับภาพรวม (Macroclimate) และในระดับที่ตั้งโครงการ (Microclimate) ตามที่ได้อธิบายแล้วในบทการวิเคราะห์สภาพภูมิอากาศ และการวิเคราะห์ขอบเขตสภาวะสบาย เพื่อให้เข้าใจปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น อุณหภูมิ ความเร็วลม และใช้เป็นข้อมูลในการเลือกกลยุทธ์สำหรับ Passive Cooling ที่เหมาะสม (รูปที่ 6-1, 6-2)

ภาพรวมของวิธีการออกแบบพลังโดยพึ่งพาธรรมชาติ สามารถแบ่งได้ดังตารางที่ 6-1



รูปที่ 6-1 การวิเคราะห์อุณหภูมิและความชื้นรายเดือนเปรียบเทียบกับกลยุทธ์ต่าง ๆ

(ที่มา: การวิเคราะห์โดยใช้ Interactive Psychrometric Chart จาก <https://hvac-eng.com/interactive-psychrometric-chart/>)



รูปที่ 6-2 การวิเคราะห์อุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วลมรายชั่วโมงกับขอบเขตสภาวะสบาย
ในสภาพไม่ปรับอากาศ (Adaptive Thermal Comfort)
(ที่มา: การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Climate Consultant)

ตารางที่ 6-1 ภาพรวมของวิธีการออกแบบโดยพึ่งพาธรรมชาติ

การลดความร้อนที่เข้าสู่อาคาร	การนำความร้อนออกจากอาคาร	การปรับความรู้สึกสบาย
การวางทิศทางของตัวอาคาร	การใช้ลมธรรมชาติ	การใช้พื้นที่เพื่อปรับความรู้สึกระหว่างโซน
การใช้วัสดุที่นำความร้อนต่ำ	การแผ่รังสีความร้อนให้ท้องฟ้าในเวลากลางวัน	-
การใช้ผนังและหลังคาสีอ่อน	-	-
การใช้ผนังมวลสารเพื่อหน่วงความร้อน	-	-
การใช้วิธีบังแดด	-	-
การใช้เนินดิน หรือ ท่อฝังดิน	-	-
การใช้วิธีระเหยกลายเป็นไอ	-	-

การวางทิศทางของตัวอาคาร โดยการวางอาคารหันด้านแคบไปทางทิศตะวันออก-ตะวันตก เพื่อลดพื้นที่ด้านที่ได้รับความร้อนสูงจากรังสีอาทิตย์ ซึ่งจะทำให้ความร้อนถ่ายเทเข้าสู่อาคารน้อยลง

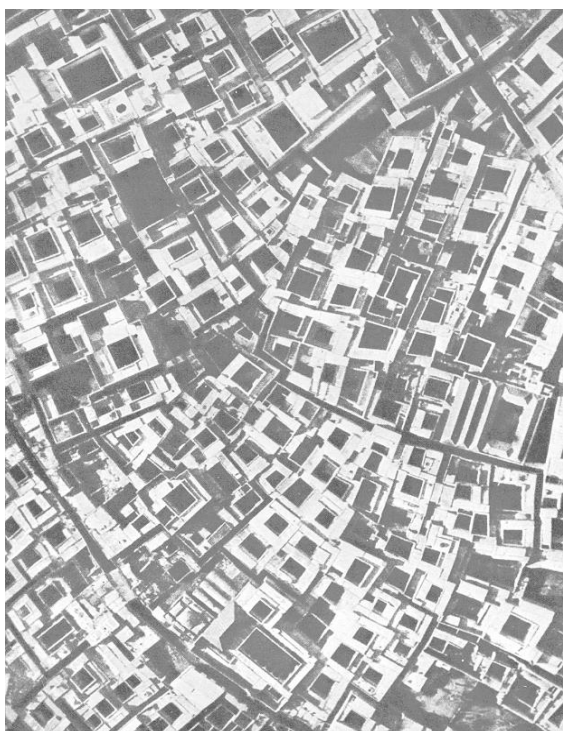
การใช้วัสดุที่นำความร้อนต่ำ ในที่นี้หมายถึงการลดความร้อนที่เข้าสู่อาคารทั้งผนังและหลังคาโดยเลือกใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติในการนำความร้อน (U-value) ต่ำ เช่น คอนกรีตมวลเบา หรือการใช้ฉนวนประเภทต่าง ๆ เสริมที่ผนังและหลังคา แต่ถ้าอาคารมีการใช้งานแบบไม่ปรับอากาศและบางเวลาที่ต้องการก็อาจจะปรับอากาศในเวลากลางวันด้วยซึ่งต้องปิดหน้าต่าง ก็ควรพิจารณารวมถึงคุณสมบัติของกระจกที่ใช้ด้วย เช่น กระจกเขียว จะสามารถลดความร้อนได้ดีกว่าการใช้กระจกใส (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมในบทที่ 8 ระบบเปลือกอาคาร)

การใช้ผนังและหลังคาสีอ่อน เป็นวิธีลดความร้อนจากการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ซึ่งหากใช้สีอ่อนควบคู่กับวัสดุผนังที่มีคุณสมบัติในการนำความร้อนต่ำด้วย ก็จะทำให้สามารถลดความร้อนเข้าสู่อาคารได้เพิ่มขึ้น

การใช้ผนังมวลสารเพื่อหน่วงความร้อน เป็นการออกแบบผนังโดยใช้วัสดุที่มีความจุความร้อนสูงซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่มีมวลสารมาก เช่น ผนังอิฐก่อเป็นผนังที่ความหนามาก การใช้ผนังมวลสารเป็นวิธีที่ช่วยลดความร้อนได้ดีมากในงานสถาปัตยกรรมเขตร้อนแห้ง เพราะอุณหภูมิอากาศในกลางวันร้อนจัดและกลางคืนเย็น ในเวลากลางวันผนังมวลสารจะช่วยหน่วงความร้อนไว้ พอถึงเวลากลางคืนความร้อนที่สะสมในผนังจะถ่ายเทเข้ามาภายในอาคารซึ่งอากาศเริ่มเย็น ก็จะช่วยเพิ่มความสะดวกสบายให้ภายในอาคาร สำหรับในประเทศไทยการใช้ผนังมวลสารมากจะช่วยลดความร้อนได้ดีในเวลากลางวัน ส่วนในช่วงเวลากลางคืน ควรเปิดหน้าต่างไล่ความร้อนออกไป ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่า Night Flushing

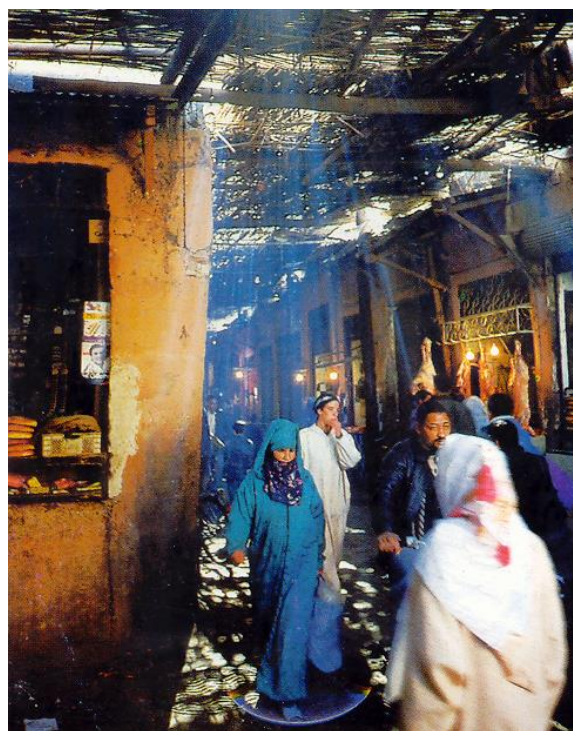
การแผ่รังสีความร้อนให้ท้องฟ้าในเวลากลางคืน ในเวลากลางคืนในสภาพภูมิอากาศซึ่งความชื้นต่ำ สภาพท้องฟ้าจะโปร่งไม่มีเมฆ หลังคาแดดฟ้าจะสามารถคายรังสีความร้อนให้กับท้องฟ้าซึ่งเย็นจัดได้เต็มที่ ทำให้อุณหภูมิที่ผิวหลังคาลดลงเป็นการลดความร้อนให้กับตัวอาคาร ปัจจุบันได้มีการพัฒนาวัสดุที่ใช้หลักการแผ่รังสีความร้อนกับท้องฟ้า ที่เรียกว่า Radiative Cooling Paint สำหรับทาบนหลังคาเพื่อทำให้สามารถแผ่ความร้อนไปยังท้องฟ้าได้ดียิ่งขึ้น (Mingxue Chen, 2020)

การใช้วิธีบังแดด (Shading) ซึ่งอาจเป็นการบังแดดโดยใช้สภาพแวดล้อม เช่น ต้นไม้ หรือสิ่งก่อสร้างใกล้เคียง การใช้รูปร่างของตัวอาคารที่ออกแบบบังแดดกันเอง หรือ ใช้ส่วนประกอบของอาคาร เช่น ชายคายที่ยื่นยาว การบังแดดเป็นวิธีที่สามารถลดความร้อนได้ดี ในงานสถาปัตยกรรมของเขตอากาศร้อนแห้งและร้อนชื้น สังเกตได้จากงานสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นของประเทศที่อากาศร้อนจัด บางทีจะสร้างอาคารชิดกันมาก มีเพียงทางเดินแคบ ๆ ผนังอาคารแต่ละหลังจะบังแดดให้กัน (รูปที่ 6-3, 6-4)



รูปที่ 6-3 สถาปัตยกรรมพื้นถิ่นในประเทศโมร็อกโก
ซึ่งสร้างชิดกันทำให้บังแดดกันเอง

(ที่มา: Rudofsky, Architecture Without Architect, 1964)



รูปที่ 6-4 ทางเดินระหว่างอาคารที่บังแดด
เพื่อลดความร้อนในประเทศโมร็อกโก

(ที่มา: Behling, Sol Power: the Evolution of Solar
Architecture, 1996)

การใช้ลมธรรมชาติ (Natural Ventilation) การใช้ลมธรรมชาติ จะสามารถใช้ประโยชน์เพื่อให้
ผู้ใช้อาคารเกิดความสบาย เพื่อระบายความร้อนออกจากตัวอาคาร และเพื่อการรักษาคุณภาพอากาศในอาคาร
ซึ่งจำเป็นต่อสุขภาพ โดยการนำอากาศบริสุทธิ์ภายนอกมาเติมในอาคาร ไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กลิ่น และ
มลพิษต่าง ๆ ในอาคารออกไป

การใช้วิธีระเหยกลายเป็นไอ เป็นวิธีที่ทำให้อุณหภูมิอากาศลดลง เช่น การใช้น้ำพุ สระน้ำ เป็นส่วน
หนึ่งในงานภูมิทัศน์ (รูปที่ 6-5) การลดความร้อนโดยใช้การระเหยเป็นวิธีที่สามารถใช้ได้ดีมากในงาน
สถาปัตยกรรมแบบร้อนแห้ง ส่วนในสถาปัตยกรรมเขตร้อนชื้นก็สามารถใช้ได้ แต่ขึ้นกับความชื้นในอากาศ
เพราะถ้าความชื้นสูงมากอยู่แล้วไอน้ำจะระเหยได้น้อย และถ้ามีความชื้นในอากาศมากเกินไปในสภาพอากาศ
ร้อนอาจทำให้รู้สึกไม่สบายได้ เพราะเหงื่อระเหยได้ยาก การลดอุณหภูมิอากาศโดยการระเหยเป็นไอของน้ำ
ไม่ควรใช้กับอาคารปรับอากาศ เพราะไม่ได้ทำให้ความร้อนรวมของอากาศลดลง แต่เป็นเพียงการเปลี่ยนจาก
ความร้อนสัมผัสเป็นความร้อนแฝง

สำหรับภายในอาคารที่ต้องการลดความร้อนโดยใช้การระเหยของน้ำ อาจจะใช้แผง Evaporative
Pad ซึ่งมีจะทำจากกระดาษติดที่ผนังอาคาร และมีการปล่อยน้ำทำให้แผ่นชื้นตลอดเวลา และใช้พัดลมดูดให้
อากาศภายนอกผ่านแผ่น ซึ่งอากาศที่ไหลผ่านแผ่นจะเย็นลง (รูปที่ 6-6, 6-7)



รูปที่ 6-5 การใช้น้ำเพื่อลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าอาคารในงานออกแบบภูมิทัศน์

(ที่มา: <https://www.archiscene.net/housing/mill-house-gert-karin-wingardh/>)

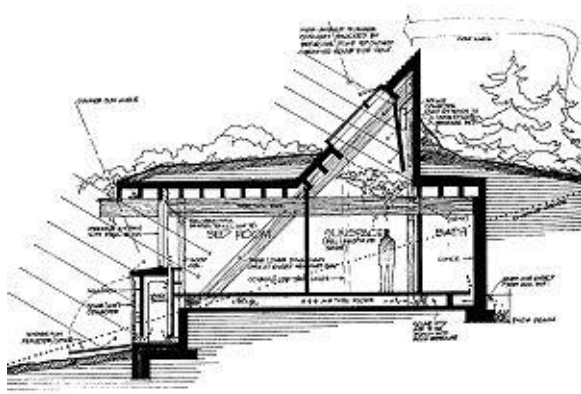
รูปที่ 6-6 การทำงานเมื่อการใช้ Evaporative Cooling Pad (ที่มา: https://www.quora.com/How-does-evaporative-air-cooling-work)	รูปที่ 6-7 อาคารที่ทำการติดตั้ง Evaporative Cooling Pads ที่ผนัง (ที่มา: https://www.alibaba.com/product-detail/Gel-evaporative-cooling-pad-liquid-cooling_60258243055.html)

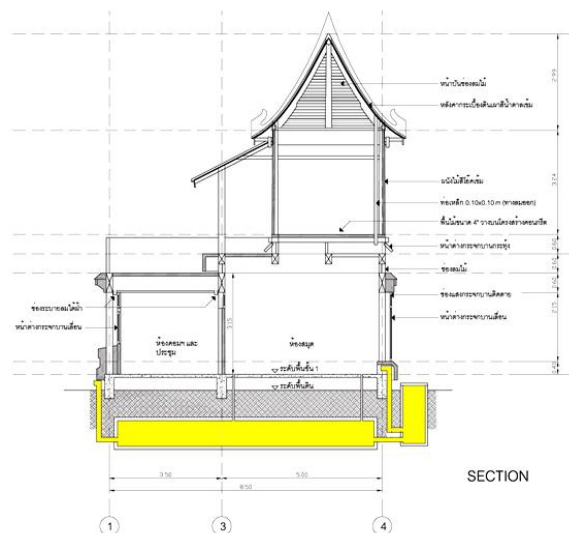
การใช้เนินดิน หรือ ท่อฝังดิน ดินไม่ใช่วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ โดยเฉพาะดินที่มีความชื้น แต่ดินมีมวลสารมากและมีความจุความร้อนสูง จึงช่วยหน่วงความร้อนที่เข้าสู่อาคาร การออกแบบที่ใช้ประโยชน์จากดินมักจะพบใน 2 ลักษณะ คือ

การออกแบบให้ผนังบางส่วนสัมผัสดิน โดยทำเป็นเนินดิน (Earth Coupling) หรืออาจจะให้ดินคลุมถึงหลังคา โดยใช้สภาพภูมิประเทศที่มีความลาดเอียงอยู่แล้ว (รูปที่ 6-8, 6-9) ซึ่งจะช่วยให้อุณหภูมิอากาศในอาคารไม่เปลี่ยนแปลงมาก เพราะอุณหภูมิผนังที่สัมผัสดินจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากในรอบวันเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิผนังที่ติดกับอากาศภายนอกและได้รับรังสีอาทิตย์

การออกแบบที่ใช้ดินอีกลักษณะหนึ่งคือ การทำท่อฝังดิน (Earth Tube) โดยให้อากาศร้อนภายนอกผ่านท่อเพื่อแลกเปลี่ยนความเย็นกับดิน แล้วไหลออกมาที่อีกปลายหนึ่งในอาคาร การออกแบบด้วยวิธีนี้ มีปัจจัยที่ต้องพิจารณาในหลายด้าน เช่น อุณหภูมิดินที่ระดับความลึกต่าง ๆ ที่เย็นพอที่จะฝังท่อ และ ความยาวท่อ เป็นต้น ในประเทศไทยไม่มีอาคารที่ใช้ระบบนี้มากนัก พบตัวอย่างอาคารสาธารณะที่ใช้บ้าง เช่น หอสมุด

สยามบรมราชชนนี จังหวัดนครสวรรค์ (รูปที่ 6-10) ข้อควรคำนึงในการใช้ท่อฝังดินที่พบปัญหา คือ การหลุดตัวของท่อฝังดินกับอาคารที่อาจไม่เท่ากัน เมื่อผ่านการใช้งานไปนาน ๆ ซึ่งอาจทำให้ท่อมียรอยแยกทำให้น้ำฝนไหลเข้าไปในท่อเวลาฝนตก การดูแลรักษาทำความสะอาดปากท่อ การป้องกันสัตว์รบกวนเข้าไปอาศัยในท่อ และราคาค่าก่อสร้าง ซึ่งควรพิจารณาอย่างรอบคอบ

	
รูปที่ 6-8 รูปตัดของการทำ Earth Coupling (ที่มา: https://www.pinterest.com/pin/712413234777453928/)	รูปที่ 6-9 ตัวอย่างอาคารใช้ดินแบบ Earth Coupling เพื่อลดความร้อนและความหนาวเย็น (ที่มา: https://www.dezeen.com/2020/03/18/jordi-hidalgo-tane-landaburu-borda-concrete-extension-spain-architecture/)



รูปที่ 6-10 ตัวอย่างอาคารที่ใช้ท่ออากาศฝังดินเพื่อแลกเปลี่ยนความเย็นกับดินก่อนเข้าสู่อาคาร
(ที่มา: ฉกาจ ดำรงเกียรติ, 2552)

การใช้พื้นที่เพื่อปรับความรู้สึกระหว่างโซน (Transition Zone) เทคนิคนี้ที่เป็นการสร้างพื้นที่เพื่อการปรับความรู้สึก โดยเป็นพื้นที่ซึ่งอยู่ระหว่างภายนอกและภายในอาคารซึ่งปรับอากาศ เช่น พื้นที่ระเบียงทางเข้าที่มีหลังคาคลุมหรือพื้นที่ใต้ถุนอาคาร ซึ่งมิงงานวิจัย (Pitts, 2013) สนับสนุนว่าผู้ใช้อาคารจะรู้สึกสบายได้ในพื้นที่ Transition Zone ในขอบเขตอุณหภูมิที่กว้างกว่าในห้องปรับอากาศ โดยอาจจะใช้พัดลมช่วยในบริเวณเหล่านี้ก็สามารถทำให้เกิดความสบายได้ โดยไม่จำเป็นต้องปรับอากาศ ซึ่งทำให้สามารถประหยัดพลังงาน ปัจจุบันเราจะพบลักษณะดังกล่าวจากการออกแบบ Community Mall ต่าง ๆ ที่มีลักษณะกึ่งภายนอก-ภายในและใช้พัดลมความเร็วต่ำ เพิ่มความเร็วลมให้รู้สึกสบาย

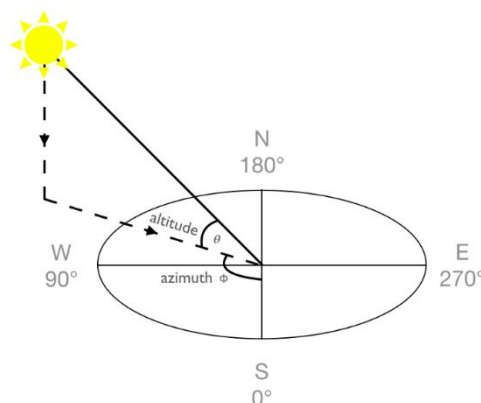
สำหรับเทคนิคต่าง ๆ ข้างต้น จะอธิบายเพิ่มเติมรายละเอียดเฉพาะในส่วนของการออกแบบอุปกรณ์บังแดด ซึ่งสามารถช่วยลดความร้อนได้ทั้งอาคารไม่ปรับอากาศ และปรับอากาศ และวิธีการระบายอากาศตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นวิธีที่มีการใช้แพร่หลายในงานสถาปัตยกรรมร้อนชื้น มากกว่าวิธีอื่น ๆ

6.2 แนวทางการออกแบบอุปกรณ์บังแดด

การลดความร้อนที่เข้าสู่อาคาร โดยการใช้อุปกรณ์บังแดด จำเป็นต้องเข้าใจวิถีวิเคราะหเพื่อหามุมที่สามารถบังแดดให้หน้าต่างหรือผนังโปร่งแสงได้ ในอดีตซึ่งยังไม่มีการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการจำลองเงาจากอุปกรณ์บังแดด เครื่องมือที่ใช้ในการหาดำแหน่งดวงอาทิตย์ คือ **ผังการโคจรของดวงอาทิตย์ (Sun Path Diagram)** โดยจะต้องเลือกผังโคจรของดวงอาทิตย์ที่มีตำแหน่งละติจูด (Latitude) ใกล้เคียงกับที่ตั้งโครงการมากที่สุด สำหรับประเทศไทยอยู่ที่ละติจูดประมาณ 20°N ถึงประมาณ 6°N ส่วนกรุงเทพมหานครจะอยู่ที่ประมาณ $13^{\circ}\text{N} - 14^{\circ}\text{N}$

การหาดำแหน่งของดวงอาทิตย์ ของเวลาที่ต้องการบังแดดจะแสดงด้วยค่ามุม 2 มุม (รูปที่ 6-11) คือ

- มุม Azimuth เป็นมุมที่แสดงตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนพื้นราบ วัดจากทิศเหนือ หรือ ทิศใต้ก็ได้ ประเทศที่อยู่ในซีกโลกเหนือจะนิยมนับมุม Azimuth จากแกนในทิศใต้ ส่วนประเทศในซีกโลกใต้มักจะวัดมุม Azimuth จากแกนทิศเหนือ แต่บางเอกสารหรือบางเว็บไซต์ก็ใช้วัดจากทิศเหนืออย่างเดียวตลอดสำหรับทุกพื้นที่ในโลก
- มุม Altitude เป็นมุมที่แสดงตำแหน่งดวงอาทิตย์ในแนวดิ่ง วัดระหว่างพื้นราบที่จุดสังเกตกับแนวดวงอาทิตย์



รูปที่ 6-11 มุม Azimuth และมุม Altitude ที่วัดจากทิศใต้

(ที่มา: <http://www.marmottenergies.com/much-sun-heat-house/>)

ปัจจุบันสามารถหาผังการโคจรของดวงอาทิตย์ได้จากเว็บไซต์ต่าง ๆ เช่น ค่ามุม Azimuth และมุม Altitude และ Sun Path Diagram ได้ทุกละติจูดจากเว็บไซต์ต่าง ๆ เช่น

<http://solardat.uoregon.edu/cgi-bin/PolarSunChart.cgi> ของ University of Oregon หรือ

<http://www.jaloxa.eu> และบางเว็บไซต์ เช่น <http://www.andrewmarsh.com> ก็มีทั้ง Sun Path

Diagram และบอกค่ามุม Azimuth และ Altitude ที่ละเอียดถึงทศนิยมด้วย

ประเภทของ Sun Path Diagram ผังที่ใช้หาตำแหน่งดวงอาทิตย์สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ ผังที่แสดงการโคจรของดวงอาทิตย์ลงบนพื้นราบ และผังที่แสดงการโคจรของดวงอาทิตย์บนระนาบแนวโค้ง ซึ่งทุกแบบอ่านค่ามุมได้ตรงกัน

(1) **ผังการโคจรของดวงอาทิตย์ในแนวราบ** หรือแบบ Polar Sun Path Diagram จะมีวิธีการฉายภาพ (project) มุม Altitude ลงมาบนพื้นราบแตกต่างกัน แบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ

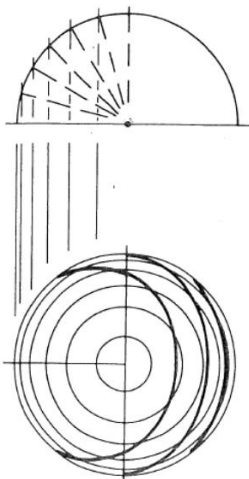
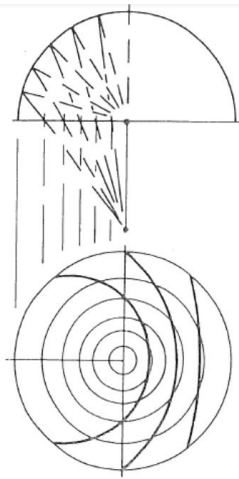
- **Spherical Sun Path** หรือ บางที่เรียก **Orthographic Sun Path Diagram** (รูปที่ 6-12, 6-14) การพล็อตมุม Altitude ใช้การวัดองศาที่นับจากศูนย์กลางทรงกลม เส้นวงกลมที่แสดงมุม Altitude เมื่อค่ามุมต่ำจะอยู่ชิดกันมากกว่าที่มุมสูง ๆ ซึ่งอาจจะอ่านยากเมื่อมุม Altitude มีค่าต่ำ

- **Stereographic Sun Path** (รูปที่ 6-13, 6-15) เป็นแบบที่มีการพล็อตตำแหน่งมุม Altitude จากจุดศูนย์กลางที่อยู่ต่ำกว่าจุดศูนย์กลางกลางของทรงกลมเท่ากับรัศมีทรงกลม ระยะห่างระหว่างวงกลมที่แสดงค่ามุม Altitude เมื่อมีมุมสูง ๆ จะแคบกว่าช่วงมุมต่ำ ระยะห่างของวงกลมที่แสดงมุม Altitude จะไม่ชิดกันมาก ซึ่งเป็นแบบที่นิยมใช้แบบหนึ่ง

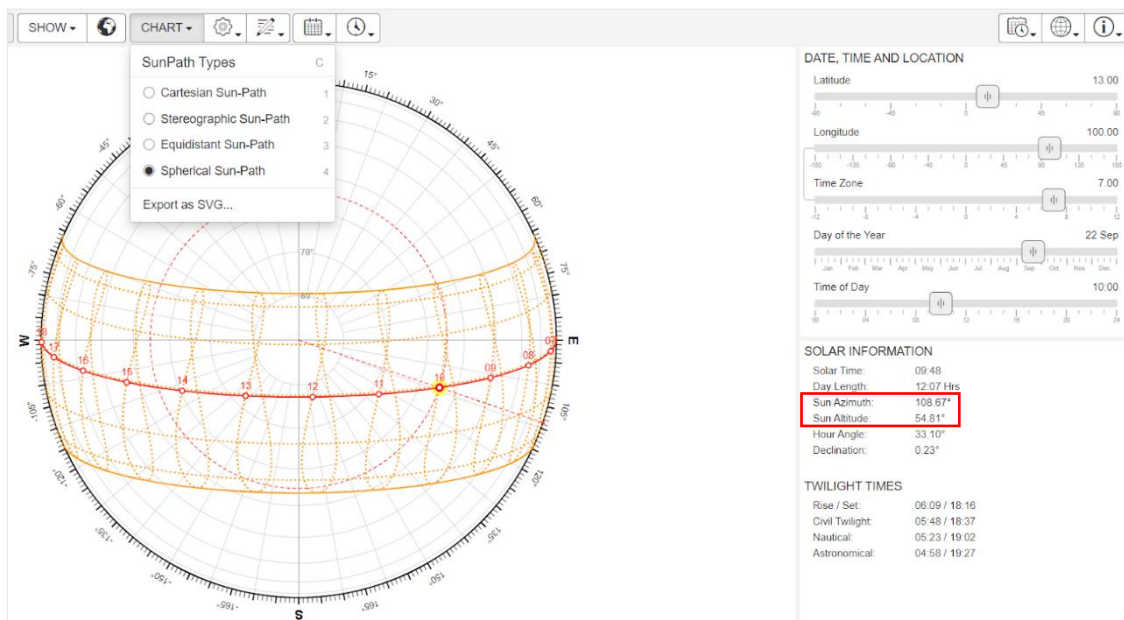
- **Equidistant Sun Path** (รูปที่ 6-16, 6-17) เป็นการแบ่งระยะห่างเส้นรอบรูปวงกลมแต่ละชั้นให้เท่า ๆ กันที่ 10° ซึ่งนิยมใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา

เวลาที่แสดงใน Sun Path Diagram เป็นเวลาที่เรียกว่า **Solar Time** คือ เวลาที่ตำแหน่งของดวงอาทิตย์อยู่สูงที่สุดตรงเวลาเที่ยงวัน ซึ่งแตกต่างจากเวลาที่เราใช้ตามนาฬิกา หรือเวลามาตรฐานของท้องถิ่นอยู่บ้าง เพราะเวลาท้องถิ่นจะเป็นเวลาที่ตั้งตรงเส้นเมริเดียน (Meridian) หรือ เส้นลองจิจูด (Longitude) ที่กำหนด เวลา Solar time และเวลาท้องถิ่นจึงตรงกันเฉพาะตรงเส้นลองจิจูดที่ใช้กำหนดเวลามาตรฐานของท้องถิ่นเท่านั้น

สำหรับในประเทศไทยได้ตั้งเวลามาตรฐานตรงเส้น Longitude ที่ 105° ตะวันออก โดยระยะห่างระหว่างลองจิจูดแต่ละเส้นมีค่าเท่ากับ 4 นาที ถ้าคิดตาม Solar Time แต่เพื่อความสะดวกประเทศไทยจึงใช้เวลาเหมือนกันทั้งประเทศ สำหรับประเทศที่มีอาณาเขตขนาดกว้างใหญ่ อาจกำหนดเวลามาตรฐานท้องถิ่นของแต่ละพื้นที่แตกต่างกัน เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา จะแบ่งเวลามาตรฐานในประเทศออกเป็น 4 เขตเวลา (Time Zone)

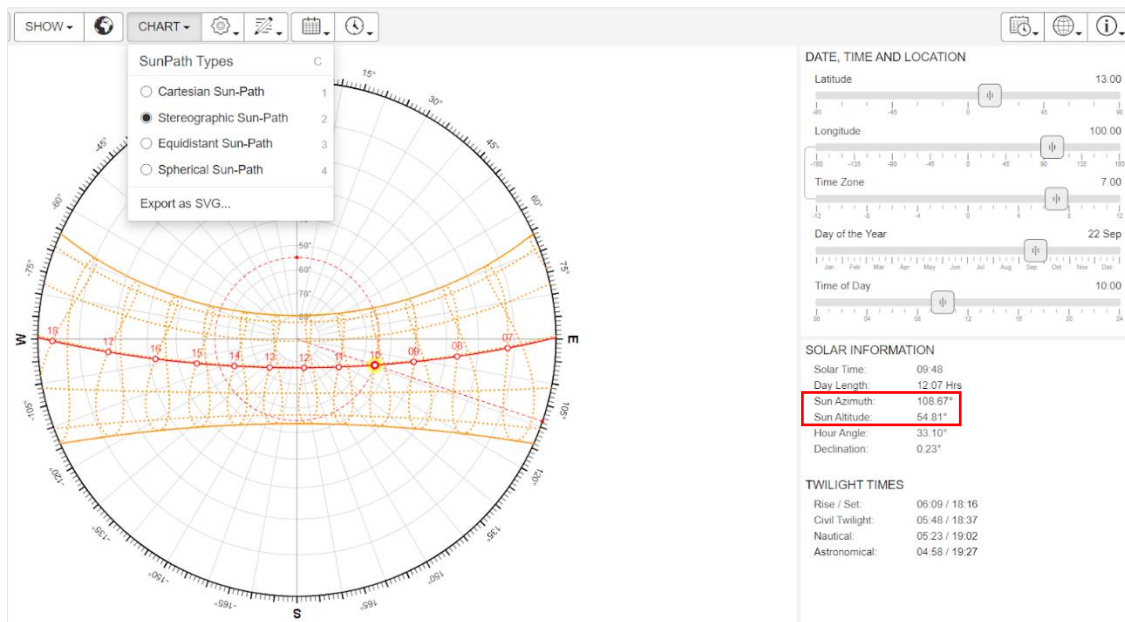
	
รูปที่ 6-12 Spherical หรือ Orthographic Sun Path Diagram (ที่มา: Szokolay, 1987, p.14)	รูปที่ 6-13 Stereographic Sun Path Diagram (ที่มา: Szokolay, 1987, p.14)

การใช้ผังโคจรของดวงอาทิตย์ นอกจากใช้หาค่ามุม Azimuth และมุม Altitude เพื่อการออกแบบแผงบังแดดแล้ว ยังสามารถใช้เพื่อหาเวลาที่เงาของอาคารโดยรอบที่พาดลงมายังจุดสังเกตในพื้นที่โครงการได้ด้วย เช่น ถ้าต้องการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (รูปที่ 6-18) หรือประเทศในเขตหนาวที่ต้องการได้ความอบอุ่นจากแสงแดด ก็ใช้ในการวิเคราะห์ Solar Access ได้

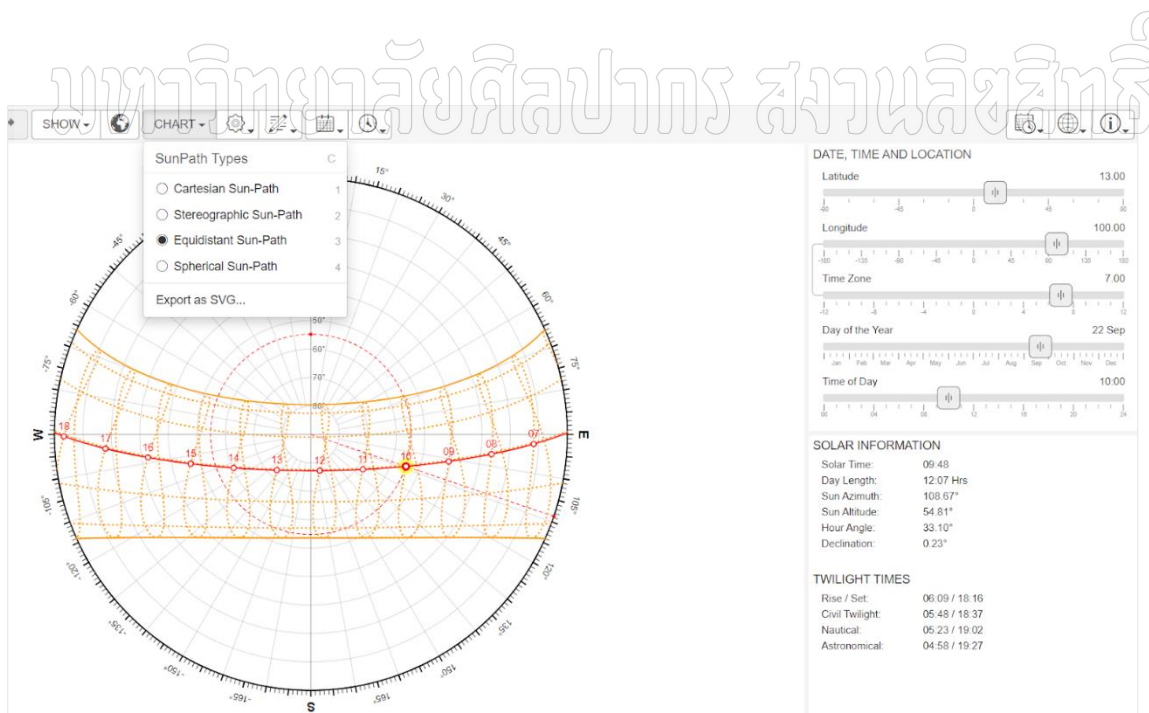


รูปที่ 6-14 ผังการโคจรของดวงอาทิตย์แบบ Spherical Sun Path

(ที่มา: <https://drajmarsh.bitbucket.io/sunpath2d.html>)



รูปที่ 6-15 ผังแบบ Stereographic Sun Path อ่านค่า Solar Azimuth ได้ = 108.67°
จากศูนย์กลางวงกลมตัดผ่านเวลา 10.00 น. ของเดือน มาที่เส้นรอบรูป Solar Altitude = 54.81°
อ่านได้จากเส้นวงแหวนสีเทาอ่อนข้างใน และอ่านได้จาก Solar Information มุมขวาล่าง
(ที่มา: <https://drajmarsh.bitbucket.io/sunpath2d.html>)

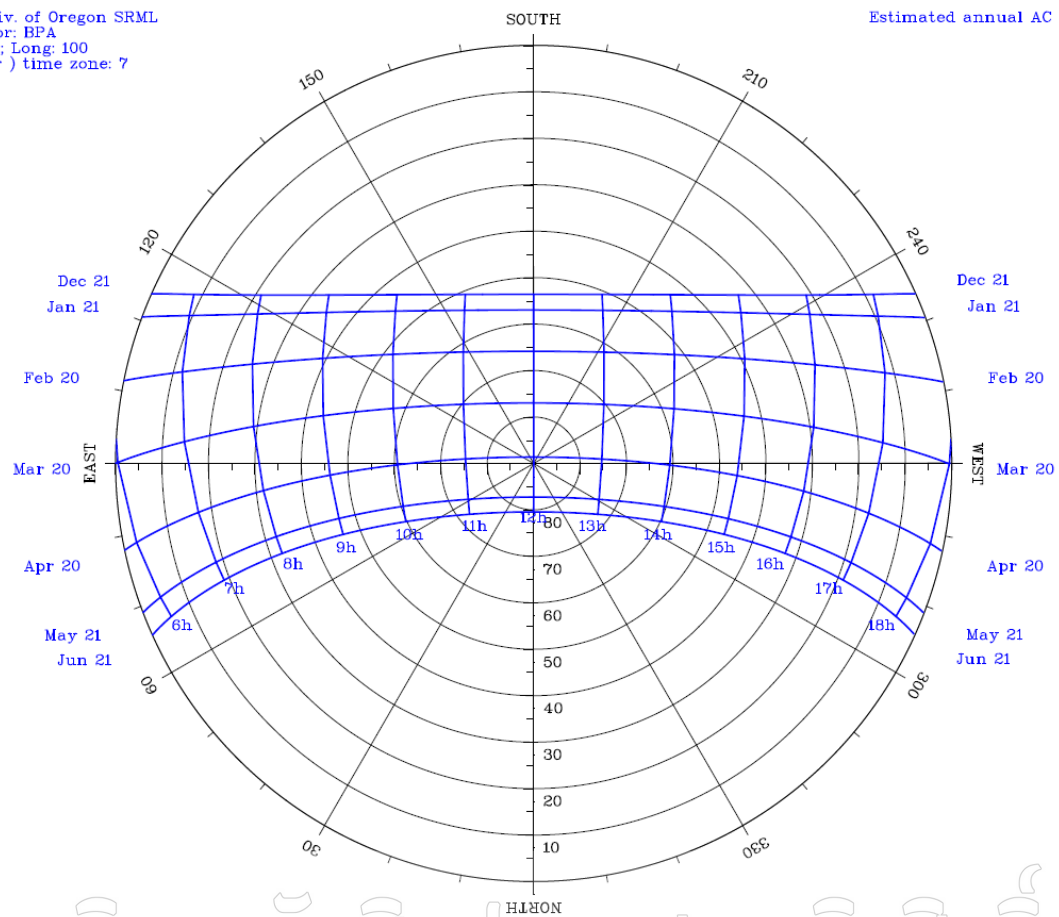


รูปที่ 6-16 ผังการโคจรของดวงอาทิตย์แบบ Equidistant Sun Path

(ที่มา: <https://drajmarsh.bitbucket.io/sunpath2d.html>)

(c) Univ. of Oregon SRML
Sponsor: BPA
Lat: 13; Long: 100
(Solar) time zone: 7

Estimated annual AC output:

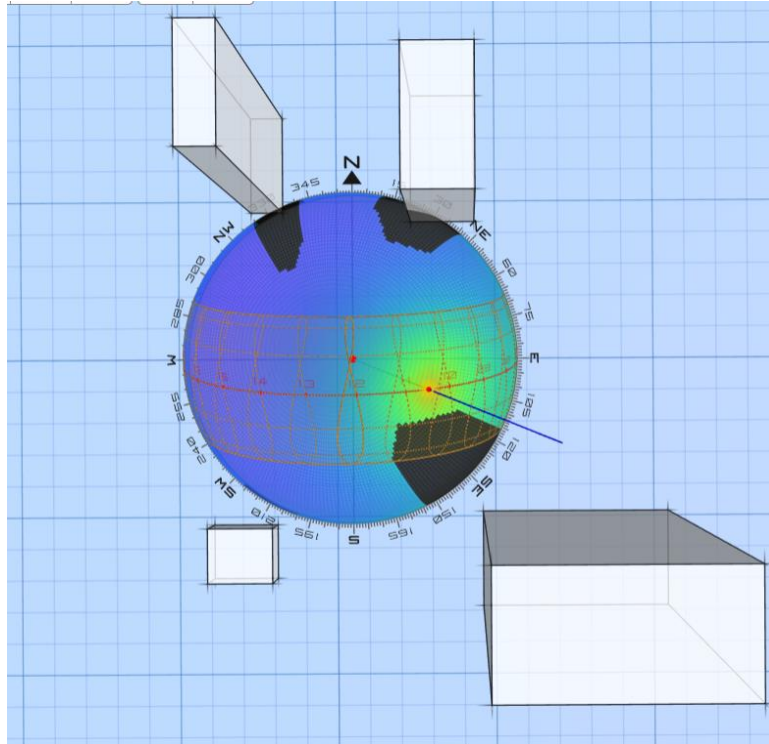


มหาวิทยาลัยศิลปากร งามเลิศสิทธิ์

รูปที่ 6-17 การใช้โปรแกรม Polar Solar Path Chart ของ University of Oregon

เพื่อสร้าง Sun Path Diagram แบบ Equidistant

(ที่มา: <http://solardat.uoregon.edu/cgi-bin/PolarSunChart.cgi>)



รูปที่ 6-18 การใช้ Sun Path Diagram วิเคราะห์เงาของอาคารโดยรอบ

จะเห็นว่าอาคารทางทิศตะวันตกเฉียงใต้จะบังแดดในช่วงเช้า

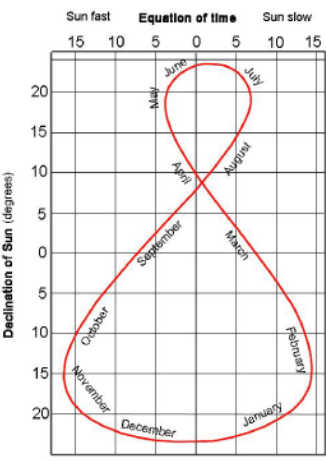
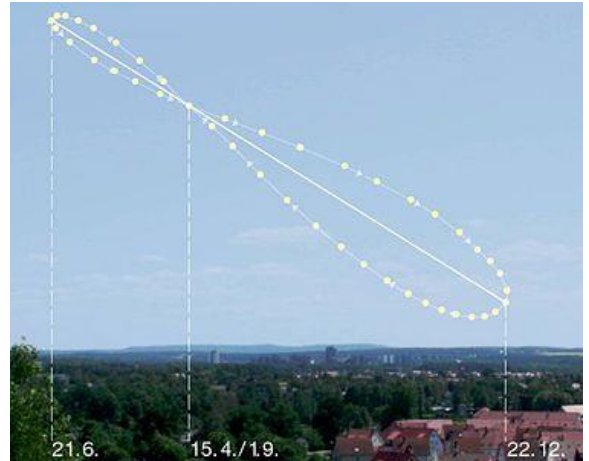
ประมาณเดือนตุลาคมถึงธันวาคม แต่อาคารอื่นจะไม่มีผล

(ที่มา: <https://drajmarsh.bitbucket.io/shading-box.html>)

มหาวิทยาลัยศิลปากร ส่วนลิขสิทธิ์

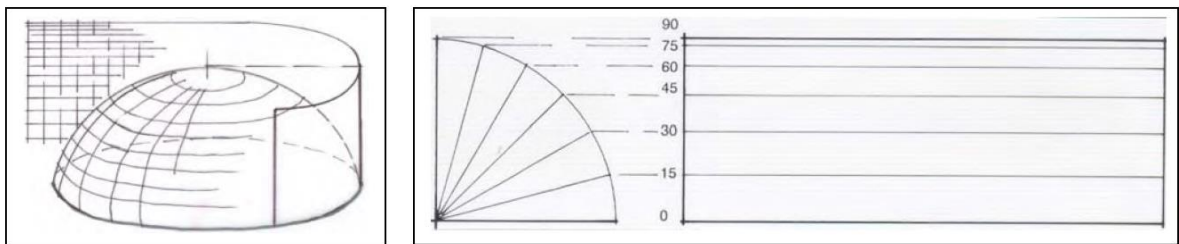
วันที่แสดงใน Sun Path Diagram ส่วนใหญ่จะแสดงการโคจรของดวงอาทิตย์วันที่ 21 ของแต่ละเดือน โดยเส้นบนสุด คือ 21 มิถุนายน และเส้นล่างสุด คือ 21 ธันวาคม (กรณีที่ด้านบน คือ ทิศเหนือ) สำหรับวันที่ 21 กันยายน และ 21 มีนาคม ดวงอาทิตย์จะขึ้นและตกทางทิศตะวันออกและทิศตะวันตกพอดี ที่เวลา 6.00 น. และ 18.00 น.

นอกจากนี้อาจสังเกตเห็นเส้นทางเดินของดวงอาทิตย์ที่ซ้ำโหม่งเดียวกันของแต่ละเดือน เคลื่อนที่เป็นรูปคล้ายเลขแปด (8) เส้นดังกล่าวเรียกว่า Analemma (รูปที่ 6-19, 6-20) ซึ่งเกิดจากการที่แกนของโลกเอียงและโลกไม่ได้โคจรรอบดวงอาทิตย์ด้วยระยะห่างที่เท่ากันตลอด แต่ในผังโคจรของดวงอาทิตย์บางแบบจะแสดงเป็นเส้นเดียว (รูปที่ 6-17) ซึ่งเป็นการใช้ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งดวงอาทิตย์

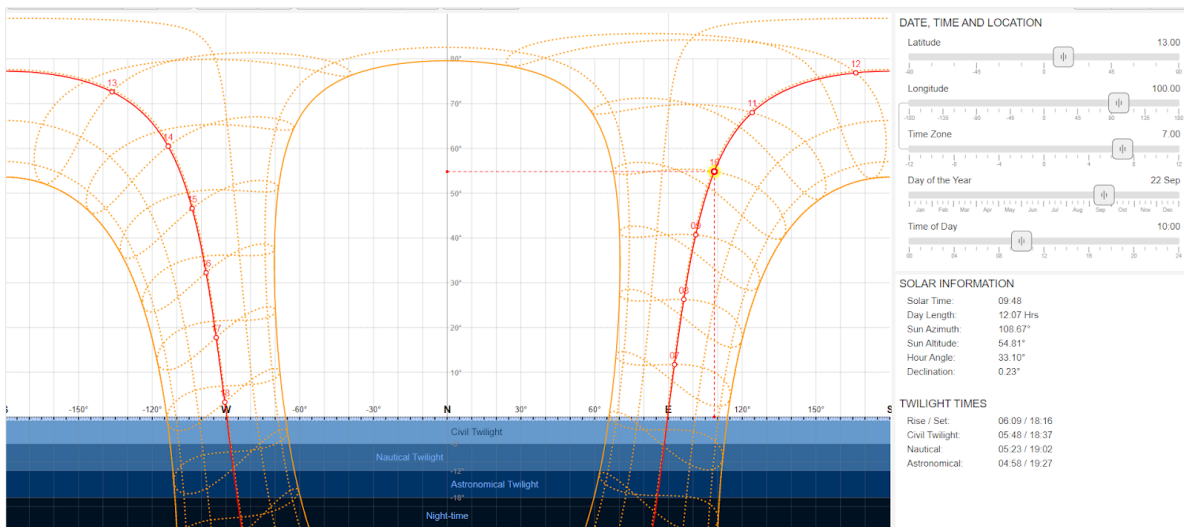
	
รูปที่ 6-19 อ่านเดือนที่ต้องการทราบตำแหน่งดวงอาทิตย์ตามเส้นโค้ง Analemma (ที่มา: Analemma)	รูปที่ 6-20 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในชั่วโมงเดียวกันของแต่ละเดือนที่เปลี่ยนแปลง บนเส้น Analemma (ที่มา: แอนาเล็มมา)

(2) **ผังโคจรของดวงอาทิตย์ในแนวตั้ง หรือ Cartesian Sun Path Diagram** เป็นการนำตำแหน่งการโคจรของดวงอาทิตย์มาพล็อตในแนวตั้งของรูปทรงกระบอก (รูปที่ 6-21) โดยมุม Altitude จะพล็อตในแนวตั้ง หรือ แกน Y ส่วนมุม Azimuth จะอยู่ในแกน X

การแบ่งช่วงของมุม Altitude ในแกน Y ของผังแบบ Cartesian ก็ยังมีหลายแบบ แล้วแต่ผังแนวนอนที่นำมาฉายภาพ ว่าเป็นแบบ Spherical มาพล็อต หรือ แบบ Equidistant (รูปที่ 6-22) การใช้ผังแบบ Cartesian นอกจากใช้อ่านค่ามุมแล้ว สามารถใช้วิเคราะห์หาเวลาที่เกิดการบังแดดจากอาคารข้างเคียงในแต่ละทิศได้ด้วย



รูปที่ 6-21 การฉายภาพการโคจรของดวงอาทิตย์ให้อยู่ในแนวตั้งของรูปทรงกระบอก
(ที่มา: Szokolay, Solar Geometry, p.11)



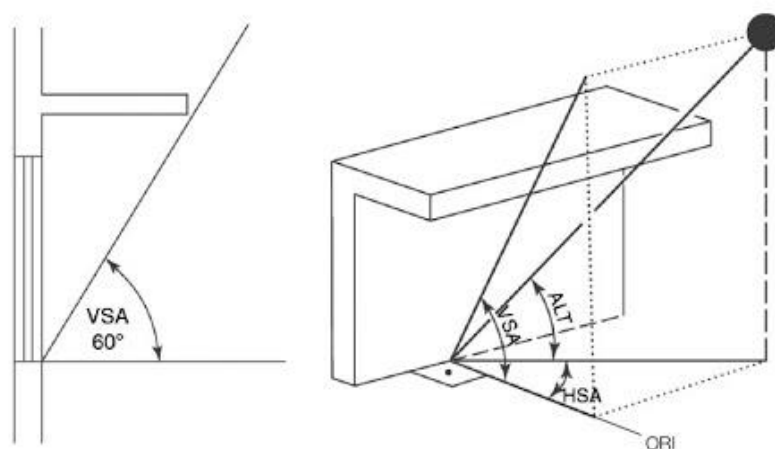
รูปที่ 6-22 ผังทางโคจรของดวงอาทิตย์แสดงในแนวตั้ง เวลา 10.00 น. 21 กันยายน
 Solar Azimuth = 108.67° (อ่านจากแกน X) Solar Altitude = 54.81° (อ่านจากแกน Y)
 (ที่มา: <https://drajmarsh.bitbucket.io/sunpath2d.html>)

6.3 การหาระยะยื่นของแผงบังแดด

หลังจากที่ได้ค่ามุม Azimuth และ Altitude จาก Sun Path Diagram แล้วก็ต้องนำมาหาระยะยื่นอุปกรณ์บังแดด ซึ่งสามารถแบ่งตามรูปร่างพื้นฐานได้เป็น 3 แบบ คือ

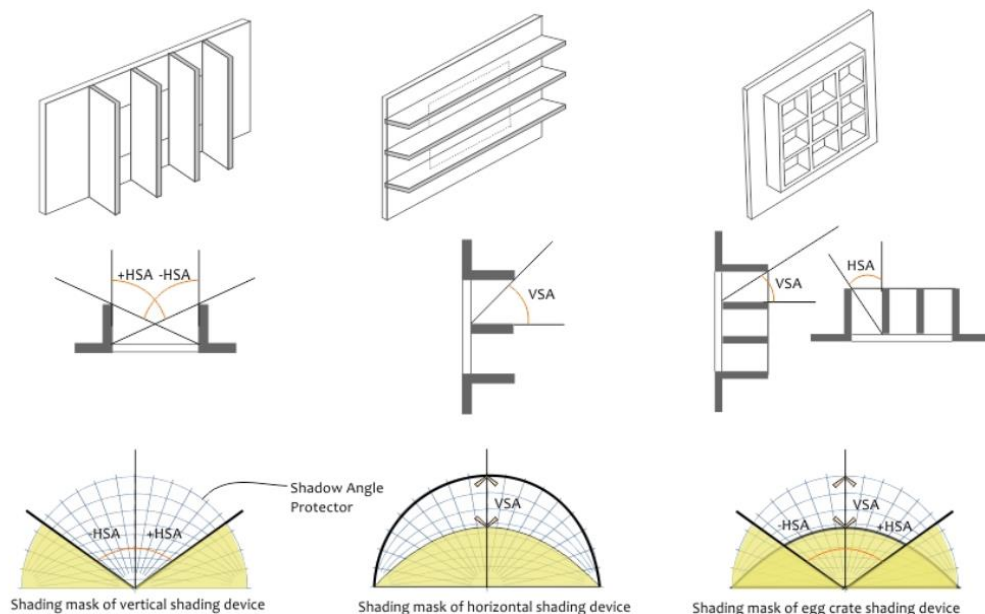
- แผงบังแดดแนวนอน
- แผงบังแดดแนวตั้ง
- แผงบังแดดที่มีทั้งแนวนอนและแนวตั้ง

การหาระยะยื่นของแผงบังแดดแนวนอน จะต้องทราบมุม Vertical Shadow Angle (VSA) ส่วนแผงบังแดดแนวตั้งจะทราบมุม Horizontal Shadow Angle (HSA) (รูปที่ 6-23, 6-24)



รูปที่ 6-23 แสดงตำแหน่งดวงอาทิตย์ มุม Altitude มุม VSA และมุม HSA สำหรับออกแบบแผงบังแดด

(ที่มา: <http://bfirst-products.eu/guidelines/a09-shading-lamellas/>)



รูปที่ 6-24 แผงบังแดดที่มีทั้งแนวนอนและแนวตั้ง

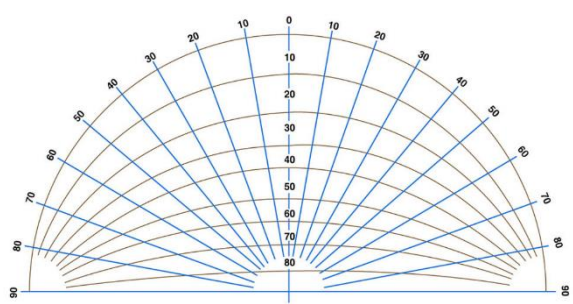
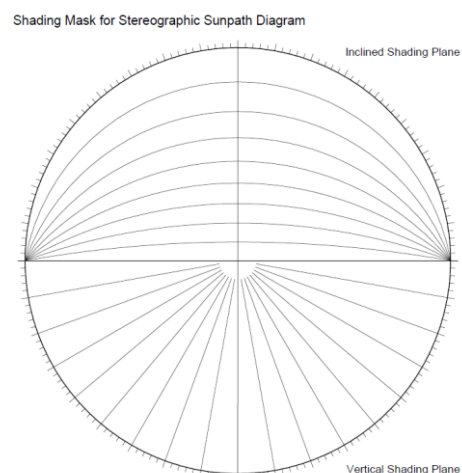
(ที่มา: <https://www.pinterest.com/pin/320388960978407775/>)

การหาค่ามุม VSA และ มุม HSA จะสามารถหาได้ 2 วิธี คือ การใช้ Shading Mask หรือ การใช้วิธี

คำนวณ

(1) การใช้ Shading Mask (รูปที่ 6-25, 6-26) คือแผนที่แสดงมุม VSA (0° ถึง 90° แสดงด้วยเส้นโค้ง) และ มุม HSA (แสดงด้วยเส้นรัศมี 0° ถึง 90° นับตามเข็มนาฬิกา และ 0° ถึง -90° นับทวนเข็มนาฬิกา) ซึ่งต้องทำด้วยแผ่นใส เพื่อวางทาบบลงไปใน Sun Path Diagram โดยต้องใช้ที่มีขนาดของเส้นรอบรูปวงกลมเท่ากันพอดีกับขนาดของผัง Sun Path โดยนำ Shading Mask มาวางในทิศเดียวกับหน้าต่าง แล้วอ่านค่ามุม VSA และ HSA ที่ตรงจุดที่เส้น VAS และ HSA ตัดกับมุม Azimuth และมุม Altitude ของเวลาที่ต้องการทราบ (รูปที่ 6-27)

แผ่น Shading Mask และผัง Sun Path Diagram ของทุก Latitude สามารถหาได้จากเว็บไซต์
เช่น <http://www.jaloxa.eu/resources/daylighting/sunpath.shtml>

	
รูปที่ 6-25 Shading Mask ที่ใช้หามุม VSA (อ่านตามเส้นโค้ง) และมุม HSA (อ่านตามเส้นรัศมี) (ที่มา: https://www.flickr.com/photos/mitopencourseware/3029340733/sizes/l)	รูปที่ 6-26 Shading Mask แบบแยกมุม VSA (เส้นโค้ง) และ HSA (เส้นรัศมี) คนละซีก (ที่มา: http://www.jaloxa.eu/resources/daylighting/sunpath.shtml)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สแกนลิขสิทธิ์

Sun Path Diagram ที่ยังไม่มี Shading Mask	เมื่อวาง Shading Mask ตามหน้าต่างที่ทำมุม 60° กับทิศใต้ (นับตามเข็มนาฬิกา) ถ้าต้องการบังแดด ตั้งแต่เวลา 11.00 น. ต้องใช้มุม $VSA = 50^\circ$
หน้าต่างหันทิศใต้ถ้าใช้แผงบังแดด แนวตั้ง ทำมุม $HSA = 40^\circ$ และ -40° จะไม่สามารถกันแดดได้ระหว่าง 10.00-14.00 น.	การหาระยะแผงบังแดดแนวตั้งและแนวนอน ที่สามารถบังแดดได้ตลอดปี สำหรับหน้าต่างหันทางทิศใต้

รูปที่ 6-27 ตัวอย่างการใช้ Shading Mask เพื่อหามุม VSA และมุม HSA

(ที่มา: ผู้เขียน)

(2) การหามุม HSA และ VSA โดยวิธีการคำนวณ โดยใช้สมการ คือ (Szokolay, 1987, p.68)

$$HSA = AZI - ORI$$

HSA = Horizontal Shadow Angle

AZI = Solar Azimuth Angle คือ มุม Azimuth ของดวงอาทิตย์นับจากทิศเหนือ (มีค่าตั้งแต่ $0-360^\circ$)

ORI = ทิศทางการหันของหน้าต่าง เป็นมุมที่วัดระหว่างทิศเหนือกับเส้นที่ลากตั้งฉากกับหน้าต่าง (มีค่าตั้งแต่ $0-360^\circ$)

$$VSA = \arctan (\tan ALT / \cos HSA)$$

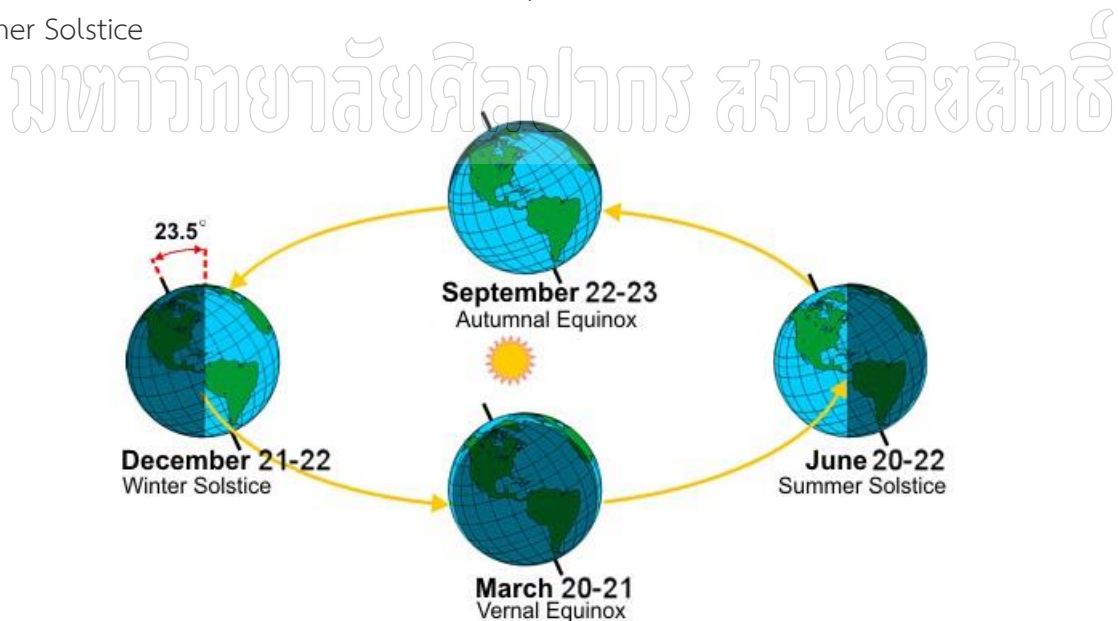
ALT = Altitude Angle ของดวงอาทิตย์ วัดที่จุดสังเกตระหว่างพื้นราบกับแนวเส้นตำแหน่งดวงอาทิตย์ (มีค่า $0-90^\circ$)

ปัจจุบันโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบ เช่น SketchUp และ REVIT สามารถแสดงเงาของแผงบังแดดได้โดยง่ายและรวดเร็ว ซึ่งอาจจะสะดวกกว่าในการวิเคราะห์เงามากกว่า การใช้ผังการโคจรของดวงอาทิตย์และวิธีคำนวณ โดยเฉพาะเมื่อแผงบังแดดมีรูปร่างอื่น ๆ ที่ไม่ใช่แบบพื้นฐาน โดยสามารถทดลองปรับลักษณะแผงจนได้พื้นที่เงาที่สามารถคลุมพื้นที่หน้าต่างได้ตามเวลาที่ต้องการ

แต่การจำลองสภาพเงา ควรต้องทราบวันที่ และเวลาที่ต้องการให้เกิดเงาของแผงบังแดดบนหน้าต่างวันที่ใช้ในการจำลองสภาพเงา ที่ควรทราบมี 4 วัน (รูปที่ 6-28) คือ

- **Summer Solstice** หรือ วันครีษมายัน (อ่านว่า ครีต-สะ-มา-ยัน) เป็นวันที่กลางวันยาวที่สุดในรอบปี ตรงกับวันที่ 22 มิถุนายน ดวงอาทิตย์ขึ้นทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ และตกทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ
- **Winter Solstice** หรือ วันเหมายัน (อ่านว่า เห-มา-ยัน) เป็นวันที่กลางคืนยาวที่สุด ตรงกับวันที่ 22 ธันวาคม ดวงอาทิตย์ขึ้นทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ และตกทางทิศตะวันตกเฉียงใต้
- **Equinox** เป็นวันที่กลางวันและกลางคืนยาวเท่ากัน ตรงกับวันที่ 21 มีนาคม (Vernal Equinox) หรือ วันวสันตวิษุวัต (อ่านว่า วะ-สัน-ตะ-วิ-สุ-วัต) และวันที่ 23 กันยายน (Autumnal Equinox) หรือ วันศารทวิษุวัต (อ่านว่า สาด-ทะ-วิ-สุ-วัต) ดวงอาทิตย์จะขึ้นทางทิศตะวันออก และตกทางทิศตะวันตกพอดี

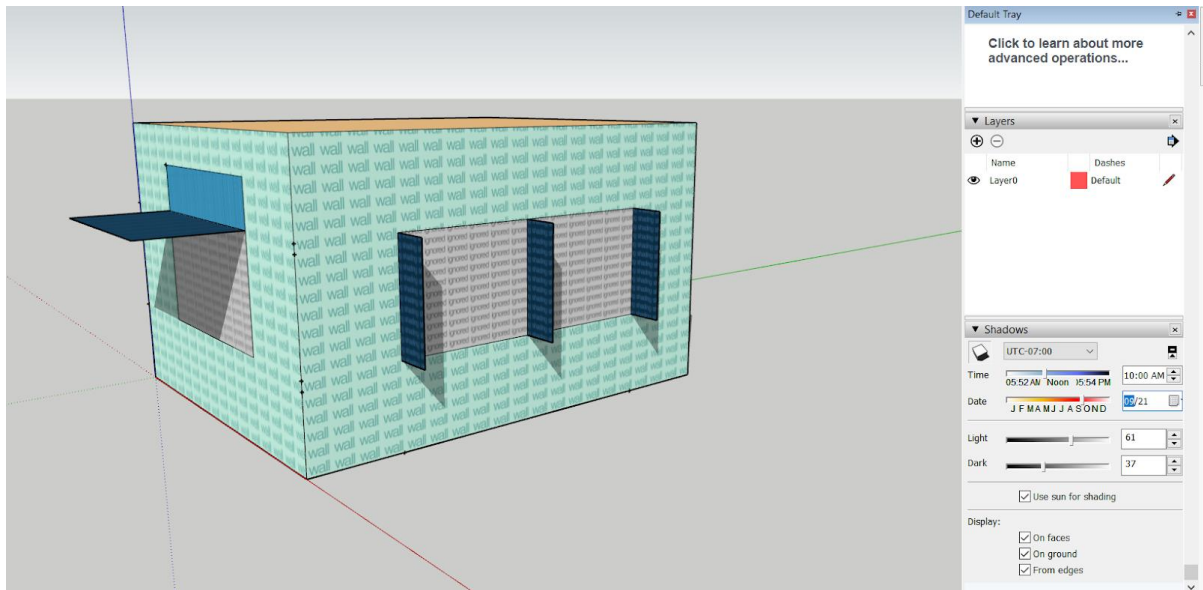
โดยวันที่ของ Summer Solstice และ Winter Solstice ข้างต้น ใช้สำหรับประเทศในซีกโลกเหนือ ถ้าเป็นประเทศในซีกโลกใต้ จะกลับกัน คือ 22 มิถุนายน เป็น Winter Solstice และ 22 ธันวาคมเป็น Summer Solstice



รูปที่ 6-28 แสดงการโคจรของโลกและการเกิด Summer Solstice, Winter Solstice และ Equinox

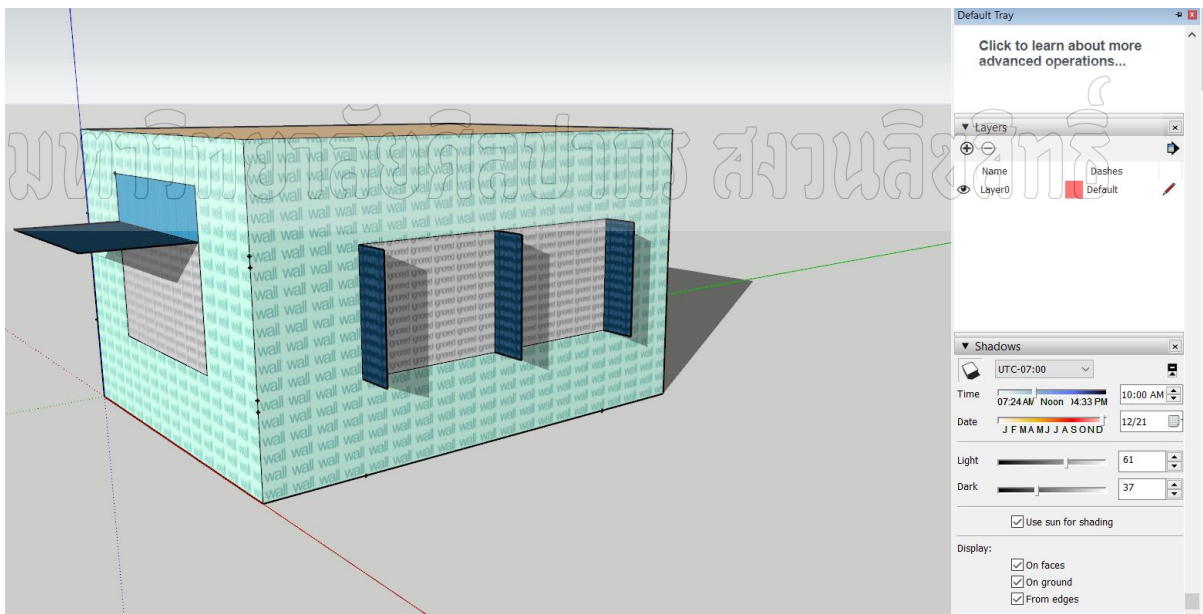
(ที่มา: <https://www.weather.gov/mkx/wintersolstice>)

ในการออกแบบอุปกรณ์บังแดด ถ้าสามารถออกแบบให้ไม่มีแสงแดดเข้าสู่อาคารได้ในวันที่เป็น Equinox (รูปที่ 6-29) แสดงว่าจะสามารถกันแดดได้ครึ่งหนึ่งของเวลาทั้งปี และถ้าสามารถออกแบบให้ไม่มีแสงแดดเข้าในวันที่เป็น Summer Solstice และ Winter Solstice (รูปที่ 6-30) ได้ แสดงว่าสามารถกันแดดไม่ให้เข้าสู่อาคารตลอดทั้งปี



รูปที่ 6-29 ตัวอย่าง การใช้โปรแกรม SketchUp และ Plug-in Sefaira

จำลองเงาของวันที่ 21 กันยายน (Equinox) เวลา 10.00 น.



รูปที่ 6-30 ตัวอย่างการใช้โปรแกรม SketchUp และ Plug-in Sefaira

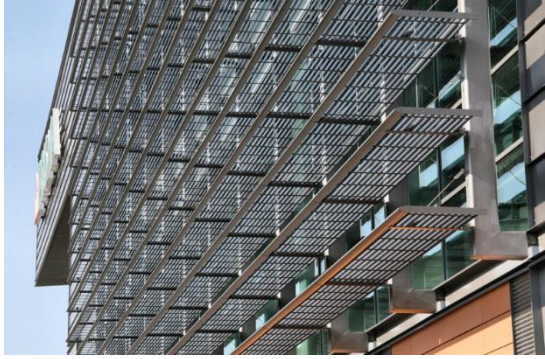
จำลองเงาของวันที่ 21 ธันวาคม (Winter Solstice) เวลา 10.00 น.

นอกจากนี้การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการหาเงาของแผงบังแดด ยังมีข้อดี คือ บางโปรแกรมสามารถหาค่าความสว่างจากแสงธรรมชาติภายในอาคารได้ และสามารถประมาณการพลังงานที่ใช้ในการปรับอากาศที่ลดลงจากการใช้แผงบังแดดได้ด้วย

6.4 แนวทางการเลือกใช้อุปกรณ์บังแดด

การใช้อุปกรณ์บังแดดควรคำนึงถึงปัจจัยในด้านต่าง ๆ ดังนี้ คือ

- **ความสามารถในการกันแดด** ในช่วงเวลาใช้งานที่กำหนด โดยทั่วไปหน้าต่างในทิศใต้และทิศเหนือสามารถใช้แผงบังแดดแนวนอนกันแดดได้ดี และยังช่วยลดปัญหาแสงบาดตา ถ้าออกแบบแผงบังแดดให้กว้างเท่าหน้าต่างก็ยังมีแสงแยงเข้าทางด้านข้าง (รูปที่ 6-29, 6-30) ถ้าไม่ต้องการให้มีแดดเข้าเลยจะต้องยื่นทำแผงบังแดดแนวนอนให้กว้างกว่าหน้าต่าง หรือ ใช้แผงบังแดดแนวตั้งช่วยกันทางด้านข้าง ส่วนหน้าต่างทางด้านทิศตะวันออกและตะวันตกนั้น หากต้องการกันแดดได้ตลอดปี จะค่อนข้างยากเพราะมุมดวงอาทิตย์ในเวลาเช้าและเวลาเย็นจะต่ำมาก หากไม่มีความจำเป็นจึงไม่ควรใช้ช่องเปิดขนาดใหญ่ทั้งสองทิศนี้ การบังแดดต้องใช้แผงแนวตั้งที่สามารถปรับมุมได้ (รูปที่ 6-31) หรือ อุปกรณ์บังแดดที่ดึงขึ้นลงได้ม้วนเก็บได้ บังด้านหน้าของหน้าต่าง หรือ ใช้แผงบังแดดแนวนอนที่ทำซ้อนชั้น (รูปที่ 6-32) หรือ ใช้กระจก 2 ชั้น ที่มีมู่ลิ้นตัว (รูปที่ 6-33, 6-34) ซึ่งจะมีความยืดหยุ่น ที่ทำให้สามารถเห็นวิวภายนอกได้ ในเวลาที่ไม่มีแดด
- **แสงสว่าง** การใช้อุปกรณ์บังแดดจะทำให้แสงสว่างเข้าสู่อาคารน้อยลง ซึ่งอาจช่วยลดแสงบาดตาได้ แต่ถ้ายื่นมากเกินไปก็จะทำให้ภายในอาคารมืด การใช้แผงบังแดดแนวนอนที่เป็นเกล็ดซ้อนกัน (Louvers) จะทำให้เกิดความโปร่ง มีแสงกระจายเข้าสู่อาคารได้มากขึ้น กว่าการใช้แผงบังแดดแบบทึบตัน และยังทำให้ลมร้อนที่สะสมบริเวณใต้แผงบังแดดสามารถระบายออกไปได้ด้วย
- **วัสดุที่ใช้ทำแผงบังแดด** ควรเป็นวัสดุน้ำหนักเบาไม่สะสมความร้อน แผงบังแดดคอนกรีตจะสะสมความร้อน และเป็นสะพานความร้อนเข้าสู่อาคาร และทำให้เพิ่มภาระความร้อนในการปรับอากาศ แผงบังแดดที่นำความร้อนเร็วจะทำให้ความสามารถในการต้านทานความร้อนของผนังอาคารลดลง แผงบังแดดที่เป็นโลหะควรมีการออกแบบจุดยึดกับตัวอาคารที่คำนึงการลดสะพานความร้อนด้วย
- **การมองเห็นทิวทัศน์ภายนอก** แผงบังแดดแนวตั้งอาจจะมองดูสวยงามจากภายนอก แต่เป็นสิ่งที่กีดขวางสายตารายอย่างถาวร เมื่อมองจากภายในออกไป ดังนั้นต้องพิจารณาว่าอาคารที่ออกแบบให้ความสำคัญกับการมองเห็นทิวทัศน์เพียงใด
- **ผลต่อการไหลของลม** ลักษณะแผงบังแดดและตำแหน่งการติดตั้ง สามารถมีผลต่อทิศทางการไหลของลม และความเร็วลมที่เข้าสู่อาคาร ในกรณีที่อาคารที่ใช้ลมธรรมชาติ แผงบังแดดอาจช่วยในการดักลมให้ลมเข้าสู่อาคารมากขึ้น หรือ เบี่ยงลมไม่ให้ไหลเข้ามาในพื้นที่ใช้งานก็ได้ ดังนั้น อาจจะต้องใช้การจำลองการไหลของลม ควบคู่การจำลองเงา
- **การบำรุงรักษาและการทำความสะอาด** อุปกรณ์บังแดดควรมีลักษณะที่สามารถทำความสะอาดได้ง่าย มีฝุ่นเกาะยาก ไม่มีน้ำขัง หรือ คราบน้ำฝน ความทนทานของมอเตอร์ หรือกลไกในการปรับมุม และ สามารถทำความสะอาดกระจกหน้าต่างได้

	
รูปที่ 6-31 แผงแนวตั้งปรับมุมได้ด้วยมอเตอร์ เหมาะกับทิศตะวันออก-ตะวันตก ที่ต้องการกันแดดทั้งปี (ที่มา: https://alunotec.en.made-in-china.com)	รูปที่ 6-32 แผงบังแดดแนวนอนซ้อนกัน เพื่อบังมุมมองอาทิตย์ที่ต่ำ และใช้แผงโปร่ง เพื่อให้แสงสว่างเข้าในอาคาร (ที่มา: https://www.alupro.com/en/reference/sun-shading-louvers/)

	
รูปที่ 6-33 การใช้กระจก 2 ชั้นพร้อมมู่ลิระหว่างกระจกช่วยบังแดดทิศตะวันตกและตะวันออกได้ดี (ที่มา: http://www.wazzadu.com)	รูปที่ 6-34 การใช้มู่ลิในกระจกบานกระทุ้งบังแดดและรับลม และปรับแสงสว่างได้ (ที่มา: https://cutt.ly/TuLXk27)

6.5 แผงบังแดดที่สามารถปรับตามสภาพแสงแดด

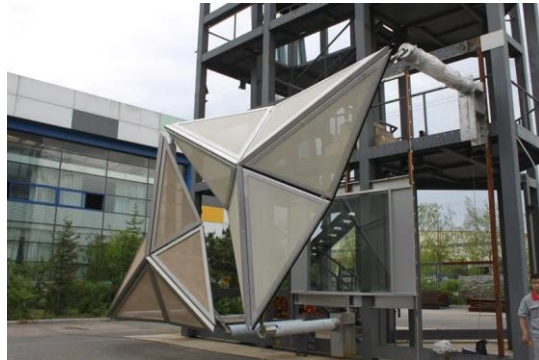
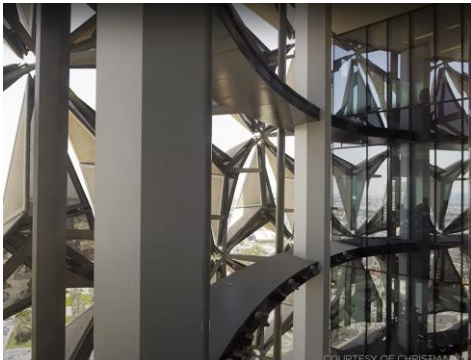
ด้วยปัจจุบันเทคโนโลยีในการผลิตวัสดุ และเทคโนโลยีของเครื่องมือหรือโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบมีความก้าวหน้ามาก จึงทำให้สามารถออกแบบแผงบังแดด ที่มีรูปร่างที่หลากหลาย และสามารถปรับมุม (รูปที่ 6-35) หรือ ปรับรูปร่าง (รูปที่ 6-36) ให้สอดคล้องกับสภาพของแสงแดดและมุมของดวงอาทิตย์ได้เป็น Dynamic Shading Devices หรือ Climate Responsive Facade ซึ่งควบคุมการปรับรูปร่างของแผงบังแดดอัตโนมัติ เช่น การปิดเมื่อมีแสงแดด และเปิดเพื่อใช้แสงธรรมชาติเมื่อไม่มีแดด เป็นการออกแบบในลักษณะ Parametric Design คือเชื่อมโยงข้อมูลของตัวแปรทางสภาพแวดล้อมเข้ากับการเปลี่ยนรูปร่างของอุปกรณ์บังแดด เพื่อหาจุดของรูปร่างที่ได้ประโยชน์สูงสุด ซึ่งจะเห็นว่าวิธีวิเคราะห์ในการออกแบบอุปกรณ์บังแดด ได้มีความซับซ้อนมากขึ้น เพื่อให้สามารถออกแบบได้ตามความคิดสร้างสรรค์ อีกทั้งยังมีสมรรถนะในด้านการประหยัดพลังงานได้อย่างดีเยี่ยมไปพร้อมกัน



รูปที่ 6-35 แผงบังแดดอะลูมิเนียมปรับมุมบังแดดได้ตามตำแหน่งดวงอาทิตย์
ที่อาคาร Esplanade ประเทศสิงคโปร์
(ที่มา: <https://livingnomads.com/2018/>)



(ที่มา: https://www.youtube.com/watch?v=ivZk6f0txZ0&feature=emb_rel_end)



รูปที่ 6-36 แผงบังแดดปรับรูปร่างอัตโนมัติตามปริมาณแสงแดด ทำด้วย Micro Perforated Glass Fibre
ที่อาคาร Al Bahar Tower ประเทศสหรัฐอาหรับเอมิเรตส์
(ที่มา: <https://www.designboom.com/architecture/aedas-al-bahar-towers/>)

6.6 แนวทางการออกแบบโดยใช้การระบายอากาศตามธรรมชาติ

การออกแบบโดยใช้ลมธรรมชาติ โดยทั่วไปจะเป็นการใช้เพื่อวัตถุประสงค์ 3 ด้าน คือ

- 1) เพื่อให้เกิดความสบาย (Comfort Ventilation)
- 2) เพื่อระบายความร้อน (Cooling Ventilation) ออกจากตัวอาคาร
- 3) เพื่อการนำอากาศบริสุทธิ์เข้ามาสำหรับการหายใจ และระบายอากาศเสีย มลพิษต่าง ๆ

ออกไป

การออกแบบจะต้องเริ่มต้นจากการหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับลม ทั้งในภาพรวมระดับจังหวัด และในที่ตั้งโครงการ ข้อมูลที่ควรทราบเบื้องต้นก่อนออกแบบ คือ

- **อุณหภูมิอากาศ** ถ้าหากอุณหภูมิอากาศสูงกว่าผิวกาย เราจะรู้สึกร้อนและรู้สึกไม่สบาย แต่อาจนำมาใช้เพื่อการระบายอากาศเสียได้ มาตรฐาน ASHRAE 55 ซึ่งเป็นมาตรฐานในการออกแบบเพื่อให้เกิดสภาวะสบาย ได้กำหนดขอบเขตสภาวะสบายในสภาพไม่ปรับอากาศในอาคาร โดยใช้ความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายนอกอาคาร (Prevailing Outdoor Air Temperature) โดยกำหนดอุณหภูมิอากาศภายนอกสูงสุดไว้ที่ 33.5°C เท่านั้น (ASHRAE, 2017) (รูปที่ 6-37)

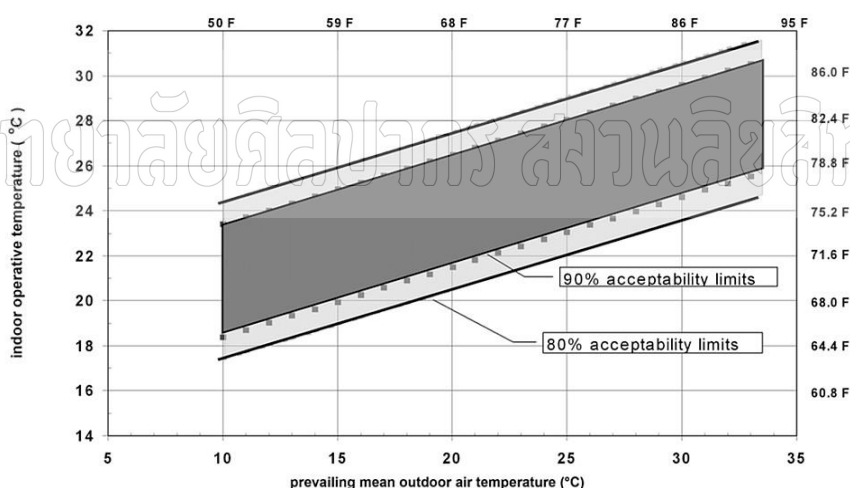


Figure 5.4.2 Acceptable operative temperature t_o ranges for naturally conditioned spaces.

