

บทความปริทรรศน์: อาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์

Review Article: Zero Energy Building

ชนิกานต์ ยิ้มประยูร

Chanikarn Yimprayoon

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

E-mail: arcccks@ku.ac.th

บทคัดย่อ

อาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ (Zero Energy Building: ZEB) คือ อาคารที่ออกแบบให้ใช้ประโยชน์จากธรรมชาติเพื่อลดการใช้พลังงานในอาคาร มีการประหยัดพลังงานในระบบต่าง ๆ และการผลิตพลังงานเองได้เท่ากับหรือมากกว่าพลังงานที่ใช้ในอาคาร การออกแบบอาคารขนาดกลางและขนาดใหญ่ให้ใช้พลังงานเป็นศูนย์เป็นเป้าหมาย 15-20 ปี ในอนาคต อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีที่พัฒนาอย่างรวดเร็วและความมุ่งมั่นของเจ้าของอาคารรวมทั้งผู้ออกแบบ ทำให้ปัจจุบันเริ่มมีอาคารขนาดใหญ่ที่ประสบความสำเร็จในการออกแบบอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์เกิดขึ้นในต่างประเทศซึ่งเร็วกว่าที่คาดหมายหลายปี บทความนี้สำรวจแนวทางที่สามารถใช้ในการออกแบบอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์สำหรับประเทศไทยและแสดงให้เห็นว่า การออกแบบอาคารประเภทนี้มีความเป็นไปได้ในอาคารขนาดใหญ่ทั่วไปด้วยเทคโนโลยีปัจจุบันและมีความคุ้มค่าในการลงทุน พร้อมทั้งนำเสนอทิศทางการวิจัยที่ต้องการเพิ่มเติมสำหรับการออกแบบอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ในภูมิภาคร้อนชื้นในอนาคต

คำสำคัญ

อาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์

อาคารประหยัดพลังงาน

พลังงานหมุนเวียนในอาคาร

Abstract

Zero Energy Building (ZEB) is a building designed to make use of natural free resources in order to reduce energy use in building, install energy efficient systems, and generate energy from renewable sources equal to or more than energy used in the project. Medium and large scale, cost effective zero energy buildings are expected to be viable in the next 15-20 years. However, rapid building technology development and determined building owners and designers had made medium and large scale buildings become successful today. This paper explored design guidelines applicable for zero energy building in Thailand and demonstrate that cost effective and repeatable zero energy buildings could be possible. Future research opportunities in the field of zero energy building design in the tropic are also identified.

Keywords

Zero Energy Building

Energy Efficient Building

Renewable Energy in Buildings

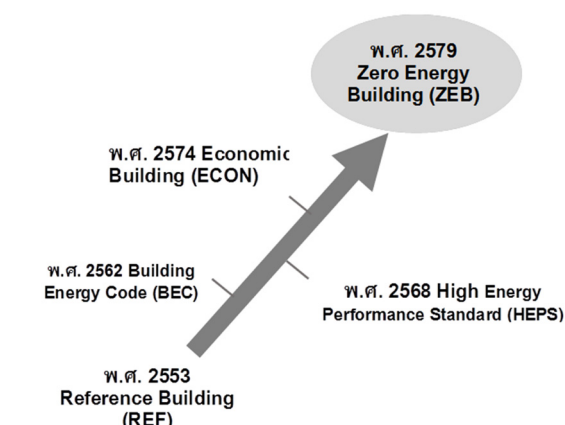
1. บทนำ

การใช้ทรัพยากรต่าง ๆ ของโลกปัจจุบันในรอบ 1 ปี มีปริมาณที่มากเกินไปกว่าที่จะสามารถผลิตทดแทนได้ทัน ส่งผลให้ทรัพยากรของโลกหมดลงไปเรื่อย ๆ (World Wildlife Fund [WWF], 2016) การพัฒนาอย่างไม่ระมัดระวัง ยังก่อให้เกิดปัญหามลพิษและการทำลายสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ปัญหาโลกร้อนที่ส่วนหนึ่งเกิดจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ทำให้เกิดกระแสการพัฒนาที่ยั่งยืนขึ้น ทั้งนี้ การพัฒนาที่ยั่งยืน คือ “การพัฒนาที่สามารถสนองความต้องการที่จำเป็นของประชากรปัจจุบันโดยไม่ทำให้ประชากรรุ่นต่อไปในอนาคตต้องประนี-ประนอมยอมเสียความสามารถในการที่จะตอบสนองความต้องการที่จำเป็นของตนเอง” (World Commission on Environment and Development [WCED], 1987; Panyakaew & Yimprayoon, 2016)

แนวทางการออกแบบอาคารที่ยั่งยืนนั้นคือการใช้ทรัพยากรเพื่อการก่อสร้างและใช้งานอาคารอย่างประหยัด คำนึงถึงผลกระทบต่อผู้อยู่อาศัย มีมูลค่าการลงทุนที่เหมาะสม และคำนึงถึงบริบททางสังคมและวัฒนธรรมของที่ตั้งอาคาร เกณฑ์การประเมินอาคารที่ยั่งยืนส่วนใหญ่จะให้คะแนนหมวดของการใช้พลังงานในอาคารเป็นสัดส่วนที่สูงที่สุด เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในอาคารส่วนใหญ่มักใช้หรือผลิตจากเชื้อเพลิงซากฟอสซิล ได้แก่ น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติและถ่านหิน ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการลดลงของทรัพยากรมากกว่าอย่างอื่น กองทุนสัตว์ป่าโลกสากล (World Wide Fund for Nature - WWF) ได้ศึกษาการใช้พลังงานของโลกและตั้งเป้าหมายว่าภายในปี ค.ศ. 2050 โลกจะต้องใช้พลังงานทั้งหมดจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน โดยในรายงานดังกล่าวได้เสนอว่าเป้าหมายนี้สามารถเป็นไปได้และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ (World Wildlife Fund [WWF], 2011)

การใช้พลังงานในอาคารที่ยั่งยืนต้องเป็นไปอย่างประหยัดและคุ้มค่า เทคโนโลยีในการออกแบบอาคารในปัจจุบันสามารถลดการใช้พลังงานในอาคารขนาดใหญ่ลงได้ถึง 50% (National Renewable Energy Laboratory [NREL], 2010) แต่หากจะลดลงมากกว่านี้ จำเป็นจะต้องมีการผลิตพลังงานโดยใช้เชื้อเพลิงหมุนเวียนภายในบริเวณโครงการร่วมกับการซื้อพลังงานที่ผลิตจากเชื้อเพลิงหมุนเวียนจากนอกโครงการด้วย (Architecture 2030, 2008; USGBC Research Committee, 2008) แนวทางนี้

ถูกเรียกว่าการออกแบบอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ (Zero Energy Building: ZEB) สำหรับประเทศไทยนั้น แผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปีของประเทศ (National Energy Efficiency Plan: EEP) ซึ่งเป็นแผนแม่บทในการอนุรักษ์พลังงานที่มีเป้าหมายในการลดความเข้มของการใช้พลังงาน (energy intensity) ลงร้อยละ 30 ในปี พ.ศ. 2579 เมื่อเทียบกับปี พ.ศ. 2553 (Ministry of Energy, 2015) ได้ตั้งเป้าหมายในส่วนอาคารอนุรักษ์พลังงานให้มุ่งสู่อาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ ภายใน ปี พ.ศ. 2579 (รูปที่ 1) ผลงานวิจัยและตัวอย่างอาคารขนาดกลางและขนาดใหญ่ที่ประสบความสำเร็จในการเป็นอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ ในต่างประเทศแสดงให้เห็นว่าการออกแบบก่อสร้างอาคารดังกล่าวสามารถเป็นไปได้ด้วยเทคโนโลยีปัจจุบันและมีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ (Adhikari, Aste, Pero & Manfren, 2012; Garde et al., 2014; Hootman, 2013; Reeder & Ebsco, 2016)



รูปที่ 1 แผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี พ.ศ. 2558 - พ.ศ. 2579 ได้กำหนดเป้าหมายส่งเสริมการออกแบบอาคารให้เป็นอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ภายในปี พ.ศ. 2579 (Thailand 20-Year Energy Efficiency Development Plan (2015-2036) has a long-term target to support zero energy building design and make them a normal practice within 2036.)

บทความนี้สำรวจแนวทางการออกแบบอาคารเพื่อมุ่งสู่อาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ที่เหมาะสมกับอาคารในประเทศไทยซึ่งมีภูมิอากาศร้อนชื้น อาคารส่วนใหญ่ใช้ไฟฟ้าเป็นพลังงานหลัก และมักมีระบบปรับอากาศเป็นระบบที่ใช้พลังงานมากที่สุดของอาคาร ปัจจุบันความสนใจในการออกแบบอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์เริ่มมีเพิ่มขึ้นและมีอาคารที่ประสบความสำเร็จในการเป็นอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ในประเทศไทยแล้วแต่เป็นอาคารขนาดเล็ก สำหรับอาคารขนาดกลางและขนาดใหญ่นั้น แม้มีความ

ท้าทายค่อนข้างมากแต่ก็สามารถเป็นไปได้ บทความนำเสนอเทคนิคการออกแบบและผลจากงานวิจัยเพื่อกำหนดแนวทางเบื้องต้น พร้อมตัวอย่างอาคารที่ประสบความสำเร็จทั้งในและต่างประเทศ และเสนอแนวทางการวิจัยเพิ่มเติมเพื่อการออกแบบอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ในประเทศไทยในอนาคต

2. ความหมายของอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์

อาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ (Zero Energy Building: ZEB) ได้แก่ อาคารที่มีการใช้พลังงานน้อยกว่าอาคารทั่วไปประเภทเดียวกันอย่างมากโดยใช้ประโยชน์จากธรรมชาติและระบบอาคารที่ประหยัดพลังงาน และมีระบบผลิตพลังงานใช้เองในอาคารจากเชื้อเพลิงหมุนเวียน (renewable energy) โดยพลังงานที่ผลิตขึ้นเองนี้จะเท่ากับหรือมากกว่าพลังงานที่อาคารใช้ในรอบ 1 ปี อาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ส่วนใหญ่โดยเฉพาะอาคารขนาดใหญ่จะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานหมุนเวียนทั้งปีของอาคารเข้ากับระบบสายส่งไฟฟ้า (electrical grid connected) โดยอาจใช้ไฟฟ้าที่มาจากระบบสายส่งไฟฟ้าเมื่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนภายในโครงการผลิตไฟฟ้าได้ไม่พอในบางช่วงเวลา และอาจส่งไฟฟ้าที่ผลิตเองออกไปยังระบบสายส่งไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ผลิตได้มากกว่าความต้องการของโครงการ

Torcellini และคณะ (Torcellini, Pless, Deru & Crawley, 2006) ได้เสนอว่า คำจำกัดความที่ชัดเจนและสามารถวัดได้นั้น มีความสำคัญมากกับการออกแบบอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ โดยส่งผลการกับทางเลือกในการออกแบบเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้และใช้ในการพิสูจน์ว่าการออกแบบนั้นสำเร็จตามเป้าหมายหรือไม่ เนื่องจากผู้ที่เกี่ยวข้องกับโครงการอาจจะมีเป้าหมายที่ไม่เหมือนกัน ตัวอย่างเช่น เจ้าของอาคารอาจสนใจค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของอาคาร ผู้ออกแบบอาจสนใจปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในอาคาร หน่วยงานของรัฐที่มีหน้าที่ดูแลทางด้านพลังงานอาจสนใจการใช้พลังงานในภาพรวมระดับชุมชนหรือภูมิภาค และหน่วยงานของรัฐที่มีหน้าที่ดูแลทางด้านสิ่งแวดล้อมอาจสนใจการปลดปล่อยมลพิษของอาคาร ความหมายของอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ที่ใช้มาก ได้แก่

- **การใช้พลังงานสุทธิที่อาคารเป็นศูนย์ (Net zero site energy – site ZEB)** คือการที่อาคารใช้พลังงานหมุนเวียนในโครงการเท่ากับหรือมากกว่าพลังงานที่อาคารใช้ในรอบปี โดยทั่วไปเมื่อพูดถึง “อาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์” มักจะใช้ในความหมายนี้ คือเป็นการใช้พลังงานสุทธิที่โครงการเป็นศูนย์ (site ZEB) เนื่องจากเข้าใจได้ง่ายและยังคำนวณได้ง่ายอีกด้วย

- **การใช้พลังงานสุทธิ ณ สถานที่ผลิตพลังงานเป็นศูนย์ (Net zero source energy – source ZEB)** คือ การที่อาคารใช้พลังงานหมุนเวียนเท่ากับหรือมากกว่าพลังงานที่อาคารใช้ในรอบ 1 ปีเมื่อคำนวณที่แหล่งที่ผลิตพลังงาน ดังนั้นสำหรับพลังงานไฟฟ้าที่มาจากระบบสายส่งนั้นจะต้องรวมประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทเชื้อเพลิงและวิธีการที่ใช้ผลิตไฟฟ้า และพลังงานที่สูญเสียไประหว่างการขนส่งด้วย พลังงานที่ใช้ผลิตไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้ามีค่ามากกว่าพลังงานไฟฟ้าที่โครงการไม่ต่ำกว่า 3 เท่าตามทฤษฎี อาคารที่วัดความสำเร็จด้วย source ZEB จึงต้องมีการประหยัดพลังงานและผลิตพลังงานจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มากกว่าอาคารที่วัดความสำเร็จด้วย site ZEB และต้องมีการหาอัตราส่วนที่จะนำมาใช้แปลงค่า site ZEB ให้เป็น Source ZEB ที่ถูกต้องเหมาะสม

- **การมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (Net zero energy costs – cost ZEB)** คือการที่อาคารสามารถขายพลังงานที่ผลิตได้คือมีรายรับเท่ากับค่าใช้จ่ายพลังงานที่ใช้ไปในรอบ 1 ปี

- **การปล่อยมลพิษจากการผลิตพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (Net zero energy emissions – emission ZEB)** คือการที่อาคารสามารถผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงหมุนเวียนที่ไม่มีมลพิษ โดยสามารถลดมลพิษได้เท่ากับมลพิษที่เกิดขึ้นจากการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงที่ก่อให้เกิดมลพิษที่โครงการทั่วไปใช้ สำหรับการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วยการผลิตพลังงานไฟฟ้า สำหรับโครงการทั่วไปมีค่าเท่ากับ 0.5897 tCO₂/MWh (Thailand Greenhouse Gas Management Organization [TGO], 2014)

Pless และ Torcellini (2010) ยังได้แบ่งประเภทของอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ออกเป็น 4 ระดับ ได้แก่

- **ระดับ A** อาคารที่มีระบบผลิตพลังงานหมุนเวียนบนอาคาร

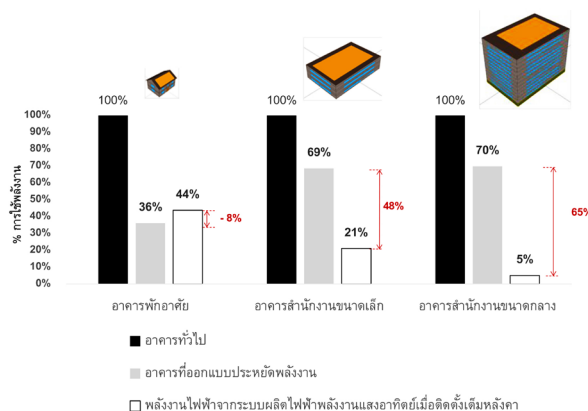
- **ระดับ B** อาคารที่มีระบบผลิตพลังงานหมุนเวียนในพื้นที่โครงการ

- **ระดับ C** อาคารที่มีการซื้อเชื้อเพลิงหมุนเวียน เช่น ชีวมวล จากภายนอกโครงการเพื่อมาผลิตพลังงาน

- **ระดับ D** อาคารที่มีการซื้อพลังงานหมุนเวียนที่ผลิตภายนอกโครงการมาใช้

3. ความท้าทายของการออกแบบอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์

ปัจจุบันการออกแบบอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ประสบความสำเร็จและมีตัวอย่างอาคารที่เป็นอาคารขนาดเล็กหลายอาคาร อย่างไรก็ตามสำหรับอาคารขนาดกลางและขนาดใหญ่ นั้นใช้พลังงานมากและมีการใช้งานและระบบอาคารที่ซับซ้อนขึ้น การลดการใช้พลังงานในอาคารขนาดกลางและขนาดใหญ่จึงมักจะท้าทายกว่าอาคารขนาดเล็ก ในการที่จะต้องลดการใช้พลังงานด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่ซับซ้อนขึ้นและต้องนำพื้นที่ผนัง หลังคา และบริเวณโดยรอบอาคารมาติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนให้ได้มากที่สุดและมีประสิทธิภาพที่สุด รูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าอาคารขนาดกลางนั้น หากออกแบบโดยใช้แนวทางทั่วไป แม้จะมีการประหยัดพลังงานและใช้พื้นที่หลังคาทั้งหมดติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ก็ยังไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้พอเพียงได้โดยง่าย (Yimprayoon, 2013)



รูปที่ 2 การออกแบบอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์สามารถทำได้ในอาคารขนาดเล็ก แต่ยังมีความท้าทายสำหรับการออกแบบอาคารขนาดกลางและขนาดใหญ่ (Designing small zero energy buildings is now possible. However, designing medium and big zero energy buildings is still challenging.)

การออกแบบอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์นั้น ขั้นตอนแรกคือต้องประเมินพื้นที่ใช้สอยและปริมาณพลังงานที่นำจะสามารถออกแบบให้ใช้ต่อไปได้ต่ำที่สุดต่อตารางเมตร จากนั้นจึงคำนวณพื้นที่ที่ต้องการเพื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้ปริมาณตามที่ต้องการต่อปี ท้ายที่สุดคือการหาความเป็นไปได้ว่าจะสามารถออกแบบให้อาคารมีพื้นที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนตามที่ต้องการได้หรือไม่ หากเป็นไปได้จึงเริ่มขั้นตอนออกแบบละเอียดต่อไป โดยขั้นตอนที่สำคัญสองขั้นตอนที่ต้องทำตั้งแต่ช่วงเริ่มต้น โครงการ (Garde et al., 2014) ได้แก่

1. การวิเคราะห์แนวทางการออกแบบอาคารเพื่อการประหยัดพลังงานในอาคารและการลงทุน

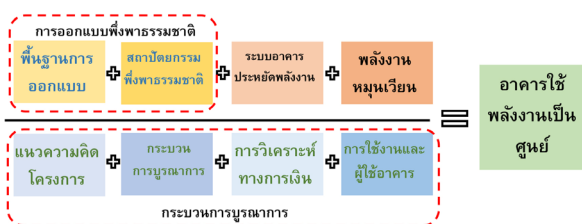
2. การวิเคราะห์ศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าของโครงการ

การวิเคราะห์แนวทางในการออกแบบอาคารขนาดกลางและขนาดใหญ่ นั้น มักมีความซับซ้อนและต้องใช้โปรแกรมจำลองการใช้พลังงานในอาคารเพื่อช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของอาคารและระบบประกอบอาคาร รวมทั้งการทำนายประสิทธิภาพและผลประหยัดเพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจทางเลือกต่าง ๆ ของการออกแบบ สำหรับประเทศไทย การออกแบบอาคารตามที่กฎหมายพลังงานกำหนดนั้นสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารต่อปีได้ประมาณ 10-20% (Chirattananon, Chaiwivatworakul, Hien, Rakkwamsuk & Kubaha, 2010) หากจะลดการใช้พลังงานลงไปอีกสามารถเพิ่มเติมมาตรการอื่น ๆ นอกเหนือจากที่กฎหมายกำหนดได้ แต่ปัญหาที่มักพบในการออกแบบอาคารขนาดกลางหรือขนาดใหญ่ให้เป็นอาคารประหยัดพลังงานในประเทศไทยคือ มักไม่มีการวิเคราะห์อาคารแบบประสานระบบโดยใช้เครื่องมือในการประเมินการใช้พลังงานในอาคารเพื่อให้ได้มาตรการและแนวทางการออกแบบอาคารที่สามารถลดการใช้พลังงานได้มากขึ้น เนื่องจากเวลาที่จำกัดและไม่มีบุคลากรที่สามารถใช้งานโปรแกรมจำลองการใช้พลังงานในอาคารที่มีความซับซ้อนได้ ส่วนใหญ่วิศวกรที่ง่ายไม่ต้องการการวิเคราะห์แบบองค์รวม และลงทุนต่ำ หรือมาตรการที่มีอาคารอื่นทำสำเร็จจนเป็นปกติแล้วเท่านั้นที่มักจะถูกนำไปใช้งานจริง (Yimprayoon, 2015b) นอกจากนี้ การออกแบบก่อสร้างอาคารส่วนใหญ่ในประเทศไทยยังมักเป็นการทำงานแบบแยกส่วนตามขอบเขตของวิชาชีพ ไม่มีกระบวนการแบบบูรณาการตั้งแต่เริ่มต้นโครงการ

4. แนวทางในการออกแบบอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์

ประเทศไทยซึ่งตั้งอยู่ในเขตอากาศร้อนชื้น อาคารส่วนใหญ่ใช้ไฟฟ้าเป็นพลังงานหลักเพื่อการทำความร้อนให้ผู้ใช้อาคารนั้น การออกแบบอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ต้องประกอบไปด้วยพื้นฐานการออกแบบอาคารที่จะต้องเน้นไปที่การป้องกันความร้อนไม่ให้เข้าอาคาร และการพึ่งพาธรรมชาติเพื่อใช้ประโยชน์จากพลังงานที่ได้มาโดยไม่ต้องซื้อ เช่น ความเย็นจากลมธรรมชาติ น้ำ ต้นไม้ และพื้นดิน แสงสว่างธรรมชาติ และความร้อนจากรังสีอาทิตย์ เพื่อให้อาคารลดการพึ่งพาไฟฟ้า จึงมักพบว่าอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์เป็นอาคารที่มีความลึกไม่มาก (ไม่เกิน 12 เมตร) โดยอาจเป็นอาคารที่แคบหรือเป็นอาคารที่มีโถงตรงกลาง (atrium) เพื่อที่จะใช้ประโยชน์จากแสงและลมธรรมชาติ และมีการใช้พัดลมเพดาน

เมื่อได้อาคารที่ดีแล้วจึงเลือกใช้ระบบประกอบอาคารที่มีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงาน และออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน กระบวนการออกแบบอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์นี้จะประสบความสำเร็จต้องใช้กระบวนการแบบบูรณาการ (integrated process) (รูปที่ 3) ผู้ที่มีความสำคัญที่สุดที่จะทำให้การออกแบบอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์มีความสำเร็จคือ เจ้าของอาคาร ที่จะต้องมีความมุ่งมั่นและกำหนดเป้าหมายที่ชัดเจน เนื่องจากอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์นั้นเป็นกระบวนการที่ต่อเนื่องเกี่ยวข้องกับทั้งการออกแบบอาคาร การใช้งานอาคาร และการประเมินผลอาคารในช่วงใช้งานในแต่ละปี



รูปที่ 3 แนวความคิดในการออกแบบอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ (Zero energy building design concept.) (Hootman, 2013).

4.1 กระบวนการบูรณาการ (Integrated process)

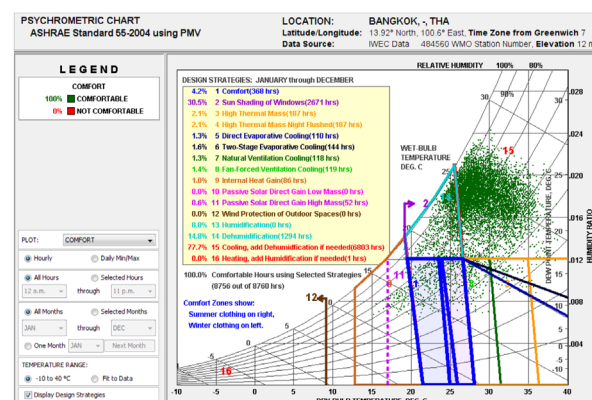
กระบวนการออกแบบก่อสร้างอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ให้ประสบความสำเร็จนั้นจะต้องเป็นกระบวนการแบบบูรณาการ (integrated process) คือ เจ้าของอาคาร ผู้ออกแบบงานสถาปัตยกรรมและภูมิสถาปัตยกรรม ผู้ออกแบบงานระบบประกอบอาคาร ผู้รับเหมาก่อสร้าง และที่ปรึกษาต่าง ๆ ทำงานร่วมกันตั้งแต่เริ่มต้น (Hootman,

2013) เนื่องจากการออกแบบอาคารโดยเฉพาะอาคารขนาดใหญ่ที่มีระบบซับซ้อนให้ประหยัดพลังงานมาก ๆ นั้น ต้องอาศัยความรู้หลายสาขา ต้องให้ทุกฝ่ายมีความเข้าใจร่วมกัน มีเป้าหมายร่วมกัน และต้องส่งต่อข้อมูลกันระหว่างแต่ละฝ่ายกลับไปกลับมาเพื่อการประเมินผลและการตัดสินใจต่าง ๆ ตลอดกระบวนการ

4.2 การออกแบบพึ่งพาธรรมชาติ

4.2.1 พื้นฐานการออกแบบ: การวิเคราะห์สภาพภูมิอากาศ

การวิเคราะห์สภาพภูมิอากาศทำให้สามารถทราบถึงวิธีการออกแบบที่เหมาะสมกับภูมิภาคนั้น ๆ ปัจจุบันมีเครื่องมือวิเคราะห์สภาพอากาศที่สามารถใส่ข้อมูลภูมิอากาศลงไปให้วิเคราะห์ได้ เช่น โปรแกรม Climate Consultant ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก <http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/climate-consultant/request-climate-consultant.php> เมื่อใส่ข้อมูลภูมิอากาศเข้าไป จะได้ผลเป็นกราฟแสดงภาพรวมสภาพภูมิอากาศสำหรับภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร จะพบว่าตั้งอยู่ในเขตร้อนชื้น มีปริมาณรังสีอาทิตย์มาก มีฝนตกชุก และมีปริมาณลมน้อยถึงปานกลาง โปรแกรมยังสามารถวิเคราะห์สภาพอากาศในแต่ละชั่วโมงว่าจะต้องออกแบบอาคารอย่างไรผู้ใช้อาคารจึงจะมีสภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิ (thermal comfort) โดยพบว่าสำหรับกรุงเทพมหานครต้องใช้ลม การบังรังสีอาทิตย์ และการปรับอากาศช่วย (รูปที่ 4) ลักษณะนี้จะคล้ายกับสภาพภูมิอากาศของภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งจะแตกต่างกับอาคารที่ตั้งอยู่ในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีฤดูหนาวที่ยาวนานกว่าและอุณหภูมิที่ต่ำกว่า



รูปที่ 4 การวิเคราะห์ภูมิอากาศของกรุงเทพมหานครและแนวทางการออกแบบอาคาร วิเคราะห์โดยโปรแกรม Climate Consultant (Bangkok climate analysis and design guidelines using Climate Consultant 6.0, available free of charge at <http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/climate-consultant/request-climate-consultant.php>.)

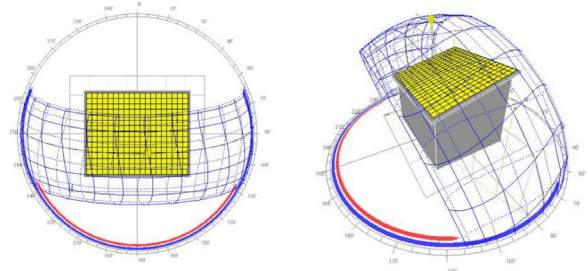
โปรแกรม Climate Consultant ได้สรุปแนวทางการออกแบบอาคารเบื้องต้นจากข้อมูลภูมิอากาศกรุงเทพมหานคร ดังนี้

- 1) ใช้ระบบปรับอากาศแต่จะต้องใช้ควบคู่กับการออกแบบอาคารให้ไม่มีความร้อนเกิดขึ้นภายในมากเกินไป
- 2) หน้าต่างต้องมีแผงกันแดดโดยออกแบบตามตำแหน่งที่ตั้งและทิศทางของอาคาร แผงกันแดดนี้อาจปรับให้ยื่นยาวได้มากน้อยตามฤดูกาล
- 3) ตั้งอุณหภูมิห้องที่มีการปรับอากาศให้สูงขึ้นเพื่อให้เครื่องปรับอากาศทำงานน้อยลงและประหยัดพลังงาน
- 4) อาคารที่ไม่มีการปรับอากาศในเขตร้อนชื้นมักใช้วัสดุรอบอาคารที่มีน้ำหนักเบา
- 5) ควรมีช่องเปิดมากและสามารถเปิดปิดช่องเปิดได้ มีระเบียงที่มีหลังคาบังแดดกันฝนและยกสูงจากพื้นดิน
- 6) ใช้เพดานสูงและหน้าต่างที่สามารถเปิดปิดได้
- 7) เลือกใช้กระจกประสิทธิภาพสูง
- 8) พยายามออกแบบอาคารให้มีกระจกทางด้านทิศตะวันตกน้อย เพื่อกันรังสีอาทิตย์เข้าอาคาร
- 9) พยายามออกแบบให้กระจกส่วนใหญ่อยู่ทางด้านทิศเหนือและมีแผงกันแดดแนวตั้ง
- 10) ปลูกต้นไม้เพื่อให้ร่มเงาแก่อาคารทางด้านทิศตะวันตก
- 11) ใช้เครื่องปรับอากาศประสิทธิภาพสูง
- 12) ออกแบบอาคารให้ใช้พื้นที่คุ้มค่าและมีขนาดที่เหมาะสม
- 13) วางช่องเปิดให้รับลมประจำและมีการกันแดด
- 14) กรอบอาคาร (ผนัง หลังคา) ควรมียี่สิบ
- 15) มีระเบียงที่มีการกันแดดและติดมุ้งลวดกันแมลง
- 16) สำหรับอาคารที่ต้องการใช้ลมธรรมชาติต้องออกแบบอาคารให้แคบและยาว
- 17) ใช้พัดลมเพดานช่วยในวันที่ไม่ร้อนมากเพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศ
- 18) ใช้ความเย็นจากดินโดยการทำชั้นใต้ดิน หรือมีท่อนำลมเย็นจากใต้ดินขึ้นมาใช้
- 19) ใช้หลังคาทรงสูงที่มีช่องว่างอากาศ สามารถกันแดดกันฝนได้ดี
- 20) หากดินมีความชื้นมากควรยกพื้นสูงเพื่อป้องกันความชื้นเข้าอาคาร

4.2.2 พื้นฐานการออกแบบ: รูปทรงและการวางทิศทางอาคาร

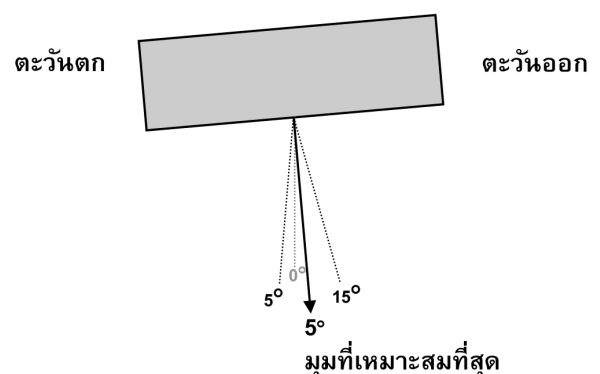
ประเทศไทยตั้งอยู่เหนือเส้นศูนย์สูตร กรุงเทพมหานครตั้งอยู่ที่ประมาณละติจูดที่ 14 องศาเหนือ ทำให้มี

ทางเดินของดวงอาทิตย์อ้อมได้ 9 เดือน และอ้อมเหนือ 3 เดือน (รูปที่ 5)



รูปที่ 5 แนวทางเดินของดวงอาทิตย์ (Sun path diagram) ของกรุงเทพมหานคร ภาพจากโปรแกรม Ecotect (Bangkok sun path diagram, image from Ecotect software.)

รังสีอาทิตย์ด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกจะร้อนและป้องกันยาก การจัดวางอาคารจะต้องวางหลบรังสีอาทิตย์ไม่ให้เข้าอาคาร จึงนิยมนวางอาคารตามตะวันคือการวางอาคารหันด้านยาวไปทางทิศเหนือและใต้ เพื่อให้ด้านแคบรับแสงแดดด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตก ทั้งยังเป็นการหันอาคารรับลมประจำที่ส่วนใหญ่จะมาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ด้วย Olgay และ Olgay (1963) ได้เสนอว่าอาคารในภูมิอากาศร้อนชื้น ควรวางอาคารตามตะวัน โดยยอมให้เส้นตั้งฉากของผนังอาคารด้านทิศใต้หันไปทางทิศตะวันตกได้ไม่เกิน 5 องศา และหันไปทางทิศตะวันออกได้ไม่เกิน 15 องศา เนื่องจากตอนช่วงหลัง 12:00 น. อุณหภูมิจะร้อนกว่าช่วงเช้า จากการที่สิ่งแวดล้อมดูดซับความร้อนและสะสมความร้อนไว้ตั้งแต่เช้าและเริ่มคายความร้อนออกมา จึงควรวางอาคารหลบรังสีอาทิตย์ช่วงหลัง 12:00 น. ซึ่งจะเพิ่มความร้อนให้กับอาคาร (รูปที่ 6)

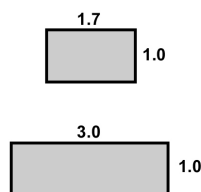


รูปที่ 6 ทิศทางวางอาคารแบบตามตะวันสำหรับภูมิอากาศร้อนชื้น ช่วยลดความร้อนเข้าอาคารและส่งเสริมให้ลมประจำเข้าอาคาร (Orient buildings to minimize sun exposure and promote ventilation by placing the long axis toward north and south orientations and short axis toward east and west orientation.) (Olgay & Olgay, 1963).

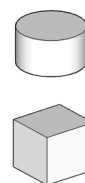
อย่างไรก็ตาม ข้อมูลภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร จากหลายแหล่ง เช่น ข้อมูล Bangkok 484560 IWEBC ซึ่งเป็นข้อมูลภูมิอากาศ ระหว่างปี พ.ศ. 2525 - 2542 (ค.ศ. 1982 - ค.ศ. 1999) ข้อมูลปริมาณรังสีอาทิตย์จากการตรวจวัดโดยสำนักพัฒนารังสีอาทิตย์ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ปี พ.ศ. 2556 และ ปี พ.ศ. 2557 (ตารางที่ 1) ต่างแสดงให้เห็นสอดคล้องตรงกัน คือ ปริมาณรังสีอาทิตย์ช่วงก่อนเวลา 12:00 น. โดยรวมตลอดปีจะมีมากกว่าช่วงหลัง 12:00 น. ในทุกชุดข้อมูล ทำให้ผลการจำลองการใช้พลังงานในอาคารที่ปรับอากาศในประเทศไทย ในกรณีที่มีกระจกเยาะและมีการกันแดดไม่มาก หากวางด้านยาวเฉียงไปทางทิศตะวันออกกลับจะมีปริมาณค่าไฟฟ้าจากการปรับอากาศเพิ่มมากขึ้น (Jamnongded & Srisutapan, 2015) จึงควรมีการทบทวนเพิ่มเติมว่าอาคารที่มีคุณลักษณะรอบอาคารที่แตกต่างกันแบบใด ควรจะเฉียงไปทางด้านทิศตะวันออกและแบบใดควรจะเฉียงไปทางด้านทิศตะวันตก

สำหรับอาคารที่ใช้การระบายอากาศธรรมชาติ ควรเลือกรูปทรงอาคารที่วางซ้อนกันทั้งในผังและในรูปตัด โดยมีช่องว่างให้อากาศผ่านระหว่างห้อง หรือระหว่างชั้นที่ใช้กันรังสีอาทิตย์ (Tantasavasdi, Chenvidyakarn & Pichaisak, 2011) สัดส่วนอาคารควรแคบและยาวโดยสัดส่วนด้านแคบต่อด้านยาวของอาคารที่เหมาะสมคือ 1:1.7 - 1:3 (Olgyay & Olgyay, 1963) หากอาคารใช้การปรับอากาศเป็นหลัก รูปทรงอาคารจะต้องพยายามให้มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดเพื่อลดปริมาณความร้อนที่จะผ่านเปลือกของอาคารเข้ามาในอาคาร ดังนั้น สัดส่วนที่เหมาะสมคือ 1:1 (รูปที่ 7) (Bunyathikan, 2002; Sreshthaputra & Chindavanig, 2007)

ผังของอาคารใช้ลมธรรมชาติควรแคบและยาว



รูปร่างอาคารที่มีการปรับอากาศควรมีพื้นที่ผิวน้อย



รูปที่ 7 สัดส่วนของอาคารที่เหมาะสมโดยอาคารที่ใช้ลมธรรมชาติควรมีรูปร่างแคบยาว อาคารที่มีการปรับอากาศมากควรมีรูปร่างที่มีพื้นที่ผิวอาคารน้อย เช่น สี่เหลี่ยมจัตุรัส (Proper shape for natural ventilation buildings are those narrow and long. Air conditioned buildings, on the other hand, should minimize building envelop area resulting in compact building shape i.e. cubic shape.)

