วิวัฒนาสถาปัตย์: เครื่องมือยุคใหม่ในกระบวนการออกแบบเชิงอนุรักษ์พลังงาน

Archevolution: Recent Tools in Energy Conservation Design Process

อวิรุทธ์ ศรีสุธาพรรณ

Awiroot Srisutapan

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Faculty of Architecture, Thammasat University

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะและคุณสมบัติของ “เครื่องมือยุคใหม่” ที่ได้เข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากต่อกระบวนการทำงานทางสถาปัตยกรรมในปัจจุบันโดยอาศัยกระบวนการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล พร้อมทั้งเสนอแนะแนวทางการประยุกต์ใช้งานเครื่องมือเหล่านี้เพื่อลดข้อจำกัดในการทำงานของสถาปนิก และเพื่อให้สอดคล้องกับบริบทของสังคมไทยที่เปลี่ยนแปลงไปโดยเฉพาะในด้านการเลือกใช้วัสดุ เทคโนโลยีการก่อสร้าง การอนุรักษ์พลังงาน การแสวงหาแหล่งพลังงานทดแทน การคำนึงถึงสภาพแวดล้อม และความต้องการคุณภาพชีวิตที่ดีในการอยู่อาศัย เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้อาคารเป็นสำคัญ บทความนี้มุ่งหวังว่าอาจเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยในการเปิดวิสัยทัศน์และในการเสนอแนวทางการออกแบบเชิงบูรณาการให้กับวิชาชีพสถาปัตยกรรม และผู้ที่เกี่ยวข้องทั้งในส่วนของการศึกษาและการปฏิบัติวิชาชีพสถาปัตยกรรมให้ตระหนักถึงความสำคัญของสถาปัตยกรรมที่มี “คุณค่า” มากกว่า “สุนทรียภาพ”

Abstract

Through collective and analytical methods, this study mainly points out the types and properties of “Recent Tools” and how they operate in architectural design process. This paper also proposes suggestions and implementation methods considering the change of Thai contexts, especially in the areas of material selection, construction technology, energy conservation, renewable energy resources, environmental impact, occupants’ needs and quality of life. Moreover, the study provides further visions and integrated design guidelines to the architectural profession, including both educational and practical organizations. In addition, it is expected that future architecture would be evaluated by its “value” rather than “aesthetic” criteria.

คำสำคัญ (Keywords)

เครื่องมือ (Tool)

กระบวนการออกแบบ (Design Process)

สถาปัตยกรรม (Architecture)

การอนุรักษ์พลังงาน (Energy Conservation)

สิ่งแวดล้อม (Environment)

คุณภาพชีวิต (Quality of Life)

1. บทนำ

การออกแบบทางสถาปัตยกรรม นอกจากจะต้องอาศัยแนวความคิดและกระบวนการสร้างสรรค์ที่เกิดขึ้นจากตัวสถาปนิกเองแล้ว ยังจำเป็นที่จะต้องอาศัยปัจจัยร่วมอื่น ๆ อีกหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นระบบการทำงานร่วมกันระหว่างสถาปนิก และผู้ที่เกี่ยวข้อง เช่น วิศวกร ผู้ดูแลกฎหมาย ผู้รับเหมา-ก่อสร้าง ผู้ผลิตวัสดุ ฯลฯ และที่สำคัญคงจะเป็นเรื่องของการใช้ "เครื่องมือ" ในการทำงานของสถาปนิก เครื่องมือเหล่านี้ นอกจากจะช่วยลดระยะเวลาและข้อจำกัดในการทำงานแล้ว ยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

เครื่องมือสำหรับการทำงานทางด้านสถาปัตยกรรมที่สถาปนิกส่วนใหญ่คุ้นเคยกันอยู่ทั่วไปอาจจะเป็นเพียงปากกา ดินสอ สี วงเวียน ไม้ฉาก โต๊ะเขียนแบบ เรื่อยไปจนถึงการใช้คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือในการออกแบบและเขียนแบบ ซึ่งความเข้าใจถึงสิ่งเหล่านี้ก็คงไม่ผิดนัก แต่ที่กล่าวมาเป็นเพียงส่วนหนึ่งของเครื่องมือทั้งหมดที่มีการใช้งานในด้านสถาปัตยกรรมเท่านั้น การเปลี่ยนแปลงทางสภาพเศรษฐกิจ สังคม สภาพแวดล้อม ฯลฯ ที่เกิดขึ้นก็ได้ส่งผลให้เครื่องมือแบบเดิม ๆ ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันอาจจะไม่มีความเหมาะสมสำหรับบริบทที่เปลี่ยนไปอีกด้วย ประกอบกับความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีทำให้เครื่องมือที่ใช้มีความทันสมัยและมีหลากหลายประเภทมากขึ้น

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งในการสร้างความเข้าใจร่วมกัน และแสดงให้เห็นถึงความสำคัญและประโยชน์ที่ได้จากการใช้ "เครื่องมือสมัยใหม่" ตลอดจนกระตุ้นให้สถาปนิกให้สามารถประยุกต์ใช้เครื่องมือสมัยใหม่เข้าร่วมกับกระบวนการทางสถาปัตยกรรม โดยคำนึงถึงความเหมาะสมต่อผู้ใช้อาคาร ความสอดคล้องกับสภาพภูมิอากาศร้อนชื้นแบบประเทศไทย การปรับเปลี่ยนรูปแบบการทำงานเข้าสู่ระบบมาตรฐานสากล ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงอื่น ๆ ที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

2. กระบวนการทำงานและเครื่องมือทางสถาปัตยกรรมในอดีต

หากพิจารณาถึงกระบวนการทำงานทางสถาปัตยกรรมประกอบกับรายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้ในการทำงาน สามารถที่จะแบ่งออกเป็นขั้นตอนได้ดังนี้ คือ [1]

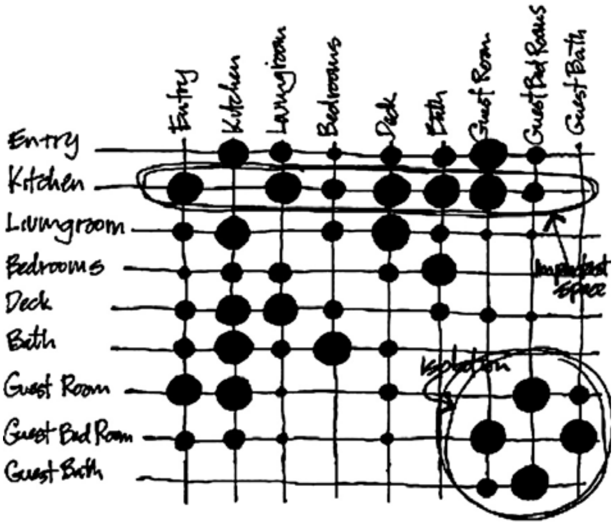
2.1 ขั้นกำหนดปัญหา เป็นขั้นตอนของการริเริ่มโครงการ การกำหนดวัตถุประสงค์หรือกำหนดขอบเขตของปัญหาให้ชัดเจน การศึกษา รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อจัดทำรายละเอียดโครงการเพื่อการออกแบบ (design program) การศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ (feasibility study) การกำหนดพื้นที่ใช้สอย ฯลฯ เพื่อนำข้อมูลมาใช้เป็นแนวทางการทำงานในขั้นตอนต่อไป ผู้จัดทำรายละเอียดโครงการ และ/หรือสถาปนิกมักเป็นผู้ที่มีบทบาทในขั้นตอนนี้

จากลักษณะของการทำงานข้างต้น เครื่องมือที่ใช้ในขั้นตอนนี้จะมีความสอดคล้องกับกระบวนการทำงานที่กล่าวมา ได้แก่ กระบวนการเก็บรวบรวมข้อมูล (data collection) ไม่ว่าจะเป็นการสัมภาษณ์ การค้นคว้าเอกสารหรือแหล่งข้อมูลอื่น ๆ ที่มีอยู่ การสอบถาม (interview) จากผู้เชี่ยวชาญ การวิเคราะห์ (analysis) การระดมความคิด (brainstorming) การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการ (feasibility analysis) การวิเคราะห์ที่ตั้งโครงการ (site analysis) การศึกษาการตลาด (market study) กฎหมายและข้อบังคับ (laws and regulations) การศึกษาระบบคมนาคม (communication study) การศึกษาพฤติกรรมและความต้องการของผู้ใช้ (behavioral study and users' requirements) ฯลฯ

2.2 ขั้นออกแบบ จากข้อมูลในขั้นกำหนดปัญหาจะนำไปสู่การศึกษาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบต่าง ๆ ทั้งภายในและภายนอกโครงการ การสังเคราะห์ (synthesis) การจัดลำดับความสำคัญของความต้องการ กระบวนการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการออกแบบ การเสนอรูปแบบหรือทางเลือกในลักษณะของแบบโครงร่าง (schematic design) การเปรียบเทียบ การประเมินรูปแบบทางเลือกที่เหมาะสมโดยอาศัยประเด็นต่าง ๆ กัน เช่น ความเหมาะสมทางด้านการสัญจร (circulation) ความเหมาะสมทางด้านการใช้ที่ดิน

เพื่อการขยายตัวในอนาคต ความเหมาะสมทางด้านประสิทธิภาพการดำเนินงาน ความเหมาะสมทางสมรรถนะของอาคาร (building performance) เป็นต้น การพัฒนาแบบ (design development) ในขั้นรายละเอียด การเลือกวัสดุ (material selection) การออกแบบระบบอาคาร (building system design) ตลอดจนการเสนอราคากลางอย่างละเอียดเพื่อควบคุมราคาค่าก่อสร้าง (cost control) ให้เป็นไปตามงบประมาณที่ได้กำหนดไว้

เครื่องมือที่ใช้ในขั้นตอนนี้ เช่น อุปกรณ์เขียนแบบ (drafting tools) อุปกรณ์นำเสนอผลงาน (presentation tool) การจัดแบ่งบริเวณ (zoning diagram) แผนผังแสดงความสัมพันธ์ของพื้นที่ (relationship diagram) การสร้างหุ่นจำลอง (modeling) เทคนิคการจำลองสถานการณ์ (simulation technique) กระบวนการตัดสินใจ (decision method) การสร้างเกณฑ์ในการประเมิน (evaluation criteria) การประมาณราคา (cost estimation) พ.ร.บ. การส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2535 (The Energy Conservation Promotion Act B.E. 2535(1992)) การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Environmental Impact Assessment: EIA) [2] การบริหารและจัดการสิ่งอำนวยความสะดวกภายในอาคาร (facility management) ฯลฯ



รูป 1 แผนผังแสดงความสัมพันธ์ของพื้นที่ใช้สอย (relationship diagram) เป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่สถาปนิกใช้เป็นพื้นฐานในการทำงาน ตลอดจนฝึกทักษะในการออกแบบสถาปัตยกรรมเบื้องต้น

2.3 ขั้นดำเนินการ เมื่อผ่านขั้นตอนของการเลือกรูปแบบอาคารที่เหมาะสมกับโครงการแล้ว จะเข้าสู่ช่วงของการจัดทำแบบก่อสร้าง เอกสารงานก่อสร้าง (construction documents) การประมาณราคา (cost estimate) การขออนุญาตปลูกสร้าง การประมูลงานก่อสร้าง การจัดหาแหล่งเงินทุน การบริหารงานก่อสร้าง (construction management) จนกระทั่งเสร็จสิ้นขั้นตอนการก่อสร้างอาคาร และเข้าสู่ช่วงของการใช้งานและการบริหารอาคาร

เมื่อเข้าสู่ขั้นตอนการดำเนินการ จะเป็นการนำแนวความคิดหรือผลงานมาดำเนินการก่อสร้างให้เป็นรูปเป็นร่างขึ้นมาโดยอาศัยเครื่องมือในการทำงานหลาย ๆ ด้านมาประกอบกัน ไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์ทางการเงิน (financial analysis) เทคนิคการบริหารงานก่อสร้าง (construction management) การควบคุมคุณภาพการก่อสร้าง (quality control) การจัดตารางการใช้งานพื้นที่อาคาร (scheduling) เป็นต้น

2.4 ขั้นประเมินผลหลังการเข้าอยู่ ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนของการประเมินผลผลิตของงานออกแบบที่ได้มีการใช้งานอย่างจริงจังแล้ว เพื่อค้นหาว่ามีสมรรถนะในด้านต่าง ๆ สอดคล้องกับเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้ในรายละเอียดของโครงการและแบบก่อสร้างมากน้อยเพียงใด สภาพแวดล้อมทางกายภาพที่ได้สร้างขึ้นว่ามีความสอดคล้องกับเป้าหมายของโครงการและความต้องการของกลุ่มผู้ใช้อย่างไรบ้าง ตลอดจนการประเมินในด้านอื่น ๆ เช่น จำนวนผู้ใช้อาคาร พฤติกรรมของผู้ใช้อาคารทั้งภายในและภายนอกอาคาร ผลตอบแทนทางการเงินที่ได้รับ อุปสรรคที่เกิดขึ้นในการดำเนินงาน ฯลฯ

ภายหลังจากที่ได้เข้าอยู่อาศัยและใช้งานอาคารแล้ว การที่จะทราบได้ว่าอาคารมีการใช้งานที่มีประสิทธิภาพตามที่ได้ออกแบบมาหรือไม่นั้น จำเป็นที่จะต้องอาศัยเครื่องมือที่เกี่ยวข้องหลายชนิด เช่น การประเมินผลโครงการ (project evaluation) การประเมินผลหลังการเข้าอยู่ (Post-Occupied Evaluation: POE) ในเกณฑ์ต่าง ๆ กัน เช่น การตรวจสอบการใช้พลังงาน (energy audit) การตรวจสอบคุณภาพอากาศภายในอาคาร (indoor air quality audit) ฯลฯ

จากรายละเอียดข้างต้นจะเห็นได้ว่าการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ในกระบวนการทำงานทางสถาปัตยกรรมมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง ทั้งยังมีความสัมพันธ์กันอย่างต่อเนื่องในแต่ละขั้นตอนอีกด้วย ทำให้สามารถที่จะทำการตรวจสอบแก้ไขข้อผิดพลาดได้อย่างรวดเร็วและเป็นระบบ