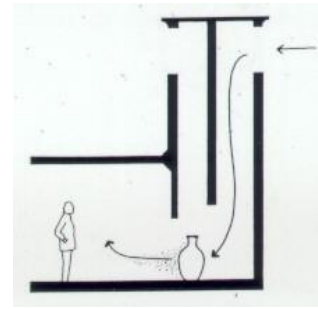
รูปที่ 6-37 แสดงอุณหภูมิอากาศภายนอกที่ 33.5°C สามารถทำให้เกิดสภาวะสบายได้

(ที่มา: ASHRAE 55-2017, p.15)

ประเทศในเขตร้อนแห้ง จะมีอุณหภูมิอากาศภายนอกเฉลี่ยในช่วงฤดูร้อนสูงกว่า 38 °C และในวันที่ร้อนจัดอาจสูงถึง 42 °C ซึ่งสูงเกินกว่าขอบเขตเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศภายนอกในช่วง 7-30 วันก่อนหน้าวันที่พิจารณาตามที่กำหนดใน ASHRAE Standard 55 มาก ซึ่งหากสังเกตงานสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นของประเทศที่อากาศร้อนจัดเหล่านี้ จะพบว่าลักษณะอาคารจะไม่ออกแบบช่องเปิดให้ลมภายนอกมาสัมผัสร่างกายโดยตรง โดยจะทำปล่องดักลม (Wind Catcher) เพื่อนำลมจากด้านบนเข้ามาในอาคาร เป็นการเติมอากาศบริสุทธิ์ภายในตัวปล่องอาจมีการกั้นเป็นช่องย่อย โดยด้านหนึ่งจะทำหน้าที่ดักลม ส่วนด้านตรงข้ามทำหน้าที่ระบายลมออกไป และบางที่ก็มีการปรับลมให้เย็นลงโดยใช้การระเหยของน้ำร่วมด้วย (รูปที่ 6-38)

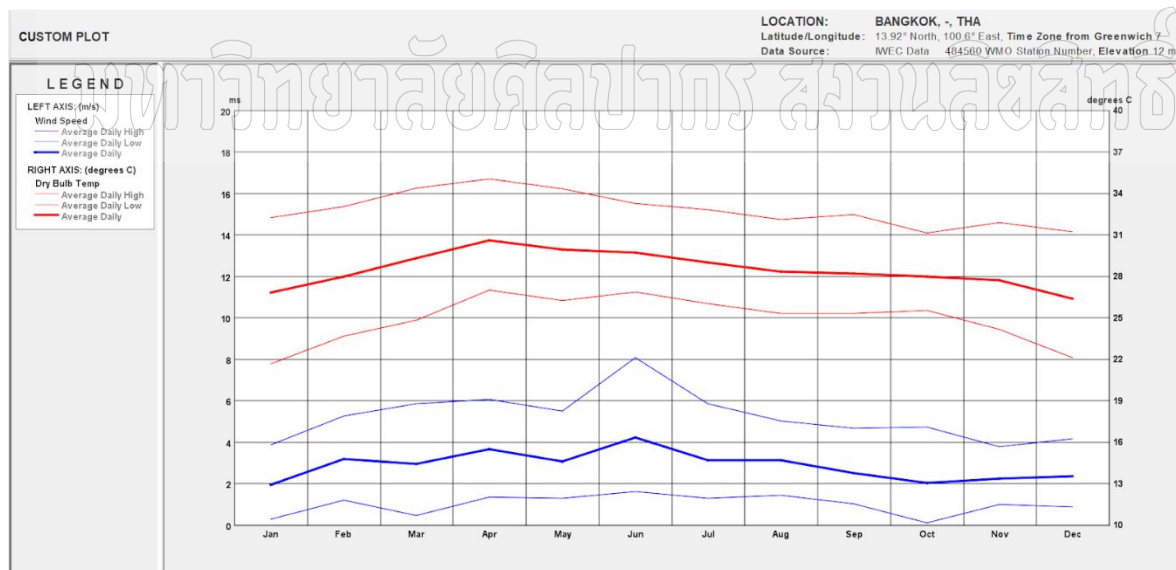


รูปที่ 6-38 บ้านพักอาศัยในอดีตในประเทศกาตาร์
ที่มีช่องเปิดในระดับที่ลมผ่านตัวน้อยมาก



รูปที่ 6-39 การปรับลมให้เย็นลง
โดยใช้การระเหยของน้ำช่วย
(ที่มา: Lechner, 2015)

ส่วนอุณหภูมิอากาศในประเทศไทย อุณหภูมิอากาศสูงสุดเฉลี่ยในช่วงเวลากลางวันในรอบปีส่วนใหญ่จะต่ำกว่า 33.5°C (รูปที่ 6-40) ดังนั้น ลักษณะการออกแบบจึงจะทำช่องเปิดในระดับที่ให้ลมผ่านตัว



รูปที่ 6-40 แสดงความเร็วลม (เส้นสีน้ำเงิน) และอุณหภูมิลม (เส้นสีแดง) ของกรุงเทพมหานคร ในรอบปี
(เส้นบน คือ ค่าเฉลี่ยสูงสุด เส้นกลาง คือ ค่าเฉลี่ยทั้งเดือน เส้นล่าง คือ ค่าเฉลี่ยต่ำสุด)
(ที่มา: วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Climate Consultant)



รูปที่ 6-41 ในเขตอากาศร้อนชื้นที่อุณหภูมิไม่สูงมากจะออกแบบให้ลมผ่านในระดับที่สัมผัสร่างกายโดยตรง
(ที่มา: <https://livingasean.com/tag/vernacular-house/>)

- **ความเร็วลม** เป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับการทำให้เกิดความสบาย โดยความเร็วลมจะมีผลต่อความรู้สึกสบายตามตารางที่ 6-2

ตารางที่ 6-2 ความเร็วลมและสภาวะสบาย

ความเร็วลม (ม./วินาที)	ความเร็วลม (กม./ชั่วโมง)	เทียบเท่าความรู้สึกว่า อุณหภูมิลดลง ($^{\circ}\text{C}$)	สภาวะสบาย
0.05	0.2	0	ลมนิ่ง ไม่สบายเล็กน้อย
0.2	0.8	1.1	ยากที่จะรู้สึกว่ามีลม แต่สบาย
0.4	1.6	1.9	เริ่มรับรู้ได้ว่ามีลม และสบาย
0.8	3.2	2.8	สามารถรับรู้ได้ชัดเจนว่ามีลมและเป็นความเร็วลมที่ยอมรับได้ ถ้าทำกิจกรรมที่ใช้แรงมากและเป็นลมอุ่น
1.0	3.7	3.3	เป็นความเร็วลมสูงสุดในการปรับอากาศ และเป็นความเร็วลมที่ดีสำหรับสภาพไม่ปรับอากาศในสภาพอากาศร้อนแห้ง
2.0	7.2	3.9	ความเร็วลมที่ดีสำหรับอากาศร้อนชื้น
4.5	16	5.0	เป็นความเร็วลมภายนอกที่กำลังสบาย

ที่มา: Lechner, 2015, p.307

ถ้าพื้นที่ซึ่งจะออกแบบมีความเร็วลมต่ำ หรือ มีความถี่ของลมต่ำ แสดงว่ามีศักยภาพในการใช้ลมธรรมชาติน้อย จะต้องใช้พัดลมช่วยเพิ่มความเร็วลมให้เกิดความสบาย สำหรับในกรุงเทพมหานครอุณหภูมิลมส่วนใหญ่จะต่ำกว่า 33.5°C (รูปที่ 6-40) ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เพื่อทำให้เกิดความสบาย แต่ความเร็วลมจะไม่ค่อยสูง ประมาณ 2-4 m/s และ ยังอาจลดลงในสภาพที่ตั้งซึ่งมีสิ่งก่อสร้างใกล้เคียงบังลม ซึ่งจำเป็นต้องดูสภาพแวดล้อมจริงในที่ตั้งประกอบการออกแบบ

- **ทิศทางลม** โดยทั่วไปทิศทางลมจะเปลี่ยนไปตามฤดูกาล พร้อมทั้งอุณหภูมิลมที่เปลี่ยนไป ซึ่งต้องพิจารณาประกอบกัน สำหรับในประเทศไทยนั้น หากพิจารณาจากฝั่งลมในหลายจังหวัดก็ไม่ได้มีทิศทางหลักของลมมาจากทิศใด หรือตะวันตกเฉียงใต้ เหมือนในกรุงเทพฯ เช่น ในจังหวัดภูเก็ตจะเป็นลมทางทิศตะวันออกและทิศตะวันตก ดังนั้นจึงควรต้องตรวจสอบข้อมูลฝั่งลม จากสถานีตรวจวัดภูมิอากาศที่ใกล้ที่สุด

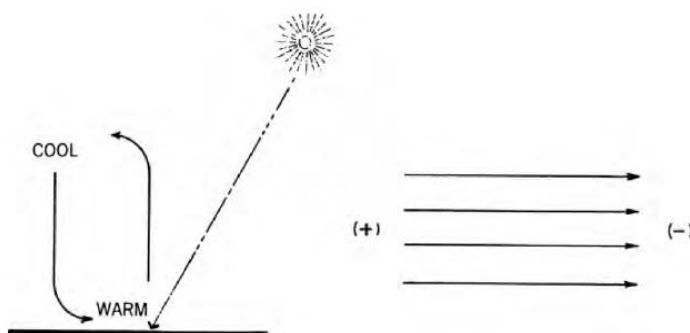
- **เวลาที่มีลม** ความเร็วลมที่เกิดขึ้นยังอาจแตกต่างกันในรอบเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งควรตรวจสอบในรายละเอียด ว่าสอดคล้องกับเวลาใช้งานหรือไม่

6.7 หลักการพื้นฐานเกี่ยวกับเคลื่อนที่ของอากาศ

(1) การเคลื่อนที่ของอากาศ สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

- การเคลื่อนที่ของอากาศซึ่งเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ การเคลื่อนที่ของอากาศในลักษณะนี้จะมีความเร็วต่ำมาก ไม่เร็วพอที่ทำให้เกิดความสบายได้ เช่น การเคลื่อนที่ของอากาศร้อนที่ลอยตัวในปล่องสูง หรือที่เรียกว่า Stack Effect

- การเคลื่อนที่ของอากาศเกิดจากความแตกต่างของแรงดัน อากาศจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีแรงดันสูงกว่า หรือ ความดันเป็นบวก (+) ไปสู่บริเวณที่แรงดันต่ำกว่า หรือ แรงดันเป็นลบ (-)



รูปที่ 6-42 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศซึ่งเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิหรือแรงดัน

(ที่มา: Lechner, 2015)

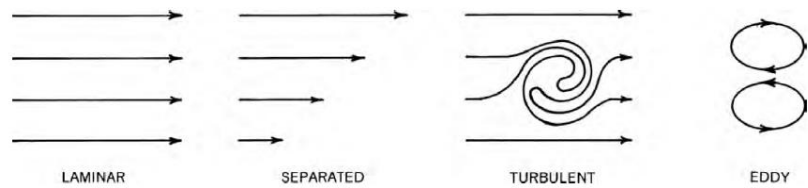
(2) ลักษณะรูปแบบการไหลของอากาศที่เกิดจากแรงดัน สามารถแบ่งได้เป็น

- แบบ Laminar เป็นการไหลแบบราบเรียบ คือ มีอัตราความเร็วเท่ากัน

- แบบ Separated เป็นการไหลที่มีอัตราความเร็วไม่เท่ากัน เช่น ลมในที่สูงจะมีความเร็วมากกว่าลมใกล้พื้นดิน

- แบบ Turbulent เป็นกระแสมที่ไหลแบบปั่นป่วน

- แบบ Eddy เป็นลมที่หมุนวน



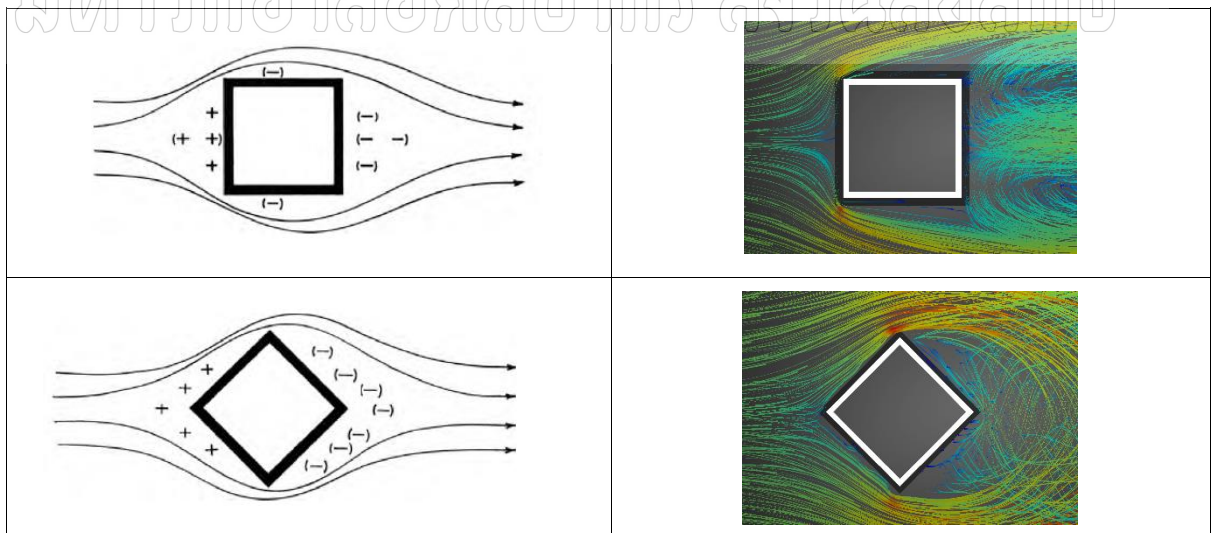
รูปที่ 6-43 รูปแบบการไหลของลม

(ที่มา: Lechner, 2015)

(3) เมื่อลมไหลไปยังวัตถุหรืออาคารที่กีดขวางทางลม ลมที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเมื่อถูกบังคับให้เปลี่ยนทิศทาง จะเบี่ยงเป็นเส้นโค้งเพราะมีแรงเฉื่อย (Inertia) ไม่มีการหักเหเป็นมุมฉากบริเวณด้านที่ลมปะทะจะเกิดแรงดันเป็นบวก ส่วนด้านตรงข้ามจะมีแรงดันเป็นลบเสมอ (รูปที่ 6-44) ซึ่งแรงดันที่เป็นลบอาจจะไม่ได้เป็นกระแสลมที่สงบ โดยอาจจะเป็นกระแสลมแบบปั่นป่วน หรือลมวนก็ได้ ซึ่งในบางหนังสือ (Lechner, 2015) ก็ได้กล่าวว่าเพื่อความง่าย จึงไม่ได้แสดงกระแสลมแบบปั่นป่วน หรือลมวน

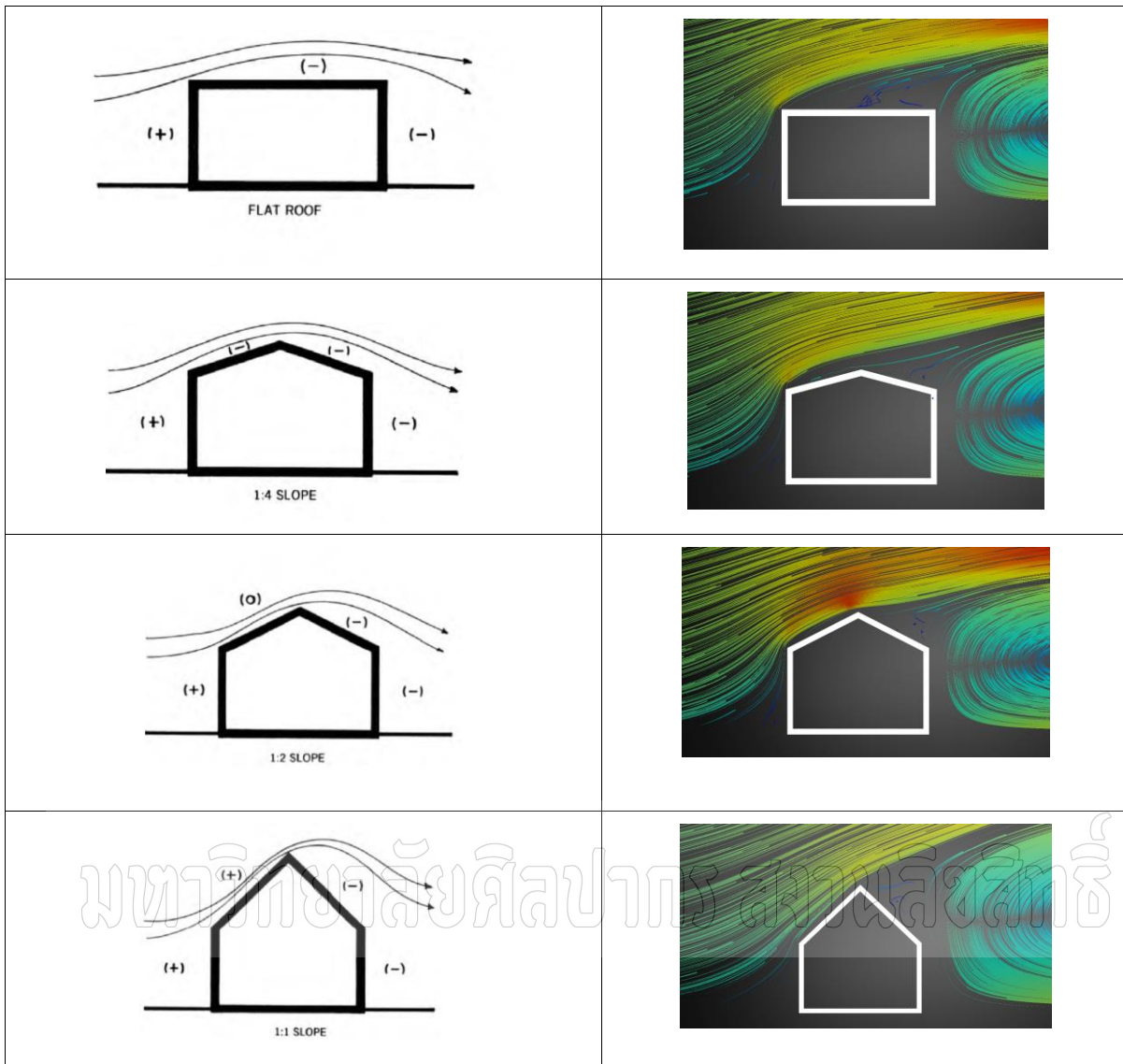
ผู้เขียนจึงได้จำลองการไหลของลมด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Computational Fluid Dynamic (CFD) เพื่อเปรียบเทียบกับภาพวาดในหนังสืออื่น ซึ่งอาจจะเห็นความแตกต่าง เพราะรูปแบบการไหลยังอาจแตกต่างตามความเร็วลมด้วย

ส่วนแรงดันลมบริเวณด้านข้างของอาคารที่รับลม อาจจะเป็นลบหรือบวกก็ได้ ขึ้นกับรูปร่างและทิศทางการหันของอาคาร การพิจารณาการไหลของลมต้องดูทั้งในแปลนและรูปตัด เพราะลมเป็นของ 3 มิติ สำหรับในรูปตัด แรงดันบริเวณหลังคาด้านที่ลมปะทะ อาจจะเป็นบวกหรือลบก็ได้ ขึ้นกับมุมเอียงของหลังคา



รูปที่ 6-44 แรงดันด้านรับลมจะเป็นบวกส่วนด้านใต้ลมจะเป็นลบ

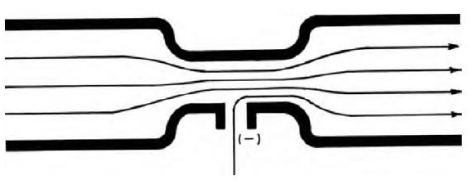
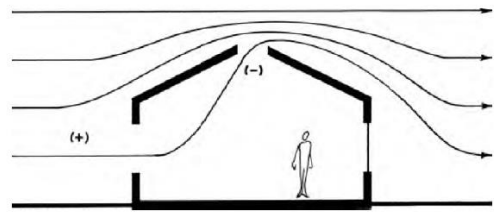
(ที่มา: (ภาพซ้าย) Lechner, 2015)



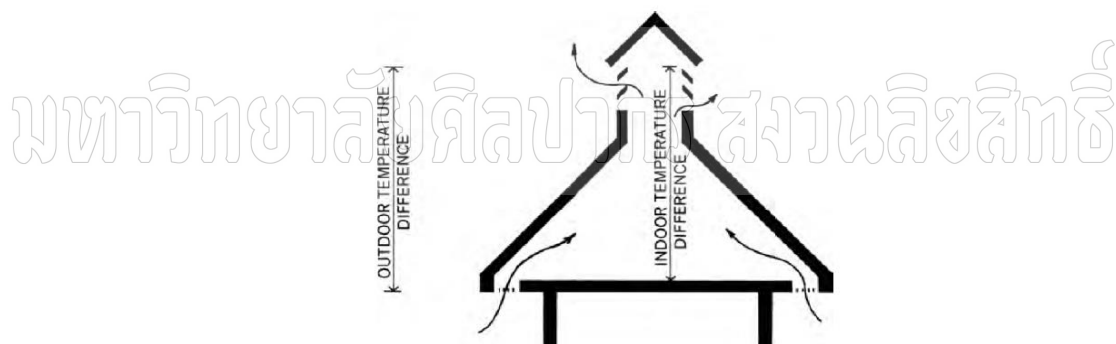
รูปที่ 6-45 แรงดันที่หลังคาจะเป็นบวกหรือลบขึ้นกับมุมเอียง

(ที่มา: (ภาพซ้าย) Lechner, 2015)

(4) **Bernoulli Effect** หรือ ปรากฏการณ์เบอร์นูลลี คือ ผลที่แสดงให้เห็นว่า ถ้าความเร็วลมของของไหลเพิ่มขึ้น แรงดัน (Static Pressure) จะลดลง ด้วยปรากฏการณ์นี้ จะเห็นว่า ในท่อ **Venturi Tube** หรือ ท่อที่ทำให้แคบลงตรงกลาง แรงดันของของไหลตรงส่วนที่แคบจะลดลง ดังนั้น หากมีการเจาะช่องรู ตรงส่วนนี้ซึ่งเกิดแรงดันเป็นลบ ทำให้มีแรงดูดผ่านรูเข้าไปในท่อ (รูปที่ 6-46) ลักษณะดังกล่าว สามารถนำมาอธิบายผลของปรากฏการณ์ Venturi หรือ Bernoulli กับการไหลของลมที่ผ่านหลังคาลาดเอียงได้ กล่าวคือ การไหลผ่านหลังคาลาดเอียง ก็คล้ายกับของไหลที่ผ่านท่อ Venturi ที่ผ่าครึ่ง ดังนั้น ถ้าหากมีการเจาะรูตรงใกล้ยอดจั่วของหลังคา ก็จะทำให้เกิดแรงดันเป็นลบ (รูปที่ 6-47) ทำให้อากาศจากส่วนที่มีแรงดันเป็นบวกไหลผ่านช่องตรงจั่วหลังคาออกไป

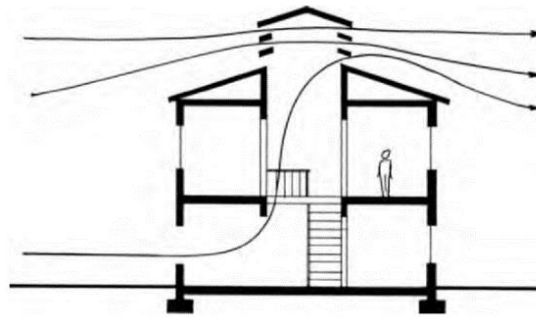
	
รูปที่ 6-46 การเกิดแรงดูดผ่านรูที่ส่วนแคบของท่อ Venturi Tube เพราะมีแรงดันเป็นลบ (ที่มา: Lechner, 2015)	รูปที่ 6-47 ลมที่ผ่านหลังคาจะคล้ายกับในท่อ Venturi ผ่าครึ่ง จึงเกิดแรงดันเป็นลบ ให้ลมไหลออกตรงสันหลังคา (ที่มา: Lechner, 2015)

(5) **Stack Effect** ผลของปรากฏการณ์แบบปล่อง เป็นการระบายความร้อนออกจากอาคารโดยการพาความร้อน ซึ่งวิธีนี้จะเกิดขึ้นได้ ต่อเมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศในปล่องระหว่างจุดลมเข้าและลมออกในปล่อง มากกว่าความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศภายนอกระหว่างจุดลมเข้าและลมออกเดียวกัน (รูปที่ 6-48) และเพื่อทำให้การระบายอากาศแบบปล่องได้ผลมากขึ้น ช่องเปิดควรต้องมีขนาดใหญ่ และมีระยะห่างในแนวตั้งระหว่างช่องเปิดให้มากที่สุด



รูปที่ 6-48 การระบายอากาศแบบปล่อง (Stack Ventilation)
จะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิในปล่องและภายนอก
(ที่มา: Lechner, 2015)

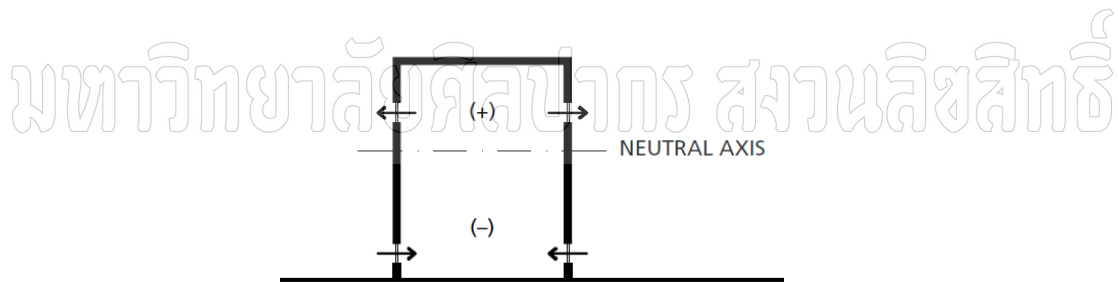
ข้อดีของ Stack Effect เมื่อเทียบกับ Bernoulli Effect คือ การระบายอากาศแบบปล่องไม่จำเป็นต้องใช้ความเร็วลม แต่ข้อด้อยคือลมอ่อนมาก แต่ถ้านำเอาวิธีการของ Venturi และ Stack มาใช้ร่วมกัน ก็จะทำให้เพิ่มการไหลของลมในช่องโถงกลางอาคาร เช่น โถงบันได ได้ (รูปที่ 6-49)



รูปที่ 6-49 การใช้ Stack Effect ร่วมกับ Bernoulli Effect

(ที่มา: Lechner, 2015)

ในปรากฏการณ์แบบปล่องนี้ อากาศที่ตรงส่วนล่างของปล่องจะมีความดันเป็นลบ และส่วนบนจะมีความดันเป็นบวก โดยมีจุดที่ความดันเป็นกลางอยู่ในบางที่ระหว่าง 2 ส่วนนี้ รูปที่ 6-50 การออกแบบที่ใช้ระบบปล่องจะต้องระวังว่าหากจุดที่มีความดันเป็นกลางอยู่ในช่วงระหว่างชั้นอาคาร หรืออีกนัยหนึ่งคือจุดที่มีความดันเป็นบวกอยู่ในช่วงชั้นบน ๆ ของอาคาร ก็จะทำให้เกิดแรงดันลมซึ่งร้อนเข้าไปในพื้นใช้งานอาคารได้ (รูปที่ 6-51) ดังนั้น การออกแบบจะต้องแก้ปัญหาโดยการเพิ่มปล่องให้สูงขึ้น เพื่อเลื่อนส่วนที่มีความดันเป็นบวกให้อยู่สูงกว่าระดับชั้นที่มีการใช้งาน (รูปที่ 6-52)

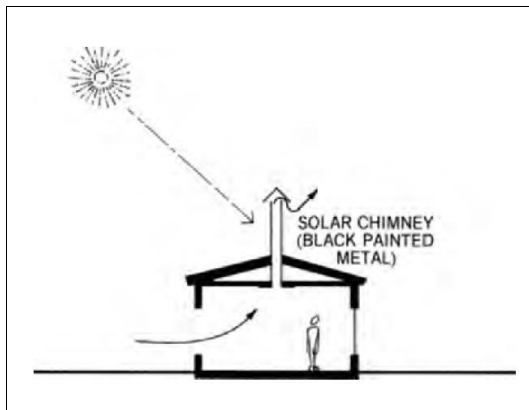


รูปที่ 6-50 แรงดันในปล่องที่เป็นบวก ลบ และแกนที่เป็นกลาง

(ที่มา: Lechner, 2015)

รูปที่ 6-51 แรงดันบวกช่วงบนของโถง ดันอากาศร้อนกลับมาในห้อง (ที่มา: Lechner, 2015)	รูปที่ 6-52 ต้องยกแกนที่เป็นกลาง ให้สูงกว่าชั้นบนสุด (ที่มา: Lechner, 2015)

(6) Solar Chimney เป็นแนวคิดในการออกแบบที่ใช้หลักการของ Stack Effect คือใช้การระบายอากาศแบบปล่องให้ความร้อนลอยขึ้นออกไปตอนบน แต่มีการเร่งให้อากาศร้อนเคลื่อนที่ออกไปเร็วขึ้นโดยการทำให้อุณหภูมิของปล่องร้อนยิ่งขึ้น เช่น การทาสีดำ (รูปที่ 6-53, 6-54) เพื่อเพิ่มความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างช่องลมเข้าและออกให้มากยิ่งขึ้น ดังที่ได้อธิบายหลักการของ Stack Effect คือ ทำงานโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างจุดลมเข้าและลมออก ลักษณะการออกแบบดังกล่าวไม่ค่อยพบมากนักในประเทศไทย



รูปที่ 6-53 การใช้ Solar Chimney
(ที่มา: Lechner, 2015)



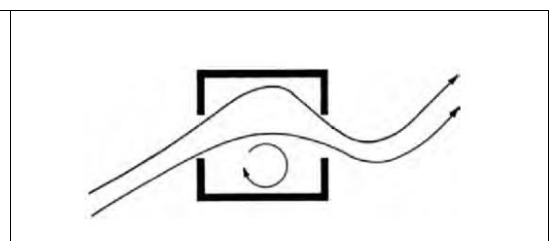
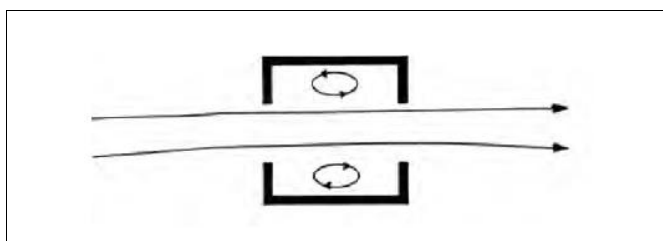
รูปที่ 6-54 การใช้ Solar Chimney ที่ Environmental Building Research Establishment (BRE) ของประเทศอังกฤษ

(ที่มา: <https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Deconstruction>)

6.8 แนวทางการออกแบบที่ใช้การระบายอากาศธรรมชาติ

การกำหนดตำแหน่งและด้านของช่องเปิด (Window Location)

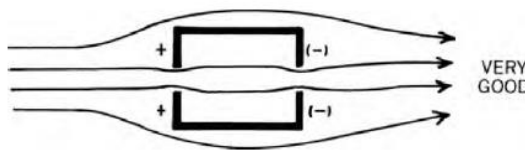
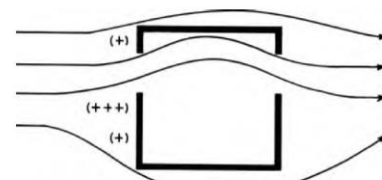
Cross Ventilation เป็นการออกแบบให้มีช่องลมเข้าและออกอยู่ที่ผนังด้านตรงข้ามกัน ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการดึงกระแสลมให้ผ่านอาคาร จากด้านรับลมที่มีความดันเป็นบวก ผ่านไปด้านใต้ลมที่มีความดันเป็นลบ โดยถ้าให้ช่องลมเข้าตั้งฉากกับทิศทางลม (รูปที่ 6-55) แรงดันลมที่ได้จะมากที่สุด แต่ถ้าทิศลมเฉียงเข้าหาผนัง อาคารภายในจะผสมกันได้ดีกว่า (รูปที่ 6-56) ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องวางอาคารให้ตั้งฉากกับทิศลมเสมอไป โดยอาจจะหันทิศอาคารให้เอียงไปบ้างเพื่อหลบแดดก็ได้ เพราะลมมักจะมาจากหลายทิศ และใช้การออกแบบให้กระแสลมเบี่ยงแทนได้



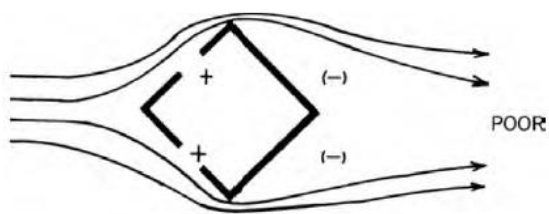
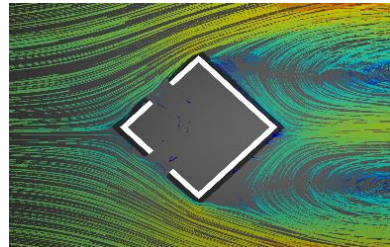
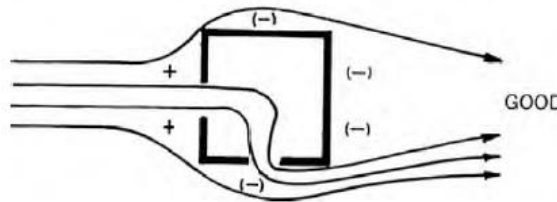
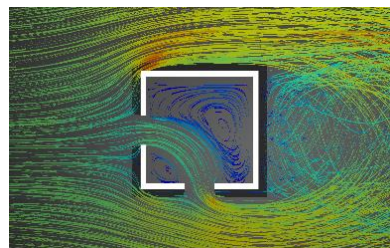
รูปที่ 6-55 กระแสลมในทิศเฉียงทำให้การผสมของอากาศในห้องดีกว่าเข้าตั้งฉากกับผนัง

(ที่มา: Lechner, 2015)

แม้ว่าตำแหน่งของหน้าต่างที่อยู่ด้านตรงกันข้ามจะดีที่สุด (รูปที่ 6-56) แต่ถ้าหากตำแหน่งช่องเปิดอยู่ในซีกเดียวของห้อง แรงดันลมบนผนังข้างหน้าต่างที่มีพื้นที่มากกว่า จะดันลมไปในทิศทางซึ่งไม่ใช่พื้นที่ส่วนใหญ่ของห้อง และทำให้พื้นที่ส่วนใหญ่ไม่ได้รับลม (รูปที่ 6-57) ดังนั้น การเจาะช่องหน้าต่างควรทำเป็นหลายช่องจะดีกว่าทำช่องใหญ่ช่องเดียว

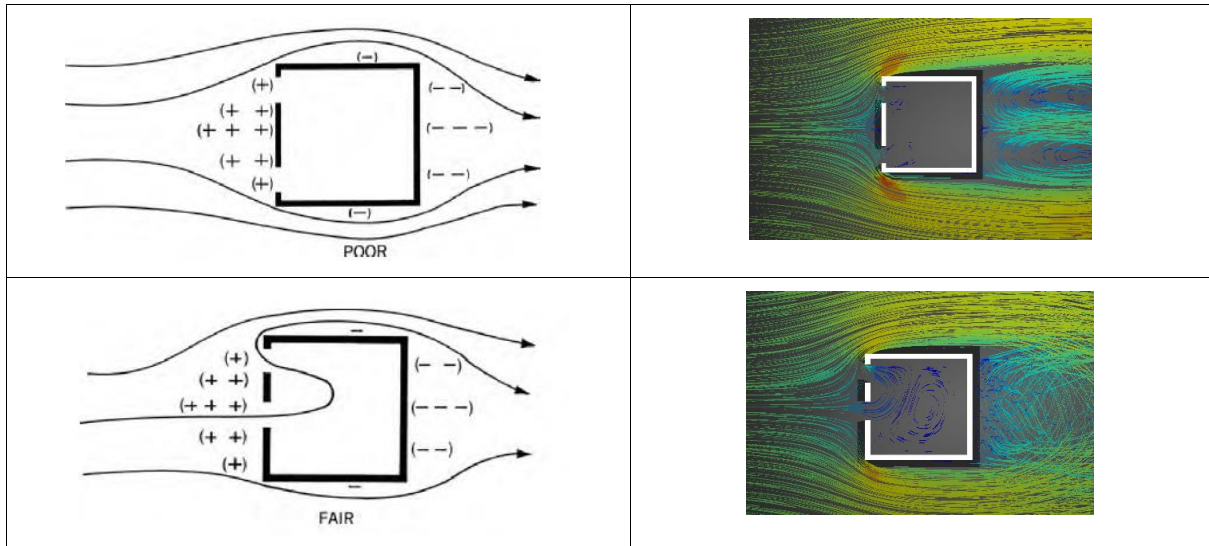
	
รูปที่ 6-56 การทำช่องลมเข้าและออกตรงกันข้ามจะดีที่สุด (ที่มา: Lechner, 2015)	รูปที่ 6-57 มีตำแหน่งช่องเปิดในทิศตรงกันข้าม แต่ถ้าตำแหน่งช่องเปิดไม่เหมาะสม ลมไม่สามารถเข้ามาในพื้นที่ส่วนใหญ่ของห้องได้ (ที่มา: Lechner, 2015)

Two Sided Ventilation การระบายอากาศผ่านผนัง 2 ด้านไม่ได้อยู่ตรงข้ามกัน จะต้องดูว่าตำแหน่งของช่องหน้าต่างทั้ง 2 บาน จะต้องไม่อยู่ในด้านที่รับลมเหมือนกัน (รูปที่ 6-58) มิฉะนั้นลมจะไม่เข้าเพราะแรงดันลมเท่ากัน

รูปที่ 6-58 ช่องลมเข้าและออกจะต้องมีแรงดันไม่เท่ากันลมจึงจะไหลเข้าสู่อาคาร
(ที่มา: (ภาพถ่าย) Lechner, 2015)

One Sided Ventilation การระบายอากาศของห้องที่มีหน้าต่างเพียงด้านเดียวที่สัมผัสภายนอกให้มีลมไหลเข้าสู่อาคาร สามารถทำได้โดยการใช้หน้าต่าง 2 บาน ให้บานหนึ่งเป็นช่องลมเข้าส่วนอีกช่องเป็นช่องลมออก แต่จะออกแบบเพื่อให้เกิดแรงดันลมที่ต่างกัน โดยการทำให้พื้นที่ผนังที่ปิดด้านข้างหน้าต่างด้านหนึ่งใหญ่กว่าอีกด้านหนึ่ง (รูปที่ 6-59)



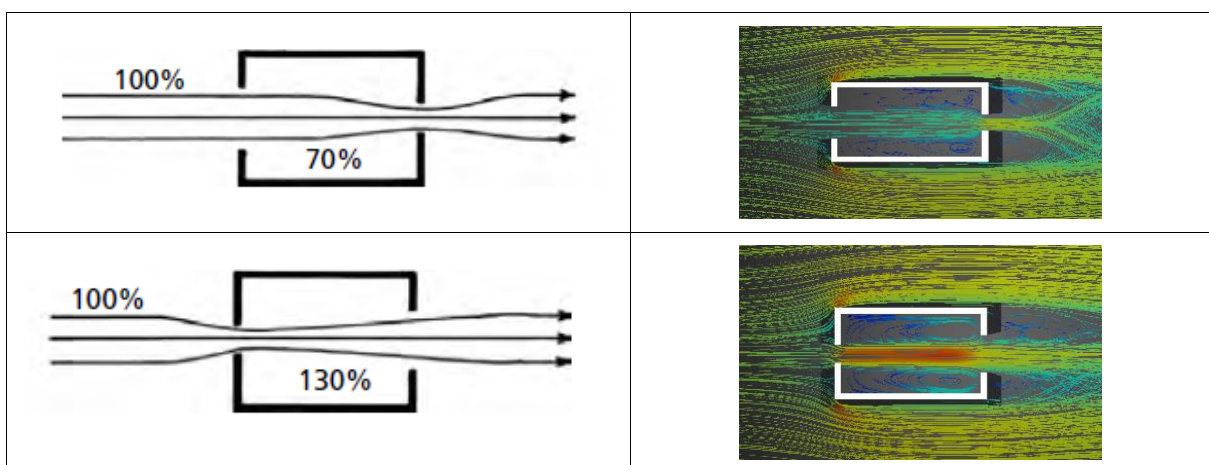
รูปที่ 6-59 การระบายอากาศของห้องที่มีผนังติดภายนอกด้านเดียว

(ที่มา: (ภาพซ้าย) Lechner, 2015)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สวณลิขสิทธิ์

ขนาดของช่องลมเข้าและลมออก

ถ้าช่องลมเข้าและลมออกมีขนาดไม่เท่ากัน ปริมาณของอากาศที่สามารถระบายได้จะขึ้นกับขนาดของช่องเปิดด้านที่เล็กกว่า ซึ่งถ้ามีหน้าต่างที่ขนาดไม่เท่ากันก็ควรให้ช่องเปิดที่เล็กกว่าอยู่ด้านรับลม เพื่อให้ได้ประโยชน์ในเรื่องความเร็วลมที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 6-60) เพราะความเร็วลมเป็นสิ่งที่ช่วยให้เกิดความสบาย (Lechner, 2015) ขนาดของช่องลมด้านทางเข้าจะมีผลต่อความเร็วลมภายในห้อง และรูปแบบการไหล (Air Flow Pattern) ของลมในห้องมากกว่าช่องลมออก



รูปที่ 6-60 ช่องลมด้านทางเข้าเล็กจะช่วยเพิ่มความเร็วลมในอาคารได้ดีกว่าช่องลมทางด้านออกเล็ก

(ที่มา: (ภาพซ้าย) Lechner, 2015)

แต่เนื่องจากทิศทางลมในหลายพื้นที่ มักจะเปลี่ยนทิศไปตามฤดูกาล ไม่ได้มาจากทิศเดียวอย่างชัดเจน (Prevailing Wind) ดังนั้น การออกแบบให้ช่องลมเข้าและออก มีขนาดเท่ากันจึงน่าจะเป็นวิธีที่ดีที่สุด

ขนาดของพื้นที่ช่องลมเข้าและลมออกรวมกันประมาณ 20-30% ของพื้นที่ห้อง จะทำให้ได้ความเร็วลมภายในห้องประมาณ 30% ของความเร็วลมภายนอก การทำให้ขนาดหน้าต่างใหญ่ขึ้นจะสามารถเพิ่มความเร็วลมได้ แต่ไม่ได้เพิ่มในสัดส่วนเดียวกันขนาดช่องเปิดที่ใหญ่ขึ้น โดยความเร็วลมภายในห้องที่ได้สูงสุดจะประมาณไม่เกิน 40% ของความเร็วลมภายนอก (Goyal, p.12)

ความสูงของช่องเปิด

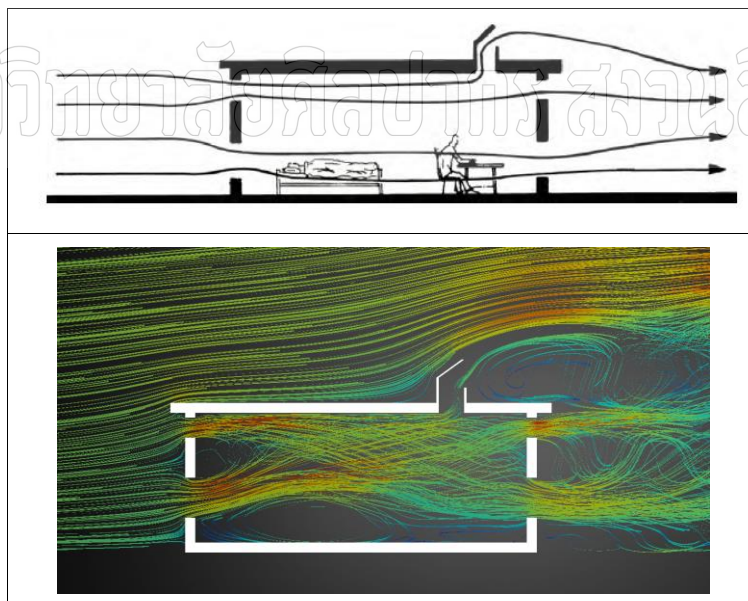
สำหรับการใช้ลมเพื่อทำให้เกิดความสบาย ความสูงของหน้าต่าง ไม่ควรอยู่สูงจากพื้นมาก เพื่อให้ลมพัดผ่านตัวผู้ใช้งาน (รูปที่ 6-61) ของความสูงของระนาบที่มีการใช้งาน ความสูงของขอบล่างหน้าต่างจากพื้น สำหรับกิจกรรมทั่วไป ควรมีระยะ (Goyal, p.12) คือ

สำหรับการนั่งบนเก้าอี้ 0.75 ม.

สำหรับการนั่งบนพื้น 0.40 ม.

สำหรับการนั่งบนเตียง 0.60 ม.

นอกจากนี้ การกำหนดความสูงหน้าต่างควรพิจารณาลักษณะการเปิดหน้าต่างด้วย หน้าต่างแบบบานกระทุ้ง หรือ บานเกล็ด จะทำให้ลมมีแนวโน้มที่จะพัดขึ้นข้างบน ซึ่งเป็นความสูงที่ผู้ใช้อาคารสามารถมองเห็น ทิวทัศน์ภายนอกได้ด้วย



รูปที่ 6-61 ระดับความสูงของช่องเปิดตอนล่างเพื่อให้เกิดความสบาย
และตอนบนเพื่อระบายความร้อนในอาคาร

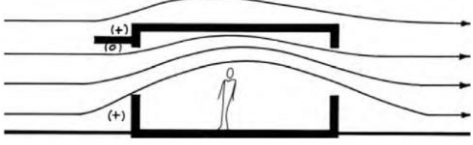
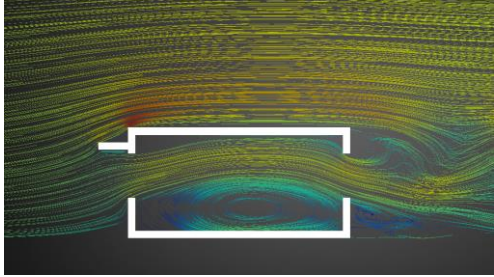
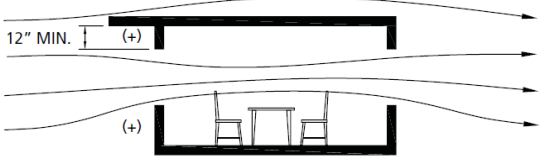
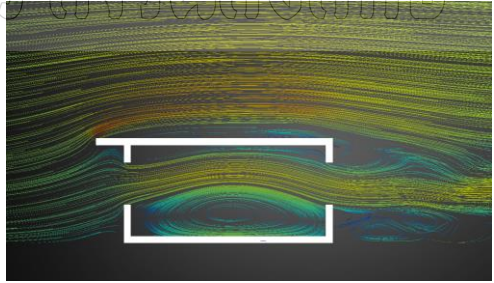
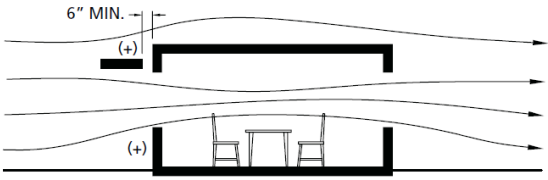
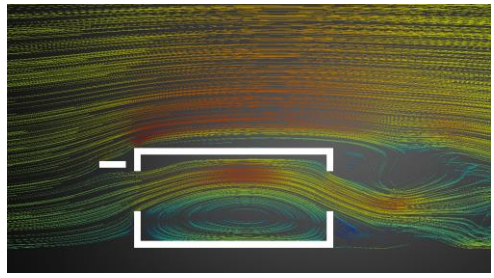
(ที่มา: (ภาพบน) Lechner, 2015)

ส่วนการระบายความร้อนที่สะสมในห้องออกไป โดยเฉพาะการระบายความร้อนออกจากอาคารในเวลากลางคืน (Night Flushing) จะต้องเจาะลมเข้าและลมออกในช่วงบนของผนังให้ลมพัดอากาศร้อนที่สะสมในช่วงบนห้องผ่านโครงสร้างของอาคารออกไป หรืออาจมีการเจาะช่องให้ลมออกผ่านส่วนหลังคาด้วย

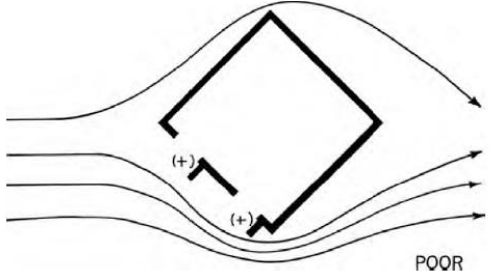
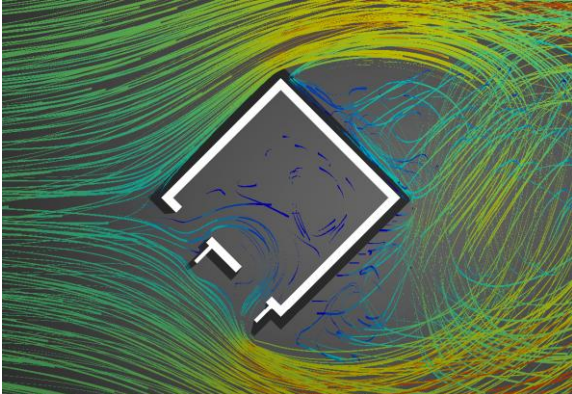
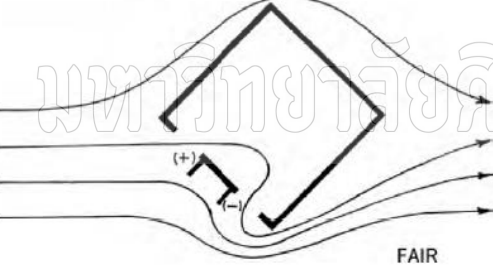
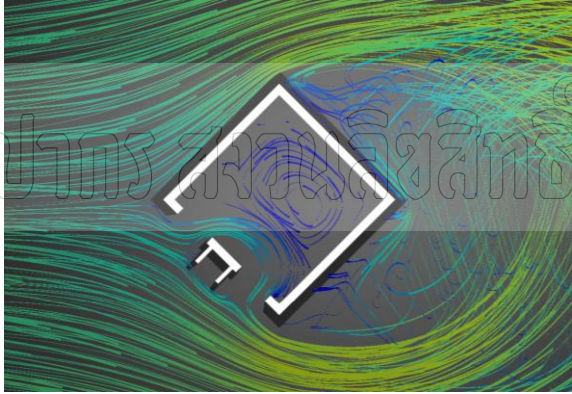
แผงบังแดดและผลต่อการไหลของลม

ผนังด้านนอกของอาคารส่วนใหญ่ จะมีส่วนยื่นต่าง ๆ เช่น ระเบียง ชายคา แผงบังแดด บานหน้าต่าง ซึ่งสิ่งเหล่านี้สามารถมีผลต่อทิศทางลมและความเร็วลมที่เข้าสู่อาคาร

การทำแผงบังแดดในแนวนอนจะทำให้ลมเปี่ยงขึ้นไปสู่เพดานมากขึ้น และไม่ผ่านในระดับตัวคน แม้ว่าจะมีการเจาะหน้าต่างในฝั่งตรงกันข้าม เพราะว่าแรงดันลมที่เกิดตรงผนังใต้หน้าต่างมีมากกว่าตรงเหนือหน้าต่าง (รูปที่ 6-62) แต่ถ้ามีพื้นที่ผนังเหนือหน้าต่างตรงใต้แผงบังแดดแนวนอน จะทำให้เพิ่มแรงดันที่เป็นบวก แล้วดันให้กระแสลมไหลต่ำลงมายังพื้นที่ใช้งานมากขึ้น (รูปที่ 6-64) หรือการทำแผงบังแดดแนวนอนให้มีช่องว่างห่างหน้าต่าง (Lechner, 2015) หรือ มีพื้นที่ผนังอยู่เหนือหน้าต่างที่จะให้ลมปะทะ ก็จะทำให้เกิดแรงดันเป็นบวก ดันกระแสลมลงมาในพื้นที่ใช้งานได้เช่นกัน (รูปที่ 6-66)

 (ที่มา: Lechner, 2015)	
รูปที่ 6-62 การยื่นแผงบังแดดแนวนอน จะทำให้กระแสลมเปี่ยงขึ้นบน  (ที่มา: Lechner, 2015)	รูปที่ 6-63 การจำลองการไหลของลม เมื่อมีแผงบังแดดแนวนอน 
รูปที่ 6-64 การไหลของลม เมื่อเลื่อนแผงบังแดดแนวนอนให้สูงขึ้น  (ที่มา: Lechner, 2015)	รูปที่ 6-65 การจำลองการไหลของลม เมื่อเลื่อนแผงบังแดดแนวนอนให้สูงขึ้น 
รูปที่ 6-66 การไหลของลม เมื่อเว้นระยะของแผงบังแดดแนวนอนให้ห่างผนัง	รูปที่ 6-67 การจำลองการไหลของลม เมื่อเว้นระยะของแผงบังแดดแนวนอนให้ห่างผนัง

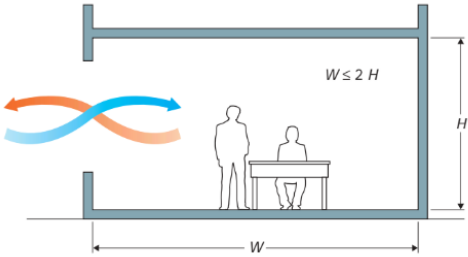
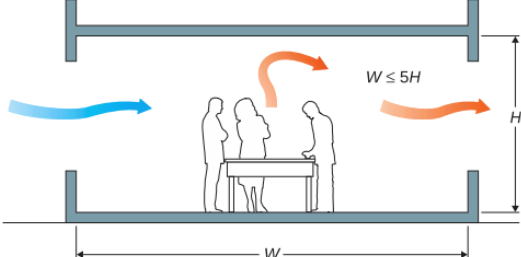
การทำแผงบังแดดแนวตั้ง หรือ ผนังยื่นเป็นปีกเพื่อดักลม (Wing Wall) ข้างหน้าต่าง หรือการใช้หน้าต่างบานผลึก สามารถทำให้แรงดันลมบริเวณหน้าต่างไม่เท่ากัน (รูปที่ 6-68 ถึง รูปที่ 6-71) และมีผลต่อรูปแบบการไหลของลมที่เข้าสู่อาคาร

 (ที่มา: Lechner, 2015)	
รูปที่ 6-68 การใช้ Wing Wall ด้านเดียวกันของหน้าต่าง	รูปที่ 6-69 การจำลองการไหลของลมที่ใช้ Wing Wall ด้านเดียวกันของหน้าต่าง
 (ที่มา: Lechner, 2015)	
รูปที่ 6-70 การใช้ Wing Wall คนละด้านของหน้าต่าง	รูปที่ 6-71 การจำลองการไหลของลมที่ใช้ Wing Wall คนละด้านของหน้าต่าง

นอกจากนี้ ลักษณะการเปิดของบานหน้าต่าง เช่น บานกระทุ้ง หรือ บานผลึก ก็มีผลทั้งลักษณะของกระแสลม และปริมาณลมที่สามารถเข้าสู่อาคาร ที่ควรคำนึงถึงในการออกแบบเส้นทางการไหลของกระแสลม

ความลึกของอาคาร

ในอาคารที่ใช้การระบายอากาศธรรมชาติ จะมีข้อจำกัดเรื่องความลึกของห้องหรืออาคารที่มีประสิทธิภาพในการระบายอากาศ (CIBSE, p.15) โดยมีหลักการอย่างง่าย หรือ กฎหัวแม่มือ (Rule of Thumb) คือ ถ้าเป็นห้องที่มีหน้าต่างด้านเดียว ความลึกของห้องจะจำกัดที่ 2 เท่า ของความสูงห้อง และถ้าเป็นอาคารที่มีหน้าต่าง 2 ด้าน ระบายอากาศแบบ Cross Ventilation ความลึกของห้องหรืออาคารจะไม่เกิน 5 เท่า ของความสูง

 Figure 2.18 Single sided ventilation, single opening	 Figure 2.20 Cross ventilation
รูปที่ 6-72 ความลึกของห้องที่มีหน้าต่างด้านเดียว ที่สามารถระบายอากาศธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ที่มา: CIBSE AM 10, p.15)	รูปที่ 6-73 ความลึกของห้องที่มีหน้าต่าง 2 ด้านตรงกันข้าม ที่สามารถระบายอากาศธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ที่มา: CIBSE AM 10, p.16)

ในการออกแบบที่จะใช้การระบายอากาศธรรมชาติ ผู้ออกแบบจะต้องมีความชัดเจนว่า จะเลือกใช้ Flow Path แบบใดในการออกแบบ เช่น Cross Ventilation แบบ One-sided Ventilation หรือ Stack Ventilation และคว่าลมสามารถผ่านได้ตาม Flow Path นั้นได้ดีเพียงใด และจะต้องมีการปรับปรุงรายละเอียดในส่วนใดบ้าง เพื่อให้การระบายอากาศมีประสิทธิภาพ เช่น ความลึกของห้อง การเปิดของบาน เป็นต้น

6.9 ข้อพิจารณาเพิ่มเติมในการใช้ลมธรรมชาติ

- คุณภาพของอากาศภายนอก ในการระบายอากาศธรรมชาติ ควรใช้ในพื้นที่ซึ่งคุณภาพของอากาศภายนอกอาคารดี ไม่มีปัญหาเรื่องฝุ่น หรือ มลพิษอื่น ๆ เกณฑ์การออกแบบที่เน้นสุขภาพ เช่น มาตรฐาน WELL จะมีข้อกำหนดว่าอาคารที่จะใช้การระบายอากาศธรรมชาติ จะต้องมีส่วนอากาศภายนอกในระยะ 1.6 กิโลเมตร ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพอากาศที่กำหนด เป็นเวลาอย่างน้อย 95% ของจำนวนชั่วโมงในปีที่ผ่านมา เพราะหากอากาศในบริเวณนั้นมีปัญหาฝุ่น PM 2.5 การออกแบบอาคารระบบปรับอากาศที่มีระบบกรองฝุ่น โดยใช้แผ่นกรองประสิทธิภาพสูงในระดับ MERV 13 หรือ 14 จะเหมาะสมกว่าการใช้การระบายอากาศธรรมชาติ

- การควบคุมควัน ในกรณีเกิดเพลิงไหม้ควันจะลอยไปตามเส้นทาง Flow Path ที่ออกแบบไว้ เช่น การออกแบบโถงสูงระหว่างชั้น (Atrium) ซึ่งความร้อนจะลอยขึ้นส่วนบนของอาคารไปยังชั้นต่าง ๆ การออกแบบเพื่อการควบคุมควันไฟ จำเป็นต้องเป็นคิดควบคู่กับการระบายอากาศธรรมชาติเสมอ

- เสียงภายนอกอาคาร นอกจากนี้หากในที่ตั้งอาคารมีปัญหาเรื่องเสียงจากภายนอก เช่น เสียงจากการจราจร การเปิดหน้าต่างอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการทำงานได้

6.10 กฎหมายและมาตรฐานในการระบายอากาศ

เนื่องจากการระบายอากาศเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อชีวิต เพื่อให้ภายในอาคารมีคุณภาพอากาศที่ดี จึงมีกฎหมายและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอาคาร คือ

- กฎกระทรวงฉบับที่ 39 (พ.ศ. 2537) ได้กำหนดให้ห้องในอาคารทุกชนิด ทุกประเภท (ยกเว้นสถานที่เก็บของ หรือ สินค้า) ที่ใช้การระบายอากาศธรรมชาติต้องมีขนาดพื้นที่ประตู หน้าต่าง

ช่องระบายอากาศรวมกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 10 ของพื้นที่ห้องนั้น โดยไม่นับรวมพื้นที่หน้าต่างประตูซึ่งติดกับทางเดิน หรือ ห้องอื่น

ดังนั้น ผู้ออกแบบควรตรวจสอบขนาดขั้นต่ำตามกฎหมายในการกำหนดเส้นทางการไหล (Flow Path) ของลมด้วย

- มาตรฐานการระบายอากาศเพื่อคุณภาพอากาศภายในที่ยอมรับได้ ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ซึ่งมีเนื้อหาเกี่ยวกับ การระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ โดยมีสมการในคำนวณปริมาณการไหลของลม การกำหนดระยะความลึกของห้องหรืออาคารที่ใช้การระบายด้านเดียว หรือ 2 ด้าน โดยอ้างอิงจาก CIBSE AM 10 และเกณฑ์การระบายอากาศเสียขั้นต่ำ

6.11 สรุป

การออกแบบที่พึงพาระบบธรรมชาติ มีหลายวิธีที่สามารถช่วยลดความร้อน เพื่อทำให้เกิดความสบายและลดการใช้พลังงาน โดยควรเลือกกลยุทธ์ที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์สภาพภูมิอากาศ และสภาพแวดล้อมของที่ตั้งอาคาร ซึ่งอาจจะใช้หลายวิธีการร่วมกัน เช่น การบังแดด การใช้ลมธรรมชาติ

การลดความร้อนโดยการใช้อุปกรณ์บังแดด หรือ สิ่งก่อสร้างที่มีอยู่ในที่ตั้งอาคาร จะต้องหาเงาที่เกิดขึ้นโดยการเลือกละติจูดที่ใกล้เคียงที่ตั้งมากที่สุด แล้วหาดำแหน่งดวงอาทิตย์ มุม VSA และมุม HSA ที่ใช้ในการกำหนดระยะยื่นของแผงบังแดด ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ผังการโคจรของดวงอาทิตย์ หรือ การจำลองเงาโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ หากต้องการบังแดดให้ได้ตลอดปีจะต้องใช้วันที่เป็น Summer Solstice และ Winter Solstice

ส่วนการออกแบบที่ใช้ลมธรรมชาติ จะต้องเริ่มจากการกำหนดเส้นทางการไหลของลมในอาคารที่ออกแบบให้ชัดเจนว่าต้องการให้เป็นแบบใด เช่น ระบายผ่านช่องเปิดที่อยู่ด้านตรงข้าม หรือ การระบายแบบปล่อง หรือ ผสมกัน และพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วลม และลักษณะการไหลของลม เช่น ลักษณะการเปิดหน้าต่าง และส่วนยื่นต่าง ๆ

การออกแบบที่พึงพาระบบธรรมชาติ ควรวิเคราะห์หาจุดที่เกิดประโยชน์สูงสุดจากหลายด้าน เช่น การออกแบบอุปกรณ์บังแดดที่สามารถบังแดดได้ดี เอื้อต่อการใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติ สามารถเปี่ยงลมให้เข้าสู่อาคารไปยังส่วนที่มีผู้ใช้งาน หรือ ต้องการระบายความร้อน รวมทั้งต้องเข้าใจข้อจำกัดของแต่ละวิธี

เอกสารอ้างอิง

กฎกระทรวงฉบับที่ 39 (พ.ศ. 2537) ออกตามความในพระราชบัญญัติ พ.ศ. 2522.

กองภูมิอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา. ฝนของประเทศไทยในคาบ 10 ปี (พ.ศ. 2524 - 2533), มพท.

ฉกาจ ดำรงค์เกียรติ. ประสิทธิภาพในการลดความร้อนที่เข้าสู่อาคารโดยใช้ระบบท่อกาศฝังดิน กรณีศึกษา หอสมุดสยามมบรมราชกุมารี วัดจันเสน จังหวัดนครสวรรค์. วิทยานิพนธ์ระดับมหาบัณฑิต สาขาสถาปัตยกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร. พ.ศ. 2552.

รุ่งโรจน์ วงศ์มหาศิริ. การออกแบบการบังแดดให้กับอาคารในประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: มิน เซอร์วิส ซัพพลาย, 2562.

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. มาตรฐานการระบายอากาศเพื่อคุณภาพอากาศภายในอาคารที่ยอมรับได้. (มาตรฐาน วสท. 031010-60), กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พ.ศ. 2560.

Architecture & Building Design. Available from <https://www.esplanade.com/about-us/architecture-and-building-design>

- The Chartered Institution of Building Services Engineers London. **Natural Ventilation in Non-Domestic Buildings - CIBSE Applications Manual AM10**. Norwich, Norfolk: Page Bros. (Norwich) Ltd., 2005.
- International WELL Building Institute. The WELL Building Standard v1 - Q1 2020. Available from <https://resources.wellcertified.com/tools/well-building-standard-v1/>
- Lechner, Norbert. **Heating Cooling, Lighting - Sustainable Design Methods for Architects**. New Jersey: John Wiley & Sons, inc., 2009.
- Luis E. Lopez Ponce de Leon, Michela Turrin and Eric van den Ham. **Shading Design Workflow for Architectural Designers**. TU Delft.
- Mingxue Chen, Wenqing Li, Shuang Tao, Zhenggang Fang, Chunhua Lu and Zhongzi Xu. A Pragmatic and High-Performance Radiative Cooling Coating with Near-Ideal Selective Emissive Spectrum for Passive Cooling. *Coatings* 2020, 10, 144. Available from <http://www.mdpi.com/journal/coatings>.
- M M Goyal. *Handbook of Building Construction - The Essential Source of Standard Construction Practices*. Faridabad: Saurabh Goyal Amridrea Consultancy Pvt., 2004.
- Passe, Ulrike, and Francine Battagila. **Design Spaces for Natural Ventilation - An Architect's Guide**. New York: Routledge. 2015
- Pitts, Adrian. Thermal Comfort in Transition Spaces. *Buildings*, 3(1), 122-142. 2013. Available from <https://www.mdpi.com/2075-5309/3/1/122/html>
- Sun Path Chart Program. Available from <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.php>
- Szokolay, S.V. **Thermal Design of Buildings**. Canberra: RAI Education. 1987.
- Szokolay, S.V. *Solar Geometry - Passive and Low Energy Architecture International Design Tools and Techniques*. 2007.
- Walker, Anfy. Natural Ventilation. Available from <http://www.wbdg.org/resources/natural-ventilation>
- XiaoZhi Lim. The super-cool materials that send heat to space. Available from <https://www.nature.com/articles/d41586-019-03911-8>

แบบฝึกหัด

- 1) ให้นำตัวอย่างงานออกแบบที่มี หรือ อาจจะสร้างขึ้นใหม่ มาวิเคราะห์ความสามารถในการบังแดด ว่าสามารถกันแดดได้ในช่วงเดือนใดของปี และถ้าต้องการให้กันแดดได้ในช่วงเวลา 9.00-16.00 น. ของทุกวันในรอบปีต้องปรับอย่างไร
- 2) ให้นำแบบอาคารที่มีอยู่แล้ว มาพิจารณาว่าถ้าต้องการใช้ลมธรรมชาติ เพื่อให้เกิดความสบายจะมีความเป็นไปได้เพียงใด และต้องปรับปรุงแบบเดิมอย่างไรบ้าง



มหาวิทยาลัยศิลปากร งามเลิศ

7. กฎหมายอนุรักษ์พลังงาน

ประเทศไทยได้มีพระราชบัญญัติส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานในอาคารตั้งแต่ พ.ศ. 2535 และได้เคยมีกฎกระทรวงที่เกี่ยวกับเกณฑ์การออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน ตั้งแต่ พ.ศ. 2538 แต่กฎหมายฉบับที่เป็นปัจจุบันที่สุดที่เกี่ยวกับการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน คือ *กฎกระทรวง กำหนดประเภทหรือ ขนาดของอาคาร และมาตรฐาน หลักเกณฑ์ และวิธีการ ในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552* ดังนั้น วัตถุประสงค์ของบทนี้ คือ เพื่อต้องการให้เข้าใจในภาพรวมของกฎกระทรวงฯ พ.ศ. 2552 ส่วนรายละเอียดของแนวทางการออกแบบให้สอดคล้องกับกฎหมายจะอธิบายเพิ่มเติมในบทต่อไป โดยในบทนี้จะครอบคลุมเรื่องดังนี้

- 1) ประเภทอาคาร ขนาดอาคาร และ เกณฑ์ที่มีการควบคุมตามกฎหมาย
- 2) วิธีการพิจารณาการผ่านเกณฑ์ตามกฎหมาย
- 3) หลักการคำนวณค่าการใช้พลังงานรวม
- 4) ข้อควรพิจารณาในการใช้ค่าพลังงานรวม

เนื่องจากกฎหมายฉบับดังกล่าวได้มีการประกาศมาเป็นเวลานานแล้ว ดังนั้นกระทรวงพลังงานจึงได้ทำการศึกษาเพื่อปรับปรุงค่าเกณฑ์ในการพิจารณา ให้เหมาะสมตามความก้าวหน้าของเทคโนโลยีด้านวัสดุอุปกรณ์ ดังนั้นผู้เรียนจึงควรติดตามประกาศ ซึ่งอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเกณฑ์ที่ไม่ตรงกับเนื้อหาบางส่วนในบทนี้ได้

กฎหมายอนุรักษ์พลังงานฯ พ.ศ. 2552 ฉบับนี้มีเนื้อหาโดยรวมซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

7.1 ประเภทและขนาดอาคาร

อาคารที่อยู่ในขอบเขตของกฎหมายนี้ ได้แก่ อาคารที่ก่อสร้างใหม่ หรือ ดัดแปลง ที่มีพื้นที่รวมกันทุกชั้นในหลังเดียวกันตั้งแต่ 2,000 ตารางเมตร ขึ้นไป ซึ่งมีทั้งหมด 9 ประเภท ได้แก่

- 1) สถานพยาบาลตามกฎหมายว่าด้วยสถานพยาบาล
- 2) สถานศึกษา
- 3) สำนักงาน
- 4) อาคารชุดตามกฎหมายว่าด้วยอาคารชุด
- 5) อาคารชุมนุมคนตามกฎหมายว่าด้วยการควบคุมอาคาร
- 6) อาคารโรงมหรสพตามกฎหมายว่าด้วยการควบคุมอาคาร
- 7) อาคารโรงแรมตามกฎหมายว่าด้วยโรงแรม
- 8) อาคารสถานบริการตามกฎหมายว่าด้วยสถานบริการ
- 9) อาคารห้างสรรพสินค้าหรือศูนย์การค้า

7.2 ระบบของอาคารที่ควบคุม

ประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่

- 1) ระบบกรอบอาคาร
- 2) ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง
- 3) ระบบปรับอากาศ
- 4) อุปกรณ์ผลิตน้ำร้อน

เกณฑ์มาตรฐาน

สำหรับระบบปรับอากาศ และระบบแสงสว่าง จะแบ่งค่าเกณฑ์มาตรฐานเป็น 3 กลุ่มตามช่วงเวลาการใช้งาน ได้แก่

(1) **ระบบปรับอากาศ** กำหนดด้วยค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านผนัง หรือ เรียกว่า ค่า OTTV (Overall Thermal Transfer Value) และค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคา หรือ เรียกว่า ค่า RTTV (Roof Thermal Transfer Value) โดยจะคิดเฉพาะผนังและหลังคาในส่วนที่มีการปรับอากาศเท่านั้น (ตารางที่ 7-1)

(2) **ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง** กำหนดด้วยค่ากำลังไฟฟ้าส่องสว่างสูงสุด หรือ เรียกว่า ค่า LPD (Lighting Power Density) ซึ่งรวมค่ากำลังไฟฟ้าของหลอดไฟ และบัลลาสต์ ของพื้นที่ภายในอาคารเท่านั้น และไม่รวมไฟฟ้าแสงสว่างในพื้นที่จอดรถในอาคาร (ตารางที่ 7-1)

ตารางที่ 7-1 เกณฑ์ค่า OTTV, RTTV และ LPD ตามกฎหมายอนุรักษ์พลังงาน

ประเภทอาคาร	เวลาใช้งาน (ชม.)	OTTV (W/m ²)	RTTV (W/m ²)	LPD (W/m ²)
กลุ่มที่ 1 สถานศึกษา สำนักงาน	2,340	50	15	14
กลุ่มที่ 2 โรงแรมที่พัก ศูนย์การค้า สถานบริการ ห้างสรรพสินค้า อาคารชุมนุมคน	4,380	40	12	18
กลุ่มที่ 3 โรงแรม สถานพยาบาล อาคารชุด	8,760	30	10	12

(3) **ระบบปรับอากาศ** สำหรับเกณฑ์มาตรฐานของระบบปรับอากาศ จะกำหนดประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศ ไว้ในประกาศกระทรวงพลังงาน ซึ่งแยกต่างหากจากกฎกระทรวง โดยได้ประกาศไว้ตั้งแต่ พ.ศ. 2552 ซึ่งจะควบคุม 3 ประเภท ได้แก่

1) เครื่องปรับอากาศขนาดเล็ก หรือ เครื่องปรับอากาศแยกส่วนที่มีขนาดไม่เกิน 12,000 วัตต์

2) ระบบปรับอากาศขนาดใหญ่ ประเภทที่ใช้เครื่องทำน้ำเย็น ซึ่งควบคุมด้วยค่า

a. ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำเย็น และ

b. ส่วนประกอบของระบบปรับอากาศที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า ต้องมีค่าพลังไฟฟ้าต่อตัน

ความเย็นตามที่กำหนด

3) เครื่องทำน้ำเย็นแบบดูดกลืน ต้องมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะตามที่กำหนด

โดยประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศ จะกำหนดด้วยค่าดังต่อไปนี้

- **ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ หรือ ค่า COP** (Coefficient of Performance) หมายถึง

อัตราส่วนระหว่างขีดความสามารถในการทำ ความเย็นรวมสุทธิของระบบปรับอากาศ หน่วยเป็น วัตต์ กับพิกัดกำลังไฟฟ้า หน่วยเป็นวัตต์

- ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน หรือ ค่า EER (Energy Efficiency Ratio)

หมายถึง อัตราส่วนระหว่างขีดความสามารถทำความเย็นรวมสุทธิของระบบปรับอากาศ หน่วย บีทียูต่อชั่วโมง กับ พิกัดกำลังไฟฟ้าหน่วยเป็นวัตต์

- ค่าพลังไฟฟ้าต่อตันความเย็น หมายถึง อัตราส่วนระหว่างพิกัดกำลังไฟฟ้า หน่วย

เป็นกิโลวัตต์ กับขีดความสามารถทำความเย็นรวมสุทธิของเครื่องทำน้ำเย็น หน่วยเป็น ตันความเย็น

สำหรับค่าประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศขนาดเล็ก ทางกระทรวงพลังงาน ได้เคยกำหนดไว้ ตั้งแต่ พ.ศ. 2552 สำหรับเครื่องปรับอากาศที่มีขนาดไม่เกิน 12,000 วัตต์ จะต้องมียุทธศาสตร์ COP ขั้นต่ำ 3.22 หรือ EER ขั้นต่ำ 11 และได้กำหนดเพิ่มเติม เนื่องจากทางไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ได้ประกาศ กำหนด ประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศประหยัดไฟเบอร์ 5 อยู่เป็นระยะ รายละเอียดของประสิทธิภาพระบบปรับอากาศแบบต่าง ๆ สามารถอ่านเพิ่มเติมได้จากบทที่ 9 ระบบปรับอากาศและระบายอากาศ

(4) อุปกรณ์ผลิตน้ำร้อน ซึ่งมีเกณฑ์ที่ควบคุมในกฎกระทรวงสำหรับอุปกรณ์ดังนี้

- a. หม้อไอน้ำและหม้อต้มน้ำร้อน ต้องมีค่าประสิทธิภาพขั้นต่ำ (ร้อยละ) ตามที่กำหนด (ตารางที่ 7-2)

ตารางที่ 7-2 เกณฑ์ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำและหม้อต้มน้ำร้อน

ประเภท	ค่าประสิทธิภาพขั้นต่ำ (ร้อยละ)
หม้อไอน้ำที่ใช้ น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง	85
หม้อต้มน้ำร้อนที่ใช้ น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง	80
หม้อไอน้ำที่ใช้ แก๊สเป็นเชื้อเพลิง	80
หม้อต้มน้ำร้อนที่ใช้ แก๊สเป็นเชื้อเพลิง	80

- b. เครื่องทำน้ำร้อนชนิดฮีตปั๊ม แบบใช้อากาศเป็นแหล่งพลังงาน (Air-Source Heat Pump Water Heater) ต้องมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะขั้นต่ำตามที่กำหนด (ตารางที่ 7-3)

ตารางที่ 7-3 เกณฑ์ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนชนิดฮีตปั๊ม

ลักษณะการออกแบบ	ภาวะพิกัด			ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะขั้นต่ำ
	อุณหภูมิ น้ำเข้า (°C)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ อากาศ (°C)	
แบบที่ 1	30.0	50.0	30.0	3.5
แบบที่ 2	30.0	60.0	30.0	3.0

สำหรับประเภทอาคารที่อาจจะมีการใช้หม้อต้มน้ำร้อน คือ โรงแรม โดยใช้ในงานซักรีด ห้องน้ำในห้องพัก ส่วนหม้อไอน้ำส่วนใหญ่จะใช้ในงานโรงพยาบาล ในแผนกจ่ายกลาง (Central Sterile Supply Department, CSSD) เพื่อการนึ่งฆ่าเชื้อโรค และใช้น้ำร้อนในงานซักรีด งานครัว ห้องพักคนไข้ แต่ปัจจุบันพบว่ามีการใช้หม้อต้มน้ำในโรงแรมน้อยลง เพราะมักเปลี่ยนไปใช้อีทีบีเอ็มในการทำน้ำร้อน ซึ่งจะได้อากาศเย็นมาพร้อมกัน และสามารถนำลมเย็นที่ได้ไปใช้ประโยชน์ตามส่วนต่าง ๆ เช่น ตามทางเดินชั้นห้องพัก หรือ ในฝ่ายบริการต่าง ๆ ที่ไม่ได้ปรับอากาศ เช่น แผนกซักรีด ทำให้พนักงานมีความสบายขึ้น รวมทั้งเทคโนโลยีของอุปกรณ์ที่ใช้ฆ่าเชื้อโรคก็เปลี่ยนแปลงไป ทำให้บางโรงพยาบาลไม่มีความจำเป็นต้องใช้หม้อไอน้ำและหม้อต้มน้ำร้อน

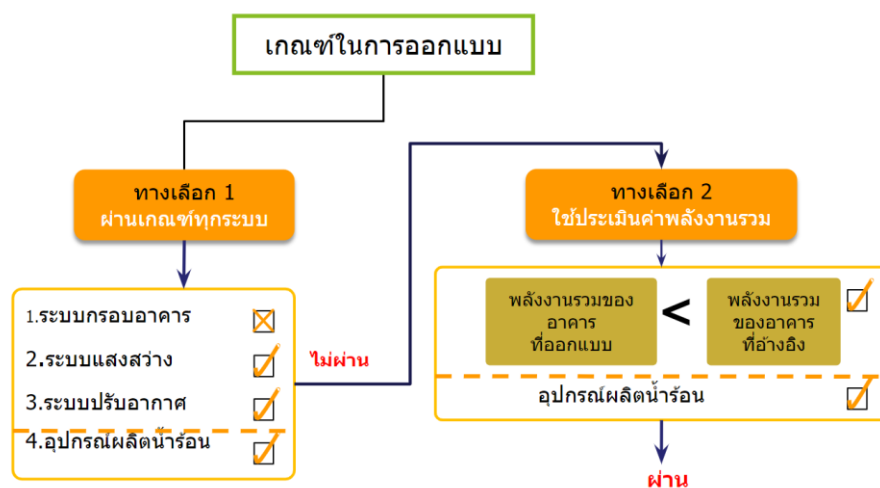
7.3 วิธีการพิจารณาการผ่านเกณฑ์ตามกฎหมาย

การพิจารณาการผ่านเกณฑ์ตามกฎหมาย สามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ (รูปที่ 7-1)

- กรณีที่ 1 ผ่านเกณฑ์รายระบบทุกระบบ คือ ทั้ง 4 ระบบ ได้แก่ ระบบกรอบอาคาร ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ และอุปกรณ์ผลิตน้ำร้อน สามารถผ่านค่าที่กำหนดได้

- กรณีที่ 2 ผ่านโดยใช้ค่าพลังงานรวม คือ ถ้าอาคารที่ออกแบบมีระบบกรอบอาคาร หรือ ระบบแสงสว่าง หรือ ระบบปรับอากาศ ที่ไม่ผ่านเกณฑ์ แต่เมื่อคำนวณค่าพลังงานรวมของอาคารที่ออกแบบเปรียบเทียบกับอาคารอ้างอิง แล้ว อาคารที่ออกแบบมีค่าการใช้พลังงานรวมต่ำกว่า ค่าการใช้พลังงานรวมของอาคารอ้างอิงจะถือว่าสามารถผ่านเกณฑ์ได้

โดยอาคารอ้างอิงจะมีพื้นที่การใช้งาน ทิศทาง และ พื้นที่กรอบอาคารแต่ละด้านเช่นเดียวกับอาคารที่ออกแบบ และมีค่าของระบบกรอบอาคาร ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง และระบบปรับอากาศ ตามเกณฑ์ในกฎหมาย แต่ทั้งนี้หากมีการใช้ ระบบอุปกรณ์ผลิตน้ำร้อนจะต้องผ่านเกณฑ์ด้วย



รูปที่ 7-1 วิธีการผ่านเกณฑ์ตามกฎหมาย

(ที่มา: เอกสารประกอบการอบรมผู้ประเมินค่าการอนุรักษ์พลังงาน, 2562)

7.4 การใช้พลังงานหมุนเวียน

การคิดค่าการใช้พลังงานรวมของอาคารที่ออกแบบ สามารถหักลบค่าพลังงานที่ใช้งานได้ หากการออกแบบเข้าข่ายใน 2 กรณี ดังนี้ คือ

- 1) กรณีที่มีการผลิตพลังงานหมุนเวียนจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- 2) กรณีที่มีการออกแบบเพื่อใช้แสงสว่างธรรมชาติสำหรับการส่องสว่างภายในอาคาร โดยสามารถนำพลังงานที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ในพื้นที่ตามแนวรอบอาคารมาหักลบได้ เสมือนว่าไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าแสงสว่าง แต่ทั้งนี้การจะหักลบได้ต้องผ่านเงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้
 - ต้องมีการแยกสวิตช์ที่เปิด-ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้าแสงสว่างตามแนวรอบอาคาร (รูปที่ 7-2)
 - อุปกรณ์ไฟฟ้าแสงสว่างต้องอยู่ในระยะห่างจากกรอบอาคาร ไม่เกิน 1.5 เท่า ของความสูงหน้าต่างในพื้นที่นั้น (รูปที่ 7-3)
 - กระจกหน้าต่างตามแนวรอบอาคาร ต้องมีค่าประสิทธิภาพของสัมประสิทธิ์การบังแดด (Effective Shading Coefficient, SC_{eff}) ไม่น้อยกว่า 0.3 และอัตราส่วนการส่งผ่านแสงต่อความร้อน (Light to Solar Gain) มากกว่า 1.0

$$SC_{eff} = (SC)(T_{vis})$$

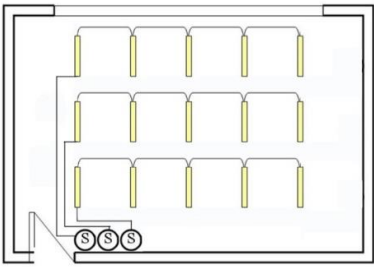
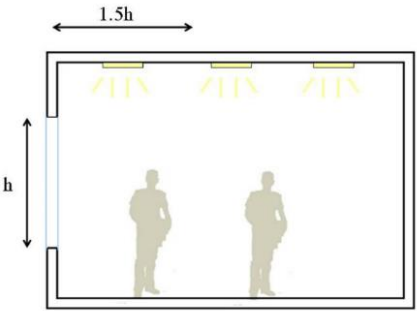
SC_{eff} = ประสิทธิภาพของสัมประสิทธิ์การบังแดด