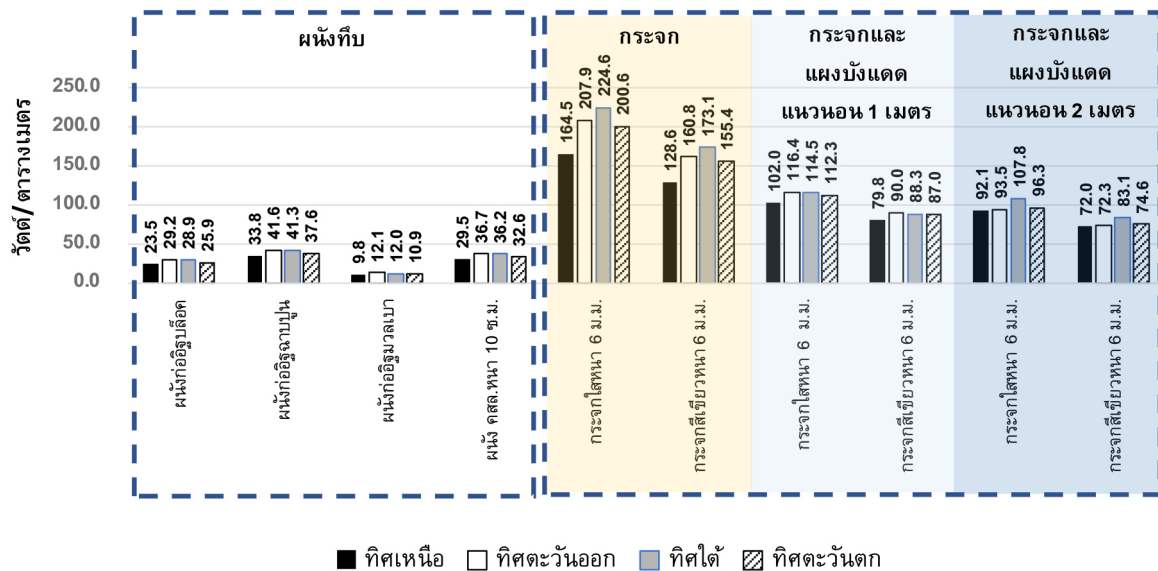
4.2.3 พื้นฐานการออกแบบ: การป้องกันรังสีอาทิตย์

การป้องกันรังสีอาทิตย์ตรงเข้าอาคารเป็นสิ่งที่จำเป็นมากสำหรับการออกแบบอาคารในเขตร้อนชื้นให้มีสภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิและประหยัดพลังงาน โดยสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การออกแบบอาคารให้สามารถบังรังสีอาทิตย์ให้กับตัวเองได้ (self-shading) ซึ่งจะช่วยลดปริมาณความร้อนเข้าอาคารและบางครั้งยังช่วยปรับปรุงการนำแสงธรรมชาติมาใช้ในอาคารได้ดียิ่งขึ้นด้วย (Jittawisutthikul & Varodompun, 2014) การอาศัยร่มเงาจากอาคารหรือโครงสร้างใกล้เคียง การบังรังสีอาทิตย์ด้วยวัสดุพืชพรรณและการใช้อุปกรณ์บังแดด ช่องเปิดของอาคารควรมีอุปกรณ์กันแดดเสมอ เนื่องจากช่องเปิดอาคารมักเป็นกระจก ความร้อนที่ผ่านเข้าอาคารทางกระจกใสทั่วไปที่หนา 6 มม. นั้นมากกว่าผนังทึบ เช่น ผนังก่ออิฐฉาบปูนถึง 5 เท่า (รูปที่ 8) การมีแผงกันแดดระยะยื่น 1 เมตร ที่ขอบบนของหน้าต่าง จะสามารถลดปริมาณความร้อนเข้าอาคารทางกระจกลงได้ประมาณ 40% แต่เมื่อแผงบังแดดยาวขึ้นประสิทธิภาพในการบังแดดจะไม่แปรผันตรงกับระยะยื่น ทำให้การออกแบบแผงกันแดดที่ดี จะต้องมีการคำนวณที่ละเอียด โดยอาจใช้แผงกันแดดแนวตั้งและแผงกันแดดรูปแบบอื่น ๆ ช่วยในการบังแดด

ตารางที่ 1 ข้อมูลปริมาณรังสีอาทิตย์รวม (Global horizontal irradiance) ตลอดปีในแต่ละชั่วโมงของวัน (Bangkok total annual global horizontal irradiance in each hour during the day.)

ชุดข้อมูล	ปริมาณรังสีอาทิตย์รวมตลอดปีในแต่ละชั่วโมง (kWh/m ²)													
	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19
Bangkok IWEBC	0.0	6.4	49.6	115.5	177.4	224.7	251.0	254.6	241.4	205.3	150.5	86.1	26.6	1.6
กทพ. 2556*	2.6	5.1	42.3	102.5	162.2	206.2	226.8	233.5	222.6	189.4	145.5	91.5	39.3	4.1
กทพ. 2557*	0.0	5.4	44.9	108.7	174.9	224.6	249.1	245.3	230.5	198.1	147.1	91.6	36.9	4.2

* ข้อมูลจากสำนักพัฒนารังสีอาทิตย์ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน



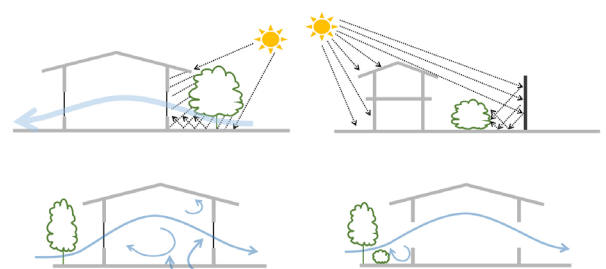
รูปที่ 8 ปริมาณความร้อนต่อตารางเมตรที่ถ่ายเทผ่านกรอบอาคารชนิดต่าง ๆ แต่ละทิศทาง คำนวณตามวิธีการในกฎกระทรวงกำหนดประเภทและขนาดของอาคารและมาตรฐานหลักเกณฑ์และวิธีการในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552 ออกตามความใน พรบ.ส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2550 (Heat transfer through 1 m² area of different building envelop types, calculated following methods specified in the Ministerial Regulations on Designate Buildings Standard, Guideline, and Methods for Energy Conservation Building Design, issued under Energy Conservation Promotion Act (No.2) B.E. 2007.)

ช่วงเวลาในการกันแดด	8:00 น. – 17:00 น.		9:00 น. – 16:00 น.		10:00 น. – 15:00	
	ระยะยื่น (เมตร)	มุมตวัด (องศา)	ระยะยื่น (เมตร)	มุมตวัด (องศา)	ระยะยื่น (เมตร)	มุมตวัด (องศา)
ทิศเหนือ	1.20	44	0.6	58	0.4	68
ทิศใต้	7.00	13	3.30	26	2.00	37
ทิศตะวันออก	4.00	22	2.10	35	1.10	48
ทิศตะวันตก	5.00	18	2.30	34	1.10	48

รูปที่ 9 ระยะยื่นของอุปกรณ์บังแดดแนวนอนสำหรับหน้าต่างสูง 1.20 เมตร เพื่อบังรังสีอาทิตย์แต่ละช่วงเวลาในทิศทางผนังต่าง ๆ (Overhang length for 1.20 m high windows in order to protect sun light at different times of the day, and at different building orientations.)

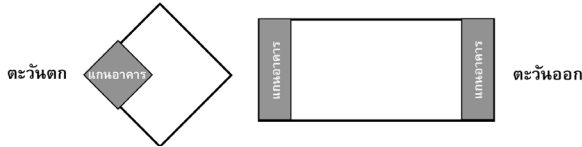
ปัจจุบันมีเครื่องมือในการช่วยออกแบบแผงกันแดดหลายชนิด เช่น แผนภาพวิถีโคจรดวงอาทิตย์ (sun chart diagram) ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ และเว็บไซต์ออนไลน์ ตัวอย่างขนาดแผงกันแดดแนวนอนในการกันแดดแต่ละทิศทางในช่วงเวลาต่าง ๆ ให้กับกระจกสูง 1.20 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 9

การใช้วัสดุพืชพรรณเพื่อการบังเงานั้นใช้ได้ทั้งการปลูกต้นไม้โดยรอบอาคาร และการปลูกต้นไม้บนกรอบอาคาร การปลูกต้นไม้อย่างมีกลยุทธ์โดยรอบอาคารสามารถช่วยบังเงาให้กับอาคารในทิศทางที่ต้องการได้ และบางครั้งยังสามารถช่วยดักลมเข้าอาคารได้อีกด้วย (รูปที่ 10) (Srisatapatt, 2002)



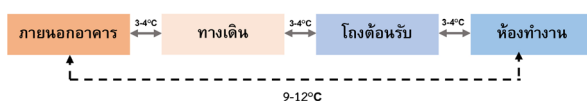
รูปที่ 10 การปลูกต้นไม้เพื่อบังเงาให้กับอาคารแต่ยังยอมให้ลมพัดเข้าอาคารได้ (Strategic tree planting that protects buildings from sunlight while still allow wind to penetrate buildings.)

การจัดวางแกนของอาคาร (core) ซึ่งเป็นบริเวณที่มักประกอบไปด้วย ห้องน้ำ ห้องเก็บของ ห้องไฟฟ้า บันได และลิฟต์ หรือการจัดวางเพอร์ริเจอร์ขนาดใหญ่ เช่น ตู้เก็บของตู้เสื้อผ้า ไว้ทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยป้องกันความร้อนเข้ามาสู่บริเวณที่ใช้งานอาคารหลักได้ (รูปที่ 11)



รูปที่ 11 การจัดวางแกนของอาคารไว้ทางด้านทิศตะวันตก หรือทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกเพื่อป้องกันความร้อนเข้าอาคาร (Building core areas placed at western side and/or eastern side of buildings to prevent heat coming into building interior.)

นอกจากนี้ การจัดลำดับบริเวณของอาคาร (zoning) ที่มีความต้องการสภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิคล้ายคลึงกันไว้ด้วยกัน และเรียงลำดับจากพื้นที่ที่ไม่ต้องการความสบายทางอุณหภูมิมาก เช่น ทางเดิน ไปยังพื้นที่ที่ต้องการความสบายทางอุณหภูมิมากขึ้น เช่น โถงพักคอย ห้องนั่งเล่น จนถึงพื้นที่ที่ต้องการความสบายทางอุณหภูมิมากที่สุด เช่น ห้องเรียน และ ห้องทำงาน ยังทำให้ไม่ต้องปรับอากาศทุกพื้นที่ให้อุณหภูมิเท่ากัน ความร้อนจากภายนอกไม่สัมผัสกับห้องที่ปรับอากาศโดยตรงเนื่องจากมีพื้นที่ต่าง ๆ คั่นอยู่ ช่วยให้ร่างกายได้ปรับตัวระหว่างที่ผ่านพื้นที่เหล่านี้ตามลำดับ และยังช่วยประหยัดพลังงานอีกด้วย (รูปที่ 12) (Bunyathikan, 2002)



รูปที่ 12 การจัดวางแผนผังอาคารให้ผู้ใช้งานอาคารค่อย ๆ ปรับตัวจากอุณหภูมิและความชื้นภายนอกเข้าสู่ภายในอาคาร (Design building zones to gradually adjust occupants from outside hot and humid weather into building interior.) (Bunyathikan, 2002).

4.2.4 พื้นฐานการออกแบบ: การเลือกใช้วัสดุกรอบอาคาร วัสดุกรอบอาคาร แบ่งเป็น ผนังทึบ หลังคาทึบ ผนังโปร่งแสง และหลังคาโปร่งแสง สำหรับในประเทศไทยยังไม่มีเกณฑ์คุณสมบัติของกรอบอาคารที่ครบถ้วน สมบูรณ์สำหรับอาคารแต่ละประเภท มีเพียงงานวิจัยที่มุ่งสำรวจอาคารบางประเภทเท่านั้น งานวิจัยที่จะกำหนดเกณฑ์ของคุณสมบัติกรอบอาคารสำหรับอาคารประเภทต่าง ๆ อย่างเป็นระบบ จึงน่าที่จะผลักดันให้เกิดขึ้นโดยหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ผู้ดูแลกฎหมายและมาตรฐานทางด้านการอนุรักษ์พลังงาน ร่วมมือกับกรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย ผู้ดูแลกฎหมายควบคุมอาคาร

ผนังทึบและหลังคาทึบ

การถ่ายเทความร้อนของผนังทึบและหลังคาทึบนั้น จะมากหรือน้อยเป็นผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผนังหรือหลังคา ความหนา สีและพื้นผิว ความหนาแน่น และความจุความร้อนจำเพาะ ในการเลือกใช้วัสดุในการออกแบบ มีข้อควรพิจารณาได้แก่

- 1) ความหนาวัสดุผนัง ในบางกรณียิ่งหนายิ่งดี แต่ต้องคำนึงถึงน้ำหนักซึ่งจะส่งผลต่อโครงสร้างที่ต้องใหญ่ขึ้น
- 2) มวลอุณหภาพ (Thermal mass) ของวัสดุและการใช้งานอาคาร โดยมวลอุณหภาพในวัสดุอาคารนั้นคือคุณสมบัติในการกักเก็บและคายความร้อนของวัสดุ ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความจุความร้อนจำเพาะ ความหนาแน่น และความหนาของวัสดุที่ยิ่งมาก ยิ่งทำให้มีมวลอุณหภาพมาก จากงานวิจัยหลายงานในประเทศไทย พบว่า อาคารแต่ละประเภทการใช้งาน มีค่าที่เหมาะสมของมวลอุณหภาพของวัสดุผนังและหลังคาอาคารที่แตกต่างกัน ส่วนของอาคารที่ใช้งานตอนกลางคืนเหมาะกับวัสดุอาคารที่มีมวลอุณหภาพน้อย ส่วนของอาคารที่ใช้งานในตอนกลางวันเหมาะกับวัสดุอาคารที่มีมวลอุณหภาพมาก (Chenvidyakarn, 2008; Taepipatpong, 2010; Athicombandhitkul & Sreshtheputra, 2013) รูปที่ 13 แสดงตัวอย่างอาคารที่แยกพื้นที่ที่ใช้งานคนละช่วงเวลาออกจากกันแล้วจึงก่อสร้างด้วยผนังที่มีมวลอุณหภาพไม่เท่ากัน



รูปที่ 13 บ้านต้นแบบประหยัดพลังงาน 2 ชั้น การเคหะแห่งชาติ เป็นอาคารตัวอย่างที่มีการแยกพื้นที่ใช้สอยที่มีความต้องการรอบอาคารแตกต่างกันออกจากกันและทาสีแตกต่างกัน (Two-story energy conservation house prototype, National Housing Authority, is an example of a building that different functions are separated and different building wall materials designated by different color and different design strategies appropriate for each space and schedule are used to comfort occupants.)

เนื่องจากกระบวนการถ่ายเทความร้อนนั้นเป็นกระบวนการพลวัต (dynamic) สำหรับอาคารที่ใช้งานในเวลากลางวันนั้นควรมีมวลอุณหภูมิมามากเพื่อถ่วงความร้อนให้เข้าอาคารช้า แต่หากผนังมีความเป็นฉนวนมากเกินไปและอาคารมีแหล่งกำเนิดความร้อนในอาคารมาก เช่น มีอุปกรณ์ไฟฟ้าและระบบแสงประดิษฐ์มาก หรือมีกิจกรรมที่ก่อให้เกิดความร้อน ก็อาจจะทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอาคารถูกกักเก็บไว้ในผนังไม่ถ่ายเทสู่ภายนอกในเวลากลางคืน จนทำให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้นในตอนเช้าเมื่อเปิดเครื่องปรับอากาศได้ (Wongkomolseth & Varodompun, 2013) ดังนั้น อาคารสำนักงานที่ใช้ผนังกระจกฉนวน ควรมีการหมุนเวียนอากาศผ่านโครงสร้างอาคารในตอนกลางคืนเพื่อช่วยระบายความร้อนออกจากอาคาร (Chenvidyakarn, 2008)

3) พิจารณาเลือกใช้วัสดุทางเลือกอื่น ๆ นอกเหนือจากผนังก่ออิฐฉาบปูนและผนังก่อด้วยอิฐบล็อก วัสดุที่มีคุณสมบัติกันความร้อนได้ดีกว่าผนังก่ออิฐฉาบปูนชั้นเดียวทั่วไปและบางครั้งมีน้ำหนักเบากว่านั้น ปัจจุบันมีให้เลือกหลายชนิด เช่น อิฐมวลเบา อิฐผสมโฟม อิฐที่มีไส้กลางเป็นโฟม นอกจากนี้ ยังมีผนังสองชั้นที่มีการระบายอากาศตรงกลาง ผนัง trombe wall ผนังดินอัด (rammed earth) ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการออกแบบเพื่อลดการพึ่งพาเครื่องปรับอากาศได้ดี โดยผนังดินอัดสามารถทำให้อุณหภูมิและความชื้นภายในอาคารคงที่มากกว่าผนังประเภทอื่น

(Yimprayoon, 2015a) แต่เนื่องจากมีความหนาประมาณ 20-30 ซม. และเป็นผนังรับน้ำหนัก จึงเหมาะกับอาคารหรือส่วนของอาคารที่ไม่ต้องการทัศนียภาพภายนอกมากและมีความสูงไม่มาก เช่น ห้างสรรพสินค้า

4) การใช้ผนังอาคารที่กันความร้อนได้ดี โดยเฉพาะการใช้นวกับผนังหรือหลังคาต้องระวังปัญหาที่เรียกว่า สะพานความร้อนหรือ thermal bridge คือ การที่บางส่วนของผนังหรือหลังคาไม่ได้ติดตั้งฉนวนหรือวัสดุที่กันความร้อนให้ต่อเนื่องเป็นผืนเดียวกัน ทำให้ความร้อนยังคงเข้าอาคารได้ตามจุดอ่อนเหล่านี้ เช่น ติดตั้งฉนวนบริเวณผนังแต่ไม่ติดตั้งฉนวนบริเวณคานและเสา ทำให้ความร้อนยังสามารถเข้าอาคารผ่านทางสะพานความร้อนนั้นได้

กระจก

การถ่ายเทความร้อนผ่านกระจกประกอบไปด้วยความร้อน 2 ส่วนคือความร้อนจากการแผ่รังสี และความร้อนจากการนำ ความร้อนจากการแผ่รังสีมีปริมาณมากและส่งผลกระทบต่อปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับอากาศสูง จึงควรมีการบังแดด (Jareemit & Inprom, 2015; Sangrutsamee & Sripanom, 2015) ควรมีการเลือกใช้ประเภทกระจกปริมาณ และทิศทางในการติดตั้งอย่างระมัดระวัง ควรเลือกกระจกที่มีค่าการส่งผ่านรังสีความร้อนต่ำ (Solar Heat Gain Factor: SHGC) ควรมีแผงกันแดดเสมอ และมีสัดส่วนพื้นที่กระจกต่อพื้นที่ผนังที่บิที่ที่เหมาะสม มาตรฐานอาคารประหยัดพลังงานของสมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทย ASHRAE 90.1 กำหนดให้อาคารทั่วไปมีพื้นที่กระจกไม่เกิน 40% ของพื้นที่ผนังทั้งหมดของด้านที่มีการปรับอากาศและไม่เกิน 5% ของพื้นที่หลังคาที่มีการปรับอากาศ (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE], 2016a)