3. ประเด็นปัญหาและข้อจำกัดในการทำงาน

จากการวิเคราะห์รายละเอียดของการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาในแต่ละขั้นตอนการทำงานทางสถาปัตยกรรม พบว่า สถาปนิกใช้เครื่องมือเหล่านี้เพื่อช่วยอำนวยความสะดวก ศึกษา วิเคราะห์ แก้ไขปัญหา ตลอดจนการแสวงหาทางเลือกในการออกแบบ จนได้มีการยึดถือการใช้เครื่องมือเหล่านี้เป็นแบบอย่างในการทำงาน อย่างไรก็ตามเนื่องจากสถานการณ์ของโลกปัจจุบันได้เปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงทางด้านการเลือกใช้วัสดุและเทคโนโลยีการก่อสร้าง การอนุรักษ์และการแสวงหาแหล่งพลังงานทดแทน การคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศวิทยา ความต้องการคุณภาพชีวิตในการอยู่อาศัยที่ดี [3] เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ได้ส่งผลให้แนวความคิดในการออกแบบสถาปัตยกรรมเกิดการเปลี่ยนแปลงและก่อให้เกิดประเด็นการตั้งคำถามใหม่ ๆ ต่อการออกแบบสถาปัตยกรรมขึ้นหลายประการ เช่น

- สภาพแวดล้อมภายในอาคารที่ได้ออกแบบไว้มีสภาวะน่าสบายตามที่กำหนดไว้ในเขตสบายหรือไม่ และจะทราบได้อย่างไร
- ลักษณะช่องเปิดของอาคารที่จะสามารถควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสลมให้เป็นไปตามที่ต้องการได้จริงหรือไม่
- คุณภาพอากาศภายในห้องเหมาะสมต่อการอยู่อาศัยหรือไม่ และควรปรับปรุงโดยวิธีการใด
- การเลือกใช้วัสดุและเทคโนโลยีที่มีราคาสูงขึ้นจะสามารถช่วยในการประหยัดพลังงานได้หรือไม่ คิดเป็นจำนวนเงินเท่าไร และจะคืนทุนได้ภายในระยะเวลากี่ปี

จากประเด็นที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า นอกจากการเปลี่ยนแปลงทางด้านประเด็นในการออกแบบองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรมแล้ว ยังส่งผลถึงการเลือกใช้เครื่องมือในกระบวนการทำงานอีกด้วย เนื่องมาจากปัจจัยสำคัญ คือ ขอบ-เขตความสามารถของเครื่องมือแบบเดิมที่มีอยู่สำหรับการ-ออกแบบสถาปัตยกรรมภายใต้บริบทใหม่ ไม่สามารถที่จะครอบคลุม ตอบสนองต่อการแก้ปัญหาได้อย่างครบถ้วน และทิศทางของกระบวนการทำงานทางสถาปัตยกรรมได้มุ่งเน้นถึงความสำคัญทางด้านวิทยาศาสตร์มากขึ้น จากปัจจัยเหล่านี้จึงจำเป็นที่จะต้องอาศัยเครื่องมือยุคใหม่เข้ามาช่วยเสริมการทำงานให้มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะการเสริมความสามารถในการทำงานของสถาปนิกทางด้านความเที่ยงตรงในการประมวลผลข้อมูลที่มีปริมาณมาก การรับรู้และการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ละเอียดและแม่นยำต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น จากข้อจำกัดของเครื่องมือแบบเดิมที่มีอยู่จึงทำให้เครื่องมือยุคใหม่ได้เข้ามามีบทบาทต่อกระบวนการทำงานทางสถาปัตยกรรมเป็นอย่างยิ่ง

4. เครื่องมือยุคใหม่ในกระบวนการออกแบบสถาปัตยกรรมเชิงอนุรักษ์พลังงาน

หากพิจารณาถึงเครื่องมือสำหรับกระบวนการออกแบบสถาปัตยกรรมยุคใหม่ที่ได้เข้ามามีบทบาทต่อการทำงานของสถาปนิกในปัจจุบัน สามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อสำคัญได้ดังนี้ คือ

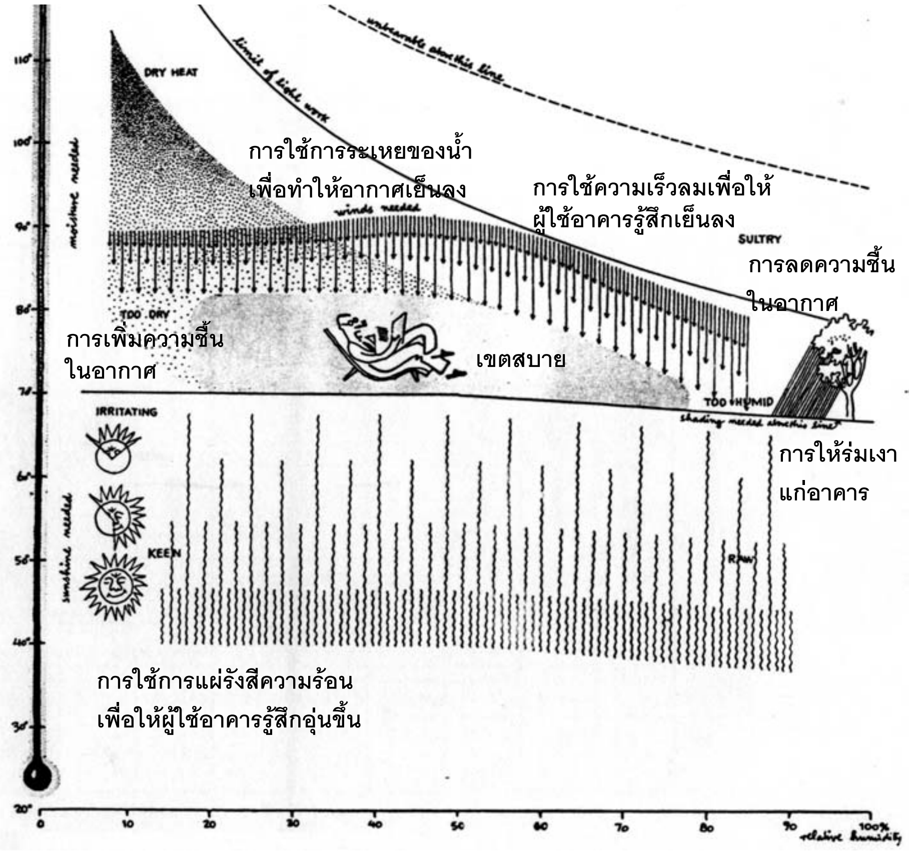
4.1 เครื่องมือในการศึกษาเรื่องอุณหภูมิ ความชื้น และความรู้สึกร้อน-หนาวที่เหมาะสม

4.2 เครื่องมือในการศึกษาเรื่องกระแสลมและการระบายอากาศ

4.3 เครื่องมือในการศึกษาเรื่องแสงธรรมชาติและแสงประดิษฐ์

4.4 เครื่องมือในการศึกษาเรื่องคุณภาพอากาศภายในอาคาร

4.5 เครื่องมือในการศึกษาเรื่องคุณภาพของเสียงภายในอาคาร



รูป 2 แผนภูมิไบโอไคลเมติก (Bioclimatic Chart) เป็นเครื่องมืออย่างหนึ่งในกระบวนการออกแบบทางสถาปัตยกรรม เครื่องมือชนิดนี้จะแสดงถึงเขตสบาย (comfort zone) [4] ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมที่ไม่ทำให้ผู้ใช้อาคารเกิดความรู้สึกร้อนหรือหนาวจนเกินไป อีกทั้งยังแสดงถึงแนวทางการปรับแต่งสภาพภูมิอากาศเพื่อสร้างสภาวะน่าสบายให้เกิดขึ้น

4.1 เครื่องมือในการศึกษาเรื่องอุณหภูมิ ความชื้น และความรู้สึกร้อน-หนาวที่เหมาะสม

แนวความคิดพื้นฐานของสถาปนิกในการออกแบบสถาปัตยกรรมในเขตร้อน-ชื้นมักจะเป็นการออกแบบอาคารให้มีลักษณะโปร่ง โล่ง หรือใช้การปรับแต่งสภาพแวดล้อมให้สามารถใช้การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติได้อย่างเต็มที่ เพื่อทำให้สภาพแวดล้อมภายในอาคารมีสภาวะน่าสบายตามที่ได้กำหนดให้อยู่ในเขตสบาย (comfort zone) ในอดีต สถาปนิกส่วนใหญ่มักจะมองสถาปัตยกรรมในด้านความสวยงามเป็นหลัก ส่วนในเรื่องของอุณหภูมิ ความชื้น และความรู้สึกร้อน-หนาวที่เหมาะสมนั้นจะเป็นเรื่องที่ถูกพิจารณาในลำดับรองลงมา และมักจะใช้เพียงความรู้สึก หรือประสบการณ์การทำงานเป็นเกณฑ์ในการออกแบบหรือตัดสินใจแทบทั้งสิ้น ซึ่งอาจจะมีทั้งส่วนที่ถูกต้องและส่วนที่ผิดพลาด โดยจะสามารถทราบได้ว่าการออกแบบสถาปัตยกรรมสามารถบรรลุตามวัตถุประสงค์ได้หรือไม่นั้นก็คือ ผู้ใช้อาคารที่ได้เข้าไปใช้งานอาคารนั้น ๆ อย่างต่อเนื่องในช่วงระยะเวลาหนึ่ง และต้องยอมรับว่ามีสถาปนิกเพียงส่วนน้อยที่ทราบถึงข้อผิดพลาดในการทำงานของตน ยิ่งไปกว่านั้น สภาพแวดล้อม วัสดุและเทคโนโลยีการก่อสร้างที่มีอยู่ในปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา การใช้ประสบการณ์ที่ผ่านมาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินจึงไม่ใช่คำตอบที่ถูกต้องเสมอไป ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องมือสมัยใหม่ที่สามารถช่วยให้การทำงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพทั้งในด้านการคำนวณ การคาดการณ์ และศึกษาหาแนวทางการแก้ไขปรับปรุง โดยวัตถุประสงค์หลักในการใช้เครื่องมือประเภทดังกล่าว พอที่จะแบ่งออกได้เป็นดังนี้

4.1.1 การใช้เครื่องมือเพื่อศึกษาความเหมาะสมในการเลือกใช้วัสดุเปลือกอาคาร (building envelope) ทั้งในแง่ของการก่อสร้างอาคารใหม่หรือปรับปรุงอาคารเก่า อาจแบ่งรายละเอียดย่อยของการศึกษาได้ดังนี้

- การศึกษาความสัมพันธ์ของมวลสารที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร เช่น การเลือกใช้ผนังอิฐมอญ ผนังคอนกรีตมวลเบา หรือผนังไม้ จะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารที่แตกต่างกัน เป็นต้น

- การศึกษาเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพ การผุกร่อน หรือการเน่าเสียของเปลือกอาคารอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ และความชื้น นอกจากจะทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ซ่อมแซม เป็นจำนวนมากแล้ว ความชื้นที่สะสมอยู่ในผนังยังเป็นส่วนหนึ่งที่ก่อให้เกิดการสะสมของเชื้อโรคชนิดต่าง ๆ และส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ โรค-ภูมิแพ้ ไข้หวัดเรื้อรัง ฯลฯ ทำให้ผู้ใช้อาคารสูญเสียคุณ-ภาพชีวิตที่ดี และความปลอดภัยในการอยู่อาศัย
- การตรวจสอบวัสดุและเทคโนโลยีที่นำเข้ามาจากต่าง-ประเทศซึ่งส่วนใหญ่จะผลิตขึ้นเพื่อตอบสนองต่อการใช้-งานในสภาพภูมิอากาศที่อยู่ในเขตหนาว มาปรับปรุงและประยุกต์ใช้ให้เกิดความเหมาะสมกับการออกแบบสถา-ปัตยกรรมในสภาพภูมิอากาศร้อน-ชื้นแบบประเทศไทย

4.1.2 การใช้เครื่องมือเพื่อตรวจสอบและควบคุมระดับอุณหภูมิและความชื้นให้เหมาะสมกับประเภทของอาคารที่แตกต่าง เช่น อาคารประเภทโรงแรม โรงพยาบาล สถานพักฟื้น ห้างสรรพสินค้า สำนักงาน สถานออกกำลังกาย เป็นต้น ซึ่งในแต่ละประเภทจะมีพฤติกรรมของผู้ใช้งาน กิจกรรม ระยะเวลา ช่วงเวลา ฯลฯ ที่ต่างกัน

4.1.3 การใช้เครื่องมือเพื่อศึกษาแนวทางการ-ผสมผสานการใช้งานระหว่างระบบธรรมชาติและระบบเครื่องกล เนื่องจากในปัจจุบันมีอาคารในประเทศไทยเป็นจำนวนมากที่ใช้ทั้งระบบปรับและไม่ปรับอากาศในอาคารเดียวกัน ทั้งอาคารที่ก่อสร้างขึ้นใหม่ และอาคารเก่าที่ได้มีการนำมาปรับปรุงและติดตั้งระบบปรับอากาศเข้าไป จึงนับว่าเป็นเรื่องที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อการศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร

4.1.4 การใช้เครื่องมือสำหรับการวิจัยและพัฒนา (Research and Development: R&D) ในหัวข้ออื่น ๆ เพื่อสร้างทฤษฎีการออกแบบทางด้านสถาปัตยกรรมและองค์ความรู้ใหม่ให้เกิดขึ้นอยู่เสมอ เช่น การศึกษาความเป็น-ไปได้ในการนำผักตบชวามาผลิตเป็นฉนวนกันความร้อนให้กับอาคารเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการนำเข้าวัสดุจากต่าง-ประเทศ และลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดผักตบชวา เป็นต้น

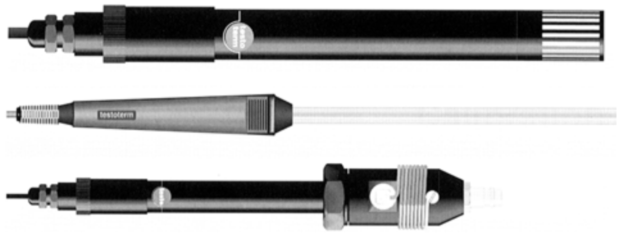
รูป 3 ความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากความชื้นที่แทรกซึมเข้ามาภายในผนัง ส่งผลให้สีที่ทาบนผนังก่ออิฐฉาบปูนหลุดร่อนออก นับเป็นปัญหาที่พบมากในปัจจุบัน

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

เครื่องมือที่นำมาใช้ในกระบวนการศึกษาเรื่องอุณหภูมิ ความชื้นและความรู้สึกร้อน-หนาวที่เหมาะสม ที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน คือ