SC = ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดด

T_{vis} = ค่าการส่งผ่านรังสีที่ตามองเห็น

- พื้นที่กระจกหน้าต่างตามแนวรอบอาคารต้องไม่น้อยกว่าผนังทับ

โดยจะต้องผ่านตามเงื่อนไขต่าง ๆ ข้างต้น ครบทุกข้อ จึงจะสามารถหักลบ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแสงสว่างได้

	
รูปที่ 7-2 การแยกสวิตช์ควบคุมหลอดไฟที่อยู่ตามแนวริมหน้าต่าง	รูปที่ 7-3 หลอดไฟต้องอยู่ในระยะ 1.5 เท่าของความสูงหน้าต่าง

7.5 หลักการคำนวณค่าการใช้พลังงานรวม

ในการประเมินการผ่านเกณฑ์ตามกฎหมายจะต้องดำเนินงานโดยใช้โปรแกรม BEC (Building Energy Code) ของกระทรวงพลังงาน โปรแกรมจะคำนวณค่าการใช้พลังงานรวมของอาคารที่ออกแบบ และอาคารอ้างอิงให้เสมอ โดยการใช้พลังงานรวมประกอบด้วย พลังงานไฟฟ้า จาก 4 ส่วน คือ

- 1) ระบบปรับอากาศ คำนวณจากความร้อนที่เกิดขึ้นในอาคารซึ่งประกอบด้วย
 - a. ความร้อนที่ผ่านผนังอาคาร (OTTV)
 - b. ความร้อนที่ผ่านหลังคาอาคาร (RTTV)
 - c. ความร้อนจากหลอดไฟ
 - d. ความร้อนจากอุปกรณ์และเครื่องมือ
 - e. ความร้อนจากคน
 - f. ความร้อนของอากาศที่นำเข้ามาเพื่อการระบายอากาศ

ความร้อนทั้งหมดจะถูกแปลงเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับอากาศ โดยการนำค่า COP ของระบบปรับอากาศมาหาร

2) ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง คิดจากจำนวนวัตต์ของหลอดและบัลลาสต์ที่ใช้ในอาคาร โดยไม่รวมหลอดไฟในที่จอดรถ

3) อุปกรณ์และเครื่องมือ คิดจากจำนวนวัตต์ของอุปกรณ์ที่ใช้ ซึ่งตามกฎหมายไม่ได้บังคับให้ต้องใส่ข้อมูลในส่วนนี้ แต่ถ้าใส่โปรแกรมจะใช้ค่าที่เท่ากันในอาคารอ้างอิงและอาคารที่ออกแบบ

4) พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ โปรแกรมจะคำนวณตามขนาดพื้นที่ที่ติดตั้ง และประสิทธิภาพรวมของระบบตามที่อาคารเลือกใช้ แล้วนำไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการคำนวณไปหักลบ จากผลรวมของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศ ระบบแสงสว่าง และอุปกรณ์

การคำนวณการใช้พลังงานรวมของอาคารที่ออกแบบและอาคารอ้างอิง ตามกฎหมายอนุรักษ์พลังงาน จะใช้สมการดังต่อไปนี้

$$E_{pa} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{A_{wi}(OTTV_i)}{COP_i} + \frac{A_{ri}(RTTV_i)}{COP_i} + A_i \left\{ \frac{C_i(LPD_i) + C_e(EQD_i) + 130C_o(OCCU_i) + 24C_v(VENT_i)}{COP_i} \right\} \right] n_h$$

$$+ \sum_{i=1}^n A_i(LPD_i + EQD_i)n_h - PVE$$

เมื่อ	LPD _i	คือ	กำลังไฟฟ้าส่องสว่างที่ติดตั้งเฉลี่ยต่อหน่วยพื้นที่ i มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m ²)
	EQD _i	คือ	กำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ต่อหน่วยพื้นที่ i มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m ²)
	OCCU _i	คือ	ความหนาแน่นของผู้ใช้อาคารในพื้นที่ i มีหน่วยเป็นคนต่อตารางเมตร (person/m ²)
	VENT _i	คือ	อัตราการระบายอากาศต่อพื้นที่ สำหรับพื้นที่ i มีหน่วยเป็นลิตรต่อวินาที (L/s)
	COP _i	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะขั้นต่ำของระบบปรับอากาศขนาดเล็ก หรือ ระบบปรับอากาศขนาดใหญ่ที่ใช้งานสำหรับพื้นที่ i

- A_i คือ พื้นที่ส่วนปรับอากาศ i (พื้นที่ i) มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)
- PVE คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยรายปีที่ผลิตโดยเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็นกิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh) สำหรับการคำนวณการใช้พลังงานโดยรวมในอาคารอ้างอิง จะไม่มีค่า PVE ในสมการกรณีที่มีส่วนที่เป็นผนังภายนอกอาคารล้อมรอบพื้นที่ i
- $OTTV_i$ คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกด้านที่พิจารณา มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)
- $RTTV_i$ คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารส่วนที่พิจารณา มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)
- A_{wi} คือ พื้นที่ของผนังด้านที่พิจารณา ซึ่งรวมพื้นที่ผนังทึบและพื้นที่หน้าต่างหรือผนังโปร่งแสง มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)
- A_{ri} คือ พื้นที่ของหลังคาส่วนที่พิจารณา ซึ่งรวมพื้นที่หลังคาทึบและพื้นที่หลังคาโปร่งแสง มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)
- C_l, C_e, C_o และ C_v คือ สัมประสิทธิ์สัดส่วนความร้อนที่เป็นภาระแก่ระบบปรับอากาศจากไฟฟ้าแสงสว่าง อุปกรณ์และเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ผู้ใช้อาคารและการระบายอากาศ ตามลำดับ ให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตามประกาศฯ (ตารางที่ 7-4)
- ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์สัดส่วนความร้อนที่เป็นภาระแก่ระบบปรับอากาศและจำนวนชั่วโมงใช้งานสำหรับอาคารแต่ละประเภท
- η_h คือ จำนวนชั่วโมงใช้งานสำหรับอาคารแต่ละประเภท
- ตารางที่ 7-4** ค่าสัมประสิทธิ์สัดส่วนความร้อนที่เป็นภาระแก่ระบบปรับอากาศ และจำนวนชั่วโมงใช้งานสำหรับอาคารแต่ละประเภท

ประเภทของอาคาร	C_l	C_e	C_o	C_v	η_h
สถานศึกษา สำนักงาน	0.84	0.85	0.90	0.90	2,340
โรงแรมที่พัก ศูนย์การค้า สถานบริการ ห้างสรรพสินค้า อาคารชุมนุมคน	0.84	0.85	0.90	0.90	4,380
โรงแรม สถานพยาบาล อาคารชุด	1.0	1.0	1.0	1.0	8,760

7.6 การประมาณค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้ตามกฎหมายอนุรักษ์พลังงาน กำหนดให้ใช้สมการดังนี้

$$PVE = \frac{(9)(365)(A_{mod})(\eta_{sys})(ESR_{pv})}{1000}$$

เมื่อ PVE	คือ	ค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยรายปีที่ผลิตโดยเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็นกิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh)
(9)(365)	คือ	จำนวนชั่วโมงเฉลี่ยที่มีแสงอาทิตย์ใน 1 วัน และ (365) คือ จำนวนวันใน 1 ปี
A_{mod}	คือ	พื้นที่รวมทั้งหมดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้ง มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)
η_{sys}	คือ	ประสิทธิภาพรวมของระบบ
ESR_{pv}	คือ	ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงและทิศทาง ที่ตรงกับการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)

การคำนวณจะใช้ค่ารังสีอาทิตย์ (ESR) ที่ประกาศฯ กำหนดให้ใช้สำหรับการคำนวณความร้อนที่ถ่ายผ่านผนังโปร่งแสงของอาคาร ในกลุ่มที่ 1 คือ สถานศึกษา หรือ สำนักงาน ซึ่งใช้งานเวลากลางวันวันละ 9 ชั่วโมง โดยให้ใช้กับอาคารในกลุ่มที่ 2 และ 3 ด้วย

มีผู้ตั้งข้อสังเกตว่าสมการข้างต้นใช้จำนวนชั่วโมงในการคำนวณไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงถึงวันละ 9 ชั่วโมงซึ่งน่าจะมากเกินไป เพราะส่วนใหญ่การคำนวณไฟฟ้าที่ผลิตได้ของกรุงเทพมหานคร จะใช้เพียงประมาณวันละ 5 ชั่วโมงเท่านั้น ซึ่งผู้เขียนได้ทดลองนำค่าที่ได้จากโปรแกรม BEC และผลจากโปรแกรมอื่นมาเปรียบเทียบกับพบว่าโปรแกรมไม่ได้ประเมินสูงกว่ามากอย่างที่เข้าใจ เนื่องจากค่า ESR ที่ใช้ในสมการนั้นเป็นค่าเฉลี่ยของรังสีอาทิตย์ในช่วงเวลา 9 ชั่วโมง ไม่ได้เป็นค่า Peak Sun Hour (ซึ่งมีค่ารังสีอาทิตย์ที่ $1,000 W/m^2$) ซึ่งหากนำค่า ESR ที่ตกบนพื้นราบ ($437.38 W/m^2$) ในช่วงเวลา 9 ชั่วโมง คิดเป็น Peak Sun Hour จะได้ประมาณ 4 ชั่วโมง ($437.38 \times 9 / 1,000 = 3.94 h$) ซึ่งยังน้อยกว่าค่าเฉลี่ยของ Peak Sun Hour ของกรุงเทพมหานคร ที่ประมาณ 5 ชั่วโมง

7.7 ข้อควรพิจารณาในการใช้ค่าพลังงานรวม

ผู้ออกแบบควรเข้าใจว่า ค่าพลังงานรวมที่ได้จากการคำนวณ หรือ โปรแกรม BEC เป็นค่าที่ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพพลังงานระหว่างอาคารที่ออกแบบ กับเกณฑ์ที่ยอมรับได้ หรือ อาคารอ้างอิงเท่านั้น มิได้เป็นค่าที่แสดงว่าอาคารที่ออกแบบจะใช้พลังงานในรอบปีเท่านั้นจริง ๆ

มีเหตุผลหลายประการ ที่ค่าดังกล่าวไม่สามารถใช้ในการพยากรณ์พลังงานที่อาคารนั้นใช้ได้ เช่น

- พลังงานที่มาจากการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งอาจจะไม่ได้ใส่ในการคำนวณ พลังงานในส่วนนี้จะขึ้นกับลักษณะของแต่ละอาคาร ซึ่งต้องมีการสำรวจจำนวนและพิกัดกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่คาดว่าจะใช้พลังงานที่ใช้ในส่วนนี้อาจจะสูงถึงประมาณ 25 % ของพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในอาคาร

- จำนวนชั่วโมงใช้งาน อาจจะแตกต่างกับสภาพจริง เช่น ในอาคารชุด จะคำนวณการใช้ไฟฟ้าแสงสว่าง ถึง 8,760 ชั่วโมง ซึ่งในความเป็นจริงไม่น่าจะมีอาคารที่เปิดไฟตลอด 24 ชั่วโมง

- จำนวนผู้ใช้อาคารในโปรแกรมจะเป็นค่าที่ไม่สามารถปรับได้ และแตกต่างจากอาคารที่ใช้งาน

- อัตราการระบายอากาศในโปรแกรม BEC ไม่สามารถปรับได้ และค่าที่ออกแบบอาจจะแตกต่างจากโปรแกรม
- ค่าการรั่วซึมของอากาศ ซึ่งแตกต่างกันได้มากในอาคารแต่ละหลังตามวิธีการออกแบบ ฯลฯ

อย่างไรก็ตาม การใช้ค่าพลังงานรวมตามวิธีการคำนวณของกระทรวงพลังงานด้วยโปรแกรม BEC ก็ยังสามารถใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร ระหว่างทางเลือกต่าง ๆ ในการออกแบบได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งพบว่า มีการนำวิธีประเมินพลังงานโดยโปรแกรม BEC ไปใช้ในการประเมินประสิทธิภาพพลังงานของอาคารที่ออกแบบ ตามเกณฑ์ของอาคารเขียวไทย หรือ TREES ด้วย

เอกสารอ้างอิง

กฎกระทรวง กำหนดประเภท หรือ ขนาดของอาคาร และมาตรฐาน หลักเกณฑ์ และวิธีการ ในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552.

ประกาศกระทรวงพลังงาน. เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการคำนวณในการออกแบบอาคารแต่ละระบบ การใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร และการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่าง ๆ ของอาคาร พ.ศ. 2552.

สถาบันอาคารเขียวไทย. คู่มือสำหรับเกณฑ์การประเมินความยั่งยืนทางพลังงานและสิ่งแวดล้อมไทย สำหรับการก่อสร้างและปรับปรุงโครงการใหม่ และอาคารประเภท พื้นที่ส่วนกลางและกรอบอาคาร พ.ศ. 2559.

Bangkok, Thailand - Solar Energy and Surface Meteorology. Available from

<https://www.gaisma.com/en/location/bangkok.html>

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



มหาวิทยาลัยศิลปากร งามเลิศ

8. ระบบเปลือกอาคาร (Building Envelope)

คำว่า “เปลือกอาคาร” บางทีเรียกว่า “กรอบอาคาร” มาจากภาษาอังกฤษ คือ Building Envelope หรือ Building Enclosure โดยทั่วไปจะหมายถึง ส่วนของอาคารที่ปกป้องผู้อยู่อาศัยจากความรุนแรงของสภาพอากาศภายนอก เพื่อทำให้เกิดความสบาย ซึ่งพบว่าหนึ่งในสาเหตุสำคัญของการสิ้นเปลืองพลังงานในการปรับอากาศ เกิดจากเปลือกอาคารที่ไม่สามารถป้องกันความร้อนและความชื้นได้ดีพอ ซึ่งการออกแบบเปลือกอาคารเป็นงานในความรับผิดชอบสถาปนิก ดังนั้น วัตถุประสงค์ของบทนี้ คือ เพื่อให้เข้าใจเรื่องดังต่อไปนี้

- 1) ระบบการถ่ายเทความร้อนของอาคารกับสภาพแวดล้อม
- 2) หลักการออกแบบอาคารปรับอากาศให้ประหยัดพลังงาน
- 3) เกณฑ์ระบบเปลือกอาคารตามกฎหมายอนุรักษ์พลังงาน
- 4) วิธีการคำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคารตามกฎหมายฯ
- 5) แนวทางการออกแบบเปลือกอาคารให้สอดคล้องกับกฎหมายฯ
- 6) ปัจจัยที่ไม่ได้รวมในการคำนวณ OTTV และ RTTV

8.1 ระบบการถ่ายเทความร้อนของอาคารกับสภาพแวดล้อม

อาคารเปรียบเสมือนระบบที่มีการถ่ายเทความร้อนกับสภาพแวดล้อมผ่านเปลือกอาคาร โดยวิธีการนำความร้อน การพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อน และการระเหยเป็นไอ ซึ่งมีทั้งการเพิ่มและลดความร้อน ดังนี้ (รูปที่ 8-1)

- ความร้อนถ่ายเทผ่านเปลือกอาคารโดยการนำความร้อน (Conduction) (Q_{cond}) ผ่านผนังทึบ หน้าต่าง หลังคา พื้น ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งการเพิ่มและลดความร้อน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายนอก หรือ ภายในอาคารสูงกว่า โดยจะไหลจากอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ

- ความร้อนจากการแผ่รังสีอาทิตย์ (Solar Radiation) (Q_{solar}) ผ่านส่วนโปร่งแสง คือ หน้าต่าง ผนัง และช่องหลังคาโปร่งแสง โดยจะเป็นความร้อนเพิ่มอย่างเดียว

- ความร้อนจากการพาความร้อน (Convection) เพื่อการระบายอากาศ (Ventilation) (Q_{vent}) หรือ การรั่วซึมของอากาศ (Infiltration) (Q_{infil}) ผ่านตามขอบหน้าต่างประตู การเปิดประตูเข้า-ออก รอยแตกที่ผนัง ซึ่งเป็นได้ทั้งการเพิ่ม หรือ สูญเสียความร้อน แล้วแต่อุณหภูมิอากาศภายนอก หรือ ภายในอาคารจะสูงกว่า

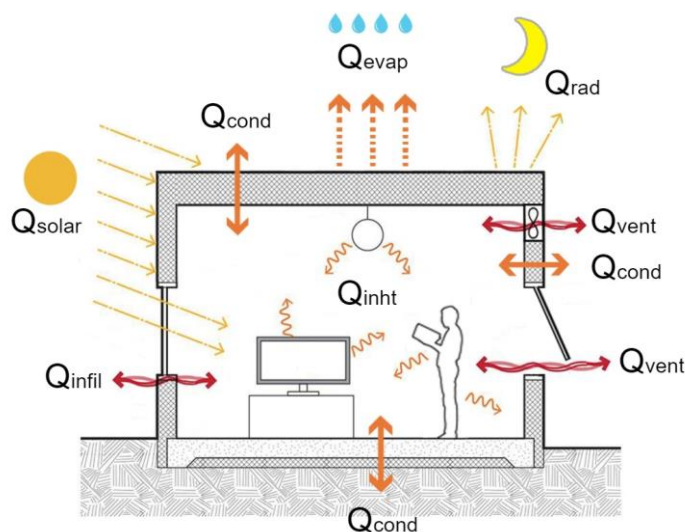
- ความร้อนจากการระเหยของน้ำ (Evaporation) (Q_{evap}) จากผิวเปลือกอาคารที่เปียก เช่น การพ่นละอองน้ำบนหลังคาให้เปียก เป็นการลดความร้อน

- ความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนของเปลือกอาคาร (Longwave Radiation) (Q_{rad}) เช่น ระหว่างหลังคาติดฟ้ายกับท้องฟ้าโปร่งไม่มีเมฆในเวลากลางคืนซึ่งจะเย็นจัด ทำให้อุณหภูมิที่ผิวอาคารลดลง เป็นการลดความร้อน

- ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอาคาร (Internal Heat) (Q_{inht}) ได้แก่ ความร้อนจากคน ความร้อนจากอุปกรณ์ เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ และ ความร้อนจากหลอดไฟฟ้า เป็นการเพิ่มความร้อนให้อาคาร

ถ้าความร้อนที่เพิ่ม และความร้อนที่ลด สมดุลกัน อุณหภูมิภายในอาคารจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ถ้าความร้อนเพิ่มมากกว่าลด อุณหภูมิภายในอาคารจะสูงขึ้น และถ้าความร้อนลดมากกว่าเพิ่ม อุณหภูมิในอาคารจะลดลง

จากลักษณะการถ่ายเทความร้อนข้างต้นจะเห็นว่า คุณภาพของเปลือกอาคารเป็นสิ่งมีผลโดยตรงต่อ ปริมาณที่ความร้อนที่ไหลเข้าหรือออกจากตัวอาคาร และเป็นสาเหตุสำคัญของการสิ้นเปลืองพลังงานในการ ปรับอากาศ



รูปที่ 8-1 การถ่ายเทความร้อนระหว่างอาคารกับสภาพแวดล้อม

8.2 หลักการออกแบบอาคารปรับอากาศให้ประหยัดพลังงาน

การออกแบบอาคารปรับอากาศให้ประหยัดพลังงาน มิได้เริ่มต้นจากการออกแบบระบบปรับอากาศ แต่ควรมีลำดับขั้นตอนของการพิจารณาดังนี้

1) การลดภาระความร้อนของระบบปรับอากาศ เป็นงานที่ควรทำเป็นลำดับแรก คือ การหาวิธีลด ภาระความร้อนที่มาจากภายนอก และภายในอาคารให้ได้มากที่สุด เพื่อลดความจำเป็นในการปรับอากาศ เพราะการใช้พลังงานไฟฟ้าซึ่งผลิตจากเชื้อเพลิงฟอสซิล จะมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ บรรยากาศในขบวนการผลิต เป็นสาเหตุของการเกิดภาวะโลกร้อน ผลกระทบต่อระบบนิเวศในระดับโลก

2) การเลือกใช้เครื่องปรับอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง หลังจากการออกแบบที่ทำให้ลดภาระความ ร้อนได้มากที่สุดแล้ว จึงพิจารณาเลือกใช้ระบบปรับอากาศที่มีขนาดเหมาะสมกับโหลดความร้อน และเลือกใช้ เครื่องปรับอากาศที่มีประสิทธิภาพพลังงานสูง ซึ่งสามารถพิจารณาได้จาก ค่า COP (Coefficient of Performance) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความสามารถในการทำความเย็นของระบบปรับอากาศต่อพิกัด กำลังไฟฟ้า ค่า COP ที่สูง หมายถึง ระบบปรับอากาศมีประสิทธิภาพสูง

3) การควบคุมการทำงานของระบบปรับอากาศ เป็นการนำเทคโนโลยีมาใช้ในการควบคุมการ ทำงานของระบบ เช่น การควบคุมการตั้งเวลาเปิด-ปิดเครื่องอัตโนมัติ ควบคุมการทำงานของพัดลม การปรับตั้ง อุณหภูมิในการปรับอากาศที่กำลังสบาย ไม่เย็นจัดจนเกินไป จะช่วยให้สามารถประหยัดพลังงานได้ดียิ่งขึ้น รวมทั้งการออกแบบให้มีระบบมิเตอร์ย่อย (Sub-Metering) ของระบบปรับอากาศโดยเฉพาะ ซึ่งควรวางแผน ตั้งตั้งขึ้นออกแบบ เพื่อช่วยให้สามารถติดตามผลการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศได้ง่าย สามารถประเมินผล ของมาตรการต่าง ๆ ที่นำมาใช้ลดพลังงานได้อย่างตรงประเด็น เช่น ถ้าต้องการทราบผลประหยัดเมื่อปิด เครื่องปรับอากาศก่อนเวลาเลิกงาน 15 นาที ก็จะต้องตรวจสอบค่าไฟฟ้าได้จากมิเตอร์ย่อย ซึ่งไม่ได้รวมผลที่อาจ เกิดจากการใช้พลังงานส่วนอื่น เช่น ไฟฟ้าแสงสว่าง เป็นต้น

8.3 การลดภาระความร้อนของระบบปรับอากาศ

ดังอธิบายข้างต้นว่า ควรลดภาระความร้อนที่เข้าสู่อาคารเป็นอันดับแรก ผู้ออกแบบจึงควรเข้าใจวิธีการต่าง ๆ ในการลดโหลดที่มีต่อระบบปรับอากาศ ซึ่งสามารถดำเนินการได้ ดังนี้

1) การวางผังบริเวณ คำนึงถึงการใช้ประโยชน์ของสภาพแวดล้อมโดยรอบที่ตั้ง เช่น การใช้ร่มเงาของอาคารใกล้เคียง หรือ ต้นไม้ใหญ่ที่มีอยู่เดิม รวมถึงการออกแบบภูมิทัศน์ เพื่อช่วยปรับอุณหภูมิอากาศโดยรอบให้เย็นลง ด้วยการทำพื้นที่สีเขียว การปลูกต้นไม้ใหญ่ การระเหยของน้ำจากใบ (Evapotranspiration) เป็นกระบวนการที่ช่วยลดอุณหภูมิอากาศ ควรหลีกเลี่ยงการออกแบบพื้นที่ลาดชันขนาดใหญ่ เช่น ลานจอดรถ แอสฟัลต์หรือคอนกรีต ซึ่งดูดกลืนความร้อนสูงและคายความร้อนสู่อากาศโดยรอบตัวอาคารทำให้มีอุณหภูมิสูง ซึ่งอาจลดพื้นที่ลาดชันโดยการใช้บล็อกหญ้า (Grass Block Paver) ที่รับน้ำหนักรถได้แทน (รูปที่ 8-2) เป็นต้น และยังได้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ คือ การลดเกาะความร้อนในเมือง ทำให้เพิ่มพื้นที่ซึมน้ำ ช่วยลดการไหลนองของน้ำฝนนอกพื้นที่โครงการ



รูปที่ 8-2 การใช้ Grass Block Paver ซึ่งสามารถรับน้ำหนักรถได้แทนลานคอนกรีตเพื่อลดความร้อน

(ที่มา: <http://www.greeninspired.co.th/products>)

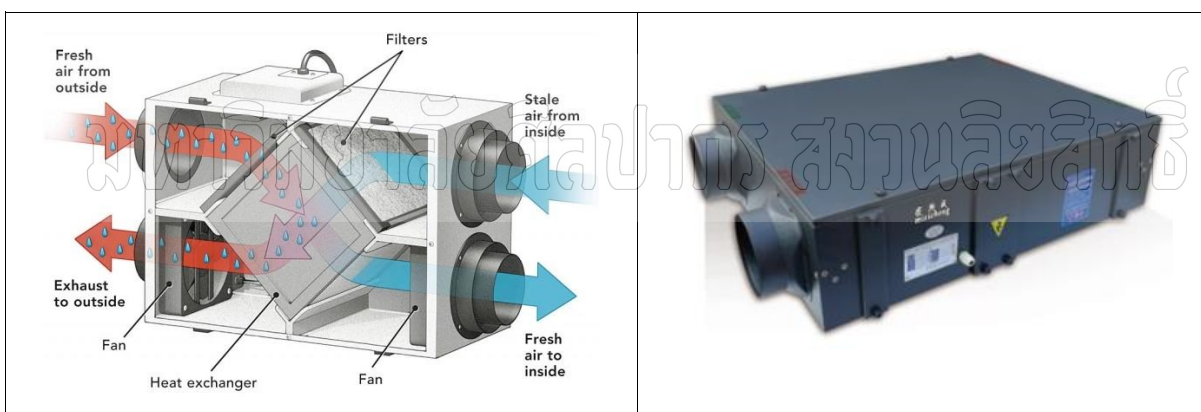
2) การวางทิศทางตัวอาคาร ในกรณีที่อาคารเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และมีสัดส่วนด้านกว้าง : ยาว แตกต่างกันมาก การวางตัวอาคารโดยหันด้านที่ยาวกว่าไปทางทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก จะทำให้ความร้อนถ่ายเทเข้าสู่ตัวอาคารมากกว่าการหันไปทางทิศเหนือ-ทิศใต้ ถ้าไม่มีข้อจำกัดเรื่องรูปร่างที่ดิน หรือข้อจำกัดอื่น การวางทิศทางอาคารที่เหมาะสม เป็นวิธีการลดความร้อนที่ไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่ม

3) การกำหนดสัดส่วนรูปร่างอาคาร ถ้าเปรียบเทียบอาคารที่มีพื้นที่ใช้สอยเท่ากัน ระหว่างอาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า อาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะมีเส้นรอบรูป หรือ พื้นที่เปลือกอาคารน้อยกว่า ดังนั้น จึงมีปริมาณความร้อนเข้าสู่อาคารจะน้อยกว่าอาคารรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพราะปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทสัมผัสโดยตรงกับขนาดพื้นที่เปลือกอาคาร แต่อย่างไรก็ตามอาจจะต้องพิจารณาในด้านอื่น ๆ ประกอบด้วย เช่น ขนาดพื้นที่ต่อชั้น (Floor Plate) เพราะอาคารที่มีพื้นที่ต่อชั้นใหญ่ ถ้ามีเส้นรอบรูปที่น้อย อาจจะไม่สามารถใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติได้เต็มที่ เพราะเมื่อแบ่งกันเป็นห้องย่อยแล้ว อาจจะมีห้องที่ไม่มีหน้าต่างเกิดขึ้นจำนวนมาก ดังนั้นการหาสัดส่วนรูปร่างที่เหมาะสม ควรต้องใช้ทั้งการจำลองพลังงานและจำลองแสงธรรมชาติควบคู่กัน ตั้งแต่การออกแบบร่างขั้นต้น

4) การลดความร้อนที่ผ่านเปลือกอาคาร คุณภาพของเปลือกอาคารมีผลโดยตรงต่อภาระความร้อนของระบบปรับอากาศ ประเทศไทยมีกฎหมายอนุรักษ์พลังงานที่กำหนดเกณฑ์มาตรฐานในการออกแบบเปลือกอาคาร ดังนั้น สถาปนิกจึงควรเข้าใจวิธีการออกแบบเปลือกอาคารให้สอดคล้องกับกฎหมาย

5) การลดแหล่งความร้อนในอาคาร ความร้อนในอาคารเกิดจาก คน อุปกรณ์ และหลอดไฟ ความร้อนจากคนนั้นคงไม่สามารถแก้ไขด้วยการลดจำนวน แต่ความร้อนจากอุปกรณ์อาจลดได้โดยการแยกอุปกรณ์ที่ปลดปล่อยความร้อนและความชื้นที่ไม่จำเป็นออกไปนอกห้องปรับอากาศ เช่น ตู้เย็น เครื่องชงกาแฟ เป็นต้น ส่วนความร้อนจากหลอดไฟ สามารถลดได้โดยการใช้หลอดไฟที่มีการปลดปล่อยความร้อนต่ำ เช่น หลอดไฟ LED แทนหลอดไฟ Halogen เป็นต้น

6) การลดความร้อนจากการระบายอากาศ การระบายอากาศเป็นสิ่งที่สำคัญมากสำหรับอาคารปรับอากาศ ซึ่งต้องมีการนำอากาศภายนอกมาเติม ในปริมาณเท่าที่กฎหมายกำหนดหรือมากกว่าเพื่อคุณภาพอากาศที่ดี ประเทศไทยมีสภาพอากาศร้อนและมีความชื้นสูง อากาศภายนอกจึงเป็นภาระความร้อนให้ระบบปรับอากาศในปริมาณที่สูง การออกแบบสามารถประหยัดพลังงานได้โดยการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Recovery Ventilator) (รูปที่ 8-3) ระหว่างอากาศบริสุทธิ์ภายนอกที่นำเข้ามา กับอากาศเสียที่นำออกไปทิ้ง ซึ่งยังมีความเย็น ทำให้อุณหภูมิของอากาศภายนอกที่นำเข้ามาเติมลดลง เป็นการลดโหลดของระบบปรับอากาศ



รูปที่ 8-3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Recovery Ventilator)

(ที่มา: <https://www.gzjixing-tech.com/products/heat-recovery-ventilator>)

8.4 เกณฑ์การออกแบบเปลือกอาคารตามกฎหมายอนุรักษ์พลังงาน

กฎหมายอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเปลือกอาคารที่ใช้ในปัจจุบัน คือ กฎกระทรวง กำหนดประเภท หรือ ขนาดอาคาร และมาตรฐาน หลักเกณฑ์ และวิธีการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552

ในกฎหมายฉบับนี้ ได้กำหนดเกณฑ์ค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคาร สำหรับอาคาร 9 ประเภท ที่มีพื้นที่รวมกันทุกชั้นในอาคารเดียวกัน ตั้งแต่ 2,000 ตร.ม. ขึ้นไป

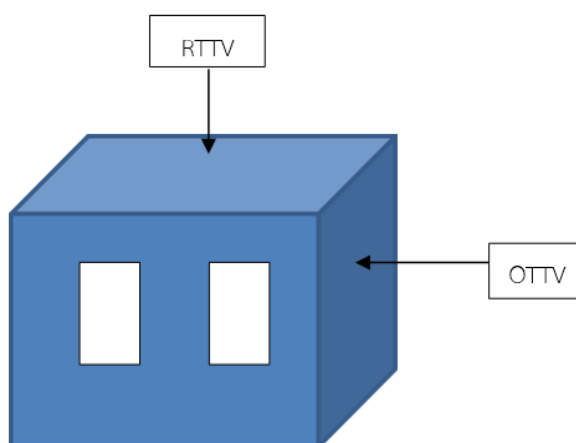
อาคารทั้ง 9 ประเภท ได้แก่

- 1) สำนักงาน
- 2) สถานศึกษา
- 3) ห้างสรรพสินค้า หรือ ศูนย์การค้า
- 4) โรงแรม
- 5) สถานบริการ ตามกฎหมายว่าด้วยสถานบริการ
- 6) อาคารชุมนุมคน ตามกฎหมายว่าด้วยอาคารชุมนุมคน
- 7) สถานพยาบาล ตามกฎหมายว่าด้วยสถานพยาบาล
- 8) โรงแรม ตามกฎหมายว่าด้วยโรงแรม
- 9) อาคารชุด ตามกฎหมายว่าด้วยอาคารชุด

กฎหมายฯ ได้กำหนดค่าการถ่ายเทความร้อนรวมผ่านเปลือกอาคารในเฉพาะส่วนที่มีการปรับอากาศ โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ (รูปที่ 8-4)

1) ความร้อนที่ผ่านผนังภายนอก เรียกว่า OTTV ย่อมาจาก Overall Thermal Transfer Value

2) ความร้อนที่ผ่านหลังคา เรียกว่า RTTV ย่อมาจาก Roof Thermal Transfer Value



รูปที่ 8-4 ส่วนประกอบของเปลือกอาคาร

เกณฑ์ค่า OTTV และ RTTV ในการออกแบบ

เกณฑ์ของค่า OTTV และ RTTV ในการออกแบบจะไม่เท่ากันในแต่ละประเภทอาคาร โดยแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ตามช่วงเวลาการใช้งาน คือ

กลุ่มที่ 1 สถานศึกษา และสำนักงาน เป็นอาคารที่ใช้งานในเวลากลางวัน วันละ 9 ชั่วโมง หรือ ใช้พลังงาน 2,340 ชั่วโมง/ปี (9 ชั่วโมง x 260 วัน)

กลุ่มที่ 2 ห้างสรรพสินค้า โรงแรม โรงมหรสพ สถานบริการ และอาคารชุมนุมคน เป็นอาคารที่ใช้งานในช่วงกลางวันและกลางคืน วันละ 12 ชั่วโมง หรือ 4,380 ชั่วโมง/ปี (12 ชั่วโมง x 365 วัน)

กลุ่มที่ 3 โรงแรม สถานพยาบาล และ อาคารชุด เป็นอาคารที่ใช้งาน 24 ชั่วโมง หรือ 8,760 ชั่วโมง/ปี (24 ชั่วโมง x 365 วัน)

ตารางที่ 8-1 ค่า OTTV และ RTTV ของอาคารแต่ละประเภท

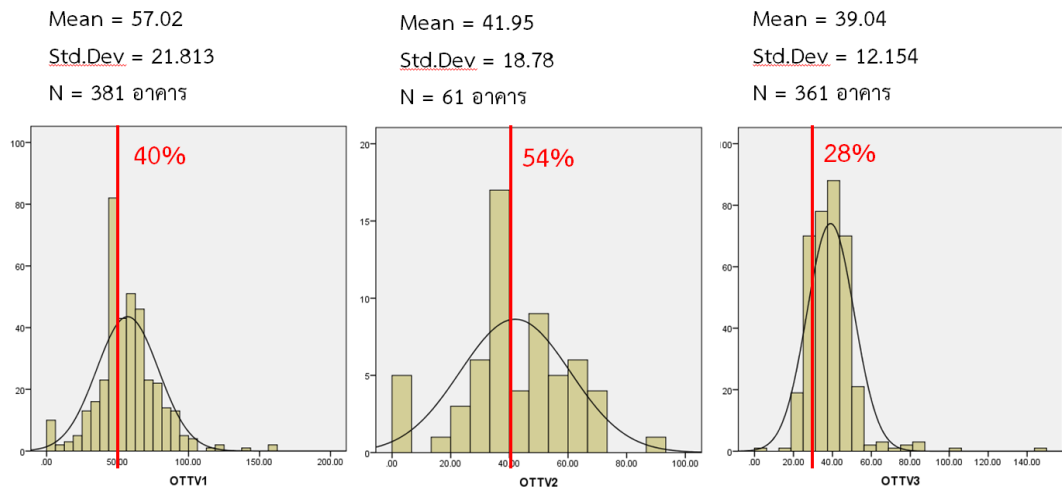
ประเภทอาคาร	OTTV (วัตต์/ตร.ม.)	RTTV (วัตต์/ตร.ม.)
สำนักงาน สถานศึกษา	≤ 50	≤ 15
ห้างสรรพสินค้า โรงแรม สถานบริการ อาคารชุมนุมคน	≤ 40	≤ 12
โรงแรม สถานพยาบาล อาคารชุด	≤ 30	≤ 10

จากผลการศึกษา ของศูนย์ประสานงานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน หน่วยงานของกระทรวงพลังงาน ที่ได้ทำการตรวจประเมินแบบของอาคารจริง ตั้งแต่ พ.ศ. 2552 - 2562 จำนวน 803 อาคาร เพื่อหาค่า OTTV และ RTTV ของอาคารทั้ง 3 กลุ่ม พบว่า อาคารจำนวนมากยังไม่สามารถออกแบบให้ผ่านตามเกณฑ์ของกฎหมายได้

โดยในกลุ่มที่ 1 จำนวน 381 อาคาร สามารถผ่านเกณฑ์ได้เพียง 40% กลุ่มที่ 2 จำนวน 61 อาคาร ผ่าน 54% และกลุ่มที่ 3 จำนวน 361 อาคาร ผ่านเพียง 28% ทั้งนี้ จากตัวเลขดังกล่าวอาจสะท้อนให้เห็นว่าการออกแบบผนังอาคารให้สอดคล้องกับกฎหมาย ยังไม่สามารถทำได้ดีพอ (รูปที่ 8-5) ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า เกิดจากความไม่เข้าใจในแนวทางการออกแบบให้สอดคล้องกับกฎหมาย

ส่วนการออกแบบหลังคา พบว่า สามารถผ่านเกณฑ์ได้ประมาณ 71-79% (รูปที่ 8-6) ดังนั้น ทางกระทรวงพลังงานจึงได้มีการศึกษาเพื่อพิจารณาปรับลดค่า RTTV เพื่อให้เกณฑ์มาตรฐานมีความเข้มข้นมากขึ้น

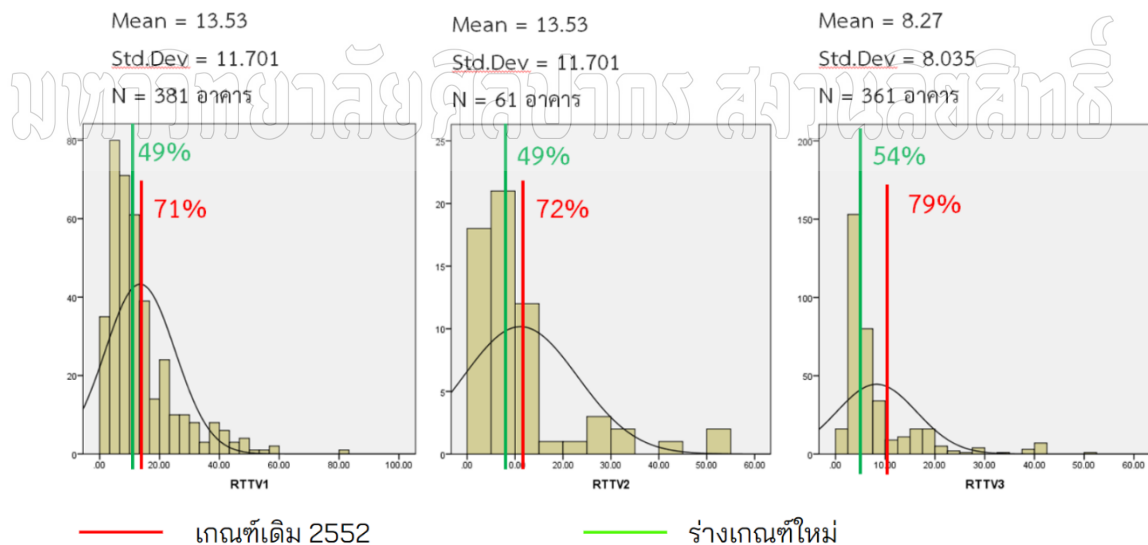
การกระจายตัวของค่า OTTV



รูปที่ 8-5 ร้อยละของอาคารที่สามารถออกแบบผ่านเกณฑ์ OTTV

(ที่มา: ศูนย์ประสานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน)

การกระจายตัวของค่า RTTV



รูปที่ 8-6 ร้อยละของอาคารที่สามารถผ่านเกณฑ์ RTTV

(ที่มา: ศูนย์ประสานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน)

8.5 วิธีการคำนวณค่า OTTV

กระทรวงพลังงาน ได้จัดทำประกาศ เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการคำนวณในการออกแบบอาคารแต่ละระบบ การใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร และการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่าง ๆ ของอาคาร พ.ศ. 2552 โดยได้กำหนดวิธีการ และสมการในการคำนวณ ค่า OTTV ดังนี้

ขั้นที่ 1 การหาค่า OTTV ของผนังแต่ละด้าน ใช้สมการ ดังนี้

$$OTTV_i = (U_w)(1-WWR)(TD_{eq}) + (U_f)(WWR)(\Delta T) + (WWR)(SHGC)(SC)(ESR)$$

เมื่อ $OTTV_i$ คือ	ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกที่พิจารณา มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)
U_w คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังทึบ มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร-องศาเซลเซียส ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$)
WWR คือ	อัตราส่วนพื้นที่ของหน้าต่างโปร่งแสง และ/หรือ ของผนังโปร่งแสง ต่อพื้นที่ทั้งหมดของผนังด้านที่พิจารณา
TD_{eq} คือ	ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (Equivalent Temperature Difference) ระหว่างภายนอกและภายในอาคารซึ่งรวมถึง ผลการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของผนังทึบ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ($^\circ C$)
U_f คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังโปร่งแสง หรือ กระจก มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร-องศาเซลเซียส ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$)
ΔT คือ	ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคาร มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ($^\circ C$)
$SHGC$ คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านผนังโปร่งแสง หรือ กระจก
SC คือ	สัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดด
ESR คือ	ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังโปร่งแสง และ/หรือ ผนังทึบ มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)

ขั้นที่ 2 ให้นำค่า OTTV ที่คำนวณได้ของแต่ละด้าน มาถ่วงน้ำหนักกับพื้นที่ของแต่ละด้านเพื่อหาค่า OTTV เฉลี่ย โดยใช้สมการ ดังนี้

$$OTTV = \frac{(A_{w1})(OTTV_1)(A_{w2})(OTTV_2) + \dots + (A_{wi})(OTTV_i)}{A_{w1} + A_{w2} + \dots + A_{wi}}$$

เมื่อ A_{wi} คือ	พื้นที่ของผนังด้านที่พิจารณาซึ่งรวมพื้นที่ผนังทึบและพื้นที่หน้าต่าง หรือ ผนังโปร่งแสง มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)
$OTTV_i$ คือ	ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกที่พิจารณา มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)

8.6 วิธีการคำนวณค่า RTTV

การคำนวณค่า RTTV จะมีหลักเกณฑ์ที่คล้ายกับการคำนวณค่า OTTV คือ การหาความร้อนที่ถ่ายเทผ่านหลังคาแต่ละชั้น (RTTV_i) เช่น ในกรณีของหลังคาทรงจั่ว จะประกอบด้วยหลังคา 2 ด้าน และหลังคาทรงปั้นหยา จะประกอบด้วยหลังคา 4 ด้าน ซึ่งมีการลาดเอียงหลังคาไปในแต่ละทิศที่ต่างกัน จากนั้นนำค่า RTTV ของแต่ละด้าน มาคูณถ่วงน้ำหนักด้วยพื้นที่ของหลังคาแต่ละชั้น เป็นค่า RTTV เฉลี่ย โดยการใช้สมการ ดังนี้

$$RTTV_i = (U_r)(1-SRR)(TD_{eq}) + (U_s)(SRR)(\Delta T) + (SRR)(SHGC)(SC)(ESR)$$

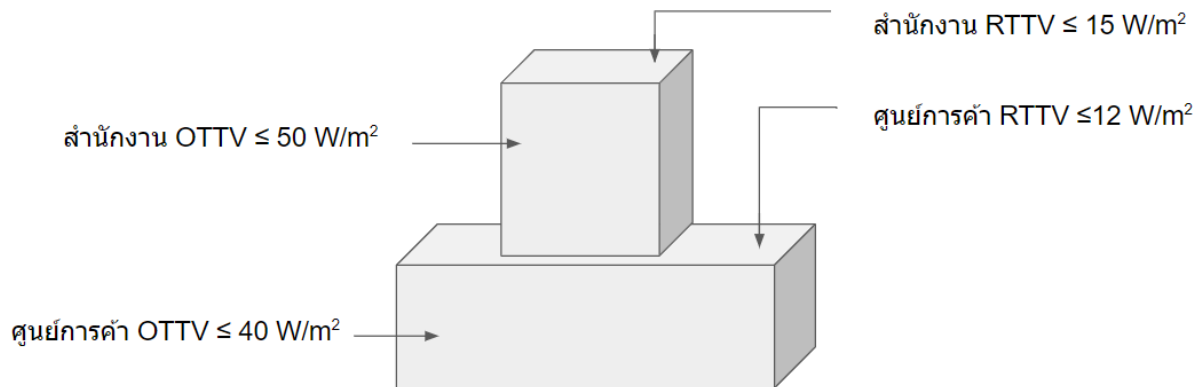
เมื่อ	RTTV _i	คือ	ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารส่วนที่พิจารณา มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m ²)
	U _r	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาทึบ มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร-องศาเซลเซียส (W/(m ² ·°C))
	SRR	คือ	อัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาโปร่งแสงต่อพื้นที่ทั้งหมดของหลังคาส่วนที่พิจารณา
	TD _{eq}	คือ	ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (Equivalent Temperature Difference) ระหว่างภายนอกและภายในของหลังคาซึ่งรวมถึงผลการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของหลังคา มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส (°C)
	U _s	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาโปร่งแสง มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร-องศาเซลเซียส (W/(m ² ·°C))
	ΔT	คือ	ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกหลังคา มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส (°C)
	SHGC	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านหลังคาโปร่งแสง
	SC	คือ	สัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดด
	ESR	คือ	ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาโปร่งแสง และ/หรือ หลังคาทึบแสง มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m ²)

$$RTTV = \frac{(A_{w1})(RTTV_1) + (A_{w2})(RTTV_2) + \dots + (A_{wi})(RTTV_i)}{A_{w1} + A_{w2} + \dots + A_{wi}}$$

เมื่อ	A _{wi}	คือ	พื้นที่ของหลังคาส่วนที่พิจารณา ซึ่งรวมพื้นที่หลังคาทึบ และพื้นที่หลังคาโปร่งแสง มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m ²)
	RTTV _i	คือ	ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาแต่ละส่วนมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m ²)

8.7 การคำนวณค่า OTTV และ RTTV ของอาคารที่มีการใช้สอยหลายประเภท

ในกรณีที่อาคารในหลังเดียวกัน มีการใช้สอยมากกว่า 1 ประเภท (Mixed Use Building) เช่น ชั้นล่างเป็นศูนย์การค้า ชั้นบนเป็นสำนักงาน การประเมินค่า OTTV และ RTTV ให้ใช้เกณฑ์ตรงตามกลุ่มของอาคารที่ออกแบบ โดยไม่ต้องนำค่า OTTV ของอาคารต่างกลุ่มกันมาคิดเป็นค่า OTTV เฉลี่ย ดังในรูปที่ 8-7 ให้คำนวณค่า OTTV และ RTTV ของอาคารส่วนที่เป็นศูนย์การค้า และคำนวณค่า OTTV และ RTTV ของอาคารส่วนสำนักงาน



รูปที่ 8-7 การคิด OTTV และ RTTV ของอาคารที่มีการใช้สอยหลายประเภท

8.8 การคำนวณค่า OTTV และ RTTV โดยใช้โปรแกรม BEC

แม้ว่าการคำนวณค่า OTTV และ RTTV จะสามารถทำได้โดยใช้เครื่องคิดเลข หรือ โปรแกรม Excel (กรณีที่ไม่มีอุปกรณ์บังคับ) แต่ในการคำนวณเพื่อการยื่นขออนุญาตก่อสร้างอาคาร จะต้องดำเนินงานโดยใช้โปรแกรม BEC (Building Energy Code) ของกระทรวงพลังงาน โดยโปรแกรมจะสรุปผลเปรียบเทียบกับเกณฑ์ว่าสามารถผ่านเกณฑ์ระบบเปลือกอาคารหรือไม่ หรือ ผ่านเกณฑ์ตามกฎหมายโดยวิธีพิจารณาค่าการใช้พลังงานรวมของอาคารที่ออกแบบ โดยมีค่าการใช้พลังงานรวมต่อปี ต่ำกว่าอาคารอ้างอิง (Reference Building) อาคารอ้างอิง คือ อาคารที่มีพื้นที่การใช้งาน ทิศทาง และพื้นที่ที่รอบอาคารแต่ละด้านเช่นเดียวกับอาคารที่ออกแบบ โดยมีค่า OTTV, RTTV ค่าประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าแสงสว่าง และประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศ เป็นไปตามข้อกำหนดตามกฎหมายของแต่ละระบบ ในส่วนของเปลือกอาคาร นอกจากค่า OTTV เฉลี่ยของทั้งอาคารแล้ว โปรแกรมยังแสดงค่า OTTV และ RTTV ของผนังย่อยในแต่ละทิศให้ทราบด้วย ผู้ออกแบบสามารถดาวน์โหลดโปรแกรม BEC ได้จาก website ของศูนย์ประสานงานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน หรือ <http://www.2e-building.com>



รูปที่ 8-8 โปรแกรม BEC v.1.0.6 ที่ใช้ในการคำนวณหาค่า OTTV และ RTTV

8.9 ตัวแปรในสมการ OTTV

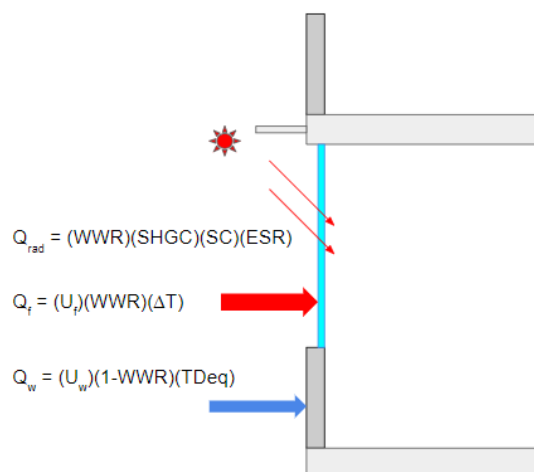
ในสมการของ OTTV จะประกอบด้วยความร้อน 3 ส่วนที่ถ่ายเทผ่านผนัง (รูปที่ 8-9) ได้แก่

- 1) ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผนังทึบ โดยการนำความร้อน (Conduction Heat Gain, Q_w)
- 2) ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผนังโปร่งแสง โดยการนำความร้อน (Conduction Heat Gain, Q_f)

$$Q_f = (U_f)(WWR)(\Delta T)$$

- 3) ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผนังโปร่งแสง โดยการแผ่รังสี (Radiation Heat Gain, Q_{rad})

$$Q_{rad} = (WWR)(SHGC)(SC)(ESR)$$



รูปที่ 8-9 องค์ประกอบของความร้อน 3 ส่วนที่ผ่านผนังอาคาร

(1) ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผนังทึบโดยการนำความร้อน

ในสถานะที่ผนังอาคารไม่ได้รับแดด สมการของการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน คือ

$$Q = U \times A \times \Delta T$$

Q = ปริมาณความร้อน (W)

U = สัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนรวม คำนวณการถ่ายเทจากอากาศภายนอก
ถึงอากาศภายใน (Air to Air Thermal Transmittance) ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)

A = พื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อน (m^2)

ΔT = ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกและอากาศภายใน ($^\circ\text{C}$)

ในสถานะที่ผนังอาคารได้รับแดด ผนังจะดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ทำให้อุณหภูมิที่ผนังสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิอากาศ ดังนั้นความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกและอากาศภายใน สมการจึงได้รวมผลของการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่ผนังไว้ด้วย จึงเป็นค่าความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศภายนอกและอากาศภายในเทียบเท่า (Equivalent Temperature Difference, TD_{eq})

ดังนั้น ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผนังทึบเมื่อได้รับรังสีอาทิตย์จึงเป็น

$$Q_w = (U_w)(1-WWR)(TD_{eq})$$

การหาค่า U_w

U_w คือ สัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังทึบ มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร-องศาเซลเซียส ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) เป็นอัตราค่าไหลของความร้อนผ่านพื้นที่ผนังซึ่งมีความหนาตามที่ต้องการ โดยมีความเป็นส่วนกลับของค่าความต้านทานความร้อนรวมของผนังนั้น (Total Thermal Resistance, R_T)

$$U = \frac{1}{R_T}$$

R_T = ค่าความต้านทานความร้อนรวมของผนังอาคาร

มีหน่วยเป็น ตารางเมตร-องศาเซลเซียสต่อวัตต์ ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$)

ค่า R_T หรือ ค่าความต้านทานความร้อนรวมของผนัง มีหน่วยเป็น ตารางเมตร-องศาเซลเซียสต่อวัตต์ ซึ่งรวมความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศที่อยู่ติดกับผนังด้านนอก ความต้านทานความร้อนของวัสดุผนังทุกชั้นในทิศทางที่ความร้อนไหลผ่าน และ ความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศที่อยู่ติดกับผนังด้านใน

$$R_T = R_0 + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_i$$

- R_0 = ความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศด้านนอก ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)
 R = ค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุแต่ละชั้นของผนัง ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)
 R_i = ความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศด้านใน ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)

ค่า R_0 และ ค่า R_i ตามประกาศหลักเกณฑ์การคำนวณฯ ของกระทรวงพลังงาน กำหนดให้ใช้ค่าตามตารางที่ 8-2 ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศ จะขึ้นกับการเคลื่อนไหวของฟิล์มอากาศซึ่งเป็นผลจากความเร็วลม ดังนั้น จะสังเกตเห็นว่า ค่าฟิล์มอากาศภายในอาคารจะสูงกว่าภายนอกอาคาร เพราะภายในอาคารเป็นอากาศนิ่งไม่มีลม และนอกจากนี้ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศยังขึ้นอยู่กับความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนของผิววัสดุ ซึ่งเรียกคุณสมบัตินี้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ในการแผ่รังสี (Emissivity, ϵ)

ค่าสัมประสิทธิ์ในการแผ่รังสีของวัสดุ คือ ความสามารถในการแผ่รังสีหรือคายความร้อนออกจากผิวหน้าของวัตถุนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดำ (Black Body) มีค่าตั้งแต่ 0-1 โดยอาจแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

- 1) วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ในการแผ่รังสีสูง ได้แก่ วัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้ในการก่อสร้างผนัง เช่น อิฐ คอนกรีต หิน ไม้ กระฉก เป็นต้น
- 2) วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ในการแผ่รังสีต่ำ ได้แก่ วัสดุประเภทโลหะที่มีผิวมันเงา เช่น อะลูมิเนียมพอยล์ สแตนเลสทำผิวมันเงา เป็นต้น

ตารางที่ 8-2 ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศสำหรับผนังอาคาร

ชนิดของผิววัสดุที่ใช้ทำผนัง	ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศ ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)	
	ที่ผิวผนังด้านใน (R_i)	ที่ผิวผนังด้านนอก (R_o)
กรณีที่พื้นผิวผนังมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีสูง	0.120	0.044
กรณีที่พื้นผิวผนังมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำ	0.299	

ค่า R หรือ ความต้านทานความร้อนของวัสดุแต่ละชั้นในผนัง มีหน่วยเป็น ตารางเมตร-องศาเซลเซียสต่อวัตต์ ($m^2 \cdot ^\circ C/W$) สามารถหาได้โดยการนำความหนาของวัสดุแต่ละชั้น ตามที่ออกแบบ (Δx) (หน่วยเป็นเมตร) มาหารด้วย ค่า k (ตารางที่ 8-3)

$$R = \frac{\Delta x}{k}$$

R คือ ค่าความต้านทานความร้อน มีหน่วยเป็นตารางเมตร - องศาเซลเซียสต่อวัตต์
 $(m^2 \cdot ^\circ C/W)$

Δx คือ ความหนาของวัสดุ มีหน่วยเป็นเมตร (m)

k คือ สัมประสิทธิ์ในการนำความร้อนของวัสดุแต่ละชนิด มีหน่วยเป็น
วัตต์ต่อเมตร - องศาเซลเซียส (W/m.°C)

ตัวอย่าง - ให้คำนวณค่า R_T และ U ของคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 700 กก./ลบ.ม. หนา 10 ซม. ฉาบปูน
คอนกรีตมวลเบาด้านละ 1 ซม.

ชั้นวัสดุ	k	Δx	$R = \Delta x/k$
R_o			0.044
R ปูนฉาบคอนกรีตมวลเบา	0.326	0.01	0.031
R คอนกรีตมวลเบา (700 กก./ลบ.ม.)	0.21	0.1	0.476
R ปูนฉาบคอนกรีตมวลเบา	0.326	0.01	0.031
R_i			0.120
$R_T =$			0.627
$U =$			1.595

ตารางที่ 8-3 ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ในการนำความร้อนของวัสดุ (k) ค่าความหนาแน่น (ρ) (อ่านว่า โร)
และค่าความจุความร้อนจำเพาะ (C_p) (ดูเพิ่มเติมในประกาศฯ กระทรวงพลังงาน)

ลำดับ	วัสดุ	k (W/m.°C)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/(kg.°C))
4	คอนกรีตมวลเบา ความหนาแน่นต่าง ๆ			
	(ก) 620 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร	0.180	620	0.84
	(ข) 700 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร	0.210	700	0.84
	(ค) 960 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร	0.303	960	0.84
	(ง) 1,120 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร	0.346	1120	0.84
	(จ) 1,280 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร	0.476	1280	0.84
	(ฉ) ปูนฉาบสำหรับคอนกรีตมวลเบา	0.326	1200	0.84

ช่องว่างอากาศ - ในกรณีที่มีช่องว่างอากาศระหว่างผนัง 2 ชั้น ให้คิด ค่าความต้านทานของช่องว่างอากาศ (R_a) เป็นส่วนหนึ่งของความต้านทานความร้อนรวม โดยค่า R_a จะขึ้นกับความกว้างของช่องว่างอากาศ (ตารางที่ 8-4) ถ้าความกว้างอยู่ในช่วงระหว่าง 5-20 มม. หรือ 20-100 มม. ให้ใช้วิธีประมาณค่าในช่วงที่ต้องการด้วยวิธีเชิงเส้นตรง (Linear Interpolation) แต่ถ้าช่องว่างอากาศ > 100 มม. ให้ใช้ค่าเท่ากับ R_a ที่ 100 มม.

นอกจากนี้ค่า R_a ยังขึ้นกับชนิดของผิวผนังภายในช่องว่างด้วย ว่าเป็นผิวที่มีค่าสัมประสิทธิ์ในการแผ่รังสีสูงหรือต่ำ ถ้ามีผิวอะลูมิเนียมพอยล์ในช่องอากาศ ให้เลือกผิวผนังที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำ ส่วนวัสดุทั่วไปจะเป็นผิวที่มีค่าสัมประสิทธิ์ในการแผ่รังสีสูง ตามตารางที่ 8-4

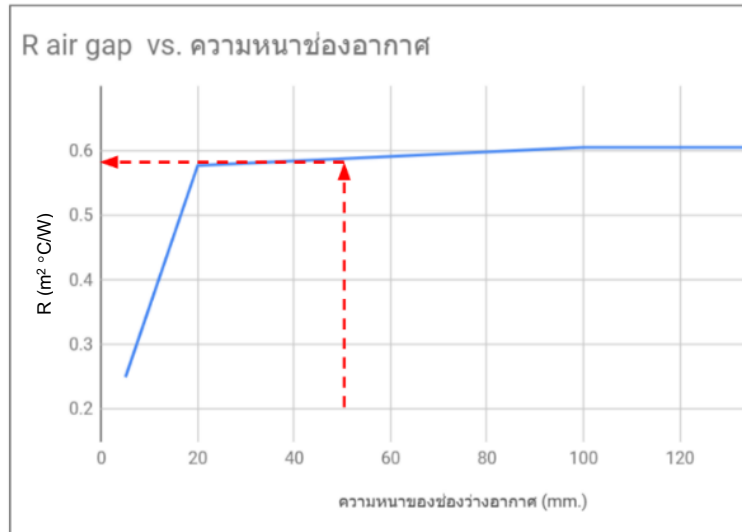
ตารางที่ 8-4 ค่าความต้านทานความร้อนของช่องว่างอากาศที่อยู่ภายในผนังอาคาร

ชนิดของผิววัสดุที่ใช้ทำผนังด้านในช่องว่างอากาศ	ค่าความต้านทานความร้อนของช่องว่างอากาศตามความหนาของช่องว่างอากาศ ($(m^2 \cdot ^\circ C)/W$)		
	5 มิลลิเมตร	20 มิลลิเมตร	100 มิลลิเมตร
กรณีที่พื้นผิวผนังมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีสูง	0.110	0.148	0.160
กรณีที่พื้นผิวผนังมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำ	0.250	0.578	0.606

$$R_T = R_o + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + R_a + \dots + \frac{\Delta x_n}{k_n} + R_i$$

เมื่อ R_T	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนรวมของผนังอาคาร มีหน่วยเป็นตารางเมตร - องศาเซลเซียสต่อวัตต์ ($(m^2 \cdot ^\circ C)/W$)
R_o	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายนอกอาคาร มีหน่วยเป็นตารางเมตร - องศาเซลเซียสต่อวัตต์ ($(m^2 \cdot ^\circ C)/W$)
R_a	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนของช่องว่างอากาศภายในผนังอาคาร มีหน่วยเป็นตารางเมตร - องศาเซลเซียสต่อวัตต์ ($(m^2 \cdot ^\circ C)/W$)
R_i	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายในอาคาร มีหน่วยเป็นตารางเมตร - องศาเซลเซียสต่อวัตต์ ($(m^2 \cdot ^\circ C)/W$)
$\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \dots, \Delta x_n$	คือ	ค่าความหนาของวัสดุแต่ละชนิดที่ประกอบเป็นผนังอาคาร มีหน่วยเป็นเมตร (m)
$k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$	คือ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุแต่ละชนิดที่ประกอบเป็นผนังอาคาร

ตัวอย่าง ให้หา ค่า R ของช่องว่างอากาศขนาด 50 มม. ที่มีผิวอะลูมิเนียมพอยล์ภายในช่องว่าง (รูปที่ 8-10)



รูปที่ 8-10 ค่า R ของช่องว่างอากาศที่มีผิวด้านในแผ่รังสีต่ำที่ระดับความหนาต่าง ๆ

ช่องว่างอากาศ 20 มม. มีค่า $R = 0.578 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$

ช่องว่างอากาศ 100 มม. มีค่า $R = 0.606 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$

ช่องว่างอากาศต่างกัน $(100-20) = 80$ มม. มีค่า R ต่างกัน $= 0.606 - 0.578 = 0.028 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$

ช่องว่างอากาศต่างกัน $(50-20) = 30$ มม. มีค่า R ต่างกัน $= (0.028/80) \times 30 = 0.006 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$

ดังนั้น ช่องว่างอากาศ 50 มม. มีค่า $R = 0.578 + 0.006 = 0.584 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$

การหาค่า TD_{eq}

ค่า TD_{eq} สามารถหาได้โดยการอ่านจากตาราง ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเทียบเท่า ในประกาศหลักเกณฑ์และวิธีคำนวณฯ ซึ่งแยกตามประเภทอาคาร ในการอ่านค่า TD_{eq} จำเป็นต้องทราบค่าที่เกี่ยวข้องได้แก่

1) มุมเอียงของผนัง (วัดมุมระหว่างพื้นราบด้านในอาคารกับผนัง) สำหรับผนังทั่วไปซึ่งอยู่ในแนวตั้งจะเป็นมุมฉาก $= 90^\circ$

2) ทิศทางของผนัง

3) ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ซึ่งเรียกว่า ค่า α (ค่าแอลฟา) จะขึ้นอยู่กับสีของวัสดุผนังว่าเป็นสีอ่อนหรือเข้ม โดยแบ่ง ค่า α เป็น 4 ระดับ คือ 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 (ตารางที่ 8-5)

4) ค่าผลคูณความหนาแน่นและความร้อนจำเพาะ (Density Specific Heat Product, DSH) มีหน่วยเป็น กิโลจูลต่อตารางเมตร-องศาเซลเซียส

ค่า DSH สามารถหาได้โดยการนำ ความหนาแน่น (ρ) คูณกับความจุความร้อนจำเพาะ (C_{pi}) และคูณกับ ความหนา (Δx) ของวัสดุผนังแต่ละชั้น จากนั้น นำ DSH ของทุกชั้นวัสดุผนังมาบวกรวมกัน (เช่น $DSH_{ปูนฉาบ} + DSH_{อิฐมวลเบา} + DSH_{ปูนฉาบ}$) โดยในกรณีที่มีช่องว่างอากาศให้คิด DSH ของช่องอากาศมีค่า เท่ากับ 0

$$DSH_i = (\rho_i)(C_{pi})(\Delta x_i)$$

$$DSH = DSH_1 + DSH_2 + \dots + DSH_i$$

เมื่อ DSH_i	คือ	ผลคูณของความหนาแน่นและความร้อนจำเพาะของวัสดุ i มีหน่วยเป็นกิโลจูลต่อตารางเมตร - องศาเซลเซียส ($\text{kJ/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)
ρ_i	คือ	ความหนาแน่นของวัสดุ i มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)
C_{pi}	คือ	ความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ i มีหน่วยเป็น กิโลจูลต่อกิโลกรัมองศาเซลเซียส ($\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)
Δx_i	คือ	ความหนาของวัสดุ i มีหน่วยเป็นเมตร (m)

ตารางที่ 8-5 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของวัสดุผนังและสีภายนอกของผนังชนิดต่าง ๆ
ที่ใช้ประกอบการหาค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า

พื้นผิวของผนังภายนอกอาคาร	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์	หมายเหตุ
วัสดุที่ใช้ฉาบหรือปิดผิว แผ่นสะท้อนแสงทำด้วยอะลูมิเนียม หินอ่อนสีขาว กรวดล้างสีขาว สีทาภายนอก สีขาว, สีเงิน, สีเงินหรือสีบรอนซ์สะท้อนแสง	0.3	วัสดุที่มีผิวสะท้อนแสงและวัสดุที่มีผิวขาว
วัสดุที่ใช้ฉาบ หรือ ปิดผิว หินอ่อนสีครีมหรือสีอ่อน หินแกรนิตสีครีมหรือสีอ่อน กรวดล้างสีครีมหรือสีอ่อน วัสดุปิดผิวสีอ่อน สีทาภายนอก สีครีม, สีฟ้าอ่อน, สีเขียวอ่อน, สีเหลืองอ่อน, สีส้มอ่อน	0.5	วัสดุที่มีผิวสีอ่อน
วัสดุที่ใช้ฉาบหรือปิดผิว คอนกรีตไม่ทาสี อิฐไม่ทาสี แผ่นไฟเบอร์ไม่ทาสี กรวดล้างสีเทา แผ่นซีเมนต์แอสเบสตอสไม่ทาสี สีทาภายนอก สีแดง, สีฟ้า, สีเขียว, สีส้ม, สีสนิม (Rustic)	0.7	วัสดุที่มีผิวสีค่อนข้างเข้ม
วัสดุที่ใช้ฉาบหรือปิดผิว อิฐสีแดง แอสฟัลต์ คอนกรีตสีเทาเข้มและสีดำ วัสดุผนังหลังคาสีเขียวเข้มและสีแดงเข้ม สีทาภายนอก สีน้ำเงินหรือสีเขียวเข้ม, สีเทาเข้ม, สีน้ำตาลเข้ม, สีดำ	0.9	วัสดุที่มีผิวสีเข้ม

การอ่านค่า T_{Deq} จากตาราง (ตารางที่ 8-6) ให้เริ่มจากเลือกมุมเอียงของผนัง -> เลือกทิศทางของผนัง -> เลือกค่า DSH จากนั้นอ่านค่าอุณหภูมิ ในช่องที่ตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของผนัง

ในกรณีที่ไม่สามารถอ่านค่า DSH ได้ตรงพอดีกับค่าที่ระบุในตาราง จะต้องใช้วิธีประมาณการเชิงเส้น (Interpolate) จากช่วงของ ค่า DSH ที่ใกล้เคียง

ตัวอย่าง - การ Interpolate ค่า T_{Deq}

อาคารประเภทสถานศึกษา ผนังมีมุมเอียง = 90° ผนังอยู่ทิศตะวันออก

ค่า DSH = $100 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ค่า $\alpha = 0.5$ อ่านค่า T_{Deq} จากตารางได้ 15.5°C

ค่า DSH = $200 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ค่า $\alpha = 0.5$ อ่านค่า T_{Deq} จากตารางได้ 13.9°C

ต้องการหา T_{Deq} ของ ผนังที่มีค่า DSH = $125 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$

DSH = $100 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ $T_{Deq} = 15.5^{\circ}\text{C}$

DSH = $125 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ $T_{Deq} = \dots? \dots^{\circ}\text{C}$

DSH = $200 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ $T_{Deq} = 13.9^{\circ}\text{C}$

ในช่วง DSH (100-200) = 100 ช่วง $T_{Deq} = (15.5-13.9) = 1.6^{\circ}\text{C}$

ในช่วง DSH (100-125) = -25 ช่วง $T_{Deq} = (1.6 / 100)(-25) = -0.4^{\circ}\text{C}$

ดังนั้น ถ้า DSH = $125 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ จะได้ค่า $T_{Deq} = 15.5-0.4 = 15.1^{\circ}\text{C}$

แต่ในกรณีที่ทำงานจริง โดยการใช้โปรแกรม BEC โปรแกรมจะคำนวณค่า T_{Deq} ให้ การอธิบายข้างต้น เพื่อให้เข้าใจหลักการคำนวณ

ตารางที่ 8-6 ตัวอย่างตารางหาค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเทียบเท่า

มุมเอียงของผนัง, องศา	ทิศทาง	DHS ($\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์			
			0.3	0.5	0.7	0.9
90	ทิศตะวันออก	15	12.6	17.2	21.9	26.5
		30	12.3	16.9	21.5	26.1
		50	11.9	16.5	21.1	25.6
		100	11.1	15.5	20.0	24.4
		200	7.8	13.9	18.0	22.2
		300	9.0	12.8	16.6	20.4
		400	8.6	12.2	15.8	19.4

การหาพื้นที่ผนังทึบ พื้นที่ผนังทึบแทนด้วยค่า (1-WWR) โดยการกำหนดให้พื้นที่ทั้งหมดของผนังในแต่ละด้านมีสัดส่วนเท่ากับ 1 และให้นำสัดส่วนของพื้นที่หน้าต่างในแต่ละด้านมาหักลบ เช่น ผนังทางทิศเหนือมีพื้นที่เท่ากับ 100 ตร.ม. มีหน้าต่าง 30 ตร.ม. ค่า WWR (Window to Wall Ratio) จะเท่ากับ 0.3 ดังนั้น สัดส่วนพื้นที่ผนังทึบ $(1-0.3) = 0.7$

(2) ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านส่วนโปร่งแสงโดยการนำความร้อน

ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านส่วนโปร่งแสงโดยการนำ (Q_f)

$$Q_f = (U_f)(WWR)(\Delta T)$$

การหาค่า U_f หรือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านกระจกชั้นเดียว จะใช้วิธีเดียวกับผนังทึบ คือ

$$U_f = \frac{1}{R_f} \quad \text{และ}$$

$$R_f = R_i + \frac{\Delta x}{k_g} + R_o$$

เมื่อ R_f คือ ค่าความต้านทานความร้อนรวมของกระจก หรือ ผนังโปร่งแสง มีหน่วยเป็น

R_i และ R_o คือ ตารางเมตร - องศาเซลเซียสต่อวัตต์ ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$)
ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายใน และภายนอกอาคาร มีหน่วยเป็น

ตารางเมตร - องศาเซลเซียสต่อวัตต์ ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$)

Δx คือ ความหนาของกระจก หรือ ผนังโปร่งแสง มีหน่วยเป็นเมตร (m)

k_g คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุกระจก หรือ ผนังโปร่งแสง
มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อเมตร - องศาเซลเซียส ($\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$)

ในกรณีที่เป็นกระจก 2 ชั้น ซึ่งเรียกว่า กระจกฉนวน (Insulate Glass Unit, IGU) ต้องนำค่าความต้านทานความร้อนของช่องว่างอากาศระหว่างกระจกมาบวกด้วย ซึ่งหาค่าได้จากตารางในประกาศฯ (ตารางที่ 8-7)

กระจกฉนวนมี 2 แบบคือ กระจกฉนวนธรรมดา และ กระจกฉนวนชนิด Low-E (Low Emissivity) ซึ่งมีผิวด้านใดด้านหนึ่งเคลือบสาร Low-E ทำให้กระจกซึ่งเดิมเป็นวัสดุแผ่รังสีสูง เปลี่ยนคุณสมบัติกลายเป็นวัสดุแผ่รังสีความร้อนต่ำ

ถ้างานออกแบบใช้กระจก 2 ชั้น Low-E ให้เลือกอ่านค่าความต้านทานความร้อนจากช่องพื้นผิวผนังมีค่าสัมประสิทธิ์ในการแผ่รังสีต่ำ ในตารางที่ 8-7 และถ้าใช้กระจก 2 ชั้น ชนิดธรรมดาให้เลือกความต้านทานช่องว่างอากาศจากช่องพื้นผิวผนังมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีสูง โดยถ้าขนาดความหนาของช่องว่างอากาศไม่ตรงพอดีกับค่าในตาราง ให้ Interpolate จากค่าในช่วงที่ใกล้เคียง เช่น ช่องว่างอากาศของกระจก 2 ชั้น Low-E หนา 12 mm ให้ Interpolate ระหว่างความหนา 10 และ 13 mm คือ 0.278 และ 0.345 ได้เท่ากับ $0.345 - [(0.345-0.278)/(13-10)] = 0.032 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ เป็นต้น

ตารางที่ 8-7 ค่าความต้านทานความร้อนของช่องว่างอากาศที่อยู่ระหว่างแผ่นกระจกหรือผนังโปรงแสง

ความหนาของ ช่องว่างอากาศ (mm)	ค่าความต้านทานความร้อนของช่องว่างอากาศ (m ² .°C/W)	
	พื้นผิวผนังมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีสูง	พื้นผิวผนังมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำ
13	0.119	0.345
10	0.110	0.278
7	0.097	0.208
6	0.091	0.196
5	0.084	0.167

นอกจากนี้ยังสามารถนำค่า U ของผู้ผลิตกระจกมาใช้ได้ โดยต้องมีผลทดสอบและการรับรองจากหน่วยงานที่เชื่อถือได้

ค่า ΔT เป็นค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคาร ให้ใช้ค่าตามประกาศฯ ตามตารางที่ 8-8

ตารางที่ 8-8 ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคารสำหรับอาคารแต่ละประเภท

ประเภทอาคาร	ค่าความแตกต่างอุณหภูมิภายใน และภายนอกอาคาร ΔT (°C)
สถานศึกษา สำนักงาน	5
โรงแรมที่พัก ศูนย์การค้า สถานบริการ ห้างสรรพสินค้า อาคารชุมนุมคน	5
โรงแรม สถานพยาบาล อาคารชุด	3

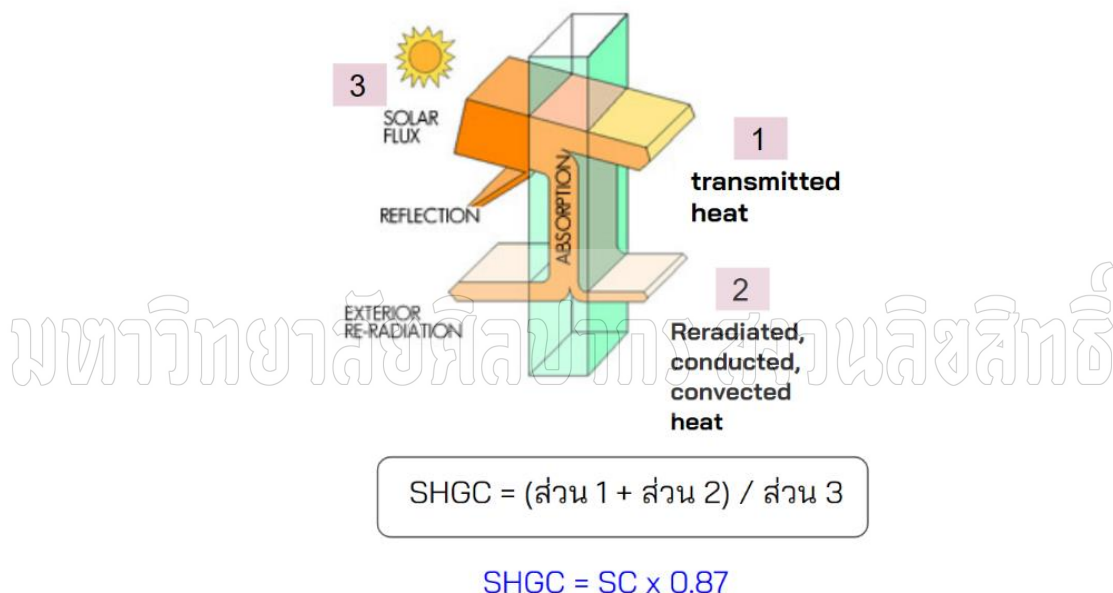
(3) ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านส่วนโปร่งแสงโดยการแผ่รังสี

ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านส่วนโปร่งแสงโดยการแผ่รังสี คำนวณจากสมการ ดังนี้

$$Q_{\text{rad}} = (\text{WWR})(\text{SHGC})(\text{SC})(\text{ESR})$$

ค่า WWR คือ สัดส่วนพื้นที่ผนังโปร่งแสงต่อพื้นที่ผนังทั้งหมดของด้านที่พิจารณา

ค่า SHGC หรือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านผนังโปร่งแสง หมายถึง อัตราส่วนของรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านวัสดุผนังส่วนที่โปร่งแสง และก่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเข้ามาภายในอาคาร ค่าดังกล่าวรวมผลของรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านวัสดุโปร่งแสงโดยตรง กับการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากรังสีอาทิตย์ที่ดูดกลืนไว้ในตัวกระจก หรือ วัสดุโปร่งแสงที่เข้ามาในอาคาร ต่อค่ารังสีอาทิตย์ที่กระทบกระจก (รูปที่ 8-11) ค่า SHGC ไม่มีหน่วย และมีค่า ตั้งแต่ 0-1 สามารถหาได้จากเอกสารของผู้ผลิตกระจก

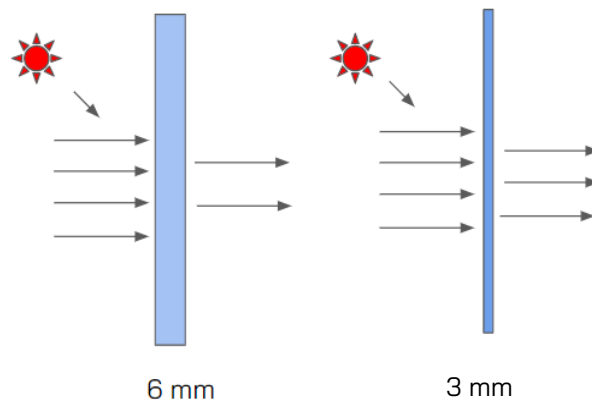


รูปที่ 8-11 องค์ประกอบของความร้อนที่ผ่านกระจก

ผู้ผลิตกระจกบางราย อาจจะระบุคุณสมบัติในการลดความร้อนของกระจกโดยใช้ค่า SC (Shading Coefficient) ในกรณีนี้ จะสามารถหาค่า SHGC ได้ โดยใช้สูตร

$$\text{SHGC} = 0.87 \times \text{SC}_{\text{กระจก}}$$

SC (Shading Coefficient) ของกระจก เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างความร้อนจากรังสีอาทิตย์ คิดในมุมตั้งฉากกับระนาบกระจกที่ผ่านกระจกที่พิจารณา เปรียบเทียบกับความร้อนที่ผ่านกระจกใสหนา 3 มม. SC เป็นค่าที่ไม่มีหน่วย ส่วนใหญ่ที่พบจะมีค่าไม่เกิน 1 (เพราะกระจกที่ใช้ในงานสถาปัตยกรรม มักจะมีความหนา มากกว่า 3 มม. เมื่อหารด้วยความร้อนที่ผ่านกระจกใส 3 มม. แล้วจึงมีค่า < 1)



รูปที่ 8-12 SC ของกระจกเป็นการเปรียบเทียบกับกระจกใส 3 มม.