ในส่วนของการลดปริมาณความร้อนที่เกิดจากการนำความร้อน ทำได้โดยใช้ 2 วิธีร่วมกันคือ การใช้กระจกสองชั้นขึ้นไปที่มีช่องว่างอากาศตรงกลางหรือที่เรียกว่า กระจกฉนวน (insulated glass) ในช่องว่างอากาศหนาประมาณ 6-12 มม. นี้ จะเป็นอากาศนิ่งและมีสารดูดความชื้นอยู่ที่กรอบกระจก เนื่องจากอากาศนิ่งมีค่าการต้านทานความร้อนจึงช่วยลดการถ่ายเทความร้อนลงได้ หากต้องการลดการถ่ายเทความร้อนโดยการนำลงไปอีกสามารถเลือกเติมก๊าซเฉื่อยที่คุณสมบัติการต้านทานความร้อนที่ดีกว่าอากาศนิ่ง เช่น ก๊าซอาร์กอน หรือ криปตอน นอกจากนี้ สามารถทำช่องว่างอากาศให้มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำ ซึ่งจะลดการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีในช่องว่างอากาศลง โดยการเคลือบสาร Low-E ที่ผิว

กระจกโดยหันด้านที่เคลือบเข้าสู่ช่องว่างอากาศ บางครั้งช่องว่างอากาศนี้ถูกออกแบบให้กว้างมากจนสามารถเข้าไปเดินได้และใช้เป็นช่องระบายความร้อนจากการอบอาคาร เช่น อาคาร เอนเออียี คอมเพล็กซ์ (Energy Complex: ENCO) เป็นต้น

หลังคา

หลังคาเป็นส่วนที่รับความร้อนจากดวงอาทิตย์โดยตรง จึงควรมีการติดตั้งฉนวนกันความร้อนประเภทฉนวนมวลสาร เช่น ฉนวนใยแก้ว ฉนวนโพลีสไตรีนขยายตัว (Expanded Polystyrene: EPS) ฉนวนโพลียูรีเทน (polyurethane) ร่วมกับฉนวนสะท้อนความร้อน เช่น อลูมิเนียมฟอล์ย หลังคาควรมีช่องว่างอากาศที่สามารถระบายอากาศได้และมีความลาดเอียงของหลังคาควรเลือกใช้หลังคาสีอ่อน ปัจจุบันมีวัสดุทางเลือกที่ใช้ทำหลังคา เช่น วัสดุประเภทหลังคาเย็น (cool roof) คือวัสดุที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ (solar reflectance) มาก และมีค่าการคายความร้อน (thermal emittance) มาก ทำให้ดูดซับความร้อนน้อยส่งผลให้ความร้อนเข้าอาคารน้อยลง หรือทำหลังคาเขียว (green roof) คือ หลังคาที่มีการปลูกพืชพรรณต่าง ๆ นอกจากนี้ยังควรมีระบบรองรับน้ำฝนไว้ใช้งานในอาคารด้วย

การป้องกันการรั่วซึมของอากาศ

จากการทดสอบประตูและหน้าต่างที่ใช้ในงานก่อสร้างของประเทศไทย พบว่า ประตูมีปริมาณการรั่วของอากาศสูงมาก สำหรับหน้าต่างจะขึ้นกับประเภทและวัสดุ โดยพบว่าหน้าต่างที่มีการรั่วซึมของอากาศมาก ได้แก่ หน้าต่างบานเกล็ด หน้าต่างบานเปิดกรอบเหล็ก และหน้าต่างชนิดกรอบไม้บางประเภท (Kubaha & Neungyao, 2008) อาคารที่มีการปรับอากาศ จะต้องมีการป้องกันการรั่วซึมอากาศที่กรอบประตู หน้าต่าง และรอยต่อต่าง ๆ ที่ดี จึงต้องระมัดระวังในการเลือกใช้ หรือหากต้องเลือกใช้ต้องหาทางป้องกันการรั่วซึมของอากาศที่อาจจะเกิดขึ้น ประตูทางเข้าหลักอาจทำเป็นประตูสองชั้นเพื่อกันอากาศเย็นออกจากอาคาร และอาจอยู่ทางทิศเหนือเพื่อป้องกันอากาศร้อนพัดเข้าอาคารเมื่อมีการเปิดประตู (Bunyathikan, 2002)

4.2.5 การออกแบบพึ่งพาธรรมชาติ: การปรับเย็นโดยวิธีธรรมชาติ (Passive cooling)

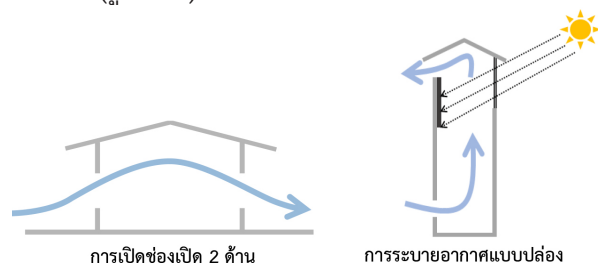
ลมประจำของประเทศไทย โดยทั่วไปในฤดูร้อน จะมาจากทิศใต้และทิศตะวันตกเฉียงใต้ โดยเป็นลมที่มีความเร็วและความถี่ไม่มากนัก นอกจากลมประจำแล้วมี

ลมประจำถิ่นด้วย เช่น ลมบก ลมทะเล ลมหุบเขา ลมภูเขา ลมว่าวหรือลมข้าว ลมตะเภา ลมตะโก้ ลมอุตรา ลมในเมือง จากการวิเคราะห์สภาพภูมิอากาศของประเทศไทย พบว่าการออกแบบสถาปัตยกรรม จะต้องพยายามใช้ประโยชน์จากลมนี้ให้มากที่สุด การออกแบบควรประยุกต์ใช้เทคนิคการปรับเย็นโดยวิธีธรรมชาติ (passive cooling) ซึ่งแบ่งออกเป็น 6 วิธี (Givoni, 1994) ดังนี้

1) การทำความเย็นด้วยการหมุนเวียนอากาศ (Ventilation cooling) คือ การนำลมธรรมชาติเข้ามาใช้ในอาคารโดยการเปิดช่องเปิดที่เหมาะสม ลักษณะของธรรมชาติ คือ ยิ่งสูงความเร็วลมยิ่งมากขึ้น ลมจะเคลื่อนที่จากที่ที่มีความกดอากาศสูงไปยังที่ที่มีความกดอากาศต่ำ ทั้งนี้ลมจะสามารถเข้ามาในอาคารได้ 2 วิธี คือ โดยความดันที่แตกต่าง และโดยอุณหภูมิที่แตกต่าง

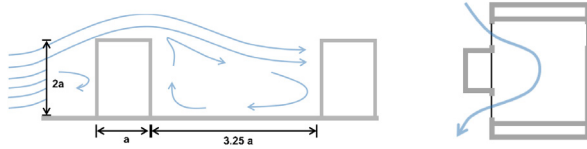
- การนำลมเข้ามาในอาคารด้วยความดันที่แตกต่าง คือการเปิดช่องเปิดที่เหมาะสม (cross ventilation) ห้องต้องมีความลึกไม่มาก และมีช่องเปิดอย่างน้อยสองด้าน หากมีช่องเปิด 2 ด้าน ห้องควรมีความลึกไม่เกิน 5 เท่าของความสูงห้องจากพื้นถึงฝ้าเพดาน (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE], 2016b)

- การนำลมเข้ามาด้วยอุณหภูมิที่แตกต่าง หรือเรียกว่าการระบายอากาศแบบปล่อง (stack ventilation) จะอาศัยการลอยตัวขึ้นของอากาศที่ได้รับความร้อน และดึงให้อากาศที่เย็นกว่าจากด้านนอกไหลเข้ามาในอาคาร กรณีนี้ช่องทางออกต้องอยู่สูงและมีการให้ความร้อนบริเวณที่จะดึงอากาศออกเพื่อให้อากาศมีการขยายตัวและลอยขึ้น (รูปที่ 14)



รูปที่ 14 การนำลมเข้ามาในอาคารโดยการเปิดช่องเปิดไม่น้อยกว่าสองด้าน และการระบายแบบปล่อง (Comfort ventilation using cross ventilation and stack ventilation.)

- ควรเว้นระยะอาคารให้ห่างจากอาคารอื่นเพื่อให้ลมสามารถเข้าถึงอาคารได้ และสามารถออกแบบส่วนประกอบของสถาปัตยกรรมหรือปลูกต้นไม้เพื่อใช้ในการดักลมเข้าอาคารได้ (รูปที่ 15)



รูปที่ 15 การเว้นระยะห่างของอาคารเมื่อมีสิ่งกีดขวางลมกรณีต่าง ๆ และการดักลมเข้าอาคาร (Allow spaces between buildings and obstacles to promote ventilation and to channel ventilation to buildings.) (Brown & Dekaym, 2001)

2) การทำความเย็นด้วยการเปิดอาคารให้ลมเย็นเข้ามาหมุนเวียนในอาคารตอนกลางคืน (Nocturnal ventilative cooling) คือการเปิดอาคารในตอนกลางคืนเพื่อนำอากาศที่เย็นเข้ามาเก็บไว้ในอาคารและปิดอาคารตอนกลางวัน เหมาะกับภูมิอากาศที่มีอุณหภูมิตอนกลางคืนเย็นกว่าตอนกลางวันและตอนกลางวันมีอากาศร้อน

3) การทำความเย็นด้วยการแผ่รังสีสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืน (Night radiant cooling) คือการระบายความร้อนจากอาคารด้วยการแผ่รังสีสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืนผ่านหลังคาชนิดที่มีมวลน้อย เช่น หลังคาเหล็กกริด (metal sheet) หรือหลังคากระเบื้องซีเมนต์ ทำหน้าที่เป็นตัวแผ่รังสี (radiator) แลกเปลี่ยนความร้อนในอาคารกับความร้อนของท้องฟ้าในเวลากลางคืน หลังคานี้จะใช้ร่วมกับวัสดุที่สามารถกักเก็บความร้อนจากท้องฟ้าได้ เช่น น้ำเพื่อใช้ในตอนกลางวัน หรือใช้ร่วมกับฝ้าเพดานที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ โดยสามารถปิดฝ้าเพื่อช่วยกันความร้อนในตอนกลางวันและเปิดฝ้าเพื่อระบายความร้อนในตอนกลางคืน Poolsrup และ Sreshthaputra (2014) ได้ทำการทดสอบการทำความเย็นด้วยการแผ่รังสีในตอนกลางคืนด้วยหลังคาที่มีมวลน้อยร่วมกับฝ้าเพดานแบบพลิกหมุน พบว่า ระบบที่ออกแบบนี้สามารถกันความร้อนได้ดีในตอนกลางวัน และสามารถระบายความร้อนออกจากหลังคาได้ดีในตอนกลางคืน โดยมีแนวโน้มที่สามารถนำไปใช้กับบ้านพักอาศัยได้

4) การทำความเย็นจากการระเหย (Evaporative cooling) การทำความเย็นจากการระเหยเป็นการใช้ประโยชน์จากเปลี่ยนสถานะของของเหลวซึ่งจะใช้ต้องพลังงานทำให้สิ่งแฉะลุ่มโดยรอบเย็นลง โดยมากของเหลวที่ใช้มักจะเป็นน้ำ วิธีการนี้แบ่งเป็น 2 แบบ คือ

- การทำความเย็นด้วยการระเหยโดยตรง (direct evaporative cooling) เช่น การฉีดน้ำเป็นละอองหรือฝอยโดยตรงให้กับพื้นที่ เมื่อน้ำระเหยจะใช้พลังงานและดูดซับความร้อนจากบรรยากาศทำให้เย็นขึ้น มีข้อควรระวังคือ

แหล่งน้ำและอุปกรณ์ประกอบต้องมีการดูแลบำรุงรักษาที่ดีไม่เช่นนั้นจะเป็นการเพิ่มโอกาสให้เชื้อโรคที่อยู่ในแหล่งน้ำหรืออุปกรณ์เข้าไปในระบบหายใจ ก่อให้เกิดโรคได้ และวิธีการนี้ไม่เหมาะกับพื้นที่ที่ปรับอากาศเพราะจะเป็นการเพิ่มความชื้นให้กับพื้นที่

- การทำความเย็นด้วยการระเหยในระบบปิดหรือภายนอกอาคาร (indirect evaporative cooling) คือ ทำให้กรอบอาคารหรือส่วนประกอบสถาปัตยกรรมส่วนนั้นเย็นและถ่ายเทความเย็นให้กับอากาศรอบ ๆ หรือลดการถ่ายเทรังสีความร้อนให้กับบริเวณโดยรอบ เช่น การรดน้ำบนหลังคาเพื่อให้เกิดการระเหยและดึงความร้อนออกจากหลังคา ทำให้ลดการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีให้กับผู้ใช้อาคารที่อยู่ด้านล่าง

ทั้งสองวิธีนี้ในทางปฏิบัติ มักมีการใช้ไฟฟ้าในระบบปั๊มเพื่อฉีดน้ำ จึงควรคำนึงถึงพลังงานที่ใช้ไปและการบำรุงรักษาด้วย

5) การใช้ความเย็นจากดิน (Earth as cooling source) การใช้ความเย็นจากดิน ทำได้โดยอาจจะสร้างสถาปัตยกรรมฝังลงไปใต้ดิน หรือการทำท่อลงไปในดินที่มีอุณหภูมิต่ำและคงที่ จากนั้นจึงดึงความเย็นของดินมาใช้โดยติดตั้งพัดลมดูดอากาศขึ้นมา หากต้องการใช้วิธีนี้ ควรพิจารณาปลูกพืชคลุมดินเพื่อกักเก็บความเย็น และคำนึงถึงพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการดึงอากาศขึ้นมาใช้ด้วย

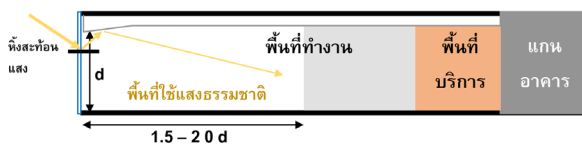
6) การใช้ความเย็นจากพื้นที่โดยรอบอาคาร (Cooling of attached outdoor spaces) เป็นการสร้างบริเวณโดยรอบอาคารให้มีความเย็นด้วยต้นไม้และแหล่งน้ำที่มีความจุความร้อนมาก สำหรับพื้นที่แคบซึ่งมีความจุความร้อนน้อย ควรมีการสร้างร่มเงาและมีสีอ่อน (Puraprom, 2016) รวมทั้งการเปิดพื้นที่ใช้รั้วโปร่งและไม่สร้างสิ่งก่อสร้างบังลม

4.2.6 การออกแบบผังพาธรรมชาติ: การใช้แสงธรรมชาติ

แสงสว่างจากดวงอาทิตย์เป็นแสงที่มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากใช้พลังงานน้อยเมื่อเทียบกับแสงสว่างที่ได้ ทำให้เมื่อนำมาใช้ในอาคารในปริมาณที่พอเหมาะจะได้ความสว่างที่มีคุณภาพและมีความร้อนน้อย แต่การออกแบบสถาปัตยกรรมให้สามารถใช้แสงสว่างจากธรรมชาติได้นั้น การเลือกรูปทรงและการประสานการออกแบบเปลือกอาคารตั้งแต่ช่วงแรกมีความสำคัญ รูปทรงอาคารต้องมีความลึกที่เหมาะสม มีช่องเปิดด้านข้างหรือด้านบนของอาคาร ช่องเปิดนั้นต้องมีการบังรังสีอาทิตย์ตรงที่เหมาะสมและมีการใช้อุปกรณ์ประกอบทางสถาปัตยกรรมเพื่อสะท้อน

แสงอาทิตย์บางส่วนเข้าอาคาร โดยเป็นการสะท้อนอย่างน้อย 2 ครั้งขึ้นไป ก่อนนำมาใช้งานเพื่อลดความร้อน (Thompson, 1989)

แนวทางหนึ่งที่จะช่วยให้สามารถป้องกันความร้อนจากแสงแดดตรงและมีการสะท้อนแสงอาทิตย์อย่างน้อย 2 ครั้งก่อนถึงพื้นที่ใช้งาน คือ การใช้หิ้งสะท้อนแสง (light shelf) ร่วมกับการออกแบบฝ้าเพดานและการเลือกใช้อุปกรณ์ภายในอาคาร จะช่วยกันความร้อนเข้าอาคาร แต่สามารถทำให้แสงธรรมชาติสะท้อนเข้าไปในอาคารได้ลึกขึ้น 1.5–2.0 เท่าของความสูงจากพื้นถึงขอบบนของช่องเปิด (รูปที่ 16) หากออกแบบร่วมกับการระบบแสงสว่างประดิษฐ์ให้สามารถปิดแสงสว่างประดิษฐ์แถวที่ใกล้ช่องเปิดได้หากมีปริมาณแสงธรรมชาติที่เพียงพอ หรือการติดตั้งอุปกรณ์หรือแสงสว่างประดิษฐ์เพื่อให้สามารถลดปริมาณความสว่างของแสงประดิษฐ์ลงเมื่อมีแสงสว่างธรรมชาติมากพอ จะช่วยให้ผู้ใช้อาคารได้รับแสงสว่างที่มีคุณภาพและเป็นการประหยัดพลังงาน



รูปที่ 16 หิ้งสะท้อนแสงสามารถช่วยให้ใช้แสงธรรมชาติในอาคารได้ลึกขึ้นถึง 1.5–2.0 เท่าของความสูงจากพื้นถึงขอบบนของช่องแสง (Light shelf could help redirect natural light deeper into building interior at 1.5–2.0 time the distance between floor and the top of windows.)