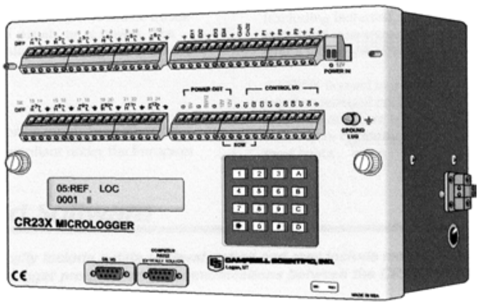
1. <u>เครื่องมือวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์</u> (Temperature and Relative Humidity) ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

- *หัวรับสัญญาณ (Sensors)* ทำหน้าที่รับสัญญาณที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่ทำการติดตั้ง
- *ส่วนประมวลผล (Processing Unit)* ทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้าจากหัวรับสัญญาณให้เป็นข้อมูลในระบบดิจิตอล เพื่อนำมาบันทึกและใช้ในการคำนวณ
- *ส่วนแสดงผล (Display)* ส่วนแสดงข้อมูลออกมาให้ผู้-ใช้ได้รับทราบ สามารถแสดงออกมาในรูปของตัวเลข หรือแผนภูมิ ได้ทั้งในส่วนของตัวเครื่อง หรือแสดงผลผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ตามที่ผู้ใช้งานกำหนด

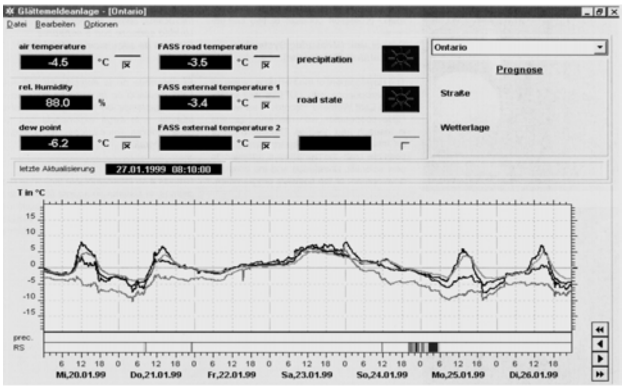


รูป 4 ลักษณะของหัวรับสัญญาณที่ใช้วัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์

รูป 5 เครื่องมือสำหรับวัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ที่สามารถประมวลผลและแสดงผลออกมาได้ในเครื่องเดียวกัน



รูป 6 ส่วนประมวลผลที่แยกออกมาจากส่วนแสดงผล สามารถนำหัวรับ-สัญญาณหลายชนิดมาติดตั้งร่วมกันและแสดงผลผ่านเครื่อง-คอมพิวเตอร์ได้



รูป 7 ผลของข้อมูลที่แสดงผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สามารถนำค่าที่วัดในแต่ละตำแหน่งมาทำการเปรียบเทียบได้ทันที

ตำแหน่งในการติดตั้ง

จากวัตถุประสงค์ของเครื่องมือที่กล่าวมาข้างต้น สามารถกำหนดตำแหน่งในการวัดค่าที่สำคัญต่อกระ-บวนการออกแบบสถาปัตยกรรมได้เป็นดังนี้

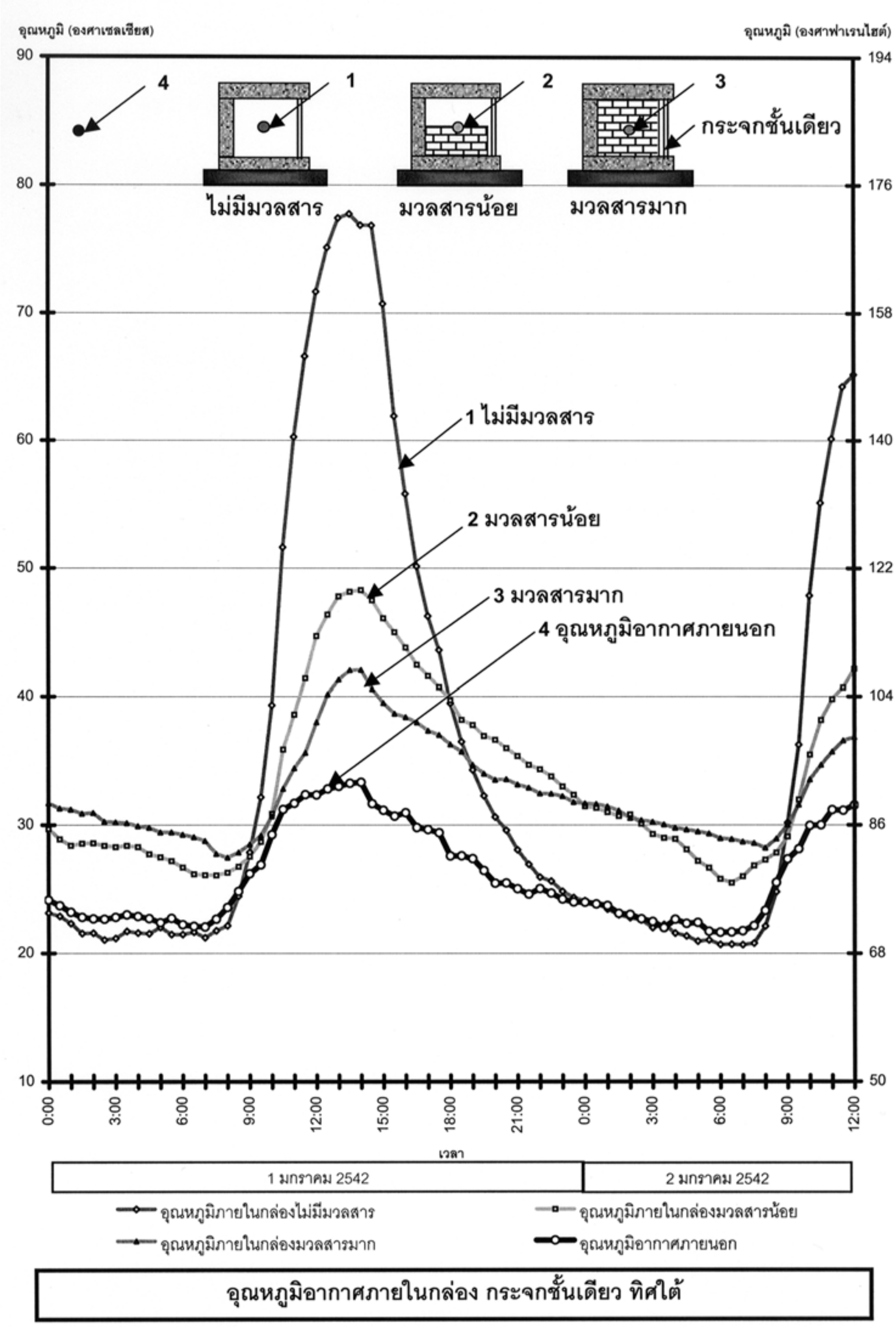
- *ตำแหน่งอุณหภูมิอากาศภายนอก* ในการ-ศึกษาแต่ละครั้งจำเป็นที่จะต้องวัดค่า ณ ตำแหน่งนี้เพื่อใช้ในการอ้างอิงหรือเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นจากการออกแบบว่าการเปลี่ยนแปลงนั้นได้ส่งผลดีหรือเสีย ในประเด็นของการทำให้อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่ศึกษามีค่าต่ำหรือสูงกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกมากน้อยเพียงใด

- *ตำแหน่งอุณหภูมิอากาศภายในอาคาร* การวัดค่า ณ ตำแหน่งนี้มักจะวัดที่ระดับใช้งาน (working plane) เนื่อง-จากเป็นพื้นที่ที่มีการใช้งานบ่อยครั้งและมีผลต่อผู้ใช้อาคารมากที่สุด ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับประเภทของงาน กิจกรรม หรือความต้องการที่แตกต่างกันออกไป

- *ตำแหน่งอุณหภูมิผิวสัมผัสวัสดุภายนอกอาคาร* ในช่วงของการออกแบบจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงอิทธิพลของวัสดุเปลือกอาคารที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความ-ร้อนเข้าสู่อาคาร เพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ถึงสภาวะ-น่าสบาย การออกแบบระบบเปลือกอาคารที่มีประสิทธิภาพการควบคุมค่าใช้จ่ายในการบริหารอาคาร เป็นต้น การศึกษาเรื่องอิทธิพลของมวลสารและสีที่มีต่อการถ่ายเทความร้อน การเลือกใช้กระจกชนิดต่าง ๆ

- *ตำแหน่งอุณหภูมิผิวสัมผัสวัสดุภายในอาคาร* เป็นการวัดค่าเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวโดยรอบ (Mean Radiant Temperature: MRT) [5] ที่มีต่อผู้ใช้อาคาร ซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญในการปรับสภาพแวดล้อมในอาคารให้เข้าสู่สภาวะน่าสบาย

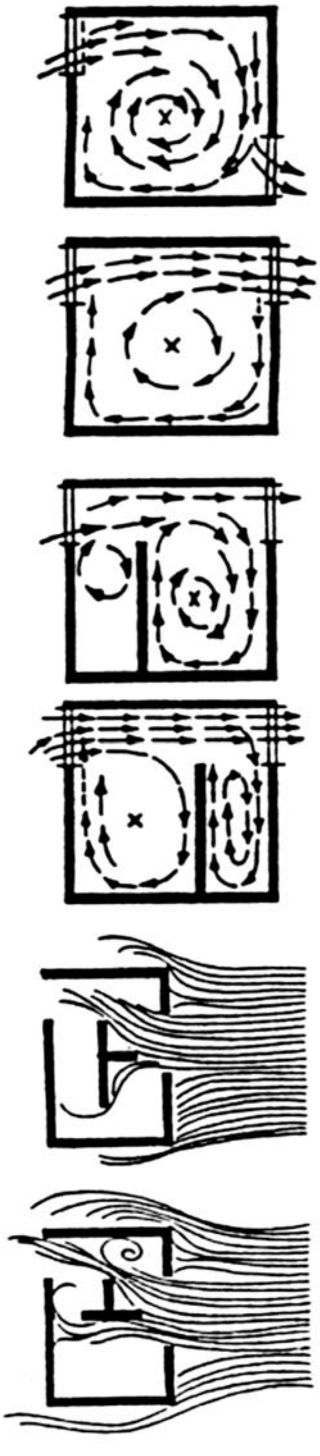
- *ตำแหน่งอื่น ๆ ที่ต้องการศึกษา* เช่น อุณหภูมิผิวดิน อุณหภูมิสภาพแวดล้อม ระดับชั้นความร้อนในช่องโล่งของโถงอาคาร (atrium) อุณหภูมิในช่องว่างอากาศระหว่างผนังหรือใต้หลังคา เป็นต้น เพื่อนำผลที่ได้มาพิจารณาร่วมกันในระหว่างกระบวนการออกแบบ



รูป 8 การนำข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดอุณหภูมิมาแสดงเป็นแผนภูมิเพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างของอุณหภูมิภายในกล่อง-ทดลองที่มีมวลสารแตกต่างกันกับอุณหภูมิอากาศภายนอกอาคาร เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาที่สามารถสร้างความเข้าใจที่ถูกต้องและนำไปสู่แนวทางการเลือกใช้ผนังภายในอาคารที่มีมวลสารแตกต่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อควรคำนึงในการใช้งาน

อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาและการติดตั้งเครื่อง-มือดังกล่าว มีข้อควรระวัง คือ หัวรับสัญญาณที่ติดตั้งเพื่อวัดค่าภายในหรือภายนอกอาคารจะต้องไม่ได้รับอิทธิพลจากตัวแปรอื่น ๆ โดยตรง เช่น หากต้องการวัดค่าอุณหภูมิอากาศภายนอกอาคารจะต้องมีการป้องกันไม่ให้หัวรับสัญญาณถูกอิทธิพลจากแสงอาทิตย์โดยตรง (direct sun) หรือ ต้องการวัดค่าอุณหภูมิอากาศภายในอาคารจะต้องป้องกันไม่ให้ถูกอิทธิพลของลมจากช่องจ่ายลมเย็นของระบบปรับอากาศโดยตรง เป็นต้น เนื่องจากจะทำให้ค่าที่วัดได้เกิดความผิดพลาด



รูป 9 ส่วนหนึ่งของรูปแบบการศึกษาเรื่องกระแสลมและการระบาย-อากาศที่ได้มีการยึดถือเป็นแบบอย่างในการทำงานมาเป็นระยะ-เวลานาน หากการออกแบบช่องเปิดตลอดจนการจัดพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารแตกต่างไปจากรูปแบบเดิมที่มีอยู่ เราจะทราบถึงลักษณะการไหลเวียนของอากาศได้อย่างไร?