ค่า SC ของอุปกรณ์บังแดด ในสมการคำนวณ OTTV คือ สัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดดภายนอกอาคาร (เป็นคนละค่ากับ SC ของกระจกที่กล่าวข้างต้น แต่เรียกเหมือนกัน) คำนวณจากสมการดังนี้

$$SC = \frac{E_{ew}}{E_{et\theta}}$$

เมื่อ E_{ew} คือ รังสีอาทิตย์ที่ผ่านอุปกรณ์บังแดดมาตกกระทบบนหน้าต่างที่พิจารณา มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)
 $E_{et\theta}$ คือ รังสีอาทิตย์ทั้งหมดที่ตกกระทบบนหน้าต่างที่พิจารณา
 เสมือนหนึ่งไม่มีอุปกรณ์บังแดด มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)

ในกรณีที่ไม่มีอุปกรณ์บังแดดรังสีอาทิตย์กระทบพื้นที่ทั้งหมดของหน้าต่าง ค่า SC จะเท่ากับ 1 แต่ถ้าจะมีการยื่นแผงบังแดดจะเกิดเงาบนพื้นที่หน้าต่าง ทำให้หน้าต่างได้รับรังสีอาทิตย์เพียงบางส่วน ค่า SC จะมีค่า <1 ยิ่งยื่นอุปกรณ์บังแดดมาก ค่า SC ก็ยิ่งต่ำลง การหาค่า SC จำเป็นต้องคำนวณด้วยโปรแกรม BEC

ค่า ESR เป็นค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังโปร่งแสง มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) สามารถหาค่าได้จากตาราง ซึ่งกระทรวงพลังงานได้แยกตาราง ตามประเภทอาคารทั้ง 3 กลุ่ม ซึ่งแบ่งตามชั่วโมงการใช้งาน ตารางดังกล่าวใช้ในการหาค่า ESR ทั้งการคำนวณ OTTV และ RTTV (ตารางที่ 8-9 ถึง 8-11)

ตารางที่ 8-9 ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (ESR) สำหรับอาคารประเภทสถานศึกษา
หรือสำนักงาน

มุมเอียง (องศา)	ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนตามทิศทางของผนัง (W/m ²)							
	เหนือ	ตะวันออกเฉียงเหนือ	ตะวันออก	ตะวันออกเฉียงใต้	ใต้	ตะวันตกเฉียงใต้	ตะวันตก	ตะวันตกเฉียงเหนือ
0	437.38	437.38	437.38	437.38	437.38	437.38	437.38	437.38
15	405.00	421.74	433.61	440.00	441.62	438.90	431.51	419.53
30	358.99	390.20	412.96	425.48	428.59	422.98	408.39	358.65
45	306.68	348.31	379.58	397.17	401.47	393.20	372.57	341.61
60	255.37	301.60	337.61	358.44	363.45	353.18	328.62	293.33
75	212.39	255.60	291.21	312.65	317.70	306.52	281.11	246.70
90	185.06	215.84	244.53	263.14	267.41	256.82	234.58	207.62

ตัวอย่าง ค่า ESR ของผนังทางทิศใต้ ของอาคารสำนักงาน อ่านได้ = 267.41 W/m²

ค่า ESR ของหลังคาตาดฟ้า = 437.38 W/m²

ค่า ESR ของหลังคาลาดลาดเอียง 15 องศาไปทางทิศเหนือ = 405.00 W/m²

ตารางที่ 8-10 ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (ESR) สำหรับอาคารประเภทโรงแรมหรืสห

ศูนย์การค้า สถานบริการ ห้างสรรพสินค้า หรืออาคารชุมนุมคน

มุมเอียง (องศา)	ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนตามทิศทางของผนัง (W/m ²)							
	เหนือ	ตะวันออกเฉียงเหนือ	ตะวันออก	ตะวันออกเฉียงใต้	ใต้	ตะวันตกเฉียงใต้	ตะวันตก	ตะวันตกเฉียงเหนือ
0	326.55	326.55	326.55	326.55	326.55	326.55	326.55	326.55
15	303.15	307.90	315.66	323.63	330.14	333.80	331.91	321.31
30	268.08	278.60	293.82	308.44	319.42	324.35	319.10	299.32
45	227.46	243.07	264.27	283.71	297.18	301.59	292.50	266.04
60	187.41	205.70	230.29	252.20	266.21	268.90	256.53	226.97
75	154.06	170.92	195.12	216.63	229.31	229.66	215.55	187.56
90	133.52	143.11	162.04	179.75	189.27	187.26	173.98	153.31

ตารางที่ 8-11 ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (ESR) สำหรับอาคารประเภทโรงแรม
สถานพยาบาล หรืออาคารชุด

มุมเอียง (องศา)	ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนตามทิศทางของผนัง (W/m ²)							
	เหนือ	ตะวันออกเฉียงเหนือ	ตะวันออก	ตะวันออกเฉียงใต้	ใต้	ตะวันตกเฉียงใต้	ตะวันตก	ตะวันตกเฉียงเหนือ
0	191.44	191.44	191.44	191.44	191.44	191.44	191.44	191.44
15	177.49	185.24	190.45	193.01	193.33	191.76	188.38	183.39
30	157.51	171.84	181.79	186.87	187.63	184.64	178.12	168.59
45	134.67	153.68	167.29	174.48	175.71	171.59	162.54	149.52
60	112.13	133.17	148.76	157.33	158.93	154.12	143.54	128.65
75	93.08	112.74	128.05	136.87	138.66	133.74	123.01	108.45
90	80.68	94.81	106.98	114.57	116.26	111.96	102.86	91.40

8.10 ตัวแปรการคำนวณค่า RTTV

สมการคำนวณ RTTV จะมีความคล้ายกับสมการ OTTV โดยประกอบด้วย ความร้อนจาก 3 ส่วนหลักเช่นเดียวกัน โดยหลังคาจะมีส่วนของช่องแสงหลังคา (Skylight) ซึ่งใช้วิธีคิดสัดส่วนพื้นที่ช่องแสงหลังคา (Skylight to Roof Ratio, SRR) เหมือนกับการคิดสัดส่วนพื้นที่ของหน้าต่าง (Window to Wall Ratio, WWR) ความร้อนที่ผ่านหลังคา ประกอบด้วย

- 1) ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านหลังคาทึบ โดยการนำความร้อน (Conduction Heat Gain, Q_r)

$$Q_r = (U_r)(1-SRR)(TD_{eq})$$

- 2) ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านหลังคาโปร่งแสง โดยการนำความร้อน (Conduction Heat Gain, Q_f)

$$Q_f = (U_f)(SRR)(\Delta T)$$

- 3) ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านหลังคาโปร่งแสง โดยการแผ่รังสี (Radiation Heat Gain, Q_{rad})

$$Q_{rad} = (SRR)(SHGC)(SC)(ESR)$$

ตัวแปรต่าง ๆ จะมีวิธีการคำนวณเหมือน OTTV ยกเว้นการคำนวณค่า U_r ของหลังคา

ค่า U_r การคำนวณค่า U_r ของหลังคา จะแตกต่างจากค่า U_w ของผนัง ที่ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศ (ตารางที่ 8-12) เพราะฟิล์มอากาศหลังคาจะอยู่ในแนวนอนหรือตามมุมเอียงของหลังคา ซึ่งค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศด้านใน (R) จะแตกต่างกันตามมุมเอียง ตั้งแต่ 0° ถึง 60°

นอกจากนี้การเลือกค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศ (R) ของหลังคา จะต้องดูว่าผิวด้านในของหลังคาเป็นวัสดุแผ่รังสีความร้อนสูง หรือ แผ่รังสีความร้อนต่ำ และเลือกให้ถูกต้อง

ตารางที่ 8-12 ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศสำหรับหลังคาอาคาร

ชนิดของผิววัสดุที่ทำหลังคา	ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศ ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$)				
	ที่ผิวหลังคาด้านใน (R_i) ที่มุมเอียงต่าง ๆ กันจากแนวนอน				ที่ผิวหลังคา ด้านนอก (R_o) ที่มุมเอียงใด ๆ
	0 องศา	22.5 องศา	45 องศา	60 องศา	
กรณีที่พื้นผิวหลังคามีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีสูง	0.162	0.148	0.133	0.126	0.055
กรณีที่พื้นผิวหลังคามีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำ	0.801	0.595	0.391	0.249	

ช่องว่างอากาศในหลังคา - การคำนวณ RTTV ต้องนำ ความต้านทานความร้อนของช่องว่างอากาศในหลังคา (Air Gap) นำมาคิดเป็นส่วนหนึ่งของความต้านทานความร้อนรวมของหลังคา ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

1) **ค่าความต้านทานความร้อนของช่องว่างอากาศในโครงหลังคา** หาได้จาก ตารางที่ 8-13 โดยต้องเลือกให้ถูกต้อง ตามประเภทของวัสดุภายในช่องว่างอากาศว่าเป็นชนิดแผ่รังสีสูง หรือ แผ่รังสีต่ำ จากนั้นอ่านค่าความต้านทานความร้อนของช่องว่าง ให้ตรงกับขนาด ถ้าขนาดความหนาของช่องว่างอากาศไม่ตรงกับขนาดตารางให้ interpolate ค่าจากช่วงที่ใกล้เคียง เช่น ความหนา 60 มม. เอียง 45 องศา ให้ Interpolate ระหว่าง 20 มม. (= 0.148) และ 100 มม. (= 0.158) เหมือนวิธีที่อธิบายมาข้างต้น ได้ 0.150 และถ้าช่องว่างอากาศมีความหนามากกว่า 100 มม. ให้ใช้ค่าเท่ากับ 100 มม.

2) **ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างหลังคาและเพดาน** ให้ใช้ค่าตาม ตารางที่ 8-14 ซึ่งจะต้องเลือกให้ถูกต้อง ตามประเภทของวัสดุภายในช่องว่างอากาศว่าเป็นชนิดแผ่รังสีสูง หรือ แผ่รังสีต่ำ

ตารางที่ 8-13 ค่าความต้านทานความร้อนของช่องว่างอากาศที่อยู่ภายในหลังคาอาคาร

ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำผิวหลังคาด้านนอก		ค่าความต้านทานความร้อนของช่องว่างอากาศ ตามความหนาของช่องว่างอากาศ ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$)		
		5 มิลลิเมตร	20 มิลลิเมตร	100 มิลลิเมตร
กรณีที่พื้นผิวหลังคามีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีสูง				
ความลาดเอียงจากพื้นผิวแนวระนาบ	0 องศา	0.11	0.148	0.174
	22.5 องศา	0.11	0.148	0.165
	45 องศา	0.11	0.148	0.158
กรณีที่พื้นผิวหลังคามีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำ				
ความลาดเอียงจากพื้นผิวแนวระนาบ	0 องศา	0.25	0.572	1.423
	22.5 องศา	0.25	0.571	1.095
	45 องศา	0.25	0.570	0.768

ตารางที่ 8-14 ค่าความต้านทานความร้อนของช่องว่างอากาศระหว่างหลังคาและเพดาน

ชนิดของผิววัสดุที่ใช้ทำเพดาน	ค่าความต้านทานความร้อนของช่องว่างอากาศ ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$)
กรณีที่พื้นผิวหลังคามีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีสูง	0.458
กรณีที่พื้นผิวหลังคามีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำ	1.356

8.11 แนวทางการออกแบบเปลือกอาคารให้สอดคล้องกับกฎหมาย

การเข้าใจตัวแปรในสมการคำนวณ OTTV และ RTTV ข้างต้น จะทำให้สามารถเชื่อมโยงวิธีการต่างๆ ในการออกแบบเพื่อลดความร้อนที่เข้าสู่อาคาร กับตัวแปรในสมการ ทำให้สามารถลดค่า OTTV และ RTTV ให้อยู่ในเกณฑ์ตามกฎหมายได้ รวมทั้งยังสามารถวิเคราะห์ราคาค่าก่อสร้างที่เปลี่ยนแปลง อันเป็นผลมาจากการทำให้ค่าตัวแปรต่าง ๆ เปลี่ยน (ตารางที่ 8-15)

ตารางที่ 8-15 ความเชื่อมโยงระหว่างแนวทางการออกแบบอาคารและตัวแปรในสมการ

แนวทางการออกแบบ	ตัวแปรในสมการ	ผลต่อราคา
การปรับขนาดหน้าต่างให้เล็กลง	ค่า WWR ลดลง	ราคาลดลงเพราะราคาหน้าต่างต่อตารางเมตรแพงกว่าผนังทึบ
การเพิ่มความหนาของผนังจากคอนกรีตมวลเบาชั้นเดียวหนา 7.5 ซม. เป็น 10 ซม.	ค่า U_w ลดลง	ราคาเพิ่มขึ้น
การเปลี่ยนจากอิฐมวลเบาเป็นคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาเท่ากัน	ค่า U_w ลดลง	ราคาใกล้เคียงกัน
การเพิ่มฉนวนที่ผนัง	ค่า U_w ลดลง	ราคาเพิ่มขึ้น
การเปลี่ยนสีของผนังจากสีเข้มเป็นสีอ่อน	ค่า TD_{eq} ลดลง	ราคาอาจจะเท่าเดิม
การเปลี่ยนกระจกใสเป็นกระจกสะท้อนแสง	ค่า SHGC ลดลง	ราคาเพิ่มขึ้น
การเปลี่ยนกระจกชั้นเดียวเป็น 2 ชั้น Low-E	ค่า U_f ลดลง ค่า SHGC ลดลง	ราคาเพิ่มขึ้นมาก
การทำแผงบังแดดให้หน้าต่าง	ค่า SC ลดลง	ราคาเพิ่มขึ้น
การติดฟิล์มบนกระจกใส	ค่า SHGC ลดลง	ราคาเพิ่มขึ้น
ลดขนาด Skylight	ค่า SRR ลดลง	ราคาลดลง
การเพิ่มฉนวนหลังคา	ค่า U_r ลดลง	ราคาเพิ่มขึ้น
การใช้แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ในช่องว่างหลังคา	ค่า U_r ลดลง	ราคาเพิ่มขึ้น
ใช้หลังคาสีอ่อนแทนสีเข้ม	ค่า TD_{eq} ลดลง	ราคาอาจจะเท่าเดิม

8.12 แนวทางการออกแบบผนังทึบ

จากสมการ OTTV ข้างต้นจะเห็นว่า ตัวแปรที่สำคัญ มีผลต่อการลดความร้อนที่ผ่านผนังทึบ คือ ค่า U ของผนังทึบ และ ค่า TD_{eq}

วิธีการลดค่า U ของพื้นที่ผนังทึบ สามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

- การเลือกใช้วัสดุที่ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ (k) เช่น การก่อผนังถ้าเปลี่ยนจากอิฐมวลเบา ($k = 1.102 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$) เป็นคอนกรีตมวลเบา ($k = 0.180 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$) ค่า U จะต่ำลง
- การเพิ่มความหนาของผนัง เช่น จากคอนกรีตมวลเบา 7.5 ซม. เป็น 10 ซม.
- การเพิ่มช่องว่างอากาศ โดยการทำผนัง 2 ชั้น เว้นช่องอากาศประมาณ 10 ซม.
- การใช้ฉนวน การออกแบบผนังเพื่อให้ได้ค่า U ที่ต่ำมาก ๆ จำเป็นต้องใช้ฉนวน ซึ่งสามารถเพิ่มความต้านทานความร้อนให้กับผนังได้สูงมากขึ้นตามที่ต้องการได้ โดยไม่กระทบต่อการเพิ่มน้ำหนักให้โครงสร้างของอาคาร เพราะฉนวนกันความร้อนมีน้ำหนักเบา เนื่องจากภายในฉนวนประกอบด้วยโพรงอากาศขนาดเล็กจำนวนมาก การใช้ฉนวนสามารถใส่ฉนวนไว้ภายในโครงคร่าว หรือ ใช้อุ้มนอกโครงคร่าว เช่น ในระบบผนัง EIFS (Exterior Insulation Finish System)

กระทรวงพลังงานได้เคยจัดทำ คู่มือแบบประเมินอาคารประหยัดพลังงานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2549 โดยได้เสนอแนะค่า U ของผนังทึบสำหรับการออกแบบสำหรับอาคาร 4 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มสำนักงาน ห้องสมุด 2) กลุ่มอาคารสรรพสินค้า อาคารพาณิชย์ อาคารแสดงสินค้า นิทรรศการ 3) กลุ่มโรงแรม โรงพยาบาล และ 4) กลุ่มอาคารพักอาศัยซึ่งรวม บ้านเดี่ยว บ้านแถว อาคารอยู่อาศัยรวม และมีการให้คะแนนโดยถ้าค่า U และ พื้นที่หน้าต่าง (WWR) ต่ำก็จะได้รับคะแนนมากกว่าค่า U และ WWR สูง (ตารางที่ 8-16)

ตารางที่ 8-16 ค่า U ของผนังทึบสำหรับอาคารแต่ละประเภทตามคู่มือแบบประเมินอาคารฯ

ประเภทอาคาร	ค่า U ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)	พื้นที่หน้าต่าง (WWR) (%)
สถานศึกษา ห้องสมุด	0.4 - 1.0	25 - 35
อาคารสรรพสินค้า อาคารพาณิชย์ อาคารแสดงสินค้า นิทรรศการ	0.4 - 1.0	20 - 30
โรงแรม สถานพยาบาล	0.4 - 1.0	20 - 30
อาคารพักอาศัย	0.6 - 1.2	20 - 30

ถ้านำค่า U ของผนังทึบแบบต่าง ๆ มาเปรียบเทียบ เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกวัสดุผนังทึบ จะเห็นว่าการทำงานที่มีค่า U ต่ำ ที่ได้ตามเกณฑ์ที่ในคู่มือแบบประเมินอาคารประหยัดพลังงานฯ จะต้องเป็นผนังคอนกรีตมวลเบา และผนังที่ใช้ฉนวน ดังตารางที่ 8-17 ดังนี้

ตารางที่ 8-17 ค่า U ของผนังทึบแบบต่าง ๆ

ลำดับ	ประเภทผนังทึบ	ค่า U (W/m ² ·°C)
1	ผนังคอนกรีตหนา 10 ซม.	4.285
2	ผนังก่ออิฐฉาบปูนหนา 7 ซม. ฉาบปูนซีเมนต์ผสมทรายด้านละ 1.5 ซม.	3.715
3	ผนังก่ออิฐฉาบปูนหนา 14 ซม. ฉาบปูนซีเมนต์ผสมทรายด้านละ 1.5 ซม.	3.006
4	ผนังก่ออิฐฉาบปูนหนา 7 ซม. ก่อ 2 ชั้น มีช่องอากาศตรงกลางหนา 10 ซม. ฉาบปูนซีเมนต์ผสมทรายด้านละ 1.5 ซม.	2.030
5	ผนังคอนกรีตมวลเบาประหยัดพลังงานเบอร์ 5 ชนิดหนา 7.5 ซม. ฉาบปูนสำหรับคอนกรีตมวลเบาด้านละ 1.25 ซม.	1.223
6	ผนังคอนกรีตมวลเบาประหยัดพลังงานเบอร์ 5 ชนิดหนา 10 ซม. ฉาบปูนสำหรับคอนกรีตมวลเบาด้านละ 1.25 ซม.	0.990
7	ผนังซีเมนต์บอร์ดหนา 1 ซม. ใส่ฉนวนใยแก้วหนา 5 ซม. ($R = 1.25 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$) ในโครงคร่าวด้านในปิดด้วยแผ่นยิปซัมหนา 1.2 ซม.	0.606
8	ผนังซีเมนต์บอร์ดหนา 1 ซม. ใส่ฉนวนใยแก้วหนา 6.5 ซม. ($R = 1.71 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$) ในโครงคร่าวด้านในปิดด้วยแผ่นยิปซัมหนา 1.2 ซม.	0.478
9	ผนังโลหะ มีฉนวนโฟมโพลีสไตรีนตรงกลางหนา 10 ซม. แผ่นโลหะหนาด้านละ 0.55 มม.	0.349

แต่คอนกรีตมวลเบาที่จำหน่ายในท้องตลาดมีหลายชนิด โดยมีความหนาแน่นแตกต่างกันตั้งแต่ 600-1,100 กก./ลบ.ม. แต่ละชนิดจะมีค่าความต้านทานความร้อนไม่เท่ากัน แม้จะมีขนาดความหนาเท่ากัน คอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่นน้อยส่วนใหญ่จะมีค่าความต้านทานความร้อนมากกว่า

ฉนวนใยแก้วที่มีจำหน่าย จะมีความหลากหลายทั้งความหนาและความหนาแน่น ปัจจุบันกระทรวงพลังงาน จึงได้จัดทำฉลากวัสดุประหยัดพลังงานเบอร์ 5 สำหรับคอนกรีตมวลเบา และฉนวนใยแก้ว เพื่อให้ผู้ออกแบบสามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกได้ง่ายขึ้น โดย

- ฉนวนใยแก้วประหยัดพลังงานเบอร์ 5 ได้แก่ ฉนวนใยแก้วที่มีค่า $R \geq 1.25 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$
- คอนกรีตมวลเบาประหยัดพลังงานเบอร์ 5 ได้แก่
 - คอนกรีตมวลเบา หนา 7.5 ซม. ที่มีค่า $R \geq 0.58 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$
 - คอนกรีตมวลเบา หนา 10 ซม. ที่มีค่า $R \geq 0.77 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$



รูปที่ 8-13 คอนกรีตมวลเบาและฉนวนใยแก้ว ที่ได้รับฉลากประหยัดพลังงานเบอร์ 5

(ที่มา: วัสดุประหยัดพลังงานเบอร์ 5)

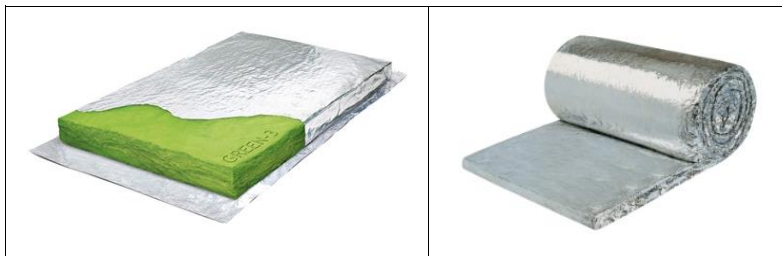
นอกจากนี้ การใช้ผนังสีอ่อน ซึ่งดูดกลืนความร้อนน้อยทำให้ความร้อนผ่านผนังที่บ้น้อยลง ก็ได้มีการกำหนดฉลากสำหรับสีทาผนังประหยัดพลังงานเบอร์ 5 ด้วยเช่นกัน

- สีทาอาคารประหยัดพลังงานเบอร์ 5 คือ สีที่สามารถสะท้อนรังสีอาทิตย์ได้มากกว่า 80% ซึ่งแสดงว่าจะดูดกลืนไม่เกิน 20% หรือ ค่า $\alpha = 0.2$ ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดในกฎกระทรวงฯ ที่ $\alpha = 0.3$ (ตารางที่ 8-5)

8.13 ประเภทของฉนวนกันความร้อน

ฉนวนกันความร้อนที่มักพบในงานก่อสร้างอาคาร ได้แก่

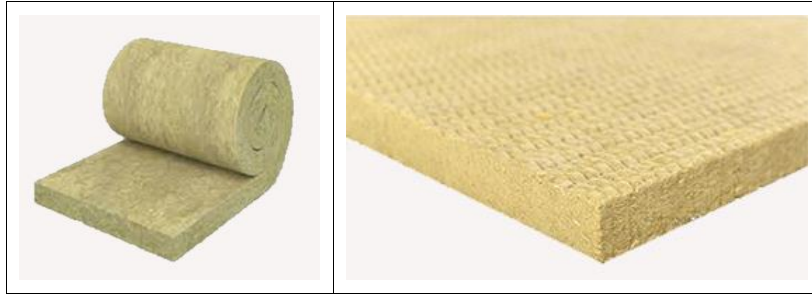
- **ฉนวนใยแก้ว** ผลิตจากการนำแก้วมาหลอมละลาย แล้วปั่นเป็นเส้นใยเล็ก ๆ ยึดกันด้วยกาวยาประสาน มีลักษณะแบบม้วนสำหรับวางบนฝ้า และแบบแผ่นสำหรับใส่วางบนฝ้าหรือในผนัง ควรเลือกใช้ชนิดมีฟอยล์หุ้มเพื่อช่วยป้องกันความชื้นของไอน้ำที่ผิวฉนวน ซึ่งจะทำให้ฉนวนชื้น และทำให้คุณสมบัติในการกันความร้อนด้อยลง และอาจจะเสื่อมสภาพ เช่น ยุบตัวเร็วขึ้น (รูปที่ 8-14)



รูปที่ 8-14 ฉนวนใยแก้วแบบแผ่นสำหรับผนัง และแบบม้วนปูบนฝ้าเพดาน

(ที่มา: Building Materials)

- **ฉนวนใยหิน** บางที่เรียก ฉนวนใยแร่ ผลิตจากหินภูเขาไฟหรือกากเหล็กที่ใช้แล้ว นำมาหลอมแล้วปั่นเป็นเส้นใยเล็กคล้ายใยแก้ว มีทั้งแบบม้วนและแบบแผ่น มีความหนาแน่น ตั้งแต่ 40 กก./ลบ.ม. ขึ้นไปแบบผนังมักใช้ที่ 80 กก./ลบ.ม. ขึ้นไป มีจุดหลอมเหลวสูง สามารถใช้เป็นฉนวนกันไฟได้ และใช้เป็นฉนวนกันเสียงในผนังได้ด้วย สามารถหน่วงไอน้ำได้ (Vapor Retarder) แม้จะไม่สามารถกันไอน้ำ (Vapor Barrier) (รูปที่ 8-15)



รูปที่ 8-15 ฉนวนใยหินแบบม้วนและแบบแผ่น

(ที่มา: Insulation Materials)

- **ฉนวนเซลลูโลส (Cellulose)** หรือ ฉนวนเยื่อกระดาษ ผลิตจากกระดาษใช้แล้ว นำมาย่อยเป็นเส้นใย มีลักษณะเป็นปุ๋ยเกาะตัวกันหลวม ๆ สำหรับพ่นโรยเข้าไปในช่องระหว่างผนัง หรือ ใต้หลังคา หรือ ใช้พ่นเปิกให้ยึดติดกับผิว บางที่ใช้เพื่อลดเสียงของหลังคาเมทัลชีทเวลาฝนตกด้วย (รูปที่ 8-16, 8-17)



รูปที่ 8-16 ฉนวนเยื่อกระดาษแบบพ่นเปิก

(ที่มา: <https://www.cellulose.ca/HomeOwner>)



รูปที่ 8-17 เยื่อกระดาษแบบแห้ง

(ที่มา: Cellulose Insulation - First Defense)

- **ฉนวนโพลีเอสเตอร์ (Polyester)** เส้นใยโพลีเอสเตอร์ อาจผลิตโดยมีส่วนผสมของพลาสติกกรีไซเคิลจากขวดน้ำ ลักษณะเป็นแผ่นอ่อนนุ่ม ทนความชื้นได้ดีกว่าใยแก้ว แต่มีราคาสูงกว่า และอายุการใช้งานนาน มีทั้งแบบแผ่นและแบบม้วน (รูปที่ 8-18, 8-19)

	
รูปที่ 8-18 ฉนวนโพลีเอสเตอร์แบบม้วน (ที่มา: Recycled Plastic Insulation - Thermafleece SupaSoft Polyester Insulation)	รูปที่ 8-19 ฉนวนโพลีเอสเตอร์สำเร็จรูป สำหรับติดดาวนั้ไลท์ (ที่มา: https://kooltegstore.com/th/products/category/64304)

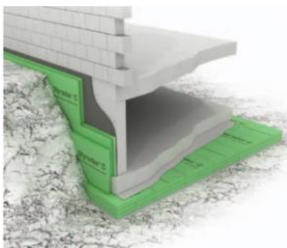
- ฉนวนโฟมโพลียูรีเทน (Polyurethane, PU) มีทั้งแบบแผ่นแข็ง แบบฉีดพ่น คุณสมบัติในการนำความร้อนต่ำ ติดไฟ ต้องระบุใช้ชนิดใส่สารกันไฟลาม (รูปที่ 8-20, 8-21)

	
รูปที่ 8-20 ฉนวนโฟมโพลียูรีเทนแบบพ่น (ที่มา: Dow Styrofoam Spray Polyurethane Foam)	รูปที่ 8-21 ฉนวนโฟมโพลียูรีเทนแบบแผ่น (ที่มา: What is Polyurethane Foam - Definition)

- ฉนวนโฟมโพลีสไตรีนแบบเบ่งขยายตัว (Expanded Polystyrene Foam, EPS) ลักษณะเป็นแผ่นแข็ง กันความร้อนได้ดี ต้องระบุชนิดใส่สารกันไฟลาม ใช้เป็นแผ่น หรือ บางทีทำเป็นส่วนหนึ่งในแผ่นผนังหรือ หลังคาแบบ Sandwich Panel (รูปที่ 8-22, 8-23)

	
รูปที่ 8-22 แผ่น EPS ทำฉนวนผนัง (ที่มา: Expanded Polystyrene (EPS Foam): Uses, Structure & Properties)	รูปที่ 8-23 แผ่น EPS ในหลังคา Sandwich Panel (ที่มา: Sandwich Roof Panel, 50mm sandwich roof panel Product on BRDECO - Building Material Solutions)

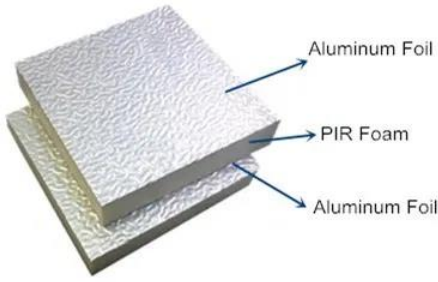
- **ฉนวนโฟมโพลีสไตรีนแบบรีด (Extruded Polystyrene Foam, XPS)** ลักษณะเป็นแผ่นแข็ง มีความหนาแน่นสูงกว่าแผ่น EPS โดยมักใช้ที่ 32 กก./ลบ.ม. ขึ้นไป ต้านทานต่อความชื้นได้ดีกว่า EPS จึงมักนำแผ่นฉนวนมาวางที่บนหลังคาตาดฟ้า (รูปที่ 8-24) และปูทับแผ่นด้วย หรือ เป็นฉนวนภายนอกที่อยู่นอกผนัง หรือ โครงคร่าว หรือ ฉนวนพื้นวางบนดิน (รูปที่ 8-25)

	
รูปที่ 8-24 ฉนวน XPS แบบแผ่นปูบนตาดฟ้า (ที่มา: https://en.decorpro.com/uteplenie/materialy/ursa-xps/)	รูปที่ 8-25 ฉนวน XPS ใช้เป็นฉนวนภายนอกผนังและวางบนดิน (ที่มา: https://cutt.ly/1yPfGA4)

- **ฉนวนโฟมโพลีเอทิลีน (Polyethylene, PE)** ลักษณะเป็นโฟมแผ่นอ่อน เหนียว เบา ลักษณะเป็นเซลล์ปิด จึงป้องกันความชื้นแทรกซึมได้ดี ถ้าพิจารณาเฉพาะค่า k ของฉนวนชนิดนี้จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ในการนำความร้อนต่ำดี ($0.029 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) แต่เนื่องจากผลิตเป็นแผ่นบางมากประมาณ 4-10 มม. จึงไม่สามารถกันความร้อนได้ดีเท่าฉนวนโฟมแบบอื่นที่ส่วนใหญ่ใช้ที่ความหนาประมาณ 50 มม. ขึ้นไป ฉนวนชนิดนี้นิยมนำมาใช้ติดตั้งกับใต้หลังคาเมทัลชีท พร้อมแผ่นฟอยล์ (รูปที่ 8-26, 8-27) เพื่อป้องกันการกักความร้อนของผิวใต้หลังคาโรงงานที่มีไอระเหยเป็นกรด แต่การที่ใต้หลังคาเมทัลชีทมีผิวอะลูมิเนียมฟอยล์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ในการแผ่รังสีต่ำติดอยู่ ทำให้ช่วยลดการแผ่รังสีความร้อนเข้ามาในอาคาร และลดเสียงฝนได้บ้าง

	
รูปที่ 8-26 ฉนวนโฟมโพลีเอทิลีนแบบม้วน (ที่มา: https://cutt.ly/1yOHKdH)	รูปที่ 8-27 ฉนวนโฟมโพลีเอทิลีนแบบติดใต้แผ่นหลังคา (ที่มา: https://www.cssteelwork.com)

- **ฉนวนโพลีไอโซไซยานูเรต (Polyisocyanurate, PIR)** เป็นฉนวนโพลีที่มีการปรับปรุงในการผลิตมาจากฉนวนโพลียูรีเทน ทำให้เกิดควันทนในขณะเพลิงไหม้น้อยกว่า มีค่าการนำความร้อนต่ำประมาณ $0.023 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ดูดซึมน้ำต่ำ ลักษณะเป็นแผ่นแข็ง บางที่ใช้เป็นฉนวนในแผ่น Sandwich Panel และใช้ทำท่อลมแอร์ (รูปที่ 8-28, 8-29)

	
รูปที่ 8-28 ฉนวนโพลีไอโซไซยานูเรต ใช้ปูบนหลังคา (ที่มา: https://www.ardex.co.nz/product/ardex-polyiso-roofing-insulation/)	รูปที่ 8-29 ฉนวนโพลีไอโซไซยานูเรต แบบหุ้มฟอยล์ใช้ทำท่อลม (ที่มา: http://www.greenfoamduct.com/pir-pre-insulated-duct/)

8.14 ข้อพิจารณาในการเลือกฉนวน

ฉนวนกันความร้อนที่มีจำหน่ายในท้องตลาดปัจจุบัน มีความหลากหลายมาก ผู้ใช้ควรพิจารณาจากเกณฑ์ในการเลือก ดังนี้

1) **ความสามารถในการป้องกันความร้อน** ซึ่งจะต้องพิจารณาจากค่า *R-Value* เป็นหลัก ซึ่งขึ้นกับว่าต้องการป้องกันความร้อนมากในระดับใด ถ้าต้องการเพียงให้ผ่านเกณฑ์ตามกฎหมาย อาจเลือกใช้ฉนวนที่มีค่าอย่างน้อย $1.25 \text{ m}^2\cdot\text{°C/W}$ ซึ่งเทียบเท่าฉนวนเบอร์ 5 แต่หากต้องการประหยัดพลังงานมากยิ่งขึ้น ก็เพิ่มค่า *R* ให้สูงขึ้น ผู้ออกแบบไม่ควรระบุในรายการประกอบแบบสถาปัตยกรรมโดยใช้ความหนาเพียงอย่างเดียว เพราะที่ความหนาเดียวกันจะมีค่า *R* แตกต่างกันได้

2) **ลักษณะรูปร่าง** รูปร่างฉนวนเหมาะสมกับตำแหน่งที่ต้องการติดตั้ง และลักษณะการใช้งาน เช่น เป็นแผ่นแข็ง แผ่นอ่อน ฟันฉิด ไรยใส่ในช่องว่าง ฉนวนวางบนฝ้าเพดานสามารถใช้ได้ทั้งแบบม้วน และแบบแผ่น ส่วนฉนวนที่ใส่ในผนังแบบแผ่นแข็งอาจจะคงรูปได้ดีกว่า ไม่ยุบตัวลงที่ส่วนล่างของผนังเมื่อใช้ไปนาน ๆ แบบฉิดฟันสามารถใช้ฟันได้หลังคา เพื่อลดความร้อนในกรณีอาคารไม่มีฝ้า เป็นต้น

3) **ไม่ลามไฟ** ฉนวนในกลุ่มโพลี มักเป็นฉนวนติดไฟและเกิดแก๊สพิษ ซึ่งต้องแน่ใจว่าได้เลือกใช้ฉนวนรุ่นที่ใส่สารกันไฟลาม

4) **การทนต่อความชื้น** ความชื้นในอากาศเป็นสาเหตุทำให้ฉนวนชื้น จากการควบแน่นเป็นหยดน้ำ และทำให้ความสามารถในการกันความร้อนของฉนวนลดลงมาก และยังสามารถทำให้เกิดการยุบตัว หรือเสื่อมสภาพในลักษณะอื่นตามมา ดังนั้น ควรเลือกฉนวนที่ทนต่อความชื้น หรือ มีการหุ้มด้วยฟอยล์ โดยรอบ

5) **ปลอดภัยต่อสุขภาพ** การขึ้นรูปของฉนวนบางชนิดจะใช้กาวในการยึดเกาะ กาวที่ใช้ อาจมีส่วนผสมของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compound, VOC) ที่ปลดปล่อยออกมา เป็นอันตรายต่อช่างที่ทำงานและผู้ใช้อาคาร ในเกณฑ์การออกแบบอาคารเขียว เช่น ระบบ LEED จะมีเกณฑ์การให้คะแนนจากการเลือกฉนวนกันความร้อนโดยพิจารณาว่า VOC นอกจากนี้อันตรายต่อสุขภาพยังอาจเกิดจากสารที่ใส่ในฉนวนเพื่อป้องกันสัตว์ แมลง หรือ อันตรายเมื่อฉนวนเสื่อมสภาพกลายเป็นฝุ่นผงขนาดเล็กมากที่อาจปนไปกับอากาศที่หายใจ เป็นต้น

6) **อายุการใช้งาน** ฉนวนที่ดีควรมีอายุใช้งานยาวนาน การเปลี่ยนฉนวนอาจเป็นเรื่องยุ่งยาก เพราะต้องมีการรื้อฝ้าหรือผนัง กระทบต่อการใช้งานอาคาร

7) **ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม** ในปัจจุบันแนวคิดในการเลือกวัสดุจะมีได้พิจารณาเพียงแค่ว่าคุณสมบัติในการใช้งาน แต่ได้มองลึกไปถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในวัฏจักรชีวิตของวัสดุ ตั้งแต่กระบวนการผลิตวัสดุ ว่าได้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อโลกอย่างไรบ้าง ตลอดจนถึงขั้นการกำจัดซากเมื่อเลิกใช้งาน ดังนั้น ฉนวนบางชนิด เช่น ฉนวนโพลีซิงกันความร้อนได้ดี แต่ถ้าในกระบวนการผลิตมีการปลดปล่อยสารเคมีออกมาสู่สภาพแวดล้อมมาก หรือ ใช้สาร HCFC ซึ่งเป็นตัวทำลายโอโซน และทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ก็กลายเป็นประเด็นในการพิจารณาได้ ในบางโครงการ

8) **ราคา** การพิจารณาราคาของฉนวน นอกจากการพิจารณาที่ราคาต่อตารางเมตรแล้ว ควรเปรียบเทียบกับ ค่า R-Value ที่ได้ และอายุการใช้งานของฉนวน ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนฉนวนใหม่เมื่อเสื่อมสภาพในช่วงตลอดอายุอาคารด้วย

8.15 อิทธิพลของผนังมวลสารในการหน่วงความร้อน

ฉนวนที่กล่าวถึงข้างต้นเป็นฉนวนต้านทานความร้อน หรือ เรียกว่า **Resistive Insulation** แต่ยังมีวิธีการหน่วงความร้อนอีกวิธีหนึ่ง คือ การใช้วัสดุผนังซึ่งมีความจุความร้อนสูงและมีมวลสารมาก เพื่อกักเก็บความร้อนในตัวเป็นการชะลอเวลาที่ความร้อนจะถ่ายเทเข้าสู่อาคาร เรียกว่า **Capacitive Insulation**

ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนแบบ **Steady State Heat Transfer** อุณหภูมิของแต่ละด้านที่มีการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าคงที่ตลอดเวลา การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในสภาวะนี้ ความจุความร้อนของวัสดุและมวลสาร จะไม่มีผลต่อการหน่วงความร้อน ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านอิฐที่มีความหนา 20 ซม. กับที่ผ่านฉนวนโพลีบาง ๆ ที่มีค่า U เท่ากัน จะมีปริมาณความร้อนเท่ากัน

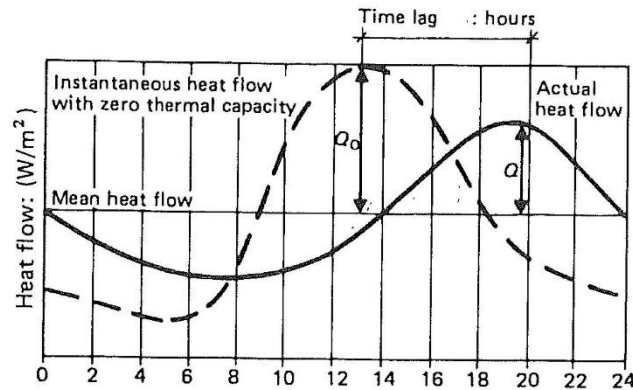
แต่ในสภาวะจริง ซึ่งอุณหภูมิอากาศภายนอกและอากาศภายใน จะเปลี่ยนแปลงตามเวลา เป็นการถ่ายเทความร้อนแบบ **Periodic Heat Flow** ในกรณีนี้ผนังที่มีมวลสารมาก และผนังที่มีมวลสารน้อยจะมีระยะเวลาในการหน่วงความร้อนแตกต่างกัน กล่าวคือ เมื่อความร้อนมากระทบผิวด้านหนึ่งของผนังมวลสาร ความร้อนส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืนไว้ก่อนที่จะส่งถ่ายความร้อนไปยังผนังชั้นถัดไป เป็นการชะลอการไหลของความร้อน และความร้อนจำนวนหนึ่งจะถูกสะสมอยู่ในมวลสารผนัง จะปล่อยกลับออกมาโดยใช้ระยะเวลาหนึ่ง เมื่อความร้อนที่ไหลเข้ามาเติมในผนังหยุดลง ลักษณะดังกล่าว คือ อิทธิพลของมวลสาร (Mass Effect)

ผนังมวลสาร จะประกอบด้วยค่าที่สำคัญ 2 ค่า คือ

Time Lag หมายถึง ระยะเวลาของการหน่วงความร้อน คือ ระยะห่างของเวลาที่ผนังมวลสารมีความร้อนสูงสุด นับจากจุดเวลาที่ผนังไม่มีมวลสาร (Zero Thermal Mass) เกิดความร้อนสูงสุด หน่วยเป็นชั่วโมง (รูปที่ 8-30)

Decrement Factor (dcr) เป็นค่าสัดส่วนระหว่างปริมาณความร้อนสูงสุดที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของผนังที่มีมวลสาร (Q) เปรียบเทียบกับปริมาณความร้อนสูงสุดที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของผนังที่ไม่มีมวลสาร (Q_o)

การใช้ผนังที่มีมวลสารในการออกแบบอาคาร จะต้องพิจารณาระหว่างความหนาของผนัง ระยะเวลาที่สามารถหน่วงได้ และช่วงเวลาการเกิด Peak ควบคู่ไปกับเวลาที่ใช้งานอาคาร



$$dcr = Q/Q_o$$

รูปที่ 8-30 Time Lag และ Decrement Factor

(ที่มา: Szokolay, 1987.p.25)

ตารางที่ 8-18 ตัวอย่างการหน่วงความร้อน และ Decrement Factor ของผนังแบบต่างๆ

ชนิดของผนัง	U-Value	Time Lag (ชั่วโมง)	Decrement Factor
ผนังอิฐ หนา 105 มม. ฉาบปูน	3.02	3.0	0.83
ผนังอิฐ หนา 220 มม. ฉาบปูน	2.14	6.5	0.49
ผนังอิฐ หนา 330 มม. ฉาบปูน	1.79	9.9	0.26
ผนังโครงคร่าวโลหะปิดด้วยแผ่นไฟเบอร์ และปิดอีกด้านด้วยยิปซัม	2.20	0.3	1.00
ผนังโครงคร่าวโลหะปิดด้วยแผ่นไฟเบอร์ มีฉนวนใยแก้ว 50 มม. และปิดอีกด้านด้วยยิปซัม	0.53	0.7	0.99

(ที่มา: Szokolay, 1987, p.65)

8.16 แนวทางการออกแบบหน้าต่างหรือผนังโปร่งแสง

แนวทางการออกแบบหน้าต่างจะต้องคำนึงถึงการลดความร้อนเพื่อให้สอดคล้องกับเกณฑ์ OTTV ตามกฎหมาย และในขณะเดียวกันต้องคำนึงถึงการใช้ประโยชน์จากแสงสว่างธรรมชาติด้วย สิ่งที่ควรพิจารณาในการออกแบบ คือ

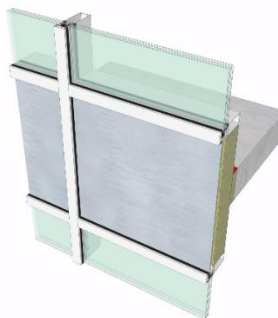
ค่า WWR (Window to Wall Ratio, WWR) สัดส่วนพื้นที่หน้าต่าง อาจกล่าวได้ว่าสาเหตุหลักของอาคารที่ไม่สามารถผ่านเกณฑ์ OTTV ได้ มาจากการมีพื้นที่หน้าต่าง หรือ ผนังโปร่งแสงมากเกินไป โดยถ้าพื้นที่หน้าต่างหรือผนังโปร่งแสงมากกว่า 40% หรือ $WWR = 0.4$ จะเริ่มมีความยากในการออกแบบให้อยู่เกณฑ์ที่กฎหมายกำหนด โดยต้องใช้วัสดุที่มีค่า U และ SHGC ต่ำมาก รวมทั้งในส่วนของผนังที่บึกก็ต้องทำให้มีค่า U ที่ต่ำมากด้วย ซึ่งราคาวัสดุต่าง ๆ ในการออกแบบอาคารประหยัดพลังงานที่มีพื้นที่หน้าต่างโปร่งแสงขนาดใหญ่จะสูงขึ้นมาก

- **ผนัง Curtain Wall** การออกแบบผนัง Curtain Wall ซึ่งพื้นที่ภายนอกเป็นกระจกทั้งหมด จะต้องทำผนังที่ด้านในอาคารให้ทึบ (รูปที่ 8-31) โดยใส่ฉนวนไว้ในช่องว่างระหว่างกระจกด้านนอกที่ทึบแสง (Spandrel) และผนังภายใน (รูปที่ 8-32) และในส่วนที่แสงส่องผ่านอาจต้องใช้กระจก 2 ชั้น ชนิด Low-e เพื่อค่า U ของกระจกต่ำลง ซึ่งอาจจะลดได้ถึงประมาณ $1.5-1.6 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ และควรเป็นเกณฑ์ของกระจกประสิทธิภาพสูงเบอร์ 5 ซึ่งกระทรวงพลังงานได้กำหนด ที่ค่า $SHGC \leq 0.55$ และมีค่า $LSG \geq 1.2$



รูปที่ 8-31 อาคาร Enco ได้รับรางวัล Thailand Energy Award

ด้านนอกเป็นกระจก Curtain Wall ทั้งหมด ส่วนผนังด้านในทำบางส่วนทึบและใส่ฉนวนกันความร้อน



รูปที่ 8-32 การใส่ฉนวนไว้ที่ด้านหลังของแผ่นกระจกทึบแสง (Spandrel) ของ Curtain Wall

(ที่มา: <https://www.fen-bc.org/content/view/resources-spandrel/>)

ค่า SHGC (Solar Heat Gain Coefficient, SHGC) เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการลดความร้อนที่ผ่านกระจกเข้ามาโดยการแผ่รังสีรวมกับส่วนที่กระจกดูดกลืนไว้และถ่ายเทเข้ามา โดยต้องเลือกกระจกที่มีค่า SHGC ต่ำ ยิ่งต่ำยิ่งดี ซึ่งควรมีค่า $SHGC \leq 0.55$

ค่า LSG (Light to Solar Gain Ratio, LSG) สัดส่วนแสงผ่านต่อความร้อนผ่าน คำนี้อย่างยิ่งดี ควรเลือกกระจกที่ $LSG \geq 1 - 1.2$

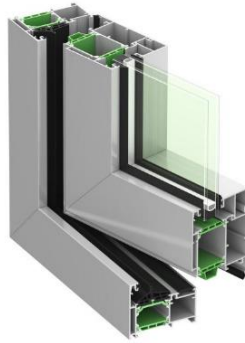
ค่า U ของกระจก เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงอัตราการไหลของความร้อนผ่านกระจก ยิ่งต่ำยิ่งดี กระจกชั้นเดียวหนา 6 mm จะมีค่า U ประมาณ $5.8 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ส่วนกระจก 2 ชั้น จะมีค่า U ประมาณต่ำกว่า $3.0 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับในประเทศไทยค่า U จะมีความสำคัญมากกว่าในประเทศเขตร้อน เพราะเป็นลักษณะของความร้อนไหลออก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเวลากลางคืนที่อากาศเย็นจัด ในประเทศเขตร้อนการใช้กระจก 2 ชั้น อาจใช้คู่กับกระจกที่มีค่า SHGC สูงเพื่อให้ได้รับความร้อนเข้าเพื่อให้อาคารอบอุ่น แต่ในประเทศเขตร้อน เช่น ประเทศไทยการเลือกใช้กระจก 2 ชั้น ควรควบคู่ไปกับการใช้กระจกที่มีค่า SHGC ต่ำเสมอ และถ้าจะให้ลดความร้อนได้มากยิ่งขึ้นควรใช้กระจก Low-e

ค่าสะท้อนแสงสู่ภายนอก (Reflectance Out) เป็นค่าที่แสดงเป็นร้อยละของแสงทั้งหมดที่กระทบกระจกและสะท้อนสู่ภายนอก หรือ อาจแสดงเป็นสัดส่วน 0-1 กระจกที่มีค่า SHGC ต่ำมักจะมีค่าการสะท้อนแสงสู่ภายนอกสูง เป็นผลให้แสงผ่านเข้าในอาคารได้น้อย ไม่สามารถใช้ประโยชน์แสงธรรมชาติได้ ต้องเปิดไฟในเวลากลางวัน นอกจากนี้ยังมีกฎหมายควบคุมอาคาร กำหนดค่าการสะท้อนแสงออกสู่ภายนอกให้ไม่เกิน 30% ดังนั้น การเลือกกระจก ควรเลือกที่มีค่าแสงสะท้อนภายนอกต่ำ มิให้เกิดผลกระทบทางสายตา

ค่าแสงส่องผ่าน (Visible Light Transmittance, VT) ซึ่งแสดงเป็นร้อยละของแสงที่ผ่านกระจกเปรียบเทียบกับแสงทั้งหมดที่ตกกระทบ มีค่าเป็นร้อยละ หรือ สัดส่วน 0-1 ควรเลือกกระจกที่มีค่าแสงส่องผ่านมาก เพื่อจะได้ใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติ

วงกบและบานกรอบ ในการคำนวณ OTTV และ RTTV จะเน้นที่คุณสมบัติกระจกเป็นหลัก โดยไม่ได้นำคุณสมบัติของวงกบเข้ามารวม กล่าวคือ หน้าต่างที่ใช้วัสดุวงกบที่แตกต่างกัน เช่น ไม้ โลหะ UPVC จะคำนวณได้เท่ากันหมด แม้ว่าการวัดพื้นที่หน้าต่าง จะวัดรวมพื้นที่ของวงกบและบานกรอบด้วย ทั้งนี้ เพื่อให้วิธีการคำนวณซับซ้อนเกินไป

แต่พื้นที่หน้าต่าง อาจจะมีสัดส่วนที่เป็นวงกบและบานกรอบสูงถึง 30% ของพื้นที่หน้าต่างทั้งหมดได้ ถ้าเป็นหน้าต่างขนาดเล็ก ค่า U ของกระจกที่คำนวณได้เป็นค่า U ที่ศูนย์กลางของแผ่นกระจก (Center of Glass) ในกรณีที่ใช้กระจก 2 ชั้น วงกบจะนำความร้อนเร็วกว่ากระจก เป็นผลทำให้ ค่า U เฉลี่ยทั้งหน้าต่างที่รวมวงกบและบานกรอบด้วยแล้วสูงขึ้น และค่า SHGC ก็สูงขึ้นด้วย เพราะการคิดค่า SHGC ของหน้าต่างจะต้องรวมคุณสมบัติเป็นค่าการนำความร้อนเอาวงกบมาคิดเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม แม้ว่าผลของวัสดุวงกบและบานกรอบที่ต่างกัน จะไม่มีผลต่อการคำนวณ OTTV แต่ในการออกแบบก็ควรตระหนักถึงอิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจากวงกบ ดังนั้น ในกรณีที่ใช้กระจก 2 ชั้น หรือ Curtain Wall ควรพิจารณาเลือกใช้วงกบที่นำความร้อนต่ำ หรือ มีวัสดุนำความร้อนต่ำทำหน้าที่เป็น Thermal Break ในวงกบและบานกรอบ จะช่วยประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้น (รูปที่ 8-33)



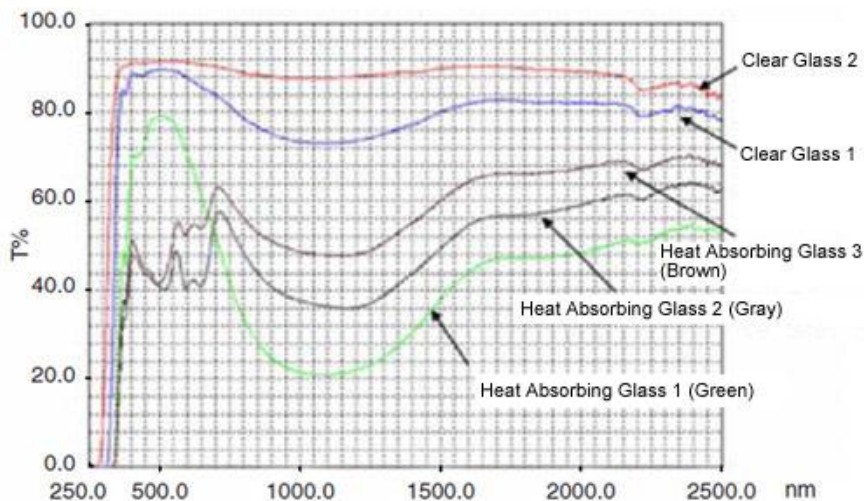
รูปที่ 8-33 การใช้วงกบและบานกรอบที่มี Thermal Break

(ที่มา: <https://thermeco.com.au/products/aluminium/residential/outward/hinged-doors/ec65-tb/>)

8.17 ชนิดของกระจกที่ใช้ในงานออกแบบอาคารประหยัดพลังงาน

กระจกใส (Clear Glass) เป็นกระจกที่ใช้ทั่วไป ความร้อนสามารถผ่านได้มาก ไม่ค่อยเหมาะกับการใช้สำหรับการออกแบบอาคารที่ผนังได้รับแดดโดยตรง แต่มีข้อดี คือ เห็นสีของทิวทัศน์ภายนอกได้ถูกต้อง ควรใช้ในกรณีที่มีชายคา อุปกรณ์บังแดด หรือ มีร่มเงาจากต้นไม้บังแดดให้หน้าต่าง

กระจกสี (Heat Absorbing Glass) กระจกสีสามารถลดความร้อนดีกว่ากระจกใส โดยถ้าเป็นกระจกสีชา หรือ สีเทา จะลดทั้งความร้อนและแสงสว่างที่เข้าสู่อาคาร กระจกเขียว จะเหมาะสมกับการออกแบบอาคารประหยัดพลังงานมากกว่า เพราะสามารถลดความร้อนได้มาก และยอมให้แสงสว่างผ่านมาก (รูปที่ 8-34)



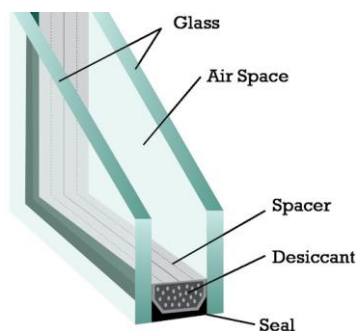
รูปที่ 8-34 กระจกเขียวยอมให้ช่วงคลื่นที่ตามองเห็นหรือแสงสว่าง

ผ่านมากกว่ากระจกสีเทาและสีชา และกันรังสีในช่วงอินฟราเรดหรือความร้อนได้มากกว่า

(ที่มา: <https://www.shimadzu.com/an/industry/electronicselectronic/chem0501005.htm>)

กระจกสะท้อนแสง (Reflective Glass) กระจกสะท้อนแสง สามารถลดความร้อนได้ดี แต่แสงสว่างจะเข้าได้น้อย กระจกที่ใช้ในการออกแบบอาคารควรมีค่า VT ในช่วงของหน้าต่างที่มีความสูงในระยะ 2 ม. จากพื้น โดยมีค่า VT ประมาณ 0.5

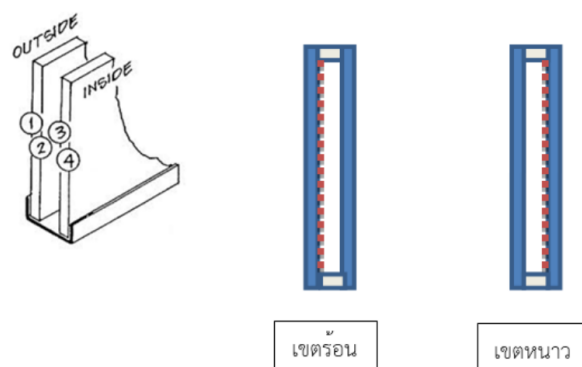
กระจก 2 ชั้น (Insulate Glass Unit, IGU) ประกอบด้วยกระจก 2 แผ่น และมีช่องว่างอากาศตรงกลางที่ถูกคั่นกลางโดยเฟรมอะลูมิเนียม (Spacer) ที่มีการบรรจุสารดูดความชื้น (Desiccant) ไว้ภายใน เพื่อป้องกันการควบแน่นของไอน้ำที่ผิวกระจกที่อยู่ในช่องว่าง (รูปที่ 8-35) ในช่องว่างอาจจะเป็นอากาศธรรมดา หรือ ก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน (Argon) เพื่อทำให้น้ำความร้อนได้ต่ำยิ่งขึ้น กระจกที่จำหน่ายส่วนใหญ่จะมีความหนาของช่องว่างอากาศประมาณ 12 mm หรือ 6 mm ข้อดีของกระจก 2 ชั้น นอกจากด้านการประหยัดพลังงานแล้วยังสามารถลดเสียงรบกวนจากภายนอกได้



รูปที่ 8-35 โครงสร้างของกระจก IGU

(ที่มา: Insulating Glass)

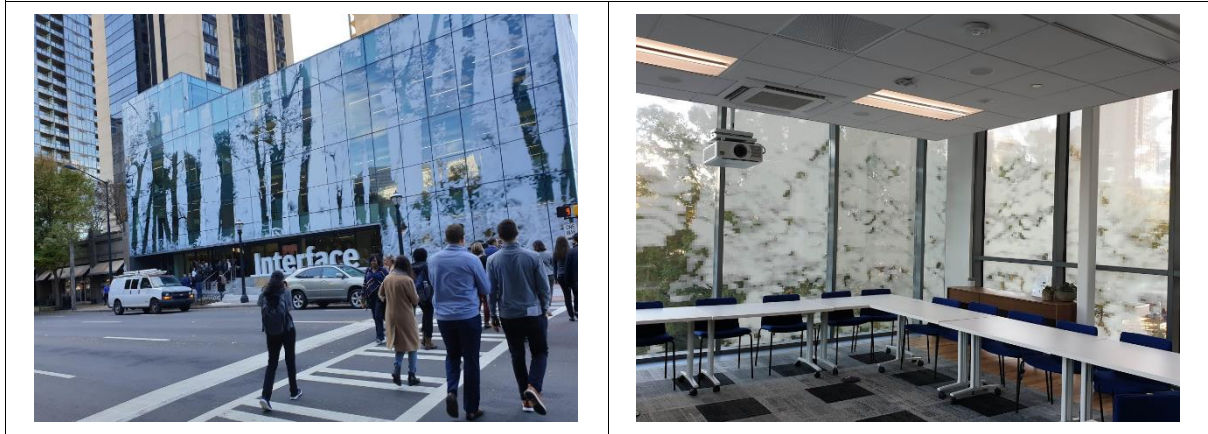
กระจก Low-e (Low Emissivity) ในอาคารที่ต้องการให้ประหยัดพลังงานมากยิ่งขึ้น จะใช้กระจก 2 ชั้น ชนิด Low-e โดยผิวที่เป็น Low-e อยู่ที่ด้านในด้านหนึ่งในช่องว่างอากาศ สำหรับการติดตั้งกระจก Low-e ในประเทศเขตร้อน จะเป็นลักษณะป้องกันความร้อนไหลเข้า ดังนั้น จะต้องติดตั้งให้ผิว Low-e อยู่ผิวที่ 2 หรือ ผิวด้านในช่องว่างของกระจกแผ่นนอก (รูปที่ 8-36) ส่วนในประเทศเขตหนาวจะติดตั้งให้ผิว Low-e อยู่ผิวที่ 3 หรือ ที่ผิวด้านในช่องว่างอากาศของกระจกแผ่นใน



รูปที่ 8-36 ตำแหน่งของผิว Low-e ในกระจก 2 ชั้น

(ที่มา: เอกสารประกอบการบรรยายหลักสูตรผู้ตรวจประเมินค่าอนุรักษ์พลังงาน)

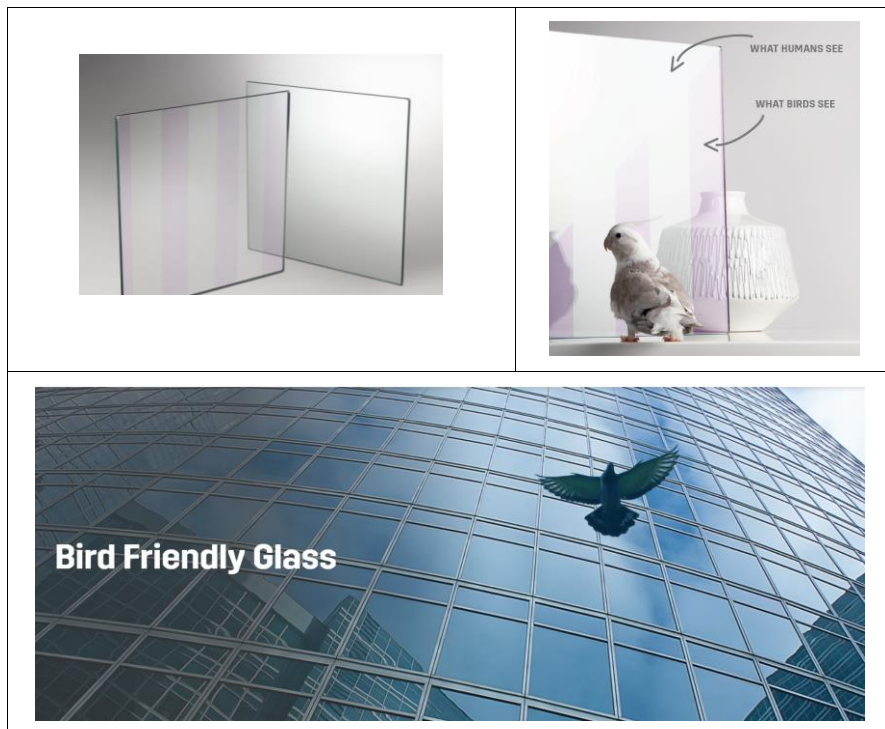
กระจกพิมพ์ลาย (Digital Printing Glass) เป็นกระจกที่ใช้ระบบการพิมพ์ลวดลายแบบดิจิทัล ซึ่งมีหลายเทคนิค เช่น พิมพ์บนกระจก หรือ พิมพ์ลงบนแผ่นฟิล์มที่แทรกตรงกลางระหว่างฟิล์ม PVB 2 แผ่น ซึ่งทำหน้าที่ยึดประกบแผ่นกระจก (Laminate) แผ่นนอกและแผ่นใน ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถแก้ปัญหาหลายเรื่องได้พร้อมกัน คือ การลามิเนต เป็นการเพิ่มความปลอดภัย ในกรณีที่กระจกแตก มีความสวยงามสามารถออกแบบลวดลายเฉพาะโครงการ หรือ ทำภาพใหญ่เท่าตัวอาคารจากลวดลายบนกระจกแต่ละแผ่นที่มาต่อต่อกัน สามารถกำหนดความโปร่งแสง หรือ ความทึบแสงได้ตามต้องการ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อค่า SHGC และค่า VT (รูปที่ 8-37)



รูปที่ 8-37 ด้านนอกและด้านในอาคารที่ใช้กระจก Digital Print

(ที่มา: ผู้เขียน)

กระจกประหยัดพลังงานพร้อมการป้องกันนกชน ปัญหาอันหนึ่งของการใช้กระจกสะท้อนแสงขนาดใหญ่ คือ มีนกจำนวนมากบินชนกระจก เพราะนกไม่สามารถแยกได้ระหว่างภาพต้นไม้ ท้องฟ้าที่เห็นในกระจกกับท้องฟ้าจริง ระบบอาคารเขียวมาตรฐาน LEED version 3 ได้ตระหนักถึงปัญหานี้ จึงได้พัฒนา Pilot Credit ที่ 55 - Bird Collision Deterrence เพื่อให้ผู้ออกแบบคำนึงถึงการแก้ปัญหาเรื่องนก ซึ่งเป็นสัตว์สำคัญในระบบนิเวศ การแก้ปัญหาในการออกแบบ อาจทำได้โดยการใช้กระจก Ceramic Frit ที่พิมพ์ลายจุดเล็ก ๆ ลงบนกระจก ทำให้นกรู้ได้ว่าเป็นอาคารไม่ใช่ท้องฟ้า ซึ่งการทำลวดลายดังกล่าวก็สามารถลดความร้อน หรือ ค่า SHGC ได้ หรือ อีกวิธีหนึ่ง คือ การเคลือบกระจกด้วยยูวี (UV Coating Technology) ตามนุษย์ไม่สามารถมองเห็น UV แต่นกสามารถมองเห็นได้ (รูปที่ 8-38) โดยที่อาคารยังมีคุณสมบัติประหยัดพลังงานและภาพลักษณ์ของกระจกอาคารยังคงเดิม



รูปที่ 8-38 การเคลือบผิวกระจกด้วย UV ทำให้นกสามารถแยกได้ระหว่างกระจกและท้องฟ้า

(ที่มา: <https://www.guardianglass.com/us/en/products/glass-type/bird-friendly>)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

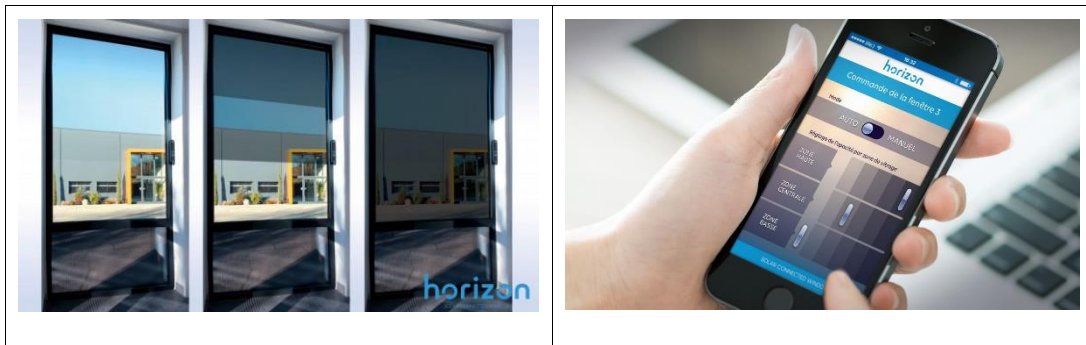
กระจกปรับเปลี่ยนคุณสมบัติได้ (Dynamic Glazing) เป็นกระจกที่สามารถปรับค่า SHGC และค่า

VT ได้ตามสภาพอากาศภายนอก ทำให้อาคารสามารถประหยัดพลังงาน และเพิ่มความเป็นส่วนตัวได้ การปรับเปลี่ยนได้อาจจะเป็นลักษณะ on-off หรือ Switchable คือ เปลี่ยนระหว่างกระจกที่มีความใสแสงผ่านได้ หรือ ฝ้าผ้าที่แสงผ่านได้แต่ไม่สามารถมองเห็น (รูปที่ 8-39) หรือ เป็นกระจกที่สามารถปรับค่า SHGC และ VT ได้ในช่วงที่กำหนด ซึ่งกระจกปรับค่าได้บางชนิด ยังสามารถทำงานผ่านระบบ IOT เชื่อมต่อกับข้อมูลสภาพอากาศ เพื่อปรับค่าให้แสงผ่านกระจกได้เหมาะสม (รูปที่ 8-40)



รูปที่ 8-39 กระจกสามารถปรับเป็นกระจกฝ้าเมื่อแดดมากระทบ

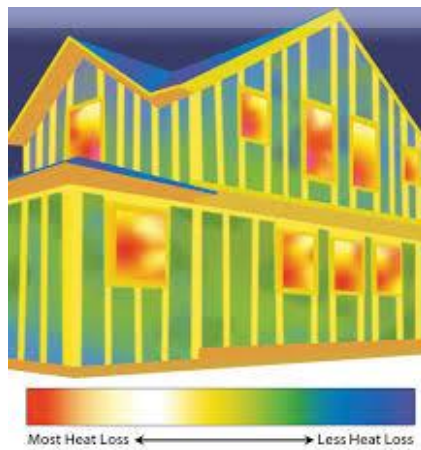
(ที่มา: www.glassonweb.com/article/switchon-intelligent-glass-homes)



รูปที่ 8-40 กระจกปรับค่า SHGC และ VT ได้ ทำงานผ่านระบบ IOT เพื่อเชื่อมต่อกับข้อมูลสภาพอากาศและมือถือ
(ที่มา: <https://glasstimes.co.uk/news/connected-smart-glass-window/>)

8.18 การลดสะพานความร้อน

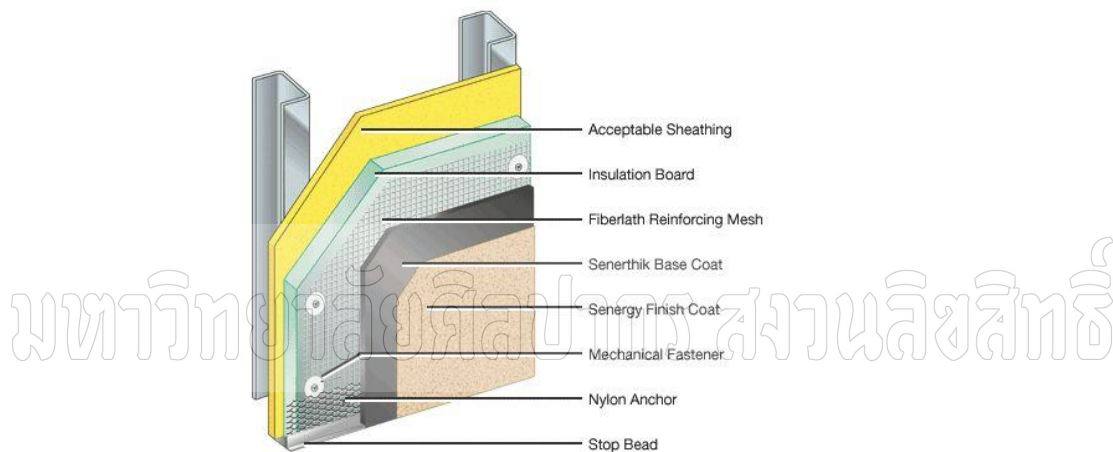
สะพานความร้อน คือ ส่วนของอาคารที่นำความร้อนเร็วกว่าส่วนอื่น ๆ ทำให้ความร้อนไหลผ่านจุดนี้มาก แม้ว่าผลของสะพานความร้อนมิได้มีรวมอยู่ในสมการ คำนวณ OTTV แต่การออกแบบควรต้องคำนึงการลดความร้อนผ่านสะพานความร้อนด้วย ส่วนของอาคารที่สามารถเป็นสะพานความร้อน ได้แก่ โครงสร้างโลหะผนังภายนอกอาคาร (รูปที่ 8-41) วงกบและบานกรอบโลหะ ส่วนของอาคารที่ยื่นออกไปจากผนังและเป็นวัสดุนำความร้อนเร็ว เช่น กันสาดคอนกรีต หรือ ขอบพื้นคอนกรีตกับผนังภายนอกซึ่งได้รับแดด



รูปที่ 8-41 สะพานความร้อน (Thermal Bridge) ผ่านโครงคร่าวผนัง
(ที่มา: <https://www.buildinggreen.com/primer/thermal-bridging>)

ระบบผนัง EIFS (Exterior Insulation Finish System) เป็นระบบผนังอาคารที่มีฉนวนอยู่ภายนอกโครงสร้าง (รูปที่ 8-42) ซึ่งมีการพัฒนามานานมากตั้งแต่ประมาณปี ค.ศ. 1960 ประกอบด้วย วัสดุผนังหลายชั้น คือ แผ่นรองฉนวน ฉนวน EPS ตาข่าย ระบบปูนฉาบปิดผิวชั้นสุดท้ายที่ผสมสี เป็นระบบผนังที่สามารถแก้ปัญหาเรื่องสะพานความร้อนของเปลือกอาคาร มีการใช้มากในประเทศสหรัฐอเมริกา ส่วนในประเทศไทย มีการนำมาใช้ในการออกแบบอาคารประหยัดพลังงานอยู่บ้าง เช่น อาคารศูนย์ราชการฯ ถนนแจ้งวัฒนะ (รูปที่ 8-43) ระบบดังกล่าวไม่ค่อยมีการใช้แพร่หลายในประเทศไทย เนื่องจากเป็นระบบผนังที่ต้องใช้ช่างเฉพาะในการก่อสร้าง

นอกจากนี้ปัจจุบันก็มีการทำผนังที่มีฉนวนอยู่นอกผนังหลัก คล้ายระบบ EIFS เรียก ระบบผนัง EIT (External Thermal Insulation) หรือ EWIS (External Wall Insulation System) แต่วัสดุปิดผิวภายนอกเป็นโลหะทำสำเร็จ ซึ่งแต่ละบริษัท จะมีวิธีการติดตั้งฉนวนนอกผนัง หรือ โครงสร้างที่แตกต่าง ในรายละเอียดของชั้นวัสดุประกอบผนังอยู่บ้าง (รูปที่ 8-44)



รูปที่ 8-42 ระบบผนัง EIFS ซึ่งมีชั้นฉนวนอยู่นอกโครงสร้างเพื่อลดสะพานความร้อน

(ที่มา: <https://www.pinterest.com/pin/198791771022241215/>)



รูปที่ 8-43 ตัวอย่างอาคารที่ใช้ผนังระบบ EIFS - ศูนย์ราชการแจ้งวัฒนะ



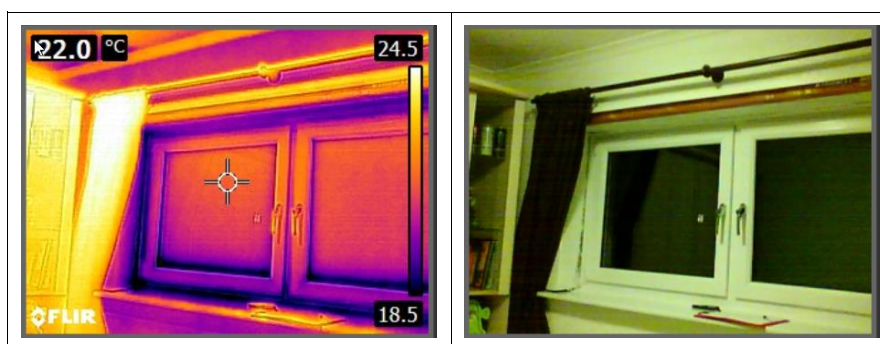
รูปที่ 8-44 แผง EIT ที่มีฉนวนภายนอกผนังหลักผิวเป็นโลหะ

(ที่มา: <https://www.ductal.com/en/architecture/external-thermal-insulation>)

8.19 การลดการรั่วซึมของอากาศ (Infiltration)

การรั่วซึมของอากาศผ่านเปลือกอาคารเป็นสาเหตุสำคัญของการสิ้นเปลืองพลังงานการปรับอากาศ อาคารที่สามารถประหยัดพลังงานได้มาก จะต้องอับอากาศ (Airtight) การรั่วสามารถเกิดได้ที่ขอบบานหน้าต่าง ประตูกับวงกบ (รูปที่ 8-45) วัสดุหน้าต่างแต่ละชนิด จะสามารถปิดได้แน่นไม่เท่ากัน เช่น หน้าต่างไม้ จะมีการรั่วมากกว่าอะลูมิเนียม และ UPVC อัตราการรั่วซึม (Air Leakage Rate) ของหน้าต่างที่ได้เครื่องหมาย Energy Star จะอยู่ที่ไม่เกิน 0.3 ลูกบาศก์ฟุตต่อวินาทีต่อตารางฟุตของพื้นที่หน้าต่าง

ส่วนการออกแบบเพื่อลดการรั่วซึมที่ประตูสามารถทำได้ โดยการออกแบบประตู 2 ชั้น หรือ ใช้ประตูหมุน (Revolving Door) ตรงทางเข้าสู่อาคาร



รูปที่ 8-45 การรั่วซึมของอากาศผ่านตามขอบของหน้าต่าง

(ที่มา: <https://fenestrolgy.co.uk/course/thermography-surveys/thermo-5/>)

8.20 แนวทางการออกแบบเพื่อลดความร้อนของหลังคา

แนวทางการลดความร้อนของหลังคา จะคล้ายกับการลดความร้อนของผนัง คือ ต้องใส่ฉนวนกันความร้อน ซึ่งจากการทดลองคำนวณ พบว่า ถ้าใส่ฉนวนประสิทธิภาพสูง คือ ฉนวนที่มีค่า R เท่ากับ หรือมากกว่า $1.25 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ส่วนใหญ่จะผ่านเกณฑ์ตามกฎหมาย และถ้าใช้หลังคาเป็นสื่อนอนด้วยจะช่วยลดความร้อนที่เข้าสู่อาคารเพิ่มขึ้น และยังช่วยลดปัญหาเกาะความร้อนในเมือง

ขนาดของช่องแสงหลังคา ในกรณีที่หลังคามีช่องแสง จากการทดลองคำนวณ พบว่า ขนาดของช่องแสงหลังคาที่สามารถผ่านค่า RTTV ได้ จะมีพื้นที่ประมาณ 3% ของพื้นที่ทั้งหมด และในคู่มือการประเมินอาคารประหยัดพลังงานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ของกระทรวงพลังงาน ได้กำหนดเกณฑ์ที่ให้คะแนนสำหรับขนาดช่องแสงที่มีพื้นที่ 1% สำหรับกลุ่มอาคารสาธารณะ และอาคารพักอาศัย ซึ่งตัวเลขดังกล่าว เป็นเพียงแนวทางในการออกแบบเบื้องต้น เพราะขึ้นอยู่กับค่า U และ SHGC ของกระจกที่ใช้ ซึ่งควรพิจารณารายละเอียดเพิ่มเติม

หลังคาเย็น (Cool Roof) เป็นการเลือกวัสดุหลังคา ที่มีค่าการสะท้อนความร้อนสูง ซึ่งทำให้การดูดกลืนความร้อนที่ผิวหลังคาน้อยลง มีผลทำให้ความร้อนที่เข้าสู่ใต้หลังคาลดลง กระทรวงพลังงาน ได้มีการกำหนดฉลากประหยัดพลังงานเบอร์ 5 สำหรับกระเบื้องหลังคา ประเภทกระเบื้องซีเมนต์ กระเบื้องคอนกรีต และกระเบื้องดินเผา โดยการใช้ค่าการสะท้อนรังสี (Solar Reflectance) ≥ 55 (มีค่าตั้งแต่ 0-100 หรือ 0-1)

ในประเทศสหรัฐอเมริกา โครงการ Energy Star ได้มีการใช้ฉลากวัสดุหลังคาประสิทธิภาพสูง เช่นกัน แต่กำหนดค่าแยกตามความลาดชันของหลังคา และอายุการใช้งาน คือ

- หลังคาที่มีความลาดชันต่ำ (Low-sloped Roof) คือ $\leq 2 : 12$ (ความสูง : แนวราบ) ต้องมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ ≥ 0.65 สำหรับหลังคาใหม่ และต้องมีค่า ≥ 0.5 ที่เวลาผ่านไปแล้ว 3 ปี
- ส่วนถ้าเป็นหลังคาที่มีความลาดชันสูง (Steep-sloped Roof) คือ $> 2 : 12$ ต้องมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ ≥ 0.25 สำหรับหลังคาใหม่ และต้องมีค่า ≥ 0.15 ที่เวลาผ่านไปแล้ว 3 ปี

นอกจากการเลือกวัสดุหลังคาที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงแล้ว ในการปรับปรุงอาคารเดิม ที่ไม่มีฝ้าเพดาน หรือ มีฝ้าเพดานแต่ไม่สะดวกที่จะรื้อฝ้าเพื่อปูนฉาบฝ้าเพดาน เนื่องจากมีคนทำงานอยู่ในห้อง อาจใช้การทาสีลดความร้อนบนหลังคาด้วยสีเซรามิก Ceramic Coating (รูปที่ 8-46) หรือ สี Thermal Barrier Paint สำหรับพื้น หรือ ทาบนหลังคาโดยตรง ก็จะสามารถช่วยลดความร้อน



รูปที่ 8-46 การพ่นบนหลังคาด้วย Ceramic Coating

(ที่มา: <http://www.apbon.co.th/>)

ในกรณีที่เป็นการเขียว การพิจารณาคุณสมบัติของหลังคา นอกจากดูที่ค่า Solar Reflectance แล้วยังมีเกณฑ์ที่ใช้ค่า **Solar Reflectance Index (SRI)** ซึ่งเป็นค่าที่เกิดจากการนำคุณสมบัติในการสะท้อนรังสีอาทิตย์ (Solar Reflectance) และคุณสมบัติในการคายรังสีความร้อน (Emittance) มาคิดร่วมกัน เพื่อต้องการลดปัญหาเกาะความร้อนในเมืองด้วย (รูปที่ 8-47) เช่น ใน LEED v 4.1 ได้กำหนดค่า SRI แยกตามความลาดชันของหลังคา คือ

- หลังคาที่มีความลาดชันต่ำ (Low-slope Roof) คือ $\leq 2 : 12$ (ความสูง : แนวราบ) ต้องมีค่า SRI ≥ 82 สำหรับหลังคาใหม่ และต้องมีค่า ≥ 64 เมื่อเวลาผ่านไปแล้ว 3 ปี
- ส่วนถ้าเป็นหลังคามีความลาดชันสูง (Steep-sloped Roof) คือ $> 2 : 12$ ต้องมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ ≥ 39 สำหรับหลังคาใหม่ และต้องมีค่า ≥ 32 เมื่อเวลาผ่านไปแล้ว 3 ปี

Color	R	SRI
Aluminum Zinc (GL)	0.67	56
Oyster White (WH)	0.52	59
Polar White (PW)	0.66	79
Light Stone (LS)	0.50	58
Hawaiian Blue (BL)	0.32	42
Sahara Tan (ST)	0.36	38
Ash Grey (AS)	0.37	40
Burnished Bronze (BR)	0.28	29
Colony Green (GR)	0.34	36
Fern Green (FG)	0.28	29
Almond (AL)	0.63	76
Snow White (SW)	0.65	79
Brownstone (BS)	0.44	48
Copper Metallic (CM)	0.46	58
Scarlet Red (SR)	0.42	47
Harbor Blue (HB)	0.28	29
Hunter Green (HG)	0.28	29

รูปที่ 8-47 ค่า R (Reflectivity) และ SRI (Solar Reflectance Index) ของหลังคาโลหะสีต่าง ๆ

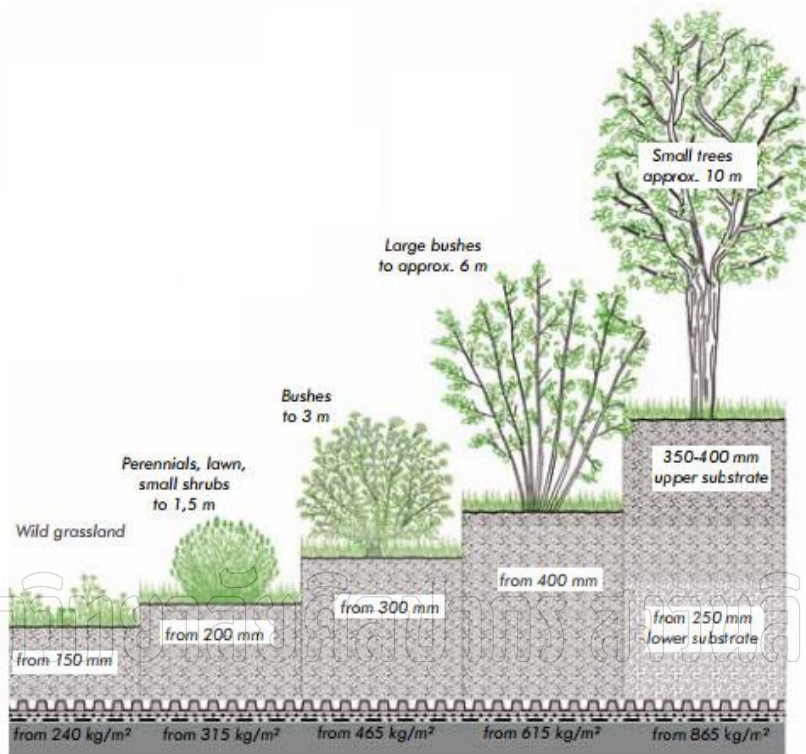
(ที่มา: <http://www.deansteelbuildings.com/products/panels/sr-sri-by-color/>)

หลังคาเขียว (Green Roof) เป็นการทำให้หลังคาสามารถปลูกพืช หรือ ต้นไม้ โดยการใช้ดิน ทับหลังคา การทำให้หลังคาสามารถลดความร้อนได้ เพราะมีชั้นดินทำหน้าที่เพิ่มความต้านทานความร้อนและ หน่วงความร้อนที่ถ่ายเทลงมาจากตัวอาคาร แต่ขณะเดียวกัน จะได้ข้อดีอื่น ๆ เพิ่ม คือ เรื่องการลดเกาะความร้อน ในเมือง การลดการไหลนองของน้ำ (Storm Water Runoff) ออกนอกพื้นที่โครงการ การทำให้ผู้ใช้อาคารได้มี โอกาสสัมผัสใกล้ชิดธรรมชาติ เช่น นก ผีเสื้อ ได้กลับมาในเมือง

หลังคา Green Roof สามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ Intensive Green Roof และ Extensive Green Roof ขึ้นอยู่กับความหนาของดิน

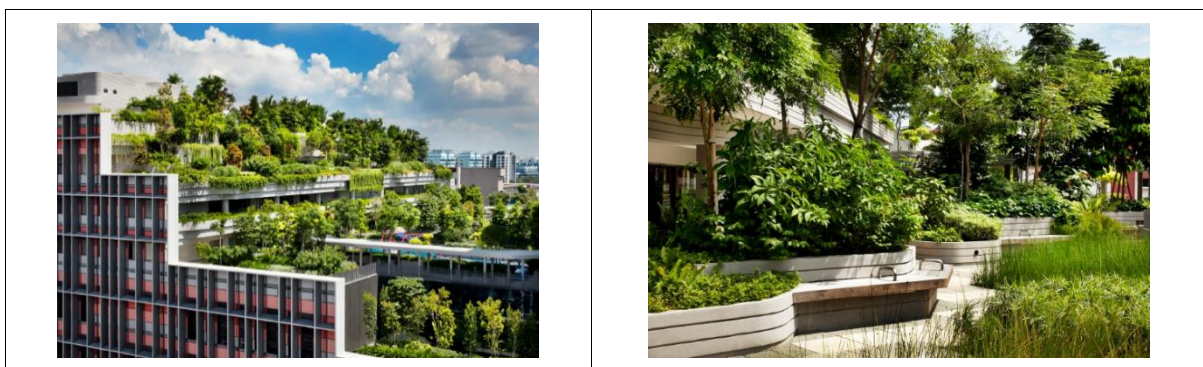
- **Intensive Green Roof** จะมีชั้นดินสำหรับการปลูกต้นไม้ที่หนากว่า คือ ชั้นต่ำประมาณ 30 ซม. สามารถรองรับการปลูกไม้พุ่ม ต้นไม้ใหญ่ โดยจะเพิ่มน้ำหนักให้กับโครงสร้าง ประมาณ 390 - 732 กก./ตร.ม. (ASHRAE Green Guide, p.97) (รูปที่ 8-48, 8-49)

- **Extensive Green Roof** จะมีชั้นดินปลูกที่บางกว่า โดยมีชั้นดินตั้งแต่ 2.5 - 15 ซม. ซึ่งอาจมีการตั้งต้นไม้ที่ปลูกในกระถางร่วมด้วย น้ำหนักดินที่เพิ่มขึ้นจะประมาณ 49 - 73 กก./ตร.ม. (ASHRAE Green Guide, p.97) เหมาะกับอาคารที่มีพื้นที่หลังคาขนาดใหญ่มาก ๆ หรือ ต้องการใช้พื้นที่กว้าง ๆ เพื่อทำกิจกรรมนอกประสงค์ (รูปที่ 8-50, 8-51) หรือ เหมาะกับอาคารที่มีพื้นที่หลังคาขนาดใหญ่ เช่น ซูเปอร์มาร์เกต (รูปที่ 8-52) โดยอาจจะใช้ร่วมกับการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา เพื่อจะได้ไม่มีปัญหาเรื่องเงาของต้นไม้ทาบบนแผง



รูปที่ 8-48 ความหนาของดินกับขนาดต้นไม้ที่สามารถปลูกได้

(ที่มา: <https://myrooff.com/intensive-green-roof/>)



รูปที่ 8-49 อาคาร Kampung Admiralty ประเทศสิงคโปร์

ได้รับรางวัล World Architecture Festival 2018 ใช้ Intensive Green Roof ปลูกต้นไม้ที่เป็นอาหาร เช่น ลำไย ผักสวนครัว สำหรับคนในโครงการ

(ที่มา: <https://www.designboom.com/architecture/woha-kampung-admiralty-singapore-10-30-2018/>)

	
รูปที่ 8-50 หลังคาแบบ Intensive Green Roof ของอาคาร Marina Barrage ประเทศสิงคโปร์ (ที่มา: https://elmich.com.au/marina-barrage-extensive-greenroof/)	รูปที่ 8-51 การใช้พื้นที่สวน Intensive Green Roof ของอาคาร Marina Barrage ประเทศสิงคโปร์ สำหรับกิจกรรมนอกประสงค์ (ที่มา: https://www.pub.gov.sg/marinabarrage/aboutmarinabarrage/greenfeatures)



รูปที่ 8-52 อาคารซูเปอร์มาร์เก็ตในประเทศอิตาลี ใช้ Extensive Green Roof น้ำหนักประมาณ 60 กก./ตร.ม.