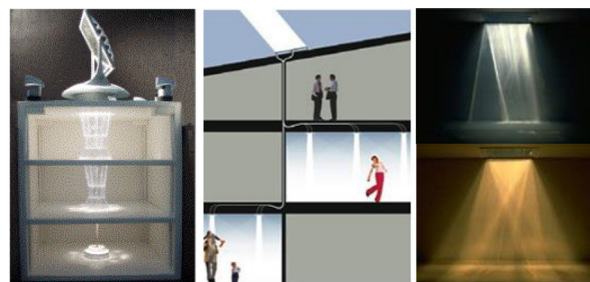
การนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ในอาคารจากด้านข้างมีหลักเกณฑ์ดังนี้ (Egan & Olgyay, 2002)

- อาคารที่ใช้แสงธรรมชาติ จะต้องมีความลึกไม่มาก
- ผนังและฝ้าเพดานต้องเป็นสีอ่อน
- มีการใช้กระจกเพื่อให้แสงเข้าไปในอาคาร
- ใช้ผนังกันภายในที่มีความสูงไม่มากในการแบ่งพื้นที่ใช้สอยย่อยในอาคาร
- เฟอร์นิเจอร์ขนาดใหญ่ที่บดบังแสง เช่น ตู้ จะต้องวางตั้งฉากกับผนังที่นำแสงเข้ามาในอาคาร
- ไม่ควรวางผังการใช้งานให้มีผนังที่บดบังแสงจากภายนอกอาคาร
- วางจอคอมพิวเตอร์ตั้งฉากกับผนังที่นำแสงเข้ามาในอาคาร
- ออกแบบกิจกรรมภายในอาคารให้สัมพันธ์กับปริมาณแสงที่เข้ามาในอาคาร

การนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ในอาคารจากด้านบนมีหลักเกณฑ์ดังนี้ (Egan & Olgyay, 2002)

- วางตำแหน่งช่องเปิดบริเวณที่ต้องการแสง
- ออกแบบให้มีพื้นที่ช่องเปิดให้น้อยที่สุด
- ใช้พื้นที่เล็ก ๆ หลาย ๆ จุด ให้แสงสม่ำเสมอ ดีกว่าพื้นที่ใหญ่จุดเดียว
- ใช้วัสดุโปร่งแสง แต่ไม่ควรทึบแสงมากเกินไป
- ควรออกแบบฝ้าเพดานให้เอียงออกจากช่องเปิด เพื่อให้แสงสม่ำเสมอและลดการเกิดแสงบาดตา
- ใช้เพดานสูงจะทำให้แสงกระจายสม่ำเสมอ
- ควรมีการบังเงาให้กับช่องเปิด หรือเอียงหลบมุมรังสีอาทิตย์เพื่อลดความร้อนที่จะเข้ามาในอาคาร
- อาจวางช่องเปิดไว้ใกล้ผนังเพื่อให้ผนังช่วยในการสะท้อนแสงเข้าไปในพื้นที่ใช้สอยด้วย
- ใช้เทคนิคการสะท้อนแสงแบบต่าง ๆ เพื่อนำแสงที่เป็นแสงสะท้อนเข้าอาคาร

อาคารอาจมีช่องเปิดโล่งตรงกลาง (atrium) เพื่อให้สามารถนำแสงธรรมชาติเข้าไปใช้ในอาคารได้อีกวิธีหนึ่ง ปัจจุบันมีผู้ที่คิดค้นการนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ในอาคารด้วยเทคนิคขั้นสูงหลายวิธีที่อาคารอาจพิจารณาเลือกใช้ได้ โดยใช้หลักการสะท้อนแสงหรือเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ในอาคารได้ลึกขึ้น เช่น ท่อแสงอาทิตย์ (solar duct) อุปกรณ์เก็บแสงธรรมชาติ (daylight collector) ปล่องแสง (light chimney) (รูปที่ 17) บางอาคารมีการออกแบบอุปกรณ์บังแดดที่สามารถกันรังสีอาทิตย์ตรงได้ในขณะที่สะท้อนแสงสว่างเข้ามาในอาคารและไม่บังทัศนียภาพภายนอก (รูปที่ 18)

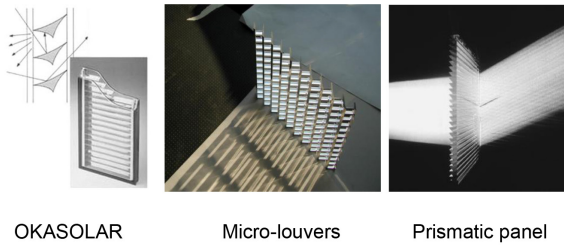


Solar duct

Daylight collectors

Light chimney

รูปที่ 17 ตัวอย่างระบบนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ในอาคารชั้นสูง (Examples of advance daylighting systems.)



รูปที่ 18 อุปกรณ์บังแดดที่สะท้อนแสงธรรมชาติเข้ามาให้อาคารด้วย
บางชนิดยังสามารถมองเห็นทัศนียภาพภายนอกได้ด้วย
(Shading devices that can protect direct sunlight while
allowing view from inside the buildings.)

4.3 งานระบบประกอบอาคาร

4.3.1 ระบบปรับอากาศ

ระบบปรับอากาศเป็นระบบที่ใช้พลังงานมากที่สุดสำหรับอาคารทั่วไปในประเทศไทย จึงควรหาวิธีลดการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศก่อน ไม่ว่าจะเป็นการลดความร้อนที่เข้ามาในพื้นที่อาคารหรือการเลือกใช้ระบบปรับอากาศที่มีประสิทธิภาพ มีการใช้งานที่ถูกต้องเหมาะสม และการบำรุงรักษาที่สม่ำเสมอ แนวทางการประหยัดพลังงานในระบบปรับอากาศมีดังนี้

- ควรเลือกใช้เครื่องปรับอากาศ ชนิดที่มีประสิทธิภาพพลังงานสูง ร่วมกับการพิจารณาราคาที่สูงขึ้นต่อค่าใช้จ่ายในการใช้งานตลอดอายุระบบ

- เครื่องปรับอากาศโดยทั่วไปจะทำงานโดยใช้ไฟฟ้า 100% เพื่อทำความเย็นให้ได้ตามต้องการแล้วจึงตัดการทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จึงจะทำงานใหม่ ปัจจุบันมีเครื่องปรับอากาศระบบอินเวอร์เตอร์ ที่ทำงานโดยใช้ไฟฟ้า 100% เพื่อทำความเย็นให้ได้ตามต้องการแล้วจึงลดความเร็วมอเตอร์ลงให้กินไฟฟ้า 20-30% และยังทำงานตลอดเวลา วิธีนี้ทำให้ได้อุณหภูมิที่คงที่กว่าและประหยัดพลังงาน

- เลือกใช้อุปกรณ์ประกอบระบบปรับอากาศที่สามารถปรับเปลี่ยนการทำงานตามภาระการทำความเย็นที่เกิดขึ้นได้ เช่น ระบบปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์พัดลม (Variable Speed Drive: VSD) ระบบปรับเปลี่ยนปริมาณการไหลสารทำความเย็น (Variable Refrigerant Flow: VRF) ระบบปรับเปลี่ยนปริมาณลมที่จ่ายเข้าพื้นที่ (Variable Air Volume: VAV)

- การนำความร้อนเหลือทิ้งของระบบปรับอากาศมาใช้ในการทำน้ำร้อนเพื่อใช้ภายในอาคาร ทำให้สามารถประหยัดค่าไฟฟ้าที่ต้องใช้สำหรับเครื่องทำน้ำร้อนลงได้มาก และทำให้ระบบปรับอากาศมีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วย

- ตำแหน่งสำหรับติดตั้งส่วนระบายความร้อนของระบบปรับอากาศ ควรกำหนดให้อยู่ไกลจากช่องเปิด เพื่อลดเสียงรบกวนที่เกิดจากการทำงานของเครื่องและลดผลกระทบจากความร้อนที่ปล่อยออกมา แต่ไม่ควรไกลจากห้องที่ติดตั้งเครื่องเป่าลมเย็นเกิน 15 เมตร หากเป็นระบบทำความเย็นด้วยน้ำยา (refrigerant flow) ส่วนระบายความร้อนควรอยู่ในที่ที่ระบายอากาศได้ดี ไม่ถูกรังสีอาทิตย์โดยตรง และไม่อยู่ใกล้ผนังเกินกว่า 15 เซนติเมตร หรือมีสิ่งขวางการระบายลม อาจพิจารณาใช้แหล่งน้ำในโครงการ (ถ้ามี) เพื่อระบายความร้อนของระบบปรับอากาศ

- ลดความร้อนภายในอาคาร โดยเอาอุปกรณ์ที่ก่อให้เกิดความร้อน เช่น ตู้เย็น ตู้ทำน้ำเย็น เครื่องถ่ายเอกสาร หม้อต้มน้ำร้อน เครื่องชงกาแฟ ตู้จำหน่ายสินค้าอัตโนมัติ หม้อหุงข้าวไฟฟ้า ฯลฯ ออกไปจากบริเวณปรับอากาศ

- ลดปริมาณความร้อนจากไฟฟ้าแสงสว่าง โดยใช้หลอดไฟฟ้าที่ให้ความร้อนน้อย

- การลดปริมาณความร้อนจากอุปกรณ์ประกอบอาคาร โดยใช้อุปกรณ์ประหยัดไฟฟ้า

- ลดความร้อนจากการเติมอากาศบริสุทธิ์ โดยใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความเย็นจากอากาศเย็นที่เอาออกไปทิ้งกับอากาศบริสุทธิ์ที่นำเข้ามาในอาคาร ให้อากาศใหม่ที่เขาเข้ามามีความเย็นและความชื้นน้อย เมื่อต้องผ่านกระบวนการปรับอากาศ จะทำให้ใช้พลังงานน้อยลงมาก อุปกรณ์เหล่านี้ ได้แก่ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger)

- การลดความชื้นของอากาศก่อนที่จะทำความเย็นด้วยสารดูดความชื้น อากาศแห้งจะต้องการพลังงานน้อยกว่าอากาศชื้นในการทำให้เย็น

- ลดปริมาณการเติมอากาศบริสุทธิ์ โดยการจ่ายอากาศบริสุทธิ์ตามปริมาณผู้ใช้พื้นที่ แทนที่จะจ่ายอากาศบริสุทธิ์คงที่ โดยการใช้เซ็นเซอร์วัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ หรือวัดอุณหภูมิและความชื้นภายในพื้นที่

- ปิดพัดลมดูดอากาศเมื่อไม่จำเป็น ผู้ออกแบบบางครั้งจะออกแบบให้พัดลมดูดอากาศทำงานเมื่อเปิดไฟฟ้าแสงสว่างโดยใช้สวิตช์เปิดปิดเดียวกันซึ่งไม่เหมาะสม

- การตั้งอุณหภูมิปรับอากาศ ไม่ควรเย็นเกินไป ควรตั้งให้เหมาะสมกับกิจกรรมและเสื้อผ้าที่ผู้ใช้อาคารสวมใส่

- สำหรับระบบปรับอากาศขนาดใหญ่ ที่มีส่วนประกอบอื่นนอกเหนือจากเครื่องทำความเย็น เช่น ปั๊มน้ำ มอเตอร์ หรือหอระบายความร้อน ควรเลือกอุปกรณ์ประกอบที่ประหยัดพลังงานด้วย

- สำหรับระบบปรับอากาศขนาดใหญ่ที่เป็นระบบน้ำเย็น พิจารณาการปรับอุณหภูมิน้ำเย็นและการปรับสมดุลระบบน้ำโดยวิศวกร

- ออกแบบให้ส่วนของเครื่องปรับอากาศที่จะต้องมีการซ่อมบำรุงติดตั้งอยู่บริเวณที่เข้าถึงง่าย ทั้งนี้ เพื่อความสะดวกและปลอดภัยในการดูแลรักษา และมีการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (preventive maintenance)

เนื่องจาก ระบบปรับอากาศเป็นระบบที่ใช้พลังงานมาก จึงมีผู้คิดค้นระบบและแนวทางใหม่ ๆ ขึ้นมาอยู่เสมอ ซึ่งโครงการอาจทำการประเมินความเป็นไปได้ในการลงทุนและประสิทธิภาพแต่ละทางเลือกในการออกแบบเพื่อทำให้การใช้พลังงานในระบบปรับอากาศลดลง ตัวอย่างทางเลือกการออกแบบระบบปรับอากาศ เช่น การจ่ายอากาศแบบหมุนเวียนทดแทน (displacement ventilation) ระบบปรับอากาศแบบดูดซึม (absorption chiller) ใช้ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานร่วม (cogeneration) ระบบปรับอากาศแบบคานเย็น (chill beam) ระบบปรับอากาศแบบพื้นเย็น (radiant floor cooling) ระบบปรับอากาศแบบใช้คลังน้ำแข็ง (ice storage) ระบบปรับอากาศแบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (solar cooling) ระบบปรับอากาศแบบย่าน (district cooling)

4.3.2 ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง

ปัจจุบันการใช้หลอด LED (Light Emitting Diode) เริ่มเป็นที่นิยมใช้ในอาคารที่มีเป้าหมายในการประหยัดพลังงาน เนื่องจากใช้พลังงานน้อยมีให้เลือกทดแทนหลอดแบบเดิมเกือบครบทุกประเภท มีอุณหภูมิสีของแสงและค่าความถูกต้องของแสงที่เหมาะสมและราคาที่ต่ำลงมากเมื่อเทียบกับพลังงานที่ประหยัดได้และอายุการใช้งานที่ยาวนาน การประหยัดพลังงานเนื่องจากการใช้หลอด LED เกิดจากองค์ประกอบสามส่วน ส่วนแรก คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแสงสว่างประดิษฐ์ที่ลดลงจากตัวหลอด LED ที่ใช้ไฟฟ้าน้อยลง 30-50% เมื่อเทียบกับหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบเดิม ส่วนที่สอง คือ ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศลดลงเนื่องจากความร้อนจากหลอดไฟฟ้าเกิดขึ้นน้อยลง ส่วนที่สาม คือ เมื่อปริมาณความร้อนที่จะต้องนำออกไปจากอาคารน้อยลงจะทำให้สามารถใช้ระบบปรับอากาศที่ขนาดเล็กลงได้ หรือลดจำนวนเครื่องปรับอากาศลงได้ด้วย

การออกแบบเพื่อประหยัดพลังงานในระบบแสงสว่างประดิษฐ์ทำได้หลายวิธี ได้แก่ การออกแบบแสงสว่างที่พอเหมาะกับพื้นที่ใช้งานโดยไม่ให้มีแสงสว่างเกินกว่าที่ต้องการมีความสำคัญมาก สามารถกระทำได้โดยการเลือกประเภทหลอดที่มีกราฟการกระจายแสงของโคม (light distribution curve) ที่เหมาะสม เลือกใช้วัสดุหรือทาสีฝ้าเพดานและผนังห้องเป็นสีอ่อนเพื่อช่วยสะท้อนแสงสว่างภายในห้องลงสู่พื้นที่ใช้งาน ในช่วงเวลากลางวันควรพิจารณาใช้แสงจากธรรมชาติเพื่อช่วยลดภาระในการส่องสว่างภายในพื้นที่ร่วมกับการออกแบบวงจรแสงสว่างประดิษฐ์ให้สามารถปิดหรือหรี่แสงสว่างประดิษฐ์แถวที่ติดช่องเปิดได้ ควรติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหว (occupancy sensor) เพื่อช่วยปิดไฟฟ้าแสงสว่างประดิษฐ์เมื่อพื้นที่ไม่มีผู้ใช้งาน

4.3.3 ระบบทำน้ำร้อน

หากอาคารมีระบบทำน้ำร้อนขนาดใหญ่ ควรพิจารณาใช้พลังงานความร้อนเหลือใช้ในโครงการหรือพลังงานหมุนเวียนมาทำความร้อน ตัวอย่างระบบทำน้ำร้อนที่ใช้พลังงานดังกล่าว ได้แก่

- เครื่องทำน้ำร้อนจากความร้อนเหลือทิ้งจากระบบปรับอากาศ ทำได้โดยการดัดแปลงเครื่องปรับอากาศให้ท่อน้ำยาที่จะเดินไประบายความร้อนที่พัดลม ไปต่อเข้ากับถังน้ำร้อนเพื่อระบายความร้อนให้กับน้ำ ก่อนเดินท่อน้ำร้อนเข้าไปยังพัดลมของระบบปรับอากาศ วิธีนี้ทำให้ได้น้ำร้อนมาใช้ และยังทำให้เครื่องปรับอากาศมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ใช้ไฟฟ้าลดลงอีกด้วย

- ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นเครื่องผลิตน้ำร้อนโดยใช้พลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ มีหลายรูปแบบ แต่หากจะใช้ระบบนี้ควรออกแบบติดตั้งระบบตั้งแต่แรกบนหลังคาหรือดาดฟ้าอาคาร การติดตั้งระบบภายหลังจะต้องมีการเดินท่อน้ำร้อนใหม่ และอาจไม่มีพื้นที่บนหลังคาที่สามารถรับรังสีอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอ

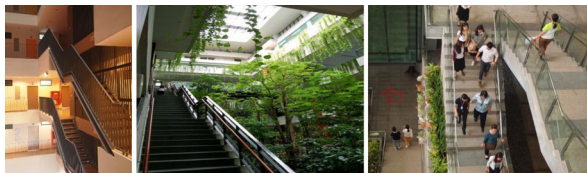
4.3.4 ระบบขนส่งทางตั้ง

ในอาคารที่มีหลายชั้นจะต้องมีระบบขนส่งทางตั้งเพื่อความสะดวกของผู้ใช้อาคาร ปัจจุบันหนึ่งในระบบขนส่งทางตั้งคือลิฟต์มีแนวทางในการประหยัดพลังงาน 2 แนวทาง ได้แก่

- มีระบบผลิตไฟฟ้าจากความร้อนที่เกิดขึ้นในการใช้ลิฟต์ หรือที่เรียกว่าระบบ regenerative drive

- ใช้ระบบจัดการการสัญจรที่เรียกว่า destination controlled lift ซึ่งเป็นระบบจัดการลิฟต์และผู้ใช้ลิฟต์ โดยกำหนดให้ผู้ที่จะไปชั้นเดียวกันขึ้นลิฟต์ตัวเดียวกัน ทำให้สามารถไปถึงที่หมายได้รวดเร็วขึ้น ประหยัดพลังงาน และบางครั้งสามารถช่วยลดจำนวนลิฟต์ลงทำให้แกนของอาคารเล็กลงได้ด้วย

นอกจากนี้ ปัจจุบันมีหลายอาคารที่พยายามออกแบบให้ผู้ใช้อาคารเดินขึ้นบันได เพื่อส่งเสริมสุขภาพของผู้ใช้อาคารและลดปริมาณไฟฟ้าที่ใช้กับระบบลิฟต์ (รูปที่ 19)



รูปที่ 19 ตัวอย่างอาคารที่ออกแบบบันไดเพื่อส่งเสริมการเดินขึ้นแทนการใช้ลิฟต์ (Examples of building design that encourage stair use instead of elevators.)

4.3.5 อุปกรณ์ไฟฟ้าในอาคาร

เครื่องใช้ไฟฟ้าประหยัดพลังงาน เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ไฟฟ้าน้อยกว่าเครื่องใช้ไฟฟ้าประเภทเดียวกันโดยสามารถทำงานได้เท่าเทียมกัน ปัจจุบันมีหน่วยงานต่าง ๆ คิดค้นฉลากประหยัดพลังงานขึ้นเพื่อช่วยให้ผู้บริโภคมีข้อมูลในการตัดสินใจซื้ออุปกรณ์ไฟฟ้าประกอบอาคารที่มีประสิทธิภาพดีได้โดยง่าย ตัวอย่างเช่น ฉลากประหยัดไฟฟ้าเบอร์ห้าดำเนินการโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตโดยทำการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีปริมาณการใช้มาก หากผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ก็จะได้รับฉลากประหยัดไฟฟ้าเบอร์ห้า ฉลากประหยัดพลังงานประสิทธิภาพสูงดำเนินการโดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งมีนโยบายให้ส่งเสริมติดฉลากวัสดุอุปกรณ์ประสิทธิภาพสูงพร้อมทั้งให้มีการกำหนดมาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานขั้นต่ำเพื่อประโยชน์ในการอนุรักษ์พลังงาน และฉลาก Energy Star ของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นฉลากอุปกรณ์ประหยัดไฟฟ้าที่บางประเภทสามารถหาซื้อได้ในประเทศไทย ตัวอย่างฉลากทั้งสามประเภทดังแสดงในรูปที่ 20



รูปที่ 20 ตัวอย่างฉลากประหยัดไฟฟ้าเบอร์ห้า ฉลากประหยัดพลังงานประสิทธิภาพสูง และฉลาก Energy Star (Examples of No.5 Label for energy efficient appliances, High Energy Efficient Appliance Label, and Energy Star Label.)