4.2 เครื่องมือในการศึกษาเรื่องกระแสลม และการระบายอากาศ

ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการสร้างสภาพแวดล้อมภาย-ในอาคารให้มีสภาวะน่าสบายตามที่กำหนดไว้ในเขตสบาย คือ การใช้กระแสมและการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ เช่นเดียวกันกับลักษณะของบ้านไทยในอดีตที่มีการใช้กระแสลมธรรมชาติมาทำความเย็นให้กับผู้อยู่อาศัยในอาคารโดยอาศัยวิธีการต่าง ๆ เช่น การยกใต้ถุนสูง การยก-ระดับพื้น การจัดวางกลุ่มอาคาร ลักษณะของช่องเปิด รูป-ทรงหลังคา ฯลฯ อีกทั้งยังมีสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติที่มีความสมบูรณ์และเอื้ออำนวยต่อการนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่ แต่ในปัจจุบัน สภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นอาคารหลากหลายขนาดและประเภทที่ปลูกสร้างกันอย่างแออัด รูปแบบการจัดวางพื้นที่ใช้สอยภายในอาคาร ตลอดจนการเปิดช่องเปิดที่มีขนาดและตำแหน่งซับซ้อนมากขึ้น ทำให้รูปแบบการระบาย-อากาศในอาคารแตกต่างกันออกไปจากทฤษฎีที่มีใช้กันอยู่ หากยังมีการยึดถือทฤษฎีหรือรูปแบบการระบายอากาศแบบเดิมที่มีอยู่อย่างจำกัดมาใช้เป็นแนวทางการออกแบบแล้ว ย่อมที่จะไม่ก่อให้เกิดประสิทธิภาพในการใช้งานตามวัตถุประสงค์อย่างแน่นอน ดังนั้น วัตถุประสงค์ในการใช้เครื่องมือในการศึกษาเรื่องกระแสลมและการระบายอากาศพอจะแบ่งออกเป็นประเด็นสำคัญได้ดังนี้

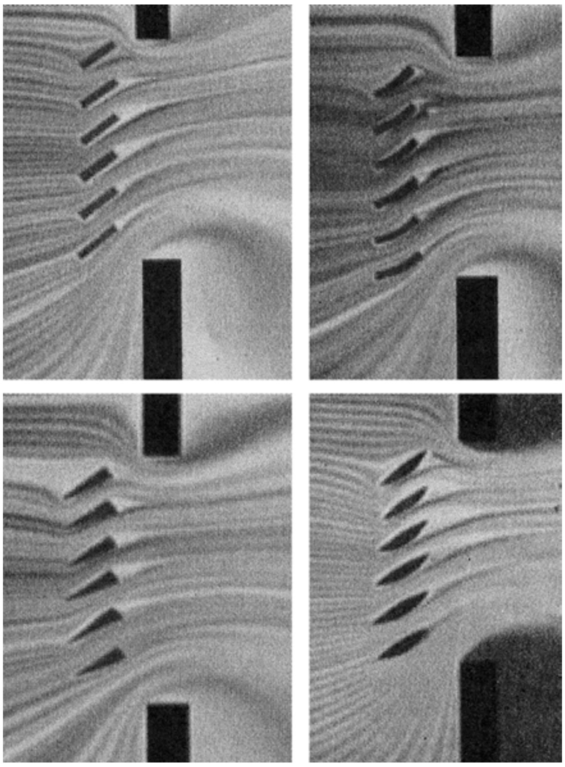
1. การวางผังอาคาร การออกแบบรูปทรงและสัดส่วนของอาคารให้เหมาะสมกับที่ตั้งนั้น ๆ
2. การประเมินทางเลือกในการใช้วัสดุเปลือกอาคาร และการออกแบบส่วนปิดล้อม (enclosure) ต่าง ๆ เพื่อลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากอิทธิพลของลม โดยเฉพาะในอาคารสูง
3. การกำหนดตำแหน่งพื้นที่ใช้สอย การจัดวางเครื่องเรือน การออกแบบตกแต่งภายใน เพื่อให้ระบายอากาศได้อย่างเพียงพอ
4. การออกแบบตำแหน่ง ขนาด และจำนวนของช่องเปิดที่สามารถระบายอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. เพื่อออกแบบอุปกรณ์ตกแต่งภายนอกอาคาร เช่น แผง-กันแดด หลังคา ชายคา หรือส่วนประกอบยื่นอื่น ๆ ของอาคารที่สามารถใช้งานร่วมกับช่องเปิดได้อย่างเหมาะสม
6. ใช้ในการควบคุมคุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality: IAQ) และอัตราการระบายอากาศ (air exchange rate) [6] ภายในอาคารให้เหมาะสมตามมาตรฐานประเภทอาคารและการใช้งาน ทั้งในแง่ของคุณภาพและปริมาณ เพื่อสร้างคุณภาพชีวิตที่ดีให้กับผู้-อยู่อาศัย
7. เป็นแนวทางการลดการใช้พลังงานในส่วนของระบบปรับอากาศ และศึกษาความสัมพันธ์ในการใช้งานร่วมกันของอาคารที่มีการใช้ระบบปรับอากาศโดยวิธีธรรมชาติและระบบเครื่องกล
8. การใช้ในวัตถุประสงค์อื่น ๆ เช่น การควบคุมทิศทางและความเร็วของกระแสลมเพื่อป้องกันแมลงไม่ให้เข้ามารบกวนภายในตัวอาคาร การควบคุมทิศทางการตกหรือการฟุ้งกระจายของฝุ่นละออง เป็นต้น

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาเรื่องกระแสลมและการ-ระบายอากาศที่สำคัญพอจะแบ่งออกได้ดังนี้คือ

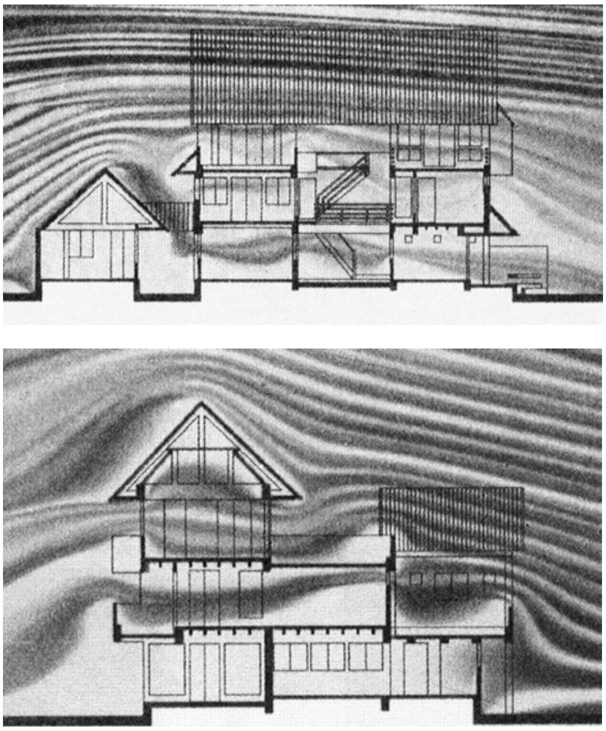
1. <u>เครื่องมือสำหรับวัดความเร็วลม</u> (Anemometer) เครื่องมือชนิดนี้จะมีอุปกรณ์บางส่วนที่คล้ายคลึงกับเครื่อง-มือที่ใช้ในการศึกษาเรื่องอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความรู้สึกร้อน-หนาวที่เหมาะสม คือ ส่วนประมวลผลและส่วนแสดงข้อมูล แต่สิ่งที่เป็นลักษณะเฉพาะของเครื่องมือประเภทนี้ คือ หัวรับสัญญาณที่มีขนาดและรูปแบบที่แตก-ต่างกันหลายรูปแบบสามารถปรับเปลี่ยนการใช้งานได้ตามความเหมาะสม เช่น หัวรับสัญญาณขนาดเล็กที่เหมาะสำหรับการใช้งานในพื้นที่ที่มีขนาดเล็ก ความเร็วต่ำ ปริมาณลมน้อย หรือวัดความเร็วลมเฉพาะตำแหน่งที่ต้องการ เช่น ในบริเวณช่องจ่ายลมเย็นของระบบปรับอากาศ ช่องระบาย-อากาศใต้หลังคา ส่วนหัวรับสัญญาณขนาดใหญ่ที่เหมาะสำหรับวัดในพื้นที่ที่มีความเร็วและมีปริมาณลมมาก หรือ



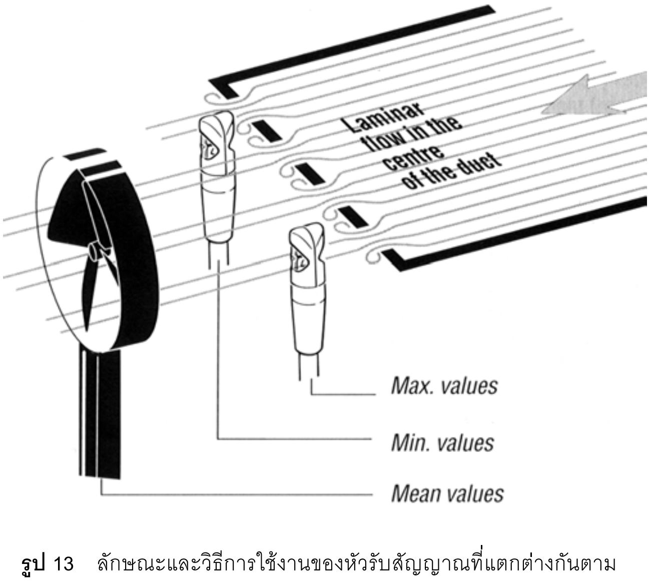
รูป 10 การเลือกใช้กันสาดหรือส่วนประกอบภายนอกอาคารที่มีรูปแบบแตกต่างกัน จะส่งผลให้ทิศทางของกระแสลมที่ไหลเวียนเข้ามาภายในอาคารเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน จึงจำเป็นต้องศึกษาถึงความเหมาะสมในการใช้งานตามวัตถุประสงค์

ความเร็วลม (foot per minute: fpm)	**ผลที่เกิดขึ้น**
0 – 50	ไม่สามารถสังเกตหรือรู้สึกได้
50 – 100	รู้สึกสบาย
100 – 200	รู้สึกสบาย และรู้สึกถึงการเคลื่อนไหวของอากาศ
200 – 300	รู้สึกว่ามีลมพัด และเกิดการรบกวนในการทำงานบ้าง
มากกว่า 300	ต้องปรับปรุงเพื่อการทำงานและการอยู่อาศัยที่มีมีประสิทธิภาพ

รูป 11 ตารางแสดงผลกระทบของความเร็วลมที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงที่มีต่อความรู้สึกของผู้ใช้อาคาร [8] เป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถใช้เครื่องมือเพื่อตรวจสอบการออกแบบสถาปัตยกรรมที่ใช้การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ



รูป 12 การจำลองลักษณะการไหลเวียนอากาศของอาคาร เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของช่องเปิด กับส่วนประกอบอื่น ๆ โดยใช้โต๊ะจำลองของไหล (fluid mapping table)



รูป 13 ลักษณะและวิธีการใช้งานของหัวรับสัญญาณที่แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ คือ การวัดค่าความเร็วลมสูงสุด–ต่ำสุดเฉพาะตำแหน่ง และความเร็วลมเฉลี่ย ที่เกิดขึ้นในพื้นที่นั้น ๆ

ความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละพื้นที่ เช่น ความเร็วลมเฉลี่ยในห้อง หรือสภาพแวดล้อมกลางแจ้ง ฯลฯ

ตำแหน่งในการติดตั้ง

โดยทั่วไปแล้วการติดตั้งหัวรับสัญญาณมักจะติดตั้งที่ตำแหน่งสำคัญ 2 ตำแหน่งคือ

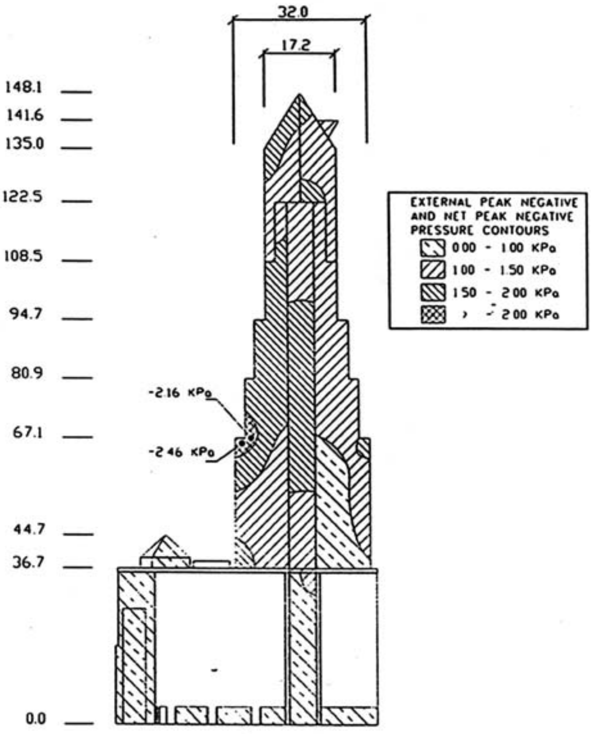
- *ตำแหน่งช่องทางลมเข้า–ออก (Inlet–outlet)* การติดตั้งเครื่องมือในตำแหน่งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงปริมาณและความเร็วลมที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งของช่องเปิดว่ามีความเหมาะสม หรือเป็นไปตามที่ผู้ออกแบบต้องการหรือไม่ เพื่อที่จะนำไปปรับเปลี่ยนรูปแบบทางสถาปัตยกรรมให้เกิดความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น
- *ตำแหน่งระดับใช้งาน (Working Plane)* การติดตั้งหัวรับสัญญาณในตำแหน่งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของลมที่เกิดขึ้นจากการออกแบบว่าสามารถนำกระแสลมมาใช้งานในพื้นที่ที่กำหนดได้มากน้อยเพียงใด หรืออาจใช้ในการปรับปรุงสภาพแวดล้อมให้เกิดความเหมาะสมในการทำงานมากยิ่งขึ้น โดยความเร็วลมที่เพิ่มขึ้น 1 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (54.68 fpm) จะสามารถช่วยให้มนุษย์รู้สึกเย็นลงกว่าอุณหภูมิอากาศจริงประมาณ 0.4 องศาเซลเซียส [7]

2. <u>โต๊ะจำลองของไหล</u> (Fluid Mapping Table) หรือที่มักเรียกกันว่า "โต๊ะน้ำ" เป็นเครื่องมือที่สามารถสร้างความเข้าใจในการศึกษาเรื่องกระแสลมและการระบายอากาศได้เป็นอย่างดี โดยอาศัยคุณสมบัติของน้ำเป็นตัวแทนในการศึกษาการไหลเวียนของอากาศ น้ำที่นำมาใช้นั้นจะเป็นน้ำที่มีการผสมสี (โดยทั่วไปมักจะใช้น้ำที่ผสมกับด่างทับทิม) เพื่อให้มองเห็นภาพจำลองของการไหลได้ง่ายขึ้น สามารถที่จะศึกษาได้ในหลายรูปแบบ เช่น การจัดวางกลุ่มอาคาร การไหลเวียนของอากาศในส่วนต่าง ๆ ของอาคาร โดยใช้เครื่องจำลองการไหลของของไหล (flow visualization apparatus) [9]

3. <u>อุโมงค์ลม</u> (Wind Tunnel) การศึกษาการไหลเวียนของอากาศด้วยโต๊ะน้ำ จะเป็นการศึกษาผลของการออกแบบในลักษณะ 2 มิติ ซึ่งในบางกรณีอาจไม่สามารถทำให้มองเห็นภาพรวมของผลกระทบที่เกิดขึ้นกับตัวอาคารและ