(ที่มา: <https://www.geoplastglobal.com/en/projects/supermarket-extensive-green-roof-bologna-italy/>)

สำหรับการคำนวณความร้อนที่ลดลงจากการใช้ Green Roof นั้น ทาง ASHRAE (ASHRAE Green Guide, p.98) ได้ให้ความเห็นว่า เป็นเรื่องที่กำหนดให้ชัดเจนได้ค่อนข้างยาก เพราะนอกจากความหนาของดิน ที่มีผลต่อการลดความร้อนแล้วยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ อีก เช่น ต้นไม้สามารถบังแดดให้กับผิวดินซึ่งช่วยลดความร้อน และขบวนการคายน้ำของพืช (Evapotranspiration) ก็สามารถลดความร้อนในดิน ซึ่งโปรแกรมการจำลองพลังงานไม่สามารถที่จะนำผลของการระเหยของความร้อนขึ้นจากดินมาคิดรวมด้วย โปรแกรมการจำลองพลังงานบางโปรแกรม อาจจะทำให้ใส่ค่านำเข้า คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของดิน (k-value) ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ของดิน และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนความร้อน (Soil Surface Absorbtivity) ซึ่งค่าปกติค่าสัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนความร้อน ที่โดยปกติจะประมาณ 0.7 แต่ได้มีการวิจัยและพบว่า ค่านี้จะแตกต่างกันไปในแต่ละเมืองในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยบางเมืองจะมีค่านี้ที่ต่ำกว่าปกติที่ใช้ เพราะมีอิทธิพลจากการระเหยของน้ำฝนที่ตกลงมาบนดินเข้ามารวม เช่น เมือง Seattle พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนความร้อนเพียง 0.36

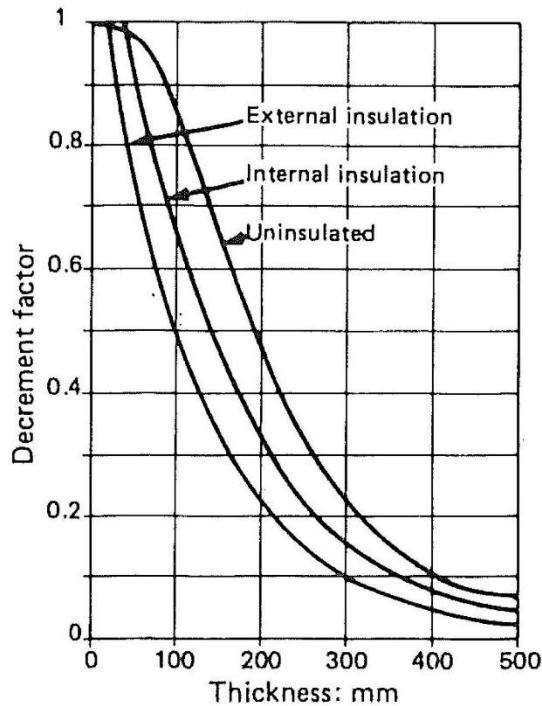
สำหรับการคำนวณค่า RTTV ตามกฎหมายอนุรักษ์พลังงานฯ ก็ยังไม่พบการกำหนดหลักเกณฑ์การคำนวณสำหรับกรณีที่มีการใช้ Green Roof วิธีการลดความร้อนส่วนใหญ่จะเน้นที่การใช้ฉนวน

การทำ Green Roof จะมีค่าใช้จ่ายสูง ทั้งค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและบำรุงรักษาให้มีสภาพดีอยู่ตลอด แต่ได้ประโยชน์ในด้านสิ่งแวดล้อม การทำ Green Roof จึงมักใช้ในอาคารเขียว เพราะมีเกณฑ์การให้คะแนนกับเรื่องเหล่านี้ เช่น ในมาตรฐานอาคารเขียวระบบ LEED

8.21 ปัจจัยที่ไม่ได้รวมในการคำนวณ OTTV และ RTTV

การคำนวณ OTTV และ RTTV เป็นการคำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านส่วนที่บดบังแสงและโปร่งแสง เพื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ตามกฎหมาย ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน เพื่อให้ผู้ออกแบบได้เกิดความตระหนักในปัจจัยที่เป็นสาเหตุหลักของการสิ้นเปลืองพลังงาน แต่ก็มีปัจจัยอื่น ๆ ซึ่งไม่ได้รวมไว้ใน การคำนวณ แต่สามารถมีผลต่อการใช้พลังงานได้ ซึ่งหากผู้ออกแบบได้คำนึงถึงสิ่งเหล่านี้ด้วย ก็จะช่วยให้ประหยัดพลังงานยิ่งขึ้น คือ

- การคำนวณ OTTV และ RTTV ไม่ได้คิดผลของเงาที่เกิดขึ้นบนผนังที่บดบัง ซึ่งเกิดจากอุปกรณ์บังแดด หรือ การยื่นชายคา การออกแบบที่มีร่มเงาบนผนังที่บดบังสามารถช่วยลดการถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคารได้ ซึ่งอาจเกิดจากการออกแบบให้รูปทรงอาคารนั้นบังแดดให้กับบางส่วนของอาคาร
- การคำนวณไม่ได้รวมคุณสมบัติของวงกบ บานกรอบ วงกบของ Curtain Wall แต่เป็นคุณสมบัติกระจกอย่างเดียว ซึ่งการเลือกวงกบที่ดีที่สามารถนำความร้อนต่ำและปิดได้แน่น จะลดทั้งการนำความร้อน และการรั่วซึมของอากาศขึ้นที่เป็นภาระความร้อนให้ระบบปรับอากาศ
- การคำนวณไม่ได้รวมอิทธิพลของ Thermal Bridge ที่อยู่ในผนังที่บดบัง ที่เกิดจากโครงสร้างและส่วนยื่นต่าง ๆ เช่น ขอบพื้น ซึ่งมีผลทำให้ค่า R ของผนังที่บดบังลดลงได้ การออกแบบที่สามารถตัดลดการถ่ายเทความร้อนผ่าน Thermal Bridge เช่น การใช้ฉนวนที่ต่อเนื่องกันความร้อนไว้ภายนอกโครงสร้าง หรือ หุ้มกันส่วนที่เป็น Thermal Bridge สามารถช่วยประหยัดพลังงานได้
- ผนังที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชั้น การคำนวณไม่ได้รวมอิทธิพลอันเกิดจากการเรียงลำดับชั้นวัสดุที่แตกต่างกัน เช่น การวางสลับของตำแหน่งของฉนวนไว้ด้านนอกหรือด้านในของผนัง จะคำนวณ OTTV ได้ค่าที่เท่ากัน แต่ในทางปฏิบัติผลของ Decrement Factor จะแตกต่างกัน โดยการวางฉนวนไว้ภายนอกจะให้ค่า Decrement Factor ที่ต่ำกว่าไว้ภายใน (Szokolay, 1987, p.25.) (รูปที่ 8-53) ซึ่งการพิจารณาความเหมาะสมในการใช้จะต้องดูความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศในระหว่างวัน ความหนาของผนัง เวลาที่ใช้พื้นที่ภายในอาคาร และเวลาในการหมุนเวียนประกอบกัน โดยใช้โปรแกรมการจำลองพลังงานอื่นที่สามารถคำนวณผลในลักษณะนี้ได้



รูปที่ 8-53 Decrement Factor กับตำแหน่งของฉนวน

(ที่มา: Szokolay, 1987, p.25)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

8.22 สรุป

คุณภาพของเปลือกอาคาร มีความสำคัญมากต่อการประหยัดพลังงานในการปรับอากาศ ผู้ออกแบบควรเข้าใจการถ่ายเทความร้อนระหว่างอาคารและสภาพแวดล้อม และเกณฑ์การออกแบบเปลือกอาคารตามกฎหมาย รวมทั้งหลักเกณฑ์และวิธีการคำนวณ จึงจะสามารถเชื่อมโยงแนวทางต่าง ๆ ในการออกแบบเปลือกอาคารกับตัวแปรในสมการได้ การลดความร้อนผ่านผนังที่บดจะต้องใช้วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ หรือ การเสริมฉนวนในผนัง ส่วนการออกแบบหน้าต่างและผนังโปร่งแสง จะต้องคำนึงถึงการกำหนดขนาดหน้าต่างที่ไม่ใหญ่จนเกินไป ควรเลือกกระจกที่มีค่า U ต่ำ และมีค่า SHGC ต่ำ แต่แสงสว่างสามารถผ่านได้มาก การออกแบบเปลือกอาคารต้องคำนึงปัจจัยอื่น ๆ ที่ยังไม่ได้รวมในขอบเขตตามกฎหมาย แต่ทำให้เปลือกอาคารมีประสิทธิภาพพลังงานมากขึ้นทั้งการลดความร้อน การป้องกันอากาศรั่ว และการป้องกันความชื้น การกำหนดขนาดหน้าต่างและเลือกกระจกที่สามารถใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติได้ดี ตลอดจนการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากเปลือกอาคาร ซึ่งเป็นการคิดในเชิงบูรณาการ เพื่อให้ได้เปลือกอาคารที่มีสมรรถนะในการใช้งานสูงในหลายมิติพร้อมกัน

เอกสารอ้างอิง

- กฎกระทรวง ฉบับที่ ๔๘ (พ.ศ. ๒๕๔๐) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. ๒๕๒๒.
กระทรวงพลังงาน. คู่มือแบบประเมินอาคารประหยัดพลังงานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อาคารที่ไม่ใช่อาคาร
พักอาศัย (อาคารสาธารณะ) (NR-O 49.02) (NR-S 49.02) (NR-H 49.02). กรุงเทพมหานคร พ.ศ.
2553.
- กระทรวงพลังงาน. คู่มือแบบประเมินอาคารประหยัดพลังงานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อาคารพักอาศัย (R-
49.02). กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2553.
- กระทรวงพลังงาน. ประกาศกระทรวงพลังงาน เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการคำนวณในการออกแบบอาคารแต่ละ
ระบบ การใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร และการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่าง ๆ ของอาคาร
พ.ศ. 2552.
- กระทรวงพลังงาน. หลักเกณฑ์เฉพาะผลิตภัณฑ์หลังคากระเบื้อง. เข้าถึงได้จาก
https://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=43304
- กองกำกับและอนุรักษ์พลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. เอกสารประกอบการบรรยาย
หลักสูตรผู้ตรวจประเมินค่าอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2562.
- ประกาศราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 126 ตอนที่ 12 ก. 20 กุมภาพันธ์ 2552. กฎกระทรวง กำหนดประเภท หรือ
ขนาดของอาคาร และมาตรฐาน หลักเกณฑ์ และวิธีการ ในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์
พลังงาน พ.ศ. 2552.
- ประกาศราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 126 ตอนที่ 23 ก. 8 กันยายน 2552. กฎกระทรวงกำหนดกระจุกเพื่อการ
อนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552.
- (ร่าง) ประกาศกระทรวงพลังงาน เรื่อง กำหนดค่ามาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน.
วัสดุประหยัดพลังงานเบอร์ 5. เข้าถึงได้จาก https://www.dede.go.th/ewt_dl_link.php?nid=43512
- ศูนย์ประสานงานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
กระทรวงพลังงาน. เอกสารประชุมทบทวน แก้ไขปรับปรุงร่าง ประกาศกระทรวงพลังงาน ภายใต้วง
กฎกระทรวง กำหนดประเภท หรือขนาดของอาคารและมาตรฐาน หลักเกณฑ์และวิธีการออกแบบ
อาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ..... , พฤษภาคม 2563.
- เอกสารข้อมูลผลิตภัณฑ์ คอนกรีตมวลเบา Q-CON. เข้าถึงได้จาก <https://qcon.co.th/>
- เอกสารข้อมูลผลิตภัณฑ์ ฉนวนกันความร้อนเอสซีจี รุ่น Stay Cool. เข้าถึงได้จาก
<https://www.scgbuildingmaterials.com/th/product/staycool>
- เอกสารข้อมูลผลิตภัณฑ์ Koolteg Insulation. เข้าถึงได้จาก <http://www.koolteg.com>
- A Publication of the Tilt-Up Concrete Association. Available from <https://tilt-up.org/tilt-uptoday/2017/08/08/composite-concrete-panels-the-future-for-tilt-up-walls/>
- ASHRAE. **ASHRAE Standard 90.1-2016 - Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings.** Atlanta: GA., 2016.
- ASHRAE. **ASHRAE GreenGuide: The Design, Construction, and Operation of Sustainable Buildings.** Third Edition, Atlanta, GA: 2010.

ASHRAE. **Standard 90.1-2016 User's Manual - ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2016**

Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. Atlanta: GA., 2016.

Bird collision deterrence. Available from <https://www.usgbc.org/credits/core-shell-existing-buildings-healthcare-new-construction-retail-nc-schools/v2009/pc55>

Can We Replace Foam Insulation?. Available from <https://www.buildinggreen.com/feature/can-we-replace-foam-insulation>

Eco Healthy Child Care. FAQs: Styrofoam. Available from <https://cehn.org/our-work/eco-healthy-child-care/ehcc-faqs/faqs-styrofoamtm/>

Energy Star Program Requirements for Residential Windows, Doors, and Skylight. Available from https://www.energystar.gov/products/building_products/residential_windows_doors_and_skylights

Measuring Performance. Air Leakage. Available from <https://www.efficientwindows.org/al.php>
New Glass Technology. Available from <https://www.newglasstech.com/?page=product&cat=Decoratief&product=digital-printing-pvb&lang=en>

Polyisocyanurate. Available from <https://en.wikipedia.org/wiki/Polyisocyanurate>

Protect Birds with Clear Results. Available from.

<https://www.guardianglass.com/us/en/products/brands/guardian-bird1st>

Szokolay, S.V. **Thermal Design of Buildings.** Canberra: RAIA Education Division, 1987.

The Fenestration Association of BC (FEN-BC). Reference Procedure for Simulating Spandrel U-Factors. Available from <https://www.fen-bc.org/content/view/resources-spandrel>

USGBC. LEED Reference Guide for Building Design and Construction v.4.1. Heat Island Reduction. Available from <https://cutt.ly/XyFyjgv>

What is Polyurethane Foam – Definition. Available from <https://www.thermal-engineering.org/what-is-polyurethane-foam-definition/>

แบบฝึกหัด

ให้คำนวณค่า U ของผนังที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุดังนี้

- 1) คอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 620 กก./ลบ.ม. หนา 10 ซม. ฉาบปูนสำหรับคอนกรีตมวลเบา ด้านนอกและด้านในด้านละ 1 ซม.
- 2) คอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 620 กก./ลบ.ม. หนา 10 ซม. ฉาบปูนสำหรับคอนกรีตมวลเบา ด้านนอกและด้านในด้านละ 1 ซม. ช่องว่างอากาศ 15 ซม. ผนังยิปซัม 1.2 ซม.
- 3) คอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 620 กก./ลบ.ม. หนา 10 ซม. ฉาบปูนสำหรับคอนกรีตมวลเบา ด้านนอกและด้านในด้านละ 1 ซม. ช่องว่างอากาศ 10 ซม. ผนังยิปซัม 1.2 ซม. ด้านหลังของแผ่นยิปซัมมีแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์กรุอยู่
- 4) คอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 620 กก./ลบ.ม. หนา 10 ซม. ฉาบปูนสำหรับคอนกรีตมวลเบา ด้านนอกและด้านในด้านละ 1 ซม. มีแผ่นโพลีไทรเร็นโฟม หนา 8.0 ซม. ช่องว่างอากาศ 2 ซม. และผนังยิปซัม 1.2 ซม. ด้านหลังของแผ่นยิปซัมมีแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ติดอยู่กับแผ่น
- 5) จากข้อมูลผลิตภัณฑ์กระจกข้างล่าง ระหว่างกระจก Energy Green กระจก Sky Blue และ กระจก Euro Grey ที่ความหนา 6 มม. เท่ากัน ท่านคิดว่ากระจกใดจะเหมาะสมในการออกแบบ อาคารประหยัดพลังงานมากที่สุด

Product Specification:

Type		Thickness (mm.)	Light Performances			Energy Performances					U Value			
			EN			EN	ISO	NFRC	EN	ISO	NFRC	EN	ISO	NFRC
			LT (%)	LR Out (%)	LR In (%)	SF (%)	SHGC (%)	SC		W/(m ² .K)		U-Summer W/(m ² .K)		
Dark Cool Grey (Dark Grey)	3.0	39	5	5	0.62	0.63	0.66	0.71	0.73	0.76	5.79	5.84	5.92	
	4.0	29	5	5	0.56	0.57	0.60	0.64	0.65	0.69	5.76	5.80	5.89	
	5.0	21	5	5	0.50	0.52	0.55	0.58	0.59	0.64	5.72	5.77	5.85	
	6.0	16	5	5	0.46	0.48	0.52	0.53	0.55	0.59	5.69	5.74	5.82	
Ocean Green	5.0	76	7	7	0.62	0.63	0.63	0.71	0.72	0.73	5.73	5.77	5.85	
	6.0	73	7	7	0.58	0.59	0.60	0.67	0.68	0.69	5.69	5.74	5.82	
	8.0	71	7	7	0.56	0.57	0.58	0.64	0.65	0.67	5.64	5.68	5.75	
	10.0	67	7	7	0.51	0.52	0.54	0.59	0.60	0.62	5.57	5.62	5.69	
	12.0	62	6	6	0.47	0.48	0.51	0.54	0.55	0.58	5.50	5.54	5.61	
Energy Green	4.0	69	7	7	0.54	0.55	0.56	0.62	0.63	0.64	5.76	5.80	5.88	
	5.0	65	6	6	0.50	0.51	0.53	0.57	0.58	0.60	5.73	5.77	5.85	
	6.0	60	6	6	0.46	0.47	0.50	0.53	0.54	0.57	5.69	5.74	5.82	
Sky Blue	6.0	58	6	6	0.57	0.58	0.60	0.66	0.67	0.69	5.69	5.74	5.82	
	8.0	50	5	5	0.51	0.52	0.54	0.59	0.60	0.62	5.63	5.67	5.75	
Euro Bronze	5.0	56	6	6	0.66	0.67	0.69	0.75	0.77	0.80	5.73	5.77	5.85	
	6.0	51	6	6	0.62	0.63	0.66	0.71	0.73	0.76	5.69	5.74	5.82	
Euro Grey	5.0	51	6	6	0.61	0.63	0.65	0.70	0.72	0.75	5.72	5.77	5.85	
	6.0	45	5	5	0.57	0.58	0.61	0.65	0.67	0.70	5.69	5.74	5.82	

รูปที่ 8-54 ข้อมูลกระจกสีชั้นเดียว

- 6) กระจกลามิเนตตามตารางข้างล่าง ชนิดใดที่สามารถลดความร้อนได้ดีที่สุด

Product Specification:

Type	Thickness (mm.)	Light Performances			Energy Performances						U Value		
		EN			EN	ISO	NFRC	EN	ISO	NFRC	EN	ISO	NFRC
		LT (%)	LR Out (%)	LR In (%)	SF (%)	SHGC (%)	SC			W/(m².K)		U-Summer W/(m².K)	
LAMITAG Clear (6+0.76+6)	12.76	85	8	8	0.70	0.71	0.72	0.80	0.82	0.83	5.41	5.45	5.51
LAMITAG Green (6+0.76+6)	12.76	71	7	7	0.53	0.54	0.56	0.60	0.62	0.64	5.41	5.45	5.51
LAMITAG Sky Blue (6+0.76+6)	12.76	56	6	6	0.51	0.52	0.55	0.59	0.60	0.63	5.40	5.44	5.51
LAMITAG Euro Bronze (6+0.76+6)	12.76	49	5	6	0.54	0.56	0.59	0.62	0.64	0.68	5.41	5.45	5.51
LAMITAG Euro Grey (6+0.76+6)	12.76	44	5	5	0.50	0.52	0.56	0.58	0.59	0.64	5.40	5.44	5.51
LAMITAG Blue Green (6+0.76+6)	12.76	60	6	6	0.49	0.50	0.53	0.56	0.57	0.61	5.40	5.44	5.51
LAMITAG Energy Green (6+0.76+6)	12.76	58	6	6	0.43	0.45	0.48	0.50	0.51	0.55	5.41	5.45	5.51

รูปที่ 8-55 ข้อมูลกระจกลามิเนต

เฉลย

1) $U = 1.281 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$

ชั้นวัสดุ	k	Δx	$R = \Delta x/k$
R_o			0.044
ปูนฉาบคอนกรีตมวลเบา 1 ซม.	0.326	0.01	0.031
คอนกรีตมวลเบา (620 กก./ลบ.ม.) 10 ซม.	0.18	0.1	0.556
ปูนฉาบคอนกรีตมวลเบา 1 ซม.	0.326	0.01	0.031
R_i			0.120
$R_T =$			0.781
$U =$			1.281

2) $U = 1.017 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$

ชั้นวัสดุ	k	Δx	$R = \Delta x/k$
R_o			0.044
ปูนฉาบคอนกรีตมวลเบา 1 ซม.	0.326	0.01	0.031
คอนกรีตมวลเบา (620 กก./ลบ.ม.) 10 ซม.	0.18	0.1	0.556
ปูนฉาบคอนกรีตมวลเบา 1 ซม.	0.326	0.01	0.031
ช่องว่างอากาศ 15 ซม.			0.160
แผ่นยิปซัม 1.2 ซม.	0.282	0.012	0.043
R_i			0.120
$R_T =$			0.983
$U =$			1.017

3) $U = 0.700 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

ชั้นวัสดุ	k	Δx	$R = \Delta x/k$
R_o			0.044
ปูนฉาบคอนกรีตมวลเบา 1 ซม.	0.326	0.01	0.031
คอนกรีตมวลเบา (620 กก./ลบ.ม.) 10 ซม.	0.18	0.1	0.556
ปูนฉาบคอนกรีตมวลเบา 1 ซม.	0.326	0.01	0.031
ช่องว่างอากาศ 10 ซม.			0.606
แผ่นยิปซัม 1.2 ซม.	0.282	0.012	0.043
R_i			0.120
$R_T =$			1.429
$U =$			0.700

4) $U = 0.276 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

ชั้นวัสดุ	k	Δx	$R = \Delta x/k$
R_o			0.044
ปูนฉาบคอนกรีตมวลเบา 1 ซม.	0.326	0.01	0.031
คอนกรีตมวลเบา (620 กก./ลบ.ม.) 10 ซม.	0.18	0.1	0.556
ปูนฉาบคอนกรีตมวลเบา 1 ซม.	0.326	0.01	0.031
ช่องว่างอากาศ 2 ซม.			0.578
แผ่นโพลีโพรพิลีน 20 กก./ลบ.ม. 8 ซม.	0.036	0.08	2.222
แผ่นยิปซัม 1.2 ซม.	0.282	0.012	0.043
R_i			0.120
$R_T =$			3.624
$U =$			0.276

5) ควรเลือก Energy Green เพราะมีค่า SHGC ต่ำที่สุด = 0.50 และค่า LT (Light Transmission) สูงสุด = 0.60 และมีค่า LSG = 1.2 (= 0.6/0.5)

6) เลือกกระจกที่มีค่า SHGC ต่ำที่สุด คือ = 0.48 (SHGC เป็นค่าที่ไม่มีหน่วย)

9. ระบบปรับอากาศและระบบระบายอากาศ

การปรับอากาศจัดว่าเป็นส่วนหนึ่งของการออกแบบอาคารในปัจจุบัน เพื่อให้ผู้ใช้อาคารเกิดความสบาย มีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น ระบบปรับอากาศมีสัดส่วนการใช้พลังงานมากกว่าระบบอื่น ๆ ในอาคาร คือ ประมาณ 50% ของพลังงานทั้งหมด ดังนั้น การประหยัดพลังงานในอาคารจึงต้องให้ความสำคัญกับการเลือกใช้ระบบปรับอากาศที่มีประสิทธิภาพพลังงาน วัสดุประสงคในบทนี้ เพื่อให้มีความเข้าใจในเรื่องดังต่อไปนี้ คือ

- 1) ส่วนประกอบของเครื่องปรับอากาศและวงจรการทำงาน
- 2) ประเภทของระบบปรับอากาศ
- 3) ค่าประสิทธิภาพพลังงานของระบบปรับอากาศ
- 4) ประเภทของระบบปรับอากาศที่มีการควบคุมประสิทธิภาพตามกฎหมาย
- 5) เทคโนโลยีในระบบปรับอากาศและระบายอากาศที่ช่วยประหยัดพลังงานและเพิ่มสุขภาวะ
- 6) ระบบปรับอากาศกับผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม

9.1 ส่วนประกอบของเครื่องปรับอากาศ และวงจรการทำงาน

เครื่องปรับอากาศจะมีส่วนประกอบ 4 ส่วน คือ

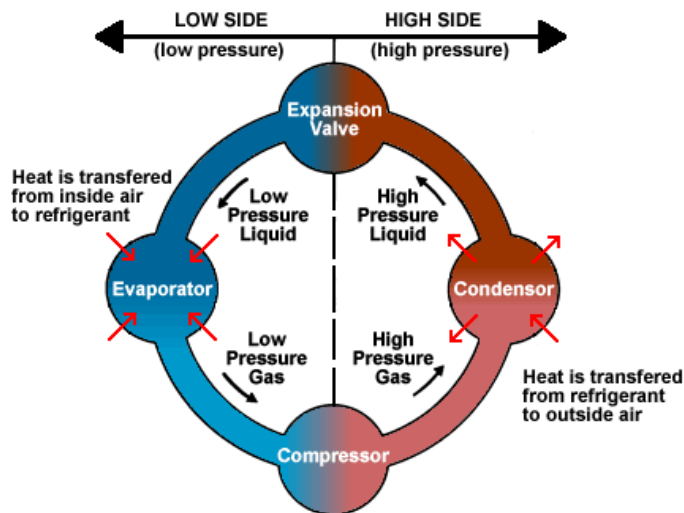
(1) **Evaporator หรือ แผงคอยล์เย็น** เป็นส่วนที่อยู่ในอาคาร ทำหน้าที่ดูดความร้อนจากพื้นที่ซึ่งต้องการทำความเย็น โดยการทำให้สารทำความเย็นที่มีสภาพของเหลวปนไอ เปลี่ยนสภาพกลายเป็นไอ

(2) **Compressor หรือ เครื่องอัด** ทำหน้าที่ดูดไอของสารทำความเย็นจากแผงคอยล์เย็น และอัดเพิ่มความดัน ทำให้ความดันสูงขึ้น และอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้สารทำความเย็นไหลเวียนในระบบ

(3) **Condenser หรือ แผงคอยล์ร้อน** ทำหน้าที่ให้สารทำความเย็นที่เป็นไอกลับเป็นของเหลว โดยระบายความร้อนสู่อากาศภายนอกอาคาร เมื่อไอน้ำยาเสียความร้อนถึงระดับหนึ่งจะควบแน่นเป็นของเหลว ความร้อนที่ดึงออกไปทิ้ง คือ ส่วนที่มาจากในห้องและจากการอัดของ Compressor

(4) **Expansion Valve หรือ Capillary Tube** ทำหน้าที่ลดความดันของสารทำความเย็นที่ผ่านมาจาก Condenser ทำให้เปลี่ยนสถานะกลายเป็นของเหลวปนกับบางส่วนเริ่มเป็นไอ และไหลไปยัง Evaporator เพื่อดูดความร้อนต่ออีกครั้ง

แต่วงจรการทำงานจะเริ่มจาก Compressor ดูดไอน้ำยาและเพิ่มความดันให้ไหลผ่านไปที่ ---> Condenser --> Expansion Valve --> Evaporator และวนไปที่ Compressor ใหม่



รูปที่ 9-1 วงจรการทำงานของเครื่องปรับอากาศ

(ที่มา: <https://wechillmart.com/air-conditioning-system-work/>)

9.2 ประเภทของระบบปรับอากาศ

ระบบปรับอากาศที่มีการใช้ในปัจจุบัน สามารถแบ่งได้ดังนี้

- 1) ระบบปรับอากาศแบบหน้าต่าง (Window Type)
- 2) ระบบปรับอากาศแบบแยกส่วน (Split Type)
- 3) ระบบปรับอากาศแบบปรับอัตราการไหลของน้ำยา (Variable Refrigerant Flow, VRF)
- 4) ระบบปรับอากาศแบบเป็นชุด (Package Unit)
- 5) ระบบปรับอากาศที่ใช้เครื่องทำน้ำเย็น (Electric Chiller)
- 6) ระบบปรับอากาศที่ใช้เครื่องทำน้ำเย็นแบบดูดซึม (Absorption Chiller)

(1) ระบบปรับอากาศแบบหน้าต่าง (Window Type) เป็นเครื่องปรับอากาศขนาดเล็ก ที่มีชุดคอยล์ร้อนและคอยล์เย็นรวมอยู่ในชุดเดียวกัน จึงมักมีปัญหาเสียงดังจากคอมเพรสเซอร์เวลาใช้งาน การติดตั้งต้องเตรียมช่องให้พอดีกับขนาดเครื่อง มิฉะนั้นจะเกิดการสั่นและปัญหาเสียงเพิ่มขึ้น ปัจจุบันจึงไม่ค่อยนิยมใช้เครื่องปรับอากาศชนิดนี้ โดยเปลี่ยนไปใช้แบบ Split Type ซึ่งเงียบกว่าและติดตั้งง่ายกว่า

(2) ระบบปรับอากาศแบบแยกส่วน (Split Type) เป็นเครื่องปรับอากาศขนาดเล็ก ที่มีส่วนประกอบหลัก คือ ชุดแฟนคอยล์ (Fan Coil Unit, FCU) หรือ ชุดคอยล์เย็น และชุดคอนเดนซิง (Condensing Unit, CDU) หรือ ชุดคอยล์ร้อนแยกกัน โดยชุดคอยล์เย็นติดตั้งในห้อง และส่วนชุดคอยล์ร้อนจะติดตั้งภายนอก ส่วนใหญ่ออกแบบให้ระบายความร้อนด้วยอากาศ จึงควรวางในตำแหน่งที่สามารถระบายลมร้อนได้ดี ไม่ถูกแดดจัด ส่วนใหญ่ชุดคอยล์ร้อน 1 ชุด จะติดตั้งคู่กับชุดคอยล์เย็น 1 ชุด มีเพียงบางยี่ห้อและบางรุ่นที่ชุดคอยล์ร้อน 1 ชุด สามารถต่อกับชุดคอยล์เย็นได้ 2-3 ชุด เครื่องปรับอากาศแบบ Split Type เหมาะกับอาคารพักอาศัย อาคารชุด หรือ อาคารสาธารณะ ที่ต้องการความสะดวกในการเปิดปิดแยกเป็นรายห้องได้ และไม่มีเจ้าหน้าที่ประจำคอยดูแลระบบ แต่จะมีข้อเสียเรื่องของประสิทธิภาพพลังงานของเครื่อง จะไม่สูงเท่าเครื่องปรับอากาศระบบใหญ่ และอาจจะไม่สวยงามที่เห็นชุดคอยล์ร้อนติดตั้งจำนวนมาก เพราะระยะเดินท่อระหว่างชุดคอยล์ร้อนและชุดคอยล์เย็นจำเป็นต้องอยู่ใกล้กัน เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการทำมาความเย็น

ระบบ Split Type ปัจจุบันจะมี 2 แบบ คือ

- แบบที่คอมเพรสเซอร์ทำงานด้วยความเร็วรอบคงที่ (Fixed Speed) โดยถ้าอุณหภูมิในห้องถึงระดับที่ตั้งไว้ คอมเพรสเซอร์จะหยุดทำงาน และทำงานอีกครั้งเมื่ออุณหภูมิในห้องเริ่มสูงกว่าจุดที่ตั้งไว้

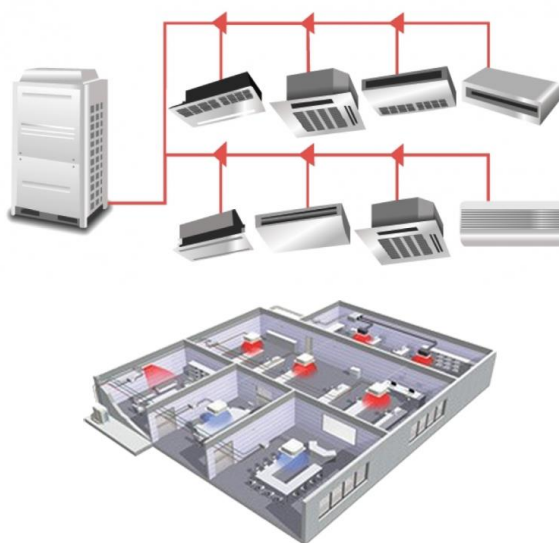
- แบบอินเวอร์เตอร์ (Inverter) คือ คอมเพรสเซอร์ (Compressor) จะปรับรอบการทำงานให้ช้าลงเมื่ออุณหภูมิในห้องถึงระดับที่ตั้งไว้ ซึ่งทำให้ประหยัดพลังงาน จากการลดรอบการทำงานของคอมเพรสเซอร์ และยังช่วยทำให้มีความสบายมากขึ้นเพราะอุณหภูมิในห้องปรับอากาศ จะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงน้อยกว่าแบบ Fixed Speed

(3) ระบบปรับอากาศแบบปรับอัตราการไหลของน้ำยา (Variable Refrigerant Flow, VRF)

(บางที่เรียกว่า VRV ย่อมาจาก Variable Refrigerant Volume ซึ่งเป็นชื่อทางการค้า) เป็นเครื่องปรับอากาศที่มีแผงชุดคอยล์ร้อน และแผงชุดคอยล์เย็นแยกกัน คล้ายระบบ Split Type แต่สามารถปรับอัตราการไหลของสารทำความเย็นได้ตามภาระความร้อนที่เกิดขึ้น โดยชุดคอยล์ร้อน 1 ชุด สามารถต่อกับชุดคอยล์เย็นได้หลายชุดที่ใช้งานคนละพื้นที่ในเวลาเดียวกัน หรือ ใช้คนละเวลากันก็ได้ และแยกเปิดปิดได้เป็นรายห้อง ในกรณีที่ใช้งานคนละเวลา เช่น ห้องนั่งเล่นใช้เฉพาะกลางวัน และห้องนอนใช้เฉพาะกลางคืน ก็สามารถใช้คอยล์ร้อนเพียงชุดเดียว ไม่ต้องใช้ 2 ชุด เหมือนในระบบ Split Type ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและพื้นที่ติดตั้ง

ระบบนี้อาจจะมีขนาดของเครื่องใหญ่ได้ถึงประมาณ 50 ตัน มีระยะการเดินท่อระหว่างชุดคอยล์ร้อนและชุดคอยล์เย็นที่ไกลมากกว่าระบบ Split Type มาก และมีประสิทธิภาพพลังงานสูงกว่า การระบายความร้อนของคอยล์ร้อน ส่วนใหญ่จะระบายความร้อนด้วยอากาศ โดยตั้งไว้ภายนอกอาคารในจุดที่มองไม่เห็น เช่น ฝ้าฟ้า หรือ ตำแหน่งที่ห่างจากตัวอาคาร ทำให้อาคารมีความสวยงาม ปัจจุบันนิยมใช้ในอาคารพักอาศัย และอาคารธุรกิจขนาดเล็กและขนาดกลาง

ระบบ VRF จะมีแบบที่ใช้การระบายความร้อนด้วยน้ำด้วย ซึ่งจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ แต่อาจจะต้องมีภาระในการดูแลระบบเพิ่มขึ้น ไม่ค่อยพบระบบที่ใช้น้ำในประเทศไทยมากนัก



รูปที่ 9-2 ระบบปรับอากาศแบบ VRF

(ที่มา: <https://www.baysidecomfortsolutions.com.au/vrf-systems/>)

(4) ระบบปรับอากาศแบบ Package Unit เป็นระบบปรับอากาศที่รวมแผงคอยล์ร้อน แผงคอยล์

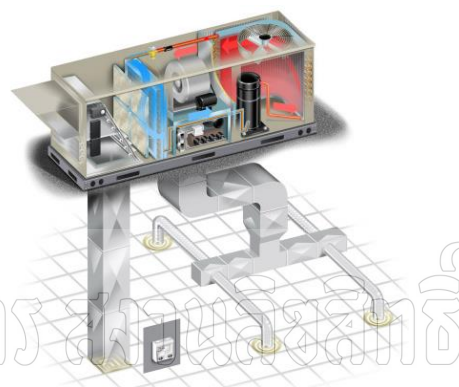
เย็น และคอมเพรสเซอร์ ไว้ในที่เดียวกัน อาจติดตั้งอยู่นอกอาคาร บนดาดฟ้า (Package Rooftop Unit, RTU) และต่อท่อลมจ่ายและลมกลับจากเครื่อง ผ่านเข้าไปยังพื้นที่ต่าง ๆ ภายในอาคาร หรือ อาจตั้งในอาคาร ตรงห้องที่มีผนังติดภายนอก เพื่อรับอากาศบริสุทธิ์เข้ามา และต่อท่อระบายลมร้อนออกไปทิ้ง ระบบนี้เหมาะกับ อาคารธุรกิจขนาดเล็ก ในระบบนี้ถ้าเดินท่อลมระยะไกล อาจจะมีปัญหาท่อลมใหญ่ ทำให้ต้องใช้ความสูงในช่อง ฝ้ามาก และอาจเกิดปัญหาเสียงดังจากท่อลม ในการออกแบบอาจมีการเสริมตัวปรับปริมาณลม (Variable Air Volume, VAV) เข้าไปด้วย ในระบบจ่ายลม เพื่อปรับปริมาณลมจ่ายให้เหมาะกับโหลดความร้อนที่เกิดขึ้น โดย อุณหภูมิลมจ่ายยังเท่าเดิม

ระบบนี้มีทั้งแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ (Package Air Cooled) และระบายความร้อน ด้วยน้ำ (Package Water Cooled) ปัจจุบันพบการใช้ระบบนี้น้อยลง เพราะมักเปลี่ยนไปใช้ระบบ VRF ซึ่ง สะดวกกว่า โดยอาจไม่จำเป็นต้องเดินท่อลม และสามารถเปิดปิดบางห้องที่ไม่ใช้งานได้



รูปที่ 9-3 Package Rooftop Unit

(ที่มา: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rooftop_Packaged_Units.JPG)



รูปที่ 9-4 Package Rooftop Unit

ที่ต่อท่อลมจ่ายและลมกลับไปยังพื้นที่
ปรับอากาศ

(ที่มา: <https://blog.ravti.com/equipment-packaged-rooftop-unit-rtu-52c22a055c8b>)

(5) ระบบปรับอากาศที่ใช้เครื่องทำน้ำเย็น (Electric Chiller) เป็นระบบปรับอากาศที่ใช้กับ

อาคารขนาดใหญ่โดยรวมศูนย์ในการผลิตน้ำเย็นไว้ที่เดียวที่ห้องเครื่อง แล้วส่งน้ำเย็นที่ผลิตไปยังเครื่องส่งลม เย็นขนาดใหญ่ (Air Handling Unit, AHU) หรือ เครื่องส่งลมเย็นขนาดเล็ก (Fan Coil Unit, FCU) เพื่อจ่ายลม เย็นให้กับแต่ละพื้นที่ที่ต้องการควบคุมการเปิดปิด เช่น พื้นที่เช่าของแต่ละสำนักงานย่อยในอาคารสำนักงาน ระบบนี้จะแบ่งเป็น

- ระบบเครื่องทำน้ำเย็นที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ ปรกติจะมีขนาดไม่เกิน 500 ตัน
- ระบบเครื่องทำน้ำเย็นที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ มีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ และสามารถมีขนาดตันความเย็นมากกว่า 500 ตัน โดยนำน้ำไประบายความร้อนที่หอผึ่งเย็น (Cooling Tower) ระบบนี้มีประสิทธิภาพพลังงานสูงกว่าแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ



รูปที่ 9-5 เครื่องทำน้ำเย็นชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ
(ที่มา: <http://www.sd-lt.cn/en/Index.asp?Type=2&Module=178&Id=567>)



รูปที่ 9-6 เครื่องทำน้ำเย็นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ

ในระบบนั้นนอกจากเครื่องทำน้ำเย็นแล้วยังมีส่วนประกอบที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า โดยทั่วไปจะประกอบด้วย (ตารางที่ 9-1)

- เครื่องสูบน้ำเย็น (Chilled Water Pump) ซึ่งอาจจะมี 2 ชุด คือ Primary Chilled Water Pump ทำหน้าที่สูบน้ำเข้าเครื่อง Chiller และ Secondary Chilled Water Pump ทำหน้าที่สูบน้ำจาก Chiller ไปที่เครื่องส่งลมเย็น แต่ในกรณีที่มีการใช้ Chiller ที่เป็นระบบ VSD (Variable Speed Drive) ซึ่งสามารถปรับอัตราการไหลของน้ำเย็นที่เข้าเครื่อง Chiller ได้ จะมีเฉพาะเครื่องสูบน้ำเย็นจาก Chiller ไปที่เครื่องส่งลมเย็น (Air Handling Unit, AHU) ชุดเดียวเท่านั้น
- เครื่องส่งลมเย็นขนาดใหญ่ (AHU) หรือ เครื่องส่งลมเย็นขนาดเล็ก (FCU)
- เครื่องสูบน้ำระบายความร้อน (Condenser Water Pump) เพื่อส่งน้ำไปที่หอผึ่งเย็น (Cooling Tower)
- หอผึ่งเย็น

ตารางที่ 9-1 ส่วนประกอบที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าของระบบปรับอากาศแบบ Chiller

ประเภทระบบ	เครื่องทำน้ำเย็น ชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ	เครื่องทำน้ำเย็น ชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ
ระบบจ่ายน้ำเย็น	• Chilled Water Pump ◦ Primary Chilled Water Pump ◦ Secondary Chilled Water Pump	• Chilled Water Pump ◦ Primary Chilled Water Pump ◦ Secondary Chilled Water Pump
ระบบส่งลมเย็น	• AHU • FCU	• AHU • FCU
ระบบระบายความร้อน	-	• Condenser Water Pump • Cooling Tower



รูปที่ 9-7 Primary Chilled Water Pump



รูปที่ 9-8 Secondary Chilled Water Pump



รูปที่ 9-9 Air Handling Unit
(ที่มา: <https://cutt.ly/YyZ1pQS>)



รูปที่ 9-10 Fan Coil Unit
(ที่มา: <https://vtsgroup.com/ae/fan-coil-unit-fcu>)



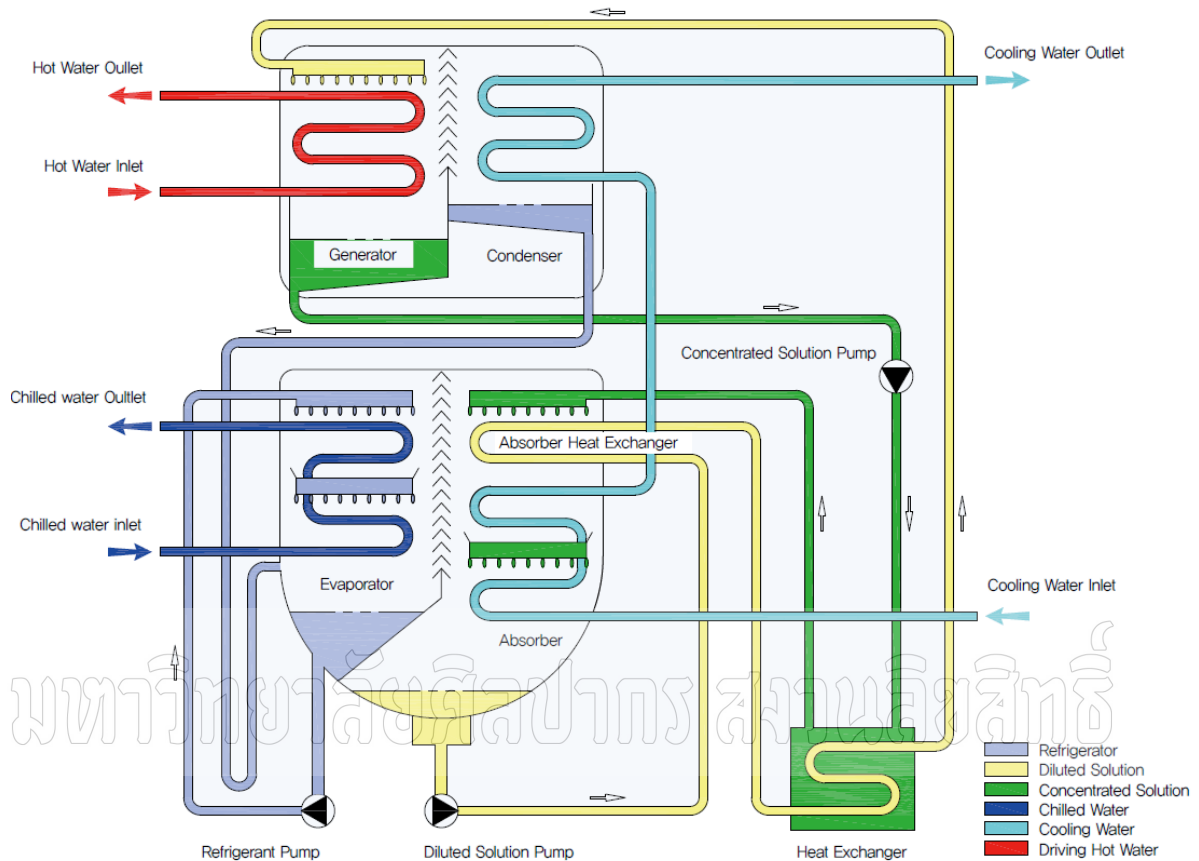
รูปที่ 9-11 Condenser Water Pump



รูปที่ 9-12 Cooling Tower

(6) ระบบปรับอากาศที่ใช้เครื่องทำน้ำเย็นแบบดูดซึม (Absorption Chiller) เป็นระบบที่ไม่ค่อยพบบ่อยนัก ในระบบนี้จะได้ใช้คอมเพรสเซอร์เหมือนกับระบบทำความเย็นที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด โดยระบบนี้ จะใช้สารละลาย 2 ชนิด ที่เป็นคู่ผสมกัน ตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นสารทำความเย็น อีกตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นสารดูดซึม คือ ใช้ น้ำ (สารทำความเย็น) กับ ลิเทียมโบรไมด์ (สารดูดซึม) หรือ แอมโมเนีย (สารทำความเย็น) กับ น้ำ (สารดูดซึม) ระบบจะใช้ความร้อนเป็นพลังงานหลัก ซึ่งมักเป็นความร้อนเหลือทิ้ง (Waste Heat) ที่มีอยู่แล้ว เช่น ไอน้ำ น้ำร้อนจากขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม แก๊ส หรือ น้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

โดยนำความร้อนมาใช้ในขั้นตอนของการแยกสารดูดซึมออกจากสารละลายเจือจางระหว่างสารดูดซึมและสารทำความเย็น จากนั้นจึงนำสารทำความเย็นไปดูดความร้อนออกจากน้ำเย็น สารคู่ผสมนี้จะทำงานอยู่ในวงจรการทำงานของเครื่อง โดยอาศัยหลักการระเหยและการควบแน่น ในระบบนี้ยังต้องมีการใช้ Cooling Tower เป็นที่ระบายความร้อน

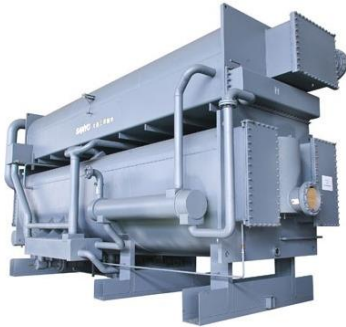


รูปที่ 9-13 วงจรการทำน้ำเย็นระบบดูดซึม ซึ่งใช้ความร้อนป้อนให้กับ Generator เพื่อแยกสารทำความเย็นออกจากสารละลายคู่ผสม เพื่อนำไปดูดความร้อนจากน้ำเย็น (ที่มา: <https://goldman.com.au/energy/company-news/how-does-an-absorption-chiller-work/>)

ระบบนี้ยังแบ่งได้ 3 แบบ คือ

- เครื่องทำน้ำเย็นดูดกลืนแบบชั้นเดียว (Single Effect)
- เครื่องทำน้ำเย็นแบบ 2 ชั้น (Double Effect) โดยแบบ 2 ชั้น จะใช้ไอน้ำที่มีแรงดันสูงกว่าแบบที่ 1 หรือ ใช้ความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่าแบบที่ 1 และมีค่า COP สูงกว่าแบบที่ 1
- เครื่องทำน้ำเย็นแบบ 3 ชั้น จะมีค่า COP สูงกว่าทั้งสองแบบข้างต้น

ข้อดีของการใช้ Absorption Chiller คือ สารทำความเย็นที่ใช้ถือว่าไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในการทำลายชั้นโอโซน หรือ การทำให้เกิดภาวะโลกร้อน เหมือนสารทำความเย็นที่ใช้ในระบบปรับอากาศทั่วไป ไม่มีเสียงดังจากการทำงานซึ่งเกิดจากคอมเพรสเซอร์ เหมือนเครื่องทำน้ำเย็นที่ใช้ไฟฟ้า

	
รูปที่ 9-14 Absorption Chiller แบบชั้นเดียว (ที่มา: http://www.bingshaninternational.com/product/steam-fired-single-effect-libr-absorption-chiller)	รูปที่ 9-15 Absorption Chiller แบบสองชั้น (ที่มา: https://ahi-carrier.gr/en/product/16nk-double-effect-steam-fired-absorption-chiller/)



รูปที่ 9-16 Absorption Chiller แบบ Triple Effect

(ที่มา: <https://cutt.ly/7yXPIZG>.)

9.3 ค่าประสิทธิภาพพลังงานของระบบปรับอากาศ

ในการออกแบบอาคารที่ประหยัดพลังงานนั้น นอกจากเปลือกอาคารที่ดี ซึ่งช่วยลดความร้อนให้กับระบบปรับอากาศแล้ว จำเป็นต้องเลือกใช้เครื่องปรับอากาศที่มีประสิทธิภาพพลังงานสูงด้วย การพิจารณาประสิทธิภาพพลังงานของระบบปรับอากาศ จะสามารถพิจารณาได้จากค่าต่าง ๆ ดังนี้

(1) **ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance, COP)** หมายถึง อัตราส่วนระหว่างขีดความสามารถในการทำความเย็นรวมสุทธิของระบบปรับอากาศ หน่วยเป็น วัตต์ กับพิกัดกำลังไฟฟ้า หน่วยเป็น วัตต์ ดังนั้น ค่า COP จึงไม่มีหน่วย ค่า COP ยิ่งสูงแสดงว่ายิ่งมีประสิทธิภาพ

(2) **อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency Ratio, EER)** หมายถึง อัตราส่วนระหว่างขีดความสามารถทำความเย็นรวมสุทธิของระบบปรับอากาศ หน่วยเป็น บีทียูต่อชั่วโมง (Btu/h) กับพิกัดกำลังไฟฟ้า หน่วยเป็นวัตต์ (W) ค่า EER มีหน่วยเป็น บีทียูต่อชั่วโมงต่อวัตต์ ((Btu/h)/W) EER ยิ่งสูงแสดงว่ายิ่งมีประสิทธิภาพ เครื่องปรับอากาศขนาดเล็ก หรือ เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน (Split-Type) ในอดีตจะบอกประสิทธิภาพด้วยค่า EER เนื่องจากเป็นระบบที่เครื่องคอมเพรสเซอร์ทำงานด้วยความเร็วคงที่ (Fixed

Speed) แต่ปัจจุบันมีการใช้ระบบอินเวอร์เตอร์ ดังนั้น การใช้ค่า EER จึงไม่สามารถสะท้อนประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องปรับอากาศได้ดี จึงเปลี่ยนมาใช้ตัวชี้วัด ที่เรียกว่า ค่า SEER แทน

(3) ค่าประสิทธิภาพพลังงานตามฤดูกาล (Seasonal Energy Efficiency Ratio, SEER) เป็นอัตราส่วนระหว่างขีดความสามารถในการทำความเย็นรวมสุทธิที่คิดเมื่ออุณหภูมิอากาศข้างนอกเปลี่ยนแปลงกับขีดความสามารถทำความเย็นรวมสุทธิ สามารถใช้บอกประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศได้ทั้งแบบ Inverter และ Fixed Speed ซึ่งปัจจุบันทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟผ.) ได้ใช้ค่า SEER สำหรับเครื่องปรับอากาศแบบ Split Type ทั้งประเภท Fixed Speed และ Variable Speed / Inverter

นอกจากนี้ กฟผ. ยังได้แบ่งระดับประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศ Split Type เป็น 4 ระดับ คือ เครื่องปรับอากาศเบอร์ 5 ธรรมดา เบอร์ 5 (1 ดาว) เบอร์ 5 (2 ดาว) และเบอร์ 5 (3 ดาว) (รูปที่ 9-17) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2562 โดยใช้ค่า SEER (ตารางที่ 9-2, 9-3)

ตารางที่ 9-2 เกณฑ์ระดับประสิทธิภาพพลังงานเครื่องปรับอากาศ ชนิด Fixed Speed ปี ค.ศ. 2019

ขนาดเครื่องปรับอากาศ	ค่าประสิทธิภาพ (บีทียู/ชั่วโมง/วัตต์)			
	เบอร์ 5	เบอร์ 5 ★	เบอร์ 5 ★★	เบอร์ 5 ★★★
ไม่เกิน 8,000 วัตต์ (27,296 บีทียู/ชั่วโมง)	12.85 - 13.84	13.85 - 14.84	14.85 - 15.84	15.85
มากกว่า 8,000 - 12,000 วัตต์ (> 27,296 - 40,944 บีทียู/ชั่วโมง)	12.40 - 13.39	13.40 - 14.39	14.40 - 15.39	15.40

ตารางที่ 9-3 เกณฑ์ระดับประสิทธิภาพพลังงานเครื่องปรับอากาศ ชนิด Variable Speed/Inverter ปี ค.ศ. 2019

ขนาดเครื่องปรับอากาศ	ค่าประสิทธิภาพ (บีทียู/ชั่วโมง/วัตต์)			
	เบอร์ 5	เบอร์ 5 ★	เบอร์ 5 ★★	เบอร์ 5 ★★★
ไม่เกิน 8,000 วัตต์ (27,296 บีทียู/ชั่วโมง)	15.00 - 17.49	17.50 - 19.99	20.00 - 22.49	22.50
มากกว่า 8,000 - 12,000 วัตต์ (> 27,296 - 40,944 บีทียู/ชั่วโมง)	14.00 - 16.49	16.50 - 18.99	19.00 - 21.49	21.50



รูปที่ 9-17 ฉลากแสดงประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องปรับอากาศ Split Type แสดงด้วยจำนวนดาว

(ที่มา: กฟผ., ข้อกำหนดโครงการประหยัดไฟเบอร์ 5, p. 22)

(4) ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อตันความเย็น หมายถึง อัตราส่วนระหว่างพิกัดกำลังไฟฟ้า หน่วยเป็น กิโลวัตต์ กับขีดความสามารถทำความเย็นรวมสุทธิของเครื่องทำน้ำเย็น หน่วยเป็นตันความเย็น (Refrigeration Ton) โดยค่า kW/RT ที่ยิ่งต่ำ จะแสดงว่ายิ่งประหยัดพลังงาน เครื่องปรับอากาศขนาดใหญ่ หรือ เครื่องทำน้ำเย็นสำหรับระบบปรับอากาศ จะบอกค่าประสิทธิภาพด้วยค่านี้ หรือ ค่า COP

ค่า COP ค่า EER และค่า kW/RT จะสามารถคำนวณแปลงค่าหากันได้เมื่อทราบค่าใดค่าหนึ่ง คือ

$$1 \text{ kW / RT} = 12 / \text{EER} = 3.517 / \text{COP}$$

9.4 ประเภทของระบบปรับอากาศที่มีการควบคุมตามกฎหมาย

กฎหมายอนุรักษ์พลังงานฉบับที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน คือ กฎกระทรวงกำหนดประเภท หรือ ขนาดของ อาคาร และมาตรฐาน หลักเกณฑ์ และวิธีการในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552 ได้ ระบุให้ระบบปรับอากาศที่ติดตั้งภายในอาคาร 9 ประเภท คือ 1) สถานพยาบาล 2) สถานศึกษา 3) สำนักงาน 4) อาคารชุด 5) อาคารชุมนุมคน 6) อาคารโรงมหรสพ 7) อาคารโรงแรม 8) อาคารสถานบริการ 9) อาคาร ห้างสรรพสินค้าหรือศูนย์การค้า ที่มีพื้นที่ตั้งแต่ 2,000 ตร.ม. ต้องใช้ระบบปรับอากาศที่มีค่าสัมประสิทธิ์ สมรรถนะขั้นต่ำ ค่าประสิทธิภาพการให้ความเย็น และค่าพลังงานไฟฟ้าต่อตันความเย็น เป็นไปตามประกาศ ของกระทรวงพลังงาน

กระทรวงพลังงาน ได้มีประกาศในปี พ.ศ. 2552 กำหนดประสิทธิภาพพลังงาน ของเครื่องปรับอากาศ 3 ชนิด คือ

- (1) เครื่องปรับอากาศขนาดเล็ก
- (2) ระบบปรับอากาศขนาดใหญ่
- (3) เครื่องทำน้ำเย็นแบบดูดกลืน

(1) เครื่องปรับอากาศขนาดเล็ก ประกาศของกระทรวงพลังงาน ได้ให้นิยามว่า หมายถึง เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ หรือ ระบายความร้อนด้วยน้ำ โดยออกแบบแยก ส่วนเป็นสองชุดทำงานร่วมกัน ซึ่งได้แก่ ชุดคอนเดนซิง (Condensing Unit) และ ชุดแฟนคอยล์ (Fan-coil Unit) ที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ สำหรับใช้เพื่อลดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่ไหลผ่าน ชุดแฟนคอยล์

ในปี พ.ศ. 2552 ทางกระทรวงพลังงาน ได้มีการประกาศกำหนดประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศที่มีขนาดไม่เกิน 12,000 วัตต์ (40,944 บีทียูต่อชั่วโมง) ต้องมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ขั้นต่ำ 3.22 หรือ ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) ขั้นต่ำ 11 และจากนั้นไม่ได้มีการประกาศกำหนดประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศขนาดเล็กอีก แต่ค่าดังกล่าวยังคงใช้ในโปรแกรม BEC สำหรับอาคารที่เป็นอาคารอ้างอิง (Reference Building)

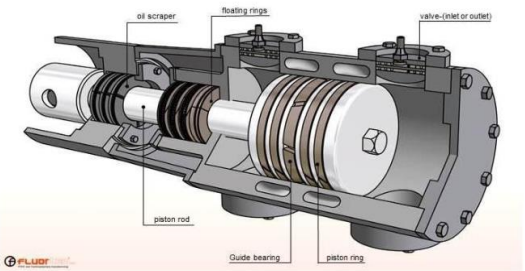
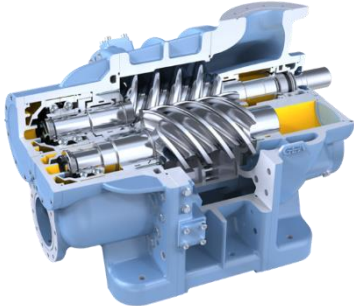
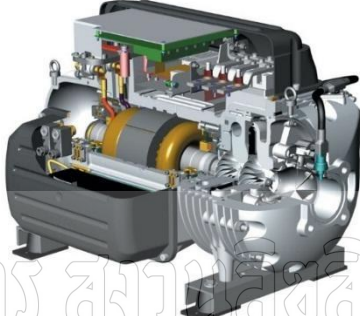
สำหรับผู้ออกแบบที่ต้องการเลือกใช้เครื่องปรับอากาศแบบ Split Type ที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพที่กำหนดโดย กฟผ. ที่เป็นปัจจุบันที่สุด โดยการเปรียบเทียบจากจำนวนดาวที่แสดงประสิทธิภาพพลังงาน และเลือกเครื่องที่มีค่า SEER ที่สูงกว่า

(2) ระบบปรับอากาศขนาดใหญ่ ความหมายของคำว่า “ระบบปรับอากาศ” ตามประกาศของกระทรวงพลังงาน จะรวมถึง ส่วนประกอบอื่น ๆ ของระบบปรับอากาศด้วย

ประกาศได้กำหนดประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำเย็น และส่วนประกอบอื่นของระบบปรับอากาศ ตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2552 โดยใช้ค่า kW/RT แยกตามประเภทของชนิดการระบายความร้อน แบบของเครื่องอัด (Compressor) (รูปที่ 9-18 ถึงรูปที่ 9-21) และขนาดตันความเย็นของเครื่องทำน้ำเย็น ดังตารางที่ 9-4

ตารางที่ 9-4 เครื่องทำน้ำเย็นสำหรับระบบปรับอากาศต้องมีค่าพลังงานไฟฟ้าต่อตันความเย็นไม่เกินกว่าที่กำหนดไว้

ประเภทของเครื่องทำน้ำเย็นสำหรับระบบปรับอากาศ		ขนาดความสามารถในการทำความเย็นที่ภาระพิกัดของเครื่องทำน้ำเย็น (ตันความเย็น)	ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อตันความเย็น (กิโลวัตต์ต่อตันความเย็น)
ชนิดการระบายความร้อน	แบบของเครื่องอัด		
ระบายความร้อนด้วยอากาศ	ทุกชนิด	น้อยกว่า 300	1.33
		มากกว่า 300	1.31
ระบายความร้อนด้วยน้ำ	แบบลูกสูบ	ทุกขนาด	1.24
	แบบโรตารี แบบสกูหรือ แบบสโครอลล์	น้อยกว่า 150	0.89
		มากกว่า 150	0.78
	แบบแรงเหวี่ยง	น้อยกว่า 500	0.76
		มากกว่า 500	0.62

	
รูปที่ 9-18 เครื่องอัดแบบลูกสูบ (Reciprocating Compressor) (ที่มา: http://www.fluorten.com/wp-content/uploads/2013/07/GB-Flyer-Compressors-sheet.jpg)	รูปที่ 9-19 เครื่องอัดแบบสกรู (Screw Compressor) (ที่มา: http://www.southernsales.co.uk/new-units-and-parts/refrigeration-air-conditioning/gea-grasso-screw-compressors)
	
รูปที่ 9-20 เครื่องอัดแบบสกรอลล์ (Scroll Compressor) (ที่มา: http://en.citizendium.org/wiki/Gas_compressor)	รูปที่ 9-21 เครื่องอัดแบบแรงเหวี่ยง (Centrifugal Compressor) (ที่มา: http://www.thermalcare.com/central-chillers/tc-series-central-chillers.php)

นอกจากนี้ ยังมีการควบคุมส่วนประกอบอื่นของระบบปรับอากาศที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย ระบบระบายความร้อน ระบบจ่ายน้ำเย็น และระบบส่งลมเย็น ต้องมีค่าพลังงานไฟฟ้าต่อตันความเย็นรวมกันไม่เกิน 0.5 กิโลวัตต์ต่อตันความเย็น

(3) **เครื่องทำน้ำเย็นแบบดูดกลืน** ตามประกาศฯ กำหนดให้ต้องมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะแล้วแต่กรณี โดยการคิดค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะให้คิดเฉพาะค่าความร้อนเท่านั้น โดยไม่รวมค่ากำลังไฟฟ้าในระบบ โดยค่าประสิทธิภาพจะต้องเป็นไปตามตารางที่ 9-5 และ ตารางที่ 9-6

ตารางที่ 9-5 กำหนดภาวะพิกิตโดยระบุอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น

ชนิดของ เครื่องทำ น้ำเย็น แบบดูดกลืน	ภาวะพิกิต				ค่าสัมประสิทธิ์ สมรรถนะ
	ด้านน้ำเย็น		ด้านน้ำระบายความร้อน		
	อุณหภูมิ น้ำเย็นเข้า	อุณหภูมิ น้ำเย็นออก	อุณหภูมิ น้ำเข้าเครื่อง ควบแน่น	อัตราการไหลของน้ำ เข้าเครื่องควบแน่น	
	(องศาเซลเซียส)			(ลิตรต่อวินาทีต่อ กิโลวัตต์)	
ก. ชั้นเดียว	12.0	7.0	32.0	0.105	0.65
ข. สองชั้น	12.0	7.0	32.0	0.079	1.10

ตารางที่ 9-6 กำหนดภาวะพิกิตโดยระบุอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าและออกจากเครื่องควบแน่น

ชนิดของ เครื่องทำ น้ำเย็น แบบดูดกลืน	ภาวะพิกิต				ค่าสัมประสิทธิ์ สมรรถนะ
	ด้านน้ำเย็น		ด้านน้ำระบายความร้อน		
	อุณหภูมิ น้ำเย็นเข้า	อุณหภูมิ น้ำเย็นออก	อุณหภูมิ น้ำเข้าเครื่อง ควบแน่น	อุณหภูมิ น้ำออกจากเครื่อง ควบแน่น	
	(องศาเซลเซียส)				
ก. ชั้นเดียว	12.0	7.0	32.0	37.5	0.65
ข. สองชั้น	12.0	7.0	32.0	37.5	1.10

9.5 เทคโนโลยีในระบบปรับอากาศและระบายอากาศที่ช่วยประหยัดพลังงานและสุขภาวะ

9.5.1 เทคโนโลยีในการระบายอากาศ

การออกแบบอาคารประหยัดพลังงาน จะต้องอยู่บนพื้นฐานของการทำให้ผู้อยู่อาศัยมีความสุขภาวะที่ดี ดังนั้นการระบายอากาศในอาคารปรับอากาศจึงถือเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุด เพราะมีผลต่อสุขภาพของผู้อยู่ในอาคารโดยตรง การออกแบบจะต้องมีการนำอากาศบริสุทธิ์เข้ามาในพื้นที่ปรับอากาศให้ได้ในปริมาณที่พอเพียงตามกฎหมายควบคุมอาคาร หรือมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบ

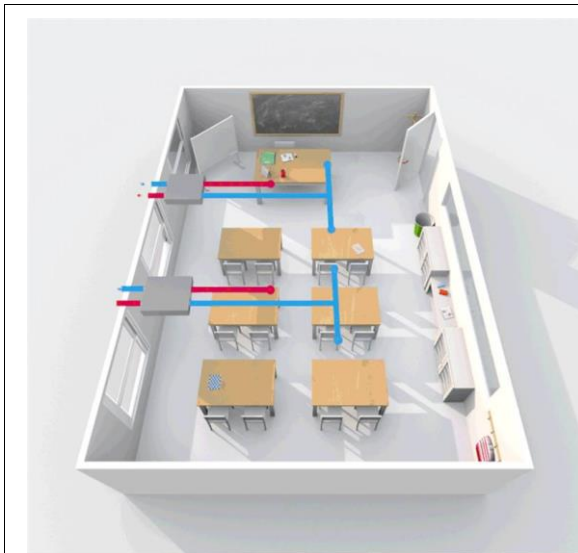
ในประเทศไทยมีมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.) คือ มาตรฐาน วสท. 031010-60: มาตรฐานการระบายอากาศเพื่อคุณภาพอากาศภายในอาคารที่ยอมรับได้ แต่ถ้านำมาใช้เป็นการออกแบบอาคารเขียว ในระบบ LEED หรือระบบ WELL ของประเทศสหรัฐอเมริกา ที่มีการนำมาใช้ในการออกแบบอาคารในประเทศไทย จะใช้มาตรฐาน ASHRAE 62.1 ซึ่งใช้การคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องการเติมจากจำนวนคนและขนาดพื้นที่ (Ventilation Rate Procedure, VRP) หรือคำนวณจากปริมาณของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compound, VOC) ที่อยู่ในอาคารที่ต้องการเจือจางออกไป (Indoor Air Quality Procedure, IAQP)

การออกแบบระบบปรับอากาศในปัจจุบัน ในหลายอาคารยังคงใช้วิธีการระบายอากาศ โดยให้อากาศรั่วซึมตามขอบหน้าต่างประตู รอยรั่ว หรือใช้การเติมอากาศภายนอก โดยการเจาะช่องเล็ก ๆ ที่ผนังติดมุ้งลวด หรือ ใช้พัดลมดูดอากาศออก ซึ่งถือว่ายังไม่ใช่วิธีการที่ดี เพราะไม่สามารถกำหนดปริมาณอากาศบริสุทธิ์ที่เติมได้แน่นอน และอากาศที่นำเข้ามาเติมเหล่านี้ ก็ไม่ได้มีการบำบัดให้สะอาด หรือลดความร้อนและความชื้นซึ่งเป็นโหลดในการปรับอากาศ

วิธีการระบายอากาศที่ดี คือจะต้องมีทั้งการดูดอากาศเข้า และดูดอากาศออก เป็นลักษณะของ Balance Ventilation ซึ่งสามารถกำหนดปริมาณอากาศที่ต้องการระบาย และแรงดันลมในอาคารได้ถูกต้อง วิธีการคือ ต้องออกแบบเปลือกอาคารให้มีความแน่น (Airtight) และเพิ่มคุณภาพในการระบายอากาศ ซึ่งสามารถใช้วิธีการดังนี้

(1) การใช้ Energy Recovery Ventilator (ERV)

เป็นการเติมอากาศ โดยนำอากาศจากภายนอกมาผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่เรียกว่า Energy Recovery Ventilator (ERV) ซึ่งจะแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศภายนอกที่ร้อนและชื้น กับอากาศภายในอาคารซึ่งยังมีความเย็นอยู่ก่อนนำออกไปทิ้ง เครื่องดังกล่าวมีอุปกรณ์ในการให้อากาศเย็นลงและลดความชื้น เป็นการลดทั้งความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงให้ระบบปรับอากาศ ซึ่งจะมีประสิทธิภาพมากกว่าเครื่องที่เรียก Heat Recover Ventilator (HRV) ซึ่งลดแต่ความร้อนสัมผัสอย่างเดียว



รูปที่ 9-22 การใช้ ERV เดิมอากาศในห้อง

(ที่มา: https://www.holtop.com/project/school-classroom-energy-recovery-ventilator?tdsourcetag=s_pctim_aiomsg)



รูปที่ 9-23 เครื่อง ERV

(ที่มา: <https://www.holtop.com/products/hrvs-ervs/eco-vent-heat-energy-recovery-ventilators/>)

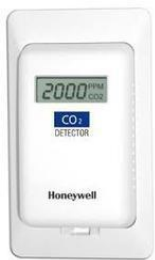
(2) การเติมอากาศแบบอิสระ (Dedicated Outdoor Air System, DOAS)

เป็นการออกแบบที่แยกระบบเติมอากาศบริสุทธิ์ออกจากการทำงานเย็น โดยปรกติการออกแบบจะนำอากาศบริสุทธิ์จากภายนอกมารวมกับอากาศเย็นที่วนกลับมาจากในห้อง แล้วให้ผ่านเครื่องส่งลมเย็น (AHU) แจกจ่ายไปยังส่วนต่าง ๆ ของอาคาร แต่ในระบบนี้จะออกแบบให้อากาศบริสุทธิ์จากภายนอกมาผ่านเข้าเครื่อง ERV (บางที่เรียก Fresh Air Unit หรือ Outdoor Air Unit (OAU)) และบำบัดให้สะอาดโดยการใช้แผ่นกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง ทำให้อากาศสะอาด และ ลดความชื้นของอากาศลง ทำให้คุณภาพอากาศในอาคารดีขึ้น

ในอาคารขนาดใหญ่ ระบบการเติมอากาศอาจจะออกแบบให้เป็นระบบรวมศูนย์ คือให้อากาศภายนอกผ่านเข้าเครื่อง Fresh Air Unit ใหญ่ทีเดียว แล้วต่อท่อลมไปยังพื้นที่ต่าง ๆ และมีตัวปรับปริมาณลมเพื่อให้ได้ปริมาณลมในแต่ละพื้นที่ที่ถูกต้องเหมาะสม

(3) การเติมอากาศตามจำนวนคน (Demand Controlled Ventilation, DCV)

ในการออกแบบห้องที่มีผู้ใช้งานหนาแน่น เช่น ห้องประชุมขนาดใหญ่ ผู้ออกแบบจะเผื่อการเติมอากาศบริสุทธิ์ให้มากพอสำหรับคนใช้งานเต็มห้อง แต่ในกรณีที่มีผู้ใช้งานจริงน้อย การนำอากาศภายนอกเข้ามาเติมโดยคิดจากฐานที่มีผู้ใช้เต็มจำนวนอาจจะมากเกินไป เป็นการเพิ่มโหลดความร้อนให้กับระบบปรับอากาศโดยไม่จำเป็น ดังนั้น ในระบบ DCV นี้จึงใช้การติดตั้ง CO₂ Sensor เพื่อวัดปริมาณ CO₂ ซึ่งเกิดจากการหายใจของคนในห้อง โดยถ้าหากมีผู้ใช้อาคารมาก ระดับของ CO₂ ในห้องสูงถึงค่าที่กำหนด เช่น มาตรฐาน WELL กำหนดที่ 800 ppm. ระบบจะส่งสัญญาณไปยังระบบให้นำอากาศบริสุทธิ์เข้ามาเติม จนค่า CO₂ ลดลงถึงระดับที่ต้องการ การติดตั้ง CO₂ Sensor ในห้องต้องติดตั้งในระดับความสูงระหว่าง 0.9 - 1.80 ม. จากพื้น ซึ่งเป็นระดับ Breathing Zone ของผู้ใช้อาคารที่นั่งและยืน

	
รูปที่ 9-24 Carbon Dioxide Sensor สำหรับติดในห้อง (ที่มา: https://www.indiamart.com/proddetail/honeywell-co2-sensor-detector-20456436497.html)	รูปที่ 9-25 Carbon Dioxide Transmitter สำหรับท่อลม (ที่มา: https://dir.indiamart.com/impcat/carbon-dioxide-detectors.html)

9.5.2 เทคโนโลยีในการบำบัดอากาศ

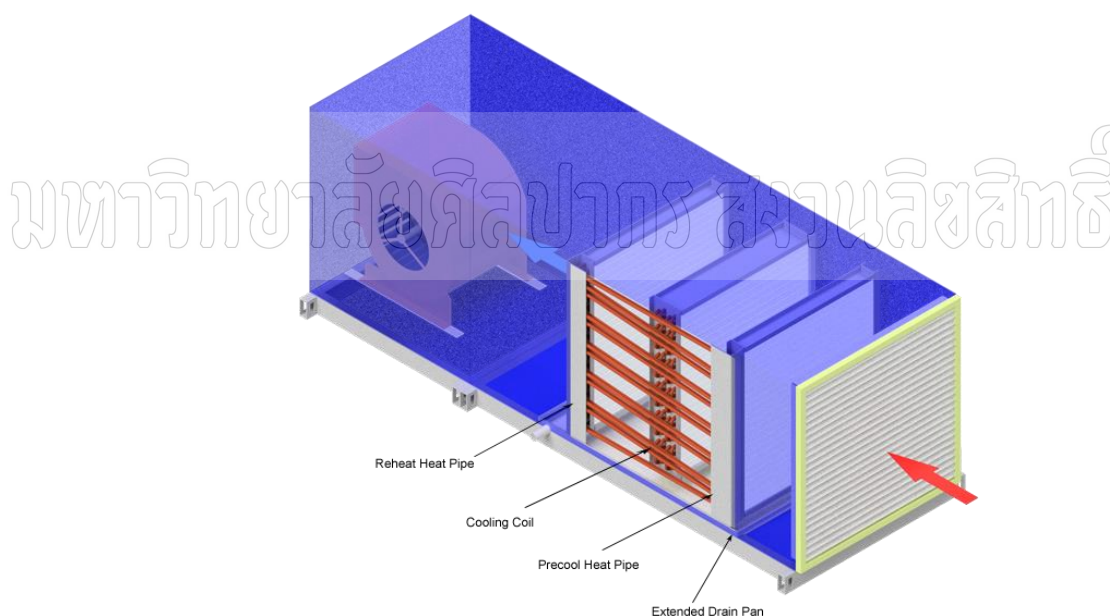
เป็นการบำบัดอากาศให้สะอาดลดฝุ่นจากอากาศภายนอกที่นำมาเติม ลดความชื้นซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดเชื้อรา การดูดซับสาร VOC ที่ปลดปล่อยจากวัสดุในอาคาร การฆ่าเชื้อโรคในอากาศ ที่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้อาคาร

(1) การใช้แผ่นกรองอากาศประสิทธิภาพสูง ในอาคารที่มีความสำคัญต่อคุณภาพอากาศ ถ้าอากาศภายนอกมีฝุ่นขนาดเล็กจำนวนมาก เช่น PM 2.5, PM 10 จะต้องใช้แผ่นกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งกำหนดโดย ค่า MERV (Minimum Efficiency Rating Value) ค่า MERV ยิ่งสูงหมายถึง ยิ่งมีประสิทธิภาพดี สำหรับพื้นที่ทั่วไป จะติดตั้งแผ่นกรองระดับ MERV 7 หรือ MERV 8 โดยจะติดตั้งแผ่นกรองนี้ที่พัดลมของ ERV แต่ถ้าต้องการกรองที่มีฝุ่นเล็กมากขนาด PM 2.5 จะต้องใช้แผ่นกรองระดับ MERV 13 หรือ MERV 14 การใช้แผ่นกรองที่มีประสิทธิภาพสูงจะทำให้เกิดปัญหาแรงดันไม่พอ (Pressure Drop) ซึ่งอาจจะไม่สามารถใช้ได้ ถ้าอาคารใช้เครื่องปรับอากาศขนาดเล็ก

	
รูปที่ 9-26 แผ่นกรองอากาศ MERV 7 (ที่มา: https://www.amazon.com/Nordic-Pure-10x20x2-Pleated-Furnace/dp/B005ESNMGM)	รูปที่ 9-27 แผ่นกรองอากาศ MERV 13 (ที่มา: https://www.amazon.com/Nordic-Pure-20x24x1M13-6-20x24x1-Pleated/dp/B005ESP6KW)

(2) การลดความชื้นโดยใช้ Heat Pipe เป็นการออกแบบเพื่อลดความชื้นในการปรับอากาศ สำหรับพื้นที่ที่ต้องการควบคุมความชื้น เช่น ห้องผ่าตัด ห้องยา หรือเพื่อป้องกันการเกิดเชื้อราในอาคาร ระบบปรับอากาศส่วนใหญ่จะไม่ได้ควบคุมความชื้น วิธีการลดความชื้นถ้าไม่ใช่ Heat Pipe ปรกติจะใช้วิธีทำให้อากาศเย็นจัด จนควบแน่นเป็นน้ำ แล้วนำน้ำออก จากนั้นทำให้อากาศอุ่นอีกครั้ง (Reheat) มาสู่อุณหภูมิที่ต้องการ โดยผ่านคอยล์ร้อน ซึ่งทำให้ต้องใช้พลังงานในการทำให้อากาศอุ่นขึ้น