4.3.6 ระบบจัดการอาคารอัตโนมัติ (Building Management System: BMS)

อาคารขนาดกลางและขนาดใหญ่ สามารถติดตั้งระบบคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการจัดการอาคารให้มีประสิทธิภาพ โดยสามารถติดตั้งจำนวนเซนเซอร์ได้ตามความต้องการและตามงบประมาณที่มีและให้คอมพิวเตอร์ช่วยจัดการดูแลอาคาร ระบบประกอบอาคารที่สามารถใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมได้ เช่น ระบบเครื่องกลและระบบไฟฟ้า (mechanical & electrical system) ระบบรักษาความปลอดภัย (security system) ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้ (fire alarm system) ระบบโทรทัศน์วงจรปิด (CCTV) และระบบโครงข่ายสายสื่อสาร (building cabling network system)

ระบบจัดการอาคารอัตโนมัติ สามารถช่วยบริหารจัดการอาคารในด้านต่างๆ ได้ดังนี้

- บริหารและจัดการการใช้พลังงาน เพื่อลดในส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (energy charge (Baht/kWh)) และเพื่อลดในส่วนของพลังไฟฟ้า (demand charge (Baht/kW)) รวมทั้งการคาดการณ์การใช้พลังงานในอาคารเพื่อประมวลผลให้เกิดการใช้งานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด (demand response)

- บริหารและจัดการการใช้งานและบำรุงรักษาอุปกรณ์ เพื่อยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์และเพื่อลดในส่วนของแรงงาน

- บริหารและจัดการการรักษาความปลอดภัย เพื่อปกป้องชีวิตและทรัพย์สิน

4.3.7 พฤติกรรมผู้ใช้อาคาร

การปรับเปลี่ยนพฤติกรรมผู้ใช้อาคารให้คำนึงถึงการประหยัดพลังงาน เช่น การเดินขึ้นลงบันไดตามตัวอย่างที่กล่าวไปแล้ว การปิดเครื่องใช้ไฟฟ้าเมื่อไม่จำเป็นเป็นมาตรการการประหยัดพลังงานที่ไม่ต้องลงทุน แต่

เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมและความเคยชินของผู้ใช้อาคาร การออกแบบอาคารเพื่อสนับสนุนการปรับพฤติกรรม เช่น การออกแบบบันไดให้อยู่ตำแหน่งที่เห็นได้ชัด สวยงาม น่าเดิน การออกแบบตำแหน่งสวิตช์ให้เห็นง่ายก่อนออกจากห้อง การติดตั้งอุปกรณ์ เช่น เต้าเสียบที่มีสวิตช์สามารถตัดไฟฟ้าได้แทนที่จะต้องดึงปลั๊กออก หรือเต้าเสียบที่สามารถติดตามปริมาณไฟฟ้าที่เครื่องใช้ไฟฟ้าใช้ไปรวม ทั้งสามารถแจ้งเตือนออนไลน์ได้ ล้วนมีส่วนช่วยให้การประหยัดพลังงานเกิดขึ้นได้ง่ายและสะดวกขึ้น อย่างไรก็ตาม การสร้างแรงจูงใจเพิ่มเติม เช่น ต้องประหยัดเพราะค่าพลังงานมีราคาที่สูงขึ้น หรือการที่รัฐมีมาตรการสนับสนุนการประหยัดพลังงานโดยการให้รางวัลหรือผลตอบแทนในรูปแบบต่าง ๆ ก็จะสามารถกระตุ้นให้ผู้ออกแบบและผู้ใช้อาคารสนใจปรับเปลี่ยนพฤติกรรมเพื่อการประหยัดพลังงานเพิ่มมากขึ้นกว่านี้ (Iamtrakul, Nusook & Ubolchay, 2014)

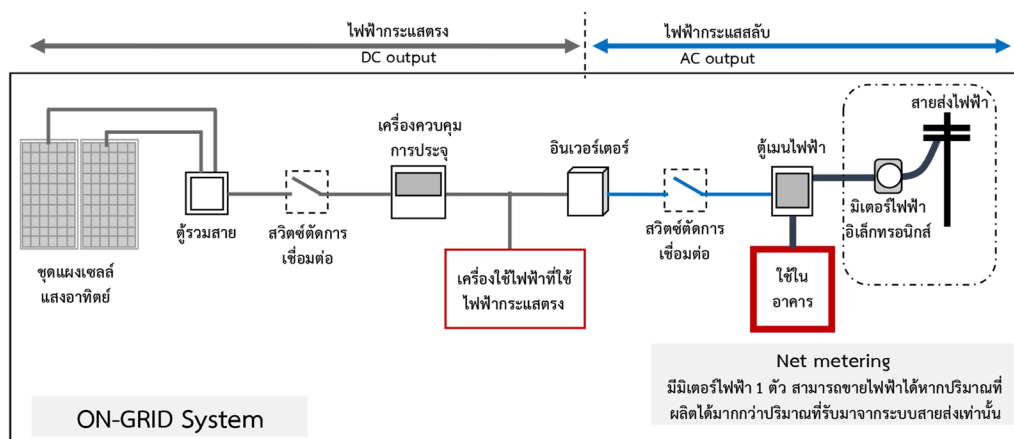
4.4 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

สำหรับประเทศไทย พลังงานหมุนเวียนที่สามารถนำมาใช้ผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ในอาคารได้นั้นมีหลายชนิด เช่น รังสีอาทิตย์ ลม ชีวมวล ความร้อนจากใต้พิภพ แต่รังสีอาทิตย์เป็นพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพมากที่สุด เนื่องจากประเทศไทยอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร แม้จะเป็นภูมิภาคที่ท้องฟ้ามักมีเมฆมาก แต่ยังมีปริมาณแสงอาทิตย์มากเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นของโลก (Panyakaew, & Yimprayoon, 2016) รังสีอาทิตย์นั้นมีอยู่ทุกพื้นที่ซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์โดยทั่วไปในประเทศไทย ในบทความนี้จึงจะกล่าวถึงเฉพาะระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เท่านั้น

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในอาคาร ปัจจุบันมักเป็นระบบที่เชื่อมต่อกับสายส่งไฟฟ้า โดยจะประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งผลิตไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อได้รับแสงอาทิตย์ และจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าอุปกรณ์แปลงไฟฟ้าหรืออินเวอร์เตอร์เพื่อเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ก่อนจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าและเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย แนวทางการต่อเชื่อมและระบบเสริมมีหลายรูปแบบ รูปที่ 21 แสดงไดอะแกรมของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งแบบเชื่อมต่อสายส่งไฟฟ้าและขายไฟฟ้าแบบหักลบหน่วย (net metering)

ในไดอะแกรมยังแสดงให้เห็นว่า อาคารสามารถพิจารณาเลือกใช้เครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อใช้ไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้โดยไม่ต้องผ่านอินเวอร์เตอร์ก่อนซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการใช้ไฟฟ้าสูงเพิ่มขึ้นไปอีก เนื่องจากไม่ต้องมีการสูญเสียระหว่างการผลิตไฟฟ้ากระแสตรงจากระบบไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อใช้ในอาคาร ไฟฟ้าที่ผลิตได้นี้หากไม่ส่งให้กับระบบสายส่ง อาจเก็บสะสมในระบบสะสมพลังงาน เช่น แบตเตอรี่เพื่อนำมาใช้ในงานในช่วงเวลาที่ไม่มีแดดหรือช่วงเวลากลางคืนก็ได้

การเชื่อมต่องานผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้ากับระบบสายส่งจะต้องออกแบบมาตรฐานอุปกรณ์การติดตั้ง การเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า และความปลอดภัยให้เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) หรือเทียบเท่ามาตรฐานสากล และระเบียบข้อกำหนดของการไฟฟ้า เช่น แผงเซลล์แสงอาทิตย์ภาคพื้นดินชนิดผลึกซิลิกอน (crystalline silicon) ต้องเป็นไปตาม



รูปที่ 21 ไดอะแกรมระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อสายส่งและขายไฟฟ้าแบบหักลบหน่วย (net metering) (Grid connected photovoltaic system diagram with net metering.)

มอก. 1843 หรือ IEC 61215 และสำหรับชนิดฟิล์มบาง (thin-film) ต้องเป็นไปตาม มอก. 2210 หรือ IEC 61646 มาตรฐานความปลอดภัยของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต้องเป็นไปตาม มอก. 2580 หรือ IEC 61730 มาตรฐานของอุปกรณ์ประกอบ (Balance-of-system components for photovoltaic systems) ต้องเป็นไปตาม IEC 62093 การติดตั้งทางไฟฟ้าและระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ต้องเป็นไปตาม มอก. 2572- 2555 หรือ IEC 60364-7-712 มาตรฐานการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าต้องเป็นไปตามระเบียบหรือข้อกำหนดของการไฟฟ้า IEEE 1547 และ Underwriters Lab (UL) 1741 หรือ IEC 61727 และ IEC 62116 หากไม่เป็นไปตามนี้จะไม่สามารถขอเชื่อมต่อระบบได้ เพราะอาจเกิดความเสียหายกับระบบสายส่งไฟฟ้า เนื่องจากอุปกรณ์ที่ไม่ได้มาตรฐาน

ประเทศไทยมีนโยบายในการส่งเสริมการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในอาคารที่ไม่แน่นอน บางช่วงรับซื้อไฟฟ้าที่ผลิตได้ในราคาที่สูงกว่าค่าไฟฟ้าจากระบบสายส่ง แต่ต้องเป็นไฟฟ้าที่เหลือจากการใช้ในอาคาร (net metering) บางช่วงไม่มีการรับซื้อ บางช่วงเปิดรับซื้อไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมดเข้าระบบไม่ต้องใช้ในอาคารก่อน (feed-in tariff) และในปัจจุบัน (พ.ศ. 2559) ยังไม่มีการเปิดรับซื้อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ แต่มีโครงการที่ให้เจ้าของอาคารสามารถติดตั้งระบบและเชื่อมต่อระบบเข้ากับระบบสายส่งไฟฟ้าได้ โดยอาคารเหล่านี้จะต้องติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อผลิตไฟฟ้าเกินกว่าที่ต้องการ ไฟฟ้าที่ผลิตได้จะไหลคืนเข้าระบบสายส่ง แต่มิเตอร์จะไม่หมุนกลับ ดังนั้นในปัจจุบัน หากอาคารต้องการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อสายส่ง ควรพิจารณาติดตั้งเฉพาะในกรณีที่มีปริมาณการใช้ไฟฟ้าในช่วงกลางวันมากพอที่จะไม่เหลือไฟฟ้าส่วนเกิน อันจะทำให้คืนทุนช้าลงหรืออาจไม่คุ้มทุน

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มีข้อดี คือระบบสามารถติดตั้งบนอาคารได้ มีลักษณะเป็นหน่วยย่อย (modular) ทำให้มีความยืดหยุ่นสามารถติดตั้งขนาดเท่าใดก็ได้ตามกำลังในการลงทุน ไม่มีค่าใช้จ่ายในการซื้อเชื้อเพลิงตลอดอายุการใช้งาน มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ เนื่องจากไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหวได้ในระบบ หากผลิตไฟฟ้าแล้วใช้งานเลยจะทำให้ลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากการขนส่ง ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ยังมีข้อดีในการช่วยลดการใช้พลังไฟฟ้าสูงสุด (peak load) โดยรวมของทั้งประเทศเนื่องจากช่วงเวลาที่ระบบผลิตไฟฟ้าสูงสุดเป็นช่วงเวลาเดียวกับที่เครื่องปรับอากาศทำงานมากที่สุด

คือช่วงที่มีรังสีอาทิตย์มากที่สุดของวัน (Perez & Collins, 2004; Perez et al., 2004) ในด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมนั้น ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีกระบวนการผลิตที่ใช้สารเคมี พลังงานและน้ำ แต่เมื่อเทียบกับการผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีอื่นๆ แล้วมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า 4-20 เท่า ขึ้นอยู่กับว่าเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีใดและภูมิภาคนั้น ๆ ผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงใดเป็นหลัก (Bikas, Giarna & Paralexandrou, 2005; Lippke, Wilson, JPerez-Garcia, Bowyer & Meil, 2004; Alsema, 2000; Fanney, Weise & Henderson, 2003; Fthenakis & Bulawka, 2004; Muneer, Younes, Lambert & Kubie, 2006; Rauei & Frankl, 2009; Fthenakis & Moskowitz, 2000)

อย่างไรก็ตาม ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ยังมีความท้าทายอยู่ ได้แก่

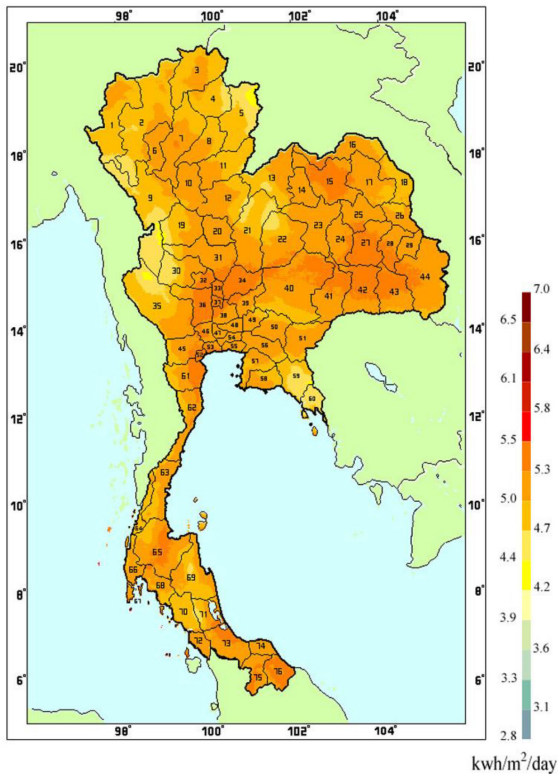
1) ข้อมูลปริมาณแสงอาทิตย์ ซึ่งปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นค่าที่มาจากการคำนวณ และเป็นค่าสถิติ ไม่เหมาะสมกับการนำมาคำนวณในการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

2) ปริมาณแสงอาทิตย์แปรเปลี่ยนตามเวลาของวัน ฤดูกาล และเหตุการณ์ต่าง ๆ จึงต้องมีวิธีการจัดการหากรบบมีขนาดใหญ่มาก

3) ระบบโครงข่ายไฟฟ้าของประเทศไทยถูกออกแบบมาให้เดินไฟฟ้าทางเดียว เมื่อมีระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ขนาดใหญ่ อาจต้องเปลี่ยนอุปกรณ์บางอย่างเพื่อให้รองรับปริมาณไฟฟ้าจำนวนมากที่จะไหลย้อนกลับเข้าสู่ระบบ หรือออกแบบระบบโครงข่ายไฟฟ้าใหม่ให้เป็นระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (smart grid)

4) การลงทุนมีมูลค่าสูง จำเป็นต้องได้รับการสนับสนุนจากภาครัฐ ปัจจุบันรูปแบบการสนับสนุนในประเทศต่าง ๆ มีหลายรูปแบบ แต่ส่วนใหญ่รัฐจะช่วยลงทุนหรือคืนเงินลงทุนในรูปแบบการคืนภาษี หรือรับซื้อไฟฟ้าที่ผลิตได้ในราคาสูง

ปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์ในประเทศไทยแปรผันตามภูมิประเทศ ภูมิประเทศตอนกลางและตอนบนมีค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงที่สุดจะได้รับการรังสีอาทิตย์ประมาณ 5.28-5.55 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร (kWh/m²) โดยมีค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ทุกพื้นที่ตลอดทั้งปีเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 5.00 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร (รูปที่ 22)

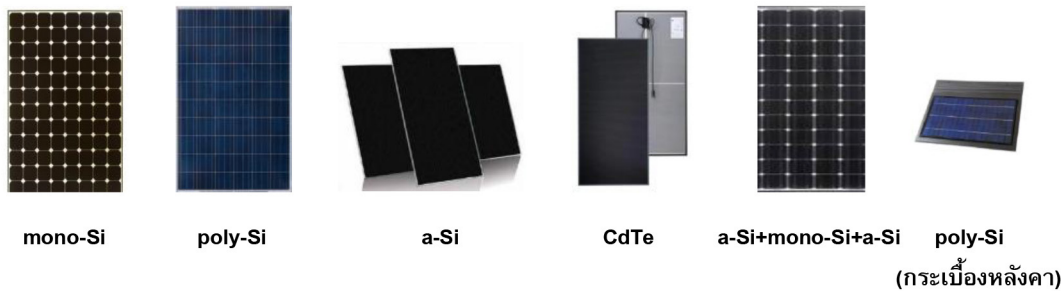


รูปที่ 22 แผนที่ปริมาณความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยต่อวันของพื้นที่ต่าง ๆ ในประเทศไทยแสดงค่าเป็น kWh/m². day (Average daily solar intensity map of Thailand in MJ/m². day.) (Department of Energy Development and Efficiency & Department of Physics, 1999)

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้ทั่วไปในงานอาคารมี 3 ประเภท ได้แก่ ซิลิคอนผลึกเดี่ยว (mono-Si) ซิลิคอนผลึกหลายรูปทรง (poly-Si, ms-Si) และอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si) ทั้ง 3 ประเภทมีประสิทธิภาพที่ต่างกัน แต่ราคาทั้ง 3 ชนิดต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ค่อนข้างใกล้เคียงกัน จึงขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่มีและรูปลักษณะที่ต้องการ นอกจากแผงทั้ง 3 ประเภทแล้ว ยังมีแผงประเภทอื่น ๆ ที่อาจเลือกใช้ได้ด้วยอย่างดังแสดงในรูปที่ 23

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดจากงานวิจัยนั้นคือ 46% (National Renewable Energy Laboratory [NREL], 2017) สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขายในท้องตลาดนั้นมีสถิติประสิทธิภาพสูงที่สุดและประสิทธิภาพเฉลี่ยตามตารางที่ 2

การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์กับอาคารสามารถทำได้หลายลักษณะ โดยอาจจะติดตั้งลงบนวัสดุผนัง ติดตั้งบนดาดฟ้า หรือติดตั้งให้เป็นส่วนหนึ่งของเปลือกอาคาร (Building-Integrated Photovoltaic: BIPV) (รูปที่ 24) หากติดตั้งชุดแผงเซลล์รังสีอาทิตย์เป็นส่วนหนึ่งของงานสถาปัตยกรรม ผู้ออกแบบจะต้องออกแบบรายละเอียดรอยต่อระหว่างแผ่นไม่ให้เกิดการรั่วซึมในภายหลัง



รูปที่ 23 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ ที่มีขายในประเทศไทย (Different solar panel technologies available in Thailand.)