สภาพแวดล้อมข้างเคียงได้ทั้งหมด จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงอิทธิพลของการไหลเวียนอากาศที่เกิดขึ้นในอุโมงค์ลมโดยการทดสอบกับหุ่นจำลองที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมนั้น ๆ โดยอาศัยลมหรือควันที่มีการผสมสีเข้าไปเพื่อให้มองเห็นภาพการไหลเวียนของอากาศได้อย่างชัดเจน นอกจากนั้นแล้วยังมีการติดตั้งหัวรับสัญญาณเพื่อศึกษาอิทธิพลของแรงลมที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของอาคาร [10] อย่างไรก็ตาม การใช้อุโมงค์ลมในการทดสอบในประเทศไทยยังไม่มีสถานที่ใดที่ทดสอบแล้วสามารถเห็นภาพการไหลเวียนของอากาศได้อย่างชัดเจน ทั้งโดยวิธีการใช้ภาพถ่ายหรือภาพเคลื่อนไหว จึงทำให้การทดสอบโดยใช้อุโมงค์ลมเป็นการทดสอบทางด้านโครงสร้างอาคารเป็นสำคัญ อีกทั้งค่าใช้จ่ายในการ-ทดสอบและการบำรุงรักษาอุโมงค์ลมยังอยู่ในระดับที่ค่อน-ข้างสูง จึงทำให้มีเพียงบางโครงการที่มีงบประมาณเพียงพอหรืออาคารสูงเท่านั้นที่ทำการทดสอบ

4. <u>โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองสถานการณ์</u> (Computer Simulation Program) จากข้อจำกัดในเรื่องของค่าใช้จ่ายที่สูง และระยะเวลาในการทำงานที่นาน จึงได้มีการคิดค้นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถช่วยให้การ-ทำงานดังกล่าวมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยโปรแกรมที่นิยมใช้จะเป็นโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics Program: CFD Program) ที่ช่วยในการศึกษาการไหลเวียนของอากาศ จะมีหลักการ-ทำงานเช่นเดียวกันกับการใช้โต๊ะน้ำ หรือการใช้อุโมงค์ลม แต่มีความสามารถเพิ่มขึ้นในด้านการวิเคราะห์ชั้นความร้อนและระดับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่ง โดยใช้วิธีการ-สร้างหุ่นจำลองขึ้นในคอมพิวเตอร์แทน ซึ่งค่อนข้างจะสะดวกรวดเร็วในการปรับเปลี่ยนแก้ไขทางเลือกในการออกแบบได้อย่างเหมาะสมและให้ผลการทดลองที่แม่นยำใกล้เคียงกับความเป็นจริง อย่างไรก็ตาม การที่จะสามารถใช้งานโปรแกรมฯ ได้อย่างคล่องแคล่วและมีประสิทธิภาพจะต้องใช้ระยะเวลาในการศึกษาค่อนข้างมาก อีกทั้งยังมีข้อจำกัดในเรื่องของความละเอียด ความครบถ้วนในการนำเสนอผลงานขั้นสุดท้ายอยู่พอสมควร



รูป 14 การศึกษาอิทธิพลของกระแสลมที่กระทำต่อส่วนต่าง ๆ ของอาคาร จากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลม ซึ่งสามารถนำผลที่ได้มาใช้ในการปรับ-เปลี่ยนรูปทรง การเลือกใช้วัสดุ ฯลฯ เพื่อลดอันตรายที่อาจเกิดขึ้น

รูป 15 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการไหลเวียนของอากาศ สามารถมองเห็นผลการทดลองที่ได้ในลักษณะ 3 มิติ

4.3 เครื่องมือในการศึกษาเรื่องแสงธรรมชาติและแสงประดิษฐ์

แนวทางการอนุรักษ์พลังงานในงานสถาปัตยกรรมโดยการแสวงหาประโยชน์จากธรรมชาติให้ได้มากที่สุดนั้นนับเป็นวิธีการที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบสถาปัตยกรรมได้อย่างหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นการใช้ประโยชน์จากพืชคลุมดิน ต้นไม้ แหล่งน้ำ ดิน กระแสลม และสภาพ-แวดล้อมอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของการใช้แสง-ธรรมชาติ ประโยชน์ที่ได้จากการใช้แสงธรรมชาตินั้น นอกจากจะใช้เพื่อการทำความร้อนให้กับน้ำและผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้แผงรับแสงอาทิตย์ และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามลำดับแล้ว ยังสามารถนำมาใช้เพื่อให้ความสว่างแก่พื้นที่ส่วนต่าง ๆ ของอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกทางหนึ่งด้วย

อย่างไรก็ตาม การนำแสงธรรมชาติมาใช้ภายในอาคารจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาถึงความเหมาะสมเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการใช้งาน มิฉะนั้นแล้วอาจทำให้เกิดผลเสียและผลกระทบต่อระบบอื่น ๆ ในการใช้งานอาคารได้ วัตถุ-ประสงค์ของการใช้เครื่องมือในการศึกษาเรื่องแสงธรรมชาติพอที่จะแบ่งออกได้เป็นดังนี้ คือ

1. เพื่อศึกษาแนวทางการป้องกันแสงที่เกิดจากดวงอาทิตย์โดยตรงไม่ให้เข้ามาในอาคาร เนื่องจากแสงประเภทนี้ประกอบด้วยช่วงของคลื่นแสง 3 ช่วง คือ infrared (IR), visible light และ ultraviolet (UV) แต่ช่วงของคลื่นแสงที่ต้องการนำมาใช้ คือ visible light ส่วน infrared และ ultraviolet นั้นไม่ต้องการเนื่องจาก infrared จะทำให้เกิดความร้อนซึ่งส่งผลต่อสภาวะน่าสบายและภาระการปรับ-อากาศ และ ultraviolet จะส่งผลให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของวัตถุ เช่น สีของเฟอร์นิเจอร์ หรือเนื้อกระดาษของหนังสือถูกทำ-ลายลงได้

2. เพื่อศึกษาวิธีการกำหนดตำแหน่งและออกแบบลักษณะช่องเปิดที่สามารถนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้งานในอาคารได้อย่างเหมาะสมทั้งในแง่ของคุณภาพและปริมาณ โดยแสงที่ต้องการนำเข้ามานั้นจะเป็นแสงกระจาย (diffuse light) เนื่องจากเป็นแสงที่นำความร้อนเข้าสู่อาคารน้อยที่สุด

รูป 16 แสงบาดตา (glare) ที่สะท้อนมาจากผนังกระจกของอาคารข้างเคียงจะรบกวนผู้ใช้อาคารในพื้นที่ใช้งานนั้น ๆ เป็นอย่างมาก

3. เพื่อคาดการณ์ปริมาณแสงที่เกิดขึ้นเมื่อมีการใช้งานอาคารจริงโดยอาศัยการศึกษาควบคู่กับหุ่นจำลองเพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบแสงสว่าง (Daylight Factor: DF) เป็นค่าอ้างอิงในการออกแบบและปรับปรุง

4. เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันทั้งภายในและภายนอกอาคารได้อย่างเหมาะสม เพื่อช่วยในการออกแบบด้านต่าง ๆ เช่น การเพิ่มค่าการสะท้อนแสง (reflectance) ของวัสดุภายในอาคารเพื่อช่วยเพิ่มความส่องสว่าง และลดค่าใช้จ่ายในส่วนของแสงประดิษฐ์ การลดค่าการสะท้อนแสงของวัสดุภายนอกอาคารเพื่อป้องกันแสงบาดตา (glare) ไปยังผู้ใช้งานหรืออาคารข้างเคียง

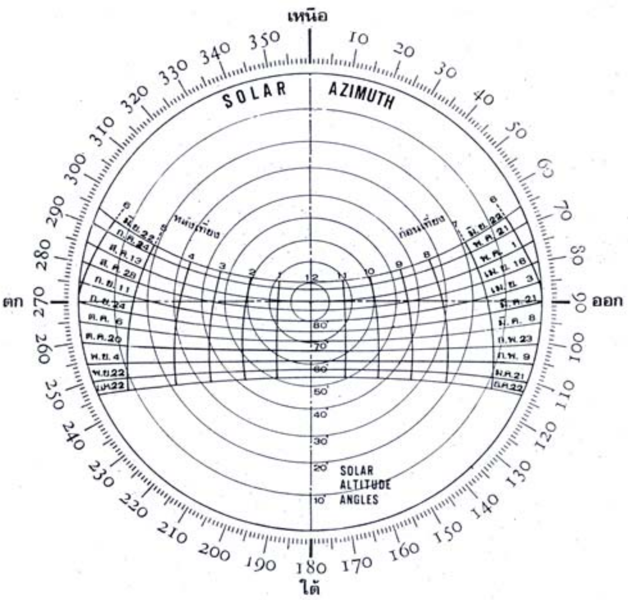
5. จากลักษณะโดยทั่วไปของแสงธรรมชาติมีความแปรปรวนตลอดทั้งวัน ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมข้างเคียง สภาพของท้องฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล ทำให้ไม่สามารถที่จะพึ่งพาการใช้แสงธรรมชาติได้ตลอดเวลาในช่วงวัน จึงจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาความเหมาะสมในการใช้งานร่วมกันระหว่างการใช้แสงประดิษฐ์ (artificial lighting) และแสงธรรมชาติ (daylighting) ให้มากที่สุด

6. การใช้เครื่องมือเพื่อศึกษาแนวทางการนำแสงธรรมชาติมาใช้ในการสร้างบรรยากาศ หรือสร้างความรู้สึกทางด้านจิตใจที่ตอบสนองต่อแนวความคิดของสถาปนิก เช่น การออกแบบระบบแสงของอาคารประเภทอนุสรณ์สถานเพื่อแสดงถึงความศักดิ์สิทธิ์และแสดงความเคารพ เป็นต้น

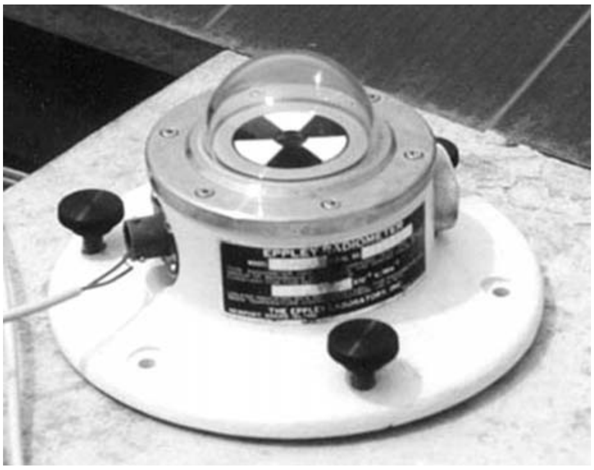
7. การใช้เครื่องมือเพื่อศึกษาเรื่องอื่น ๆ เช่น การศึกษาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ได้รับแสงอาทิตย์มากที่สุดตลอดทั้งวัน การศึกษาวิเคราะห์การออกแบบรูปทรงอาคารที่ไม่ทำให้เกิดแสงสะท้อนรบกวนแก่อาคารข้างเคียง เป็นต้น

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

จากวัตถุประสงค์ข้างต้นสามารถแบ่งประเภทของเครื่องมือในปัจจุบันที่สำคัญและมีบทบาทในการศึกษาเรื่องแสงประดิษฐ์และแสงธรรมชาติออกได้เป็นดังนี้



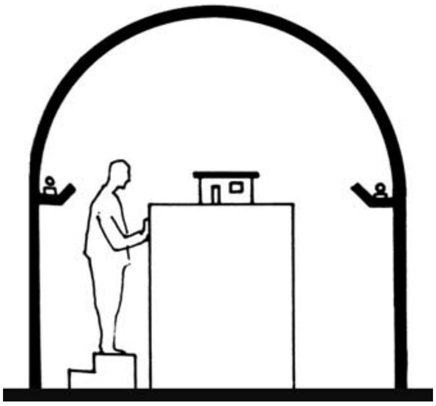
รูป 17 แสดงแผนผังการโคจรของดวงอาทิตย์ ทำให้สามารถวิเคราะห์ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ได้อย่างแน่นอนในแต่ละช่วงเวลาของปี โดยแสดงในรูปของมุมเบี่ยง (azimuth) และมุมยก (altitude)



รูป 18 ลักษณะของเครื่องวัดค่ารังสีดวงอาทิตย์โดยตรงสำหรับใช้ภายนอกอาคาร สามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูลได้

รูป 19 ลักษณะของเครื่องวัดค่าระดับความสว่าง (lux meter) สำหรับใช้ภายในอาคาร

รูป 20 ลักษณะการใช้เครื่องวัดค่าความสว่างในพื้นที่ใช้งานของอาคาร



รูป 21 ลักษณะของท้องฟ้าจำลองทรงโดมครึ่งวงกลม

1. <u>แผนผังการโคจรของดวงอาทิตย์</u> (Sun Chart) เป็นเครื่องมือพื้นฐานที่มีการใช้งานกันมาเป็นระยะเวลานาน แล้วได้มีการพัฒนารูปแบบให้สามารถใช้งานได้ง่ายและสะดวกขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์ในการใช้งานเพื่อวิเคราะห์ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลาของปี เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบขนาดและตำแหน่งของช่องเปิด แผงกันแดด การปรับสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติ แนวทางการใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติที่สอดคล้องกับการโคจรของดวงอาทิตย์มากยิ่งขึ้น

2. <u>เครื่องวัดค่ารังสีดวงอาทิตย์</u> (Pyranometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้เพื่อวัดปริมาณความร้อนหรือความสว่างจากแสงอาทิตย์โดยตรง โดยทั่วไปจะใช้เพื่อวัดค่าเพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบกับค่าความส่องสว่างที่เกิดขึ้นภายในอาคาร ชุดเครื่องมือประกอบไปด้วยส่วนประมวลผล ส่วนแสดงผลและหัวรับสัญญาณที่สามารถเชื่อมต่อเพื่อเพิ่มจำนวนหัวรับสัญญาณได้อย่างเป็นระบบ เครื่องมือชนิดนี้ใช้ภายนอกอาคาร

3. <u>เครื่องมือวัดค่าระดับความสว่าง</u> (Illumination/ Lux Meter) เครื่องมือชนิดนี้ใช้วัดค่าระดับความสว่างของแสงธรรมชาติและแสงประดิษฐ์เพื่อใช้หาปริมาณแสงภายในอาคาร โดยค่าที่วัดได้นี้สามารถนำไปใช้ในการหาค่าตัวประกอบแสงสว่างต่อไปได้