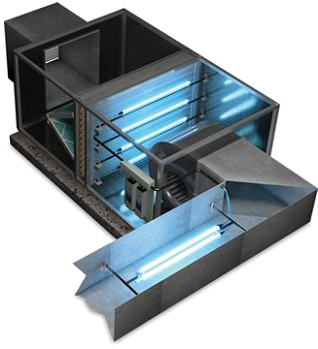
หลักการทำงานของ Heat Pipe คือ การใช้สารทำความเย็น เช่น R-134a มาบรรจุในท่อปิดที่เป็นสุญญากาศ ให้ทำงานโดยใช้หลักการระเหยเป็นไอ การควบแน่น และแรงโน้มถ่วง โดยไม่ต้องใช้พลังงานอื่นมาช่วย กล่าวคือ ในการใช้งานจะต้องนำ Heat Pipe ไปวางครอบคลุมที่ด้านหน้าและด้านหลังของคอยล์เย็น ใน AHU (รูปที่ 9-28) เมื่ออากาศภายนอกไหลผ่าน Heat Pipe สารทำความเย็นใน Heat Pipe จะดูดความร้อนจากอากาศแล้วระเหยเป็นไอ ลอยขึ้นไปยังส่วนที่สูงกว่าใน Heat Pipe ซึ่งอยู่ที่อีกด้านของคอยล์เย็น อากาศที่เย็นลงจากการผ่าน Heat Pipe ส่วนแรก (Precool) จะไหลผ่านคอยล์เย็นของ AHU และควบแน่นเป็นน้ำออกมา จากนั้นจะไหลไปผ่าน Heat Pipe ส่วนที่สองที่อยู่อีกด้าน เมื่ออากาศเย็นผ่าน Heat Pipe ส่วนนี้ จะทำให้สารทำความเย็นใน Heat Pipe ควบแน่น และปล่อยความร้อนออกมา ทำให้อากาศอุ่นขึ้น (Reheat) ส่วนสารทำความเย็นใน Heat Pipe ที่ควบแน่นก็ไหลตามแรงโน้มถ่วง กลับไปอยู่ที่ส่วนล่างของท่อที่อยู่อีกด้านตามเดิม



รูปที่ 9-28 การใช้งานของ Heat Pipe ในเครื่องส่งลมเย็นเพื่อลดความชื้นของอากาศ

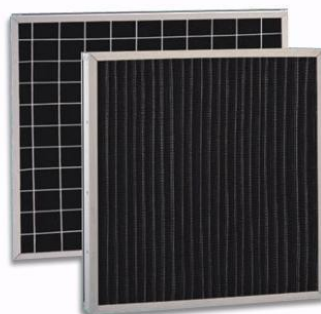
(ที่มา: <http://www.heatpipe.com/engineering-manual/dehumidifier-heat-pipes-in-air-conditioning/>)

(3) การใช้ UV ในการฆ่าเชื้อโรค (UV Germicidal Irradiation, UVGI) เป็นการนำแสง UV-C มาฆ่าเชื้อโรคที่แผงคอยล์เย็นของเครื่อง AHU หรือ FCU เพื่อแก้ปัญหาคุณภาพอากาศ ที่เกิดจากความสกปรกที่แผงคอยล์เย็น ซึ่งเป็นแหล่งสะสมเชื้อโรคในอากาศ

	 Tight-Fit Kit in Fan Coil
รูปที่ 9-29 การใช้ UVGI ที่ AHU (ที่มา: https://www.freshaireuv.com/commercial-hvac/#small)	รูปที่ 9-30 การใช้ UVGI ที่ Fan Coil (ที่มา: https://www.freshaireuv.com/commercial-hvac/#small)

	
รูปที่ 9-31 การใช้ UVGI ในเครื่อง Split Type (ที่มา: https://www.freshaireuv.com/residential/mini-uv-led/)	รูปที่ 9-32 หลอด UVGI แบบ Ribbon (ที่มา: https://www.freshaireuv.com/residential/mini-uv-led/)

(4) การใช้ **Activated Carbon** เป็นการใช้แผ่นกรองเพื่อช่วยลดปัญหาเรื่องกลิ่น และสารอินทรีย์ระเหยง่าย ที่เกิดจากภายในอาคาร และฝุ่นขนาดใหญ่ ซึ่งจะติดตั้งในท่อนลม ส่วนที่อากาศภายในอาคารจะหมุนเวียนผ่าน



รูปที่ 9-33 Activated Carbon Filter สำหรับดูดซับสาร VOC ในเครื่อง AHU

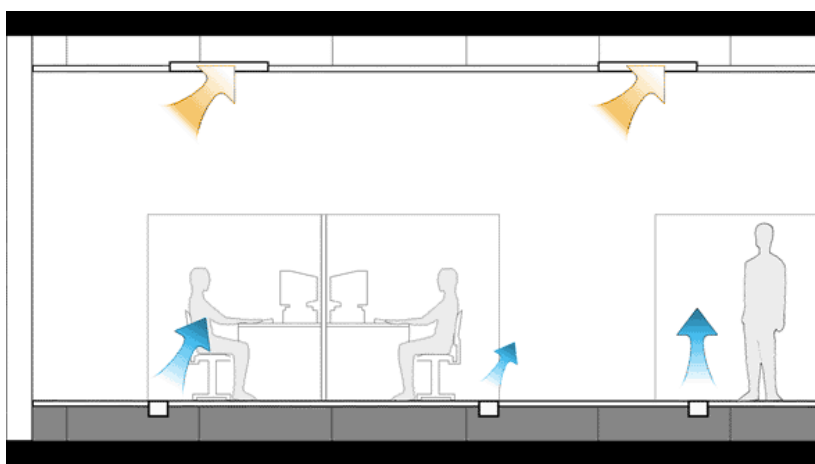
(ที่มา: <https://www.indiamart.com/proddetail/activated-carbon-filters-12091277373.html>)

9.5.3 เทคโนโลยีในการจ่ายความเย็น

ระบบจ่ายความเย็นมีผลต่อการใช้พลังงาน สภาวะสบายของผู้ใช้อาคาร และ คุณภาพอากาศ ซึ่งมี การออกแบบหลายระบบ นอกเหนือจากการจ่ายลมจากฝ้าเพดานซึ่งพบในอาคารทั่วไป ดังนี้

(1) **Displacement Ventilation** เป็นระบบที่ออกแบบในห้องที่มีความเย็นเฉพาะระดับความสูง ของห้องในส่วนที่มีผู้ใช้งานเท่านั้น โดยการจ่ายลมเย็นจากช่วงล่างของผนังที่ใกล้พื้นเป็นลมอ่อน ใช้หลักการที่ว่าอากาศเย็นที่หนักกว่าจะอยู่ที่ส่วนล่างของห้อง ส่วนอากาศร้อนจะลอยอยู่ช่วงบน ในกรณีที่ห้องโถงสูง มาก ระบบนี้จะประหยัด เพราะไม่ต้องปรับอากาศให้เย็นทั้งห้อง และยังสามารถจ่ายลมเย็นมาได้ที่อุณหภูมิ สูงขึ้น เพราะลมที่จ่ายมาอยู่ใกล้ตัวคนมากกว่าการจ่ายลมมาจากเพดาน และในด้านคุณภาพอากาศถือว่า ดีกว่า เพราะการแบ่งชั้นของอากาศทำให้มลพิษต่าง ๆ มักจะลอยไปรวมอยู่ช่วงบนที่ใกล้ ๆ เพดาน นอก Breathing Zone แล้วมลพิษเหล่านี้จะไหลออกไปตามช่องลมกลับ (Return Air) ที่เพดาน

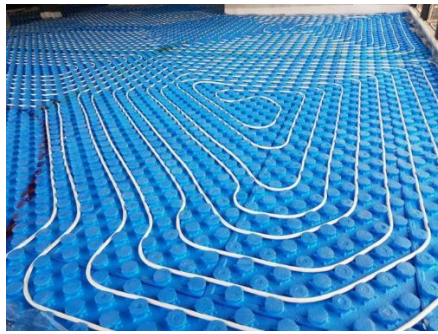
(2) **Underfloor Air Distribution System (UFAD)** เป็นระบบที่คล้ายกับ Displacement Ventilation คือ เป็นการจ่ายลมจากช่วงล่างของห้อง และให้ช่องลมกลับอยู่ที่เพดาน (รูปที่ 9-34) ในระบบนี้ จะออกแบบให้มีการจ่ายลมเย็นมาจากใต้พื้น ซึ่งต้องใช้กับพื้น 2 ชั้น (Raised Floor) ในอาคารประเภท สำนักงานบางแห่ง ซึ่งมีความต้องการทำพื้นยกเพื่อเดินสายเคเบิลอยู่แล้ว ก็อาจใช้ประโยชน์ช่องว่างใต้พื้น สำหรับการจ่ายลมเย็นด้วย ข้อดีของการจ่ายลมร้อนจากพื้น คือ สามารถจ่ายลมด้วยอุณหภูมิที่สูงกว่าการจ่าย ลมมาจากฝ้าเพดานทำให้ประหยัดพลังงาน และอากาศจะแบ่งชั้นเนื่องจากความต่างของอุณหภูมิ โดยอากาศ ร้อนจะลอยขึ้นข้างบนสู่ช่องลมกลับที่เพดาน อากาศที่คนได้รับจึงสะอาดและในด้านสภาวะสบายจะถือว่าดีกว่า เพราะผู้ใช้อาคารสามารถปรับหัวจ่ายลมที่พื้น ในจุดที่ใกล้โต๊ะทำงานได้เอง นอกจากนี้ยังอาจใช้ระยะความสูง ระหว่างพื้นถึงพื้นน้อยกว่าอาคารทั่วไป เพราะช่องลมกลับที่อยู่ในฝ้าเพดาน จะไม่ได้มีขนาดใหญ่มาก จึงไม่ต้อง ใช้ความสูงในช่องฝ้ามาก ถึงแม้ว่าจะต้องมีระยะการยกพื้น แต่หักลบกันแล้วก็เป็นระยะความสูงจากพื้นถึงพื้นที่ ต้องการน้อยลง ซึ่งอาจจะทำให้ประหยัดค่าก่อสร้างในส่วนนี้



รูปที่ 9-34 การออกแบบจ่ายลมจากพื้นที่ใกล้ตำแหน่งคนทำงาน และให้ลมกลับที่เพดาน

(ที่มา: <https://cbe.berkeley.edu/underfloorair/techoverview.htm>)

(3) **Radiant Floor** พื้นแผ้วรังสี เป็นการออกแบบให้พื้นเย็น โดยการเดินท่อน้ำเย็นไว้ในพื้น (รูปที่ 9-35) เพื่อให้พื้นแลกเปลี่ยนความเย็นกับผู้ใช้อาคาร ทำให้สามารถตั้งอุณหภูมิอากาศในการปรับอากาศให้สูงขึ้นกว่าปรกติ ซึ่งช่วยประหยัดพลังงาน ในประเทศเขตร้อนจะใช้ท่อน้ำร้อนเดินในพื้น ตัวอย่างของอาคารขนาดใหญ่ในประเทศไทยที่ใช้ระบบนี้ คือ อาคารสนามบินสุวรรณภูมิ ซึ่งใช้ท่อน้ำเย็นที่เดินอยู่ใต้พื้นเพื่อให้พื้นเย็น และเดินท่อน้ำไปจ่ายที่ Fan Coil Unit แต่ละตัวที่ตั้งบนพื้น เป็น การจ่ายลมแบบ Displacement Ventilation



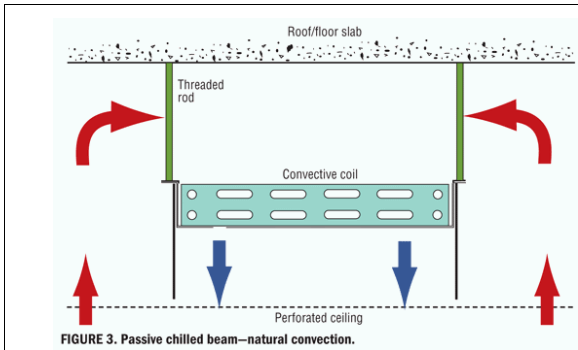
รูปที่ 9-35 การเดินท่อน้ำเย็นในพื้น Radiant Cooling

(4) **Chilled Beam คานเย็น** เป็นการออกแบบระบบปรับอากาศที่ใช้หลักการพาความร้อน โดยในระบบนี้จะมีท่อน้ำเย็นเดินอยู่ในกล่อง ซึ่งอาจจะทำเป็นส่วนหนึ่งของฝ้าเพดาน หรือ ห้อยต่ำลงมาจากฝ้าเพดานก็ได้ Chilled Beam จะทำให้อากาศที่อยู่โดยรอบเย็น มีความหนาแน่นมากขึ้นและหนัก จึงเคลื่อนตัวลงมายังส่วนล่างของห้อง อากาศที่ร้อนกว่าก็จะลอยขึ้นไปรับความเย็น แล้วตกลงมาใหม่วนเวียนกัน ระบบจะไม่มีท่อลมขนาดใหญ่ การทำความสะอาดและดูแลรักษาจึงง่ายกว่า Chilled Beam มี 2 ประเภทคือ Passive และ Active

- **Passive Chilled Beam** จะมีแบบที่ทำงานโดยใช้การพาความร้อนอย่างเดียว และแบบที่ใช้การพาความร้อนร่วมกับการแผ้วรังสี เพื่อเพิ่มความสบาย แบบ Passive จะไม่มีท่อลม การไม่ใช้พัดลมส่งผลให้ประหยัดพลังงาน และเสียงเงียบ แต่จะต้องมีระบบเติมอากาศบริสุทธิ์ให้กับห้องแยกต่างหาก (รูปที่ 9-36)

- **Active Chilled Beam** บางที่เรียก Ventilated Chilled Beam หรือ Ventilated Induction Unit แบบนี้จะมีท่อลมต่อกับระบบระบายอากาศ เป็นระบบที่มีการใช้มากกว่า Passive Chilled Beam เพราะสามารถทำความเย็นได้มากกว่า ในระบบนี้ (รูปที่ 9-37 ถึง รูปที่ 9-39) จะมีท่อน้ำเย็นไหลผ่าน heat exchanger อากาศร้อนจากในห้องจะลอยตัวสูงขึ้นผ่าน Heat Exchanger มารวมกับลมเย็นที่จ่ายมาตามท่อ อากาศเย็นก็ตกลงมาสู่ส่วนล่างของห้อง และอากาศร้อนในห้องก็ลอยตัวขึ้นไปอีก

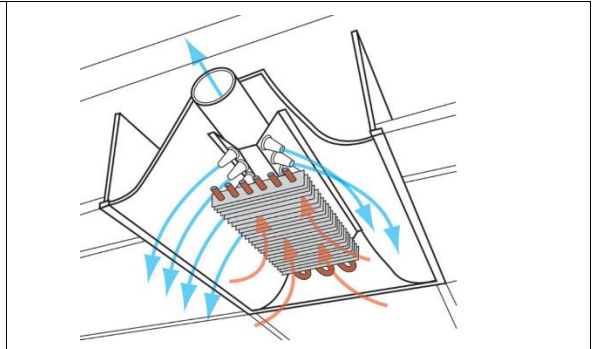
นอกจากนี้ Chilled Beam ยังอาจจะออกแบบให้เป็น Multi Service Chilled Beam คือรวมระบบอุปกรณ์อื่น ๆ ไว้ด้วยกันใน Chilled Beam เช่น โคมไฟฟ้าแสงสว่าง อุปกรณ์ตรวจจับควัน ระบบเสียง เป็นต้น (รูปที่ 9-40) อาคารในประเทศไทยที่ใช้ระบบนี้ยังมีน้อย โดยมีการใช้ที่อาคารสำนักงานใหญ่ของรถไฟฟ้าฝ่ายผลิต ในชั้นที่ 4-14 ซึ่งเป็นพื้นที่สำนักงานซึ่งใช้ผนัง Curtain Wall ที่ปิดสนิทจากภายนอกเท่านั้น เนื่องจากระบบนี้ไม่เหมาะกับบริเวณที่มีความชื้นจากภายนอกเข้ามาได้ เช่น ใกล้ทางเข้าหลักที่มีการเปิดปิดประตูบ่อย เพราะอาจจะเกิดการควบแน่นที่ Chilled Beam ซึ่งเย็นจัดได้ ข้อดีของการใช้ Chilled Beam คือ ท่อลมเล็ก ทำให้ระยะความสูงระหว่างชั้นน้อยลงได้ ประหยัดค่าก่อสร้าง



รูปที่ 9-36 การทำงานของ Passive Chilled Beam

(ที่มา:

<http://tacoadvancedhydronics.files.wordpress.com/2011/08/0711-chilled-beam-fig32.gif>)



รูปที่ 9-37 การทำงานของ Active Chilled Beam

(ที่มา: <https://www.buildinggreen.com/product-review/active-chilled-beams-saving-energy-and-space>)



รูปที่ 9-38 การใช้ Active Chilled Beam

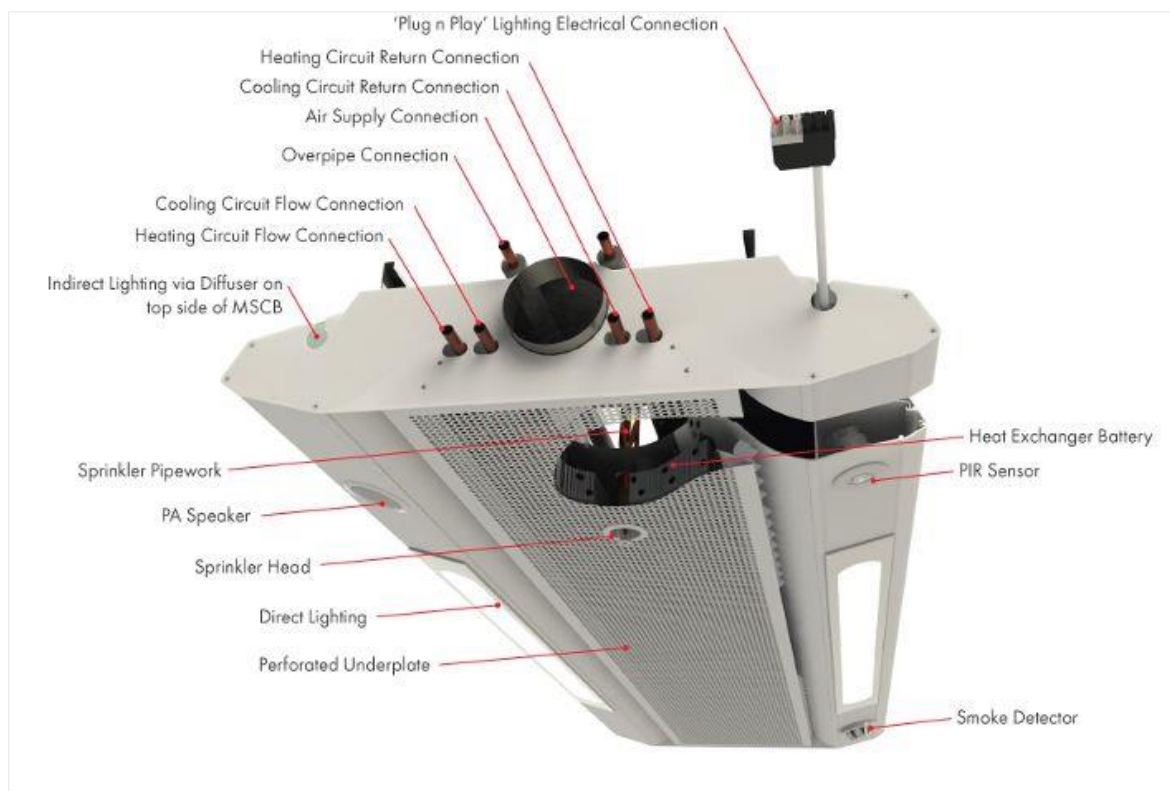
แบบฝังในฝ้า

(ที่มา: <https://effectiv-hvac.com/product/waab-300-active-chilled-beam/>)



รูปที่ 9-39 การใช้ Active Chilled Beam

แบบไม่มีฝ้า ทำให้ได้ความสูงห้องเพิ่มขึ้น



รูปที่ 9-40 Multi Service Chilled Beam ที่รวมระบบอุปกรณ์อาคารอื่นด้วย

(ที่มา: <https://www.frenger.co.uk/latest-news/over-20-years-of-multiservice-chilled-beam-solutions.php>)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

9.6 ระบบปรับอากาศกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ในระบบปรับอากาศมีการใช้สารทำความเย็น ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อการทำลายโอโซน และการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ดังนั้น มาตรฐานการออกแบบระบบปรับอากาศในปัจจุบัน โดยเฉพาะในอาคารเขียว จะพิจารณาชนิดของสารทำความเย็นที่ใช้ด้วย มิได้คำนึงแต่ประสิทธิภาพพลังงานเพียงอย่างเดียว ค่าที่ใช้ในการพิจารณา คือ ค่าศักยภาพในการทำลายโอโซน (Ozone Depletion Potential, ODP) และค่าศักยภาพในการทำให้เกิดโลกร้อน (Global Warming Potential, GWP) ซึ่งสารทำความเย็นที่ห้ามใช้ในอาคารเขียวตามมาตรฐาน LEED คือ สาร CFC (Chlorofluorocarbon) ซึ่งปัจจุบันเครื่องปรับอากาศที่จำหน่ายส่วนใหญ่ ก็ไม่มีการใช้แล้ว ส่วนในระบบ TREES ก็มีการให้คะแนน สำหรับอาคารที่ออกแบบโดยไม่ใช้ CFC และ HCFC-22 (Hydrochlorofluorocarbon) สารทำความเย็นที่มีการใช้มากตัวหนึ่งในปัจจุบัน คือ HFC (Hydrofluorocarbon) ซึ่งมีค่า ODP ต่ำเกือบเป็นศูนย์ แต่ยังมีค่า GWP สูงอยู่ ซึ่งปัจจุบันผู้ผลิตเครื่องปรับอากาศก็ได้พยายามปรับเปลี่ยนสารทำความเย็นที่ใช้ เพื่อให้มีทั้งค่า ODP และ GWP ต่ำ ซึ่งต่อไปในอนาคต ค่าทั้งสองอาจจะกลายเป็นเกณฑ์สำคัญในการเลือกระบบปรับอากาศ พร้อมกับค่าประสิทธิภาพพลังงานด้วย

9.7 สรุป

การออกแบบอาคารประหยัดพลังงาน จำเป็นต้องเลือกระบบปรับอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่า COP, EER, SEER หรือ kW/RT นอกจากประสิทธิภาพของตัวเครื่องแล้ว วิธีการออกแบบก็เป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้ประหยัดพลังงานได้มากยิ่งขึ้น โดยมีระบบระบายอากาศที่ช่วยประหยัดพลังงาน และทำให้มีคุณภาพอากาศที่ดี มีอัตราการระบายอากาศพอเพียง มีวิธีการบำบัดอากาศที่นำมาระบายอากาศ โดยการใช้แผ่นกรองอากาศประสิทธิภาพสูง วิธีการลดความชื้น การฆ่าเชื้อโรคในอากาศที่หมุนเวียน นอกจากนี้วิธีการจ่ายความเย็นก็สามารถทำได้หลายแบบ เช่น ใช้การแผ่รังสีความเย็นจากพื้น การแผ่รังสีจากด้านบนเพดาน การจ่ายลมเย็นจากผนัง การจ่ายลมเย็นจากใต้พื้น ซึ่งแต่ละวิธีก็อาจจะมีเหมาะสมแตกต่างกัน แล้วแต่ลักษณะการใช้สอยของอาคาร ซึ่งต้องพิจารณาในรายละเอียด นอกจากนี้แล้วการออกแบบระบบปรับอากาศยังควรมีความเข้าใจ เกี่ยวกับผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนซึ่งเกิดจากประเภของสารทำความเย็นที่ใช้ ดังนั้น ผู้ออกแบบควรมีเข้าใจระบบปรับอากาศและเรื่องที่เกี่ยวข้องในหลาย ๆ ด้าน ไม่จำกัดเฉพาะประสิทธิภาพพลังงานของตัวระบบเพียงอย่างเดียว

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงพลังงาน. ประกาศกระทรวงพลังงาน เรื่อง การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะขั้นต่ำ ค่าประสิทธิภาพการให้ความเย็นและค่าพลังงานไฟฟ้าต่อตันความเย็นของระบบปรับอากาศที่ติดตั้งใช้งานในอาคาร พ.ศ. 2552.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. รู้จักระบบปรับอากาศ Chilled Beam กฟผ. สำนักงานใหญ่แห่งใหม่ ประหยัดพลังงานได้กว่า 30 %. Available from https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=2557:art20180528-01&catid=49&Itemid=251
- เกชา ชีระโกเมน. เทคโนโลยีอาคาร. สถาบันอิอีซี. 2558.
- ประกาศราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 126 ตอนที่ 12 ก. 20 กุมภาพันธ์ 2552. กฎกระทรวง กำหนดประเภท หรือขนาดของอาคาร และมาตรฐาน หลักเกณฑ์ และวิธีการ ในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552.
- สถาบันอาคารเขียวไทย. คู่มือสำหรับเกณฑ์การประเมินความยั่งยืนทางพลังงานและสิ่งแวดล้อมไทย สำหรับการก่อสร้างและปรับปรุงโครงการใหม่และอาคารประเภท พื้นที่ส่วนกลางและกรอบอาคาร. 2559.
- COVID-19 – The Basics. Available from https://www.americanultraviolet.com/germicidal-healthcare-solutions_on_Solar_Thermal_energy
- Dynamic Air Corporation. Wrap Around Heat Pipe | How does a Wrap Around Heat Pipe work? Available from <http://www.dac-hvac.com/wrap-around-heat-pipe-how-does-a-wrap-around-heat-pipe-work-2/>
- Ehrlich, Brent. Building Green. Active Chilled Beams: Saving Energy and Space. Available from <https://www.buildinggreen.com/product-review/active-chilled-beams-saving-energy-and-space>
- Japan Gas Association. Development of Triple Effect Absorption -Chiller Heater. Available from <https://cutt.ly/7yXPIZG>.
- Module 10: Absorption refrigeration. CIBSE Journal. Available from <https://www.cibsejournal.com/cpd/modules/2009-11/>
- Performance evaluation and COP calculation of Triple effect vapour Absorption machine working on Solar Thermal energy. Available from https://www.researchgate.net/publication/322753897_Performance_evaluation_and_COP_calculation_of_Triple_effect_vapour_Absorption_machine_working
- The WELL Building Standard is a registered trademark of Delos Living LLC. **The WELL Building Standard V1 with Q1 2018 addenda**. New York : Delos Living LLC., 2018.
- U.S. Green Building Council. LEED Reference Guide for Building Design and Construction V4. Washington : 2013.

10. ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง และการใช้แสงธรรมชาติ

ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง เป็นอีกส่วนหนึ่งในอาคารที่มีการใช้พลังงานมาก โดยมีสัดส่วนการใช้พลังงานประมาณ 25% ของพลังงานที่ใช้ในอาคาร ดังนั้น การออกแบบอาคารที่เน้นการประหยัดพลังงาน จะต้องให้ความสำคัญกับวิธีการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่างด้วย บทนี้จึงมีวัตถุประสงค์ คือ

- 1) เพื่อให้เข้าใจกฎหมายและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่าง
- 2) เพื่อให้เข้าใจวิธีการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่างให้ประหยัดพลังงาน
- 3) เพื่อให้เข้าใจวิธีการใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติ
- 4) เพื่อให้เข้าใจประโยชน์ของแสงธรรมชาติที่มีต่อสุขภาพ

10.1 กฎหมายและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่าง

การออกแบบระบบแสงสว่างให้ประหยัดพลังงาน จะต้องออกแบบให้มีความสว่างพอเพียง สอดคล้องกับกฎหมาย หรือ มาตรฐานที่เลือกใช้ด้วย ซึ่งในประเทศไทยมีกฎหมายและมาตรฐานการออกแบบที่เกี่ยวข้องคือ

(1) กฎหมายควบคุมอาคาร ตามกฎกระทรวงฉบับที่ 39 พ.ศ. 2537 หมวดที่ 3 ระบบการจัดการแสงสว่างและการระบายอากาศ ซึ่งได้กำหนด ค่าความเข้มของแสงสว่าง หน่วยเป็น Lux ซึ่งมีทั้งการจำแนกตามประเภทพื้นที่ (Space Type) เช่น พื้นที่ห้องเรียน ห้องประชุม ห้องทำงานในสำนักงานต้องมีความเข้มของแสงสว่าง 300 Lux และตามประเภทอาคาร (Building Type) รวมอยู่ในตารางเดียวกัน เช่น ห้างสรรพสินค้า 200 Lux เป็นต้น ซึ่งในมาตรฐานต่างประเทศ เช่น ASHRAE 90.1 จะแยกตารางเกณฑ์ความเข้มของแสงสว่างสำหรับประเภทพื้นที่และสำหรับประเภทอาคาร

(2) ประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่อง มาตรฐานความเข้มของแสงสว่าง ซึ่งเน้นเฉพาะพื้นที่ในสถานประกอบกิจการ โดยกำหนดค่าความเข้มของแสงสว่าง ณ พื้นที่ทั่วไป และบริเวณการผลิตภายในสถานที่ประกอบกิจการ โดยใช้ค่าเฉลี่ยความเข้มของแสงสว่าง และค่าความเข้มของจุดที่แสงสว่างต่ำสุดควบคู่กัน เช่น ห้องสำนักงาน ต้องมีค่าเฉลี่ยความเข้มของแสงสว่าง 300 Lux และค่าความเข้มของแสงสว่างต่ำสุด 150 Lux เป็นต้น

(3) คู่มือแนวทางการออกแบบการส่องสว่างภายในอาคาร และ คู่มือแนวทางการออกแบบแสงสว่างภายนอกอาคาร ของสมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย ซึ่งเป็นคู่มือที่ผู้ออกแบบจำนวนมากใช้เป็นมาตรฐานในการออกแบบ เพราะมีตารางกำหนดเกณฑ์คุณภาพแสงสว่างสำหรับพื้นที่ย่อย ๆ ในอาคารหลายประเภท มากกว่าในกฎหมายควบคุมอาคาร และประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เช่น ห้องย่อยต่าง ๆ ในโรงพยาบาล และยังมีการกำหนดมาตรฐานคุณภาพอื่น ๆ นอกเหนือจากความเข้มของแสงสว่างขั้นต่ำด้วย ได้แก่ ค่าจำกัดพิกัดแสงจ้า (Unified Glare Rating, UGR_L) ค่าความสม่ำเสมอของความส่องสว่าง (U_o) ค่าดัชนีความถูกต้องของสีต่ำสุด (R_a) สำหรับแต่ละห้อง เช่น ในอาคารสำนักงาน ก็จะแยกเป็นเกณฑ์การออกแบบสำหรับ พื้นที่เขียน พิมพ์ อ่าน และโต๊ะเขียนแบบคอมพิวเตอร์ ต้องมีค่าความส่องสว่างเฉลี่ยขั้นต่ำ = 500 Lux, UGR_L = 19, U_o = 0.6, R_a = 80 ส่วนโต๊ะพนักงานต้อนรับ กำหนดให้ ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยขั้นต่ำ = 300 Lux, UGR_L = 22, U_o = 0.6, R_a = 80 เป็นต้น

(4) กฎหมายอนุรักษ์พลังงาน คือ กฎกระทรวง กำหนดประเภท หรือ ขนาดของอาคาร และมาตรฐาน หลักเกณฑ์และวิธีการในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552 ได้กำหนด **ค่ากำลังไฟฟ้าส่องสว่างสูงสุด (Lighting Power Density, LPD)** ของอาคาร 9 ประเภท ที่มีพื้นที่ตั้งแต่ 2,000 ตร.ม. โดยแยกเป็น 3 กลุ่ม ตามช่วงเวลาการใช้งานเหมือนกับเกณฑ์ในการออกแบบเปลือกอาคาร ดังตารางที่ 10-1

ตารางที่ 10-1 ค่ากำลังไฟฟ้าส่องสว่างสูงสุดตามกฎหมาย (วัดต่อตารางเมตรของพื้นที่ใช้งาน)

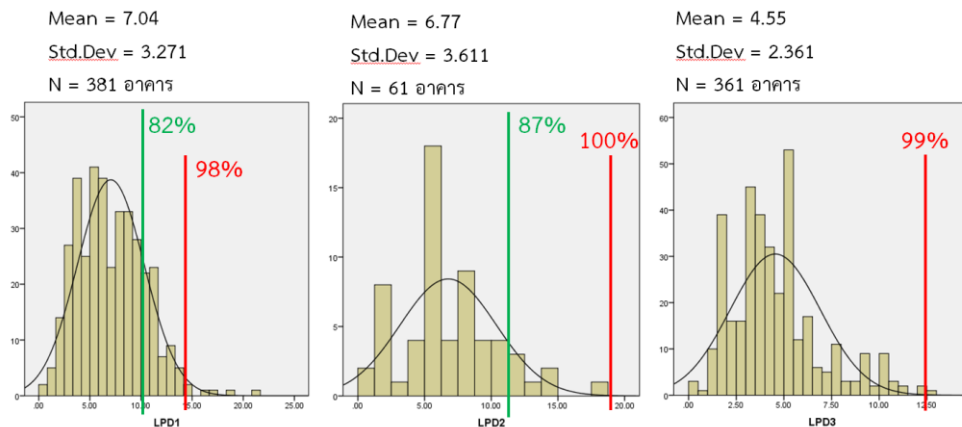
ประเภทอาคาร	ค่ากำลังไฟฟ้าส่องสว่างสูงสุด วัดต่อตารางเมตร ของพื้นที่ใช้งาน
สถานศึกษา สำนักงาน	14
โรงแรมที่พัก ศูนย์การค้า สถานบริการ ห้างสรรพสินค้า อาคารชุมนุมคน	18
โรงแรม สถานพยาบาล อาคารชุด	12

การคิดค่ากำลังไฟฟ้าส่องสว่างสูงสุด จะต้องนำค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ของบัลลาสต์มารวมกับหลอดไฟด้วย แต่จะไม่คิดการใช้ไฟฟ้าแสงสว่างในพื้นที่จอดรถ และไม่นำพื้นที่จอดรถมารวม และไม่คิดการใช้ไฟฟ้าแสงสว่างภายนอกอาคาร

อย่างไรก็ตาม หากสามารถออกแบบให้พื้นที่อาคารจอดรถและพื้นที่ภายนอกอาคาร ประหยัดพลังงานด้วย ก็เป็นสิ่งที่ดี เช่น การใช้หลอดไฟที่มีประสิทธิภาพสูง การใช้เซนเซอร์ หรือ อุปกรณ์ตั้งเวลา (Timer) ควบคุมการเปิดปิดไฟ

จากการศึกษาของศูนย์ประสานงานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ที่ได้ตรวจแบบอาคาร ในระหว่างปี พ.ศ. 2552 - 2562 จำนวน 803 อาคาร พบว่า ปัจจุบันอาคารเกือบ 100% (รูปที่ 10-1) สามารถผ่านเกณฑ์ LPD ตามกฎหมายได้ เพราะเทคโนโลยีของหลอดไฟมีประสิทธิภาพดีขึ้นมาก โดยค่า LPD เฉลี่ย ของอาคารกลุ่มที่ 1 มีค่า = 7.04 W/m^2 กลุ่มที่ 2 = 6.77 W/m^2 และกลุ่มที่ 3 = 4.55 W/m^2 ทำให้ขณะนี้ได้มีการศึกษาเพื่อปรับเกณฑ์ ค่า LPD ให้เหมาะสมกับเทคโนโลยีของหลอดไฟในปัจจุบัน

การกระจายตัวของค่า LPD



รูปที่ 10-1 ค่าเฉลี่ย LPD ของอาคารในกลุ่มที่ 1, 2 และ 3

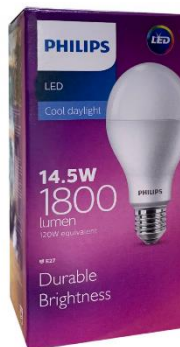
(สีแดง คือ เกณฑ์ปัจจุบันตามกฎหมาย สีเขียว คือ เกณฑ์ในอนาคต)

(ที่มา: ศูนย์ประสานงานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน, 2563)

10.2 วิธีการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่างให้ประหยัดพลังงาน

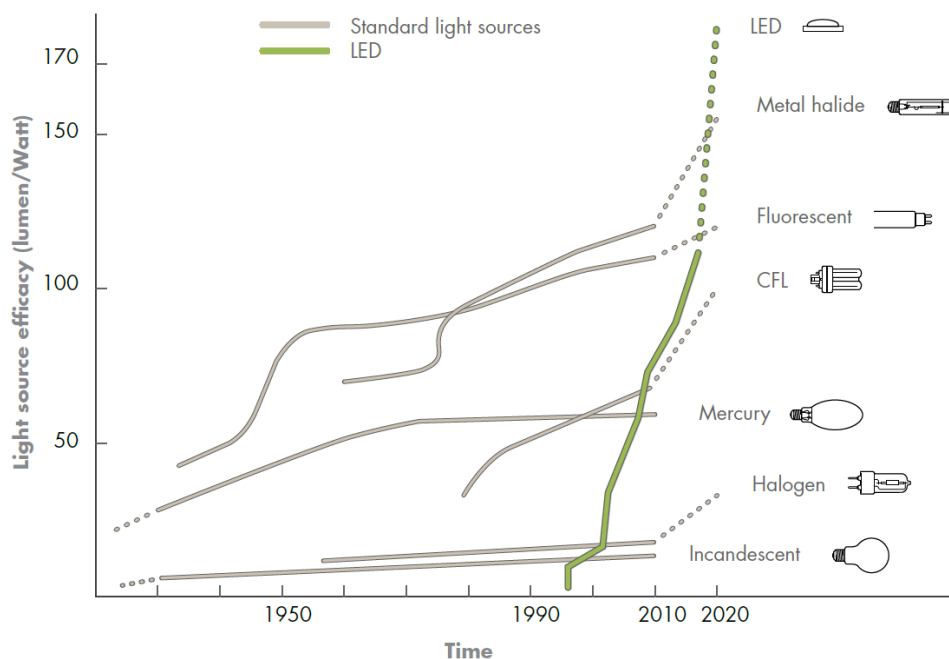
(1) การเลือกใช้หลอดไฟประสิทธิภาพสูง (Lamp Efficacy) เป็นวิธีการประหยัดไฟฟ้าแสงสว่างที่ได้ผลตรงที่สุด ซึ่งสามารถพิจารณาประสิทธิภาพของหลอดได้จาก **ค่าลูเมนต่อวัตต์ (Lumen/Watt)** Lumen/Watt เป็นค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่าง ความสว่างที่ออกมาจากหลอดไฟในแต่ละวินาที ต่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ยิ่งมีค่าสูงแสดงว่ายิ่งมีประสิทธิภาพ หลอดไฟทุกยี่ห้อที่จำหน่ายจะมีค่า Lumen และ Watt กำกับ เพื่อให้ผู้บริโภคสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพ (รูปที่ 10-2)

ปัจจุบันหลอดไฟที่ให้ค่าประสิทธิภาพพลังงานสูงที่สุด คือ หลอดไฟ LED (Light Emitting Diode) (รูปที่ 10-3) ซึ่งในอดีตยังมีราคาสูง แต่ปัจจุบันราคาถูกลงและมีแนวโน้มถูกลงอย่างต่อเนื่อง และยังมีหลากหลายรูปทรงและชนิดหัวหลอด จึงนิยมนำมาเปลี่ยนแทนหลอดไฟเดิมทั้งภายในอาคารและภายนอกอาคาร จึงทำให้ค่า LPD ของอาคารส่วนใหญ่ ต่ำกว่าที่กำหนดไว้ในกฎหมายอนุรักษ์พลังงานมาก



รูปที่ 10-2 การแสดงค่า Lumen (= 1800) และ Watt (= 14.5) ที่กล่องผลิตภัณฑ์

(ที่มา: <https://www.thianthong.com/philips-led-14-5w-durable-brightness-daylight-e27.htm>)



รูปที่ 10-3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหลอดไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ

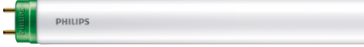
(ที่มา: http://glamox.com/upload/2014/06/03/tenthings_gmo_2014_webedition_singelpages03.pdf)

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้จัดทำเกณฑ์ประสิทธิภาพของหลอดไฟฟ้า LED เบอร์ 5 ซึ่งเริ่มใช้ตั้งแต่ พ.ศ. 2562 โดยแบ่งตามค่า lumen/W เป็น 4 ระดับ และแสดงด้วยจำนวนดาว ยังมีดาวมากแสดงว่ายังมีประสิทธิภาพ (ตารางที่ 10-2) ซึ่งแบ่งตามชนิดรูปร่างหลอดไฟ 5 แบบ (รูปที่ 10-4)

ตารางที่ 10-2 เกณฑ์ระดับประสิทธิภาพพลังงานหลอดแอลอีดี (เริ่มใช้ตั้งแต่ 1 มกราคม 2562)

ชนิดหลอดแอลอีดี	ค่าประสิทธิภาพ (ลูเมน/วัตต์)			
	เบอร์ 5	เบอร์ 5 ★	เบอร์ 5 ★★	เบอร์ 5 ★★★
MR16	65 - 70	71 - 76	77 - 82	83
PAR30/38	65 - 70	71 - 76	77 - 82	83
BULB E27	90.0 - 97.4	97.5 - 104.9	105.0 - 112.4	112.5
TUBE	120 - 129	130 - 139	140 - 149	150
HIGH/LOW BAY	90 - 99	100 - 109	110 - 119	120

ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, ข้อกำหนดโครงการประหยัดไฟฟ้าเบอร์ 5 หลอดแอลอีดี, พ.ศ. 2562

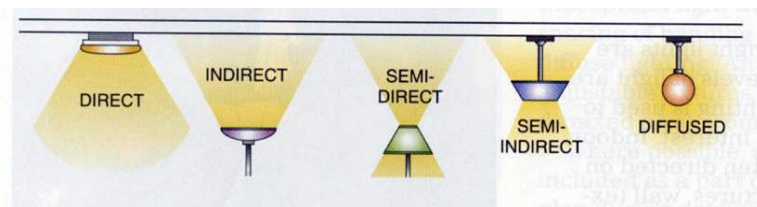
		
MR 16	PAR 30	Bulb ไข้วแบบ E27
		
Tube	Low Bay	High Bay

รูปที่ 10-4 ตัวอย่างหลอดไฟแอลอีดี

(ที่มา: <https://www.lighting.philips.co.th/>)

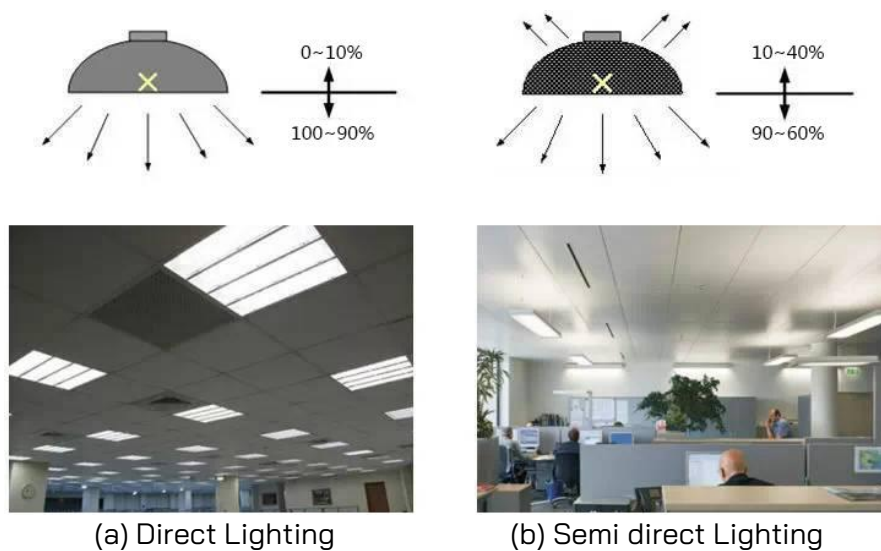
มหาวิทยาลัยศิลปากร งามลิขสิทธิ์

(2) วิธีการให้แสงสว่างจากดวงโคม รูปแบบของโคมจะมีผลต่อความส่องสว่างที่ได้รับ ซึ่งมีการให้แสงจากโคมหลายแบบ (รูปที่ 10-5) คือ การให้แสงทั้งหมดส่องลงข้างล่างยังพื้นที่ใช้งาน (Direct Lighting) การให้แสงส่องขึ้นบนเพดานแล้วสะท้อนมายังพื้นที่ใช้งาน (Indirect Lighting) การให้แสงส่องขึ้นเพดานและพื้นที่ใช้งาน (Semi-Direct or Semi-Indirect) หรือ การให้แสงรอบตัว (Diffuse) โดยถ้าพิจารณาด้านประสิทธิภาพพลังงานเพียงอย่างเดียว การเลือกใช้โคมที่ให้แสงแบบส่องลงมายังพื้นที่ใช้งานจะประหยัดพลังงานมากที่สุด แต่ทั้งนี้การออกแบบแสงสว่าง ก็ยังมีปัจจัยอื่นที่ต้องพิจารณา ร่วมด้วย เช่น ห้องนอนอาจไม่ต้องการแสงส่องลงข้างล่าง เพราะแยงตาเวลนอนมองไปที่เพดาน รวมทั้งการออกแบบยังต้องคำนึงบรรยากาศซึ่งเกิดจากทิศทางของแสง (รูปที่ 10-6)



รูปที่ 10-5 ลักษณะการให้แสงจากโคม

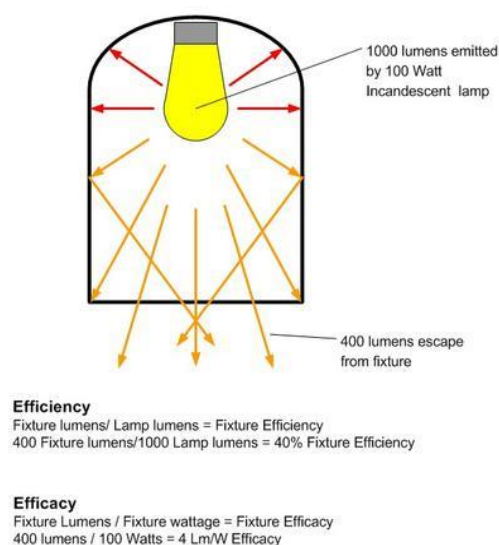
(ที่มา: <http://frontdesk.co.in/forum/Thread-Classification-of-lighting-system>)



รูปที่ 10-6 การเปรียบเทียบทิศทางการให้แสงและบรรยากาศในพื้นที่ (Space)

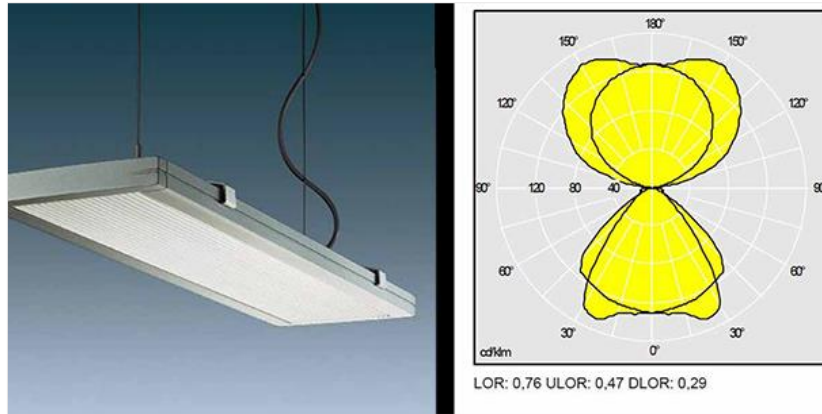
(ที่มา: <https://www.topillumination.com/scene-application/office-lighting-design-regular-office.html>)

(3) การใช้โคมประสิทธิภาพสูง แสงที่ส่องออกมาจากโคมจะขึ้นกับประสิทธิภาพของโคม (Luminaire) หลอดไฟที่มีประสิทธิภาพสูง แต่ถ้าอยู่ในโคมที่มีประสิทธิภาพต่ำ จะได้แสงออกมาน้อย (รูปที่ 10-7) ประสิทธิภาพของดวงโคมแสดงด้วย ค่า Light Output Ratio (LOR) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณแสง (หน่วย : Lumen) ที่ออกมาจากโคมต่อปริมาณแสงที่ออกมาจากหลอดไฟ เป็นค่าทศนิยม จากจำนวนเต็มที่มีค่าเท่ากับ 1 หรือ แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ คำนี้นางที่ยังแบ่งเป็น Upper Light Output Ratio (ULOR) และ Down Light Output Ratio (DLOR) (รูปที่ 10-8) ซึ่งควรเลือกโคมที่มีค่า LOR สูง หรือ DLOR สูง สำหรับห้องที่ต้องการแสงจากโคมแบบส่องลงข้างล่าง



รูปที่ 10-7 หลอดไฟ 1,000 Lumen ได้แสงออกจากโคมเพียง 400 Lumen ประสิทธิภาพโคมเท่ากับ 40%

(ที่มา: <http://www.americangreenlights.com/efficiency-vs.-efficacy.html>)



รูปที่ 10-8 ค่าประสิทธิภาพของแสงที่ได้จากโคม LOR, ULOR และ DLOR

(ที่มา: <https://cutt.ly/byB2Z89>)

(4) การใช้ผิวภายในอาคารที่มีสีอ่อน ความสว่างที่ได้ในอาคารนั้นจะมาจาก 2 ส่วน คือ ความสว่างจากดวงโคมโดยตรง บวกกับความสว่างที่สะท้อนมาจากเพดาน ผนัง พื้นภายในห้อง ดังนั้น การใช้สีภายในที่มีค่าการสะท้อนแสง หรือ Light Reflectance Values (LRV) สูง จะช่วยเพิ่มความสว่าง ทำให้ประหยัดพลังงาน มาตรฐาน WELL ได้กำหนดให้พื้นที่ทำงานมีค่า LRV สำหรับเพดาน ≥ 0.8 (80%) ผนัง ≥ 0.7 (70%) เฟอร์นิเจอร์ ≥ 0.5 (50%) (IWBI, p.101)

(5) การกำหนดระยะห่างระหว่างโคมและพื้นที่ใช้งาน ความสว่างที่ได้จากหลอดไฟจะขึ้นกับระยะห่าง จากแหล่งกำเนิดแสง และลักษณะของแหล่งกำเนิดแสง ดังนี้

- ถ้าแหล่งกำเนิดแสงลักษณะเป็นจุด เช่น ดวงโคม 1 ดวง ความสว่างที่ได้จะลดลงตามระยะห่างยกกำลังสอง เช่น วัดความสว่างที่ระยะห่างจากโคม 1 ม. ได้ 100 Lux ที่ระยะห่าง 2 ม. จะได้ 25 Lux ($= 100/2^2$) ที่ระยะห่าง 3 ม. จะได้ 11.1 Lux ($= 100/3^2$)

- ถ้าแหล่งกำเนิดแสงเป็นเส้นที่มีความยาวมากไม่สิ้นสุด (Infinite Length) เช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ติดยาวต่อเนื่องกัน ความสว่างที่ได้จะลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะห่าง เช่น ความสว่าง 100 Lux ที่ระยะ 1 ม. ถ้าห่าง 2 ม. จะได้ 50 Lux ($= 100/2$) และที่ 3 ม. จะได้ 33.3 Lux ($= 100/3$)

- ถ้าแหล่งกำเนิดแสงเป็นระนาบที่มีขนาดใหญ่ไม่สิ้นสุด (Infinite Plane) เช่น แสงจากหลอดไฟที่ติดเต็มทั้งเพดาน หรือ แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นลำแสงขนาน ความสว่างที่ได้จะเท่ากัน ไม่ขึ้นกับระยะห่าง เช่น ที่ระยะห่าง 1 ม. จากแหล่งกำเนิดแสงวัด 100 Lux ที่ระยะ 2 ม. หรือ 3 ม. จะวัดได้ 100 Lux เท่ากัน

POINT SOURCE 100 fc (lux) 25 fc (lux) 11.1 fc (lux)	INFINITE LINE SOURCE 100 fc (lux) 50 fc (lux) 33.3 fc (lux)	INFINITE SURFACE 100 fc (lux) 100 fc (lux) 100 fc (lux)
แหล่งกำเนิดแสงแบบจุด ความสว่างลดตามระยะห่าง ยกกำลังสอง	แหล่งกำเนิดแสงแบบเส้นยาวไม่ สิ้นสุด ความสว่างลดเป็นสัดส่วน เท่ากับระยะห่าง	แหล่งกำเนิดแสงแบบระนาบใหญ่ ไม่สิ้นสุด ความสว่าง เท่าเดิมในทุกระยะห่าง

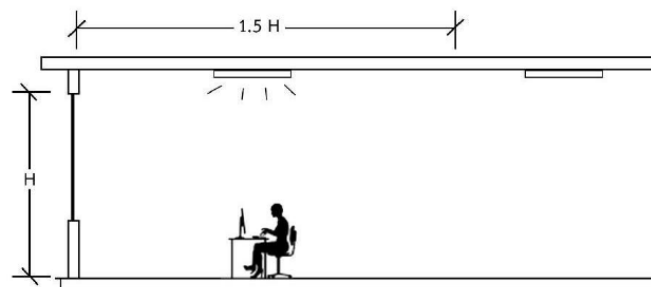
รูปที่ 10-9 ความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งกำเนิดแสง ระยะห่าง และความสว่าง

(ที่มา: Lechner, 2015, p. 474)

(6) การควบคุมการเปิด-ปิดหลอดไฟ สามารถช่วยให้ประหยัดพลังงานได้มากยิ่งขึ้น ดังนั้น มาตรฐานการประหยัดพลังงานในบางระบบ เช่น ASHRAE 90.1 นอกจากจะกำหนดค่า LPD แล้วยังกำหนดให้มีการควบคุมการเปิด-ปิดหลอดไฟด้วย ซึ่งสามารถควบคุมได้หลายลักษณะ ได้แก่

- การแยกสวิตช์เปิด-ปิดในบริเวณที่มีแสงธรรมชาติ
- การใช้เซนเซอร์ควบคุม
- การแบ่งขนาดพื้นที่ควบคุมให้มีขนาดเล็กลง

(6.1) การแยกสวิตช์สำหรับควบคุมหลอดไฟในบริเวณที่มีแสงธรรมชาติเพียงพอ เช่น บริเวณริมหน้าต่าง โดยหลอดไฟควรจะต้องติดตั้งในระยะ 1.5 เท่าของความสูงหน้าต่าง โดยวัดความสูงจากพื้นถึงขอบบนของวงกบ (รูปที่ 10-10)



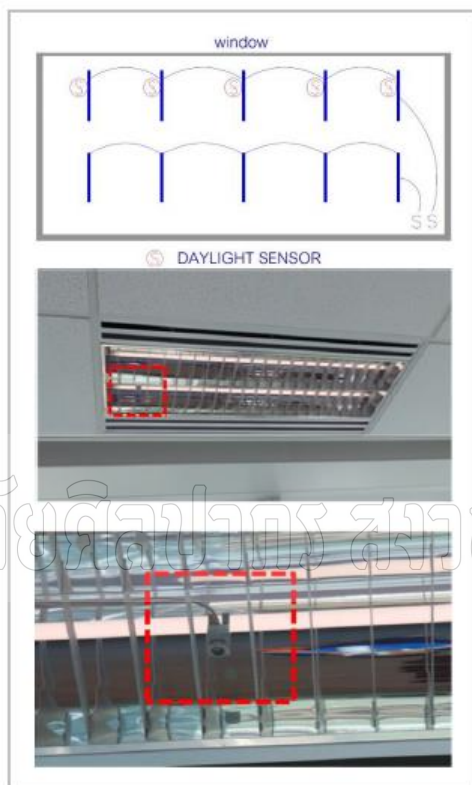
ระยะหลอดไฟในแนวริมหน้าต่าง
ซึ่งควรแยกวงจรควบคุมออกจากพื้นที่ด้านใน

รูปที่ 10-10 ระยะห่างของหลอดไฟจากบริเวณริมหน้าต่างที่ควรแยกสวิตช์เปิด-ปิด

(ที่มา: ผู้เขียน)

นอกจากนี้ กระจกที่ใช้ตามแนวริมอาคารจะต้องมีค่าสัดส่วนที่แสงผ่านได้ (Visible Light Transmittance, VT) สูงพอสมควรด้วย ในมาตรฐาน WELL ได้มีเกณฑ์การให้คะแนน ในการเลือกใช้กระจกที่มีค่า $VT \geq 50\%$ หรือ 0.5 สำหรับกระจกในช่วงที่สูงไม่เกิน 2.1 ม. จากพื้น ซึ่งเรียก Vision Glass และใช้ค่า $VT \geq 60\%$ หรือ 0.6 ในช่วงที่สูงกว่า 2.1 ม. ขึ้นไป หรือ เรียก Daylight Glass

การควบคุมหลอดไฟตามแนวริมหน้าต่างนี้ ควรใช้ร่วมกับ **Daylight Sensor** โดยอาจจะติดตั้งที่หลอดไฟ (รูปที่ 10-11) หรือ บริเวณใกล้เคียง เพื่อให้หลอดไฟหรี่แสงหรือปิดอัตโนมัติ เมื่อมีแสงสว่างธรรมชาติพอ เพราะผู้ใช้อาคารอาจลืมปิดไฟ ทำให้การแยกสวิตช์ไม่ได้ประโยชน์เท่าที่ควร



รูปที่ 10-11 การใช้ Daylight Sensor เพื่อให้หลอดไฟแนวริมหน้าต่าง เปิด-ปิด อัตโนมัติ

(6.2) การควบคุมโดยการใช้ **Occupancy Sensor** เป็นการควบคุมการเปิด-ปิดหลอดไฟ โดยใช้การเคลื่อนไหวของผู้ใช้อาคาร ซึ่งจะต้องติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสม เพื่อป้องกันมิให้เกิด False Activation หรือ การเปิดไฟเองโดยที่ไม่มีคนอยู่ในบริเวณนั้น Occupancy Sensor อาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

- **Passive Infrared Radiation (PIR)** (รูปที่ 10-12) ซึ่งทำงานโดย การจับสัญญาณความร้อนที่แตกต่างกันระหว่างคน และพื้นหลัง (Background) เหมาะกับการใช้ในพื้นที่โล่ง ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างเส้นสัญญาณกับตัวคน (Line of Sight) และผู้ใช้อาคารมีการขยับเคลื่อนไหวที่ชัดเจน หรือ ใช้ในห้องที่เพดานสูง ซึ่งใช้แบบ Ultrasonic ไม่ค่อยได้ผล

- Ultrasonic (รูปที่ 10-13) ทำงานโดยการส่งคลื่นเสียงและอ่านค่าที่สะท้อนกลับ จึงไม่

จำเป็นต้องมี Line of Sight ไปยังคน สามารถใช้ได้ในพื้นที่ที่มีการกั้นผนัง หรือฉากบังเป็นห้องย่อย ๆ เช่น ในห้องน้ำรวม สามารถจับการเคลื่อนไหวแม้เพียงการขยับเล็กน้อย แต่จะมีข้อจำกัดเรื่องความสูง ซึ่งใช้ไม่ค่อยได้ผลถ้าห้องสูงเกิน 3.60 เมตร หรือ 4.20 เมตร

- ชนิดที่มีทั้ง PIR และ Ultrasonic (รูปที่ 10-14) เพื่อชดเชยข้อด้อยของแต่ละแบบ

 360° PIR Motion Sensor Ceiling Mounted Occupancy Sensor		
รูปที่ 10-12 PIR Sensor แบบติดเพดาน (ที่มา: https://www.pinterest.com/pin/631629916461343503/)	รูปที่ 10-13 Ultrasonic Switch แบบติดผนัง (ที่มา: http://www.cooperindustries.com/content/public/en/lighting/products/wall-box_dimmers_and_sensors/_896737.html)	รูปที่ 10-14 PIR และ Ultrasonic Switch แบบติดผนัง (ที่มา: https://www.alibaba.com/product-detail/Wall-Mount-Occupancy-Sensor-Dual-Technology_60744943693.html)

นอกจากนี้การทำงานของ Occupancy Sensor ยังมีหลายแบบ เช่น

- ชนิดเปิดไฟอัตโนมัติ (Automatic on) เวลาที่มีผู้ใช้งาน และปิดเองเมื่อไม่มีผู้ใช้งาน

เช่น ห้องเก็บของ

- ชนิดต้องเปิดสวิตช์ด้วยมือ (Manual on) เมื่อต้องการแสงสว่าง และปิดด้วยมือแต่ถ้าผู้ใช้ลืมปิด ก็จะปิดอัตโนมัติ ชนิดนี้มักใช้ในบริเวณที่ปรกติมีแสงธรรมชาติอยู่บ้าง ซึ่งผู้ใช้จะพิจารณาเองว่าต้องการเปิดไฟให้สว่างเพิ่มขึ้นหรือไม่

- ชนิดที่เปิดไฟให้มีความสว่างระดับหนึ่ง เช่น 50% และจะเพิ่มความสว่างเป็น 100% เมื่อมีผู้ใช้งาน เช่น โถงบันได และปรับลดลงเมื่อไม่มีคน

(6.3) การแบ่งโซนควบคุมให้มีขนาดเล็กลง ถ้าเป็นพื้นที่เปิดโล่งขนาดใหญ่ การแบ่งพื้นที่ควบคุมการเปิด-ปิดต่อหนึ่งสวิตช์ให้เล็กลง จะทำให้มีความยืดหยุ่นในการปิดไฟส่วนที่ไม่ใช้งาน เช่น พื้นที่ 1,000 ตร.ม. อาจจะแบ่งไม่เกิน 250 ตร.ม. ต่อหนึ่งสวิตช์ หรือ แบ่งขนาดตามโซนที่เหมาะสมกับพฤติกรรมการใช้พื้นที่

(6.4) การปรับความสว่างเป็นระดับ คือ การออกแบบให้สามารถเปิดปิดหลอดไฟได้เป็นอย่างน้อย 2 ระดับ (Bi-Level) เช่น ถ้ามีหลอดไฟ 2 หลอด ใน 1 โคม อาจจะกดสวิตช์หนึ่งครั้ง ไฟสว่าง 1 หลอด และกดอีกครั้งไฟสว่างทั้ง 2 หลอด ซึ่งในบางเวลาการเสริมความสว่างด้วยแสงประดิษฐ์เพียง 50% ก็พอเพียง หรือ จะออกแบบโดยใช้ Dimmer เพื่อหรี่แสง

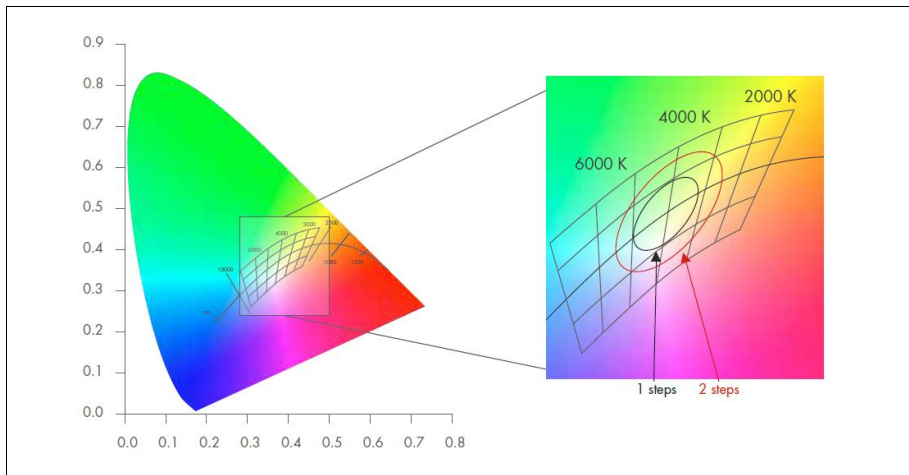
(6.5) การใช้แสงเพื่อการทำงานเฉพาะที่ (Task Lighting) เป็นการออกแบบให้พื้นที่ในห้องมีความสว่างในระดับหนึ่ง เช่น 300 Lux ส่วนที่โต๊ะทำงานมีความสว่าง 500 Lux โดยใช้โคมที่โต๊ะทำงาน โดยไม่จำเป็นต้องออกแบบให้ทั้งห้องมีความสว่างเท่ากันหมดที่ 500 Lux (รูปที่ 10-15) โดยความสว่างของแสงโดยรอบ ควรมีค่าประมาณไม่น้อยกว่า 1 ใน 3 ของบริเวณโต๊ะทำงาน (Lechner, p.470)



10.3 คุณภาพของหลอดไฟ LED

แม้ว่าหลอดไฟ LED จะมีประสิทธิภาพพลังงาน (Efficacy) สูงกว่าหลอดไฟประเภทอื่น แต่ก็ยังมีคุณสมบัติด้านอื่น ที่ควรพิจารณาเพิ่มเติมในการใช้งาน นอกจากค่า lumen/watt ได้แก่

- **ค่า Power Factor (PF)** หรือ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า เป็นค่าที่แสดงให้ทราบว่าไฟฟ้าที่จ่ายให้หลอดไฟนั้น หลอดไฟสามารถนำมาใช้จริงได้เท่าใด โดยจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 หรือ 100% ค่า Power Factor ยิ่งสูงยิ่งดี โดยค่านี้อาจจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.4 - 0.9 ขึ้นอยู่กับประเภทของหลอดไฟและขนาดวัตต์ของหลอดไฟ ค่ามาตรฐานของ กฟผ. สำหรับหลอดไฟที่ไม่บังคับทิศทางแสง อยู่ที่ PF > 0.5
- **ความคงเส้นคงวาของสี (Color Consistency)** เนื่องจากหลอดไฟ LED ประกอบขึ้นจากหลอดไฟ LED เล็ก ๆ เรียงกัน ซึ่งจะมีสีขาวยังไม่เหมือนกันทีเดียว ความต่างของสีจะกำหนดโดยค่า MacAdam Ellipses เป็นระดับ (Step) ยิ่งมี Step น้อยจะยิ่งดี สำหรับหลอดไฟที่ได้มาตรฐานของ กฟผ. คือ น้อยกว่า 7 Step



รูปที่ 10-16 ค่า MacAdam Ellipses ซึ่งแสดงความแตกต่างระหว่างสีของ LED
ยังมี Step น้อย ความคงเส้นคงวาของสีจะยิ่งมาก



รูปที่ 10-17 สีที่ต่างกันของแต่ละ Diode

(ที่มา: <http://www.glamox.com>)

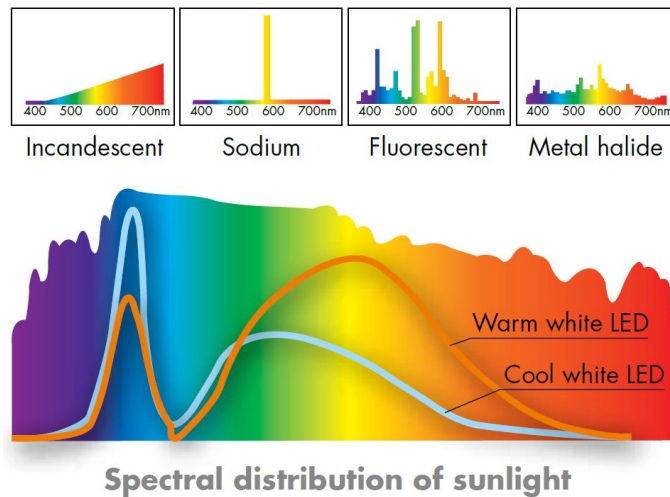
มหาวิทยาลัยศิลปากร ฐานลิขสิทธิ์

- ค่าดัชนีสีที่ปรากฏ (Color Rendering Index, CRI) เป็นค่าที่แสดงความถูกต้องของสีเมื่อได้รับแสงจากหลอดไฟ ซึ่งกำหนดโดยใช้ ค่า Ra ซึ่งเป็นความถูกต้องของสีที่เฉลี่ยมาจาก 8 เฉดสี (R1-R8) (รูปที่ 10-18) ซึ่งค่า Ra ควร ≥ 80 และ ค่า R9 คือ ความถูกต้องของสีแดง ลักษณะของหลอดไฟ LED จะมีแถบสีช่วงคลื่นสีแดงต่ำ (รูปที่ 10-19) สำหรับงานทั่วไปอาจจะใช้ค่า R9 = 0 แต่สำหรับงานที่ต้องการคุณภาพแสงที่สูงขึ้น เช่น เกณฑ์ในมาตรฐาน WELL จะกำหนดให้ใช้ R9 ≥ 50



รูปที่ 10-18 สี R1-R8 ที่ใช้ในการคำนวณ Ra และสีพิเศษ R9-R14

(ที่มา: สมาคมไฟฟ้าแสงสว่าง. คู่มือการเลือกหลอด LED, p.30)



รูปที่ 10-19 การเปรียบเทียบสเปกตรัมของหลอดไฟ LED

และหลอดไฟประเภทอื่น ซึ่งมีผลต่อความถูกต้องของสีแต่ละสีแตกต่างกัน

(ที่มา: <http://Glamox.com>)

- ความเปลี่ยนแปลงของสีของแสง (Change of Chromaticity) สีของหลอดไฟ LED สามารถเปลี่ยนได้เมื่อเวลาผ่านไปนาน ๆ ซึ่งกำหนดโดยค่า Du_v ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าสีจะเปลี่ยนไปมาก มาตรฐานหลอดไฟ กฟผ. คือ Du_v ไม่เกิน 0.007 ที่อายุใช้งาน 1,000 ชั่วโมง
- อายุการใช้งานและความสามารถในการคงความสว่างของหลอดไฟ โดยมักใช้การคงความสว่างที่ 70% หรือ L70 เช่น อายุใช้งาน L70 ไม่น้อยกว่า 25,000 ชั่วโมง หลอดไฟ LED มาตรฐาน เบอร์ 5 กฟผ. กำหนดให้คงความสว่างที่ไม่น้อยกว่า 95% ที่ 1,000 ชั่วโมง
- ลักษณะสีที่ปรากฏ ซึ่งแสดงด้วยค่า Correlated Color Temperature (CCT) มีหน่วยเป็น เคลวิน ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น ค่า $CCT < 3300\text{ K}$ - สีอุ่น, CCT ระหว่าง 3300 ถึง 5300 K สีปานกลาง, $CCT > 5300\text{ K}$ สีเย็น การเลือกสีจะขึ้นอยู่กับความพึงพอใจ ส่วนใหญ่สถานที่ทำงานจะเลือกแสงที่มี CCT สูง หรือ ให้สีขาวเย็น ส่วนบ้านพักอาศัยมักนิยมสีปานกลาง หรือ สีอุ่น

10.4 การใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติ

ในการออกแบบอาคารประหยัดพลังงาน ควรต้องพิจารณาความเป็นไปได้ของการใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติเสมอ เพื่อลดความจำเป็นในการใช้พลังงานจากการใช้แสงประดิษฐ์ แต่การใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติ มีข้อควรคำนึงในเรื่องความไม่แน่นอนของปริมาณแสง และต้องคำนึงถึงความร้อนที่ผ่านเปลือกอาคารด้วย ซึ่งต้องหาจุดเหมาะสมระหว่างปริมาณแสงสว่างที่ได้ กับความร้อนที่เข้าสู่อาคาร เพราะเกี่ยวข้องกับปัจจัยในการออกแบบเปลือกอาคารหลายค่า ได้แก่ สัดส่วนพื้นที่หน้าต่าง (WWR) ค่าสัดส่วนที่แสงสามารถผ่านกระจก (Visible Light Transmittance, VT) ความสูงของหน้าต่างจากพื้น ทิศทางของหน้าต่าง การแบ่งหรือกระจายช่องหน้าต่างบนผนัง ซึ่งอาจต้องพิจารณาการจำลองสภาพแสงด้วยโปรแกรม เพื่อตัดสินใจระหว่างทางเลือกต่าง ๆ ในการออกแบบ โดยมักพบค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์การใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติ ได้แก่

1) **Daylight Factor (DF)** เป็นค่าที่แสดงเปอร์เซ็นต์ของความสว่างภายในอาคาร เปรียบเทียบกับความสว่างภายนอกอาคารในวันที่ท้องฟ้าไม่มีแดด (Overcast Skies) ถ้าภายนอกมีความสว่าง 20,000 Lux ภายในอาคารมีความสว่าง 1,000 Lux แสดงว่าค่า Daylight Factor = 5 % โดยค่า Daylight Factor ขั้นต่ำที่แนะนำสำหรับพื้นที่ต่าง ๆ ดังตารางที่ 10-3 (Lechner, 2009, p.391)

ตารางที่ 10-3 ค่า Daylight Factor ขั้นต่ำที่แนะนำสำหรับพื้นที่ต่าง ๆ

ประเภทห้อง	Daylight Factor (%)
สตูดิโอ ศิลปะ หรือ ห้องแสดงภาพ	4 - 6
โรงงาน ห้องปฏิบัติการ	3 - 5
สำนักงาน ห้องเรียน สนามกีฬาในร่ม ครั้ว	2
โถง (Lobby) ห้องนั่งเล่น โบสถ์	1
ทางเดิน ห้องนอน	0.5

เกณฑ์การออกแบบอาคารเขียวระบบ BREEAM ของประเทศอังกฤษ และระบบ DGNB ของประเทศเยอรมัน จะใช้ค่า Daylight Factor ในการพิจารณาให้คะแนนการใช้แสงธรรมชาติ ค่า Daylight Factor สามารถหาได้จากการใช้หุ่นจำลองอาคารโดยการวัดแสงเปรียบเทียบกับระหว่างภายในหุ่นจำลองและภายนอก แต่ปัจจุบันมักใช้การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

2) Spatial Daylight Autonomy (sDA) และค่า Annual Sunlight Exposure (ASE)

sDA เป็นค่าที่แสดงเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ซึ่งได้รับแสงธรรมชาติซึ่งมีความสว่างถึงระดับที่กำหนด เช่น sDA_{300/50%} หมายความว่า มีเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ซึ่งได้รับแสงธรรมชาติที่มีความสว่าง (Illuminance) 300 lux หรือมากกว่า เป็นเวลาอย่างน้อย 50% ของช่วงเวลาที่วิเคราะห์ โดยเกณฑ์การออกแบบจะกำหนดว่า ต้องออกแบบให้มีพื้นที่ซึ่งมีค่า sDA_{300/50%} อย่างน้อย 55% หรือ 75% จึงจะได้รับคะแนน เป็นต้น

ASE เป็นค่าที่แสดงแนวโน้มของการเกิดความไม่สบายตาภายในอาคาร เนื่องจากสว่างมากเกินไป โดยแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ซึ่งมีความสว่างจากแสงอาทิตย์ (Direct Sunlight Illuminance) เกินจำนวนชั่วโมงที่กำหนดในช่วงเวลาหนึ่งปี เช่น ASE_{1000/250} หมายความว่า พื้นที่ซึ่งมีความสว่างจากแสงอาทิตย์มากกว่า 1000 lux เป็นเวลามากกว่า 250 ชั่วโมงต่อปี โดยเกณฑ์การออกแบบจะกำหนดว่าควรจะมีค่า ASE_{1000/250} ไม่เกินกี่เปอร์เซ็นต์ เช่น 10% หรือ 20% ซึ่งค่ายิ่งน้อยจะยิ่งดี

ค่า SDA และ ASE จะสามารถหาได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3) **การใช้ค่าผลคูณระหว่างค่าสัดส่วนแสงที่ผ่านกระจก (Visible Light Transmittance, VT) กับค่าอัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างต่อพื้นที่อาคาร (Window to Floor Area, WFR) ใน LEED v3 (2009)** ประเภทงานอาคารสร้างใหม่ และประเภทงานตกแต่งภายใน ได้มีเกณฑ์การออกแบบแสงสว่าง (Credit - Daylight) ที่ไม่ต้องใช้การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ด้วย โดยพิจารณาจากผลคูณของค่า VT และ WFR ที่มีค่ามากกว่า 0.15 และ น้อยกว่า 0.18 โดยพื้นที่หน้าต่างที่นำมาคำนวณ จะต้องอยู่สูงจากพื้นอย่างน้อย 75 ซม. (30 นิ้ว)

$$0.15 < (VT \times WFR) < 0.18$$

ตัวอย่าง ถ้าใช้กระจกที่มีค่า $VT = 0.65$ มีพื้นที่หน้าต่าง 100 ตร.ม. พื้นที่อาคาร 400 ตร.ม. $WFR = 0.25$ ผลคูณระหว่าง $VT \times WFR = 0.65 \times 0.25 = 0.162$ ก็จะได้คะแนน

4) การใช้ผลคูณระหว่าง ค่าการส่งผ่านรังสีที่ตามองเห็น (Visible Light Transmittance, VT) กับค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดด (Shading Coefficient, SC) ในกฎหมายอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552 ได้มีการกำหนดเกณฑ์ที่ยอมให้นำหลอดไฟที่อยู่ในระยะ 1.5 เท่า ของความสูงหน้าต่างมาหักลบจากพลังงานไฟฟ้าที่อาคารใช้ เสมือนว่าไม่มีหลอดไฟ โดยกำหนดว่าค่าประสิทธิผลของสัมประสิทธิ์การบังแดด ซึ่งคือผลคูณของ VT กับ SC จะต้องไม่น้อยกว่า 0.3 และกระจกจะต้องมีค่า $LSG > 1.0$ ($LSG = VT/SHGC$) แต่ทั้งนี้ พื้นที่หน้าต่างตามแนวรอบอาคาร จะต้องไม่น้อยกว่าพื้นที่ผนังทึบที่อยู่ข้าง ๆ (ไม่นับพื้นที่ผนังทึบส่วนที่อยู่เหนือและใต้หน้าต่าง) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2562)

$$(VT \times SC) \geq 0.3$$

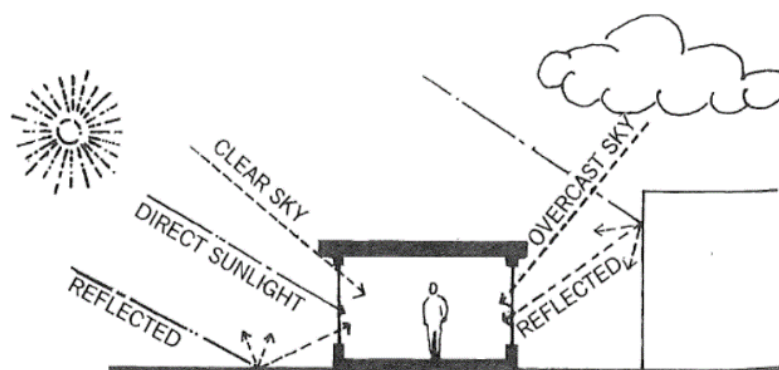
$$LSG > 1.0$$

10.5 วิธีการออกแบบเพื่อใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติ

การออกแบบเพื่อใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติ อาจแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ การให้แสงจากด้านข้าง และการให้แสงจากด้านบนอาคาร หรือ หลังคา

10.5.1 การให้แสงจากด้านข้าง

แสงธรรมชาติที่เข้าสู่ภายในอาคาร จะเกิดจากรังสีตรง รังสีกระจายจากท้องฟ้า รังสีสะท้อนแสงจากพื้นภายนอก รังสีสะท้อนจากผนังอาคารอื่น (รูปที่ 10-20) ดังนั้น การประมาณความสว่างที่เกิดขึ้นภายในอาคารอย่างแม่นยำในการออกแบบ จึงค่อนข้างยาก

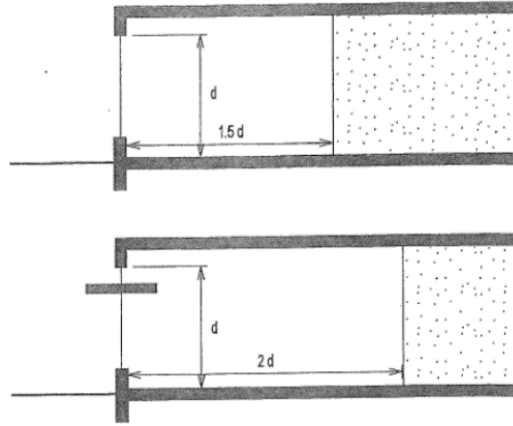


รูปที่ 10-20 แสงสว่างภายในอาคารจะประกอบด้วยรังสีตรงจากดวงอาทิตย์และส่วนอื่น ๆ

(ที่มา: Lechner, 2015)

แต่อย่างไรก็ตาม ในการออกแบบใช้แสงธรรมชาติ ก็สามารถใช้หลักเกณฑ์อย่างง่าย หรือ กฎหัวแม่มือ (Rule of Thumb) เป็นแนวทางการออกแบบในขั้นต้นได้ ดังนี้ (Lechner, 2015)

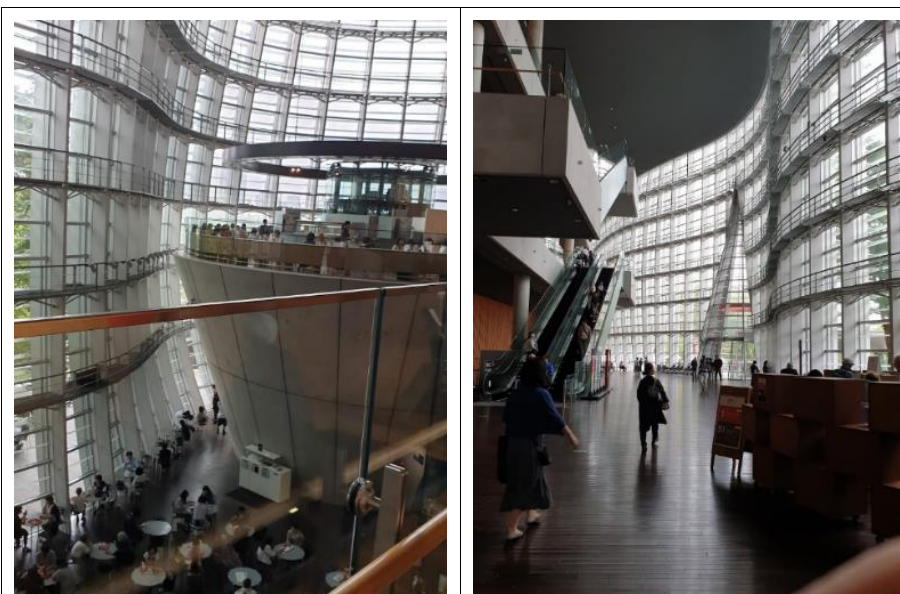
ระยะความลึกที่สามารถใช้แสงธรรมชาติ จะสัมพันธ์กับความสูงของหน้าต่าง โดยแสงจะเข้ามาภายในอาคารได้ประมาณ 1.5 เท่า ของความสูงหน้าต่าง (รูปที่ 10-21) แต่ถ้ามีการใช้หิ้งสะท้อนแสง (Light Shelf) ด้วยก็จะสามารถเพิ่มความลึกได้ประมาณ 2 เท่า การใช้ Light Shelf นอกจากช่วยสะท้อนแสงเข้าไปด้านในอาคารลึกขึ้นแล้ว ยังช่วยลดแสงจ้าที่บริเวณใกล้หน้าต่างให้ลดลง