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพ พื้นที่ที่ต้องการ และความคงทนของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่าง ๆ ที่มีขายในท้องตลาด (Efficiencies, areas required, and life spans of each photovoltaic cell technology available in the market.)

วัสดุ	ประสิทธิภาพแผง สูงสุด (%) (Green et al., 2017)	ประสิทธิภาพแผง โดยเฉลี่ย (%)	พื้นที่ติดตั้งต่อ 1 กิโลวัตต์ (ตร.ม.)	ความคงทน (ปี)
ซิลิคอนผลึกเดี่ยว	24.4 ± 0.5	13 – 19	4 – 5	> 30
ซิลิคอนผลึกหลายรูปทรง	19.9 ± 0.4	12 – 16	6 – 7	> 25
อะมอร์ฟัสซิลิคอน	12.3 ± 0.3	7 – 8	12 – 13	> 20



ติดตั้งบนดาดฟ้าอาคาร



ติดตั้งบนดาดฟ้าอาคาร



ติดตั้งทับกระเบื้องหลังคา



ติดตั้งเป็นส่วนหนึ่งของผนังอาคาร



ติดตั้งเป็นหลังคาที่จอดรถ



ติดตั้งโดยแผ่นที่เป็นส่วนหนึ่งของ
กระเบื้องหลังคา

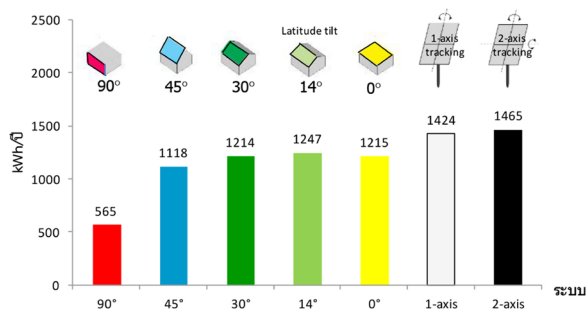
รูปที่ 24 ลักษณะการติดตั้งแผงเซลล์รังสีอาทิตย์กับอาคาร โดยอาจวางทับลงไปบนแผ่นหลังคาเดิม หรือเป็นส่วนหนึ่งของเปลือกอาคาร (Solar panels could be attached on top of existing roofs or installed as parts of building skins.)

สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์เทคโนโลยีเดียวกัน อาจมีราคาที่แตกต่างกันเนื่องจากประสิทธิภาพของแผง (Panyakaew & Yimprayoon, 2016) เช่น

- มีกำลัง (Wp) มากกว่าในพื้นที่เท่ากัน
- มีการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การทำชั้นลดการสะท้อนแสงบนผิวด้านหน้าของเซลล์ทำให้แผงได้รับแสงอาทิตย์เต็มที่ การเปิดแผงด้านหลังให้สามารถรับรังสีอาทิตย์ที่สะท้อนจากสิ่งแวดล้อมได้ด้วยการพัฒนาให้ประสิทธิภาพของแผงลดลงน้อยลงเมื่ออุณหภูมิแผงสูงขึ้น การเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการทำ Back Surface Field (BSF) การเพิ่มเส้นเชื่อมไฟฟ้าภายในเซลล์ (bus bar) จาก 2 เส้น เป็น 3 - 5 เส้น การใช้ bypass diode 2-4 ตัวในแผงเพื่อลดปัญหาปริมาณไฟฟ้าลดลงจากการบังเงา การออกแบบกรอบของแผงไม่ให้หักงอ
- การออกแบบกรอบของแผงให้มีความสวยงามเมื่อติดตั้ง เช่น มีสีที่กลมกลืนกับสีของเซลล์แสงอาทิตย์ในแผง หรือออกแบบให้ดูเหมือนไม่มีกรอบทำให้ดูเป็นผืนเดียวกันทั้งหมดเมื่อติดตั้ง
- มีการรับประกันที่นานกว่าปกติ โดยทั่วไปแผงจะรับประกันที่ 10 ปี และปริมาณการผลิตไฟฟ้าจะรับประกันที่ไม่ต่ำกว่า 80% ในปีที่ 25

- การออกแบบให้สามารถนำไปรีไซเคิลได้ง่ายหรือมีโครงการรับซื้อคืนเมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์หมดอายุ

การคำนวณปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การคำนวณมือ การใช้ซอฟต์แวร์ เช่น โปรแกรม PVsyst โปรแกรม System Adviser Model (SAM) และการคำนวณออนไลน์ สำหรับกรุงเทพมหานครที่ตั้งอยู่ที่ละติจูด 14 องศาเหนือ ทิศทางการวางแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีที่สุดคือวางแผงหันไปทางทิศใต้โดยมีมุมเงยเท่ากับละติจูดคือ 14 องศา อย่างไรก็ตาม เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร การวางแผงเซลล์แสงอาทิตย์เงย 0-45 องศาไปทางทิศใต้ จะผลิตปริมาณไฟฟ้าได้ไม่ต่างกันมากนัก (รูปที่ 25) และการหันแผงไปยังทิศทางต่าง ๆ โดยมีมุมเงยไม่เกิน 30 องศาจะทำให้การผลิตไฟฟ้าแตกต่างกันไม่เกิน 20% สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 1 กิโลวัตต์ มีมุมเงย 15 องศาและหันไปทางทิศใต้ จะผลิตไฟฟ้าได้ประมาณปีละ 1,247 หน่วย คำนวณโดยใช้โปรแกรม PVWatt และภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร



รูปที่ 25 ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 1 กิโลวัตต์ติดตั้ง ณ กรุงเทพมหานคร หันหน้าไปทางทิศใต้ที่มุมเงยต่าง ๆ (Amount of annual electricity produced from a 1 kW photovoltaic system, installed in Bangkok and oriented toward southern direction at different tilt angles.) (Panyakaew & Yimprayoon, 2015).

รูปที่ 26 แสดงสัดส่วนไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 1 กิโลวัตต์เมื่อหันแผงไปทิศทางต่าง ๆ เมื่อเทียบกับทิศทางและมุมเงยที่ดีที่สุด

การคำนวณปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ มีข้อควรระวังคือข้อมูลภูมิอากาศที่มีให้ใช้ มักเป็นข้อมูลภูมิอากาศแบบทั่วไป (typical weather data) ซึ่งจะเลือกข้อมูลอากาศแต่ละเดือนของชุดข้อมูลภูมิอากาศ จำนวน 10–25 ปี โดยเลือกเดือนที่มีความเป็นกลางที่สุดมาวางต่อกัน ดังนั้นค่าที่ได้จึงเป็นค่าเฉลี่ยและเป็นค่าในอดีต ในขณะที่ข้อมูลภูมิอากาศที่ใช้พยากรณ์ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ต้องการข้อมูลรายปีหลายปีที่สุดและเป็นปัจจุบันที่สุดเพื่อให้เห็นแนวโน้มของการผลิตไฟฟ้า (Dean, 2010; Storck, McCaa, Eichelberger & Etringer, 2010) กระทั่งต้องการข้อมูลที่มีอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศในอนาคตเพื่อให้ค่าที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด (Robert & Kummert, 2012) ค่าการพยากรณ์ปริมาณการใช้ไฟฟ้าหากใช้ข้อมูลเฉลี่ยในแต่ละปีอาจมีความคลาดเคลื่อนได้ถึง $\pm 20\%$ (รูปที่ 27) เนื่องจากเหตุการณ์ใหญ่บางอย่าง เช่น ภูเขาไฟระเบิด ไฟไหม้ป่าครั้งใหญ่ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ทำให้อากาศหนาวหรือร้อนหรือฝนตกมากผิดปกติ ล้วนส่งผลต่อปริมาณรังสีอาทิตย์ เหล่านี้เป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นทุก ๆ ไม่เกินคาบ 10 ปี (Yimprayoon & Navvab, 2011) ปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณรังสีอาทิตย์รายปีที่เผยแพร่อย่างแพร่หลาย ต้องขอข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยาและกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานเป็นรายปี

แผงเซลล์รังสีอาทิตย์แต่ละแผงมีขนาดกำลังไฟฟ้า 200–300 วัตต์ มีขนาด 1x1.6 เมตร ถึง 1x2 เมตร หากใช้แผงเซลล์รังสีอาทิตย์แบบซิลิคอนผลึกหลายรูปทรง ที่มีขนาดกำลังไฟฟ้าแผงละ 250 วัตต์และมีขนาด 1x1.6 เมตร จะมีข้อมูลเบื้องต้นดังนี้

- ระบบขนาด 1 กิโลวัตต์ มี 4 แผง ใช้พื้นที่ 6.4 ตารางเมตร โดยวางเรียงกันขนาด 4x1.6 ตารางเมตร หรือ 2x3.2 ตารางเมตร

- ระบบขนาด 1 กิโลวัตต์มีน้ำหนักประมาณ 80 กิโลกรัม หรือ 12.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

- ระบบขนาด 1 กิโลวัตต์ สามารถผลิตไฟฟ้าได้วันละประมาณ 4 หน่วย (4 kWh) หากติดตั้งยกขึ้น 15 องศาหันไปทางทิศใต้และไม่มีเงาบังตลอดปี

- ระบบขนาด 1 กิโลวัตต์ ราคารวมทั้งระบบ รวมสายไฟ อินเวอร์เตอร์และค่าติดตั้ง เท่ากับประมาณ 65,000 บาท หรือตารางเมตรละ 10,156.25 บาท ราคาอาจถูกลงได้อีก ขึ้นอยู่กับคุณภาพวัสดุและอุปกรณ์ที่เลือกใช้

- ระยะเวลาการคืนทุนอยู่ที่ประมาณ 8–10 ปี

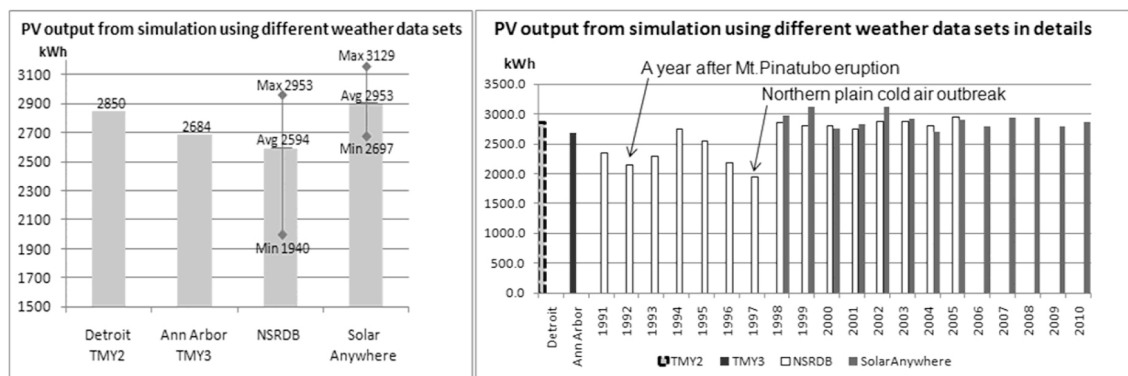
ปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ควรจะสม่ำเสมอเพราะแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผงต่อกันแบบอนุกรม หากมีแผงใดแผงหนึ่งหรือส่วนใดส่วนหนึ่งของแผงผลิตไฟฟ้าได้น้อยกว่าส่วนอื่น ส่วนนั้นจะดึงให้การผลิตไฟฟ้าโดยรวมของระบบลดลง จึงควรระมัดระวังไม่ให้มีเงาจากโครงสร้างข้างเคียงหรือต้นไม้ตกลงบนแผง หลีกเลี่ยงการวางแผงที่ต่ออนุกรมกันหันต่างทิศทางกัน และดูแลเรื่องฝุ่นหรือความสกปรกอย่างอื่นที่อาจจะบังไม่ให้แสงอาทิตย์ตกลงบนแผง นอกจากนี้ คุณภาพการต่อวงจรไฟฟ้าเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ ทั้งคุณภาพของสายไฟ คุณภาพของอินเวอร์เตอร์ วิธีการเชื่อมต่อสายและเชื่อมต่อระบบ รวมทั้งลำดับการเชื่อมต่อต่าง ๆ

4.5 ตัวอย่างอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ในเขตร้อน

ประเทศไทยมีตัวอย่างอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ที่มีผู้ใช้งานจริงไม่ใช่เป็นเพียงอาคารต้นแบบ ได้แก่อาคาร Net zero energy building กองสื่อสารองค์กร มหาวิทยาลัยขอนแก่น ซึ่งเป็นอาคารขนาดเล็ก สำหรับอาคารขนาดกลางและขนาดใหญ่นั้นมีตัวอย่างอาคารในต่างประเทศ ในส่วนนี้จะนำเสนอข้อมูลอาคารตัวอย่างเบื้องต้นและแนวทางในการออกแบบต่าง ๆ

เหนือ														
90	46	43	40	36	33	31	30	31	34	37	41	44	47	90
75	57	54	50	46	42	40	39	40	43	47	51	55	58	75
60	69	65	61	57	54	51	50	51	54	58	62	66	70	60
45	80	77	73	70	68	66	65	66	68	71	74	77	80	45
30	89	87	84	82	81	80	79	80	81	83	85	87	90	30
15	94	93	92	91	91	90	90	91	91	93	94	95	97	15
0	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	0
มุมเงย °	90	75	60	45	30	15	0	15	30	45	60	75	90	มุมเงย °
ทิศ														
ตะวันออก														
มุมเงย °	90	75	60	45	30	15	0	15	30	45	60	75	90	มุมเงย °
0	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	0
15	94	95	96	97	98	99	100	100	100	99	99	98	97	15
30	89	91	93	95	96	97	98	97	97	95	94	92	90	30
45	80	83	85	87	89	90	90	90	89	88	86	83	80	45
60	69	72	74	76	77	78	79	79	78	77	75	72	70	60
75	57	65	62	63	64	64	64	64	64	63	62	61	58	75
90	46	48	49	49	49	49	49	49	49	50	50	49	47	90
ใต้														

รูปที่ 26 ร้อยละของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เมื่อแผงเซลล์รังสีอาทิตย์หันไปในทิศทางต่าง ๆ กันและมีมุมเงยที่ต่าง ๆ กัน เทียบกับปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ผลิตได้ที่มีมุมเงย 15 องศา หันไปทางทิศใต้ ซึ่งสามารถผลิตไฟฟ้าได้ 1,247 kWh (Percentages of electricity produced from photovoltaic systems placed at different orientations and tilt angles compared to the same system placed at southern orientation and tilt 15° which has the highest annual electricity production at 1,247 kWh/kW.)



รูปที่ 27 ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 4 kW เมื่อใช้ข้อมูลภูมิอากาศที่แตกต่างกัน (Amount of annual electricity produced from a 4-kW system when different weather data are used.) (Yimprayoon & Navvab, 2011).

4.5.1 อาคาร Net Zero Energy Building กองสื่อสารองค์กร มหาวิทยาลัยขอนแก่น

อาคารสำนักงานกองสื่อสารองค์กร มหาวิทยาลัยขอนแก่น เดิมเป็นอาคารเก่า 2 ชั้น มีพื้นที่ใช้งาน 315 ตารางเมตร มีการใช้ไฟฟ้าประมาณ 35,000 หน่วยต่อปี ได้รับการเลือกเพื่อรับการปรับปรุงให้เป็นอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ โดยได้รับการสนับสนุนจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานในการทำวิจัยและปรับปรุงอาคาร งบประมาณทั้งสิ้น 18 ล้านบาท การลดการใช้พลังงานในอาคารใช้เทคนิค ได้แก่ การปรับเปลี่ยนอุปกรณ์สำนักงานเป็นอุปกรณ์ประหยัดพลังงาน การปรับปรุงผนังอาคารโดยการติดตั้งฉนวนในผนัง การปรับปรุงหลังคาอาคารโดยการเปลี่ยนวัสดุผนังเป็นสีอ่อน และติดตั้งฉนวนใยแก้วหนา 4 นิ้ว การลดพื้นที่กระจกและติดตั้งฟิล์มกรองแสงที่กระจกเพื่อลดความร้อน โดยอาคารมีค่าการถ่ายเทความร้อนรวม (thermal transfer value: OTTV) เท่ากับ 18.95 วัตต์ต่อตารางเมตร และมีค่าสัดส่วนพื้นที่หน้าต่างกระจกต่อพื้นที่ผนังทั้งหมด (Window to Wall Ratio: WWR) เท่ากับ 0.21 การติดตั้งอุปกรณ์นำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ในอาคาร การปรับปรุงระบบปรับอากาศโดยใช้ระบบ variable refrigerant volume (VRF) มีคอมเพรสเซอร์ DC มอเตอร์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง และมีอินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบให้สัมพันธ์กับภาระการทำความเย็น มีการติดตั้งแผงรังผึ้งระบายความร้อน (cooling pad) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนของระบบปรับอากาศ การใช้หลอด LED โดยมีค่าพลังไฟฟ้าแสงสว่างต่อพื้นที่ (Lighting Power Density: LPD) เท่ากับ 3.36 วัตต์ต่อตารางเมตร โดยที่ยังมีแสงสว่างที่เพียงพอ และการรณรงค์จิตสำนึกการอนุรักษ์พลังงาน สุดท้ายคือการปรับปรุงหลังคาให้มีความลาดเอียงไปทางทิศใต้และติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 20 กิโลวัตต์ สามารถผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ 26,000 หน่วยต่อปี (Wongwatthanasatian, Sudpakdee, Boonyaputthipong, Prasunluck & Chumchart, 2015) ผลการตรวจวัดจริงในปีแรกพบว่าอาคารใช้พลังงานตลอด ปี พ.ศ. 2556 เท่ากับ 28,420 หน่วย ในขณะที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 30,166 หน่วย



รูปที่ 28 อาคาร Net Zero Energy Building กองสื่อสารองค์กร มหาวิทยาลัยขอนแก่น (Net Zero Energy Building, Communication Affairs Division, Khon Kaen University.)