4. <u>ท้องฟ้าจำลองทรงโดมครึ่งวงกลม</u> (Hemispherical Dome Artificial Sky หรือ Sky Dome) ท้องฟ้าจำลองทรงโดมครึ่งวงกลม จะมีลักษณะเป็นห้องรูปครึ่งทรงกลมขนาดใหญ่ ภายในประกอบไปด้วยหลอดไฟ 2 ประเภท คือ หลอดไฟที่ใช้แทนแสงจากดวงอาทิตย์โดยตรง และหลอดไฟที่ใช้แทนแสงจากสภาพแวดล้อม โดยสร้างหุ่นจำลองขึ้นเพื่อศึกษาแสงเงา ความส่องสว่างภายในอาคาร ความเหมาะสมของช่องเปิด ฯลฯ โดยจะใช้งานร่วมกับเครื่องมือวัดค่าความสว่าง เพื่อที่จะได้ผลที่แม่นยำ เที่ยงตรงและสามารถนำไปใช้ในการออกแบบสถาปัตยกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

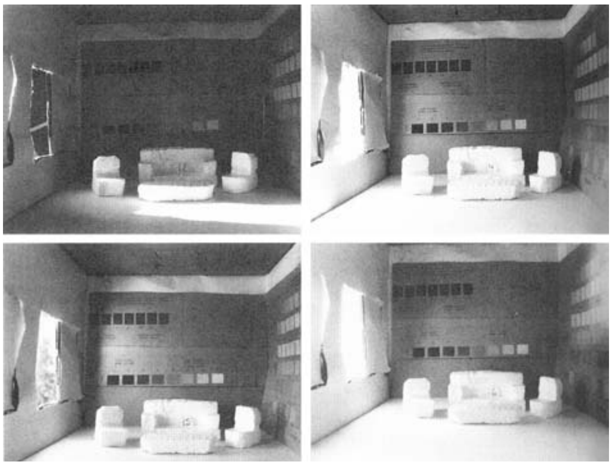
อย่างไรก็ตาม นอกจากปัญหาในเรื่องของราคาค่าก่อสร้างและค่าดูแลรักษาที่ค่อนข้างสูง ต้องใช้พื้นที่ในการก่อสร้างมากแล้ว อาจมีปัญหาบางประการที่อาจเกิดขึ้นในการทำงาน คือ

- หากหุ่นจำลองมีขนาดใหญ่เกินไป หรือท้องฟ้าจำลองมีขนาดเล็กเกินไป ความเข้มของแสงที่เกิดขึ้นในบางส่วนของหุ่นจำลองมีมากเกินความเป็นจริง ทำให้มีโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดในการออกแบบได้
- ลักษณะการกระจายแสงของท้องฟ้าจำลองชนิดนี้มีความสมดุลมากเกินไป แตกต่างจากการกระจายความสว่างที่เกิดจากท้องฟ้าธรรมชาติ จนอาจทำให้ค่าที่ทำการศึกษาดีเกินกว่าความเป็นจริง
- พื้นที่ในการติดตั้งหลอดไฟภายในท้องฟ้าจำลองอาจมีน้อยเกินไปจนทำให้การศึกษาเรื่องคุณภาพของแสงเป็นไปได้ลำบาก

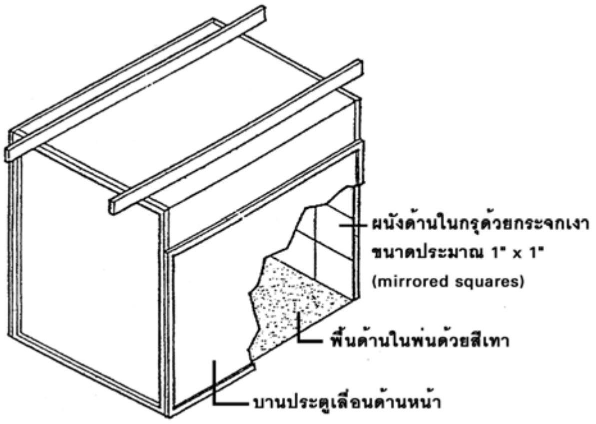
5. <u>ท้องฟ้าจำลองทรงกล่องกระจกสี่เหลี่ยม</u> (Mirror Box Artificial Sky หรือ Mirror Box) เป็นอุปกรณ์ที่จำลองสภาพท้องฟ้าเช่นเดียวกับท้องฟ้าจำลองทรงโดมครึ่งวงกลม แต่จะแตกต่างกันที่ขนาดและรูปทรง โดยที่ท้องฟ้าจำลองทรงกล่องกระจกสี่เหลี่ยมมีลักษณะเป็นกล่องที่มีสัดส่วน 4 x 4 x 5 ฟุต ผนังภายในกรุด้วยกระจกเงา ซึ่งเป็นวิธีการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากผลของการทำงานด้วยท้องฟ้าจำลองทรงโดมครึ่งวงกลมในเรื่องของปริมาณแสงภายใน ทำให้อุปกรณ์ชนิดนี้สามารถวัดค่าได้อย่างถูกต้องมากยิ่งขึ้น อีกทั้งราคาที่ไม่สูงจนเกินไปนักและสามารถเคลื่อนย้ายได้ค่อนข้างสะดวก จึงทำให้ได้รับความนิยมในการใช้งานมากขึ้น เครื่องมือชนิดนี้จะเน้นถึงแนวทางการออกแบบในลักษณะของท้องฟ้าชนิดฟ้าหลัวที่มีเมฆปกคลุมมาก (overcast sky) [11]

6. <u>ดวงอาทิตย์จำลอง</u> (Heliodon) เป็นอุปกรณ์ที่จำลองลักษณะการโคจรของดวงอาทิตย์ เพื่อนำมาใช้ในการศึกษาเรื่องการออกแบบอุปกรณ์กันแดด หรือทิศทางของแสงและเงาที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของปีสำหรับการออกแบบสถาปัตยกรรม ในการวิเคราะห์จะต้องใช้หุ่นจำลองประกอบกันไปด้วย ลักษณะของเครื่องมือจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก 2 ส่วน คือ

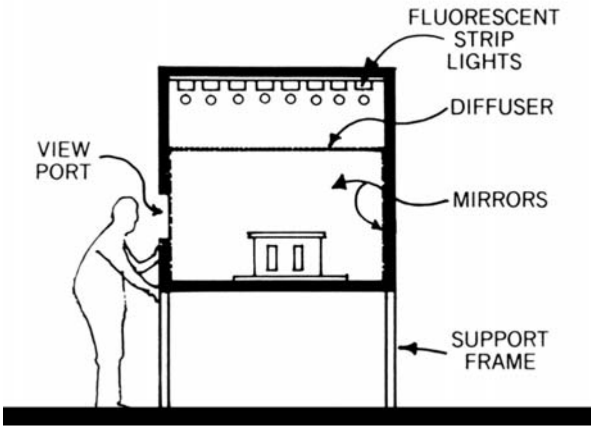
- ส่วนหลอดไฟ เป็นส่วนที่ใช้จำลองตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในแต่ละเดือนของปี



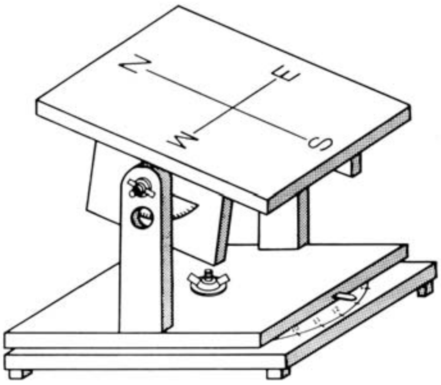
รูป 22 ผลที่ได้จากการใช้หุ่นจำลองศึกษาลักษณะของช่องเปิดและปริมาณแสงที่เข้ามาภายในอาคารในแต่ละช่วงเวลาของวัน



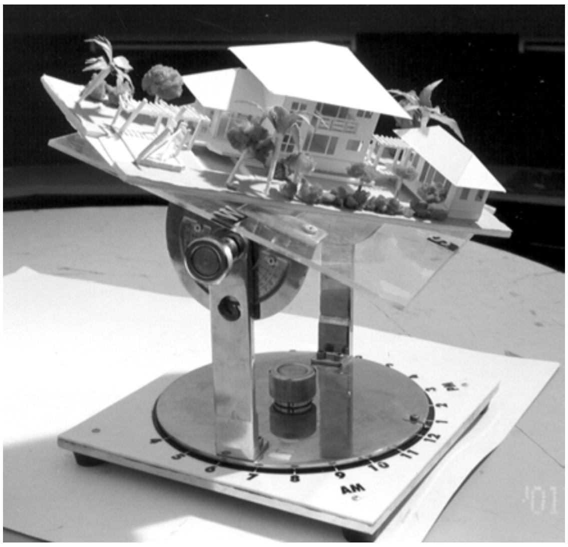
รูป 23 ลักษณะของท้องฟ้าจำลองทรงกล่องกระจกสี่เหลี่ยม



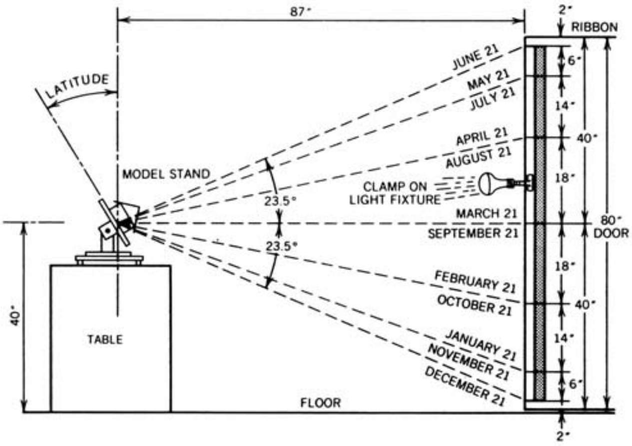
รูป 24 แสดงลักษณะและวิธีการการใช้งานท้องฟ้าจำลองทรงกล่องกระจกสี่เหลี่ยม



รูป 25 ลักษณะส่วนฐานของดวงอาทิตย์จำลองจะมีสัญลักษณ์ที่แสดงถึงทิศทาง และมุมที่เปลี่ยนไป



รูป 26 การติดตั้งหุ่นจำลองเข้ากับส่วนฐานของดวงอาทิตย์จำลอง เพื่อศึกษาทิศทางของแสง เงาตกกระทบ ฯลฯ



รูป 27 การปรับเปลี่ยนทิศทางของส่วนฐานจะสอดคล้องกับส่วนหลอดไฟที่แสดงทิศทางการโคจรของดวงทิตย์ในแต่ละเดือนของปี

- ส่วนฐาน ทำหน้าที่ยึดและปรับเปลี่ยนทิศทางของหุ่นจำลองให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการศึกษา

เครื่องมือชนิดนี้จะเน้นถึงแนวทางการออกแบบแบบใช้แสงธรรมชาติในลักษณะของท้องฟ้าโปร่ง (clear sky) ข้อดีของเครื่องมือชนิดนี้ คือ มีขนาดกระทัดรัด สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก ราคาปานกลาง และใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย [12]

7. <u>โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองสถานการณ์</u> (Computer Simulation Program) ในส่วนของการศึกษาเรื่องแสงประดิษฐ์และแสงธรรมชาติ ได้มีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อเป็นเครื่องมือในการช่วยวิเคราะห์การทำงานทางด้านสถาปัตยกรรมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วยเช่นกัน ทั้งการวิเคราะห์และคำนวณระดับความส่องสว่าง การเลือกใช้หลอดไฟ การกำหนดตำแหน่งในการติดตั้งดวงโคม การประเมินคุณสมบัติของวัสดุผนังที่ส่งผลต่อการสะท้อนแสงภายในอาคาร การออกแบบแสงเพื่อความรู้สึกทางด้านจิตใจของผู้ใช้อาคาร ฯลฯ โดยมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์หลายโปรแกรมที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน เช่น Lightscape, 3DSMAX, AutoCad, FormZ เป็นต้น

4.4 เครื่องมือในการศึกษาเรื่องคุณภาพอากาศภายในอาคาร

แม้ว่าในกระบวนการออกแบบสถาปัตยกรรมจะมีการคำนึงถึงการวางผังอาคาร การเลือกใช้วัสดุ การระบายอากาศในอาคาร ฯลฯ ที่ดีเพียงใด ก็ไม่สามารถควบคุมคุณภาพอากาศภายในอาคารให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากมลภาวะที่เกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา โดยมีสาเหตุดังนี้

- มลภาวะที่เกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อม ได้แก่ การใช้สารเคมีที่เป็นอันตราย เช่น สีทาผนัง กาว แลคเกอร์ ฯลฯ หรือเกิดจากการเปลี่ยนแปลงการเปลี่ยนแปลงการใช้พื้นที่ จำนวนผู้ใช้งานที่เพิ่มขึ้น ฝุ่นละออง ควันจากท่อไอเสียรถยนต์ เขม่าและควันจากการเผาขยะ เป็นต้น
- มลภาวะที่เกิดขึ้นจากการใช้งานภายในอาคาร เกิดขึ้นเนื่องจากตัวผู้ใช้อาคารเอง เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ที่เกิดขึ้นจากการหายใจควันบุหรี่ กลิ่นจากห้องน้ำ เชื้อโรคจากขยะมูลฝอยที่สะสมไว้ เป็นต้น

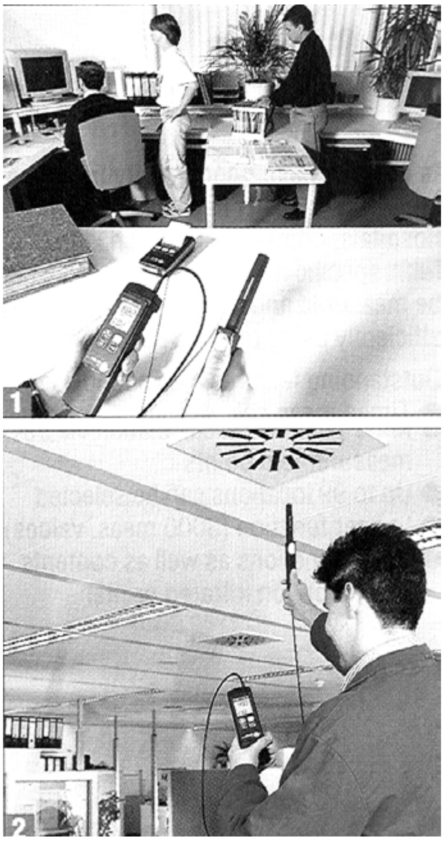
การศึกษาคุณภาพอากาศภายในอาคารนับว่าเป็นเรื่องที่สำคัญในกระบวนการออกแบบเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากผลที่เกิดขึ้นจะกระทบโดยตรงต่อผู้ใช้อาคาร เช่น อาการป่วยที่เกิดจากอาคาร (Sick Building Syndrome: SBS) เป็นสาเหตุทำให้เกิดอาการผิดปกติของร่างกายได้หลายอย่าง เช่น การเจ็บไข้ได้ป่วยอยู่ตลอดเวลา การเกิดอาการแพ้หรือระคายเคืองตามส่วนต่าง ๆ [13] โรคลีเจียนแนร์ (Legionnaire’s Disease) ซึ่งเป็นโรคที่เกี่ยวข้องกับระบบทางเดินหายใจส่วนล่างที่มีสาเหตุหลักของโรคมาจากแบคทีเรีย ที่เกิดจากหอผึ่งน้ำ (cooling tower) [14] หากปล่อยทิ้งไว้เป็นระยะเวลานาน ๆ อาจทำให้เกิดอาการร้ายแรงมากขึ้น เช่น โรคมะเร็ง จนอาจทำให้เสียชีวิตได้ วัตถุประสงค์ในการศึกษาเรื่องคุณภาพอากาศภายในอาคารแบ่งออกได้เป็น