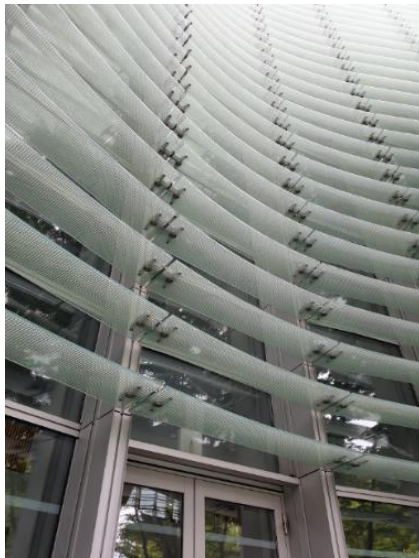
รูปที่ 10-21 ระยะที่แสงเข้าในอาคารจะสัมพันธ์กับความสูงของหน้าต่าง

(ที่มา: Lechner, 2015)

แต่ใน LEED ประเภทอาคารสร้างใหม่ v3 ได้กำหนดระยะของพื้นที่ซึ่งได้แสงธรรมชาติอยู่ในช่วง 2 เท่า ของความสูงจากพื้นถึงขอบบนของหน้าต่าง โดยไม่มี Light Shelf (Lechner, 2015 p.550) ในอาคารที่ให้แสงจากด้านข้างเพื่อให้แสงเข้ามาภายในอาคารได้ลึก โดยใช้ผนังกระจกที่สูงมาก อาจต้องมีการใช้อุปกรณ์ (Fin) เพื่อช่วยลดความร้อนและลดแสงให้ไม่จ้าเกินไป (รูปที่ 10-22, 10-23)



รูปที่ 10-22 การให้แสงสว่างทางด้านข้างโดยใช้ผนังโปร่งแสงที่สูง เพื่อให้แสงเข้ามาในอาคารได้ลึกขึ้นและมีบรรยากาศที่สว่างโปร่งตา

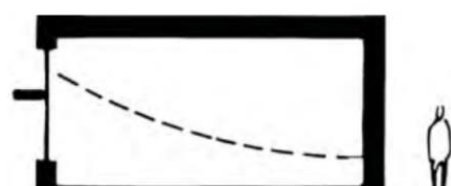


รูปที่ 10-23 การลดความร้อนและแสงจ้าโดยใช้แผงบังแดดทำด้วยกระจก Frit
ที่ National Art Center Tokyo (NACT) ประเทศญี่ปุ่น

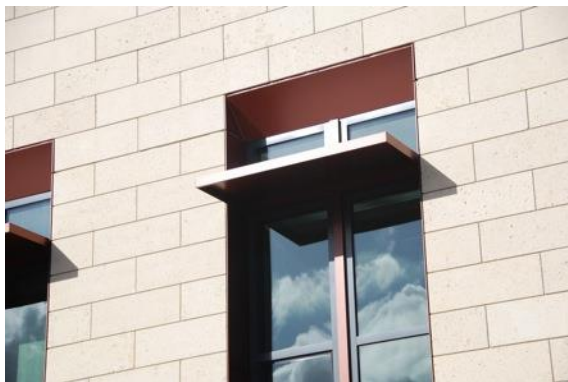
การใช้หิ้งสะท้อนแสง (Light Shelf) เพื่อช่วยสะท้อนแสงให้เข้าสู่อาคารได้ลึกขึ้น (รูปที่ 10-24, 10-25) โดยมีแบบติดตั้งภายนอกอาคาร (รูปที่ 10-26) และแบบติดตั้งในอาคาร (รูปที่ 10-27) สำหรับแบบติดตั้งภายนอกอาคารจะใช้ประโยชน์ในการบังแดดให้หน้าต่างพร้อมกับสะท้อนแสงผ่านกระจกตอนบนเข้าสู่อาคาร ซึ่งมักนิยมติดตั้งที่หน้าต่างทางทิศใต้ เพราะจะมีช่วงที่สามารถสะท้อนแสงได้หลายชั่วโมง แต่อาจใช้ติดตั้งทางทิศตะวันออกและทิศตะวันตกด้วยก็ได้ซึ่งมักจะยืนยาวกว่า ผิวบนของ Light Shelf จะต้องผิวสีขาว หรือ ผิวมัน เพื่อให้สะท้อนแสงได้ดี และมีความสะอาดอยู่เสมอ



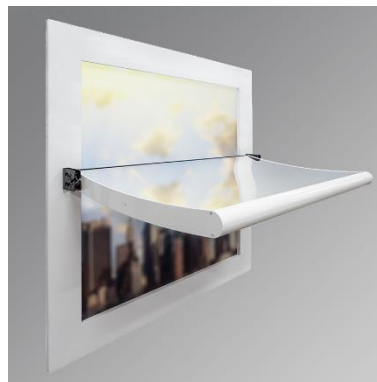
รูปที่ 10-24 กรณีไม่มี Light Shelf ความสว่างที่ริมหน้าต่างและด้านในจะแตกต่างกันมาก
(ที่มา: Lechner, 2015)



รูปที่ 10-25 Light Shelf ช่วยลดความสว่างจ้าที่ริมอาคารและทำให้แสงเข้าด้านในมากขึ้น
(ที่มา: Lechner, 2015)

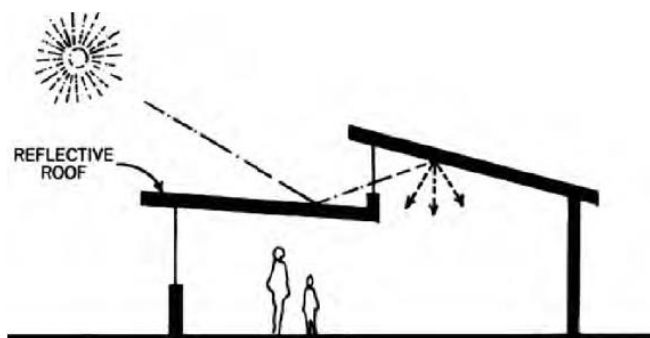


รูปที่ 10-26 การใช้ Light Shelf แบบภายนอก
ทางทิศใต้เพื่อช่วยบังแดดและสะท้อนแสง
เข้าสู่อาคาร
(ที่มา: <https://guykawasaki.com/green-building/>)



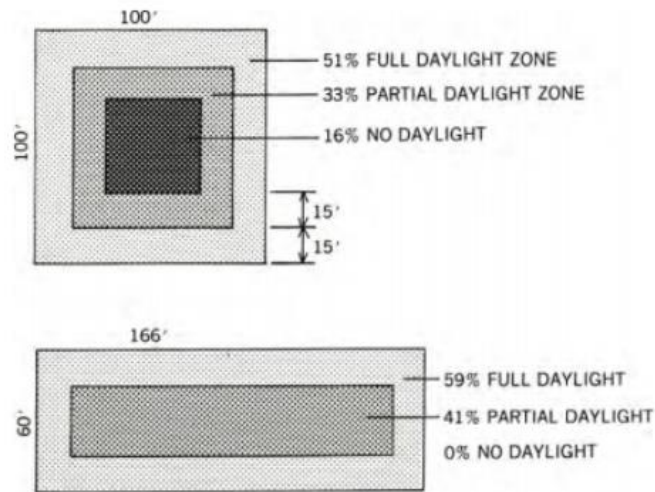
รูปที่ 10-27 การใช้ Light Shelf แบบภายใน
สำเร็จรูปซึ่งสามารถหมุนแผ่นลงมาเปิด
ทำความสะอาดได้เวลาฝุ่นเกาะ
(ที่มา:
<https://www.draperinc.com/windowshades/productdetail/242/flexwave-light-shelf>)

การสะท้อนแสงภายในอาคาร ถ้าต้องการความสว่าง ควรเน้นการใช้สีที่มีค่าการสะท้อนแสงสูงที่เพดานเป็นอันดับแรก รองลงมาคือผนังด้านที่อยู่ฝั่งตรงข้ามหน้าต่างหรือผนังโปร่งแสง ถัดไปจึงเป็นผนังด้านข้าง พื้น และเฟอร์นิเจอร์ในห้อง ตามลำดับ การใช้สีภายนอกอาคาร ก็สามารถมีผลต่อความสว่างภายในได้เช่นกัน คือถ้าพื้นภายนอกเป็นสีอ่อนก็สามารถสะท้อนแสงเข้ามาในอาคารได้มากขึ้น หรือ หลังคาสีอ่อน หรือ ผิวมันเงาก็สามารถสะท้อนแสงผ่านช่องแสงตอนบนของผนังเข้าสู่อาคารได้ (รูปที่ 10-28)



รูปที่ 10-28 การสะท้อนแสงของผิวหลังคา สามารถเพิ่มความสว่างในอาคาร
(ที่มา: Lechner, 2015)

การกำหนดรูปร่างแปลนอาคาร เนื่องจากพื้นที่ซึ่งจะได้แสงเต็มที่ (Fully Daylit) จะอยู่ตามแนวริมหน้าต่างในระยะประมาณ 4.5 ม. และอีก 4.5 ม. ถัดเข้ามาจะได้แสงบางส่วน (Partially Daylit) ดังนั้น ถ้าเปรียบเทียบระหว่างอาคาร เป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสกับรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดพื้นที่ต่อชั้นเท่ากัน (รูปที่ 10-29) อาคารรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะมีพื้นที่ซึ่งใช้แสงธรรมชาติได้มากกว่า ซึ่งถ้าอาคารมีขนาดพื้นที่ต่อชั้นใหญ่ ก็อาจต้องใช้โถงสูงที่มีแสงธรรมชาติส่องมาจากข้างบน (Atrium) ช่วยให้ความสว่างพื้นที่กลางอาคาร



รูปที่ 10-29 พื้นที่ซึ่งสามารถได้รับแสงธรรมชาติจะขึ้นกับรูปร่างของผนัง

(ที่มา: Lechner, 2015)

การกระจายช่องหน้าต่าง การออกแบบหน้าต่างแบ่งเป็นหลายบาน จะทำให้แสงในอาคารมีความสม่ำเสมอมากกว่าเจาะหน้าต่างขนาดใหญ่บานเดียว

นอกจากนี้การเจาะช่องหน้าต่างถี่ถี่ จะทำให้ผนังช่วยสะท้อนแสง และมีความสว่างเพิ่มขึ้น ทำให้ความบาดตา (Glare) ลดลง เพราะ Brightness Ratio ระหว่างหน้าต่างกับผนังรอบ ๆ จะลดลง (รูปที่ 10-30)



รูปที่ 10-30 การเจาะช่องหน้าต่างและเส้น Contour ที่มีค่าความส่องสว่างเท่ากัน

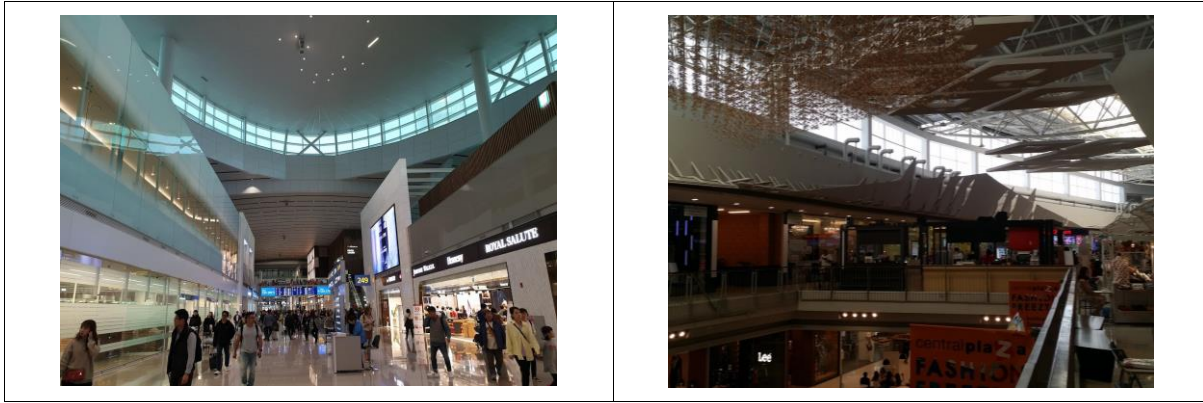
หน้าต่างที่ติดกับผนังจะทำให้ผนังด้านข้างสว่างขึ้น ทำให้ลดแสงบาดตา

(ที่มา: Lechner, 2015)

10.5.2 การให้แสงจากด้านบน

การให้แสงจากด้านบนหลังคา สามารถช่วยให้ประหยัดพลังงานจากการใช้แสงธรรมชาติได้มาก โดยเฉพาะอาคารที่มีผนังขนาดใหญ่ เช่น อาคารผู้โดยสารในสนามบิน ศูนย์การค้า ซึ่งส่วนใหญ่จะมีระยะความสูงจากพื้นถึงฝ้าเพดานมาก การให้แสงจากด้านบนสามารถทำได้หลายแบบ เช่น

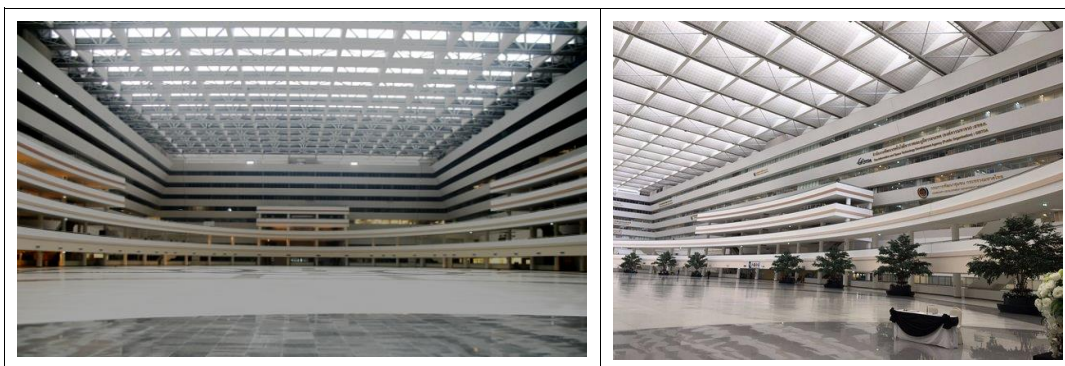
- การให้แสงจากผนังตอนบนใกล้เพดาน (Clerestory) (รูปที่ 10-31)
- การทำหลังคาแบบฟั้นเลื้อย ซึ่งมักจะให้ช่องแสงหันไปทางทิศเหนือ หรือ ทำช่องแสงที่เป็นส่วนหนึ่งของหลังคา (Skylight) (รูปที่ 10-32)
- การทำช่องแสงเป็นส่วนหนึ่งของหลังคา (Skylight) (รูปที่ 10-33)



รูปที่ 10-31 การให้แสงจากส่วนบนของผนัง (Clearstories)
ใช้ได้กับอาคารที่เพดานสูง เช่น โถงในศูนย์การค้า หรือ สนามบิน



รูปที่ 10-32 การให้แสงจาก Skylight เหมาะกับพื้นที่ซึ่งห่างจากผนังภายนอก
ทำให้รู้สึกโปร่ง ภายในสนามบินอินซอน ประเทศเกาหลี



รูปที่ 10-33 การให้แสงผ่านหลังคาแบบฟันเลื่อย (Sawtooth)
และมีการออกแบบส่วนหลังคาให้ช่วยสะท้อนแสงในอาคารศูนย์ราชการ
(ที่มา: <https://www.th.jec.com/th/project-details.aspx?projectId=139>)

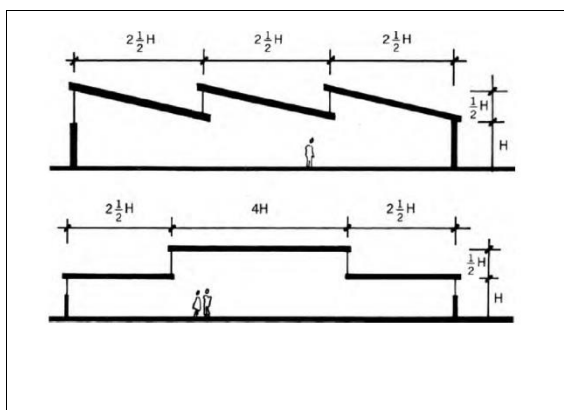
การใช้แสงธรรมชาติจากด้านบน ช่วยทำให้อาคารมีบรรยากาศที่รู้สึกโปร่ง สบายงาม แต่ควรคำนึงถึงการลดความร้อนและปัญหาแสงบาดตา โดยอาจใช้อุปกรณ์บังแดดติดตั้งที่ภายนอก หรือ ภายในอาคาร ซึ่งถ้าพิจารณาในด้านการลดความร้อน การติดแผงบังแดดไว้ภายนอก จะช่วยลดความร้อนที่จะเข้าสู่อาคารได้ดีกว่า แต่ทั้งนี้ ก็พิจารณาปัจจัยอื่นประกอบด้วย เช่น วิธีการทำความสะอาด เป็นต้น



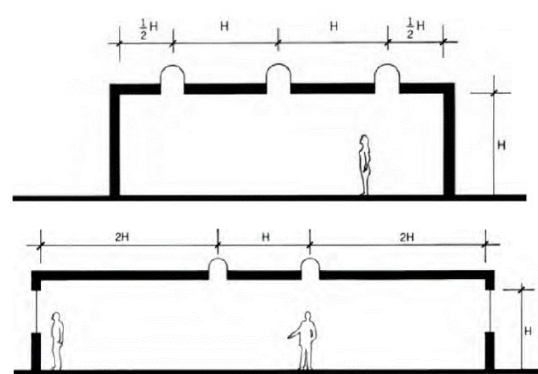
รูปที่ 10-34 การให้แสงจากหลังคาโปร่งแสงขนาดใหญ่ ซึ่งออกแบบเพื่อลดแสงจ้าและความร้อน โดยใช้โลหะฉลุลาย ที่ National Gallery of Singapore

Lechner (2015) ได้แนะนำหลักการกำหนดระยะห่างระหว่างช่องแสงที่สามารถกระจายแสงได้ดี โดยสัมพันธ์กับความสูงของห้อง ของหลังคาแบบต่าง ๆ ดังรูปที่ 10-35

ใน LEED v3 ได้แนะนำพื้นที่ Skylight ประมาณ 3-6% ของพื้นที่หลังคา โดยใช้กระจกที่มีค่า VT อย่างน้อย 0.5 (Lechner, 2015 p.550)



รูปที่ 10-35 ระยะห่างของช่องแสงที่ตอนบนของหลังคา ถ้าช่องแสงอยู่ในแนวตั้ง (ที่มา: Lechner, 2015)



รูปที่ 10-36 ระยะห่างของช่องแสงที่บนของหลังคา กรณีไม่มีหน้าต่าง และมีหน้าต่าง (ที่มา: Lechner, 2015)

10.3 การใช้ท่อนำแสง (Light Pipe, Light Tube)

เป็นการออกแบบให้สามารถใช้แสงธรรมชาติ ในบริเวณที่อยู่ห่างจากผนังด้านนอก หรือ หลังคา โดยให้แสงผ่านช่องรับแสงที่มีปลายด้านหนึ่งของท่อติดตั้งที่นอกอาคาร ตัวท่อทำจากวัสดุที่มีผิวมันเงามีค่าการสะท้อนแสงสูงมาก เพื่อสะท้อนแสงจากช่องรับแสงภายนอกอาคารไปออกที่อีกปลายด้านหนึ่งของท่อ ซึ่งอยู่ในบริเวณที่ต้องการแสง สามารถให้ความสว่างคล้ายกับการเปิดโคมไฟ ในประเทศไทยไม่พบการใช้ท่อนำแสงมากนัก เนื่องจากราคาสูง ตัวอย่างอาคารที่มีการใช้ท่อนำแสง คือ อาคาร สสส. กรุงเทพมหานคร โดยใช้ท่อนำแสงจากพื้นดินภายนอกอาคารไปยังที่จอดรถใต้ดิน (รูปที่ 10-37, 10-38)



รูปที่ 10-37 หัวท่อนำแสงส่วนที่อยู่นอก
อาคาร สสส.



รูปที่ 10-38 ปลายท่อนำแสงในที่จอดรถใต้ดิน
อาคาร สสส.

10.4 ประโยชน์ของแสงธรรมชาติที่มีต่อสุขภาพ

ปัจจุบันการออกแบบโดยใช้แสงธรรมชาติมิได้ให้ความสำคัญเพียงเพราะต้องการประหยัดพลังงานเท่านั้น แต่ได้มีการศึกษาจำนวนมาก ระบุถึงความสำคัญของแสงธรรมชาติที่มีต่อสุขภาพ ซึ่งพบว่ามีเซลล์ประสาทตา ที่เรียกว่า intrinsic photosensitive Retinal Ganglion Cells (ipRGCs) ซึ่งไม่มีหน้าที่ในการมองเห็น แต่สามารถส่งผลต่อวงจรการทำงานของร่างกาย (Circadian Rhythm) ในเรื่องการนอนหลับ และระดับฮอร์โมน ดังนั้น ในการออกแบบอาคารที่เน้นสุขภาพะ เช่น มาตรฐาน WELL จึงมีเกณฑ์การออกแบบเพื่อให้ได้แสงธรรมชาติ โดยใช้ค่า Equivalent Melanopic Lux (EML) เป็นตัววัด โดยกำหนดให้ได้รับแสงอย่างน้อย 250 EML ที่ประมาณ 75% ของพื้นที่ทำงาน จะสามารถได้รับคะแนน วิธีการวัดแสงในแนวดิ่ง หันหัววัดความสว่างเข้าหาแสงที่ความสูง 1.2 ม. จากระดับพื้น โดยจะต้องออกแบบให้ได้ความสว่างในระดับนี้อย่างน้อย 4 ชั่วโมงต่อวันและทุกวันในรอบปี (IWBI, p.96)

ค่า EML สามารถคำนวณได้จากสูตร เมื่อทราบชนิดของหลอดไฟ และค่าความส่องสว่าง (IWBI, p.194)

$$EML = L \times R$$

L = visual lux

R = Ratio ซึ่งขึ้นกับหลอดไฟแต่ละชนิด ได้แก่

CCT	ชนิดหลอดไฟ	Ratio
2700	LED	0.45
3000	Fluorescent	0.45
2800	Incandescent	0.45
4000	Fluorescent	0.57
4000	LED	0.76
5450	CIE E (Equal Energy)	1.00
6500	Fluorescent	1.02
6500	Daylight	1.10
7500	Fluorescent	1.11

ดังนั้น ทิศทางการออกแบบในปัจจุบัน จึงมีได้เน้นแต่การประหยัดพลังงานเท่านั้น แต่ยังมีการให้ความสำคัญต่อการออกแบบโดยใช้คนเป็นศูนย์กลาง (Human Centric Lighting) โดยมีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตหลอดไฟ LED ให้สามารถปรับอุณหภูมิสีของแสงได้ (Tunable White Light) (รูปที่ 10-39) ตามต้องการให้เป็นแสงสีขาวแบบอุ่น หรือ แบบเย็น เพื่อตอบสนองต่อ Circadian Rhythm เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน การเรียนรู้ นอกจากนี้ การปรับเปลี่ยนแสงยังมีการพัฒนาวิธีการควบคุม โดยสามารถเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ต และใช้โทรศัพท์มือถือควบคุม ซึ่งเรียกว่า Connected Lighting



รูปที่ 10-39 ตัวอย่างการออกแบบห้องเรียนให้ปรับแสงได้

โดยตอนเช้าจะใช้แสงสีขาวเย็น สำหรับกิจกรรมที่ต้องการสมาธิ
และตอนบ่ายใช้แสงสีขาวอุ่น สำหรับกิจกรรมการสนทนาที่ต้องการความผ่อนคลาย

(ที่มา: glamox.com)

10.5 สรุป

การออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่างในอาคาร จะต้องมีความสว่างได้ตามกฎหมายควบคุมอาคาร หรือมาตรฐานที่เลือกใช้ และสอดคล้องกับกฎหมายอนุรักษ์พลังงาน วิธีการประหยัดพลังงานในระบบไฟฟ้าแสงสว่าง คือ การเลือกหลอดไฟที่มีประสิทธิภาพสูง โคมประสิทธิภาพสูง การใช้สียภายในที่เป็นสีอ่อน ใช้อุปกรณ์ควบคุมการเปิดปิดหลอดไฟอัตโนมัติที่สัมพันธ์กับปริมาณแสงสว่างธรรมชาติ มีการแบ่งขนาดโซนต่อหนึ่งสวิทช์ที่ไม่ใหญ่เกินไป การออกแบบให้มีความสว่างเฉพาะที่ การเลือกหลอดไฟ LED ควรพิจารณาคุณสมบัติด้านอื่น ๆ ประกอบด้วย นอกจากค่าประสิทธิภาพพลังงาน เช่น ค่าดัชนีสีที่ปรากฏ อายุการใช้งาน

นอกจากนี้ การใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติ ทั้งการให้แสงจากด้านข้างหรือด้านบน ต้องคำนึงถึงความสมดุลระหว่างแสงที่ได้รับกับความร้อนที่ผ่านเข้าสู่อาคาร ซึ่งอาจจะต้องใช้การจำลองสภาพแสง และการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนควบคู่กัน เพื่อหาขนาดช่องเปิดและชนิดกระจกที่เหมาะสม การใช้แสงธรรมชาติ นอกจากช่วยในการประหยัดพลังงานแล้ว ยังมีความสำคัญต่อสุขภาพด้วย ดังนั้น การออกแบบระบบแสงสว่างจึงควรพิจารณาทั้งการประหยัดพลังงาน และปัจจัยอื่น ๆ อย่างครอบคลุม เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

มหาวิทยาลัยศิลปากร สแกนลิขสิทธิ์

เอกสารอ้างอิง

กฎกระทรวง กำหนดประเภท หรือขนาดของอาคาร และมาตรฐาน หลักเกณฑ์ และวิธีการในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552. ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 126 ตอนที่ 12 ก. 20 กุมภาพันธ์ 2552.

กฎกระทรวงฉบับที่ 39 พ.ศ. (2537) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. เอกสารประกอบการฝึกอบรมเพื่อพัฒนาความต่อเนื่องทางวิชาชีพของผู้ตรวจสอบและรับรองการจัดการพลังงาน. เข้าถึงได้จาก

<http://webkc.dede.go.th/testmax/kb01-list>

การไฟฟ้าฝ่ายผลิต. ข้อกำหนดโครงการประหยัดไฟเบอร์ 5 หลอดไฟ LED. เข้าถึงได้จาก

<http://labelno5.egat.co.th/new58/wp-content/uploads/update/product/led.pdf>

ประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่อง มาตรฐานความเข้มของแสงสว่าง ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 135 ตอนพิเศษ 39 ง 21 กุมภาพันธ์ 2561.

ศูนย์ประสานงานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. เอกสารการประชุมทบทวนแก้ไขปรับปรุงร่างประกาศกระทรวงพลังงาน ภายใต้ร่างกฎกระทรวงกำหนดประเภท หรือขนาดของอาคาร และมาตรฐาน หลักเกณฑ์ และวิธีการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ....., พฤษภาคม 2563.

สมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย. คู่มือการเลือกหลอด LED เวอร์ชัน 1.0.

สมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย. คู่มือแนวทางการออกแบบการส่องสว่างภายในอาคาร. กรุงเทพฯ:

2559. เข้าถึงได้จาก <http://www.tieathai.org>.

BREEAM UK New Construction, Technical Manual SD5078 BREEAM UK New Construction 2018 2.0. Available from www.breeam.com

Electrical Contractor. Bilevel Switching. Available from

<https://www.ecmag.com/section/lighting/bilevel-switching>

Glamox Luxo. 10 Things you should know about LED.

Glamox. An Essential Guide to Human Centric Lighting. Available from

<http://www.glamox.com>

International WELL Building Institute (IWBI). The WELL Building Standard v1 with January 2017 addenda. Available from <http://www.wellcertified.com>

Lechner, Norbert. **Heating, Cooling, Lighting Sustainable Design Methods for Architects.**

Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2015.

Overbey, Daniel. Lighting Impact on Circadian Rhythm. Building Enclosure. Available from

<https://www.buildingenclosureonline.com/blogs/14-the-be-blog/post/86105-lighting-impacts-on-circadian-rhythms>

U.S. Green Building Council. LEED Reference Guide for Green Building Design and Construction. Edition 2009. Washington D.C., 2009.

แบบฝึกหัด

- 1) ให้ศึกษาจากห้องจริงในอาคาร เช่น ห้องเรียน ห้องสำนักงาน โดยการหาค่า LPD และตรวจวัดค่าความส่องสว่างที่ได้เปรียบเทียบกับ กฎหมายควบคุมอาคารและมาตรฐานของสมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย และสรุปว่าห้องดังกล่าวสอดคล้องกับกฎหมายและมาตรฐานหรือไม่
- 2) ให้หาค่า Daylight Factor ของห้องในข้อ 1 ใช้วิธีกำหนดจำนวนจุด ตามข้อแนะนำในคู่มือแนวทางการออกแบบการส่องสว่างในอาคาร โดยสมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย เปรียบเทียบ ค่า DF กับเกณฑ์มาตรฐานต่าง ๆ เช่น มาตรฐานอาคารเขียวระบบใดระบบหนึ่ง
- 3) ให้หาข้อมูลหลอดไฟ LED ที่จำหน่าย อย่างน้อย 2 ยี่ห้อ ที่มีรูปทรงเดียวกัน ใช้พลังงานหรือจำนวนวัตต์เท่ากันและนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติด้านการประหยัดพลังงาน และคุณสมบัติอื่น ๆ และให้ข้อสรุปว่าท่านจะเลือกหลอดไฟ LED ชนิดใดในการออกแบบ เพราะเหตุใด
- 4) ให้วัดค่าความส่องสว่างในอาคารจริงจากริมอาคารในทุกระยะ 50 ซม. ตลอดความกว้างของรูปตัดห้องและพล็อตค่าความส่องสว่างและความสูงของหน้าต่าง เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะความสูงหน้าต่างและค่าความส่องสว่าง เปรียบเทียบกับกฎหมายว่าเหมือนหรือแตกต่างอย่างไร

มหาวิทยาลัยศิลปากร สแกนลิขสิทธิ์

11. สถาปัตยกรรมยั่งยืนและระบบประเมินอาคาร

การประหยัดพลังงานนั้น ไม่ได้มีความสำคัญเพียงเพราะว่าพลังงานเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด ไม่เพียงพอต่อการใช้งานภายในประเทศ ต้องมีการนำเข้า มีผลต่อเศรษฐกิจของประเทศ แต่ปัจจุบัน เป็นที่ประจักษ์ชัดว่า สาเหตุของการเกิดปัญหาภาวะโลกร้อน และปัญหาสิ่งแวดล้อมในหลายด้าน ส่วนหนึ่งเกิดจากอาคาร ตั้งแต่การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากขบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อการใช้งานในอาคาร ความต้องการน้ำ ความต้องการวัสดุ และปัญหาขยะจากการก่อสร้าง ดังนั้น เป้าหมายของการออกแบบ จึงมิได้จำกัดเพียงการลดการใช้พลังงาน หรือ ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเท่านั้น แต่ได้เชื่อมโยงถึงความพยายามในการแก้ปัญหาที่กว้างมากขึ้น โดยมีเป้าหมายใหญ่ คือ การสร้างงานสถาปัตยกรรมที่ตอบสนองต่อการพัฒนาที่ยั่งยืน

ดังนั้น องค์กรหลายแห่งจึงได้พยายามพัฒนาแนวทางการออกแบบอาคาร ที่ให้ความสำคัญต่อการพัฒนาที่ยั่งยืน วัตถุประสงค์ในขั้นนี้ คือ เพื่อให้รู้จักและเข้าใจในเรื่องดังต่อไปนี้

- 1) องค์กรประกอบของการพัฒนาที่ยั่งยืน
- 2) ระบบประเมินอาคารเขียวในประเทศไทย
- 3) เกณฑ์ประเมินอาคารเขียวตามมาตรฐาน LEED
- 4) เกณฑ์ประเมินอาคารเขียวตามมาตรฐาน TREES
- 5) ระบบประเมินอาคารที่เน้นสุขภาวะตามมาตรฐาน WELL

11.1 องค์กรประกอบของการพัฒนาที่ยั่งยืน

คำว่า การพัฒนาที่ยั่งยืน หรือ Sustainable Development อาจจะมีผู้ให้คำอธิบายไว้อย่างมากมาย แต่คำนิยามที่พบที่มีการอ้างอิงบ่อย คือ คำอธิบาย ในเอกสาร Our Common Future หรือ บางทีเรียก Brundtland Report (1987) ตามชื่อของอดีตนายกรัฐมนตรี Gro Harlem Brundtland ของประเทศนอร์เวย์ ซึ่งกล่าวว่า “Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.”

ซึ่งให้ความหมายว่า การพัฒนาที่ยั่งยืน เป็นการพัฒนาที่สามารถสนองต่อความต้องการของคนในรุ่นปัจจุบันโดยไม่กระทบต่อความต้องการของคนรุ่นหลัง

ในรายงานดังกล่าว ได้เน้นความเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน ของขบวนการใน 3 ด้าน ได้แก่ เศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม ซึ่งได้รับการเผยแพร่อย่างกว้างขวางในการประชุมผู้นำโลก Earth Summit ที่เมือง Rio de Janeiro ประเทศบราซิล ในปี ค.ศ. 1992 ทำให้เห็นว่า ความยั่งยืนนั้นไม่สามารถมองในมิติเดียว เช่น การป้องกันผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมเท่านั้น แต่จะต้องให้ความสำคัญต่อสังคม ความเป็นอยู่ และเศรษฐกิจ โดยรวมเป็นหนึ่งเดียวกัน

ภายหลังปี ค.ศ. 2015 องค์กรสหประชาชาติ ได้กำหนดเป้าหมายของการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals) ซึ่งประเทศทั่วโลกจะพยายามทำให้สำเร็จภายในปี ค.ศ. 2030 ซึ่งประกอบด้วยเป้าหมาย 17 ข้อ ได้แก่

- เป้าหมายที่ 1 - ขจัดความยากจน (No Poverty)
- เป้าหมายที่ 2 - ขจัดความหิวโหย (Zero Hunger)
- เป้าหมายที่ 3 - การมีสุขภาพและความเป็นอยู่ที่ดี (Good Health and Well-Being)
- เป้าหมายที่ 4 - การศึกษาที่เท่าเทียม (Quality Education)

เป้าหมายที่ 5 - ความเท่าเทียมทางเพศ (Gender Equality)

เป้าหมายที่ 6 - การจัดการน้ำและสุขาภิบาล (Clean Water and Sanitation)

เป้าหมายที่ 7 - พลังงานสะอาดที่ทุกคนเข้าถึงได้ (Affordable and Clean Energy)

เป้าหมายที่ 8 - การจ้างงานที่มีคุณค่าและการเติบโตทางเศรษฐกิจ (Decent Work and Economic Growth)

เป้าหมายที่ 9 - อุตสาหกรรม นวัตกรรม และโครงสร้างพื้นฐาน (Industry Innovation and Infrastructure)

เป้าหมายที่ 10 - ลดความเหลื่อมล้ำ (Reduced Inequalities)

เป้าหมายที่ 11 - เมืองและถิ่นฐานมนุษย์อย่างยั่งยืน (Sustainable Cities and Communities)

เป้าหมายที่ 12 - แผนการบริโภคและการผลิตที่ยั่งยืน (Responsible Consumption and Production)

เป้าหมายที่ 13 - การรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Action)

เป้าหมายที่ 14 - การใช้ประโยชน์จากมหาสมุทรและทรัพยากรทางทะเล (Life Below Water)

เป้าหมายที่ 15 - การใช้ประโยชน์จากระบบนิเวศทางบก (Life on Land)

เป้าหมายที่ 16 - สังคมสงบสุข ยุติธรรม ไม่แบ่งแยก (Peace and Justice Strong Institutions)

เป้าหมายที่ 17 - ความร่วมมือเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน (Partnerships for the Goals)

หลักการพัฒนายั่งยืนที่มีองค์ประกอบใน 3 ด้าน และเป้าหมายในการพัฒนายั่งยืน ทั้ง 17 ข้อ ได้ถูกนำมาเป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาเกณฑ์การประเมินอาคารที่ให้ความสำคัญต่อการพัฒนายั่งยืน หรือ ที่เรียกว่า อาคารเขียว (Green Buildings) ในเนื้อหาของระบบการประเมินอาคาร โดยทั่วไปจะครอบคลุมทั้ง 3 ด้าน แต่การให้น้ำหนักในแต่ละด้าน จะแตกต่างกัน เช่น เกณฑ์การประเมินอาคารเขียวในระบบ LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) ของประเทศสหรัฐอเมริกา จะให้คะแนนความยั่งยืนทางด้านสิ่งแวดล้อม (ซึ่งรวมพลังงานอยู่ด้วย) สูง ดังชื่อของเกณฑ์ ส่วนเกณฑ์ประเมินอาคารระบบ WELL ของประเทศสหรัฐอเมริกา จะเน้นในเรื่องสุขภาวะของคน หรือ สังคม มากกว่าด้านสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจ ในขณะที่เกณฑ์อาคารเขียว DGNB ของประเทศเยอรมัน จะให้ความสำคัญทั้ง 3 ด้าน เท่ากัน โดยแบ่งสัดส่วนคะแนนในการประเมินความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อม ด้านสังคม และด้านเศรษฐกิจ เท่ากัน เป็นต้น และเชื่อมโยงข้อเกณฑ์ต่าง ๆ ให้เห็นว่ตรงกับเป้าหมายในการพัฒนายั่งยืนขององค์การสหประชาชาติ

11.2 ระบบประเมินอาคารเขียวในประเทศไทย

การออกแบบอาคารให้สอดคล้องกับเกณฑ์การประเมินอาคารเขียว ได้เริ่มมีในประเทศไทยมากกว่า 10 ปี โดยระบบที่มีการใช้ในประเทศไทยในระยะแรก คือ ระบบ LEED (Leadership in Energy and Environmental Sustainability) ซึ่งพัฒนาโดย U.S. Green Building Council ของประเทศสหรัฐอเมริกา ต่อมาได้มีการจัดตั้งสถาบันอาคารเขียวไทย และได้มีการพัฒนาเกณฑ์ประเมินอาคารเขียวของประเทศไทยขึ้น เรียกว่า TREES (Thai's Rating in Energy and Environmental Sustainability)

ปัจจุบันระบบ LEED เป็นระบบการประเมินอาคารที่มีการใช้มากที่สุดในโลก เมื่อเปรียบเทียบกับระบบอาคารเขียวอื่น ๆ และ ในประเทศไทยก็มีจำนวนโครงการที่ได้การรับรอง และได้ลงทะเบียนเพื่อขอการรับรองในระบบ LEED มากที่สุด รองลงมา คือ ระบบ TREES และพบอาคารที่ออกแบบโดยใช้ระบบ DGNB ของประเทศเยอรมนี และระบบ Green Mark ของประเทศสิงคโปร์ อยู่บ้างแต่มีจำนวนไม่มากนัก

นอกจากนี้ก็ยังมีการพัฒนาเกณฑ์การประเมินอาคารเขียวโดยหน่วยงานอื่น ๆ เช่น

- คู่มือเกณฑ์และแนวทางในการจัดการสิ่งแวดล้อม สำหรับอาคารสำนักงานราชการเขียว ของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม โดยมีคู่มือ 2 เล่ม คือ คู่มือสำหรับกรณีที่จะมีการก่อสร้างอาคารใหม่ และคู่มือสำหรับอาคารเดิม พ.ศ. 2552
- คู่มือเกณฑ์การประเมินชุมชนน่าอยู่สบายอย่างยั่งยืน หรือ Eco Village ของการเคหะแห่งชาติ ซึ่งพัฒนาดังแต่ปี พ.ศ. 2555 เป็นเกณฑ์ที่เน้นอาคารพักอาศัยทั้งแนวราบและแนวดิ่ง
- คู่มือระบบรับรองแบบบ้านประหยัดพลังงานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม TREES-HOME โดย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช) พ.ศ. 2562
- คู่มือการออกแบบอาคารเขียวภาครัฐ ของกรมโยธาธิการและผังเมือง พ.ศ. 2562 ซึ่งประกอบด้วยคู่มือ 2 เล่ม (รูปที่ 11-1) คือ คู่มือการออกแบบอาคารที่จะก่อสร้างใหม่ให้เป็นอาคารเขียวภาครัฐ (Green Government Office Design Guidelines for New Construction, G-GOODs : NC) และ คู่มือการออกแบบปรับปรุงอาคารภาครัฐที่มีอยู่เดิมให้เป็นอาคารเขียวภาครัฐ (Green Government Office Design Guidelines for Major Renovation, G-GOODs : RV) ซึ่งเป็นแนวทางการออกแบบอาคารราชการ ที่อยู่ในความรับผิดชอบของกรมโยธาธิการและผังเมือง แต่ได้เผยแพร่ให้หน่วยงานราชการอื่น ๆ สามารถดาวน์โหลดไปใช้ได้



รูปที่ 11-1 คู่มือประเมินอาคารเขียวภาครัฐ

(ที่มา: <http://subsites.dpt.go.th/edocument/index.php/doc-work>)

11.3 เกณฑ์การประเมินอาคารเขียวในระบบ LEED

U.S. Green Building Council หรือ สภาอาคารเขียว ของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้พัฒนาเกณฑ์ LEED เวอร์ชันแรกตั้งแต่ปี ค.ศ. 1998 เนื่องจาก LEED ได้มีการพัฒนามายาวนานมากกว่า 20 ปี จึงมีอาคารที่เข้ารับการประเมินเป็นจำนวนมากหลายประเภท ทำให้มีการพัฒนาเกณฑ์การประเมินออกเป็นหลายระบบให้เหมาะสมกับงานแต่ละประเภทยิ่งขึ้น และได้ผ่านการปรับปรุงมาหลายเวอร์ชัน ตามเทคโนโลยีและบริบทอื่น ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปทุก 3-5 ปี จนถึงปัจจุบันได้เปิดให้ลงทะเบียนในเวอร์ชัน 4.1 ซึ่งเวอร์ชันที่ 4.1 จะแบ่งเป็นระบบประเมินย่อย ได้แก่

- ระบบประเมินอาคารสร้างใหม่ (LEED for Building Design and Construction) และอาคารประเภทสร้างแต่เปลือกอาคารและพื้นที่ส่วนกลาง (Core and Shell)
- ระบบประเมินอาคารเดิม ในด้านการจัดการและการบำรุงรักษา (LEED for Operation and Maintenance)
- ระบบประเมินงานตกแต่งภายใน (LEED for Commercial Interiors)
- ระบบประเมินอาคารพักอาศัย (LEED for Residential)
- ระบบประเมินงานออกแบบชุมชน (LEED for Communities)
- ระบบประเมินงานออกแบบเมือง (LEED for Cities)

ในทุกระบบจะครอบคลุมเรื่องที่ประเมินคล้ายกัน เช่น การเลือกที่ตั้ง การลดการเดินทางโดยใช้รถยนต์ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การใช้พลังงาน การใช้น้ำ การใช้วัสดุ คุณภาพของสภาพแวดล้อมภายในอาคาร เป็นต้น ซึ่งในบทนี้จะอธิบายเฉพาะระบบประเมินอาคารสร้างใหม่ (LEED for Building Design and Construction, LEED BD+C) ในเวอร์ชัน 4 ซึ่งอาคารส่วนใหญ่ในประเทศไทยขณะนี้ที่สร้างยังไม่เสร็จจะยังอยู่ในเวอร์ชันนี้ โดยจะอธิบายในภาพรวม เนื่องจากเนื้อหาของ LEED ประกอบด้วยรายละเอียดจำนวนมาก แต่ในส่วนเกณฑ์ด้านประสิทธิภาพพลังงานจะมีการอธิบายในส่วนของเวอร์ชัน 4.1 ไว้ด้วย

เกณฑ์การประเมินของ LEED BD+C เวอร์ชัน 4 จะแบ่งเป็นหมวดย่อย 9 หมวด (Categories) มีคะแนนรวมทั้งหมด 110 คะแนน ซึ่งแบ่งเป็นหมวดดังนี้ (ตารางที่ 11-1)

ตารางที่ 11-1 หมวดเนื้อหาของ LEED เวอร์ชัน 4

หมวด		คะแนน
1	กระบวนการบูรณาการ (Integrative Process)	1
2	ย่านที่ตั้งและการขนส่ง (Location and Transportation)	16
3	ที่ตั้งยั่งยืน (Sustainable Sites)	10
4	ประสิทธิภาพการใช้น้ำ (Water Efficiency)	11
5	พลังงานและบรรยากาศ (Energy and Atmosphere)	33
6	วัสดุและทรัพยากร (Materials and Resources)	13
7	คุณภาพสภาพแวดล้อมในอาคาร (Indoor Environmental Quality)	16
8	นวัตกรรม (Innovation)	6
9	งานที่มีความสำคัญต่อภูมิภาค (Regional Priority)	4

ในหมวดต่าง ๆ จะประกอบด้วยข้อเกณฑ์ ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ เกณฑ์บังคับที่ไม่มีคะแนน (Prerequisites) และเกณฑ์เลือกทำที่จะได้รับคะแนน (Credits) โดยแต่ละข้อจะมีคะแนนไม่เท่ากัน และเมื่อรวมคะแนนที่ได้ทั้งหมด ก็จะแบ่งระดับอาคารเป็น 4 ระดับตามคะแนนที่ได้รับ คือ

ระดับผ่านการรับรอง (Certified)	40 - 49 คะแนน
ระดับเงิน (Silver)	50 - 59 คะแนน
ระดับทอง (Gold)	60 - 79 คะแนน
ระดับแพลตินัม (Platinum)	80 คะแนน ขึ้นไป

สำหรับภาพรวมของเนื้อหาในแต่ละหมวด สามารถสรุปได้คือ

(1) กระบวนการบูรณาการ (Integrative Process) ในหมวดนี้มีเพียง 1 ข้อเกณฑ์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผู้ออกแบบได้วิเคราะห์หาแนวทางการประหยัดพลังงาน และประหยัดน้ำ ตั้งแต่ขั้นต้นของงาน การคำนึงถึงความสัมพันธ์กันระหว่างระบบต่าง ๆ ในอาคาร ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดเงินลงทุนได้ดีกว่า โดยเกณฑ์กำหนดให้มีการวิเคราะห์หาปริมาณการใช้พลังงาน และการใช้น้ำในโครงการตั้งแต่ขั้นแบบร่าง โดยให้จำลองหาความต้องการพลังงาน โดยใช้รูปทรงอาคารที่ทำเป็นกล่องอย่างง่าย ยังไม่ต้องมีรายละเอียดของตัวอาคารมาก เพื่อเปรียบเทียบระหว่างทางเลือกต่าง ๆ ในการออกแบบ เช่น สัดส่วนรูปทรง (Mass) การหันทิศทางอาคาร การใช้วัสดุที่มีค่า R ต่างกัน การปรับเปลี่ยนขนาดของสัดส่วนหน้าต่าง (Window to Wall Ratio) ช่วงของสภาวะสบาย เช่น การตั้งค่าอุณหภูมิ ที่มีผลต่อความต้องการพลังงาน

ในด้านความต้องการน้ำ เป็นการประมาณความต้องการการใช้น้ำทั้งภายในและภายนอกอาคาร และน้ำใช้ในขบวนการผลิต และความเป็นไปได้ในการหาน้ำจากแหล่งอื่นมาใช้แทนน้ำประปา เช่น การใช้น้ำฝน เป็นต้น

(2) หมวดยานที่ติดตั้งและการขนส่ง (Location and Transportation) ในหมวดนี้ไม่มีเกณฑ์บังคับ เป็นหมวดเกี่ยวกับการเลือกที่ตั้ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ ลดการเดินทางโดยการใชัรถยนต์ส่วนตัว

การประเมินของ LEED ในแต่ละหัวข้อ ส่วนใหญ่มักทำเป็นทางเลือก ให้เลือกแนวทางที่จะทำคะแนน เช่น การเลือกที่ตั้งอยู่ในโครงการที่ได้รับการรับรอง LEED for Neighborhood สำหรับในประเทศไทย เพิ่งเริ่มมีโครงการออกแบบโดยใช้เกณฑ์ LEED for Neighborhood หรือ เลือกที่ตั้งโดยใช้ข้อเกณฑ์อื่น ๆ ในหมวดนี้ แล้วรวมคะแนนกัน

หลักการเลือกที่ตั้ง ที่จะได้รับคะแนนคือ เลือกที่ดินซึ่งเคยผ่านการใช้งานมาก่อน เช่น ปรับที่ดินทำที่จอดรถ เป็นต้น หรือ หลีกเลี่ยงพื้นที่ซึ่งมีความอ่อนไหวเชิงนิเวศ เช่น พื้นที่เกษตรที่อุดมสมบูรณ์ พื้นที่น้ำท่วม พื้นที่ใกล้แหล่งน้ำขนาดใหญ่ พื้นที่ชุ่มน้ำ พื้นที่ซึ่งเป็นแหล่งอาศัยของสัตว์ซึ่งหายากใกล้สูญพันธุ์ (Endangered Species)

การเลือกที่ตั้งที่อยู่ใกล้ระบบขนส่งมวลชน ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้อาคารสามารถเดินทางมาได้โดยไม่ต้องใช้รถยนต์ส่วนตัว

การเลือกที่ตั้งใกล้เส้นทางรถจักรยาน และจัดทำพื้นที่จอดจักรยาน ที่ใกล้ทางเข้าโครงการ

การเลือกที่ตั้งซึ่งมีการใช้ที่ดินหนาแน่น และมีสิ่งอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวันที่หลากหลายอยู่ใกล้เคียง เช่น ร้านอาหาร ร้านสะดวกซื้อ ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้อาคารสามารถเดินไปยังสถานที่เหล่านั้นได้โดยไม่ต้องใช้รถยนต์

การไม่สร้างที่จอดรถมากกว่าที่กฎหมายกำหนด เพราะไม่ต้องการส่งเสริมการเดินทางโดยใช้รถยนต์ส่วนตัว

การจัดให้มีที่ชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าในโครงการ ซึ่งปลดปล่อยมลพิษน้อยกว่ารถที่ใช้น้ำมัน

(3) หมวดที่ตั้งยั่งยืน (Sustainable Sites) มีเกณฑ์บังคับ 1 ข้อ คือ การป้องกันผลกระทบจากการก่อสร้าง เช่น การกันรั้วไม่ให้ดินไหลออกไปยังพื้นที่ข้างเคียง (รูปที่ 11-2)



รูปที่ 11-2 การทำรั้วป้องกันตะกอนดินและเศษวัสดุต่าง ๆ เข้าไปยังที่ดินข้างเคียง
ในโครงการที่ใช้มาตรฐาน LEED
(ที่มา: ผู้เขียน)

การเพิ่มพื้นที่สีเขียว ให้มากกว่าที่กฎหมายกำหนด

การฟื้นฟูสภาพธรรมชาติในที่ดิน เช่น เก็บรักษาหน้าดินเดิมไว้ก่อนการก่อสร้าง และนำกลับมาใช้ปลูกต้นไม้ในโครงการอีก

การจัดการน้ำฝนไม่ให้ไหลนองออกนอกพื้นที่โครงการ โดยการออกแบบให้มีพื้นที่ซึมน้ำ หรือสวนรับน้ำฝน (Rain Garden) (รูปที่ 11-3)

การลดเกาะความร้อนที่เกิดจากพื้นที่ลาดแข็ง และจากหลังคา การใช้วัสดุที่มีสีอ่อนหรือมีค่า SRI สูงตามเกณฑ์ที่กำหนด หรือการทำหลังคาคลุมพื้นที่จอดรถและมีการใช้ประโยชน์จากหลังคาผลิตพลังงานหมุนเวียน (รูปที่ 11-4) หรือ การทำหลังคาปลูกต้นไม้ (Roof Garden) (รูปที่ 11-5)

การลดมลภาวะทางแสง คือ จะต้องเลือกดวงโคมที่ใช้ภายนอกอาคารให้แสงตกอยู่ภายในขอบเขตที่ดิน ไม่สาดแสงเข้าไปรบกวนที่ดินข้างเคียง และไม่เลือกโคมภายนอกที่แสงส่องขึ้นบนท้องฟ้า ซึ่งเป็นการรบกวนสัตว์ที่หากินในเวลากลางคืน โดยการเลือกโคมที่มีค่า BUG Rating (รูปที่ 11-6, 11-7) ตามที่กำหนด ซึ่งแตกต่างกันตามสภาพพื้นที่ว่าอยู่ใน lighting zone แบบใด จาก 0 = ไม่มีแสงสว่างโดยรอบ ถึง 4 = บริเวณที่มีแสงสว่างมาก เช่น ในเมืองที่มีกิจกรรมและคนพลุกพล่านยามราตรี



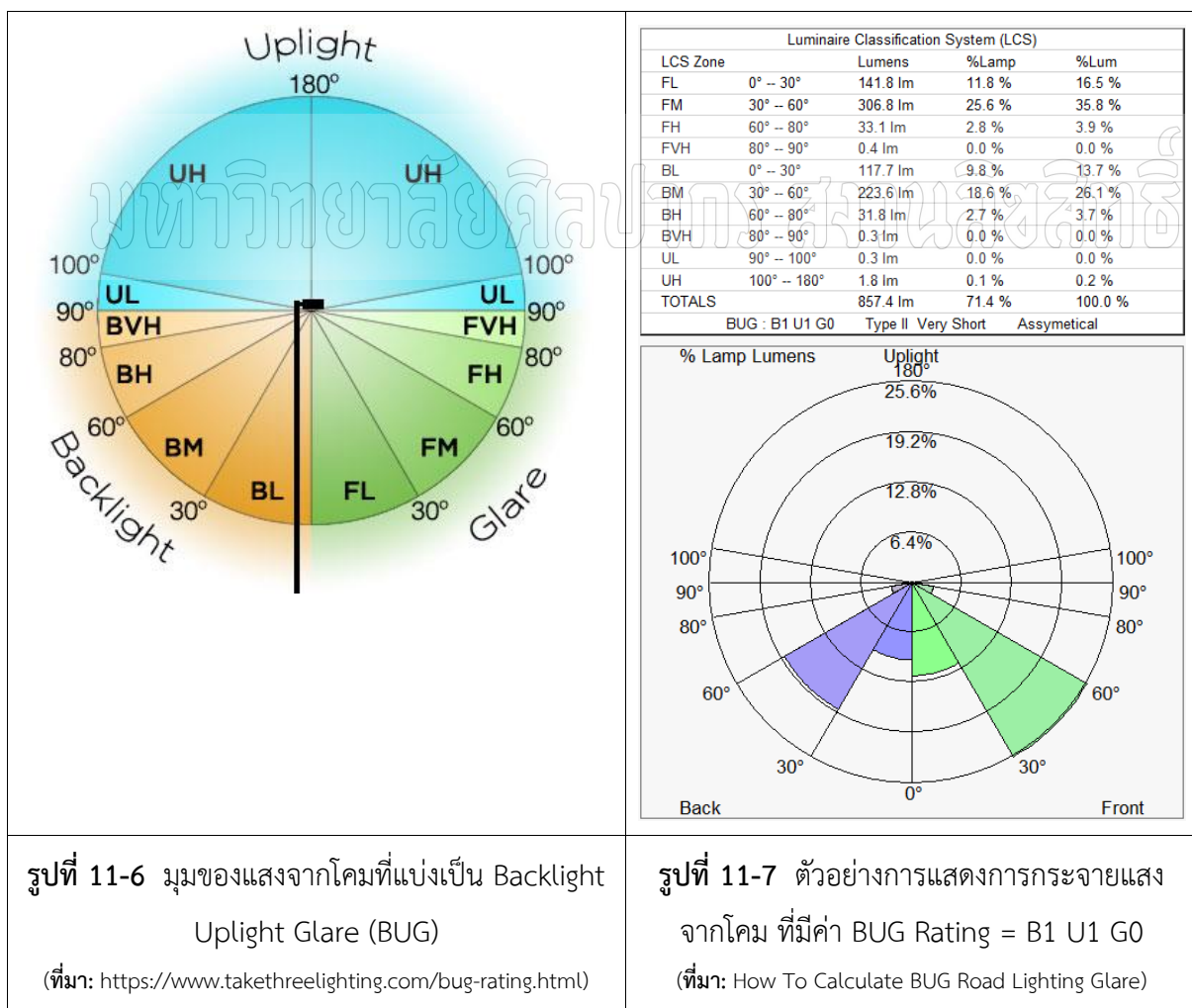
รูปที่ 11-3 สวนรับน้ำฝน (Rain Garden) และทางเดินลาดแข็งที่น้ำสามารถซึมได้
(ที่มา: ผู้เขียน)



รูปที่ 11-4 การลดเกาะความร้อนซึ่งเกิดจากที่จอดรถขนาดใหญ่โดยทำหลังคาคลุม
และติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์
(ที่มา: <http://www.monosun.net/>)



รูปที่ 11-5 การทำ Roof Garden ช่วยลดเกาะความร้อนในเมือง
ช่วยลดน้ำฝนที่ไหลออกนอกพื้นที่ ลดความร้อนเข้าสู่อาคาร ทำให้คนได้ใกล้ชิดธรรมชาติ
และยังสามารถเป็นแหล่งอาหาร ช่วยด้านเศรษฐกิจได้ด้วย
(ที่มา: <https://cutt.ly/boVDpRy>)



(4) **หมวดการใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพ (Water Efficiency)** ประกอบด้วยเกณฑ์บังคับ 3 ข้อ ได้แก่

- การลดการใช้น้ำนอกอาคาร เป็นการใช้น้ำในงานภูมิทัศน์ โดยการเลือกพืชพันธุ์ที่ต้องการใช้น้ำน้อย ใช้ระบบรดน้ำต้นไม้ เช่น ระบบน้ำหยด และหากสามารถประหยัดน้ำได้มากกว่าเกณฑ์บังคับ ก็จะได้รับคะแนนตามเปอร์เซ็นต์ที่สามารถประหยัดน้ำได้จากค่าฐาน

- การใช้น้ำภายในอาคาร โดยการเลือกใช้สุขภัณฑ์ประหยัดน้ำ การเลือกเครื่องใช้ เช่น เครื่องซักผ้า เครื่องล้างจานที่ประหยัดน้ำ เช่น ได้เครื่องหมาย Energy Star ซึ่งจะได้รับคะแนนเมื่อประหยัดน้ำได้มากกว่าเกณฑ์บังคับ และได้คะแนนเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ที่สามารถประหยัดน้ำได้เมื่อเทียบกับค่าฐาน เช่นเดียวกับการใช้น้ำภายนอกอาคาร

- การติดตั้งมาตรวัดน้ำประจำอาคาร

นอกจากนี้ยังมีการให้คะแนนกับการประหยัดน้ำประเภทที่ใช้กับหอระบายความร้อน (Cooling Tower) และในขบวนการผลิต การติดตั้งมาตรวัดน้ำย่อยเพื่อให้ทราบปริมาณน้ำที่ใช้ในอาคาร และน้ำที่ใช้รดน้ำต้นไม้ หรือ ในจุดที่มีการใช้น้ำมาก เช่น ระบบน้ำร้อน

(5) **พลังงานและบรรยากาศ (Energy and Atmosphere)** ซึ่งประกอบด้วยเกณฑ์บังคับ 4 ข้อ คือ

- การตรวจสอบความถูกต้องของการติดตั้งและการปรับแต่งระบบ (Fundamental Commissioning) ซึ่งต้องดำเนินงานโดยบุคคลที่สาม ซึ่งจะต้องมีผู้รับผิดชอบงาน (Commissioning Authority) เข้ามาในโครงการหลังจากขั้นตอนพัฒนางานออกแบบ (Design Development Phase) เสร็จ

- การประหยัดพลังงานขั้นต่ำ จะต้องเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

- การใช้สารทำความเย็นในระบบปรับอากาศจะต้องไม่ใช่คลอโรฟลูโอโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbon, CFC)

- มีการติดตั้งมิเตอร์ประจำอาคาร

ส่วนเกณฑ์การออกแบบที่มีคะแนน คือ

การตรวจสอบการติดตั้งและการปรับแต่งระบบขั้นสูง (Enhanced Commissioning) เป็นการทำงานที่มีขอบเขตกว้างขวางกว่าขั้น Fundamental Commissioning คือ ครอบคลุมถึงขั้นภายหลังจากที่อาคารสร้างเสร็จแล้ว 10 เดือน การจัดทำคู่มือการใช้งานและอบรมการใช้งานระบบต่าง ๆ และ การทำแผนงานเพื่อตรวจสอบและปรับแต่งระบบในระหว่างการใช้งานอาคาร (On-going Commissioning) และยังมีคะแนนสำหรับการตรวจสอบระบบเปลือกอาคาร (Building Enclosure Commissioning) อีกด้วย

การติดตั้งมาตรวัดพลังงานขั้นสูง (Advanced Energy Metering) ซึ่งเป็นการใช้มิเตอร์ที่มีความสามารถสูง เช่น สามารถเก็บข้อมูลได้เป็นรายชั่วโมง และส่งข้อมูลจากระยะไกลได้ (Remote Location) ระบบจะต้องสามารถเก็บข้อมูลได้อย่างน้อย 36 เดือน สามารถรายงานผลเป็นรายชั่วโมง รายวัน รายเดือน หรือ ทั้งปีได้ ซึ่งการบันทึกข้อมูลการใช้พลังงานถือว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวางแผนบริหารจัดการพลังงานในระหว่างใช้อาคาร

การออกแบบเพื่อรองรับการลดความต้องการใช้ไฟฟ้าในอาคาร ในช่วงที่ความต้องการใช้ไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าอยู่ในระดับสูง ซึ่งในอนาคตหากมีโครงการ Demand Response อาคารที่ออกแบบก็จะสามารถเข้าไปมีส่วนร่วมได้

การใช้พลังงานหมุนเวียน ซึ่งอาจจะเป็นการติดตั้งในพื้นที่โครงการ หรือ จากภายนอกโครงการ โดยจะได้คะแนนเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ที่สามารถผลิตได้ตามเกณฑ์ที่กำหนด

การจัดการสารทำความเย็นขั้นสูง (Enhanced Refrigerant Management) คือการออกแบบที่ไม่ใช้สารทำความเย็น หรือ ใช้สารทำความเย็นที่มีผลกระทบต่อค่า ซึ่งพิจารณาจากค่า Ozone Depletion Potential (ODP) และค่า Global Warming Potential (GWP) ซึ่งต้องนำค่าที่เกี่ยวข้องมาคำนวณเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนด

สำหรับการประเมินประสิทธิภาพพลังงานขั้นต่ำของอาคาร (Minimum Energy Performance) ของระบบ LEED จะใช้มาตรฐาน ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) โดยใน LEED v4 แบ่งทางเลือกในการประเมินพลังงานเป็น 3 ทางเลือก (รูปที่ 11-10) ได้แก่

- **ทางเลือก 1** ใช้การจำลองพลังงาน ตาม ASHRAE 90.1-2010 และมีผลประหยัดดีกว่าค่าของอาคารฐานที่มีลักษณะตาม Appendix G อย่างน้อย 5% สำหรับอาคารสร้างใหม่ และ 2% สำหรับอาคารที่ออกแบบเฉพาะเปลือกอาคารและพื้นที่ส่วนกลาง (Core and Shell)

- **ทางเลือก 2** ใช้การทำตามข้อกำหนด (Prescriptive Compliance) ใน ASHRAE 50% Advanced Energy Design Guide

- **ทางเลือก 3** ใช้การทำตามข้อกำหนดใน Advanced Buildings Core Performance Guide

ส่วนใน LEED v4.1 นั้น จะแบ่งวิธีการประเมินประสิทธิภาพพลังงานขั้นต่ำเป็น 4 ทางเลือก

- **ทางเลือก 1** คือ การทำตามรายการที่ระบุไว้ (Prescriptive Provision) ซึ่งกำหนดใน Section 5-10 ของมาตรฐาน ASHRAE 90.1 -2016 ได้แก่

- Section 5 การออกแบบเปลือกอาคาร (Building Envelope) (รูปที่ 11-8)
- Section 6 การออกแบบระบบทำความร้อน การระบายอากาศ และการปรับอากาศ (Heating, Ventilating, and Air Conditioning)
- Section 7 การทำน้ำร้อน (Service Water Heating)
- Section 8 กำลังไฟฟ้า (Power)
- Section 9 การออกแบบแสงสว่าง (Lighting)
- Section 10 อุปกรณ์อื่น ๆ (Other Equipment)

รายการจะระบุค่าที่กำหนด เช่น ค่า R ของฉนวน ค่า U ค่า SHGC ของกระจก เป็นต้น แยกตามเขตภูมิอากาศซึ่งแบ่งเป็น 9 เขต (จากเขต 0 ถึง 8 และ A = อากาศชื้น B = อากาศแห้ง) สำหรับประเทศไทยจะอยู่ใน 2 เขตภูมิอากาศ (รูปที่ 11-9) คือ เขตภูมิอากาศ 0A = ร้อนจัดมาก (Extremely Hot) และชื้น เช่น กรุงเทพมหานคร และ เขตภูมิอากาศ 1A = ร้อนมาก (Very Hot) และชื้น เช่น เชียงใหม่ (ASHRAE 90.1-2016, p.370) ในวิธีการทำตามรายการที่ระบุนี้ ไม่ต้องใช้การจำลองพลังงาน โดยมีการคำนวณบ้าง เช่น การคำนวณค่า U-Value ของผนังทึบ หลังคา เป็นต้น

Table G3.4-1 Performance Rating Method Building Envelope Requirements for Zones 0 and 1 (A,B)*

	Nonresidential		Residential		Semiheated	
Opaque Elements	Assembly Maximum		Assembly Maximum		Assembly Maximum	
Roofs						
Insulation entirely above deck	U-0.360		U-0.360		U-7.280	
Walls, Above-Grade						
Steel-framed	U-0.705		U-0.705		U-1.998	
Wall, Below-Grade						
Below-grade wall	C-6.473		C-6.473		C-6.473	
Floors						
Steel-joist	U-1.986		U-1.986		U-1.986	
Slab-on-Grade Floors						
Unheated	F-1.264		F-1.264		F-1.264	
Opaque Doors						
Swinging	U-3.975		U-3.975		U-3.975	
Nonswinging	U-8.233		U-8.233		U-8.233	
Fenestration	Assembly Max. U	Assembly Max. SHGC	Assembly Max. U	Assembly Max. SHGC	Assembly Max. U	Assembly Max. SHGC
Vertical Glazing, % of Wall						
0% to 10.0%	U _{air} 6.93	SHGC _{air} 0.25	U _{air} 6.93	SHGC _{air} 0.25	U _{air} 6.93	SHGC _{air} NR
10.1% to 20.0%	U _{air} 6.93	SHGC _{air} 0.25	U _{air} 6.93	SHGC _{air} 0.25	U _{air} 6.93	SHGC _{air} NR
20.1% to 30.0%	U _{air} 6.93	SHGC _{air} 0.25	U _{air} 6.93	SHGC _{air} 0.25	U _{air} 6.93	SHGC _{air} NR
30.1% to 40.0%	U _{air} 6.93	SHGC _{air} 0.25	U _{air} 6.93	SHGC _{air} 0.25	U _{air} 6.93	SHGC _{air} NR
Skylight All, % of Roof						
0% to 2.0%	U _{air} 7.72	SHGC _{air} 0.36	U _{air} 7.72	SHGC _{air} 0.19	U _{air} 7.72	SHGC _{air} NR
2.1%+	U _{air} 7.72	SHGC _{air} 0.19	U _{air} 7.72	SHGC _{air} 0.19	U _{air} 7.72	SHGC _{air} NR

* The following definitions apply: c.i. = continuous insulation (see Section 3.2), NR = no (insulation) requirement.
a. Exception to A3.1.3.1 applies.

รูปที่ 11-8 ลักษณะเปลือกอาคารของอาคารฐาน (Baseline Case) ใน Section 5 สำหรับการจำลองพลังงานตาม Appendix G ของ ASHRAE 90.1-2016

(ที่มา: ASHRAE 90.1-2016)

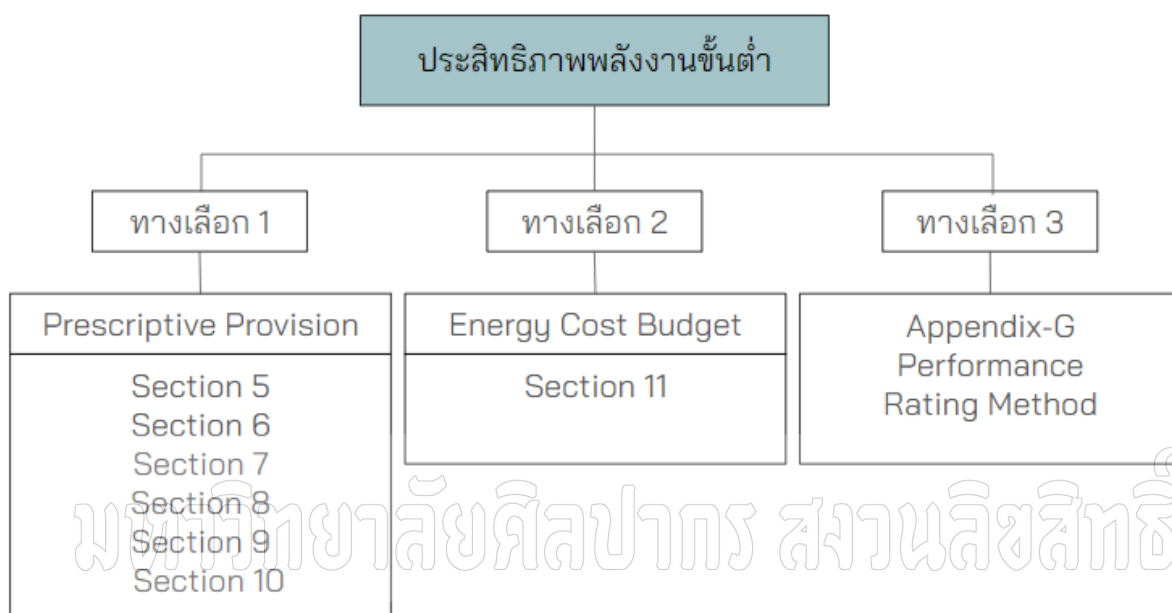
Thailand (THA)						
ARANYAPRATHET	484620	13.70	102.58	0A	1426	56
BANGKOK METROPOLIS	484550	13.73	100.57	0A	1500	59
BHUMIBOL DAM	483770	17.25	99.02	0A	1061	42
BUA CHUM	484180	15.27	101.18	0A	1131	45
CHAIYAPHUM	484030	15.80	102.03	0A	1207	48
CHANTHABURI	484800	12.60	102.12	0A	2902	114
CHIANG MAI	483270	18.78	98.98	1A	1183	47
CHIANG RAI	483030	19.97	99.88	1A	1671	66
CHON BURI	484590	13.37	100.98	0A	1323	52
CHUMPHON	485170	10.48	99.18	0A	2354	93
DON MUANG	484560	13.92	100.60	0A	1438	57
HAT YAI	485690	6.92	100.43	0A	1779	70

รูปที่ 11-9 ตัวอย่างการแบ่งพื้นที่ในประเทศไทยเป็นเขต 0A และ 1A ใน ASHRAE 90.1-2016

(ที่มา: ASHRAE 90.1-2016)

ทางเลือก 2 คือ การใช้วิธีที่เรียกว่า Energy Cost Budget ซึ่งกำหนดอยู่ใน Section 11 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างอาคารที่ออกแบบและอาคารฐาน โดยอาคารฐานจะมีลักษณะต่าง ๆ เช่น เปลือกอาคาร ระบบปรับอากาศ ระบบแสงสว่าง โดยต้องใช้วิธีการจำลองพลังงาน และ คำนวณเข้าที่กำหนดตามตาราง Modeling Requirements ของ Section 11

ทางเลือก 3 คือ การใช้วิธีที่เรียกว่า Performance Rating Method ซึ่งกำหนดในภาคผนวก G เป็นการเปรียบเทียบระหว่างอาคารที่ออกแบบกับอาคารฐาน โดยใช้วิธีการจำลองพลังงาน และใช้คำนวณเข้าตามที่กำหนด ซึ่งกำหนดแตกต่างจากทางเลือก 2



รูปที่ 11-10 ทางเลือกในการประเมินประสิทธิภาพพลังงานขั้นต่ำ

(Minimum Energy Performance) ของ LEED v 4.1

สำหรับ**ประสิทธิภาพพลังงานในระดับสูง** (Optimize Energy Performance) ใน LEED v 4.1 เป็นการหาประสิทธิภาพพลังงานของอาคารที่ดีกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำ ซึ่งจะเริ่มได้คะแนนตามผลการเปรียบเทียบระหว่างอาคารที่ออกแบบและอาคารฐาน โดยแบ่งเป็น 4 ทางเลือก (รูปที่ 11-11) ได้แก่

ทางเลือกที่ 1 Energy Performance Compliance (สามารถได้คะแนน 1- 18 คะแนน) ใช้การเปรียบเทียบระหว่างอาคารที่ออกแบบกับอาคารฐาน (Baseline Building) ตามวิธีการของ ASHRAE 90.1-2016 ใน ภาคผนวก G - Performance Rating Method โดยใช้ตัวชี้วัดคือ ราคาที่ได้จากค่า Performance Cost Index (PCI) ของอาคารที่ออกแบบ เปรียบเทียบกับราคาที่ได้จากค่า Performance Cost Index Target (PCIt) ของอาคารฐาน สำหรับอาคารทั่วไปที่ไม่ใช่สถานพยาบาล ถ้ามีราคาของ PCI ต่ำกว่าราคาของ PCIt 5% จะได้ 1 คะแนน และทุก 5 % ที่ลดลงจะได้คะแนนเพิ่ม 1 คะแนน เช่น 10% ได้ 2 คะแนน 15% ได้ 3 คะแนน จนถึง 45% ได้ 9 คะแนนซึ่งเป็นคะแนนสูงสุด และถ้าประหยัดได้ถึง 50% ถือว่ามีสมรรถนะดีเยี่ยม (Exemplary Performance, EP) ซึ่งจะได้คะแนนเพิ่มในหมวดนวัตกรรม

นอกจากนี้การประเมินจะต้องคำนวณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งคิดในรูปค่าคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ที่ลดลงเปรียบเทียบระหว่าง PCI และ PCIt และนำเปอร์เซ็นต์ที่ลดลงมาคิดคะแนนที่ได้ และนำคะแนนที่ได้จากการคิดโดยใช้ราคา และการคิดโดยใช้ค่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกมารวมกัน ซึ่งจะมีคะแนนสูงสุด 9 คะแนน เมื่อรวมคะแนนสูงสุดจากการใช้ราคา 9 คะแนน และคะแนนจากการใช้คาร์บอนไดออกไซด์อีกด้วยอีก 9 คะแนน รวมเป็น 18 คะแนนสำหรับด้านประสิทธิภาพพลังงาน

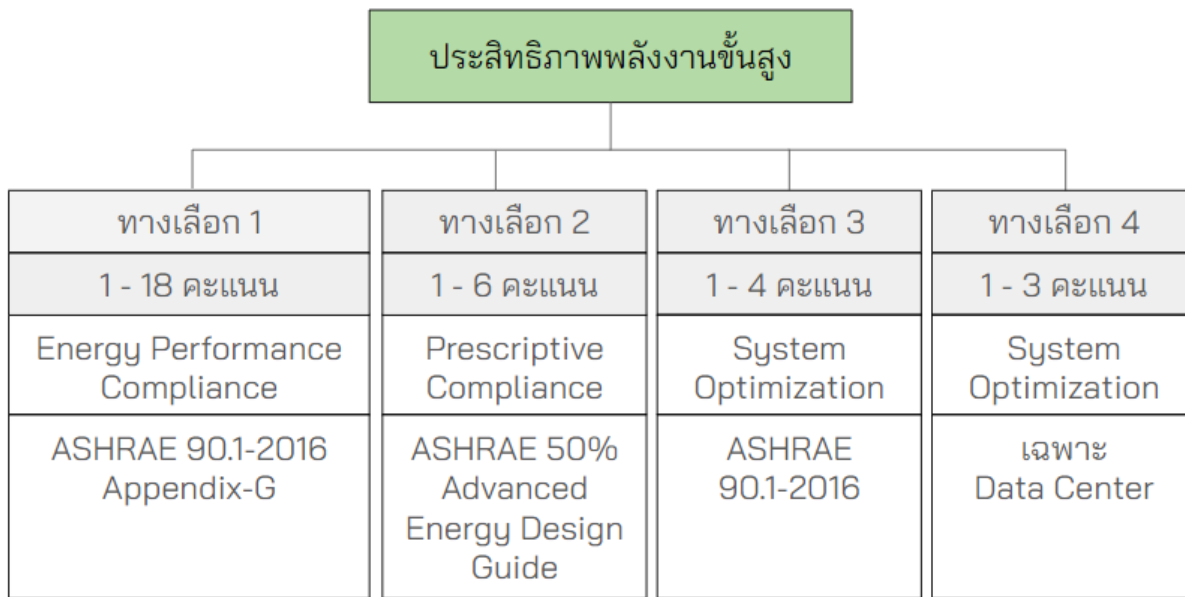
การหาค่า PCI และ PCIt จะมีรายละเอียดของสมการคำนวณใน ASHRAE 90.1-2016

ทางเลือกที่ 2 คือ การใช้ค่าตามที่กำหนด (Prescriptive Compliance) (สามารถได้คะแนน 1-6 คะแนน) ตามในคู่มือ Advanced Energy Design Guide เนื่องจากวิธีทางเลือก 1 อาจจะมีข้อซับซ้อนเพราะต้องใช้การจำลองพลังงานซึ่งจำเป็นต้องมีโปรแกรมในการจำลองพลังงานที่มีคุณสมบัติตามที่ ASHRAE กำหนดและต้องมีความรู้ความเข้าใจทางด้านการจำลองพลังงาน ดังนั้น วิธีที่ 2 จึงเป็นวิธีที่ไม่ต้องใช้การจำลอง โดยให้ดำเนินการออกแบบอาคารให้มีลักษณะตามที่กำหนด คู่มือ ASHRAE 50% Advanced Energy Design Guide ซึ่งมีคู่มือสำหรับอาคารหลายประเภท เช่น สำหรับอาคารสำนักงานขนาดเล็กและขนาดกลาง คู่มือสำหรับโรงเรียน โดยเอกสารในกลุ่ม ASHRAE 50% Advanced Energy Design Guide นี้สามารถดาวน์โหลดมาศึกษาได้ฟรีจาก <https://www.ashrae.org/technical-resources/aedgs/50-percent-aedg-free-download> ซึ่งปัจจุบันมีทั้งหมด 5 เล่ม วิธีนี้จะปฏิบัติง่ายกว่าทางเลือก 1 แต่คะแนนสูงสุดที่ได้จะน้อยกว่า

ทางเลือกที่ 3 คือ System Optimization (1-4 คะแนน) เป็นคะแนนที่ได้จากการออกแบบให้อาคารมีประสิทธิภาพสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดใน ASHRAE 90.1-2016 โดยการออกแบบตามมาตรการต่าง ๆ ที่กำหนดในหัวข้อนี้ เช่น การลดไฟฟ้าแสงสว่างภายในอาคารและนอกอาคารได้ต่ำกว่าค่าฐาน 15% หรือ การทำผนังอาคารส่วนที่อยู่เหนือดินอย่างน้อย 70% ให้เป็นผนังมวลสารตามคำจำกัดความของผนังมวลสาร (Thermal Mass) ที่กำหนดโดย ASHRAE เป็นต้น

ทางเลือกที่ 4 คือ System Optimization (1-3 คะแนน) ซึ่งใช้กับอาคารประเภท Data Center เท่านั้น โดยการพิจารณาจากผลรวมของโหลด (Overall System Design Value) ของงานเครื่องกลกับงานไฟฟ้าของอาคารที่ออกแบบกับค่าสูงสุดของผลรวมของโหลด (Maximum Overall System Value) ตามที่กำหนดใน ASHRAE 90.1-2016 และมีค่าต่ำกว่าตั้งแต่ 10% ขึ้นไป

โดยรวมแล้วจะเห็นว่าวิธีการประเมินพลังงานตามวิธีการของ ASHRAE 90.1 นั้นจะมีความซับซ้อนกว่ากฎหมายอนุรักษ์พลังงานของประเทศไทยมากพอสมควร



รูปที่ 11-11 ทางเลือกในการประเมินประสิทธิภาพพลังงานขั้นสูง
(Optimized Energy Performance) ตาม LEED v 4.1

(6) **หมวดการใช้วัสดุและทรัพยากร** ประกอบด้วยเกณฑ์บังคับ 2 ข้อ คือ

- มีห้องเก็บของ เพื่อเก็บขยะที่สามารถรีไซเคิลได้ กระดาษ กระดาษลูกฟูก แก้ว อะลูมิเนียม พลาสติก
 - มีแผนการแยกขยะในการก่อสร้าง และแยกเป็นเส้นทางที่นำไปรีไซเคิลย้งที่ต่าง ๆ (Waste Stream) เพื่อลดการนำขยะจากการก่อสร้างไปถมทิ้ง
- ส่วนเกณฑ์ที่มีคะแนน จะประกอบด้วยเกณฑ์ เช่น
- การพิจารณาคะแนนจากการใช้วัสดุที่มีค่า Environmental Product Declaration (EPD) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลกระทบของวัสดุที่ผลิตขึ้น ในช่วงตั้งแต่ไปขุดมา ขนส่งมายังโรงงาน และขึ้นการผลิต หรือเรียกว่า ตั้งแต่ช่วง Cradle to Gate ซึ่งเป็นค่าที่ทำได้ค่อนข้างยากสำหรับวัสดุในประเทศไทย
 - การเลือกวัสดุที่มีข้อมูลแหล่งที่มา เช่น ไม้ที่ใช้เป็นไม้ที่ได้รับการรับรองโดย Forest Stewardship Council (FSC) การใช้วัสดุที่มีส่วนผสมของวัสดุรีไซเคิล
 - การเลือกวัสดุที่มีการเปิดเผยข้อมูลส่วนผสมของสารเคมี หรือ ได้รับฉลากรับรองว่าไม่มีส่วนผสมที่เป็นสารเคมีอันตราย
 - การลดขยะในการก่อสร้างที่นำไปยังที่ทิ้งขยะ (Landfills) ซึ่งจะได้คะแนนตามเปอร์เซ็นต์ที่สามารถลดได้
 - การใช้วัสดุที่ใช้แล้วนำมาใช้ใหม่ (รูปที่ 11-12)



รูปที่ 11-12 การนำวัสดุใช้แล้ว (กระจกบานเกล็ด และไม้) มาดัดแปลงทำแผงบังแดดปรับมุม
ที่อาคารห้องสมุด HSBC ที่ได้ LEED PLatinum v.3 (2009)