4.5.2 อาคาร Enerpos

อาคาร Enerpos เป็นอาคารการศึกษา ตั้งอยู่บนเกาะ Reunion Island บริเวณมหาสมุทรอินเดีย ซึ่งปกครองโดยประเทศฝรั่งเศส มีพื้นที่อาคาร 739 ตารางเมตร และสร้างเสร็จในปี ค.ศ. 2008 ได้รับการออกแบบให้ใช้ลมธรรมชาติ หันอาคารรับลมและปลูกต้นไม้รอบอาคารเพื่อให้เกิดความเย็น มีพัดลมเพดานในทุกห้อง ช่องเปิดทั้งหมดมีการกันแดด ใช้นวนที่ผนังและหลังคา อาคาร Enerpos ใช้ระบบปรับอากาศแบบ VRV และแบบแยกส่วน ใช้หลอดไฟฟ้า LED และมีระบบ BMS อาคารนี้ใช้พลังงานเพียง 1/7 ของอาคารประเภทเดียวกันในเกาะ Reunion และสามารถผลิตพลังงานได้มากกว่าที่ใช้อยู่ 7 เท่า โดยติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 50 kW บนหลังคา



รูปที่ 29 อาคาร Enerpos เกาะ Reunion Island ประเทศฝรั่งเศส (Enerpos, Reunion Island, France.) (IEA Joint SHC Task 40/ECBCS Annex 52, 2014)

4.5.3 อาคาร BCA Academy

อาคาร BCA Academy เป็นอาคารของ Building and Construction Authority ประเทศสิงคโปร์ มีพื้นที่อาคาร 4,500 ตารางเมตร และสร้างเสร็จในปี ค.ศ. 2009 มีกระบวนการออกแบบแบบบูรณาการ ใช้ผนังฉนวนที่มีน้ำหนักน้อย ใช้กระจก Low-E มีการกันแดด ใช้ผนังต้นไม้ทางด้านทิศตะวันตก ใช้หลังสะท้อนแสง และบางห้องในบริเวณชั้น 1 มีการใช้ท่อนำแสงธรรมชาติ บางส่วนของหลังคาออกแบบให้มีการระบายอากาศแบบปล่อง โดยในวันที่อากาศร้อน ปล่องอากาศนี้จะร้อนถึง 60 องศาเซลเซียส ทำให้อากาศภายในมีความร้อนประมาณ 47 องศาเซลเซียสและทำให้ดึงอากาศผ่านเข้ามาในอาคาร ลมที่พัดเข้ามาเพื่อออกไปยังปล่องนี้ มีความเร็วประมาณ 1.9 เมตรต่อวินาที อาคารใช้ระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ และระบายความร้อนด้วยอากาศ มีมอเตอร์แบบ VSD ระบบจ่ายลมเย็นเป็นนวัตกรรมที่ลดพลังงานที่ใช้อย่างมาก และเป็นระบบที่แปรเปลี่ยนได้ตามปริมาณของผู้ใช้อาคาร ใช้หลอดไฟฟ้า T5 โดยออกแบบประสานกับการใช้แสงธรรมชาติ บริเวณทำงานจะมีไฟฟ้าแสงสว่างเฉพาะที่ (task light) บริเวณที่มีผู้ใช้งานไม่ประจำจะมีเซ็นเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหวเพื่อช่วยปิดไฟเวลาไม่มีผู้ใช้พื้นที่ มีระบบ BMS อาคารนี้สามารถผลิตพลังงานได้มากกว่าที่ใช้อยู่ 10% โดยติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 190 kW บนหลังคา



รูปที่ 30 BCA academy ประเทศสิงคโปร์ (BCA Academy, Singapore.) (IEA Joint SHC Task 40/ECBCS Annex 52, 2014)

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

อาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์เริ่มมีการออกแบบก่อสร้างและใช้งานในประเทศไทยแล้วแต่ยังเป็นอาคารขนาดเล็ก การออกแบบก่อสร้างอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ขนาดกลางและขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อนมากกว่าเนื่องจากระบบประกอบอาคารที่เพิ่มขึ้นทำให้มีการใช้พลังงานมากขึ้น การลดการใช้พลังงานในอาคารต้องการการทำงานประสานกันแบบบูรณาการของผู้ที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งออกแบบบูรณาการแนวทางการประหยัดพลังงานด้วย ซึ่งส่วนใหญ่จะต้องมีการใช้โปรแกรมจำลองพลังงานในอาคารเพื่อให้มีข้อมูลสนับสนุนทางเลือกการออกแบบต่าง ๆ ตามแนวทางการออกแบบที่นำเสนอในส่วนของ 4 รวมทั้งต้องมีการออกแบบเตรียมพื้นที่เพื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ผู้ที่มีบทบาทสำคัญที่สุดในการทำให้การออกแบบอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ประสบความสำเร็จ ได้แก่ เจ้าของอาคาร เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการที่ต่อเนื่องตั้งแต่ออกแบบก่อสร้างไปจนถึงการใช้งานและวัดผลความสำเร็จของอาคาร ปัจจุบันเริ่มมีอาคารขนาดกลางและขนาดใหญ่ที่ประสบความสำเร็จในการเป็นอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์แล้วในต่างประเทศ

แผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี ของประเทศไทย กำหนดให้มีการออกแบบอาคารทั่วไปให้เป็นอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ภายในปี พ.ศ. 2579 แต่ยังไม่มีความชัดเจนในการไปสู่จุดมุ่งหมายนั้น เพื่อสนับสนุนการออกแบบอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ในประเทศไทย ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเรื่องต่าง ๆ ดังนี้

- การตรวจวัดและประเมินผลอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ที่มีผู้ใช้งานประจำที่ต่อเนื่องและมีการประเมินผลทุกปี
- การวิจัยเพื่อหาตัวอย่างแนวทางการออกแบบที่เป็นรูปธรรม ที่จะนำไปสู่การประหยัดพลังงานที่เหมาะสมกับอาคารประเภทต่าง ๆ ในประเทศไทยโดยเพิ่มการลงทุนน้อยหรือไม่เพิ่มเลย หรือมีระยะเวลาคืนทุนที่เหมาะสมเพื่อสนับสนุนการออกแบบก่อสร้างอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์อย่างแพร่หลายในอนาคต
- การวิจัยการออกแบบและก่อสร้างอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ในระดับย่าน โดยอาคารใกล้เคียงกันอาจจะมีการใช้ระบบหรือการใช้งานที่พึ่งพากัน ช่วยให้ทั้งโครงการสามารถไปสู่การใช้พลังงานเป็นศูนย์ได้

- การผลิตและใช้พลังงานหมุนเวียนที่มีประสิทธิภาพนั้นจะต้องใช้งานในโครงการให้หมดโดยไม่ส่งไฟฟ้าที่ผลิตได้เข้าสายส่งไฟฟ้า ทำให้ในอนาคตอาคารควรจะต้องมีระบบกักเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่าในการลงทุน

- การวิจัยเพื่อค้นหาเทคโนโลยีในการประหยัดพลังงานใหม่ ๆ ของระบบปรับอากาศ ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง และอุปกรณ์ไฟฟ้าประกอบอาคาร

- การวิจัยเพื่อการจัดการพลังงานที่เหมาะสมกับพฤติกรรมการใช้งานอาคารของคนไทย

- มีการพัฒนาโปรแกรมการจำลองการใช้พลังงานในอาคารที่ใช้งานง่าย เน้นไปที่ช่วงออกแบบแนวความคิด พร้อมทั้งการพัฒนาคนที่จะใช้งานโปรแกรมเหล่านี้

- การพัฒนาข้อมูลภูมิอากาศที่ครบถ้วนครอบคลุมพื้นที่ต่าง ๆ ในประเทศ เข้าถึงง่าย มีจำนวนปีมากและมีชุดข้อมูลที่ทำนายภูมิอากาศในอนาคต เนื่องจากอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์มักจะเป็นอาคารที่อ่อนไหวกับสภาพภูมิอากาศมากเพราะเน้นเรื่องการออกแบบพึ่งพาธรรมชาติและผลิตไฟฟ้าโดยใช้พลังงานจากธรรมชาติ

จะเห็นได้ว่าการออกแบบอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์นั้นมีความเป็นไปได้ในภูมิภาคที่มีภูมิอากาศร้อนชื้น แต่ยังต้องการความร่วมมือจากหลายฝ่ายและงานวิจัยสนับสนุนในด้านต่าง ๆ เพื่อสร้างความมั่นใจให้กับผู้ลงทุนหรือเจ้าของอาคาร ซึ่งเป็นบุคคลที่มีบทบาทมากในการที่จะผลักดันให้เกิดอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ขนาดกลางและขนาดใหญ่ในประเทศในอนาคต

References

- Adhikari, R. S., Aste, N., Pero, C. D. & Manfren, M. (2012). Net zero energy buildings: Expense or investment?. *Energy Procedia*, 14, 1331-1336.
- Alsema, E. A. (2000). Energy pay-back time and CO₂ emissions of PV systems. *Progress in photovoltaics: research and applications*, 8(1), 17-25.
- American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE]. (2016a). *90.1 User's manual ANSI/ASHRAE/IES 90.1-2016 Energy standard for buildings except low-rise residential buildings*. Atlanta, GA: Author.
- American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE]. (2016b). *ASHRAE 62.1-2016 Ventilation for acceptable indoor air quality*. Atlanta, GA: Author.
- Architecture 2030. (2008). *Meeting the 2030 challenge through building codes*. Retrieved from http://www.architecture2030.org/files/2030Challenge_Codes_WP.pdf.
- Athicombandhitkul, A. & Sreshtaputra, A. (2013). Comparative study of energy performance of radiant barriers and typical roof insulation. *Paper presented at the Built Environment Research Associates Conference, BERAC IV*, Rangsit, Pathumthani.
- Bikas, D., Giarma, C. & Paralexandrou, M. (2005). A study of the effect of the use of photovoltaic technology on the environmental performance of a building in northern Greece. *Paper presented at the World Sustainable Building conference 2005*, Tokyo, Japan.
- Brown, G. Z. & Dekaym, M. (2001). *Sun, Wind & Light: Architectural design strategies*. New York: John Wiley & Sons.
- Bunyathikan, S. (2002). *Integrated design Shinawatra University*. Bangkok: SE-Education Public Company Limited.
- Chenvidyakarn, T. (2008). Passive design for thermal comfort in hot humid climates. *Journal of architectural research and studies*, 5(1), 26.
- Chirarattananon, S., Chaiwiwatworakul, P., Hien, V. D., Rakkwamsuk, P. & Kubaha, K. (2010). *Assessment of energy savings from the revised building energy code of Thailand*. *Energy*, 35(4), 1741-1753.
- Dean, S. R. (2010). Quantifying the variability of solar PV production forecasts. *Paper presented at the SOLAR 2010 National Conference Phoenix, Arizona*.
- Department of Energy Development and Efficiency, Ministry of Science, Technology and Environment, & Department of Physics, Faculty of Science, Silapakorn University. (1999). *Solar radiation map of Thailand*. Bangkok, Thailand: Author.
- Egan, M. D. & Olgyay, V. (2002). *Architectural lighting*. Boston: McGraw-Hill.
- Fanney, A. H., Weise, E. R. & Henderson, K. R. (2003). Measured impact of a rooftop photovoltaic system. *Journal of solar energy engineering*, 125(3), 245-250.
- Fthenakis, V. M. & Bulawka, A. O. (2004). Photovoltaics, Environmental Impact of. In J. C. Cutler (Ed.), *Encyclopedia of energy* (pp. 61-69). New York: Elsevier.
- Fthenakis, V. M. & Moskowitz, P. D. (2000). Photovoltaics: environmental, health and safety issues and perspectives. *Progress in photovoltaics: Research and Applications*, 8(1), 27-38.
- Garde, F., Lenoir, A., Scognamiglio, A., Aelenei, D., Waldren, D., Rostvik, H. N., Cory, S. (2014). Design of net zero energy buildings: Feedback from international projects. *Energy Procedia*, 61, 995-998.

- Givoni, B. (1994). *Passive low energy cooling of buildings*. New York: Wiley.
- Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., Dunlop, E. D., Levi, D. H. & Ho-Baillie, A. W. Y. (2017). Solar cell efficiency tables (version 49). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 25(1), 3-13.
- Hootman, T. (2013). *Net zero energy design: a guide for commercial architecture*. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons.
- IEA Joint SHC Task 40/ECBCS Annex 52. (2014). *Solution set and net zero energy buildings, A review of 30 net ZEBs case studies worldwide*. Reunion, French: University of Reunion Island.
- Iamtrakul, P., Nusook, T. & Ubolchay, P. (2014). Impact of urban heat island on daily life of people in Bangkok Metropolitan Region (BMR). *Journal of Architectural/Planning Research and Studies*, 11(2), 53.
- Jamnongded, P. & Srisutapan, A. (2015). *Study of building proportion and PV orientation for energy efficiency in office building*. Paper presented at the Built Environment Research Associates Conference, BERAC VI, Rangsit, Pathumthani.
- Jareemit, D. & Inprom, N. (2015). Significant parameters in building energy simulation. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies*, 12(1), 1.
- Jittawisutthikul, R. & Varodompun, J. (2014). Design guideline of office building facade with self-shading for energy conservation in hot-humid climate. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies*, 11(1), 93.
- Kubaha, K. & Neungyao, S. (2008). A study on air leakage through window and door. *Paper presented at The 3rd Conference on Energy Network of Thailand*, Bangkok.
- Lindkvist, C., Karlsson, A., Sørnes, K. & Wyckmans, A. (2014). Barriers and challenges in ZEB projects in Sweden and Norway. *Energy procedia*, 58, 199-206.
- Lippke, B., Wilson, J., Perez-Garcia, J., Bowyer, J. & Meil, J. (2004). Life-cycle environmental performance of renewable building materials. *Journal of Forest Products*, 54(6), 8-19.
- Ministry of Energy. (2015). *Energy efficiency plan 20 years 2015-2036*. Bangkok, Thailand: Author.
- Muneer, T., Younes, S., Lambert, N. & Kubie, J. (2006). Life cycle assessment of a medium-sized photovoltaic facility at a high latitude location. *Journal of power and energy*, 220(6), 517-524.
- National Renewable Energy Laboratory [NREL]. (2010). *Technical support document: 50% energy savings for large office buildings*. Golden, Colorado, USA: Author.
- National Renewable Energy Laboratory [NREL]. (2017). *Research cell efficiency records*. Retrieved from http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg.
- Olgyay, V. & Olgyay, A. (1963). *Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism*. Princeton, N.J.: Princeton university press.
- Panyakaew, P. & Yimprayoon, C. (2016). *Photovoltaic system design guidelines for buildings in Thailand*. Bangkok, Thailand: The Association of Siamese Architects under Royal Patronage.
- Perez, R. & Collins, B. (2004). Solar energy security: Could dispersed PV generation have made a difference in the massive North American blackout? *Refocus*, 5(4), 24-28.
- Perez, R., Kmiecik, M., Hoff, T., Herig, C., Letendre, S., Williams, J. & Margolis, R. (2004). Availability of dispersed photovoltaic resource during the august 14th 2003 northeast power outage. *Paper presented at the ASES National Solar Conference 2004*, Portland, Oregon.
- Pless, S. & Torcellini, P. (2010). *Net-Zero energy buildings: A classification system based on renewable energy supply options* (Technical Report, NREL/TP-550-44586). Oak Ridge, TN.
- Poolsrup, N. & Sreshthaputra, A. (2014). *Nocturnal radiative cooling efficiency of operable hinged ceiling*. Paper presented at the 1st Building Technology Alliance Conference on Energy And Environment, Khonkaen.

- Puraprom, W. (2016). The impact of site elements to micro-climate air temperature. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies*, 13(1), 23.
- Raugei, M. & Frankl, P. (2009). Life cycle impacts and costs of photovoltaic systems: Current state of the art and future outlooks. *Energy*, 34(3), 392-399.
- Reeder, L. & Ebsco. (2016). *Net zero energy buildings: case studies and lessons learned*. London: Routledge.
- Robert, A. & Kummert, M. (2012). Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past. *Building and environment*, 55, 150-158.
- Sangrutsamee, V. & Sripanom, T. (2015). Investigating influence of different materials on window thermal performance. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies*, 12(2), 25.
- Sreshthaputra, A. & Chindavanig, T. (2007). Development of minimum requirements of thermal property of building envelopes for single houses. *Paper presented at the 3rd Conference on Energy Network of Thailand*, Bangkok.
- Srisatapap, S. (2002). *Plant material design for energy conservation*. Bangkok: Chulalongkorn University Press.
- Storck, P., McCaa, J., Eichelberger, S. & Etringer, A. (2010). Integration of short-duration ground based measurements with long-duration satellite based measurement and numerical weather simulations to provide a more accurate assessment of solar energy availability and variability. *Paper presented at the SOLAR 2010 National Conference*, Phoenix, Arizona.
- Taepipatpong, K. (2010). Study of materials and window to wall ratio for reducing energy consumption of residential buildings. *Paper presented at the Built Environment Research Associates Conference, BERAC I*, Rangsit, Pathumthani.
- Tantasavasdi, C., Chenvidyakarn, T. & Pichaisak, M. (2011). Integrative passive design for climate change: A new approach for tropical house design in the 21st century. *Built international journal of building, Urban, Interior and landscape technology*, 1, 5-19.
- Thailand Greenhouse Gas Management Organization [TGO]. (2014). *The study of greenhouse gas emission from power production in Thailand 2014*. Bangkok, Thailand: Author.
- Thompson, G. (1989). *The museum environment*. London: Butterworth-Heinemann.
- Torcellini, P., Pless, S., Deru, M. & Crawley, D. (2006). Zero energy buildings: A critical look at the definition. *Paper presented at the ACEEE Summer Study*, Pacific Grove, California.
- USGBC Research Committee. (2008). *A national green building research agenda*. Washington, DC: Author.
- Wongkamolseth, T. & Varodompun, J. (2013). Applications of thermal mass for energy conservation of office building. *Paper presented at the Built Environment Research Associates Conference, BERAC IV*, Rangsit, Pathumthani.
- Wongwatthanasatian, T., Sudpakdee, D., Boonyaputthipong, C., Prasunluck, N. & Chumchart, D. (2015). *Development of net zero energy building technology suitable for Thailand's context*. Khon Kaen, Thailand: Khon Kaen University.
- World Commission on Environment and Development [WCED]. (1987). *Our common future*. N.P.: n.d.
- World Wildlife Fund [WWF]. (2011). *The energy report*. Switzerland.
- World Wildlife Fund [WWF]. (2016). *Living planet report 2016 risk and resilience in a new era*. Switzerland.
- Yimprayoon, C. & Navvab, M. (2011). Impact of different weather data sets on photovoltaic system performance evaluation. *Paper presented at the 2011 Annual Architectural Research Centers Consortium Spring Research Conference*, Detroit, MI.

- Yimprayoon, C. (2013). Energy efficient measures for buildings with grid-connected photovoltaic systems located in Bangkok, Thailand. *Applied Mechanics and Materials*.
- Yimprayoon, C. (2015a). Comparative study of indoor thermal and relative humidity in buildings with passive design strategies in the tropic. *Paper presented at the 2nd Building Technology Alliance Conference on Energy and Environment*, Khonkaen, Thailand.
- Yimprayoon, C. (2015b). Thailand building energy simulation models development guidelines. *Academic Journal of Architecture*, 64(2015), 16.