1. การใช้เครื่องมือเพื่อเป็นแนวทางในการคำนวณและออกแบบเบื้องต้นเพื่อให้มีการระบายอากาศที่เพียงพอทั้งในแง่ของคุณภาพและปริมาณ โดยวิธีการกำหนดขนาด พื้นที่ และตำแหน่งช่องเปิดสำหรับอาคารที่ไม่ปรับอากาศ ส่วนอาคารที่มีการปรับอากาศนั้น จะใช้เป็นแนวทางในการคำนวณอัตราการระบายอากาศที่เหมาะสมของระบบปรับอากาศ

2. การใช้เครื่องมือเพื่อตรวจสอบคุณภาพอากาศภายในอาคารที่สร้างใหม่หลังจากที่ได้เริ่มมีการใช้งานแล้ว หรือทำการปรับปรุงอาคารเก่าเพื่อให้มีคุณภาพอากาศภายในอาคารเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดตามประเภทการใช้งาน

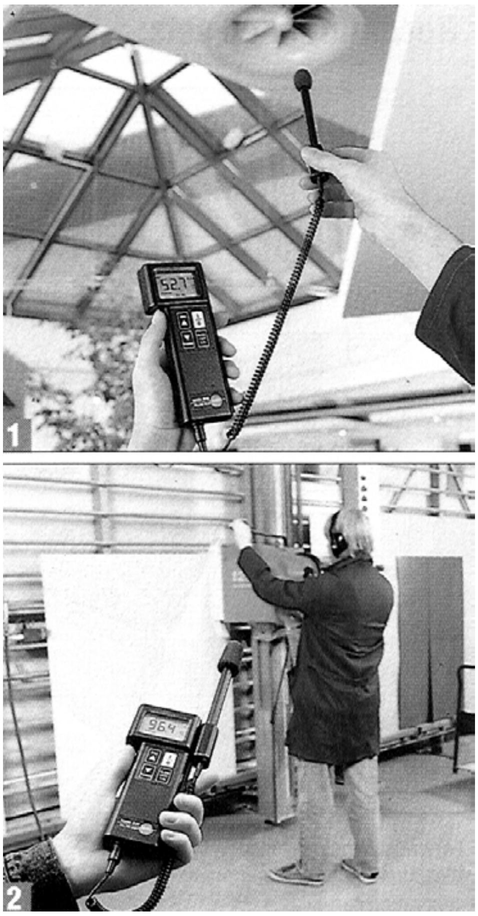
สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสามารถใช้ส่วนประมวลผลและส่วนแสดงผลร่วมกับเครื่องมือชนิดอื่น ๆ ได้ เพียงเปลี่ยนหัวรับสัญญาณให้เป็นหัวสำหรับวัดคุณภาพอากาศ (air quality meter) โดยทั่วไปมักจะวัดในพื้นที่ และตำแหน่งที่มีการใช้งานเป็นประจำ

รูป 28 แสดงลักษณะของเครื่องวัดคุณภาพอากาศภายในอาคาร



รูป 29 ลักษณะและวิธีการใช้เครื่องมือเพื่อวัดคุณภาพอากาศภายในอาคารในตำแหน่งต่าง ๆ

รูป 30 ลักษณะของเครื่องมือเพื่อวัดคุณภาพเสียงภายในอาคาร



รูป 31 ลักษณะและวิธีการใช้เครื่องมือเพื่อวัดคุณภาพเสียงภายในอาคาร เช่น การวัดเสียงที่เกิดจากระบบปรับอากาศ หรือในขณะปฏิบัติงาน

4.5 เครื่องมือในการศึกษาเรื่องคุณภาพของเสียงภายในอาคาร

เสียงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อระบบประสาทสัมผัสทั้งห้าของมนุษย์ (รูป รส กลิ่น เสียง สัมผัส) สามารถทำให้ผู้ใช้อาคารเกิดความรู้สึกที่ดีขึ้นหรือแย่ลงได้เช่นกัน ในอาคารแต่ละประเภทมีความต้องการระดับเสียงที่แตกต่างกันออกไป เช่น ในห้างสรรพสินค้าอาจต้องการเสียงดังเพื่อให้เกิดความสนุกสนานและร่าเริง ส่วนห้องประชุมและห้องสมุดต้องการความเงียบสงบและไม่มีการสะท้อนของเสียงมากเกินไปจนฟังไม่รู้เรื่อง บ้านพักอาศัยต้องการระดับเสียงที่ดังปานกลางไม่ดังหรือเงียบเกินไปจนขาดความมีชีวิตชีวา ฯลฯ ดังนั้นการออกแบบสถาปัตยกรรมจึงจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงผลกระทบของคุณภาพเสียงต่อการใช้งานด้วยเช่นกัน แหล่งกำเนิดเสียงโดยทั่วไปอาจแบ่งออกได้ดังนี้

- เสียงที่เกิดขึ้นจากลักษณะของตัวอาคาร เช่น เสียงลมที่เกิดจากระบบปรับอากาศ (fan-coils unit และ condensing unit) เสียงกระทบของบานหน้าต่างเนื่องจากโดนลมพัด ฯลฯ
- เสียงที่เกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร เช่น เสียงบีบแตร เสียงเร่งเครื่องยนต์ เสียงจากการก่อสร้าง ฯลฯ
- เสียงที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน เช่น เสียงพูดคุยของเพื่อนร่วมงาน เสียงคนเดิน เสียงวิทยุ เสียงพิมพ์งาน เสียงที่เกิดจากการทำสิ่งของตก เสียงกระทบของช้อนส้อมในโรงอาหาร ฯลฯ

วัตถุประสงค์ในการศึกษาเรื่องเสียงอาจแบ่งออกได้เป็นข้อ ๆ ดังนี้

1. เพื่อศึกษาแนวทางการป้องกันเสียง ทั้งการป้องกันเสียงจากภายนอกอาคาร และระหว่างพื้นที่ภายในอาคาร โดยจะเน้นการศึกษาในเรื่องของการเลือกใช้ฉนวนป้องกันเสียง (sound insulation) ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันโดยคำนึงถึงค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง (sound absorbtion coefficient) การกำหนดตำแหน่งในการติดตั้งที่เหมาะสมเพื่อการป้องกันการรั่วของเสียง (sound leaks) ตลอดจนการใช้ประโยชน์จากสภาพแวดล้อมได้อย่างเต็มที่

2. เพื่อศึกษาแนวทางการออกแบบเพื่อให้เสียงมีคุณภาพตามวัตถุประสงค์ โดยเริ่มต้นตั้งแต่การวางผังและการจัดวางกลุ่มอาคาร การจัดวางเครื่องเรือนการออกแบบรูปทรง (room geometry) สัดส่วนของห้อง (room proportion) ตลอดจนองค์ประกอบอื่น ๆ ภายในและภายนอกอาคาร

3. เพื่อศึกษาแนวทางการลงทุน ทำให้สามารถทราบจุดคุ้มทุนของการเพิ่มความหนาของฉนวนได้ เนื่องจากจะส่งผลเกี่ยวเนื่องกับค่าใช้จ่ายในการลงทุน วิธีการติดตั้งและก่อสร้าง การดูแลรักษา และผลตอบแทนที่ได้รับ

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาเรื่องคุณภาพของเสียงสามารถใช้ส่วนประมวลผลและส่วนแสดงผลร่วมกับเครื่องมือชนิดอื่น ๆ ได้ เพียงแต่เปลี่ยนหัวรับสัญญาณให้เป็นหัวสำหรับวัดระดับเสียง (sound level meter) เท่านั้น

5. แนวทางการประยุกต์ใช้งาน

จากรายละเอียดของลักษณะและคุณสมบัติในการใช้งานของเครื่องมือที่ได้กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นอาจกล่าวได้ว่าเครื่องมือทุกชนิดสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในทุกขั้นตอนของกระบวนการทำงานทางด้านสถาปัตยกรรม โดยไม่มีข้อจำกัดว่าจะต้องอยู่ในขั้นตอนใดเพียงขั้นตอนหนึ่งเท่านั้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการทำงานเป็นสำคัญ หากพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของเครื่องมือสมัยใหม่ร่วมกับขั้นตอนการออกแบบแล้ว จะเห็นถึงแนวทางการทำงานในแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้

5.1 การใช้เครื่องมือในขั้นกำหนดปัญหา ในขั้นตอนนี้ สามารถใช้เครื่องมือเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ การตรวจสอบหรือค้นหาสาเหตุเบื้องต้นของปัญหาที่เกิดขึ้นจากอาคารที่ใช้เป็นกรณีศึกษา (case study) เพื่อนำมาสู่การตั้งสมมติฐาน (hypothesis) ในการทำงานว่า อะไรคือสาเหตุของปัญหา จะแก้ปัญหาเหล่านั้นได้อย่างไร ด้วยวิธีใด และผลที่ได้เป็นเช่นไร สามารถแก้ปัญหาตามสมมติฐานที่ได้กำหนดไว้หรือไม่ เช่น หากต้องการปรับปรุงอาคารหลังหนึ่งให้ลดการใช้พลังงานในส่วนของระบบปรับอากาศลง จำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องมือในการตรวจสอบว่าสาเหตุหลักของการใช้พลังงานสิ้นเปลืองนั้นมาจากองค์ประกอบส่วนใดของอาคาร ในขั้นตอนการตรวจสอบเบื้องต้นอาจใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิผิวสัมผัสภายนอก และภายในของวัสดุเปลือกอาคารทุกชนิดเปรียบเทียบความแตกต่างกับอุณภูมิอากาศภายนอกและอุณหภูมิอากาศในพื้นใช้งาน เพื่อทราบถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนของวัสดุเปลือกอาคารแต่ละชนิด หากพบว่าสาเหตุหลักเกิดขึ้นเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนจากวัสดุเปลือกอาคารส่วนที่เป็นกระจก ทำให้สามารถแก้ปัญหาได้ตรงตามวัตถุประสงค์ได้มากขึ้น หรือในทำนองเดียวกัน หากต้องการออกแบบอาคารในเชิงอนุรักษ์พลังงานจะทำให้ผู้ออกแบบทราบว่าแนวทางหนึ่งในการกำหนดรูปแบบอาคารอาจทำได้โดยการลดพื้นที่เปลือกอาคารส่วนที่เป็นกระจก หรือเลือกใช้กระจกชนิดอื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติดีกว่าแทน เป็นต้น

5.2 การใช้เครื่องมือในขั้นออกแบบ จากข้อมูลหรือแนวทางการดำเนินงานในขั้นตอนที่ผ่านมา เมื่อเข้ามาสู่ขั้นตอนการออกแบบแล้ว จะต้องทำการศึกษาและประเมินทางเลือกที่เกิดขึ้นว่ามีความเหมาะสมและสอดคล้องกับลักษณะของโครงการมากน้อยเพียงใด โดยคำนึงถึงภาพรวมทั้งหมดของกระบวนการออกแบบ ไม่ว่าจะเป็นข้อจำกัดทางด้านงบประมาณการก่อสร้าง ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ระยะเวลาคืนทุน สภาพแวดล้อมของที่ตั้ง หรือข้อกำหนดอื่น ๆ โดยในขั้นตอนนี้จะเป็นการตอบคำถามที่เกิดขึ้นเพื่อให้ได้ทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด เช่น

- ความหนาหรือสีของกระจกที่แตกต่างกันจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบริหารอาคารได้หรือไม่ ถ้าหากว่าได้จะลดลงเป็นจำนวนเงินเท่าไร
- ระหว่างกระจกชั้นเดียวและกระจกสองชั้นมีพฤติกรรมในการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกันอย่างไร และกระจกแบบใดมีความเหมาะสมกับโครงการมากกว่า
- หากต้องการนำแสงธรรมชาติมาใช้งานในระยะ 5 เมตรแรกจากบริเวณช่องแสงซึ่งเป็นพื้นที่ส่วนสำนักงาน ควรจะออกแบบช่องแสงให้มีลักษณะอย่างไรจึงจะเหมาะสมมากที่สุด

- ภายในห้องมีอัตราการระบายอากาศกี่ลูกบาศก์ฟุตต่อนาทีและจะมีวิธีการปรับปรุง หรือแก้ไขอย่างไรหากการออกแบบยังไม่ตรงตามมาตรฐาน

คำถามเหล่านี้คงไม่สามารถตอบได้ในทันที แต่คงจะต้องอาศัยระยะเวลาและเครื่องมือในการทดสอบเพื่อแสวงหาคำตอบที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือ ทำให้เป็นแนวทางในการกำหนดรูปแบบอาคารได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

5.3 การใช้เครื่องมือในขั้นดำเนินการ แม้ว่าจะเสร็จสิ้นกระบวนการออกแบบ และเริ่มดำเนินการก่อสร้างอาคารขึ้นแล้วก็ตาม แต่ยังจำเป็นที่จะต้องอาศัยเครื่องมือเหล่านี้เป็นเกณฑ์ในการตรวจสอบ เปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษากับผลในขณะดำเนินก่อสร้างว่าแตกต่างกันเพียงใด หากเกิดความผิดพลาดมากจนเป็นที่น่าสังเกต จะได้รีบดำเนินการตรวจสอบและแก้ไขได้อย่างทันท่วงที นอกจากนี้ยังเป็นแนวทางการควบคุมคุณภาพของกระบวนการก่อสร้าง และการติดตั้งวัสดุให้สอดคล้องกับแนวทางการออกแบบที่ได้ทำการศึกษาไว้ เช่น การควบคุมการติดตั้งวงกบ กรอบบานกระจก ตลอดจนวัสดุยาแนวชนิดต่าง ๆ ที่สามารถควบคุมไม่ให้เกิดการรั่วซึมของอากาศ (infiltration) มากเกินไปกว่าเกณฑ์ที่ได้คำนวณไว้ซึ่งจะส่งผลต่อภาระการปรับอากาศที่มากขึ้น การตรวจสอบมุมตกกระทบของแสงและเงาที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์บังแดดของอาคารในช่วงเวลาที่แตกต่างกันว่าสามารถป้องกันแสงอาทิตย์ได้ตามที่คำนวณไว้หรือไม่