(7) หมวดคุณภาพสภาพแวดล้อมในอาคาร ประกอบด้วยเกณฑ์บังคับ 2 ข้อ คือ

- คุณภาพอากาศภายในอาคารขั้นต่ำ (Minimum Indoor Air Quality Performance) เป็นการออกแบบอัตราการระบายในพื้นที่ปรับอากาศ และไม่ปรับอากาศ โดยใช้มาตรฐาน ASHRAE 62.1-2010 (สำหรับ v4.1 ใช้มาตรฐาน ASHRAE 62.1-2016)
 - การควบคุมควันบุหรี่ โดยการไม่ให้สูบบุหรี่ในอาคาร และจัดพื้นที่สูบบุหรี่ภายนอกอาคารที่ห่าง 7.5 ม. จากประตูและช่องเปิดต่าง ๆ
- ส่วนเกณฑ์ที่มีคะแนน จะประกอบด้วยเกณฑ์ที่เกี่ยวกับคุณภาพอากาศ แสง เสียง เช่น
- การออกแบบให้มีอัตราการระบายอากาศมากกว่า อัตราการระบายอากาศขั้นต่ำอย่างน้อย 30%
 - การเลือกใช้วัสดุที่มีสารอินทรีย์ระเหยง่ายต่ำ (Low Volatile Organic Compound, Low VOC) เช่น สีทาภายใน กาว ฉนวนกันความร้อน ฉนวนกันเสียง ไม้คอมโพสิต และวัสดุอื่น ๆ ที่อยู่ในหมวดที่กำหนด
 - การออกแบบให้อยู่ในสภาวะสบายโดยใช้มาตรฐาน ASHRAE 55-2010 (LEED v 4.1 ใช้ ASHRAE 55-2017)
 - การออกแบบใช้สามารถใช้แสงธรรมชาติ โดยต้องมีเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ซึ่งมีผู้ใช้งานประจำที่มีค่า Spatial Daylight Autonomy $300/50\%$ (sDA $_{300/50\%}$) ได้ตามที่กำหนด หรือ มีเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ซึ่งมีค่าความส่องสว่าง 300-3000 lux ที่เวลา 9.00 น. และ 15.00 น. ในวันที่ช่วงเวลากลางวันและกลางคืนยาวเท่ากัน (Equinox)
 - การออกแบบให้ผู้ใช้อาคารสามารถมองเห็นทิวทัศน์ภายนอกที่มีคุณภาพ ได้อย่างน้อย 75% ของพื้นที่ซึ่งมีผู้ใช้งานประจำ
 - การออกแบบแสงสว่างให้ผู้ใช้อาคารสามารถควบคุมแสงสว่างได้ในลักษณะ เปิด-ปิด และให้ความสว่างระหว่างกลาง คุณภาพความถูกต้องของสีของแสงสว่างจากหลอดไฟ หรือ ค่า CRI ≥ 80
 - สมรรถนะทางด้านเสียงในอาคาร ซึ่งพิจารณาจากเสียงพื้นหลังของระบบปรับอากาศ (HVAC Background Noise) เสียงที่ส่งผ่านเข้ามาในห้องโดยใช้ ค่า Sound Transmission Class (STC) และระยะเวลากังวาน (Reverberation Time, RT) คือ เวลาที่ความดังของเสียงที่ความถี่ 500 Hz, 1000 Hz และ 2000 Hz มีความดังลดลง 60 dB จะต้องน้อยกว่าเวลาที่กำหนดสำหรับห้องแต่ละประเภท เช่น ในสำนักงานแบบเปิดที่ไม่มีระบบ Sound Masking จะต้องมีค่า RT60 น้อยกว่า 0.8 วินาที

(8) **หมวดนวัตกรรม** คือ การออกแบบที่มีนวัตกรรม หรือ การออกแบบในเกณฑ์ที่เป็นเกณฑ์นำร่อง (Pilot Credit) หรือ การออกแบบในเกณฑ์บางข้อที่กำหนดได้ดีเป็นพิเศษ (Exemplary Performance) เช่น การประหยัดพลังงาน เป็นต้น และคะแนนจากการมีบุคคลที่ได้รับการรับรองเป็น LEED AP (Accredited Professional) อย่างน้อย 1 คน อยู่ในโครงการ

(9) **หมวดสิ่งสำคัญสำหรับภูมิภาค** เป็นการได้รับคะแนนเนื่องจากได้ออกแบบในสิ่งที่สำคัญสำหรับภูมิภาคซึ่งเป็นที่ตั้งโครงการ และได้คะแนนสูงที่ระดับที่กำหนด เช่น สำหรับประเทศไทย จะเป็นเรื่องการประหยัดพลังงาน การประหยัดน้ำ เป็นต้น

11.4 เกณฑ์การประเมินอาคารเขียวในระบบ TREES

สำหรับเกณฑ์การพัฒนาอาคารเขียวของประเทศไทยนั้น ปัจจุบันสถาบันอาคารเขียวไทย จะมีคู่มือเกณฑ์การประเมินความยั่งยืนทางพลังงานและสิ่งแวดล้อมไทย สำหรับการก่อสร้างและปรับปรุงโครงการใหม่ และอาคารประเภทพื้นที่ส่วนกลางและกรอบอาคาร (TREES -NC/CS) เวอร์ชัน 1.1 และคู่มือฯ สำหรับอาคารระหว่างการใช้งาน (TREES for Existing Building: Operation and Maintenance) v 1.0 และมีเกณฑ์สำหรับการประเมินเบื้องต้นและขอการรับรองอาคารโดยที่ยังไม่ได้ก่อสร้าง เรียก Pre-NC

ในภาพรวมเกณฑ์การออกแบบอาคารที่จะก่อสร้างใหม่ จะมีโครงสร้างและเนื้อหาบางส่วนคล้ายกับ LEED ในเวอร์ชัน 3 (2009) โดยแบ่งเป็น 8 หมวด คือ

หมวด		คะแนน (บังคับ)
1	การบริหารจัดการอาคาร (Building Management)	3 (1)
2	ผังบริเวณและภูมิทัศน์ (Site and Landscape)	16 (2)
3	การประหยัดน้ำ (Water Conservation)	6
4	พลังงานและบรรยากาศ (Energy and Atmosphere)	20 (2)
5	วัสดุและทรัพยากรในการก่อสร้าง (Materials and Resources)	13
6	คุณภาพสภาพแวดล้อมในอาคาร (Indoor Environmental Quality)	17 (2)
7	การป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Protection)	5 (2)
8	นวัตกรรม (Green Innovation)	5

จากหมวดข้างต้น จะเห็นว่าคล้ายคลึงกับ LEED แต่มีการเพิ่มหมวดที่ 1 การบริหารจัดการอาคาร และหมวดที่ 7 การป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

สำหรับเกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพพลังงานขั้นต่ำ ตามมาตรฐาน TREES จะพิจารณาที่อาคารมีการใช้พลังงานรวมต่ำกว่าอาคารอ้างอิงตามกฎหมายอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552

และสำหรับเกณฑ์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานซึ่งจะมีคะแนนเต็มสูงถึง 16 คะแนน ให้ผู้ออกแบบสามารถเลือกได้ว่า จะใช้ทางเลือก 1 ที่ใช้การเปรียบเทียบค่าพลังงานรวมของอาคารที่ออกแบบและอาคารอ้างอิงตาม ASHRAE 90.1-2007 ตามภาคผนวก G หรือ ใช้ทางเลือก 2 คือการเปรียบเทียบพลังงานรวมระหว่างอาคารที่ออกแบบและอาคารอ้างอิงตามกฎหมายอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552 โดยการใช้โปรแกรม BEC และมีผลประหยัดตั้งแต่ 6% ขึ้นไปสำหรับอาคารสร้างใหม่ แต่การคำนวณผลประหยัดจะต้องใส่โหลดจากอุปกรณ์เครื่องใช้ (Equipment Load) เข้าไปด้วยให้เท่ากันทั้งอาคารที่ออกแบบและอาคารฐาน

คะแนนรวมทั้งหมดจะมี 85 คะแนน และแบ่งระดับการรับรองเป็น 4 ระดับ เช่นกัน คือ

CERTIFIED	30-37	คะแนน
SILVER	38-45	คะแนน
GOLD	46-60	คะแนน
PLATINUM	61	คะแนน ขึ้นไป
ทุกระดับต้องผ่านคะแนนข้อบังคับ	9	ข้อ

เกณฑ์ต่าง ๆ ของ TREES จะมีการใช้ตัวชี้วัดที่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทยมากขึ้น เช่น การเลือกวัสดุต่าง ๆ จะใช้วัสดุที่ได้รับรองฉลากเขียว หรือ ฉลากคาร์บอนของประเทศไทย เป็นต้น

ส่วนเกณฑ์เรื่องอัตราการระบายอากาศ ซึ่งเป็นเกณฑ์บังคับ จะใช้ ASHRAE 62.1-2007 และเกณฑ์การออกแบบสภาวะสบายใช้ ASHRAE 55-2004 คล้ายกับ LEED v 4 เพียงแต่เป็น version ที่เก่ากว่า

11.5 ระบบประเมินอาคารที่เน้นสุขภาวะตามมาตรฐาน WELL

การออกแบบอาคารประหยัดพลังงาน จะต้องให้ความสำคัญต่อการมีสุขภาวะภายในอาคารที่ดีด้วย มาตรฐาน WELL Building Standard เป็นเกณฑ์การประเมินที่มีความแตกต่างจากเกณฑ์การประเมินอาคารเขียวอื่น ๆ ที่แพร่หลายในปัจจุบัน ตรงที่เป็นเกณฑ์ที่เน้นสุขภาวะ ความเป็นอยู่ที่ดี และประสิทธิภาพการทำงานของคนในอาคารเป็นหลัก ซึ่ง International WELL Building Institute (IWBI) ประเทศสหรัฐอเมริกา กล่าวว่า WELL เป็นเกณฑ์การประเมินอันแรกที่เน้นสุขภาวะในอาคาร ในขณะที่เกณฑ์ประเมินอาคารเขียวส่วนใหญ่เน้นการประหยัดพลังงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าเรื่องอื่น ๆ IWBI ได้ประกาศใช้ WELL ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2014

ด้วยข้อแตกต่างดังกล่าว ทำให้ WELL ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในการออกแบบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในประเทศสหรัฐอเมริกา มีบางอาคารที่ขอการรับรองทั้ง LEED และ WELL เพื่อแสดงให้เห็นถึงการเป็นอาคารที่ดีอย่างรอบด้าน โดยปัจจุบันมีโครงการที่ลงทะเบียนขอการรับรอง WELL Certification แล้วมากกว่า 30 ประเทศ โดยมีโครงการที่ผ่านการรับรองแล้วมากกว่า 100 โครงการ และที่ได้ลงทะเบียนเพื่อขอรับการตรวจรับรองมากกว่า 900 อาคาร สำหรับในประเทศไทยก็มีโครงการที่ลงทะเบียนขอการรับรองแล้วเช่นกัน

เนื่องจากเกณฑ์ WELL เน้นที่สุขภาพ การพัฒนาเกณฑ์การประเมิน จึงมีพื้นฐานมาจากการวิจัยทางการแพทย์ ซึ่งมีหลักฐานยืนยันความเกี่ยวข้องระหว่างผลของการออกแบบอาคารที่มีต่อสุขภาพ โดยได้จำแนกระบบการทำงานของร่างกายที่อาจได้รับผลกระทบเป็น 11 ระบบ ได้แก่ (รูปที่ 11-13)

- 1) ระบบหัวใจและหลอดเลือด (Cardiovascular System)
- 2) ระบบการย่อยอาหาร (Digestive System)
- 3) ระบบต่อมไร้ท่อ (Endocrine System)
- 4) ระบบภูมิคุ้มกัน (Immune System)

- 5) ระบบผิวหนัง (Integumentary System)
- 6) ระบบกล้ามเนื้อ (Muscular System)
- 7) ระบบประสาท (Nervous System)
- 8) ระบบสืบพันธุ์ (Reproductive System)
- 9) ระบบหายใจ (Respiratory System)
- 10) ระบบกระดูก (Skeletal System)
- 11) ระบบทางเดินปัสสาวะ (Urinary System)

ใน WELL v.1 ได้แบ่งเนื้อหาในการประเมินอาคาร เป็น 7 กลุ่มแนวคิด เรียก Concepts (คล้าย Categories ของ LEED) และ 100 ข้อเกณฑ์ อธิบายเชื่อมโยงให้เห็นว่าเกณฑ์แต่ละข้อมีผลต่อร่างกายระบบใดบ้างใน 11 ระบบข้างต้น

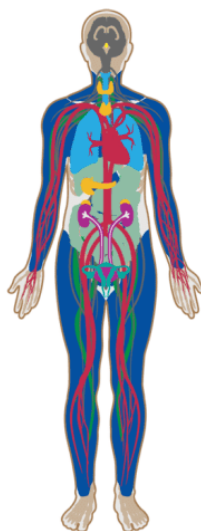
โดยประกอบด้วย กลุ่มแนวคิดด้านต่าง ๆ ดังนี้ คือ

1) อากาศ (Air)	29	ข้อ
2) น้ำ (Water)	8	ข้อ
3) โภชนาการ (Nourishment)	15	ข้อ
4) แสงสว่าง (Light)	11	ข้อ
5) ความแข็งแรงของร่างกาย (Fitness)	8	ข้อ
6) ความสบาย (Comfort)	12	ข้อ
7) สภาวะทางใจ (Mind)	17	ข้อ
รวม	100	ข้อ (คะแนน)

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

Body Systems Applied to WELL Features

A simple way to express the built environment's complex impact on the human body



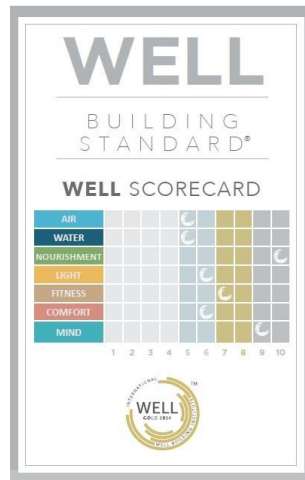
Cardiovascular
Digestive
Endocrine
Immune
Integumentary
Muscular
Nervous
Reproductive
Respiratory
Skeletal
Urinary

Copyright© 2015 by International WELL Building Institute PBC. All rights reserved.

รูปที่ 11-13 ระบบของร่างกาย 11 ระบบ ที่เชื่อมโยงกับทุกเกณฑ์ในการประเมินอาคาร

(ที่มา: <https://www.chargespot.com/workspaces/well-building-standard/>)

ในแต่ละ Concept จะประกอบด้วยหัวข้อประเมิน (หรือ Features) ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ เกณฑ์บังคับ และเกณฑ์เลือกทำ เกณฑ์บังคับจะเรียก Preconditions (คล้าย Prerequisite ของ LEED) ส่วน เกณฑ์เลือกทำเรียก Optimizations (คล้าย Credits ของ LEED) โดยทั้ง Preconditions และ Optimizations ทุกข้อจะมีคะแนนเท่ากันหมด คือ ข้อละ 1 คะแนน โดยถ้าหากสามารถผ่านเกณฑ์บังคับหรือ Preconditions ได้ทุกข้อ ก็จะได้รับรางวัลรับรองในระดับ Silver และหากสามารถทำคะแนนในข้อที่เป็น Optimization ได้ 40% ก็จะได้ระดับ Gold และ 80% จะได้ระดับ Platinum โดยคะแนนในแต่ละ Concept จะถูกนำมาคำนวณใหม่ ให้ฐานคะแนนเต็มเป็น 10 เท่ากัน โดยทุก Concept ต้องได้อย่างน้อย 5 คะแนน



รูปที่ 11-14 การแสดงผลประเมินจะแสดงระดับที่ได้พร้อมคะแนนของแต่ละ Concept

(ที่มา: <https://www.iesve.com/discoveries/article/6470/what-next-for-building-design-well>)

เกณฑ์ WELL v1. สามารถใช้ประเมินได้กับงาน 3 ประเภท คือ

- 1) ประเภทอาคารสร้างใหม่และอาคารเดิม
- 2) ประเภทงานตกแต่งภายในทั้งอาคารใหม่และอาคารเดิม
- 3) ประเภทสำนักงานให้เช่า (core and shell)

ทั้ง 3 ประเภทนี้จะมีคะแนนเต็มไม่เท่ากัน นอกจากนี้แล้ว IWBI ก็ยังมีโปรแกรมนำร่อง (Pilot Programs) สำหรับอาคารพักอาศัยรวม สถานศึกษา อาคารค้าปลีก ภัตตาคาร และครัวร้านอาหาร

ใน WELL v1. เกณฑ์สำหรับประเมินอาคารใหม่และอาคารเดิมนั้น จะประกอบด้วย 100 ข้อ และภาพรวมของ WELL จะมีเกณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบปรับอากาศ และระบายอากาศ ระบบแสงสว่าง และสภาวะสบายในอาคารมากกว่า LEED และเน้นในเชิงของคุณภาพมากกว่าผลประหยัดหรือเชิงปริมาณ เช่น การออกแบบแสงสว่างจะไม่ได้ใช้ตัวชี้วัดคือ LPD (Lighting Power Density) แต่เน้นที่คุณภาพของแสง การป้องกันการเกิดแสงจ้าจากดวงคอม หรือ การนำแสงธรรมชาติมาใช้มิใช่เพื่อการประหยัดพลังงาน แต่เพราะแสงมีผลต่อวงจรของระบบการทำงานของร่างกาย (Circadian Rhythm) ซึ่งใช้ตัวชี้วัดคือ Melanopic Lux เป็นต้น

เกณฑ์ในหมวดอากาศ มีถึง 29 Features เพราะคุณภาพอากาศมีผลโดยตรงต่อสุขภาพ และเป็นสาเหตุของการเสียชีวิตจากโรคต่างๆ ก่อนวัยอันควร ในจำนวนนี้เป็นเกณฑ์บังคับถึง 12 ข้อ ซึ่งหากเปรียบเทียบกับ LEED แล้ว จะเห็นว่า LEED มีเกณฑ์บังคับด้านอากาศเพียง เรื่องอัตราการระบายอากาศที่ต้องได้ตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1-2010 และควบคุมเรื่องการสูบบุหรี่ในอาคารเท่านั้น



รูปที่ 11-15 สัดส่วนของคะแนนในแต่ละ Concept

WELL ยังมีการนำมาตรฐาน ASHRAE มากำหนดในเกณฑ์ประเมินหลายข้อ คล้ายกับ LEED เช่น การใช้ ASHRAE 62.1-2013 เรื่องอัตราการระบายอากาศ, ASHRAE 55-2013 เรื่องสภาวะสบาย, ASHRAE Guideline 0-2005 ในการทำ Commissioning เปลือกอาคาร, ASHRAE Guidelines RP-949 สำหรับการออกแบบ Displacement Ventilation เป็นต้น

ตัวอย่าง เกณฑ์บังคับใน WELL v.1 เช่น

หัวข้อ **ประสิทธิภาพในการระบายอากาศ** (Ventilation Effectiveness) กำหนดให้ออกแบบให้ได้ตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1-2013 และในกรณีเป็นห้องที่มีขนาดใหญ่กว่า 46.5 ตร.ม. และมีคนหนาแน่นคือมากกว่า 25 คน/93 ตร.ม. (25 คน/1,000 ตร.ฟุต) จะต้องออกแบบระบบระบายอากาศให้เป็นแบบ Demand Controlled Ventilation โดยจะต้องทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในห้อง < 800 ppm. เป็นต้น

หัวข้อ **การกรองอากาศ** กำหนดให้ใช้แผ่นกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพระดับ MERV 13 ยกเว้นแต่ถ้าจะมีข้อมูลว่าอากาศภายนอกในระยะ 1.6 กม. (1 ไมล์) จากที่ตั้งอาคาร มีค่า PM_{2.5} และ PM₁₀ ต่ำกว่าค่าที่ WELL กำหนด

การตรวจวัดสมรรถนะอาคารตามจริง

มาตรฐาน WELL เป็นระบบการประเมินอาคารที่มี GBCI (Green Building Certification Inc.) (หน่วยงานเดียวกันกับที่รับรองอาคารตามมาตรฐาน LEED) ทำหน้าที่เป็น Third Party ให้การรับรอง

แต่ WELL มีความแตกต่างกับ LEED อย่างชัดเจนอย่างหนึ่ง คือ มีการตรวจวัดสมรรถนะตามจริง (Performance Verification) โดยมีผู้ประเมินที่ผ่านการฝึกอบรม (WELL Assessor) มาตรวจที่อาคาร ซึ่ง LEED ไม่มี เพราะการรับรองอาคารของ LEED นั้นเป็นการตรวจจากเอกสารอย่างเดียว

การตรวจสอบสมรรถนะอาคารของ WELL นั้น ครอบคลุมในหลายเรื่อง เช่น

- คุณภาพอากาศ ตรวจสอบปริมาณของฟอร์มัลดีไฮด์ ส่วนประกอบรวมของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Total volatile organic compounds) ปริมาณสารแขวนลอยในอากาศ (Particulate Matter) ขนาด PM_{2.5} และ PM₁₀ ปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ ปริมาณโอโซน และ ก๊าซเรดอน
- คุณภาพน้ำดื่ม ตรวจวัดสารละลายเคมี สารแขวนลอย

- คุณภาพแสงสว่าง วัดทั้งความสว่างที่มีผลต่อการมองเห็น และความสว่างที่มีผลต่อวงจรการทำงานของสรีระในรอบวัน (Circadian lighting) ที่ส่งผลต่อการทำงานของระบบต่าง ๆ ในร่างกาย
- อุณหภูมิอากาศภายใน ความเร็วลม ความชื้น
- การวัดความดังของเสียงรบกวนจากภายนอก เป็นต้น

นอกจากนี้การรับรองอาคาร WELL มีอายุเพียงแค่ 3 ปี ซึ่งเจ้าของอาคารจะต้องขอการรับรองใหม่อย่างต่อเนื่องหากต้องการแสดงให้เห็นว่าอาคารยังสามารถรักษาคุณภาพให้ได้อย่างสม่ำเสมอ และถ้าเลือกทำคะแนนในบางหัวข้อ ในระหว่างที่ยังอยู่ในช่วงอายุของการรับรองจะต้องมีการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมด้วย เช่น มีการตรวจวัดคุณภาพน้ำดื่มทุก 3 เดือน มีการตรวจสอบเชื้อราที่คอยล์เย็นของระบบปรับอากาศทุก 3 เดือน ต้องถ่ายภาพหลักฐานการตรวจสอบ ส่งรายงานให้ IWBI เป็นรายปี

สำหรับภาพรวมของเกณฑ์ในแต่ละหมวด 7 หมวด คือ

(1) อากาศ จะเน้นเรื่องคุณภาพอากาศภายในอาคาร เกณฑ์บังคับจำนวนมาก เช่น ค่าปริมาณ $PM_{2.5} < 15$ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ $PM_{10} < 50$ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และระหว่างการก่อสร้างจะต้องมีการปิดกันฝุ่นเข้าไปตามท่อลม การควบคุมการเกิดเชื้อรา การใช้วัสดุที่มีสารอินทรีย์ระเหยง่ายต่ำ และเกณฑ์ที่มีคะแนน เช่น มีอัตราการระบายอากาศมากกว่าเกณฑ์ ASHRAE 62.1 อย่างน้อย 30% การควบคุมความชื้น ทางเข้าอาคารมีพรมดักฝุ่นที่พื้น ชนิดของอุปกรณ์ทำความสะอาด การมีระบบฝ้าติดตามคุณภาพอากาศในอาคารที่ทำให้พนักงานทราบ (รูปที่ 11-16) เป็นต้น

(2) น้ำ จะดูที่คุณภาพน้ำดื่ม การจัดบริการน้ำดื่ม ให้ผู้ใช้อาคารเข้าถึงได้สะดวก มีการตรวจสอบคุณภาพน้ำดื่มเป็นระยะ เพื่อดูว่าไม่มีสารปนเปื้อนต่าง ๆ ตามเกณฑ์

(3) โภชนาการ (Nourishment) จะเน้นว่าอาหารที่ขายหรือจัดให้พนักงานรับประทาน จะต้องเป็นอาหารที่มีประโยชน์ คือ มีผัก ผลไม้ ไม่เป็นอาหารที่มีน้ำตาลสูง มีการจัดที่ให้ล้างมือ เป็นต้น (รูปที่ 11-17)

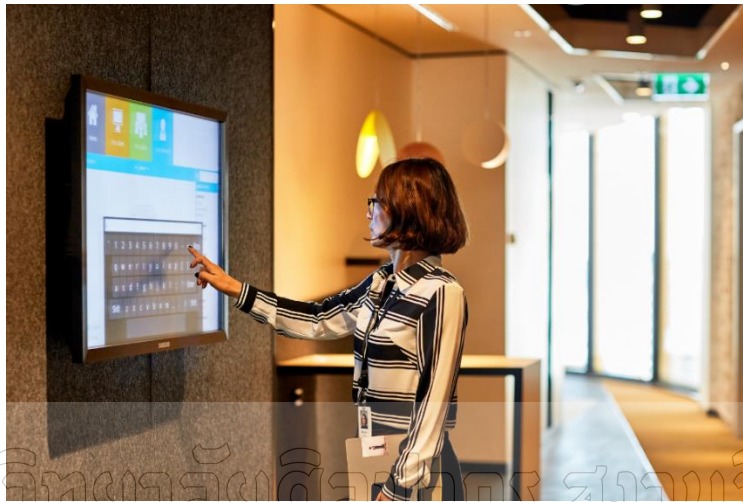
(4) แสงสว่าง (Light) จะเป็นหมวดที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโดยตรง คือ ต้องออกแบบให้มีแสงสว่างโดยรอบ (Ambient Light) อย่างน้อย 215 lux ที่ความสูง 0.76 ม. จากพื้น มีการควบคุมแสงสว่างโดยแบ่งพื้นที่ย่อยๆ ตามขนาดที่กำหนด การออกแบบแสงสว่างโดยคำนึงถึงวงจรการทำงานของร่างกาย การควบคุมแสงจากคอมพิวเตอร์ การควบคุมแสงจากแสงธรรมชาติ การวางตำแหน่งโต๊ะคอมพิวเตอร์เพื่อลดการเกิดแสงจ้าปรากฏในจอคอมพิวเตอร์ การใช้สีภายในห้องเพื่อให้ห้องดูสว่าง ค่าความถูกต้องของสีของแสงโดยใช้ค่า Ra และ R9 การติดตั้งอุปกรณ์บังแดดอัตโนมัติเพื่อควบคุมแสงจากแสงอาทิตย์ การออกแบบเพื่อใช้ประโยชน์แสงธรรมชาติ

(5) ความแข็งแรงของร่างกาย (Fitness) เป็นเกณฑ์การออกแบบที่ส่งเสริมให้คนได้ออกกำลังกาย เช่น การเดินภายในอาคารโดยการขึ้นลงบันได (รูปที่ 11-18) การจัดอุปกรณ์ออกกำลังกายให้พนักงานได้ใช้

(6) ความสบาย (Comfort) ใน v.1 นี้ได้รวมความสบายในหลายเรื่องไว้ด้วยกัน คือ ความสบายเชิงอุณหภูมิ (Thermal Comfort) การไม่มีเสียงรบกวนขณะทำงานโดยใช้ Sound Masking กลบเสียง การใช้ผนังที่มีค่า Noise Isolation Class (NIC) ที่มากพอในการกันเสียงรบกวนที่มาจากห้องติดกัน การไม่มีกลิ่นรบกวน และมีความสบายทางสรีระจากการใช้โต๊ะ เก้าอี้ที่สามารถปรับความสูงต่ำให้เหมาะสมกับร่างกาย (รูปที่ 11-19)

(7) **สภาวะทางใจ (Mind)** เป็นการทำงานร่วมมือกันระหว่างผู้ที่มีส่วนได้ส่วนเสียในโครงการ (Stakeholders) ให้เกิดความเข้าใจแนวคิดในการออกแบบอาคารที่มีผลต่อสุขภาวะ และหาวิธีที่จะทำให้อาคารนั้นยังคงรักษามาตรฐานที่ดีทางสุขภาวะได้ตลอดไป การให้ผู้ใช้อาคารรู้สึกปลอดภัย โปร่ง ไม่มีความเครียด เช่น การนำธรรมชาติ หรือต้นไม้เข้ามาในอาคาร (รูปที่ 11-20) การนำงานศิลปะหรือสิ่งที่สะท้อนวัฒนธรรมของท้องถิ่นเข้ามาในงานตกแต่ง เพื่อเกิดความภูมิใจหรือปิติเมื่อพบเห็น

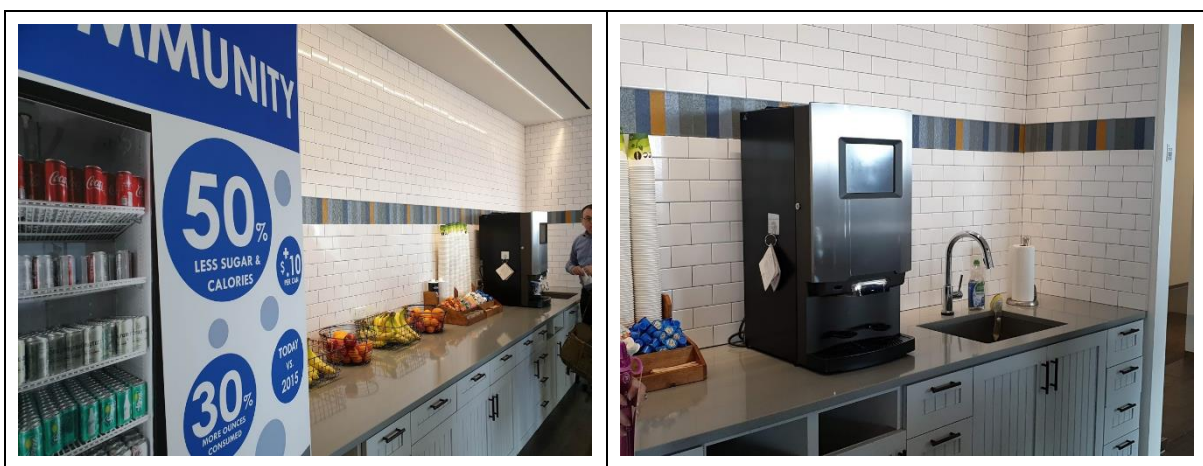
นอกจากเกณฑ์ข้างต้น ซึ่งเป็นบางส่วนของเกณฑ์ที่อธิบายให้เห็นภาพรวมแล้ว WELL ยังมีเกณฑ์นวัตกรรม ถ้าหากสามารถทำในบางเรื่องที่มีผลดีต่อสุขภาพหรือสุขภาวะโดยมีหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ หรือหลักฐานทางการแพทย์สนับสนุน



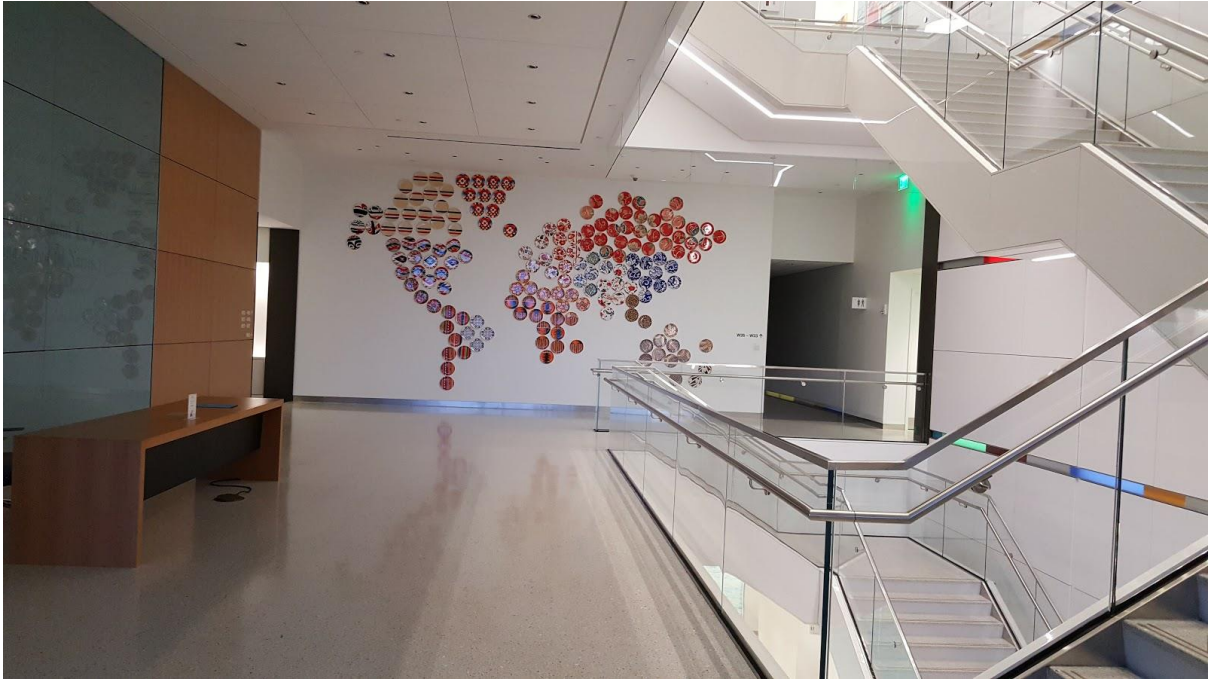
รูปที่ 11-16 การติดตั้ง Sensor และระบบเฝ้าติดตามคุณภาพอากาศในอาคารให้ผู้ใช้อาคารทราบ

ตามเกณฑ์ข้อ Feature 18: Air Quality Monitoring and Feedback

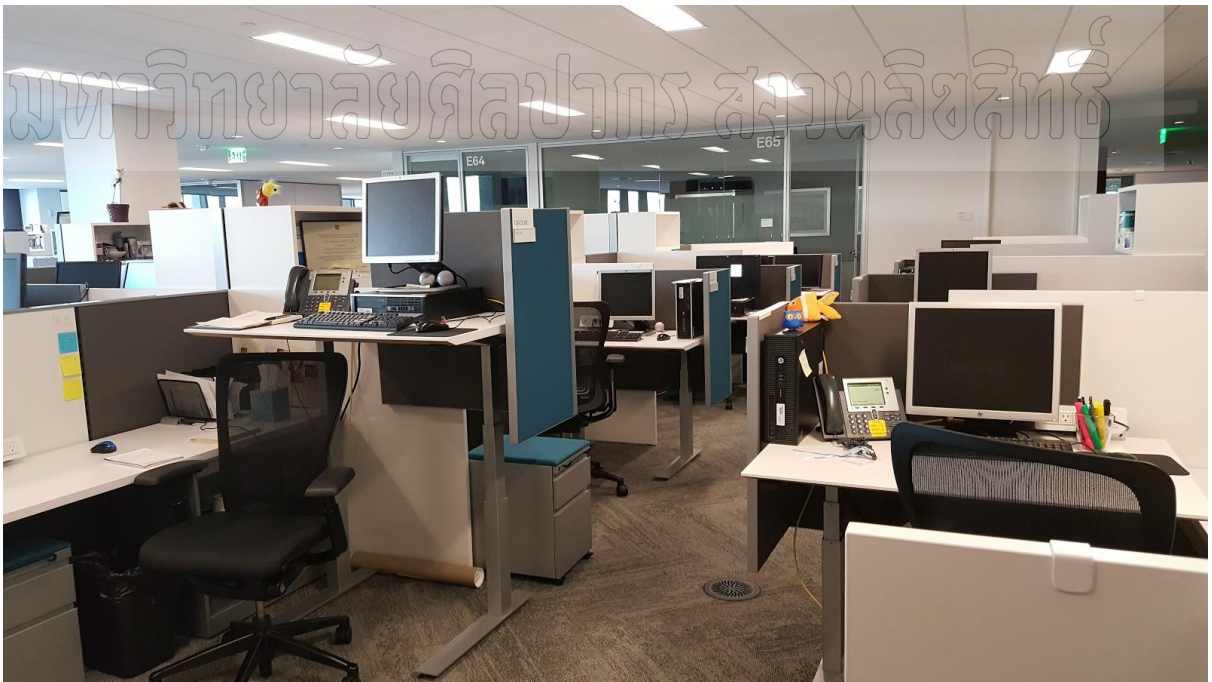
(ที่มา: <https://www.wellcertified.com/en/articles/mirvac-headquarters>)



รูปที่ 11-17 การจัดผลไม้และเครื่องดื่มที่น้ำตาลน้อยให้พนักงานรับประทาน
และอ่างล้างมือตามเกณฑ์หมวดโภชนาการ (Nourishment)



รูปที่ 11-18 การออกแบบบันไดให้น่าเดิน แทนการใช้ลิฟต์ ทำให้ร่างกายแข็งแรง (และประหยัดพลังงาน)
หัวข้อ 64: Interior Fitness Circulation ตามหมวด Fitness



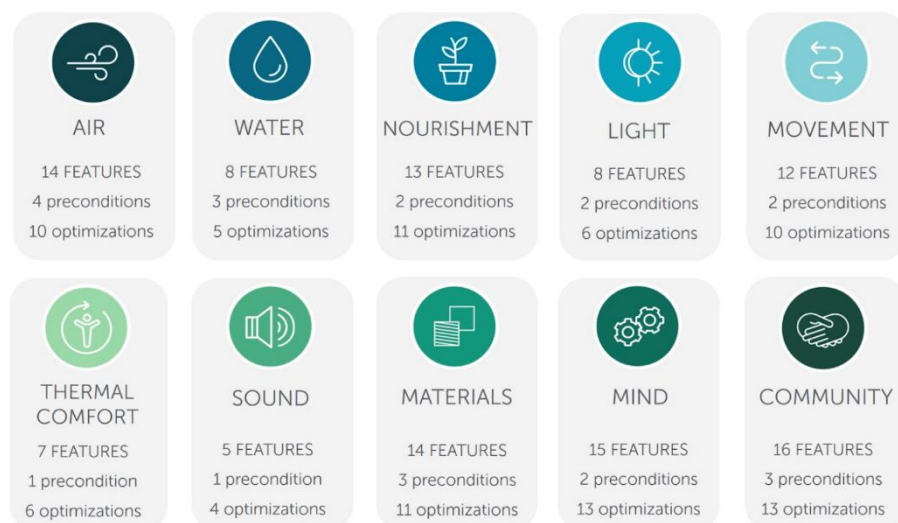
รูปที่ 11-19 โต๊ะที่สามารถปรับให้ยืนทำงานได้ ตามเกณฑ์ข้อ 73 Ergonomics : Visual and Physical
ในหมวดความสบาย (Comfort)



รูปที่ 11-20 การนำต้นไม้ที่ปลูกในกระถางวางในอาคาร ตามเกณฑ์ข้อ 100: Biophilia II-Qualitative
หมวดสภาวะทางใจ (Mind)

WELL v2.

ในปี ค.ศ. 2018 International WELL Building Institute (IWBI) ได้ประกาศ WELL v2. เป็นโครงการ Beta (ซึ่งยังอาจจะมีการปรับเนื้อหาได้) โดยปรับหมวดการประเมินใหม่จากเดิม 7 แนวคิด (Concepts) เป็น 10 แนวคิด ได้แก่ 1.อากาศ 2.น้ำ 3.โภชนาการ 4.แสงสว่าง 5.การเคลื่อนที่ 6.ความสบายเชิงอุณหภูมิ 7.เสียง 8.วัสดุ 9.สภาวะทางใจ และ 10.ชุมชน (รูปที่ 11-21) และยังมีหมวดเพิ่มเติม 1 หมวด คือนวัตกรรม



รูปที่ 11-21 แนวคิดในการประเมินอาคารมาตรฐาน WELL v2. ทั้ง 10 หมวดและจำนวนเกณฑ์

(ที่มา: <https://www.wellcertified.com/en/articles/tip-comparison-v1-well-v2-pilot>)

การอธิบายเกณฑ์ในเวอร์ชันที่ 2 ของ WELL นี้จะเปลี่ยนมาอธิบายว่าแต่ละเกณฑ์ตรงกับเป้าหมายข้อใดของการพัฒนาที่ยั่งยืนขององค์การสหประชาชาติ เพื่อแสดงให้เห็นว่า WELL Building Standard เป็นระบบที่ครอบคลุมทุกเป้าหมายของการพัฒนาที่ยั่งยืน

นอกจากนี้ได้ปรับวิธีการให้คะแนนเกณฑ์แต่ละข้อจากเดิมซึ่งเคยมีคะแนนเท่ากันหมดทุกข้อ ๆ ละ 1 คะแนน เป็นคะแนนไม่เท่ากัน เช่น 1 คะแนน หรือ 3 คะแนน ตามผลกระทบของเรื่องนั้นที่มีต่อสุขภาพ และการจะได้รับรองนอกจากต้องผ่านเกณฑ์บังคับ (Preconditions) ทุกข้อแล้ว ยังต้องผ่านเกณฑ์เลือกทำ (Optimizations) อย่างน้อยหมวดละ 2 ข้อ อีกด้วย (ยกเว้นอาคารประเภทสำนักงานให้เข้าต้องผ่านหมวดละ 1 ข้อ) IWBI ได้ให้เหตุผลของการพัฒนา WELL v2 ว่า เพื่อให้ยืดหยุ่นสามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางมากขึ้นในหลายพื้นที่ในโลก และในเวอร์ชัน 2 นี้ก็ได้มีการพัฒนาระบบการให้คะแนนใหม่ให้เหมือนกับ LEED คือ มีคะแนนรวมของทุกหมวดเป็น 100 คะแนน และมีคะแนนหมวดนวัตกรรมอีก 10 คะแนน รวมเป็น 110 คะแนน และมีการแบ่งระดับ Silver, Gold และ Platinum ที่คะแนน 50, 60 และ 80 คะแนน ตามลำดับเหมือน LEED ตลอดจนมีการให้คะแนนกับการที่มีผู้ผ่านการทดสอบความรู้เกี่ยวกับเกณฑ์ WELL ซึ่งเรียกว่า WELL AP ในโครงการเหมือนกับ LEED

ในด้านราคาก่อสร้างที่เพิ่มขึ้นนั้น WELL ได้อ้างผลการศึกษาอันหนึ่ง (Osso, 1994) ที่ได้ศึกษาเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในเวลา 30 ปีที่ใช้อาคาร กล่าวว่าค่าใช้จ่ายที่มากที่สุด 92% คือค่าจ้างบุคลากร, 6% เป็นค่าดำเนินการและบำรุงรักษาอาคาร ส่วน 2% เป็นค่าออกแบบและก่อสร้างอาคาร หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าก่อสร้างอาคารนั้นน้อยมากถ้าเปรียบเทียบกับเงินทั้งหมด ดังนั้นผู้ประกอบการควรลงทุนกับอาคารเพื่อให้พนักงานมีสุขภาพที่ดีและมีความสุขเพื่อที่จะได้อยู่กับองค์กรนาน ๆ ลดค่าใช้จ่ายในการแสวงหาคนใหม่ ลดการเสียเงินเสียเวลาเพื่อสอนงานใหม่ สามารถทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ

การพัฒนามาตรฐาน WELL มิได้จำกัดอยู่เพียงทำให้เกณฑ์สอดคล้องกับ LEED เท่านั้น แต่ได้พยายามทำให้สามารถใช้ร่วมกับเกณฑ์ประเมินอาคารเขียวอื่นๆ ได้ด้วย เช่น Living Building Challenge (อเมริกา), Three Star (จีน), Green Star (ออสเตรเลีย) และ BREEAM (สหราชอาณาจักร)

ผู้สนใจศึกษาการออกแบบตามมาตรฐาน WELL เพิ่มเติม สามารถดาวน์โหลด The WELL Building Standard ได้จาก <https://www.wellcertified.com/resources>

11.6 สรุป

การออกแบบอาคารให้ประหยัดพลังงาน เป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาที่ยั่งยืน เกณฑ์ประเมินอาคารเขียวที่เน้นในความยั่งยืนทางด้านสิ่งแวดล้อม มักจะมีเกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพพลังงานเป็นส่วนหนึ่งของเกณฑ์บังคับ โดยเป้าหมายของความยั่งยืนทั้งทางด้านสิ่งแวดล้อม สังคม และเศรษฐกิจ ในแต่ละระบบประเมิน อาจจะมีการเน้นน้ำหนักที่แตกต่างกัน

แต่สิ่งสำคัญที่ต้องการชี้ให้เห็น คือการออกแบบอาคารประหยัดพลังงาน จำเป็นต้องคำนึงถึงการแก้ปัญหาในด้านอื่น ๆ ไปพร้อมกันด้วย ตั้งแต่ขั้นเริ่มต้นโครงการ จึงจะนำไปสู่การลดผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม ลดผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ ผลต่อคุณภาพชีวิต และผลด้านเศรษฐกิจ หรืองบประมาณในการลงทุนที่สามารถประหยัดลงได้ดีกว่าการคิดแบบแยกส่วน

การดำเนินงานจำเป็นต้องอาศัยการร่วมกันคิด จากคนในทีมงาน หรือผู้เกี่ยวข้องทั้งการออกแบบ การก่อสร้าง การบริหารอาคารจากต่างวิชาชีพ มิใช่เป็นลักษณะของการทำงานที่สถาปนิกจะคิดงานออกแบบเพียงฝ่ายเดียวจนจบลงตัวแล้ว จากนั้นผู้ร่วมงานออกแบบอื่น ๆ ก็รับช่วงงานไปดำเนินการต่อ

ตัวอย่าง การออกแบบหลังคา สามารถมีทางเลือกในการออกแบบได้หลายวิธี เช่น การทำสวนบนหลังคา ซึ่งสามารถหน่วงความร้อนที่เข้าสู่อาคาร ทำให้ประหยัดพลังงานในการปรับอากาศ และยังลดปัญหาเกาะความร้อน สามารถลดน้ำฝนไหลนองออกนอกพื้นที่ สามารถใช้เป็นที่พักผ่อน เป็นที่อาศัยของ นก ผีเสื้อ ทำให้คนได้ใกล้ชิดธรรมชาติ สามารถเป็นแหล่งอาหารปลอดสารพิษให้ผู้ใช้อาคารได้ แต่จะเพิ่มน้ำหนักให้โครงสร้างมากขึ้น เพิ่มราคาค่าก่อสร้าง เพิ่มค่าใช้จ่ายในการดูแลต้นไม้ให้อยู่ในสภาพดี มีผลต่อความต้องการน้ำในฤดูแล้ง แต่ขณะเดียวกันพื้นที่หลังคาสามารถใช้เป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้าใช้ในอาคาร ทำให้ประหยัดพลังงาน และสามารถใช้ได้ในเวลาไฟฟ้าดับ เป็นความมั่นคงอย่างหนึ่ง หลังคาสามารถใช้เป็นพื้นที่รวบรวมน้ำฝนได้เป็นอย่างดี และสามารถใช้เป็นพื้นที่สำหรับติดตั้งงานวิศวกรรมระบบต่าง ๆ รวมทั้งยังอาจจำเป็นต่อการหนีไฟทางอากาศด้วย ซึ่งจะเห็นว่าทางเลือกต่าง ๆ เหล่านี้ จะต้องใช้หลายวิชาชีพช่วยกันวิเคราะห์ หาข้อมูลที่ชัดเจนมาสนับสนุนการตัดสินใจ เพื่อเลือกแนวทางที่ให้ประโยชน์สูงสุด และได้ผลลัพธ์ของงานที่ตรงกับวัตถุประสงค์ของเจ้าของโครงการ ภายใต้เงื่อนไขงบประมาณที่สามารถสร้างได้

ดังนั้น แม้ว่ารายวิชานี้จะเน้นด้านการออกแบบอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน แต่ผู้ออกแบบจะต้องตระหนักถึงความเชื่อมโยงกับประเด็นอื่น ๆ ที่สำคัญในการออกแบบ และการบูรณาการ เพื่อสร้างสรรค์งานสถาปัตยกรรมที่ดี

เอกสารอ้างอิง

กรมโยธาธิการและผังเมือง. คู่มือการออกแบบอาคารภาครัฐที่จะก่อสร้างใหม่ให้เป็นอาคารเขียวภาครัฐ.

กรุงเทพมหานคร: บริษัท คอนซัลแทนท์ ออฟ เทคโนโลยี จำกัด, 2562.

การเคหะแห่งชาติ. คู่มือเกณฑ์การประเมินชุมชนน่าอยู่สบายอย่างยั่งยืน ฉบับปรับปรุงเพื่อการออกแบบที่อยู่

อาศัยสำหรับผู้มีรายได้น้อย. กรุงเทพมหานคร: บริษัท เปเปอร์เมท (ประเทศไทย) จำกัด, 2559.

สถาบันอาคารเขียวไทย. คู่มือสำหรับเกณฑ์การประเมินความยั่งยืนทางพลังงานและสิ่งแวดล้อมไทย สำหรับ

การก่อสร้างและปรับปรุงโครงการใหม่ และอาคารประเภท พื้นที่ส่วนกลางและกรอบอาคาร. Version 1.1

สมาคมสถาปนิกสยามในพระบรมราชูปถัมภ์. สร้างสรรค์ อาคารสบาย. กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัด

อุดมศึกษา, 2547

สุนทร บุญญาธิการ. เทคนิคการออกแบบบ้านประหยัดพลังงานเพื่อคุณภาพชีวิตที่ดีกว่า. พิมพ์ครั้งที่ 1,

กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542

Division for Sustainable Development Goals, UNHQ. Report of the World Commission on

Environment and Development: Our Common Future. Available from

<https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>

International WELL Building Institute. The WELL Building Standard. V1 with Q1 addenda. 2020.

Available from <https://www.wellcertified.com/resources>.

International WELL Building Institute. WELL V2. Available from

<https://v2.wellcertified.com/v2.1/en/overview>.

Osso, Annette. Sustainable Building Technical Manual. Available from

[https://pdhonline.com/courses/g240/Buuilding_%20Systems_%20and_IAQ-](https://pdhonline.com/courses/g240/Buuilding_%20Systems_%20and_IAQ-SustainableDesignManual.pdf)

SustainableDesignManual.pdf, อ้างใน WELL Building Standard available from

<https://www.wellcertified.com/node/2530> accessed October 13, 2018.

The WELL Certification Guidebook. V1 Q1 2020. Available from

<https://www.wellcertified.com/resources>.

U.S. Green Building Council. LEED v 4.1 Building Design and Construction. Getting started

Guide for Beta Participants, April 2019.

U.S. Green Building Council. LEED v4.1 Building Design and Construction - Getting Started

Guide for Beta Participants. April 2019.

U.S. Green Building Council. Reference Guide for Building Design and Construction v4.

Washington, D.C. 2013.

UN Thailand. The Global Goals for Sustainable Development. Available from

<https://www.un.or.th/globalgoals/th/the-goals/>

แบบฝึกหัด

- 1) ให้นักศึกษานำตัวอย่างแบบอาคารที่เคยออกแบบ หรือแบบอาคารมีอยู่แล้ว มาวิเคราะห์ว่าสามารถผ่านเกณฑ์อาคารเขียวมาตรฐาน LEED ในข้อใดได้บ้าง และสาเหตุที่ไม่สามารถผ่านได้เพราะเหตุใด จะต้องปรับการออกแบบจากเดิมอย่างไร
- 2) ในอาคารเดียวกันถ้าใช้เกณฑ์ของ TRESS จะผ่านเกณฑ์ข้อใดบ้าง และข้อที่ไม่ผ่านจะสามารถปรับการออกแบบอย่างไร อุปสรรคในการประเมินคืออะไร
- 3) ในอาคารเดียวกันถ้าใช้เกณฑ์ของ WELL จะสามารถผ่านเกณฑ์ข้อใดได้บ้าง และจะต้องปรับการออกแบบอย่างไร อุปสรรคในการประเมินคืออะไร

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

บรรณานุกรม

- กฎกระทรวง กำหนดประเภท หรือขนาดของอาคาร และมาตรฐาน หลักเกณฑ์ และวิธีการในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552. ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 126 ตอนที่ 12 ก.20 กุมภาพันธ์ 2552.
- กฎกระทรวง ฉบับที่ 39 (พ.ศ. 2537) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522.
- กฎกระทรวง ฉบับที่ 48 (พ.ศ. 2540) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน. ความร้อนเบื้องต้น - ตำราฝึกอบรมผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (ผพพ) ด้านความร้อน หลักสูตร "ผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน อาวุโส ภาคทฤษฎี (ความร้อน)" เข้าถึงได้จาก http://www2.dede.go.th/bhrd/old/file_handbook.html
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. เอกสารประกอบการฝึกอบรมเพื่อพัฒนาความต่อเนื่องทางวิชาชีพของผู้ตรวจสอบและรับรองการจัดการพลังงาน. เข้าถึงได้จาก <http://webkc.dede.go.th/testmax/kb01-list>
- กรมโยธาธิการและผังเมือง. คู่มือการออกแบบอาคารภาครัฐที่จะก่อสร้างใหม่ให้เป็นอาคารเขียวภาครัฐ. กรุงเทพมหานคร: บริษัท คอนซัลแทนท์ ออฟ เทคโนโลยี จำกัด, 2562.
- กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน. ประกาศเรื่อง มาตรฐานความเข้มของแสงสว่าง ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 135 ตอนพิเศษ 39 ง 21 กุมภาพันธ์ 2561.
- กรมอุตุนิยมวิทยา. เอกสารวิชาการ ผังลมของประเทศไทยในคาบ 20 ปี (พ.ศ. 2524 - 2543) เล่ม 3 ภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. เข้าถึงได้จาก http://www.arcims.tmd.go.th/Research_files/WindRoseVol3..pdf
- กระทรวงพลังงาน. คู่มือแบบประเมินอาคารประหยัดพลังงานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อาคารที่ไม่ใช่อาคารพักอาศัย (อาคารสาธารณะ) (NR-O 49.02) (NR-S 49.02) (NR-H 49.02). กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2553.
- กระทรวงพลังงาน. คู่มือแบบประเมินอาคารประหยัดพลังงานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม. อาคารพักอาศัย (R-49.02). กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2553.
- กระทรวงพลังงาน. ประกาศกระทรวงพลังงาน เรื่อง การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะขั้นต่ำ ค่าประสิทธิภาพการให้ความเย็นและค่าพลังงานไฟฟ้าต่อตันความเย็นของระบบปรับอากาศที่ติดตั้งใช้งานในของอาคาร พ.ศ. 2552.
- กระทรวงพลังงาน. ประกาศกระทรวงพลังงาน เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการคำนวณในการออกแบบอาคารแต่ละระบบ การใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร และการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่าง ๆ ของอาคาร พ.ศ. 2552.
- กระทรวงพลังงาน. หลักเกณฑ์เฉพาะผลิตภัณฑ์หลังคากระเบื้อง. เข้าถึงได้จาก https://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=43304
- กองกำกับและอนุรักษ์พลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. เอกสารประกอบการบรรยาย หลักสูตร ผู้ตรวจประเมินค่าอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2562.
- กองภูมิอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา. ผังลมของประเทศไทยในคาบ 10 ปี (พ.ศ. 2524 - 2533), มปท.
- การเคหะแห่งชาติ. คู่มือเกณฑ์การประเมินชุมชนน่าอยู่สบายอย่างยิ่งย่น ฉบับปรับปรุงเพื่อการออกแบบที่อยู่อาศัยสำหรับผู้มีรายได้น้อย. กรุงเทพมหานคร: บริษัท เปเปอร์เมท (ประเทศไทย) จำกัด, 2559.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิต. ข้อกำหนดโครงการประหยัดไฟเบอร์ 5 หลอดไฟ LED. เข้าถึงได้จาก <http://labelno5.egat.co.th/new58/wp-content/uploads/update/product/led.pdf>
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. รู้จักระบบปรับอากาศ Chilled Beam กฟผ. สำนักงานใหญ่แห่งใหม่ ประหยัดพลังงานได้กว่า 30 %. Available from https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=2557:art20180528-01&catid=49&Itemid=251
- เกชา ธีระโกเมน. เทคโนโลยีอาคาร. กรุงเทพมหานคร : สถาบันอีอีซี. 2558.
- ฉกาจ ดำรงค์เกียรติ. ประสิทธิภาพในการลดความร้อนที่เข้าสู่อาคารโดยใช้ระบบท้อภาคผิวดิน กรณีศึกษาหอสมุดสยามบรมราชกุมารี วัดจันเสน จังหวัดนครสวรรค์. วิทยานิพนธ์ระดับมหาบัณฑิต สาขาสถาปัตยกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร. พ.ศ. 2552.

ณัฐพงษ์ ประพฤติ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. พลังงานลมและกังหันลมเบื้องต้น. เข้าถึงได้จาก <http://www.mut.ac.th/research-detail-82>

เทอร์โมคัปเปิล. เข้าถึงได้จาก <https://cutt.ly/eybEI3m>

ประกาศราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 126 ตอนที่ 12 ก. 20 กุมภาพันธ์ 2552. กฎกระทรวง กำหนดประเภท หรือ ขนาดของ อาคาร และมาตรฐาน หลักเกณฑ์ และวิธีการ ในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552.

ประกาศราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 126 ตอนที่ 23 ก. 8 กันยายน 2552. กฎกระทรวงกำหนดกระຈจเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552.

(ร่าง) ประกาศกระทรวงพลังงาน เรื่อง กำหนดค่ามาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน.

พันธุตา พุฒิไพโรจน์. การออกแบบอาคารประหยัดพลังงานไม่ยากอย่างที่คิด. กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัดปัสการ พิมพ์และบรรจุกัณฑ์, 2558.

พันธุตา พุฒิไพโรจน์. ออกแบบอย่างไรให้เพิ่มประสิทธิภาพพลังงานในอาคาร. กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัดปัสการ พิมพ์และบรรจุกัณฑ์, 2558.

รุ่งโรจน์ วงศ์มหาศิริ. การออกแบบการบังแดดให้กับอาคารในประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: มิน เซอร์วิส ซัพพลาย, 2562.

วัสดุประหยัดพลังงานเบอร์ 5. เข้าถึงได้จาก https://www.dede.go.th/ewt_dl_link.php?nid=43512

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. มาตรฐานการระบายอากาศเพื่อคุณภาพอากาศภายในอาคารที่ยอมรับได้. (มาตรฐาน วสท. 031010-60), กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ. 2560.

ศูนย์ประสานงานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวง พลังงาน. เอกสารประชุมทบทวน แก้ไขปรับปรุงร่าง ประกาศกระทรวงพลังงาน ภายใต้ร่างกฎกระทรวง กำหนด ประเภท หรือขนาดของอาคารและมาตรฐาน หลักเกณฑ์และวิธีการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ..... , พฤษภาคม 2563.

สถาบันอาคารเขียวไทย. คู่มือสำหรับเกณฑ์การประเมินความยั่งยืนทางพลังงานและสิ่งแวดล้อมไทย สำหรับการก่อสร้างและ ปรับปรุงโครงการใหม่ และอาคารประเภทพื้นที่ส่วนกลางและกรอบอาคาร. พ.ศ. 2559.

สถาบันอาคารเขียวไทย. คู่มือสำหรับเกณฑ์การประเมินความยั่งยืนทางพลังงานและสิ่งแวดล้อมไทย สำหรับการก่อสร้างและ ปรับปรุงโครงการใหม่ และอาคารประเภท พื้นที่ส่วนกลางและกรอบอาคาร. Version 1.1.

สมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย. คู่มือการเลือกหลอด LED เวอร์ชัน 1.0.

สมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย. คู่มือแนวทางการออกแบบการส่องสว่างภายในอาคาร. กรุงเทพฯ: 2559. เข้าถึงได้จาก <http://www.tieathai.org>.

สมาคมสถาปนิกสยามในพระบรมราชูปถัมภ์. สร้างสรรค์ อาคารสบาย. กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัดอุดมศึกษา, 2547.

สุนทร บุญญาธิการ. ศ. 2542 เทคนิคการออกแบบบ้านประหยัดพลังงานเพื่อคุณภาพชีวิตที่ดีกว่า. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุนทร บุญญาธิการ. พลังงานใกล้ตัว. พ.ศ. 2545.

สุริชัย ภัทรกิจนรินทร์ และ รวี งามโชคชัยเจริญ. มารู้จักกับ Psychrometric Chart กันเถอะ! บทความวิชาการชุดที่ 8 ของ สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศ, หน้า 42-94. เข้าถึงได้จาก <http://www.acat.co.th>

อรรถนั ศรีษฐบุตร. นิเวศวิทยสถาปัตยกรรม. กรุงเทพมหานคร: บริษัทอัมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด (มหาชน), 2557.

อรรถนั ศรีษฐบุตร. อาคารเขียว. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์มติชนปากเกร็ด, 2561.

เอกสารข้อมูลผลิตภัณฑ์ Koolteg Insulation. เข้าถึงได้จาก <http://www.koolteg.com>

เอกสารข้อมูลผลิตภัณฑ์ คอนกรีตมวลเบา Q-CON. เข้าถึงได้จาก <https://qcon.co.th/>

เอกสารข้อมูลผลิตภัณฑ์ ฉนวนกันความร้อนเอสซีจี รุ่น Stay Cool. เข้าถึงได้จาก <https://www.scgbuildingmaterials.com/th/product/staycool>

A Publication of the Tilt-Up Concrete Association. Available from <https://tilt-up.org/tilt-up-today/2017/08/08/composite-concrete-panels-the-future-for-tilt-up-walls/>

Air Humidity and Indoor Air Quality. Available from <https://www.epfl.ch/labs/hobel/air-humidity-and-indoor-air-quality/>

- Architecture & Building Design. Available from <https://www.esplanade.com/about-us/architecture-and-building-design>
- Arens, E., Hoyt, T., Zhou, X., Huang, L., Zhang, H., & Schivalon, S. (2015) Modeling the Comfort Effects of Short-wave Solar Radiation Indoors. *Building and Environment*, 88-3-9. Available from <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.004>.
- ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55-2017. Atlanta. 2017.
- ASHRAE. ASHRAE Handbook Fundamentals. SI Edition. Atlanta, GA. 2017.
- ASHRAE. ASHRAE GreenGuide: The Design, Construction, and Operation of Sustainable Buildings. Third Edition, Atlanta, GA: 2010.
- ASHRAE. ASHRAE Standard 90.1-2016 - Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. Atlanta: GA., 2016.
- ASHRAE. ASHRAE Thermal Comfort Tool. CD-ROM. Version 2.
- ASHRAE. Proposed Addendum b to Standard 169, Climate Data for Building Design Standard. First Public Review (July 2012). Available from <https://docplayer.net/41029164-Proposed-addendum-b-to-standard-169-climatic-data-for-building-design-standards.html>
- ASHRAE. Standard 90.1-2016 User's Manual - ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2016 Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. Atlanta: GA., 2016.
- Athalye, Rahul A., Todd Taylor and Bing Liu. Impact of ASHRAE Standard 169-2013 on Building Energy Codes and Energy Efficiency. Available from <https://cutt.ly/6yv8LaO>
- Bangkok, Thailand - Solar Energy and Surface Meteorology. Available from <https://www.gaisma.com/en/location/bangkok.html>
- Bird collision deterrence. Available from <https://www.usgbc.org/credits/core-shell-existing-buildings-healthcare-new-construction-retail-nc-schools/v2009/pc55>
- BREEAM UK New Construction, Technical Manual SD5078 BREEAM UK New Construction 2018 2.0. Available from www.breeam.com
- Campbell Scientific. What is the difference between a thermopile pyranometer and a silicon photovoltaic pyranometer? Available from <https://www.campbellsci.com/faqs?v=2322>
- Can We Replace Foam Insulation?. Available from <https://www.buildinggreen.com/feature/can-we-replace-foam-insulation>
- CBE Thermal Comfort Tool. Center for the Built Environment. University of California Berkeley. Available from <http://comfort.cbe.berkeley.edu/>
- Chayapon Keeratikasikorn and Stefania Bonafoni. Urban Heat Island Analysis over the Land Use Zoning Plan of Bangkok by Means of Landsat 8 Imagery. Available from <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/3/440>
- Climate Consultant Download Page. Available from <http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/climate-consultant/request-climate-consultant.php>
- Climate Consultant V6.10. (Video). Available from <https://www.youtube.com/watch?v=bc0dIPP0SBg>
- Cooling Degree Days and Heating Degree Days. Available from <http://www.energy-a.eu/cooling-degree-days-and-heating-degree-days/?cn-reloaded=1>
- COVID-19 – The Basics. https://www.americanultraviolet.com/germicidal-healthcare-solutions_on_Solar_Thermal_energy
- Cowan Henry J. and Smith Peter R. **Environmental Systems**. New York : Van Nostrand Reinhold, 1983.

Division for Sustainable Development Goals, UNHQ. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. Available from <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>

Drury B. Crawley. Climatic Data for Energy Efficiency and Building Performance. 27 April 2016. Available from <https://cutt.ly/Ayv1v1G>

Dynamic Air Corporation. Wrap Around Heat Pipe | How does a Wrap Around Heat Pipe work? Available from <http://www.dac-hvac.com/wrap-around-heat-pipe-how-does-a-wrap-around-heat-pipe-work-2/>

Eco Healthy Child Care. FAQs: Styrofoam. Available from <https://cehn.org/our-work/eco-healthy-child-care/ehcc-faqs/faqs-styrofoamtm/>

Effects of Solar UV and Climate Change on Materials. Available from <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2011/pp/c0pp90038a#!divAbstract>

Effects of UV radiation. Available from <http://kipzonen-brewer.com/uv/effect-uv-radiation/>

Ehrlich, Brent. Building Green. Active Chilled Beams: Saving Energy and Space. Available from <https://www.buildinggreen.com/product-review/active-chilled-beams-saving-energy-and-space>

Electrical Contractor. Bilevel Switching. Available from <https://www.ecmag.com/section/lighting/bilevel-switching>

Energy Star Program Requirements for Residential Windows, Doors, and Skylight. Available from https://www.energystar.gov/products/building_products/residential_windows_doors_and_skylights

Glamox Luxo. 10 Things you should know about LED.

Glamox. An Essential Guide to Human Centric Lighting. Available from <http://www.glamox.com>
<https://www.e-education.psu.edu/eme812/node/644>

Inside the Apparel Innovation Centre. Available from <https://www.avenuecalgary.com/shopping-style/inside-the-apparel-innovation-centre/>

Instructions on Using Climate Consultant. Available from https://courseworks2.columbia.edu/files/616106/download?download_frd=1

Interactive Psychrometric chart. Available from <http://andrewmarsh.com/software/psychro-chart-web/>

International WELL Building Institute (IWBI). The WELL Building Standard v1 with January 2017 addenda. Available from <http://www.wellcertified.com>.

International WELL Building Institute. The WELL Building Standard v1 - Q1 2020. Available from <https://resources.wellcertified.com/tools/well-building-standard-v1/>

International WELL Building Institute. The WELL Building Standard. V1 with Q1 addenda. 2020. Available from <https://www.wellcertified.com/resources>. International WELL Building Institute.

International WELL Building Institute. WELL V2. Available from <https://v2.wellcertified.com/v2.1/en/overview>.

Japan Gas Association. Development of Triple Effect Absorption -Chiller Heater. Available from <https://cutt.ly/7yXPIZG>.

Kesik, Ted J. Managing Enclosure Heat Flows. Whole Building Design Guide. Available from <https://www.wbdg.org/resources/managing-enclosure-heat-flows>

Lechner, Norbert. **Heating, Cooling, Lighting Sustainable Design Methods for Architects**. 4th Edition, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2014.

Liu, S. et al. (2016) Predicted Percentage Dissatisfied with Ankle Draft. Available from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ina.12364>

Luis E. Lopez Ponce de Leon, Michela Turrin and Eric van den Ham. Shading Design Workflow for Architectural Designers. TU Delft.

- M M Goyal. Handbook of Building Construction - The Essential Source of Standard Construction Practices. Faridabad: Saurabh Goyal Amridrea Consultancy Pvt., 2004.
- Mazzarella, Livio and Jaap Hogeling. CEN Standard EN 16798-3:2017 on Ventilation for Non-Residential Buildings: Performance Requirements. REHVA Journal – April 2018
- McMullan, Randall. Environmental Science in Building. Sixth edition, New York: Palgrave, 2007.
- Measuring Performance. Air Leakage. Available from <https://www.efficientwindows.org/al.php>
- Mingxue Chen. Wenqing Li, Shuang Tao, Zhenggang Fang, Chunhua Lu and Zhongzi Xu. A Pragmatic and High-Performance Radiative Cooling Coating with Near-Ideal Selective Emissive Spectrum for Passive Cooling. Coatings 2020, 10, 144. Available from <http://www.mdpi.com/journal/coatings>.
- Module 10: Absorption refrigeration. CIBSE Journal. Available from <https://www.cibsejournal.com/cpd/modules/2009-11/>
- New Glass Technology. Available from <https://www.newglasstech.com/?page=product&cat=Decoratief&product=digital-printing-pvb&lang=en>
- Olgyay, Victor. (1963). Design with Climate - Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism. Princeton, New Jersey: Princeton University Press. Available from Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism - PDF Free Download
- Online Psychrometric chart. Available from <http://www.flycarpet.net/en/PsyOnline>.
- Osso, Annette. Sustainable Building Technical Manual. Available from https://pdhonline.com/courses/g240/Builinging_Systems_and_IAQ-SustainableDesignManual.pdf, WELL Building Standard. Available from <https://www.wellcertified.com/node/2530> accessed October 13, 2018.
- Overbey, Daniel. Lighting Impact on Circadian Rhythm. Building Enclosure. Available from <https://www.buildingenclosureonline.com/blogs/14-the-be-blog/post/86105-lighting-impacts-on-circadian-rhythms>
- Passe, Ulrike, and Francine Battagila. Design Spaces for Natural Ventilation - An Architect's Guide. New York: Routledge. 2015.
- PennState University, Department of Energy and Mineral Engineering. Available Solar Radiation and How It Is Measured. Available from
- Performance evaluation and COP calculation of Triple effect vapour Absorption machine working on Solar Thermal energy. Available from https://www.researchgate.net/publication/322753897_Performance_evaluation_and_COP_calculation_of_Triple_effect_vapour_Absorption_machine_working
- Pitts, Adrian. Thermal Comfort in Transition Spaces. Buildings, 3(1), 122-142. 2013. Available from <https://www.mdpi.com/2075-5309/3/1/122/htm>
- Polyisocyanurate. Available from <https://en.wikipedia.org/wiki/Polyisocyanurate>
- Protect Birds with Clear Results. Available from <https://www.guardianglass.com/us/en/products/brands/guardian-bird1st>
- RTD vs Thermocouple. Available from https://www.youtube.com/watch?v=3atbFRXTN_I
- Santamouris, Mat and Wouters, Peter. Building Ventilation - The State of the Art. London: Earthscan, 2006.
- Solar Radiation & Photosynthetically Active Radiation. Available from <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/weather/photosynthetically-active-radiation/>
- Sun Path Chart Program. Available from <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.php>

Szokolay S.V. Introduction to Architectural Science – The Basis of Sustainable Design. Amsterdam : Elsevier, 2010.

Szokolay, S.V. Solar Geometry - Passive and Low Energy Architecture International Design Tools and Techniques. 2007.

Szokolay, S.V. Thermal Design of Buildings. Canberra: RAI Education Division, 1987.

The Chartered Institution of Building Services Engineers London. Natural Ventilation in Non-Domestic Buildings - CIBSE Applications Manual AM10. Norwich, Norfolk: Page Bros. (Norwich) Ltd., 2005.

The Fenestration Association of BC (FEN-BC). Reference Procedure for Simulating Spandrel U-Factors. Available from <https://www.fen-bc.org/content/view/resources-spandrel>

The WELL Building Standards. v1. Available from <https://resources.wellcertified.com/tools/well-building-standard-v1-q1-2019/>

The WELL Building Standards. v2. Available from <http://v2.wellcertified.com/v/en/thermal%20comfort>

The WELL Certification Guidebook. V1 Q1 2020. Available from <https://www.wellcertified.com/resources>.

Thermal Admittance of Building Materials. Available from https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Thermal_admittance_of_building_materials

Thermal Admittance. Available from <http://performativedesign.com/definitions/heat/thermal-admittance/>

Thermocouple Colour Code. Available from <https://instrumentationforum.com/t/thermocouple-colour-codes/5784>

Thermocouple vs RTD vs Thermistor - Learn the differences. Available from <https://www.youtube.com/watch?v=YugXyuTfXtk>

Types of Thermocouples. Available from <https://www.omega.com/en-us/resources/thermocouple-types>

U.S. Green Building Council. LEED Reference Guide for Building Design and Construction V4. Washington : 2013.

U.S. Green Building Council. LEED Reference Guide for Green Building Design and Construction. Edition 2009. Washington D.C., 2009.

U.S. Green Building Council. LEED v 4.1 Building Design and Construction. Getting started Guide for Beta Participants, April 2019.

U.S. Green Building Council. LEED v4.1 Building Design and Construction - Getting Started Guide for Beta Participants. April 2019.

U.S. Green Building Council. Reference Guide for Building Design and Construction v4. Washington, D.C. 2013.

UN Thailand. The Global Goals for Sustainable Development. Available from <https://www.un.or.th/globalgoals/th/the-goals/>

USGBC. LEED Reference Guide for Building Design and Construction v.4.1.

Walker, Anfy. Natural Ventilation. Available from <http://www.wbdg.org/resources/natural-ventilation>

Weather Data Web Application. Available from <http://andrewmarsh.com/software/>

What is Polyurethane Foam – Definition. Available from <https://www.thermal-engineering.org/what-is-polyurethane-foam-definition/>

XiaoZhi Lim. The super-cool materials that send heat to space. Available from <https://www.nature.com/articles/d41586-019-03911-8>

ดัชนีคำค้น

- Absolute Humidity, 59
 Absorptance, 9
 Absorption Chiller, 222
 Active Chilled Beam, 237
 Adaptive Method, 100
 Air Speed, 79
 Altitude, 119
 Analemma, 124
 Analytical Comfort Zone Method, 94
 Anemometer, 46
 Angle Factor, 80
 Annual Sunlight Exposure, 256
 ASE, 256
 ASHRAE 55, 283
 ASHRAE 62.1, 283
 ASHRAE 90.1, 278
 ASHRAE Standard, 89
 ASHRAE Thermal Comfort Tool, 81
 Azimuth, 119
 Bernoulli Effect, 139
 Bioclimatic Chart, 87
 British thermal unit, 1
 Brundtland Report, 269
 Btu, 1
 BUG Rating, 274
 Building Envelope, 161
 calorie, 1
 Capillary Tube, 217
 Cartesian Sun Path Diagram, 124
 CBE Thermal Comfort Tool, 81
 Celcius, 2
 Chilled Beam, 237
 Circadian Rhythm, 264
 Climate Consultant, 22
 clo, 82
 Coefficient of Performance, 153, 224
 Color Consistency, 253
 Color Rendering Index, 254
 Compressor, 217
 Computatioanl Fluid Dynamic (CFD), 138
 Condenser, 217
 Conduction, 6
 Conductivity, 6
 Convection, 7
 Cool Roof, 206
 Cooling Degree Days, 38
 COP, 224
 CRI, 254
 Cross Ventilation, 142
 Data Logger, 49
 Daylight Factor, 256
 DCV, 231
 Decrement Factor, 196
 Dedicated Outdoor Air System, 231
 Degree Days, 38
 Degree Hours, 39
 Demand Controlled Ventilation, 231
 Density Specific Heat Product, 176
 Dew Point Temperature, 62
 DGNB, 270
 Direct Lighting, 247
 Displacement Ventilation, 235
 DOAS, 231
 Dry Bulb Temperature, 61
 Dynamic Glazing, 202
 Earth Coupling, 117
 Eddy, 137
 EER, 224
 Effective Shading Coefficient, 155
 EIFS, 204
 Electric Chiller, 220
 Elevated Air Speed Comfort Zone Method, 96
 Emissivity, 173
 Emittance, 9
 Energy Efficiency Ratio, 224
 Energy Efficiency Ratio, 153
 Enthalpy, 63
 Equidistant Sun Path, 120
 Equinox, 129
 Equivaent Melanopic Lux, 264
 Evaporation, 12
 Evaporator, 217
 Expansion Value, 217
 Extensive Green Roof, 208

Exterior Insulation Finish System, 204
 Fahrenheit, 2
 G-GOODs, 271
 Global Warming Potential, 239
 Globe Thermometer, 52, 107
 Graphic Comfort Zone Method, 91
 Green Roof, 208
 Greenhouse, 11
 GWP, 239
 Heat, 1
 Heat Capacity, 3
 Heat Flow, 2
 Heat Flow Rate, 2
 Heat Flux, 2
 Heat Flux Density, 2
 Heat Pipe, 233
 Heat Sink, 12
 Heat Source, 12
 Heat Transfer, 6
 Heating Degree Days, 38
 Horizontal Shadow Angle, 125
 Hygrometer, 45
 Illuminance Meter, 53
 Indirect Lighting, 247
 Infiltration, 205
 Infrared Thermometer, 48
 Integrative Process, 273
 Intensive Green Roof, 208
 Irradiance, 14
 Irradiation, 14
 Kelvin, 2
 k-value, 6
 Lamp Efficacy, 245
 Latent Heat, 5
 LED, 245
 LEED, 270
 Light Emitting Diode, 245
 Light Output Ratio, 248
 Light Pipe, 264
 Light Shelf, 259
 Light to Solar Gain Ratio, 198
 Light Tube, 264
 Lighting Power Density, 244
 Local Thermal Discomfort, 99

LPD, 244
 Lux Meter, 53
 Macro Climate, 19
 Mean Radiant Temperature, 79
 Melanopic Lux, 287
 MERV, 232
 met, 85
 Metabolic Rate, 85
 Micro Climate, 19
 Minimum Efficiency Rating Value, 232
 Natural Ventilation, 116
 Occupancy Sensor, 251
 ODP, 239
 Operative Temperature, 97
 OTTV, 165
 Overall Thermal Transfer Value, 165
 Ozone Depletion Potential, 239
 Package Air Cooled, 220
 Package Water Cooled, 220
 Passive Chilled Beam, 237
 Passive Cooling, 113
 Passive Infrared Radiation, 251
 Periodic Heat Flow, 16
 Power, 2
 Power Factor, 253
 Psychrometric Chart, 57
 Pyranometer, 51
 Radiant Floor, 236
 Radiation, 8
 Rankine, 2
 Reflectance, 9
 Relative Humidity, 59
 Resistance, 6
 Resistivity, 6
 Roof Thermal Transfer Value, 165
 RTTV, 165
 R-value, 6
 SC, 168
 sDA, 256
 Seasonal Energy Efficiency Ratio, 225
 SEER, 225
 Sensible Heat, 5
 Shading, 115
 Shading Coefficient, 181

Shading Mask, 127
SHGC, 168
Short Wave Infrared, 13
Sol Air Temperature, 16
Solar Chimney, 141
Solar Constant, 14
Solar Heat Gain Coefficient, 198
Solar Reflectance, 10
Solar Reflectance Index, 207
Spatial Daylight Autonomy, 256
Specific Heat Capacity, 3
Specific Volume, 65
Spherical Sun Path, 120
SRI, 207
Stack Effect, 140
Steady State Heat Flow, 15
Stereographic Sun Path, 120
Summer Solstice, 129
Sun Path Diagram, 34
Sunshine Duration, 21
Sustainable Development, 269
Sustainable Development Goals, 269
Task Lighting, 252
Temperature, 2
Temperature Difference Equivalent, 16
Thermal Comfort, 77
Thermocouple, 50
Thermometer, 45
Transition Zone, 119
Transmittance, 9
TREES, 270
UFAD, 236
Ultrasonic, 251
Underfloor Air Distribution System, 236
UV Germicidal Irradiation, 234
UVGI, 234
Vapour Pressure, 64
Variable Refrigerant Flow, 219
Vertical Shadow Angle, 125
Visible Light Transmittance, 198
Volumetric Specific Heat, 4
WELL, 270
WELL v2, 292
Wet Bulb Temperature, 61

Wind Rose Diagram, 20
Window to Floor Area, 256
Winter Solstice, 129
การนำความร้อน, 6
การแผ่รังสีความร้อน, 8
การพาความร้อน, 7
การลดการรั่วซึมของอากาศ, 205
การวิเคราะห์สภาพภูมิอากาศ, 19
ความจุความร้อนจำเพาะ, 3
ความจุความร้อนจำเพาะเชิงปริมาตร, 4
ความชื้นสัมบูรณ์, 59
ความชื้นสัมพัทธ์, 59
ความร้อน, 1
ความร้อนแฝง, 5
ความร้อนสัมผัส, 5
ค่าสัมประสิทธิ์ในการแผ่รังสี, 173
ปริมาตรจำเพาะ, 65
แผนภูมิไซโครเมตริก, 57
ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง, 243
แรงดันไอน้ำ, 64
สภาวะสบาย, 77
อุณหภูมิกระเปาะเปียก, 61
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง, 61
อุณหภูมิจุดน้ำค้าง, 62
อุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย, 79
เอนทัลปี, 63



มหาวิทยาลัยศิลปากร งามเลิศ

ประวัติผู้เขียน

รองศาสตราจารย์ ดร.พันธุ์ดา พุฒิไพบรณ



สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (เกียรตินิยม) ทางด้านสถาปัตยกรรม จากคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ระดับปริญญาโททางด้านเคหกรรม จากคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และระดับปริญญาเอก ทางด้านสถาปัตยกรรม จาก University of Michigan ประเทศสหรัฐอเมริกา

ปัจจุบันทำงานเป็นอาจารย์ สอนด้านการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร ของคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับคัดเลือกเป็นบุคลากรดีเด่นของมหาวิทยาลัยศิลปากร รางวัลนักวิชาการดีเด่น จากสมาคมบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ และประกาศเกียรติคุณผู้ทำชื่อเสียงให้มหาวิทยาลัยศิลปากร

ได้รับการรับรองเป็นผู้เชี่ยวชาญด้านอาคารเขียว LEED AP ประเภท BD+C, O+M, ID+C, Homes, ND, WELL AP ของประเทศสหรัฐอเมริกา และ DGNB Consultant ของประเทศเยอรมนี และมีประสบการณ์ในการพัฒนาคู่มือการออกแบบอาคารเขียวภาครัฐ หรือ มาตรฐาน G-GOODs ของกรมโยธาธิการและผังเมือง งานพัฒนาเกณฑ์การประเมินอาคารด้านการประหยัดพลังงาน ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เกณฑ์การประเมินบ้านจัดสรรประหยัดพลังงาน ของกระทรวงพลังงาน

ทางด้านวิชาชีพ เป็นวุฒิสถาปนิก และสถาปนิกอาเซียน มีประสบการณ์ในการออกแบบโครงการขนาดใหญ่ที่สร้างด้วยระบบคอนกรีตสำเร็จรูป ทั้งในประเทศและต่างประเทศ งานออกแบบอาคารสาธารณะหลายประเภท รวมทั้งงานด้านการวางผังโครงการ ผังชุมชนขนาดใหญ่ และงานออกแบบ Smart City อาคารที่ใช้พลังงานเป็นศูนย์

ในด้านงานบริการวิชาการ ได้ทำงานเป็นวิทยากรบรรยายด้านกฎหมายอนุรักษ์พลังงาน การออกแบบอาคารให้สอดคล้องกับกฎหมายอนุรักษ์พลังงานให้กระทรวงพลังงาน เป็นกรรมการตัดสินการประกวด Thailand Energy Award และวิทยากรบรรยายด้านอาคารเขียว LEED และ WELL ให้องค์กรเอกชนหลายแห่ง และปัจจุบันดำรงตำแหน่ง Vice-President ของ ASHRAE Thailand Chapter



มหาวิทยาลัยศิลปากร งามเลิศ

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