5.4 การใช้เครื่องมือในขั้นประเมินผลหลังการเข้าอยู่ จากรายละเอียดข้างต้นอาจกล่าวได้ว่าขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากต่อกระบวนการทำงานด้านสถาปัตยกรรม เนื่องจากเป็นการใช้เครื่องมือเพื่อตรวจสอบผลงานการออกแบบว่าได้ผลหรือมีประสิทธิภาพตามวัตถุประสงค์หรือไม่ เช่น การตรวจสอบการใช้พลังงานของอาคาร การตรวจสอบคุณภาพอากาศภายในอาคาร การตรวจสอบระดับความส่องสว่างในแต่ละพื้นที่ใช้งาน ฯลฯ ถ้าหากพบว่าผลที่ได้ไม่บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ก็จำเป็นที่จะต้องค้นหาว่าปัญหาเกิดขึ้นมาจากสาเหตุใด เพื่อนำข้อผิดพลาดมาเป็นแนวทางการปรับปรุงการทำงานในครั้งต่อ ๆ ไป ซึ่งจะช่วยทำให้กระบวนการออกแบบสถาปัตยกรรมเข้าสู่ระบบที่เป็นมาตรฐานและตอบสนองผู้ใช้อาคารได้อย่างแท้จริง แต่ในปัจจุบันขั้นตอนการทำงานมักยังไม่ได้ครอบคลุมถึงขั้นตอนนี้ โดยทั่วไปกระบวนการทำงานทุกอย่างมักจะสิ้นสุดเมื่อได้มีการเข้าอยู่อาศัยหรือเริ่มใช้งานอาคารไปแล้ว

6. บทสรุป

ถึงแม้ว่าสถาปนิกบางส่วนในประเทศไทยจะได้มีการใช้งานเครื่องมือเหล่านี้มาบ้างแล้ว แต่ก็ยังไม่เป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวางเท่าไรนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการขาดความสนใจ หรือขาดแรงส่งเสริมหรือแรงกระตุ้นอย่างเพียงพอที่จะทำให้เกิดความแพร่หลายในการใช้งาน หากคำนึงถึงรายละเอียดของเครื่องมือและวิธีการใช้งานที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว จะพบว่า เครื่องมือเหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบในกระบวนการทำงานทางด้านสถาปัตยกรรมในเชิงอนุรักษ์พลังงาน และเป็นที่สังเกตได้ว่าเครื่องมือส่วนใหญ่มักจะเป็นเครื่องมือทางด้านวิทยาศาสตร์แทบทั้งสิ้น อย่างน้อยคงพอที่จะแสดงให้เห็นได้ว่า ***ความหมายของ "สถาปัตยกรรม" ไม่เพียงแต่ประกอบไปด้วยความสวยงามเพียงอย่างเดียว แต่ยังต้องคำนึงถึงเหตุผลทางวิทยาศาสตร์ กระบวนการแสวงหาคำตอบที่มีขั้นตอนและหลักฐานอ้างอิง สามารถอธิบายเหตุผลหรือที่มาได้อย่างชัดเจน มากกว่าที่จะเกิดขึ้นจากการคาดเดา*** *และการที่กระบวนการทำงานสำเร็จลุล่วงตามเป้าหมายได้นั้นจำเป็นที่จะต้องอาศัยองค์ประกอบสนับสนุนด้วยกัน 3 ส่วน คือ*

<u>องค์ประกอบที่ 1</u> "บทบาทของสถาปนิก" *ในสภาพปัจจุบัน การที่สถาปนิกมีความรู้พื้นฐานเพียงวิชาใดวิชาหนึ่ง เช่น รู้แต่เรื่องของการออกแบบแต่ไม่รู้เรื่องของการบริหารจัดการทรัพยากรของอาคาร เป็นต้น อาจจะไม่เพียงพอต่อการทำงาน เนื่องจากไม่สามารถมองเห็นภาพรวมของการออกแบบได้อย่างชัดเจน ทำให้ผลงานที่ออกมามีโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดได้ง่ายขึ้น สถาปนิกจำเป็นต้องเปิดมุมมองทางความคิด ขยายบทบาททางวิชาการ และแนว-*

ทางการออกแบบในเชิงบูรณาการเพื่อประยุกต์ใช้ในการทำงานให้มีความเหมาะสมในทุก ๆ ด้าน มากกว่าบทบาทของการเป็น "นักออกแบบ" ที่คำนึงถึงเฉพาะด้านความงาม

*<u>องค์ประกอบที่ 2</u> "**กระบวนการเรียนรู้**" สถาปนิกควรที่จะรับรู้ถึงวิธีการใช้เครื่องมือในแต่ละขั้นตอนการทำงานเพื่อหาทางเลือกและคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละโครงการ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การใช้เครื่องมือสมัยใหม่ในขั้นตอนการประเมินผลหลังการเข้าอยู่เพื่อที่จะสามารถตรวจสอบและประเมินผลอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ที่สำคัญหากพบข้อผิดพลาด สถาปนิกจะต้องยอมรับ นำข้อผิดพลาดนั้นกลับไปทบทวน และปรับปรุงแก้ไขในกระบวนการทำงานครั้งต่อ ๆ ไป*

*<u>องค์ประกอบที่ 3</u> "**การประเมินผลที่ชัดเจน**" หน่วยงานที่เกี่ยวข้องและมีบทบาทต่อการประกอบวิชาชีพสถาปัตยกรรมจะต้องให้ความร่วมมือในการเผยแพร่บทบาทความสำคัญและประโยชน์ของการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ในกระบวนการออกแบบสถาปัตยกรรม ทั้งในส่วนของสถาบันการศึกษา สำนักงานสถาปนิก ผู้ผลิตวัสดุ หรือแม้แต่เจ้าของโครงการ ให้เป็นที่ยอมรับ เพื่อให้เกิดความเทียบเท่าทางด้านองค์ความรู้ และการประเมินผลในมาตรฐานเดียวกัน*

ถึงเวลาแล้วหรือยัง ที่สถาปนิกไทยจะเปลี่ยนทัศนคติ และเปิดวิสัยทัศน์ในการออกแบบสถาปัตยกรรมโดยหันมาคำนึงถึงความสำคัญและศึกษาวิธีการใช้เครื่องมือสมัยใหม่เหล่านี้อย่างจริงจัง

รายการอ้างอิง (References)

[1] วิมลสิทธิ์ หรยางกูร. (2541). <u>การจัดทำรายละเอียดโครงการเพื่อการออกแบบงานสถาปัตยกรรม</u> พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 23-44.

[2] อ่านรายละเอียดของวิธีการ และเกณฑ์ในการประเมินได้ใน

(1) กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม. (2541). <u>แนวทางในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (รายละเอียดขั้นต่ำ) สำหรับโครงการด้านที่พักอาศัย บริการ ชุมชน และสถานที่พักตาก-อากาศ.</u> กรุงเทพฯ: อินทิเกรเต็ด โปรโมชัน เทคโนโลยี.

(2) บัณฑิต จุลาสัย. (2544). สาระสำคัญบางประการในการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับงานสถาปัตยกรรม. <u>@ศาสตร์สถา, 1,</u> 67-78.

[3] อ่านรายละเอียดเพิ่มเติมในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงทางด้านแนวความคิด และกระบวนการทำงานของสถาปนิกได้ใน

(1) วิมลสิทธิ์ หรยางกูร. (2536). <u>พัฒนาการแนวความคิดและรูปแบบของงานสถาปัตยกรรม: อดีต ปัจจุบัน และอนาคต.</u> กรุงเทพฯ: สมาคมสถาปนิกสยาม.

(2) ผุสดี ทิพทัส. (2539). <u>สถาปนิกสยาม: พื้นฐาน บทบาท ผลงาน และแนวคิด (พ.ศ. 2475-2537) เล่ม 1.</u> กรุงเทพฯ: สมาคมสถาปนิกสยาม.

(3) อวิรุทธ์ ศรีสุธาพรรณ และพรรณจิรา ทิศาวิภาต. (2544). สถาปัตยกรรมกับแนวคิดในสหัสวรรษใหม่. <u>@ศาสตร์สถา, 1,</u> 35-65.

[4] อ่านรายละเอียดเพิ่มเติมของสภาวะน่าสบายใน "เขตสบาย" ได้ใน

(1) สุนทร บุญญาธิการ. (2540). <u>เทคนิคการออกแบบบ้านประหยัดพลังงานเพื่อคุณภาพชีวิตที่ดีกว่า.</u> กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 38-39, 216-220.

(2) Olgyay, V. (1973). Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism (4th ed.). New Jersey, Princeton University Press, 17-18.

[5] หากสามารถทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวโดยรอบต่ำกว่าอุณหภูมิผิวกายได้ 1 องศาเซลเซียส จะทำให้ร่างกายรู้สึกเสมือนเย็นลงกว่าปกติ 1.4 องศาเซลเซียส อ่านรายละเอียดและวิธีการคำนวณเพิ่มเติมได้ใน

(1) อ่านอ้างอิง 4(1), 142.

(2) The American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers. (1989). 1989 ASHRAE handbook fundamentals I-P edition. Georgia: ASHRAE. 13.9 – 13.10.

(3) Cowan, J. H. (Ed.). (1991). Handbook of architectural technology. New York: Van Nostrand Reinhold, 334, 374–375.

[6] ดูรายละเอียดของมาตรฐานอัตราการระบายอากาศในแต่ละประเภทพื้นที่ใช้งานได้ใน Bradshaw, V. (1993). Building control systems (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons, 577–581.

[7] อ่านอ้างอิง 4(2), 35.

[8] อ่านอ้างอิง 4(2), 20.

[9] อ่านวิธีการใช้งานเครื่องมือโดยละเอียดได้ใน

(1) มาลินี ศรีสุวรรณ. (2544). การใช้เครื่องจำลองการไหลของของไหล. คู่มือการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยทางเทคโนโลยีอาคาร, 17-21.

(2) มาลินี ศรีสุวรรณ. (2543). การศึกษาความสัมพันธ์ของทิศทางกระแสลมกับการเจาะช่องเปิดที่ผนังอาคารสำหรับภูมิ-อากาศร้อนชื้นในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: เจ. ปรินท์, ผ5–ผ8.

[10] พูลศักดิ์ เพียรสุสม. (2544). การใช้อุโมงค์ลม. คู่มือการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยทางเทคโนโลยีอาคาร, 23-36.

[11] วรวรรณ โรจนไพบูลย์. (2544). การวิจัยโดยการใช้กล่องจำลองแสงอาทิตย์. คู่มือการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยทางเทคโนโลยีอาคาร, 49-73.

[12] พรรณชลัท สุริโยธิน. (2544). การใช้อุปกรณ์จำลองการโคจรของดวงอาทิตย์. คู่มือการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยทางเทคโนโลยีอาคาร, 38-48.

[13] สมสิทธิ์ นิตยะ. (2536). ปัญหาจากการประหยัดพลังงานคุณภาพอากาศภายในอาคาร. วารสารวิชาการ คณะสถาปัตยกรรม-ศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: เทคโนโลยีและพลังงาน, 56-59.

[14] พันธุดา พุฒิไพโรจน์. (2544). ลีเจียนแนร์: โรคที่เกิดจากการออกแบบอาคารที่ไม่เหมาะสมและแนวทางการป้องกัน. @ศาสตร์สถา, 1, 10-16.

ที่มาของรูปประกอบ (Figure Credits)

รูป 1 Laseau, P. (1989). Graphic thinking for architects and designers (2nd ed.). New York: John Weily & Sons.

รูป 2, 11 Olgyay, V. (1973). Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism (4th ed.). New Jersey, Princeton University Press.

รูป 4, 5, 13, 19, 20, 28, 29, 30, 31 Testo GmbH & Co. (1999). The informative catalogue: Portable measuring instruments 1999/2000. Lenzkirch.

รูป 6 เอกสารส่งเสริมการขายของ KINETICS Corporation ltd.

รูป 7 Luft. (1999). Annual 1999. Fellbach.

รูป 8 พรรณจิรา ทิศาวิภาต. (2544). ผลของการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารผ่านช่องแสงด้านข้างที่ไม่ได้รับแสงแดดโดยตรงโดยการหมุนหลบ. สาระศาสตร์: การประชุมวิชาการประจำปี สถาปัตยกรรมและศาสตร์ที่เกี่ยวเนื่อง ครั้งที่ 4.

รูป 9 Syska & Hennessey. (1978). Energy inform: Designing for energy conservation.

รูป 10, 12 มาลินี ศรีสุวรรณ. (2543). การศึกษาความสัมพันธ์ของทิศทางกระแสลมกับการเจาะช่องเปิดที่ผนังอาคารสำหรับภูมิอากาศร้อนชื้นในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: เจ. ปรินท์.

รูป 14 สมสิทธิ์ นิตยะ. (2540). เอกสารประกอบการบรรยาย โครงการศึกษาต่อเนื่อง สาขาวิชาเทคโนโลยีอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รูป 15 Field, M. (1999). Future system. London: Phaidon Press.

รูป 17 ฝ่ายวิจัยการก่อสร้าง, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. แสงอาทิตย์และเงาที่เกี่ยวข้องกับอาคาร.

รูป 21, 24, 25, 27 Lechner, N. (1991). Heating, cooling, lighting: Design methods for architects. New York: John Wiley & Sons.

รูป 22 Stein, B., & Reynolds, J. S. (2000). Mechanical and electrical equipment for buildings (9^{th} ed.). New York: John Weily & Sons.

รูป 23 วรวรรณ โรจนไพบูลย์. (2544). การวิจัยโดยการใช้กล่องจำลองแสงอาทิตย์. คู่มือการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยทางเทคโนโลยีอาคาร.