

รายงานการศึกษา

โครงการการศึกษาเพื่อกำหนดกรอบแนวคิด ทฤษฎี และเทคนิควิธีการ
เพื่อออกแบบอาคารสถานบริการสุขภาพต้นแบบ ที่ปลอดจาก
การปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ (Carbon Neutral Healthcare Facilities)
ด้วยกระบวนการออกแบบบูรณาการ (Integrated Design Processes: IDP)

กองแบบแผน กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ กระทรวงสาธารณสุข
กันยายน พ.ศ. 2561

COPYRIGHT 2018

กองแบบแผน กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ กระทรวงสาธารณสุข

Design and Construction Division, Department of Health Service Support,
Ministry of Public Health

คำนำ

ในแต่ละปี มีการใช้พลังงานภาคอาคาร (Building sector energy consumption) สูงถึงร้อยละ 20 – 27 ของปริมาณการใช้พลังงานรวมทั้งประเทศ อันเป็นสาเหตุสำคัญของการปล่อยก๊าซคาร์บอนเข้าสู่บรรยากาศโลกอันส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก โดยอาคารสถานพยาบาลภาครัฐนั้นนับเป็นอาคารที่มีการใช้พลังงานสูงตลอดเวลา ทั้ง 24 ชั่วโมง ไม่มีวันหยุด เพื่อให้บริการทางการแพทย์แก่ประชาชนทุกคน ดังนั้นการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนของสถานบริการสุขภาพภาครัฐให้ลดลงมาเป็นศูนย์นั้น ย่อมส่งผลที่เป็นประโยชน์อย่างมหาศาล ต่อปรากฏการณ์เรือนกระจกและสภาวะโลกร้อนที่ทุกประเทศกำลังประสบอยู่

โครงการการศึกษาเพื่อกำหนดกรอบแนวคิด ทฤษฎี และเทคนิควิธีการ เพื่อออกแบบอาคารสถานบริการสุขภาพต้นแบบที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ (Carbon Neutral Healthcare Facilities) ด้วยกระบวนการออกแบบบูรณาการ (Integrated Design Processes: IDP) นั้นมีวัตถุประสงค์สำคัญ คือ เพื่อศึกษาและกำหนดกรอบแนวคิด ทฤษฎี และเทคนิควิธีการ การออกแบบอาคารสถานบริการสุขภาพต้นแบบที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ (Carbon Neutral Healthcare Facilities) ด้วยกระบวนการออกแบบบูรณาการ (Integrated Design Processes: IDP) เพื่อเป็นความรู้สนับสนุนและเป็นแนวทางการออกแบบอาคาร แก่เจ้าหน้าที่กองแบบแผน กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ และผู้สนใจ ให้ผลงานด้านอาคารของกลุ่มบุคคลดังกล่าวได้มุ่งสู่การเป็นอาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ เพื่อการสร้างนวัตกรรม เพื่อรองรับต่อการพัฒนาประเทศตามแนวทาง Thailand 4.0 รวมทั้งยังเป็นกลไกสำคัญให้การออกแบบ-ก่อสร้างอาคารสถานบริการสุขภาพภาครัฐ ลดผลกระทบที่มีต่อสภาวะโลกร้อน ลดการใช้พลังงาน และเป็นมิตรต่อโลกและสิ่งแวดล้อม อย่างยั่งยืนสืบไป

คณะทำงานฯ

สารบัญ

	หน้า
คำนำ.....	I
สารบัญ.....	II
สารบัญตาราง.....	III
สารบัญรูปภาพ.....	IV
บทที่ 1 อาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ.....	1
1.1 ปรากฏการณ์เรือนกระจก.....	1
1.2 ผลกระทบจากก๊าซเรือนกระจกที่มีต่อภาวะโลกร้อน.....	3
1.3 ก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากอาคาร.....	4
1.4 อาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ (Carbon-Neutral Building).....	6
1.5 เครื่องมือตรวจวัดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	9
บทที่ 2 การออกแบบอาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ.....	15
2.1 กระบวนการออกแบบอาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ.....	15
2.1.1 กระบวนการสร้างจุดอ้างอิงด้านการปล่อยก๊าซคาร์บอนของอาคาร.....	15
2.1.2 กระบวนการทำให้เกิดความสมดุลระหว่างการปล่อยและการลดก๊าซคาร์บอน.....	16
2.1.3 กระบวนการหักกลบลบกันของการปล่อยก๊าซคาร์บอน.....	34
2.2 กระบวนการออกแบบอาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ (Carbon-neutral Building Design Process: CNDP) ด้วยกระบวนการออกแบบบูรณาการ (Integrated Design Processes: IDP).....	36
2.2.1 กระบวนการออกแบบบูรณาการ.....	36
2.2.2 ระบบสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคาร.....	38
2.2.3 ระบบสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคารแบบอัตโนมัติ.....	40
2.2.4 ระบบแบบจำลองสารสนเทศ.....	40
2.2.5 การกำหนดระดับความละเอียดของการพัฒนาแบบจำลองสารสนเทศ.....	42
2.2.6 ระบบจำลองสมรรถนะอาคาร และการปฏิบัติการร่วมกับระบบแบบจำลองสารสนเทศ.....	47
ภาคผนวก.....	54
ภาคผนวก ก บทคัดย่อแบบยาวรายงานการวิจัย เพื่อการเข้าร่วมการประชุมวิชาการ Passive and Low Energy Architecture 2018 ณ ประเทศฮ่องกง	
ภาคผนวก ข รายงานการวิจัยฉบับเต็ม ที่ได้รับการคัดเลือกเข้าร่วมการประชุมวิชาการ Passive and Low Energy Architecture 2018 ณ ประเทศฮ่องกง	
ภาคผนวก ค คำสั่งแต่งตั้งคณะทำงาน	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ระดับของค่า GWP ของก๊าซเรือนกระจก (GHGs) ต่างๆ ที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์.....	2
2.1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติกักเก็บลมประเภท HAWT และ VAWT.....	31
2.2 สรุปความหมาย Level of Detail / Level of Development ในวรรณกรรมต่างๆ.....	43

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การประเมินศักยภาพการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของแต่ละภาค (Sectors) และภูมิภาค	4
1.2 รูปตารางเปรียบเทียบ Carbon-counting Tools / GHG Calculator / Energy Modeling ด้านอาคาร จำนวน 40 เครื่องมือ	10
1.3 Conversion Factor ของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยการผลิตไฟฟ้า	10
1.4 Conversion Factor ของปริมาณการของการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติ (กิโลกรัมต่อ Therm) ของ 14 Carbon-counting Tools	11
2.1 เทคโนโลยีวัสดุเซลล์แสงอาทิตย์	19
2.2 ผังเส้นเวลาแสดงถึง ประสิทธิภาพสูงสุดของเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ จากการทดลองและมีการบันทึก	21
2.3 แผนภาพระบบ BIPV	22
2.4 Parameter ของ (B-2) Surrounding Obstacle และ (C-1) PV surface geometry	25
2.5 กรอบเชื่อมโยง Parameter ของ Partial Shading Effects	26
2.6 ตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงรูปร่างที่ซับซ้อนของเงาที่ทอดจาก Surrounding Obstacle ลงบนสู่พื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์	27
2.7 (a) และ (b) ตัวอย่างที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของเงาที่ทอดจาก Surrounding Obstacle ลงบนสู่ พื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาอาคาร BIPV ในเวลา 14.30 น. วันเพ็ญ (Winter Solstice)	28
2.8 (a) และ (b) ตัวอย่างที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของเงาที่ทอดจาก Surrounding Obstacle ลงบนสู่ พื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาอาคาร BIPV ในเวลา 15.30 น. วันเพ็ญ (Winter Solstice)	29
2.9 กลไกการทำงาน ของวิธีการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานน้ำด้วยรูปแบบ Pump Storage	30
2.10 เปรียบเทียบกังหันลมแนวแกนนอน (HAWT) และกังหันลมแนวแกนตั้ง (VAWT)	31
2.11 แผนภาพแสดงการทำงานของ Direct-fired Combustion Systems	34
2.12 Carbon Neutral Design Process (CNDP) Matrix	35
2.13 แผนภาพแสดงแนวความคิดกระบวนการออกแบบบูรณาการ (IDP)	37
2.14 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบกระบวนการออกแบบแบบตามลำดับ (ซ้าย) กับกระบวนการออกแบบบูรณาการ (IDP) (ขวา)	37
2.15 โอกาสและต้นทุนในการปรับปรุงอาคาร ในช่วงขั้นตอน (Phases) ต่างๆในช่วงชีวิตอาคาร	38
2.16 ประโยชน์ของการใช้งาน BIM ในกระบวนการออกแบบบูรณาการ (IDP)	42
2.17 การแสดงตัวอย่างการเพิ่มขึ้นของข้อมูลในระดับ Level of Development ตั้งแต่ LOD100 ถึง LOD500	44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 การแสดงตัวอย่างการเพิ่มขึ้นของข้อมูลในระดับ Level of Detail ของแบบจำลองสารสนเทศ เก้าอี้ตามการแบ่งระดับ AEC (UK) BIM Protocol.....	44
2.19 ตัวอย่างภาพจากโปรแกรม Autodesk Revit.....	45
2.20 ตัวอย่างภาพจากโปรแกรม ArchiCAD.....	46
2.21 ตัวอย่างภาพจากโปรแกรม MicroStation.....	47
2.22 ตัวอย่างภาพจากโปรแกรม Vectorwork.....	48

บทที่ 1

อาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ

1.1 ปรากฏการณ์เรือนกระจก

ปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effect) เป็นปรากฏการณ์ที่มีความสำคัญกับโลก เพราะ **ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases: GHGs)** เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซมีเทนจะกักเก็บความร้อนอันเกิดจากรังสีอินฟราเรด (Infrared: IR) บางส่วนไว้ในโลกไม่ให้สะท้อนกลับสู่บรรยากาศทั้งหมด มิฉะนั้นอุณหภูมิของโลกในช่วงเวลากลางคืนจะหนาวจัดและตอนกลางวันจะร้อนจัดจนสิ่งมีชีวิตไม่สามารถดำรงชีพได้ เพราะไม่มีบรรยากาศรองและกักเก็บพลังงานจากดวงอาทิตย์ ก๊าซเรือนกระจกนี้ทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีความร้อนไว้ในเวลากลางวัน แล้วค่อยๆ แผ่รังสีความร้อนออกมาในเวลากลางคืน ทำให้อุณหภูมิในบรรยากาศโลกไม่เปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2561b) ซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้คล้ายคลึงกับหลักการของเรือนกระจก (Greenhouse) ที่ใช้ปลูกพืชจึงเรียกว่า ปรากฏการณ์เรือนกระจก (Roche, 2017; ธนเวทย์ ประกิจ, 2553)

ก๊าซเรือนกระจก (GHGs) บางชนิดนั้นเกิดขึ้นเองผ่านกระบวนการต่างๆ ตามธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ แต่ GHGs บางชนิดนั้นเกิดขึ้นเพียงจากกิจกรรมของมนุษย์เท่านั้น GHGs ดังกล่าวโดยส่วนใหญ่คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide: CO₂) ก๊าซมีเทน (Methane: CH₄) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (Nitrous Oxide: N₂O) ก๊าซ Hydrofluorocarbon (HFC) และก๊าซ Sulfur Hexafluoride

GHGs ที่สำคัญ มีกระบวนการปรากฏเข้าสู่บรรยากาศดังต่อไปนี้

- **ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)** ที่ปรากฏเข้าสู่บรรยากาศของโลกนั้นเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ (Fossil Fuel) เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas) และถ่านหิน (Coal) รวมถึงการเผาไหม้ขยะมูลฝอย (Solid Waste) ผลิตภัณฑ์จากส่วนต่างๆ ของต้นไม้ และปฏิกิริยาทางเคมีจากการผลิตทางอุตสาหกรรม อีกด้วย และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังกล่าวถูกกำจัดหรือถูกกักเก็บ (Carbon Sequestration) จากบรรยากาศด้วยกระบวนการตามธรรมชาติ โดยการดูดซับจากต้นไม้เป็นส่วนหนึ่งของ วัฏจักรคาร์บอน (Carbon Cycle) (Roche, 2017; องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2555)
- **ก๊าซมีเทน (CH₄)** ปรากฏเข้าสู่บรรยากาศ จากการเผาไหม้ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมันจากมูลสัตว์และการปศุสัตว์ และการเกษตรกรรม รวมถึงจากการเน่าเปื่อยของสารอินทรีย์ในขยะมูลฝอยชุมชน (Municipal Solid Waste) อีกด้วย (Roche, 2017)
- **ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (Nitrous Oxide: N₂O)** มีแหล่งกำเนิดจากการปศุสัตว์และโรงงานอุตสาหกรรม โดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์และขยะมูลฝอย
- **ก๊าซ Hydrofluorocarbon (HFC) และก๊าซ Sulfur Hexafluoride** ซึ่งเป็นก๊าซประเภท Fluorinated Gases นั้นเป็นก๊าซสังเคราะห์ (Synthetic Gases) เกิดจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม

กิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ กำลังเพิ่มปริมาณก๊าซเรือนกระจกเหล่านี้ (อาเจยกเว้นไอน้ำ) การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากถ่านหิน น้ำมันและก๊าซธรรมชาติรวมทั้งการตัดไม้ทำลายป่าทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การทำการเกษตรและการปศุสัตว์ปล่อยก๊าซมีเทนและไนตรัสออกไซด์ ควันทนจากท่อไอเสียรถยนต์ปล่อยก๊าซโอโซน

นอกจากนี้ กระบวนการแปรรูปอุตสาหกรรมปล่อยสารฮาโลคาร์บอน (CFCs, HFCs, PFCs) การเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกนั้น ส่งผลให้ชั้นบรรยากาศมีความสามารถในการกักเก็บรังสีความร้อนได้มากขึ้น ผลที่ตามมาคือ อุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศที่เพิ่มขึ้นด้วย แต่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลกนั้น ไม่ได้เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิดยังมีศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Global Warming Potential: GWP) ที่แตกต่างกัน ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการแผ่รังสีความร้อนของโมเลกุล และขึ้นอยู่กับอายุของก๊าซนั้นๆ ในบรรยากาศ และจะคิดเทียบกับการแผ่รังสีความร้อนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เช่น 20 ปี 50 ปี หรือ 100 ปี (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2561a) โดยความรุนแรงของ GHGs ในการเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อนนั้นสามารถแปลงเป็นหน่วยวัดเชิงปริมาณได้ มี 2 วิธีการได้แก่

- 1) การใช้แนวคิด “ศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential: GWP)” กำหนดเป็นค่า GWP โดยค่า GWP นี้คือ การมีอิทธิพลต่อภาวะโลกร้อนในหนึ่งหน่วยเวลา (ระยะเวลา 100 ปี ที่ได้ถูกบัญญัติไว้ในพิธีสารเกียวโต (Kyoto Protocol) (Roche, 2017)) ในปริมาณที่สัมพันธ์กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งหมายถึงก๊าซเรือนกระจกนั้นๆ มีศักยภาพทำให้เกิดภาวะโลกร้อนได้เป็นกี่เท่าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยค่า GWP ของ GHGs ต่างๆ ได้ถูกแจกแจงไว้ในตารางที่ 1.1
- 2) การใช้ค่า **คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (Carbon Dioxide Equivalent: CO₂e)** ในหนึ่งหน่วยเวลา 100 ปี โดย 1 กิโลกรัม CO₂e = คาร์บอนไดออกไซด์หนัก 1 กิโลกรัม ซึ่งความเป็นจริงนั้นการปล่อย GHGs ของกิจกรรมต่างๆ บนโลกมีปริมาณมาก จึงนิยมใช้ค่าคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่านี้เป็นหน่วย เมตริกตันของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (MtCO₂) ซึ่งหน่วยการวัดแบบคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่านี้เป็นที่นิยมในระดับนานาชาติเพื่อใช้รวบรวมข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เนื่องจากใช้ระบบการวัดแบบมาตราเมตริก (Metric Unit) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ได้รับความนิยมใช้งานอยู่แล้ว

ตารางที่ 1.1 ระดับของค่า GWP ของก๊าซเรือนกระจก (GHGs) ต่างๆ ที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Roche, 2017)

ก๊าซเรือนกระจก	GWP
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	1
ก๊าซมีเทน (CH ₄)	21
ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (Nitrous Oxide: N ₂ O)	310
ก๊าซ Hydrofluorocarbon (HFC)	6,500
Sulfur Hexafluoride	23,900

ผลจากการสำรวจการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มวลรวมของประเทศไทยในปี ค.ศ. 2013 พบว่ามีปริมาณสูงถึง 4.45 MtCO₂ (The World Bank, 2018) โดยคิดเป็นปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้ามากถึง 42,596,193 ตัน หรือคิดเป็นการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.56 กิโลกรัมต่อการผลิตไฟฟ้าหนึ่งหน่วย (kg CO₂/kWh) (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2557)

1.2 ผลกระทบจากก๊าซเรือนกระจกที่มีต่อภาวะโลกร้อน

สิ่งมีชีวิตบนโลกจะไม่สามารถดำรงอยู่ได้หากโลกนี้ปราศจากปรากฏการณ์เรือนกระจก แต่การเพิ่มขึ้นของ GHGs ที่เกิดจากมนุษย์ (Anthropogenic Emissions) นั้นส่งผลกระทบให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อสภาพภูมิอากาศของโลก (Global Climate) เป็นอย่างมาก โดย Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ได้ทำนายว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกจะเพิ่มขึ้น 1.1 ถึง 6.4 องศาเซลเซียส เมื่อสิ้นสุดศตวรรษที่ 21 ขึ้นอยู่กับปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่จะเข้าสู่ชั้นบรรยากาศและตัวแปรอื่นๆ ที่มีอิทธิพลต่อสภาพภูมิอากาศ นอกจากอุณหภูมิโลกที่จะเพิ่มขึ้นแล้ว พบว่าระดับน้ำทะเลเฉลี่ยของโลกนั้นจะมีระดับเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ 20 ถึง 60 เซนติเมตร ในปี ค.ศ. 2100 อีกด้วย ระดับน้ำทะเลเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อชุมชนที่ตั้งอยู่บนเกาะ (Coastal Communities) ขณะที่อุณหภูมิโลกที่สูงขึ้นนั้นเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดสภาพอากาศที่แปรปรวน เกิดความแห้งแล้งและเกิดน้ำท่วมที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของมนุษย์ รวมทั้งอาจทำให้พืชพรรณ สัตว์ และสิ่งมีชีวิตบางประเภทสูญพันธุ์ได้ (Roche, 2017; Vongvisessomjai, 2010; Zuo & Zhao, 2014)

พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกในปี ค.ศ. 2015 นั้นสูงกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกในปี ค.ศ. 2014 อยู่ 0.13 องศาเซลเซียส และ ค.ศ. 2015 ยังเป็นปีแรกในประวัติศาสตร์ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกนั้นสูงกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกระหว่างปี ค.ศ. 1880 – ค.ศ. 1899 อีกด้วย ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวได้สอดคล้องกับภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นอย่างมากมายในสถานที่ต่างๆ ของโลก เช่น การเกิดปรากฏการณ์คลื่นความร้อน (Heat Waves) การเกิดภัยแล้ง อุทกภัย พายุ รวมทั้งไฟป่า อันสะท้อนให้เห็นถึงความเสี่ยงต่อระบบนิเวศและชุมชนของมนุษย์ที่จะประสบกับภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้น รุนแรงขึ้น (Roche, 2017)

สำหรับประเทศไทย การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นปัจจัยเสี่ยงที่จะส่งผลกระทบต่อร่างกายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยอุณหภูมิประเทศไทยในรอบ 50 ปีที่ผ่านมา แนวโน้มของอุณหภูมิเฉลี่ยอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิต่ำสุดนั้นเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และเมื่อพิจารณาเป็นรายภาคพบว่า อุณหภูมิในแต่ละภาคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน รวมถึงในช่วง 10 ปี ยังพบว่าจำนวนวันที่หนาวลดลง จำนวนวันที่ร้อนหรืออบอุ่นเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะจังหวัดในภาคกลางและเมืองขนาดใหญ่ เช่นกรุงเทพมหานคร นนทบุรี กาญจนบุรี ชุมพร และภูเก็ต เป็นต้น แสดงให้เห็นได้ว่า ประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะร้อนขึ้น และอาจเป็นปัญหาสำคัญในอนาคตหากไม่ดำเนินการใด

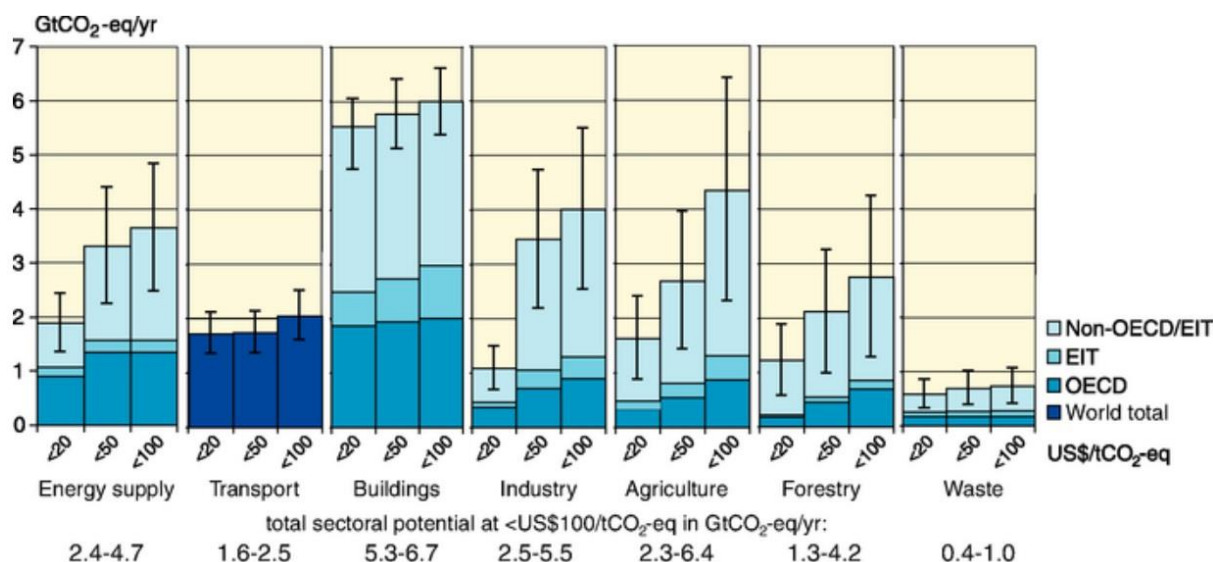
พบว่า อัตราป่วยด้วยโรคจากความร้อนเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยในช่วงปี พ.ศ. 2553-2556 อัตราป่วยเพิ่มขึ้นจาก 1.76 ต่อแสนประชากร ในปี พ.ศ.2553 เป็น 4.24 ต่อแสนประชากร ในปี พ.ศ.2556 ซึ่งอัตราป่วยจะสูงสุดในเดือนเมษายนและพฤศจิกายนเกือบทุกปี โดยเฉพาะในภาคเหนือและภาคใต้ ซึ่งสัมพันธ์กับฤดูร้อนของประเทศกลุ่มอาเซียนที่พบผู้ป่วยสูงสุด คือ กลุ่มอาเซียนเกษตรกร รองลงมาคือ กลุ่มคนงานรับจ้างทั่วไป และกลุ่มนักเรียน ซึ่งประชาชนกลุ่มนี้ยังได้รับผลกระทบจากอากาศที่ร้อนขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการปฏิบัติงานลดลงได้ถึง 25% นอกจากนี้ยังพบรายงานการเสียชีวิตในกลุ่มนักท่องเที่ยวต่างชาติจากโรคลมแดดที่จังหวัดภูเก็ต ในปี พ.ศ.2555 อีกด้วย (Kjellstrom & McMichael, 2013; กองประเมินผลกระทบต่อสุขภาพ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2559)

นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศยังเป็นปัจจัยเสริมให้เกิด โคมความร้อน (Urban Heat Island) ที่รุนแรงขึ้นในเขตเมืองซึ่งมีสภาวะแวดล้อมที่เอื้อต่อ การกักเก็บความร้อนอยู่แล้วอีกด้วย ปรากฏการณ์โคมความร้อนนี้ เป็นภาวะที่อุณหภูมิในเขตเมืองสูงกว่าเขตรอบนอก ในทุกช่วงเวลาทั้งกลางวัน กลางคืนและทุกฤดูกาล สามารถเกิดได้ในเมืองใหญ่ หรือเมืองที่มีประชากรเพียงประมาณ 10,000 คน ปรากฏการณ์นี้เป็น

ที่รู้จักมากกว่าร้อยละ 50 และคาดว่าจำนวนประชากรที่ได้รับผลกระทบอาจมากถึงครึ่งหนึ่งของประชากรโลกภายในปลายศตวรรษนี้ การเพิ่มสูงของอุณหภูมิเฉลี่ยยังส่งผลให้เกิดความต้องการพลังงาน พลังงานไฟฟ้าเพื่อทำความเย็นสูงขึ้น ทำให้เกิดการขยายกำลังการผลิตไฟฟ้า ซึ่งมีผลกระทบต่อเนื่องถึงปัญหาการขาดแคลนน้ำในหน้าแล้งที่จะใช้ผลิตไฟฟ้า และอุปโภคบริโภค (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2561c)

1.3 ก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากอาคาร

ข้อมูลจากแหล่งต่างๆ ได้ประเมินว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHGs) เข้าสู่บรรยากาศโลกจากภาคอาคาร (Building Sector) นั้นมีจำนวนประมาณ 33% ของปริมาณการปล่อย GHGs ทั้งหมดอันเกิดจากการใช้พลังงานจากแหล่งเชื้อเพลิงและพลังงานไฟฟ้า หรือเป็นประมาณ 8.6 กิกะตัน (Gigaton: Gt) ของ CO₂e ต่อปี รวมทั้งยังปล่อยก๊าซเรือนกระจกอื่นๆ เป็นปริมาณมหาศาล ได้แก่ 0.1 GtCO₂-eq N₂O และ 0.4 GtCO₂-eq CH₄ (International Energy Agency, 2011; Roche, 2017; Zuo, Read, Pullen, & Shi, 2012) จากข้อมูลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบของการปล่อย GHGs จากภาคอาคารที่มีต่อสภาวะโลกร้อนอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม กลับพบว่าภาคอาคารนั้นมีศักยภาพที่สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มากที่สุด ทั้งในมิติทางเศรษฐศาสตร์ และทั้งมิติทางปริมาณ (International Energy Agency, 2011) ดังที่แสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าภาคอาคารมีศักยภาพที่สามารถลดการปล่อย GHGs ได้เป็นอย่างมาก ตั้งแต่ 30% ถึง 50% ของปริมาณการปล่อย GHGs ในปัจจุบัน โดยไม่ต้องมีการเพิ่มการลงทุนอย่างเป็นนัยสำคัญแต่อย่างใด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการใช้งานอาคาร (Building Operation) และยังสามารลดการปล่อย GHGs ได้มากยิ่งขึ้นถ้ามุ่งเน้นการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการก่อสร้างอาคาร (Building Construction) ทั้งจากการขนส่ง การใช้น้ำในการก่อสร้างอาคาร รวมถึงการจัดการขยะในการก่อสร้างอย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย (Roche, 2017)



รูปที่ 1.1 การประเมินศักยภาพการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของแต่ละภาค (Sectors) และภูมิภาค (Regions) ในปี ค.ศ. 2030 (IPCC, 2007; Roche, 2017)

ก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยออกมาจากอาคารนั้นมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมภายนอกอาคาร ซึ่งสามารถนำมาจัดกลุ่มโดยแบ่งออกเป็นกลุ่มของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการปล่อย GHGs ของอาคารหนึ่งๆ ได้ดังใน **สมการที่ 1.1** ต่อไปนี้ (Roche, 2017)

$$T_{be} = O_e + C_e + W_e + W_a \dots\dots\dots (1.1)$$

- โดย T_{be} คือ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมของอาคาร (Total Building Emissions)
 O_e คือ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการใช้งานอาคาร (Operation Emissions)
 C_e คือ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการก่อสร้าง (Construction Emissions)
 W_e คือ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการใช้น้ำ (Water Emissions)
 W_a คือ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากขยะ (Waste Emissions)

นอกจากปัจจัยดังกล่าวที่ส่งผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของอาคารนั้น ยังมีปัจจัยอื่นที่ไม่ได้กล่าวถึงในรายงานฉบับนี้ ได้แก่ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพืชและการจัดสวน และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่งภายนอกขอบเขตของที่ดินของอาคาร

จากสมการที่ 1.1 สามารถอธิบายปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการปล่อย GHGs ของอาคารหนึ่งๆ ได้ตามที่ได้ระบุรายละเอียดในข้อที่ 1.3.1 – 1.3.4 ดังนี้

1.3.1 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการใช้งานอาคาร (Operation Emissions: O_e)

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการใช้งานอาคาร นั้นเกิดจากการใช้พลังงานทั้งพลังงานไฟฟ้า แก๊ส และพลังงานอื่นๆ เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้อาคารและการใช้งานอาคาร (Occupants / Building Usages) โดยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการใช้งานอาคารนั้นนับเป็นปริมาณสูงมากกว่า 80% ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมของอาคาร (Total Building Emissions) (Peng, 2016; UNEP SBCI, 2010) และตัวเลขดังกล่าวอาจสามารถแปรผันได้เป็นอย่างมากหากนับรวมปัจจัยด้านพลังงานสะสมรวมของวัสดุก่อสร้างอาคาร (Embodied Energy) (พิมลมาศ วรณคณาพล, 2014) รวมถึงปัจจัยด้านประเภทอาคาร และปัจจัยด้านสภาพภูมิอากาศ เข้ามาร่วมพิจารณาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของอาคาร

สิ่งสำคัญในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการใช้งานอาคารนั้น คือต้องลดการใช้พลังงานภายในอาคารนั้นให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้โดยวิธีการทำให้อาคารนั้นๆ เป็นหรือเข้าใกล้การเป็นอาคารที่ใช้พลังงานรวมเท่ากับศูนย์ (Net Zero Energy Buildings) ซึ่งได้อธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 1.4

1.3.2 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการก่อสร้าง (Construction Emissions: C_e)

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการก่อสร้างนั้นวัดจากปริมาณ GHGs ที่ปล่อยสู่บรรยากาศโลกระหว่างช่วงเวลาการก่อสร้างอาคาร ซึ่งการก่อสร้างนั้นประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ คือ การเตรียมที่ดินสถานที่ก่อสร้าง การเตรียมและเก็บรักษาวัสดุก่อสร้าง รวมถึงการจัดการต่อวัสดุ อุปกรณ์ ต่างๆ ที่สิ้นสุดการใช้งานในขั้นตอนการก่อสร้างอาคารอีกด้วย

1.3.3 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการใช้น้ำ (Water Emissions: W_e)

การใช้น้ำในอาคารนั้นเป็นสาเหตุหนึ่งของการปล่อย GHGs เข้าสู่บรรยากาศโลก โดยแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน ได้แก่ (1) ขั้นตอนการนำน้ำจากแหล่งน้ำถึงผู้บริโภค คือ การสูบน้ำจากท่อจ่ายน้ำประปาผ่านปั๊มเพื่อให้ออกยังหัวก๊อกจ่ายน้ำสำหรับผู้ใช้อาคาร และ (2) ขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้เหมาะสมแก่

วัตถุประสงค์การบริโภค คือ การทำความสะอาด และหรือ การฆ่าเชื้อโรค เพื่อกำจัดสิ่งสกปรก สารเคมี และเชื้อโรคและสารอินทรีย์ ต่างๆ ที่อยู่ในแหล่งน้ำต้นทาง ให้มีคุณภาพเหมาะสมกับการใช้งานและการบริโภคของผู้ใช้อาคาร การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการใช้น้ำ (W_e) นี้มีความแตกต่างกันอย่างมากภายในแต่ละสถานที่แต่ละภูมิภาค ซึ่งแปรเปลี่ยนไปตามคุณภาพของแหล่งน้ำดิบ รวมทั้งระยะทางจากแหล่งผลิตน้ำในแต่ละสถานที่

1.3.4 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากขยะ (Waste Emissions: W_a)

ขยะมูลฝอย (Solid Waste) เศษสิ่งเหลือใช้และสิ่งปฏิกูลต่างๆ ซึ่งเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์และสัตว์ รวมถึงสิ่งอื่นใดที่เก็บกวาดจากถนน หรือสถานที่ ทั้งจากการผลิต การบริโภค การขับถ่าย การดำรงชีวิตของมนุษย์ เป็นต้น (กรีธา สุขทั้ง และคณะ, 2548) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยเฉพาะก๊าซมีเทน (CH_4) ที่เกิดจากการเน่าเปื่อยย่อยสลายของขยะมูลฝอย การลดการปล่อย GHGs จากขยะมูลฝอยนี้สามารถทำได้โดยการจัดการขยะที่มีประสิทธิภาพของอาคาร เช่น การแยกขยะ การนำขยะมาใช้ใหม่ (Reuse / Recycle) อย่างเหมาะสม การใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น ลดการใช้กระดาษ เป็นต้น

1.4 อาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ (Carbon-Neutral Building)

1.4.1 ข้อถกเถียงของนิยาม และนิยามของอาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ

พบว่าความหมายของอาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ (Carbon-Neutral Building) นั้นมีความแตกต่างจากการให้นิยามของหลายผู้วิจัยและหลายองค์กร ซึ่งการนิยามความหมายดังกล่าวนี้มีทั้งความสอดคล้องและความขัดแย้งกัน ไม่มีการให้ความหมายที่ชัดเจนเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน (Boake, 2008; Jason N. Rauch, 2009; Kennedy & Sgouridis, 2011; Murray & Dey, 2009; Nässén, Holmberg, Wadeskog, & Nyman, 2007; Newton & Tucker, 2010; UNEP SBCI, 2010) การให้ความหมายของ Carbon-neutral Building ที่แตกต่างกันดังกล่าวนี้เป็นอุปสรรคสำคัญในการดำเนินการให้แนวความคิดนี้สำเร็จได้หรือไม่ประสบความสำเร็จเนื่องจาก การให้ความหมายของ Carbon-neutral Building ที่แตกต่างกันทำให้เกิดความแตกต่างด้านเกณฑ์การวัดความสำเร็จของความเป็น Carbon Neutrality ทั้งทางด้านเกณฑ์การออกแบบ (Design Criteria) และเกณฑ์ด้านการวัดสมรรถนะ (Performance Measuring Criteria) (Zuo et al., 2012)

โดยสรุป อาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ (Carbon-Neutral Building) หมายถึง อาคารที่ไม่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนสู่บรรยากาศโลกอย่างสุทธิที่ผ่านกระบวนการคำนวณอย่างโปร่งใสด้วยกระบวนการสองอย่าง (Attia, 2016; Ceranic, Angela, Faulkner, & Latham, 2016; UK Department of Energy and Climate Change., 2016) ได้แก่

(1) การทำให้เกิดความสมดุลระหว่างการปล่อยและการลดก๊าซคาร์บอน (Balancing Emissions) คือการลดการใช้พลังงานของอาคารจากแหล่งพลังงานที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้ต่ำที่สุดเท่าที่สามารถเป็นไปได้ และสร้างพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทน (Renewable Energy) ที่ปลอดจากการปล่อย GHGs ให้มากที่สุดเท่าที่สามารถทำได้

(2) การหักกลบลบกันของการปล่อยก๊าซคาร์บอน (Carbon Offset) คือ การจัดให้มีโครงการที่มีการกำจัดก๊าซคาร์บอนออกจากบรรยากาศ เช่น การจัดสวนและการปลูกต้นไม้ที่สามารถคำนวณได้

ว่าสามารถหักกลบลบกันของการปล่อยก๊าซคาร์บอนจากการใช้พลังงานในอาคารได้ **กระบวนการที่ 1 และ 2** ดังกล่าวนำมาคำนวณแล้วการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแล้วต้องมีค่าเท่ากับศูนย์หรือต่ำกว่าศูนย์

แนวทางการออกแบบอาคารที่มีหลักการใกล้เคียงกับอาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ และอาจสร้างความสับสนแก่ผู้ออกแบบอาคาร คือ **อาคารที่มีการใช้พลังงานรวมเป็นศูนย์ (Net Zero Energy Building)** และ **อาคารเขียว (Green Building)** ซึ่งมีความแตกต่างกับอาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

อาคารที่มีการใช้พลังงานรวมเป็นศูนย์ (Net Zero Energy Building: NZEB) หมายถึง อาคารที่สามารถสร้างพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทนได้อย่างน้อยเท่ากับพลังงานที่ถูกใช้ในอาคาร และมีการเชื่อมระบบด้านพลังงานเข้ากับระบบสาธารณูปโภคในระดับที่ใหญ่กว่า และอาจไม่ใช่อาคารที่ดำรงอยู่ได้ด้วยตนเอง (มิได้ปลดตนเองออกจากระบบพลังงานภายนอก) โดยใช้พลังงานรวมทั้งหมดเป็นศูนย์ต่อหนึ่งช่วงเวลา หรือสามารถสร้างพลังงานจ่ายกลับคืนสู่ระบบได้ (Marszal et al., 2011; Sartori, Napolitano, & Voss, 2012; Sun, Huang, & Huang, 2015) ซึ่งจะมี **ความแตกต่าง** ในหลักการ **จากอาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ** เนื่องจาก Carbon-Neutral Building นั้นอาจไม่จำเป็นต้องให้การใช้พลังงานรวมทั้งหมดเป็นศูนย์ แต่มุ่งพิจารณาที่การปล่อยก๊าซคาร์บอนในขั้นตอนสุดท้ายหลังจากคำนวณ Balancing และ Offsetting แล้วต้องมีค่าเท่ากับศูนย์หรือดีกว่า

ส่วน **อาคารเขียว (Green Building)** นั่นคือ อาคารที่มีการก่อสร้างโดยมีกระบวนการออกแบบและก่อสร้างที่คำนึงถึงสิ่งแวดล้อมในภาพรวมทั้งหมด โดยมีได้มุ่งคำนึงแต่เรื่องประสิทธิภาพด้านพลังงานและการสร้างพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทนเท่านั้น แต่ยังคงคำนึงระบบนิเวศในสถานที่ตั้ง แหล่งน้ำ แสง เสียง การปลดปล่อยสารพิษสู่ภายนอกและสู่ภายในอาคาร ตลอดช่วงอายุขัยของอาคาร ตั้งแต่การออกแบบ ก่อสร้าง ใช้งานอาคาร บำรุงรักษาอาคาร การปรับปรุงอาคาร จนถึงการปลดระวาง-ทุบทำลายอาคาร และยังมีความหมายที่กว้างไกลไปถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ การใช้งาน ความคงทนถาวร และการสร้างความสบายแก่ผู้ใช้อาคารอีกด้วย เพราะฉะนั้นจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า NZEB ซึ่งคำนึงด้านการใช้และการสร้างพลังงาน และอาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธินั้นเป็นเพียงส่วนหนึ่งของ Green Building เท่านั้น (Paul & Taylor, 2008)

1.4.2 ช่วงชีวิตของอาคาร (Building's Life Cycle) ที่สัมพันธ์กับการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

Carbon-Neutral Building นั้นจะเกิดขึ้นได้สำเร็จนั้นจำเป็นต้องใช้ **กระบวนการออกแบบปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ (Carbon-Neutral Design)** ซึ่งเป็นกระบวนการออกแบบที่มุ่งเน้นการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอด **ช่วงชีวิตของอาคาร (Building's Life Cycle)** (Kilroy, Wasley, & Quale, 2006) โดย แบ่งออกเป็น 4 ช่วง เวลาหลักของช่วงชีวิตอาคารได้แก่ (Kilroy et al., 2006; Roche, 2017)

- ช่วงเวลาก่อนการก่อสร้างอาคาร (Before Construction) เป็นช่วงเวลาที่มีการปล่อย GHGs เป็นอย่างมากจากการแปรรูปวัตถุดิบให้เป็นวัสดุก่อสร้าง
- ช่วงเวลาก่อสร้างอาคาร (During Construction) ก๊าซเรือนกระจกจะถูกปล่อยสู่บรรยากาศโลกโดยกิจกรรมต่างๆ ดังนี้ การขนส่งวัสดุก่อสร้างจากแหล่งสู่สถานที่ก่อสร้าง การเตรียมที่ดินสำหรับการก่อสร้าง การใช้อุปกรณ์และเครื่องจักรในการก่อสร้าง รวมถึงกระบวนการก่อสร้างอาคารในช่วงเวลาต่างๆ อีกด้วย

- ช่วงเวลาใช้งานอาคาร (Building's Operation) ซึ่งเป็นช่วงชีวิตอาคารที่มีการปล่อย GHGs มากที่สุด (UNEP SBCI, 2010) โดยคิดเป็นปริมาณมากถึง 85.4% ของการปล่อย GHGs ภาควิศวกรรมทั้งหมด (Peng, 2016) โดยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกนี้เกิดจากการใช้พลังงานในรูปแบบต่างๆ เพื่อตอบสนองการใช้งานของอาคารและความต้องการของผู้ใช้อาคาร จากระบบปรับอากาศ ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เป็นต้น
- ช่วงเวลาปลดระวางและทุบทำลายอาคาร (Building Decommissioning and Demolition) ซึ่งสามารถปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมการทุบทำลายอาคาร การนำวัสดุกลับมาใช้ซ้ำ (Reusing) การนำวัสดุอาคารไปผลิตซ้ำ (Recycling) และการขนส่งเศษวัสดุไปทิ้งหรือทำลาย เป็นต้น

1.4.3 แนวทางการบรรลุถึงอาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ

ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 1.4.1 เพื่อให้บรรลุถึงอาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ ซึ่งเป็นอาคารที่ไม่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนสู่บรรยากาศโลกอย่างสุทธิที่ผ่านกระบวนการคำนวณอย่างโปร่งใสด้วยกระบวนการสองอย่าง คือ กระบวนการทำให้เกิดความสมดุลระหว่างการปล่อยและการลดก๊าซคาร์บอน (Balancing Emissions) และกระบวนการหักกลบลบกันของการปล่อยก๊าซคาร์บอน (Carbon Offset) นั้น แต่กระบวนการทั้งสองนั้นมีรายละเอียดปลีกย่อยที่จะต้องดำเนินการให้สำเร็จ จึงจะทำให้กระบวนการใหญ่ทั้งสองประสบความสำเร็จ ดังรายละเอียดต่อไปนี้ (Roche, 2017)

กระบวนการ Balancing Emissions ย่อยที่ 1 สิ่งแรกที่ต้องออกแบบอาคารและผู้เกี่ยวข้องจะต้องพยายามทำให้สำเร็จคือ การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคารให้มากที่สุดเสียก่อน ตัวอย่างเช่น การใช้อุปกรณ์ไฟฟ้า และระบบปรับอากาศภายในอาคารที่มีประสิทธิภาพ การใช้การระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ การใช้แสงธรรมชาติ เป็นต้น โดยหลักการแล้วผู้ออกแบบอาคารควรลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการย่อยที่ 1 ให้ได้ประมาณ 80% ของเป้าหมาย เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ

กระบวนการ Balancing Emissions ย่อยที่ 2 ลำดับถัดไปที่ผู้ออกแบบอาคารต้องดำเนินการให้การปล่อยกับการลดก๊าซคาร์บอนจากอาคารนั้นมีความสมดุลกัน เพื่อการเป็นอาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ ด้วยการ การติดตั้งระบบสร้างพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทน (Renewable Energy Sources: RES) เช่น การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Panels / Solar Cells) กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า (Wind Turbines) หรือ ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานน้ำขนาดเล็ก (Small-scale Hydropower Systems) เป็นต้น (Botkin & Keller, 2011; Parida, Iniyar, & Goic, 2011) โดยหลักการแล้วผู้ออกแบบอาคารควรลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการย่อยที่ 2 (ร่วมกับกระบวนการ Carbon Offset) ไม่เกินประมาณ 20% ของเป้าหมายเนื่องจากมีต้นทุนสูง (Roche, 2017)

สืบเนื่องจาก สมการที่ 1.1 ใน หัวข้อที่ 1.3 เมื่อดำเนินการตามกระบวนการ Balancing Emissions ทั้งสองกระบวนการย่อยแล้วยังมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากอาคารหลงเหลือจึงค่อยดำเนินการกระบวนการหักกลบลบกันของการปล่อยก๊าซคาร์บอน (Carbon Offset) ต่อไป (รายละเอียดในบทที่ 2.1 ระเบียบวิธีของกระบวนการออกแบบอาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ) เพื่อให้อาคารมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ เท่ากับหรือน้อยกว่าศูนย์ ดังรายละเอียดใน สมการที่ 1.2 ต่อไปนี้

$$0 \geq Tbe - Rs \dots\dots\dots (1.2)$$

โดย Tbe คือ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมของอาคาร (จากสมการที่ 1.1)

Rs คือ การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้พลังงานทดแทน

หมายเหตุ ระเบียบวิธีการคำนวณนี้ไม่ได้รวมถึงการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่ง (Transportation Emissions) แต่อย่างใด

1.5 เครื่องมือตรวจวัดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon-Counting Tools)

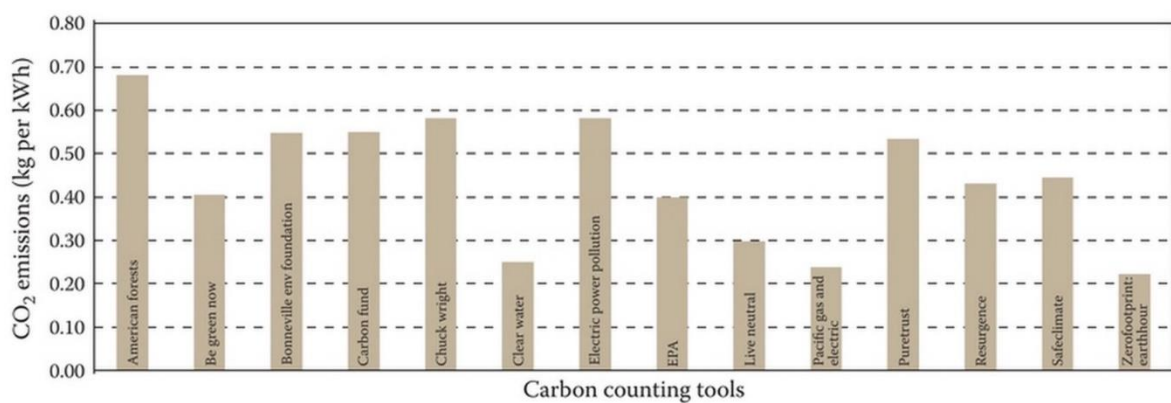
1.5.1 ประเภทของเครื่องมือตรวจวัดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และข้อจำกัด

การปล่อย GHGs สู่ชั้นบรรยากาศโลกนั้นสามารถที่จะตรวจวัดเชิงปริมาณได้ มีเครื่องมือและวิธีการเป็นจำนวนมากที่ถูกคิดค้นตามวัตถุประสงค์ดังกล่าว ซึ่งโดยส่วนใหญ่ใช้การประมาณค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂e) จากสิ่งใดสิ่งหนึ่ง (เช่น อาคาร เป็นต้น) ต่อหนึ่งหน่วยเวลา นั่นคือ **เครื่องมือตรวจวัดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon-counting Tools)** และในเครื่องมือดังกล่าว นั้นเป็น Carbon Footprint Calculators ที่ให้บริการในรูปแบบ web application โดยเครื่องมือดังกล่าวนี้เอื้อให้ผู้ออกแบบอาคารสามารถใช้งานร่วมกับกระบวนการออกแบบได้อย่างสะดวก และผู้ออกแบบอาคารจะสามารถประเมินกลยุทธ์ด้านการออกแบบอาคารเพื่อลดการปล่อย GHGs / ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้อย่างสะดวกและเป็นอันหนึ่งอันเดียวกับกระบวนการออกแบบ

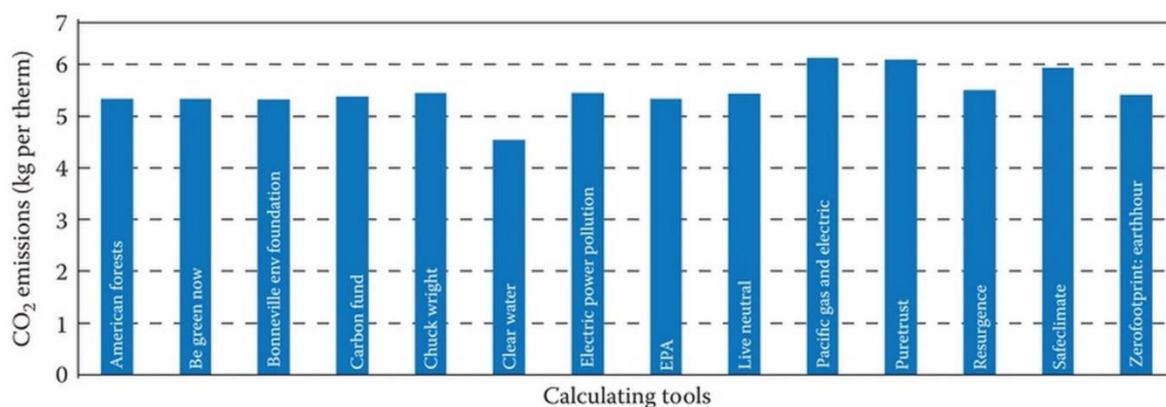
La Roche (2010) และ La Roche (2017) ได้เปรียบเทียบ Carbon-counting Tools / GHG Calculator และซอฟต์แวร์ Energy Modeling ด้านอาคาร จำนวน 40 เครื่องมือ ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 1.2 ในประเด็นที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่างๆ โดย Column ที่ 1 (ด้านซ้ายสุด) ได้แสดงชื่อของเครื่องมือ และ Column ลำดับถัดมาได้แสดงถึงปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับอาคาร ที่เป็นแหล่งกำเนิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ การใช้งานอาคาร (Operation) การขนส่ง (Transportation) ขยะ (Waste) การก่อสร้างอาคาร (Construction) และการใช้น้ำภาคอาคาร (Water) ช่องสี่เหลี่ยมที่เติมในตารางแสดงให้เห็นว่าเครื่องมือใดมีความสามารถคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนจากแหล่งกำเนิดใดได้ โดยการศึกษาพบว่าเครื่องมือส่วนใหญ่นั้นมีความสามารถคำนวณหรือคาดการณ์การปล่อย GHGs จากการใช้งานอาคารและการขนส่ง แต่มีเครื่องมือเป็นจำนวนน้อยที่สามารถคำนวณหรือคาดการณ์การปล่อย GHGs จากการใช้น้ำ จากกระบวนการก่อสร้างอาคาร และจากขยะได้ (Roche, 2017) และยังพบว่าเครื่องมือดังกล่าวจำนวนมากนั้นมีกระบวนการคำนวณที่ไม่โปร่งใส ผลการคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละเครื่องมือทำให้ผลลัพธ์ที่คลาดเคลื่อนไม่ตรงกัน ซึ่งผู้ที่ต้องการนำผลลัพธ์ไปใช้งาน จำเป็นต้องมีความระมัดระวังและคำนึงถึงข้อจำกัดเรื่องนี้ โดยเฉพาะประเด็นด้านปัจจัยการแปลงค่า (Conversion Factors) ที่เครื่องมือต่างๆ ใช้ค่าไม่ตรงกัน ตัวอย่างเช่น Conversion Factor ของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยการผลิตไฟฟ้า (กิโลกรัมต่อ kWh) ที่เครื่องมือต่างๆ มีการคำนวณไม่เท่ากัน (รูปที่ 1.3) และรูปที่ 1.4 ที่แสดงให้เห็นถึงปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยของการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติ (กิโลกรัมต่อ Therm) เป็นต้น

APPLICATION															OPERATION	TRANSPORTATION		WASTE	CONSTRUCTION	WATER
	ELECTRICITY	LIGHTS	FANS	A/C	APPLIANCES	NAT GAS	PROPANE	HEAT OIL	WOOD	COAL	LPG	KEROSENE	BUTANE	WATER HEATER	FURNACE	AUTO	AIRPLANE			
Act on CO ₂ calculator																				
American forests																				
Athena: EcoCalculator for assemblies																				
Be green now																				
Berkeley institute of the environment																				
Best foot forward																				
Bonneville environmental foundation																				
BP calculator																				
Build carbon neutral construction calculator																				
California carbon calculator																				
Carbon footprint																				
CarbonCounter.org																				
Carbon fund																				
Center for alternative technologies																				
Chuck wright																				
City of fair Oaks, CA water use calculator																				
City of Tampa, Florida water use calculator																				
Clear water																				
Electric power pollution calculator																				
Energy star home energy yardstick																				
Energy star target finder																				
EPA personal emissions calculator																				
EPA waste reduction model WARM																				
GEIC calculator																				
HEED																				
Home energy saver calculator																				
Inconvenient truth																				
Live neutral																				
Pacific gas and electric																				
Puretrust																				
Resurgence																				
Safeclimate																				
TerraPass																				
The conservation fund																				
The nature conservancy's carbon footprint calculator																				
Yahoo green calculator																				
Water conservation calculator																				
Zerofootprint: Earthhour																				
Zerofootprint: Unilever Go Blue																				

รูปที่ 1.2 รูปตารางเปรียบเทียบ Carbon-counting Tools / GHG Calculator / Energy Modeling ด้าน
อาคาร จำนวน 40 เครื่องมือ (Roche, 2017)



รูปที่ 1.3 Conversion Factor ของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยการผลิตไฟฟ้า
(กิโลกรัมต่อ kWh) ของ 14 Carbon-counting Tools (Roche, 2017)



รูปที่ 1.4 Conversion Factor ของปริมาณการของการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติ (กิโลกรัมต่อ Therm) ของ 14 Carbon-counting Tools (Roche, 2017)

1.5.2 Recommended Carbon-Counting Tools ในขั้นตอนต่างๆ ด้านอาคาร

จากรูปที่ 1.2 จะเห็นได้ว่าไม่มี Carbon-Counting Tools ใด สามารถคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ครบทุกมิติ โดยเครื่องมือแต่ละตัวล้วนแล้วแต่มีข้อเด่น-ข้อด้อยและคุณสมบัติการใช้งานที่แตกต่างกัน โดยสามารถจำแนกเครื่องมือคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นที่แนะนำ (Recommended Carbon-counting Tools) ในขั้นตอนต่างๆ ด้านอาคาร ได้ดังต่อไปนี้ (Roche, 2017)

- **การใช้พลังงานด้านอาคาร (Operational Energy)** เครื่องมือที่แนะนำคือ
 - HEED (Home Energy Efficient Design) (UCLA Department of Architecture and Urban Design, 2018)
 - Autodesk Insight 360 (Autodesk, 2018)
- **การก่อสร้างอาคาร (Construction)** เครื่องมือที่แนะนำคือ
 - Build Carbon Neutral (BuildCarbonNeutral.org, 2007)
- **การใช้น้ำ (Water)** เครื่องมือที่แนะนำคือ
 - Carbon Footprint (carbonfootprint.com, 2018)
- **ขยะ (Waste)** เครื่องมือที่แนะนำคือ
 - EPA Carbon Footprint Calculator (US EPA, 2016)
- **การขนส่ง (Transportation)** เครื่องมือที่แนะนำคือ
 - Carbon Footprint (carbonfootprint.com, 2018)
 - EPA Carbon Footprint Calculator (US EPA, 2016)

หนังสืออ้างอิง

Attia, S. (2016). Towards regenerative and positive impact architecture: A comparison of two net zero energy buildings. *Sustainable Cities and Society*, 26, 393–406.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.04.017>

- Autodesk. (2018). Insight - High performance and sustainable building design analysis. Retrieved September 12, 2018, from <https://insight.autodesk.com/oneenergy>
- Boake, T. M. (2008). The Leap to Zero Carbon and Zero Emissions: Understanding How to Go Beyond Existing Sustainable Design Protocols. *Journal of Green Building*, 3(4), 64–77. <https://doi.org/10.3992/jgb.3.4.64>
- Botkin, D. B., & Keller, E. A. (2011). *Environmental Science: Earth as a Living Planet* (8 edition). Hoboken, NJ: Wiley.
- BuildCarbonNeutral.org. (2007). Construction Carbon Calculator || BuildCarbonNeutral.org - A CO2 calculator for your whole building project. Retrieved September 12, 2018, from <http://buildcarbonneutral.org/>
- carbonfootprint.com. (2018). Home of Carbon Footprinting. Retrieved September 12, 2018, from <https://www.carbonfootprint.com/>
- Ceranic, B., Angela, D., Faulkner, M., & Latham, D. (2016). Case study based approach to integration of sustainable design analysis, performance and building information modelling. In *The Sustainable City XI* (Vol. 204). Retrieved from <http://derby.openrepository.com/derby/handle/10545/582957>
- International Energy Agency. (2011). *World Energy Outlook 2011*. Retrieved from <https://www.iea.org/newsroom/news/2011/november/world-energy-outlook-2011.html>
- IPCC. (2007). *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4)*. Retrieved from https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html
- Jason N. Rauch. (2009). Defining sustainability metric targets in an institutional setting. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 10(2), 107–117. <https://doi.org/10.1108/14676370910945927>
- Kennedy, S., & Sgouridis, S. (2011). Rigorous classification and carbon accounting principles for low and Zero Carbon Cities. *Energy Policy*, 39(9), 5259–5268. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.05.038>
- Kilroy, E., Wasley, J., & Quale, J. (2006). *Carbon Neutral Affordable Housing: A Guidebook for Providers, Designers and Students of Affordable Housing*. Retrieved from <http://www.tboake.com/carbon-aia/pdf/CND%20Affordable%20Housing%20Guide-sm.pdf>
- Kjellstrom, T., & McMichael, A. J. (2013). Climate change threats to population health and well-being: the imperative of protective solutions that will last. *Global Health Action*, 6(1), 20816. <https://doi.org/10.3402/gha.v6i0.20816>
- Marszal, A. J., Heiselberg, P., Bourrelle, J. S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., & Napolitano, A. (2011). Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, 43(4), 971–979. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.022>

- Murray, J., & Dey, C. (2009). The carbon neutral free for all. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3(2), 237–248. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2008.07.004>
- Nässén, J., Holmberg, J., Wadeskog, A., & Nyman, M. (2007). Direct and indirect energy use and carbon emissions in the production phase of buildings: An input–output analysis. *Energy*, 32(9), 1593–1602. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.01.002>
- Newton, P. W., & Tucker, S. N. (2010). Hybrid buildings: a pathway to carbon neutral housing. *Architectural Science Review*, 53(1), 95–106. <https://doi.org/10.3763/asre.2009.0052>
- Parida, B., Iniyar, S., & Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1625–1636. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.032>
- Paul, W. L., & Taylor, P. A. (2008). A comparison of occupant comfort and satisfaction between a green building and a conventional building. *Building and Environment*, 43(11), 1858–1870. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.11.006>
- Peng, C. (2016). Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling. *Journal of Cleaner Production*, 112, 453–465. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.078>
- Roche, P. M. L. (2017). *Carbon-Neutral Architectural Design, Second Edition*. CRC Press.
- Sartori, I., Napolitano, A., & Voss, K. (2012). Net zero energy buildings: A consistent definition framework. *Energy and Buildings*, 48, 220–232. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.032>
- Sun, Y., Huang, P., & Huang, G. (2015). A multi-criteria system design optimization for net zero energy buildings under uncertainties. *Energy and Buildings*, 97, 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.008>
- The World Bank. (2018). CO2 emissions (metric tons per capita) | Data. Retrieved September 11, 2018, from <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC>
- UCLA Department of Architecture and Urban Design. (2018). HEED: Home Energy Efficient Design. Retrieved September 12, 2018, from <http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/heed/>
- UK Department of Energy and Climate Change. (2016, January 20). Making the Department of Energy & Climate Change sustainable - GOV.UK. Retrieved February 22, 2018, from <https://www.gov.uk/guidance/making-the-department-of-energy-climate-change-sustainable>
- UNEP SBCI. (2010). *2009-2010 Annual Report & 2010-2011 Work Plan & Budget*. Retrieved from http://staging.unep.org/sbci/pdfs/2009_2010_AnnualReport_final.pdf
- US EPA, O. of A. and R. (2016). Carbon Footprint Calculator | Climate Change | US EPA [Data & Tools]. Retrieved September 12, 2018, from <https://www3.epa.gov/carbon-footprint-calculator>

- Vongvisessomjai, S. (2010). Effect of global warming in Thailand. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 32(4), 431–444.
- Zuo, J., Read, B., Pullen, S., & Shi, Q. (2012). Achieving carbon neutrality in commercial building developments – Perceptions of the construction industry. *Habitat International*, 36(2), 278–286. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2011.10.010>
- Zuo, J., & Zhao, Z.-Y. (2014). Green building research–current status and future agenda: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 271–281. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.021>
- กริษา สุขทั้ง และคณะ. (2548). การแยกขยะ. Retrieved February 20, 2018, from <http://arts.kmutt.ac.th/ssc210/Group%20Project/ASSC210/2.48%20anurak%20forest/recyclekaya.html>
- กองประเมินผลกระทบต่อสุขภาพ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. (2559). ผลกระทบต่อสุขภาพจากความร้อน. Retrieved from <http://hia.anamai.moph.go.th/download/hia/manual/book/book50.pdf>
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2557). ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปี พ.ศ. 2556. Retrieved from https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=342&Itemid=127&catid=37
- ธนเวทย์ ประกิจ. (2553). โครงการเสนอแนะศึกษาและออกแบบสถาปัตยกรรมภายใน สถาบันการเรียนรู้ระยะสี่เขียว | RMUTT Research Repository:คลังข้อมูลงานวิจัย. Retrieved February 6, 2018, from <http://www.research.rmutt.ac.th/?p=10451>
- พิมลมาศ วรณคนาพล. (2014). ดัชนีพลังงานสะสมรวมของอาคารและวัสดุก่อสร้างอาคารในช่วงการก่อสร้างและรื้อถอน. Retrieved from http://www.tnrr.in.th/?page=result_search&record_id=267024
- องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2555). อภิธานศัพท์และคำย่อด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก ปี 2555. Retrieved February 6, 2018, from http://www.tgo.or.th/2015/thai/download_detail.php?id=47
- องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2561a). กิจกรรมที่ทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจก. Retrieved September 11, 2018, from <http://www.tgo.or.th/2015/thai/content.php?s1=7&s2=18&sub3=sub3>
- องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2561b). ชนิดของก๊าซเรือนกระจก. Retrieved September 11, 2018, from <http://www.tgo.or.th/2015/thai/content.php?s1=7&s2=16>
- องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2561c). อุณหภูมิ. Retrieved September 11, 2018, from <http://www.tgo.or.th/2015/thai/content.php?s1=8&s2=23>

บทที่ 2

การออกแบบอาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ

2.1 กระบวนการออกแบบอาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ (Carbon-neutral Building Design Process: CNDP)

ความพยายามในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากน้ำมือมนุษย์ (Anthropogenic Emission) นั้นเป็นสิ่งสำคัญในการลดความรุนแรงของภาวะเรือนกระจกที่กำลังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและทุกชีวิตบนโลกใบนี้ในเวลานี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนจากภาคอาคาร ซึ่งจะสามารถทำได้สำเร็จด้วยการใช้ กระบวนการออกแบบอาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ (Carbon-neutral Building Design Process: CNDP) (Roche, 2017)

ดังที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 1.3 การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนจากภาคอาคารนั้นจะต้องคำนึงถึงตลอดทั้งช่วงชีวิตอาคาร (Building Life Cycle) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปล่อยคาร์บอนที่เกิดจากการใช้งานอาคาร (Operation Emissions: O_e) ที่คิดเป็นปริมาณมากกว่า 80% ของปริมาณทั้งหมดตลอดช่วงชีวิตอาคาร (Peng, 2016) ซึ่งเป็นเป้าหมายที่การศึกษานี้ให้ความสำคัญ

ปัจจุบันยังไม่มีเครื่องมือ Carbon-counting Tools ที่สามารถคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนได้อย่างครบถ้วนจากทุกปัจจัยทั้งตลอดช่วงชีวิตอาคารได้ ดังนั้นผู้ออกแบบอาคารและผู้เกี่ยวข้อง ต้องประยุกต์การใช้กระบวนการ เข้ากับเครื่องมือ เทคนิค ต่างๆ จึงจะทำให้ CNDP บรรลุเป้าหมาย คือ การออกแบบอาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิสำเร็จ ซึ่งสามารถบรรลุได้ยากมากเนื่องจากการทำให้อาคารหลังหนึ่งๆ นั้นไม่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนเลยนั้นเป็นสิ่งที่ยังเป็นไปไม่ได้ในเวลานี้ แต่ด้วยกระบวนการ CNDP นั้นจะทำให้อาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอน “แบบสุทธิ” ซึ่งเป็นเป้าหมายเชิงแนวความคิด (Conceptual Goals) ที่สามารถเป็นประโยชน์เชิงปฏิบัติการ (Operational Goals) ได้

สืบเนื่องจากเนื้อหาที่ได้กล่าวไปในบทที่ 1.4.3 กระบวนการ CNDP นั้นมีลำดับของกระบวนการดังต่อไปนี้ (Attia, 2016; Roche, 2017; K. Smith, 2007)

- (1) กระบวนการสร้างจุดอ้างอิงด้านการปล่อยก๊าซคาร์บอนของอาคาร (Emission Baseline)
- (2) กระบวนการทำให้เกิดความสมดุลระหว่างการปล่อยและการลดก๊าซคาร์บอน (Balancing Emissions)
- (3) กระบวนการหักกลบลบกันของการปล่อยก๊าซคาร์บอน (Carbon Offset) ด้วยการสร้างมาตรการดักจับและกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture and Sequestration หรือ Carbon Sinks) และหรือ การลงทุนในโครงการดักจับและกักเก็บคาร์บอน (Carbon Projects Funding)

รายละเอียดของแต่ละกระบวนการได้ถูกแจกแจงในหัวข้อต่อไปนี้

2.1.1 กระบวนการสร้างจุดอ้างอิงด้านการปล่อยก๊าซคาร์บอนของอาคาร (Emission Baseline)

การสร้างจุดอ้างอิงด้านการปล่อยก๊าซคาร์บอนของอาคาร (Emission Baseline) เพื่อเป็นจุดอ้างอิงให้ผู้ออกแบบสร้างทางเลือกต่างๆ ด้านการออกแบบ-ปรับปรุงอาคาร เพื่อการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนจนเหลือศูนย์ โดย Emission Baseline นี้มักจะใช้ค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนมีหน่วยเป็น กิโลกรัมของ

คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อตารางเมตรต่อปี (Kilograms of CO₂e per Square Meter per Year: kg CO₂e/m²/yr) Emission Baseline นี้จะถูกใช้เพื่อเปรียบเทียบค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนระหว่างทางเลือกการออกแบบต่างๆ เป็นข้อมูลสนับสนุนให้ผู้ออกแบบสามารถประเมินเพื่อเลือกและปรับปรุงการออกแบบต่างๆ ได้อย่างเป็นระบบ

2.1.2 กระบวนการทำให้เกิดความสมดุลระหว่างการปล่อยและการลดก๊าซคาร์บอน (Balancing Emissions)

กระบวนการ Balancing Emissions คือการลดการใช้พลังงานของอาคารจากแหล่งพลังงานที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้ต่ำที่สุดเท่าที่สามารถเป็นไปได้ โดยการลดการใช้พลังงานที่เกิดจากการใช้งานอาคาร (Operational Energy Consumption) และการติดตั้งระบบสร้างพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทน (Renewable Energy Sources: RES) ที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

กระบวนการ Balancing Emissions ย่อยที่ 1

การลดการใช้พลังงานที่เกิดจาก Operational Energy Consumption จะสำเร็จได้หรือไม่ ขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญคือความมีประสิทธิภาพด้านพลังงานของอาคารนั้นๆ โดย **อาคารที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงาน (Energy-efficient Buildings: EeB)** นั้นหมายถึง อาคารที่ลดการใช้พลังงานด้านอาคารให้ได้ต่ำที่สุดโดยที่สามารถตอบสนองการใช้งานและสามารถสร้างสภาวะแวดล้อมภายในอาคารให้ได้ตามต้องการ รวมถึงสร้างสภาวะน่าสบายแก่ผู้ใช้อาคารได้ (Ionescu, Baracu, Vlad, Necula, & Badea, 2015; Pacheco, Ordóñez, & Martínez, 2012)

อาคารจะมีความมีประสิทธิภาพด้านพลังงานได้นั้นมีปัจจัยด้านการออกแบบอาคารเข้ามามีอิทธิพลอย่างมาก และจะต้องนำปัจจัยเหล่านั้นมาประกอบรวมกันอย่างเหมาะสมอีกด้วย **ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพด้านพลังงานของอาคาร** นั้นได้แก่

- **ปัจจัยด้านสถานที่ตั้งอาคาร (Site and Landscape)** โดยอาคารควรใช้ประโยชน์จากองค์ประกอบทางธรรมชาติของสถานที่ตั้งและสิ่งแวดล้อมรอบข้างให้มากที่สุด ซึ่งไม่เพียงเป็นการส่งเสริมให้มีสภาวะน่าสบายแก่ผู้ใช้อาคารและการลดการใช้พลังงานในอาคารเท่านั้น แต่ยังช่วยลดปัญหาที่อาคารนั้นจะก่อแก่สิ่งแวดล้อมรอบข้าง เช่น ปัญหาน้ำท่วมและปัญหาเกาะความร้อน (Urban Heat Island) อีกด้วย
- **ปัจจัยด้านรูปร่างอาคาร (Building Shape)** รูปร่างอาคารนั้นเป็นปัจจัยสำคัญในการรับความร้อนจากดวงอาทิตย์ ซึ่งส่งผลโดยตรงกับการใช้พลังงานของอาคารเนื่องจากรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบอาคารสามารถเพิ่มความต้องการการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศได้สูงถึง 25% (Elasfour, Maraqa, & Tabbalat, 1991) นอกจากนั้นรูปร่างของอาคารนั้นมีได้เพียงแค่เป็นตัวชี้ถึงพื้นที่รวมของเปลือกอาคารและหลังคาที่รับรังสีอาทิตย์เท่านั้น แต่ยังไม่ถึงปริมาณพื้นที่ของเปลือกอาคารที่อาจมีการรั่วไหลของอากาศที่ถูกปรับสภาวะแล้วออกสู่ภายนอก เป็นสาเหตุให้สิ้นเปลืองพลังงานได้ สำหรับการออกแบบอาคารที่มีการปรับอากาศ สัดส่วนของพื้นที่ผิวเปลือกอาคารกับปริมาตรรวมของอาคารนั้นควรมีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ พบว่ามีการศึกษาเพื่อค้นหารูปร่างของอาคารที่ส่งผลให้มีประสิทธิภาพด้านพลังงานสูงสุด ได้แก่ รูปร่างทรงกลม รูปร่าง Parallelepiped (รูปร่างลูกบาศก์มีด้านขนานกัน แต่ไม่เป็นมุมฉาก) รูปร่างกระบอกห้าเหลี่ยม และรูปร่างกระบอกแปดเหลี่ยม เป็นต้น ซึ่งพบว่ารูปร่างดังกล่าวมักจะส่งผลให้อาคารมีประสิทธิภาพด้าน

พลังงานสูงขึ้น แต่กลับทำให้ประสบปัญหาด้านการใช้งานและส่งผลให้ยากลำบากในการก่อสร้างมากขึ้น โดยปัจจัยด้านรูปทรงอาคารนั้นมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยด้านรูปทรงของอาคารที่มีอิทธิพลต่อการใช้พลังงานเพื่อการปรับอากาศของอาคาร (Pacheco et al., 2012) อันประกอบด้วย ดัชนีความกระชับของอาคาร (Compactness Index) คือ อัตราส่วนระหว่าง ปริมาตรอาคาร กับ พื้นที่เปลือกอาคาร ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบเปลือกอาคารและการรั่วของอากาศในอาคารปรับอากาศอาคารที่มีค่า Compactness Index สูงนั้นหมายถึงอาคารที่มีพื้นที่เปลือกอาคารน้อย และ ปัจจัยรูปร่างอาคาร (Shape Factor) คืออัตราส่วนระหว่าง ความกว้างกับความยาวของอาคาร ปัจจัยรูปร่างอาคารนี้ใช้พิจารณาร่วมกับทิศการวางอาคาร (Orientation) จะเป็นการบอกถึงร้อยละของผิวนิ่งที่ทำมุมกับทิศหลักแต่ละทิศ (เหนือ ใต้ ออก ตก) (Cardinal Points) พบว่าเมื่อออกแบบอาคารให้มีปัจจัยรูปร่างอาคารร่วมกับทิศการวางอาคารที่เหมาะสมนั้นสามารถลดการใช้พลังงานได้มากถึง 36% (Aksoy & Inalli, 2006)

- **ปัจจัยด้านทิศทางการวางอาคาร (Orientation)** ในบรรดาปัจจัยต่างๆที่มีผลด้านการออกแบบอาคารที่สัมพันธ์กับรังสีอาทิตย์ ปัจจัยที่มีความสำคัญสูงสุด คือ ปัจจัยด้าน ทิศทางการวางอาคาร (Orientation) ซึ่งเป็นตัวกำหนดระดับของการรับรังสีอาทิตย์ของเปลือกอาคาร เนื่องจากรังสีอาทิตย์นั้นประกอบด้วยแสงสว่างและพลังงานความร้อน การกำหนดทิศทางการวางอาคารที่เหมาะสมนั้นจะทำให้อาคารสามารถใช้ประโยชน์จากรังสีอาทิตย์ซึ่งเป็นสิ่งที่มีอยู่อย่างล้นเหลือในธรรมชาติได้อย่างเหมาะสม
- **ปัจจัยด้านลักษณะกรอบอาคาร (Building Envelope)** กรอบอาคารนั้นเป็นส่วนของอาคารที่เป็นกรอบนอกสุด ที่กั้นสภาพแวดล้อมภายในอาคารออกจากสภาพแวดล้อมภายนอก โดยกรอบอาคารได้แก่ ฐานราก หลังคา ผนัง ประตู และหน้าต่าง พบว่าโดยปกติแล้วภาระการปรับอากาศภายในอาคารนั้นจะเป็นผลมาจากความร้อนที่ถ่ายเทจากภายนอกที่สูงมากกว่า 60% และที่เหลือจะเกิดจากความร้อนที่เกิดขึ้นภายในตัวอาคารเอง ความร้อนที่ถ่ายเทจากภายนอกจะเกิดจากรังสีอาทิตย์กระทบกับกรอบอาคาร และมีการส่งผ่านพลังงานเข้าสู่อาคารโดยตรง ผ่านพื้นผิวที่โปร่งแสง เช่น หน้าต่าง และหลังคาโปร่งแสง (Skylight) และผ่านพื้นผิวทึบแสงเช่น ผนังทึบ พื้น และหลังคา นอกจากนั้นสิ่งที่ควรคำนึงเพิ่มเติมคือ ความร้อนที่เกิดจากการรั่วซึมของอากาศเข้า-ออกอาคาร (Infiltration) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ระบบปรับอากาศทำงานหนักและสิ้นเปลืองพลังงาน
- **ปัจจัยด้านอุปกรณ์บังแดด (Shading on Buildings)** อุปกรณ์บังแดด คือองค์ประกอบของอาคาร/อุปกรณ์ที่ติดตั้งบริเวณกรอบอาคารเพื่อใช้ควบคุมปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบสู่อาคารโดยเฉพาะหน้าต่างกระจกและผนังโปร่งแสง สามารถทำให้ลดภาระการปรับอากาศและลดการใช้พลังงานได้เป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์บังแดดไม่ควรทึบมากเกินไป เนื่องจากอาจทำให้ปิดกั้นแสงสว่างจากธรรมชาติ และทำให้ผู้ใช้อาคารไม่สามารถมองเห็นสิ่งแวดล้อมภายนอกได้ ส่งผลทำให้ สิ้นเปลืองพลังงานในระบบไฟฟ้าส่องสว่างในเวลากลางวัน และอาจส่งผลกระทบต่อ จังหวะรอบวัน (Circadian Rhythm) และ นาฬิกาชีวภาพ (Chronobiology) ของผู้ใช้อาคารได้ (Fournier & Wirz-Justice, 2010; Pacheco et al., 2012)

- **ปัจจัยด้านระบบการสร้างสิ่งแวดล้อมอาคารด้วยวิธีธรรมชาติ (Passive Systems)**
อาคารควรใช้ประโยชน์จากองค์ประกอบทางธรรมชาติของสถานที่ตั้งและสิ่งแวดล้อมรอบข้างให้มากที่สุด แม้แต่อาคารที่ใช้ระบบปรับอากาศก็ต้องคำนึงถึงองค์ประกอบทางธรรมชาติเพื่อการลดภาระการปรับอากาศให้ต่ำที่สุดและทำให้ประสิทธิภาพของสูงที่สุด ระบบการสร้างสิ่งแวดล้อมอาคารด้วยวิธีธรรมชาติ (Passive Systems) ที่ใช้ในประเทศที่อยู่ในสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น (Hot-humid Climate) นั้นมุ่งเน้นในการใช้งาน ระบบทำความเย็นด้วยวิธีธรรมชาติ (Passive Cooling) ได้แก่ ระบบการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ (Natural Ventilation) ระบบการทำความเย็นด้วยการพาความร้อนในเวลากลางคืน (Nocturnal Convective Cooling) ระบบการทำความเย็นด้วยการแผ่รังสี (Radiant Cooling) ระบบการทำความเย็นด้วยการระเหยของไอน้ำในอากาศ (Evaporative Cooling) และ ระบบการทำความเย็นด้วยกระแสลมใต้ดิน (Earth-air Cooling) (Givoni, 1994)
- **ปัจจัยด้านการใช้อุปกรณ์ประกอบอาคารที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงาน (Energy Efficient Equipment)** เช่น ระบบปรับอากาศ ระบบไฟฟ้าส่องสว่าง ระบบทำน้ำร้อน เป็นต้น

กระบวนการ Balancing Emissions ย่อยที่ 2

ผู้ออกแบบอาคารต้องดำเนินการให้การปล่อยกับการลดก๊าซคาร์บอนจากอาคารนั้นมีความสมดุลกัน เพื่อการเป็นอาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ ด้วยการ การติดตั้งระบบสร้างพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทน (Renewable Energy Sources: RES) ได้แก่

■ **พลังงานแสงอาทิตย์ และเซลล์แสงอาทิตย์**

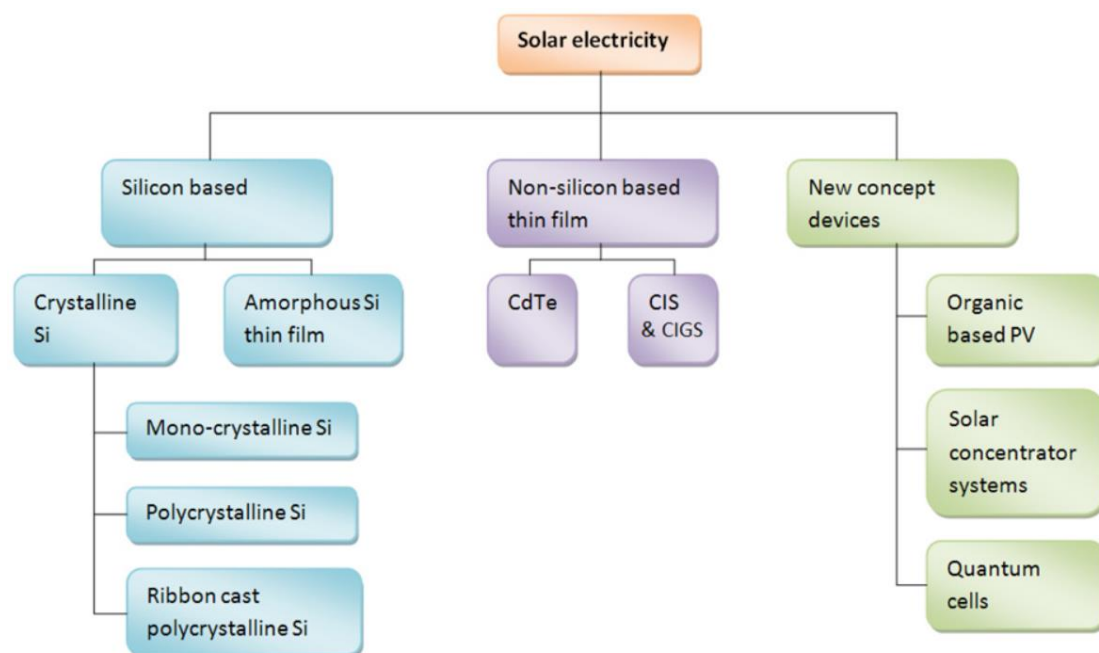
พลังงานแสงอาทิตย์นั้นนับเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ล้นเหลือที่สุด ไม่ลดน้อยลง และเป็นพลังงานสะอาด (Parida, Iniyar, & Goic, 2011) พลังงานที่ส่งมาจากดวงอาทิตย์ตกกระทบผิวเปลือกโลกนั้นมีปริมาณเฉลี่ยสูงถึง 90,000 - 120,000 terawatts ซึ่งเป็นปริมาณที่มากกว่าความต้องการใช้พลังงานของโลกถึงมากกว่า 7,000 เท่า (Botkin & Keller, 2011) ประเทศไทยเป็นประเทศที่ตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรและมีศักยภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากรังสีดวงอาทิตย์สูง โดยพบว่าประเทศไทยมีระดับของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปีสูงถึง 18.2 MJ/ตารางเมตร-วัน หรือ 4-5 kW/ชั่วโมง/ตารางเมตร และมีระดับของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดเฉลี่ยระหว่างเดือน เมษายน - พฤษภาคม สูงถึง 20 - 24 MJ/ตารางเมตร-วัน พลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ดังกล่าวสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ รวมถึงการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic)

เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) คืออุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนรังสีดวงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current: DC) ได้โดยตรง โดยเซลล์แสงอาทิตย์นับเป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง (Optoelectronics) ซึ่งผลิตขึ้นมาจาก สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น Silicon เป็นต้น โดยมีการทำงานคือ เมื่อมีรังสีดวงอาทิตย์มากระทบกับเซลล์แสงอาทิตย์ จะส่งผลให้เกิดกระบวนการสองขั้นตอนที่ต่อเนื่องกัน คือ กระบวนการดูดซับรังสี โดยวัสดุที่เป็น Semiconductor จะดูดซับพลังงานจากรังสีอาทิตย์ ทั้งที่เป็นแสง และรังสีที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น Infrared ไว้ และ กระบวนการกระจายพลังงาน ที่ดูดซับไว้กระตุ้นให้ Electron ในสาร Semiconductor หลุดออกจากวงโคจรและเคลื่อนที่อย่างอิสระ การ

เคลื่อนที่หรือการไหลของ Electron นั่นก็คือการไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อนำหน้าสัมผัสที่เป็นโลหะติดตั้งที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ จะสามารถนำกระแสไฟฟ้ามาใช้งานได้ (Lau, 2015)

การสร้างพลังงานไฟฟ้าจากรังสีดวงอาทิตย์ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์นั้นขึ้นกับองค์ประกอบหลายประการ ได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ การเชื่อมต่อทางเครื่องกลและระบบไฟฟ้า อุปกรณ์หรือรางยึด รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมกระแสไฟฟ้าที่เป็นผลผลิตของระบบ (Parida et al., 2011) ขนาดของกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบ PV คือ kWp (Kilowatt Peak) ซึ่งหมายถึง กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak Power) ที่คาดว่าจะได้รับจากระบบ PV เมื่อดวงอาทิตย์อยู่ในตำแหน่งตั้งฉากตรงกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส กำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นสัมพันธ์ถึง ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้รับจริง/ค่ากำลังเฉลี่ย (Nominal Power) อันเป็นข้อมูลมาตรฐานที่ผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ระบุไว้บนผลิตภัณฑ์ (Nameplate Capacity) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เป็นค่าที่ได้รับในการตรวจวัดที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เป็นอุดมคติ ยากที่จะเป็นจริง ในความเป็นจริง กำลังไฟฟ้าที่ได้รับจากระบบ PV นั้นจะมีค่าน้อยกว่าที่ถูกระบุไว้ประมาณ 15-20 %

เซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถเปลี่ยนรังสีดวงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ต่อเมื่อมีรังสีดวงอาทิตย์มากระทบกับ วัสดุดูดซับแสง (Light Absorbing Materials) (Jelle & Breivik, 2012; Parida et al., 2011) ที่ถูกติดตั้งอยู่ในเซลล์แสงอาทิตย์ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.1 อันได้แก่



รูปที่ 2.1 เทคโนโลยีวัสดุเซลล์แสงอาทิตย์ ปรับจาก Jelle, Breivik, & Røkenes (2012)

ซิลิคอนรูปผลึก (Crystallized Silicon) ชนิด **ซิลิคอนผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon / Monocrystalline Silicon: mono-Si)** ที่มีความบริสุทธิ์สูง และมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแสงอาทิตย์ ให้เป็นไฟฟ้าได้ประมาณ 15-20% และถือว่าเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่สูง (Space Efficient) โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้สามารถผลิตไฟฟ้ามากเป็นสี่เท่าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบแผ่นบาง (Thin Film Solar Panels) เซลล์แสงอาทิตย์ Mono-Si นี้มีอายุการใช้งานและคงประสิทธิภาพยาวนาน นอกจากนั้นยังมีประสิทธิภาพในสถานที่ที่มีอากาศร้อนและสภาพแสงน้อยที่ดีอีกด้วย แต่ราคาเซลล์แสงอาทิตย์แบบนี้มีราคาแพง เนื่องจาก Crystalline Silicon เป็นส่วนประกอบสำคัญของ

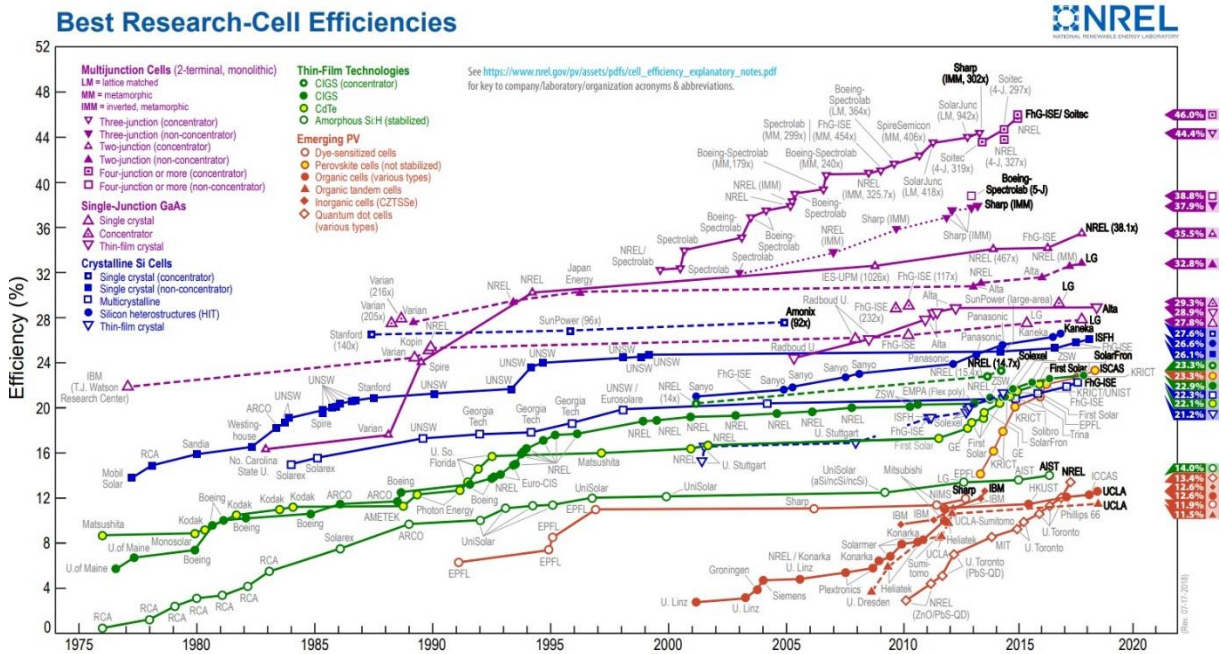
อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จึงมีคุณค่าเพิ่ม (Value Added) ที่สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนี้กรรมวิธีในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จาก Crystalline Silicon ที่จะต้องนำมาเลื่อยให้เป็นแผ่น (Wafer) บางๆ จึงทำให้เกิดการสูญเสีย ในลักษณะที่เลื่อยไปไม่น้อยกว่าครึ่ง ในการติดตั้งเพื่อใช้งาน ควรระมัดระวังไม่ให้ส่วนใดส่วนหนึ่งของแผ่น (Panel) โดนบังแสง (Partial Shading) เพราะอาจทำให้ระบบเสียหายได้ (Maehlum, 2018; Parida et al., 2011) โดย เซลล์แสงอาทิตย์ Mono-Si นี้มี ข้อดี ได้แก่ ประสิทธิภาพสูง (15-20%) ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่สูง ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าต่อสภาพแสงน้อยสูงเหมาะในการใช้งานในภูมิอากาศร้อนอายุการใช้งานยาวนาน (25-30 ปี) และมี ข้อเสีย คือ แผงสูญเสียวัสดุเป็นขยะมาก ต้องระมัดระวังในการติดตั้งและการดูแลรักษา

ซิลิคอนผลึกรวม (Polycrystalline Silicon: p-Si / Multi-crystalline Silicon: mc-Si) ซึ่งมีวิธีการผลิตด้วยการเทซิลิคอนหลอมเหลวลงสู่แม่พิมพ์ ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมที่สมบูรณ์ ไม่มีเศษซิลิคอนให้เหลือทิ้งเป็นขยะ ส่งผลให้มีราคาที่ถูกกว่าประเภท mono-Si แต่เซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/mc-Si นี้มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าที่น้อยกว่า คือ 12-18% เนื่องจากเซลล์มีความบริสุทธิ์ของซิลิคอนที่น้อยกว่า ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่นั้นต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si อีกด้วย โดยเซลล์แสงอาทิตย์แบบ p-Si นี้มี ข้อดี คือราคาถูกกว่า mono-Si ได้รับความนิยมสูง หาซื้อง่าย สูญเสียวัสดุเป็นขยะน้อย แต่มี ข้อเสีย คือประสิทธิภาพต่ำกว่า mono-Si (16-24%) และมีประสิทธิภาพลดต่ำลงเมื่อติดตั้งในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง (Jelle & Breivik, 2012; Maehlum, 2018)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด เซลล์แสงอาทิตย์แผ่นบาง (Thin Film Photovoltaic Cells: TFPV) TFPV คือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้เป็นการผสานชั้นบางๆ ของวัสดุซับแสงจำนวนอย่างน้อยหนึ่งชั้นหรือมากกว่าบนพื้นผิว (Substrate) ต่างๆ โดยวัสดุซับแสงที่ใช้ผลิต TFPV นั้นได้แก่ Amorphous silicon (a-Si), Cadmium Telluride / Cadmium Sulphide (CdTe/CdS) และ Copper Indium Gallium Selenide (CIGS/CIS) โดย **ซิลิคอนที่ไม่เป็นผลึก (Amorphous silicon: a-Si)** ซึ่งเป็นประเภทรอง (subcategory) ของเทคโนโลยี เซลล์แสงอาทิตย์แบบแผ่นบาง (Thin-film) ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด โดยมีประสิทธิภาพ 5-7% และ 8-10% ในประเภท Double และ Triple Junction หรือเรียกว่า Stacking โดย Amorphous Silicon นี้สามารถเคลือบลงแผ่นกระจกหรือแผ่นโลหะ ทำให้ติดตั้งในส่วนที่เป็นวัสดุอาคารได้ แต่วัสดุซับแสงชนิดนี้มีจุดด้อยที่สำคัญคือมีการเสื่อมสภาพที่เร็วกว่า Crystalline Silicon (Parida et al., 2011) เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้ใช้ซิลิคอนปริมาณเพียง 1% ที่ใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบอื่น แต่การ Stacking นั้นมีต้นทุนการผลิตสูง **เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Cadmium Telluride (CdTe) และ Cadmium Sulphide (CdS)** โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe/CdS นี้มีความสามารถสูงมากในการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์และปล่อยอิเล็กตรอน ด้วยความหนาของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้เพียง 3 ไมครอน นั้นมีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าในการใช้งานจริงสูงถึง 15% **เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Copper Indium Gallium Selenide (CIGS/CIS)** เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIGS/CIS นั้นมีวัสดุซับแสงเป็นสารประกอบของ Copper, Indium, Gallium และ Selenide ฉาบลงบนวัสดุแผ่นเรียบเช่น พลาสติกหรือกระจก ที่ประกอบด้วย Anode และ Cathode (Electrodes) ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIGS/CIS นี้มีประสิทธิภาพเฉลี่ยที่ 11-14%

เซลล์แสงอาทิตย์ดังที่ได้กล่าวถึงไปนั้นคือ เซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่ 1 (First Generation Photovoltaic Cells) ประกอบด้วย Mono-crystalline และ Poly-crystalline และเซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่ 2 (Second Generation Photovoltaic Cells) ประกอบด้วย Amorphous Silicon, CdTe และ CIGS โดยเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองรุ่นนั้นยังคงเป็นที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน แต่ด้วยข้อจำกัดดังที่ได้กล่าวไปนั้นจึงได้เกิดการพัฒนา **เซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่ 3 (Third Generation Photovoltaic Cells)** ซึ่งมีวัตถุประสงค์สำคัญในการ

พัฒนา คือ เพิ่มประสิทธิภาพการสร้างพลังงานให้สูงขึ้น ใช้ส่วนประกอบที่เป็นสารเคมีที่ไม่เป็นพิษ (Nontoxic) และ หาได้ง่ายมีอยู่อย่างล้นเหลือ (Not Limited in Abundance) โดย เซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่ 3 นี้ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์แบบ Copper Zinc Tin Sulphide (CZTS) เซลล์แสงอาทิตย์แบบ Dye-sensitized เซลล์แสงอาทิตย์แบบ Organic Photovoltaic เซลล์แสงอาทิตย์แบบ Perovskite เซลล์แสงอาทิตย์แบบ Polymer และ เซลล์แสงอาทิตย์แบบ Quantum Dot (Shukla, Sudhakar, & Baredar, 2017)



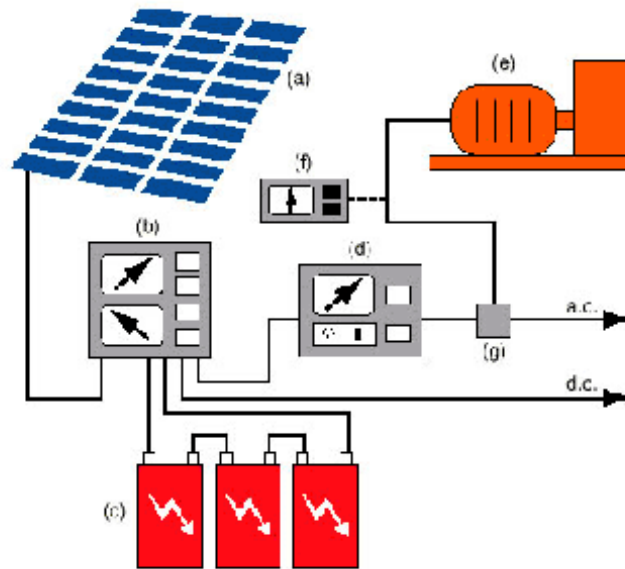
รูปที่ 2.2 ผังเส้นเวลาแสดงถึง ประสิทธิภาพสูงสุดของเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ จากการทดลองและมีการบันทึก (National Center for Photovoltaics, 2018)

■ อาคารผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ (Building Integrated Photovoltaic: BIPV)

การนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ในอาคารแบบที่มีส่วนทางกายภาพเชื่อมต่อกับตัวอาคารมี 2 ประเภท ได้แก่ (1) เซลล์แสงอาทิตย์แบบยึดเข้ากับอาคาร (Building Attached Photovoltaic: BAPV) หมายถึงการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV module) ยึดติดเข้ากับตัวอาคารด้วยโครงเคร่าและราง (Rack-mounted PV systems) และ (2) เซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสานเข้ากับวัสดุอาคาร หรือ อาคารผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ (Building Integrated Photovoltaic: BIPV) โดย BIPV นั้นหมายถึงการนำผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ (PV Products) มาติดตั้ง เพื่อเป็นส่วนหนึ่งขององค์ประกอบเปลือกอาคาร เช่น ผนังอาคาร กระเบื้องหลังคา อุปกรณ์บังแดด กระจกในช่องเปิดอาคารหรือหลังคาอาคาร เป็นต้น โดยยังคงรักษาคุณสมบัติในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างครบถ้วน (Jelle & Breivik, 2012; Strong, 2016; Yang, 2015) ซึ่ง BIPV ที่มีข้อได้เปรียบเหนือกว่าการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปและ BAPV ไป คือ BIPV นั้นถูกผสมผสานเข้าไปด้วยกลมกลืนเป็นส่วนหนึ่งกับอาคาร สามารถที่จะก่อสร้างให้กลมกลืนไปกับการออกแบบอาคารโดยไม่เป็นส่วนเพิ่มหรือส่วนเกินด้านองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรม

นอกจากนั้น BIPV ซึ่งใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งทดแทนวัสดุก่อสร้างอาคารปกติ ทำให้ลดการวัสดุก่อสร้างและมีต้นทุนในการติดตั้งน้อยกว่า Rack-mounted PV systems เป็นการลดต้นทุนทั้งทางด้านแรงงาน ทั้งทางวัสดุก่อสร้าง ได้พลังงานสะอาดที่ไม่มีวันหมดมาใช้ในอาคาร และเป็นการใช้พลังงาน

ไฟฟ้าได้เต็มประสิทธิภาพเนื่องจากได้ใช้ไฟฟ้าใกล้กับระบบสร้างไฟฟ้า มีการสูญเสียพลังงานต่ำมากเมื่อเทียบกับระบบสายส่งไฟฟ้าที่มีการสูญเสียพลังงานสูงถึง 6% รวมถึงการใช้งาน BIPV นั้นยังเป็นการลดความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด (Peak Load) ของอาคารได้อีกด้วยเนื่องจากระบบ BIPV นั้นจะสามารถสร้างพลังงานได้สูงสุดในเวลาที่มีความต้องการใช้พลังงานสูงสุดอันเกิดจากระบบปรับอากาศในอาคารเช่นเดียวกัน (Jelle & Breivik, 2012; Strong, 2016) โดยระบบ BIPV ที่สมบูรณ์นั้นมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้ (Strong, 2016)



รูปที่ 2.3 แผนภาพระบบ BIPV (Strong, 2016)

- (a) ผลิตภัณฑ์ BIPV หรือ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Modules) ซึ่งมีหลากหลายรูปแบบและหลากหลายวัสดุชั้นแสง
- (b) ส่วนควบคุมกระแสไฟฟ้าเข้า-ออกระบบ (Charger Controller) ทำหน้าที่จัดการปริมาณและทิศทางการกระแสไฟฟ้า ถ้าเป็นระบบ BIPV แบบแยกส่วนอิสระจากระบบสายส่ง (Stand-alone) อุปกรณ์นี้จะทำหน้าที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าเข้าสู่และออกจากแบตเตอรี่
- (c) ระบบเก็บประจุไฟฟ้า (Power Storage Systems) หรือคือแบตเตอรี่ในระบบ Stand-alone
- (d) อุปกรณ์แปลงชนิดกระแสไฟฟ้า (Power Conversion Equipment) ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในระบบ BIPV โดยเป็นที่รู้จักกันทั่วไปในชื่ออุปกรณ์ Inverter
- (e) อุปกรณ์สร้างพลังงานสำรอง เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากน้ำมันดีเซล (Diesel Generators) เป็นต้น
- (f) อุปกรณ์วางยึดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สายไฟฟ้า และอุปกรณ์ประกอบเพื่อความปลอดภัยอื่นๆ

ปัจจุบันมีการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้งานภาคอาคารในรูปแบบของ อาคารผสมเซลล์แสงอาทิตย์ (BIPV) ในสามรูปแบบ (White, 2015) ได้แก่ (1) แบบเชื่อมต่อกับระบบสายส่งไฟฟ้า (Grid-tied หรือ Utility-interactive PV Systems) ซึ่งระบบ PV แบบนี้เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมมากที่สุด (2) แบบแยกส่วนอิสระจากระบบสายส่ง (Off-grid หรือ Stand-alone หรือ Battery-based PV

Systems) นิยมใช้ในอาคารที่ตั้งอยู่ห่างไกลจากระบบสายส่งไฟฟ้า ซึ่งอาจเป็นระบบที่ใช้การสร้างพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว หรือใช้การสร้างพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน (Hybrid System) จากแหล่งพลังงานทดแทนอื่นๆ เช่น พลังงานจากกังหันลม (Wind Turbine) พลังงานจากกังหันน้ำ (Small Hydroelectric Turbine) เป็นต้น กับการสร้างพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) และ (3) แบบผสมการเชื่อมต่อระบบสายส่งไฟฟ้าและใช้แบตเตอรี่สำรอง (Grid-tied-battery-backup หรือ Multimodal PV Systems)

■ ผลกระทบจากการโดนบังเงาบางส่วน (Partial Shading Effects)

เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) คืออุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนรังสีดวงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง โดยพลังงานไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้จากระบบ PV นั้นจะมีปริมาณมาก-น้อยเท่าใดจะขึ้นอยู่กับปริมาณการได้รับรังสีอาทิตย์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ นั่นคือ **การแผ่รังสีแสงอาทิตย์ทั้งหมด (Total Solar Radiation)** ที่ตกกระทบลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ โดย Total Solar Radiation นี้ ประกอบด้วยองค์ประกอบสามส่วน ได้แก่ **ลำแสงอาทิตย์ (Beam Radiation)** **รังสีกระจายจากท้องฟ้า (Diffuse Radiation)** และ **รังสีสะท้อนจากสภาพแวดล้อมรอบ (Surrounding-Reflected Radiation)** โดยมีรายละเอียดขององค์ประกอบทั้งสาม ดังต่อไปนี้ Beam Radiation คือ ลำแสงอาทิตย์ ที่เป็นรังสีอาทิตย์โดยตรง ไม่เป็นรังสีที่ฟุ้งกระจายอยู่ในบรรยากาศ แต่ Diffuse Radiation คือ รังสีกระจายจากท้องฟ้า จะมีรูปแบบของรังสีที่กระจายเนื่องจากอนุภาคต่างๆ ของฝุ่นละอองหรือ เมฆ หมอกควันในชั้นบรรยากาศ การคำนวณ Beam Radiation นั้นขึ้นอยู่กับ **เรขาคณิตของแสงอาทิตย์ (Solar Geometry)** ได้แก่ **มุมทิศ (Azimuth)** และ **มุมระดับความสูง (Altitude Angle)** ได้อย่างตรงไปตรงมา ในทางกลับกัน Surrounding-Reflected Radiation คือ รังสีสะท้อนจากสภาพแวดล้อมรอบ นั้นมีรูปแบบที่ซับซ้อนสามารถคำนวณและประมาณได้ยาก เนื่องจากรังสีชนิดนี้เกิดขึ้นโดยทั้ง Beam Radiation และ Diffuse Radiation ที่สะท้อนจากบริเวณโดยรอบ เช่นอาคารข้างเคียงและพื้นดิน จึงจะสะท้อนเข้าถึงวัสดุเซลล์แสงอาทิตย์ Surrounding-Reflected Radiation นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ **Surrounding Reflectance (การสะท้อนจากสภาพแวดล้อม)** **Absorptance (การดูดซับรังสี)** **Emittance (การแผ่รังสี)** และ **Transmittance (การส่งผ่านพลังงาน)** ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อการสะท้อนรังสีอาทิตย์เข้าสู่ระบบ BIPV ทั้งสิ้น (Yoo, 2011; Gökmen, et al., 2016)

ถึงแม้เทคโนโลยีการนำพลังงานจากรังสีอาทิตย์ มาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อการใช้งานภาคอาคารจะมีการพัฒนาและมีความก้าวหน้ามากขึ้นเป็นอย่างมาก แต่พบว่าเมื่อนำระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) มาใช้งานจริงในอาคาร ยังมีอุปสรรคที่ทำให้ระบบ PV ได้รับ Total Solar Radiation ได้สูงสุด โดยมีอุปสรรคสำคัญคือ **ผลกระทบจากการโดนบังเงาบางส่วน (Partial Shading Effects: PSE)** อันหมายถึง การที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Modules / Arrays) ถูกสิ่งบังเงาแวดล้อม (Surrounding Obstacles) เช่น อาคารข้างเคียง ต้นไม้ เป็นต้น กันไม่ให้ ลำแสงอาทิตย์ (Beam Radiation) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของการแผ่รังสีอาทิตย์ (Solar Radiation) ที่มีระดับพลังงานสูงสุด ตกลงบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรง เมื่อ PV Modules ได้รับผลกระทบจากการโดนบังเงาบางส่วน ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบ PV นั้นๆ จะมีรูปแบบที่ไม่เสถียรด้วยการผลิตพลังงานสูงสุดที่ไม่สม่ำเสมอ (Multiple Peaks) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าในภาพรวมลดลงไปได้ถึง 20% (Kanters, 2015; Kanters & Wall, 2014; Lin, Chai, & Ay, 2017; Ning, et al., 2017)

เมื่อเกิดระบบ PV เกิดปรากฏการณ์ PSE นั้นหมายถึงผิวหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Surfaces) เกิดเงา (Shadow) อันเกิดจาก Surrounding Obstacle มาทับทบบังและมีการเปลี่ยนแปลงอยู่

ตลอดเวลาเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ Solar Geometry อันได้แก่ Azimuth และ Altitude Angle ซึ่ง Surrounding Obstacle ดังกล่าวนั้นมีลักษณะสองอย่างคือ มีรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ (Irregular Shape) อันหมายถึง Obstacle แต่ละวัตถุนั้นมีรูปร่างที่แตกต่างกันซึ่งทำให้การคาดการณ์ถึงผลกระทบต่อปรากฏการณ์ PSE นั้นสามารถทำได้ยากลำบาก และ ความใกล้ของ Obstacle กับ PV System (Closeness) ซึ่งหมายถึงยิ่ง Obstacle อยู่ใกล้ PV System เพียงใด ความรุนแรงของ Partial Shading Effect ที่จะทำให้เกิด สถานะการสูญเสียพลังงาน (Shading Loss) ของ PV System ก็ยิ่งรุนแรงมากขึ้นเท่านั้น (Masa-bote & Caamaño-Martin, 2014)

การวิเคราะห์เพื่อคาดการณ์ถึง Shading Loss ใน PV System ที่ได้รับปรากฏการณ์ PSE นั้นเป็นสิ่งซับซ้อนแต่ก็เป็นสิ่งจำเป็นที่นักวิจัยจำนวนมากได้พยายามศึกษาเพื่อให้สามารถคาดการณ์ถึงประสิทธิภาพของ PV System ในการใช้งานจริงได้ (Kawamura, et al., 2003; Woyte, Nijs, & Belmans, 2003; Karatepe, Boztepe, & Çolak, 2007; Di Piazza & Vitale, 2010) แต่การศึกษาดังกล่าวนั้นได้มุ่งเน้นที่คุณสมบัติของ PV Modules คุณสมบัติของ PV Systems และการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า (Electricity Losses) ภายใน PV Systems เป็นหลักโดยไม่ได้ศึกษาการสูญเสียการรับรังสีอาทิตย์ (Irradiation Losses) โดยมีการศึกษาจำนวนน้อยที่ได้มุ่งเน้นค้นหา การฉายรังสีอาทิตย์ที่เกิดประสิทธิภาพ (Effective Irradiance) (Drif, Pérez, Aguilera, & Aguilar, 2008; Masa-bote & Caamaño-Martin, 2014) แต่การศึกษาวิจัยที่ได้กล่าวมาทั้งหมด ไม่ได้ศึกษาปัจจัยที่เกิดจาก Surrounding Obstacle แต่อย่างใด

การออกแบบระบบ BIPV ที่จะให้บรรลุถึงประสิทธิภาพนั้น ผู้ออกแบบ BIPV จำเป็นต้องสามารถเข้าใจและคาดการณ์ถึง Partial Shading Effects ที่ส่งผลกระทบต่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์นั้นได้ โดยจำเป็นต้องมีการพิจารณาให้มีความสำคัญต่อพารามิเตอร์ (Parameter) สามตัวหลักของ Partial Shading Effects อันได้แก่ (A) คุณสมบัติรังสีอาทิตย์ (Solar Properties Parameter) (B) สภาพแวดล้อม (Surrounding Parameter) และ (C) องค์ประกอบที่สัมพันธ์กับ BIPV (Related-BIPV Parameter) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (Celik, Karatepe, Gokmen, & Silvestre, 2013; Celik, Karatepe, Silvestre, Gokmen, & Chouder, 2015; Masa-Bote & Caamaño-Martin, 2014; Yoo, 2011)

(A) Parameter ของ คุณสมบัติรังสีอาทิตย์ (Solar Properties) ประกอบด้วย (A-1) Altitude Angle ของดวงอาทิตย์ (A-2) Azimuth ของดวงอาทิตย์ และ (A-3) ปริมาณการฉายรังสีดวงอาทิตย์ (Solar Irradiation) ซึ่งหมายถึงพลังงานส่งจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นผิวที่ต้องการตรวจวัด อันตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการคำนวณ Solar Insolation ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Zeil, 2017)

(B) Parameter ของ สภาพแวดล้อม (Surrounding) ประกอบด้วยสองหมวดย่อย ได้แก่

(B-1) Parameter ของ รังสีสะท้อนจากสภาพแวดล้อม (Surrounding-Reflected Radiation) ประกอบด้วย (B-1-1) การสะท้อนรังสี (Reflectance) (B-1-2) การดูดซับรังสี (Absorbance) (B-1-3) การแผ่รังสี (Emittance) และ (B-1-4) การส่งผ่านพลังงาน (Transmittance) ดังที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้

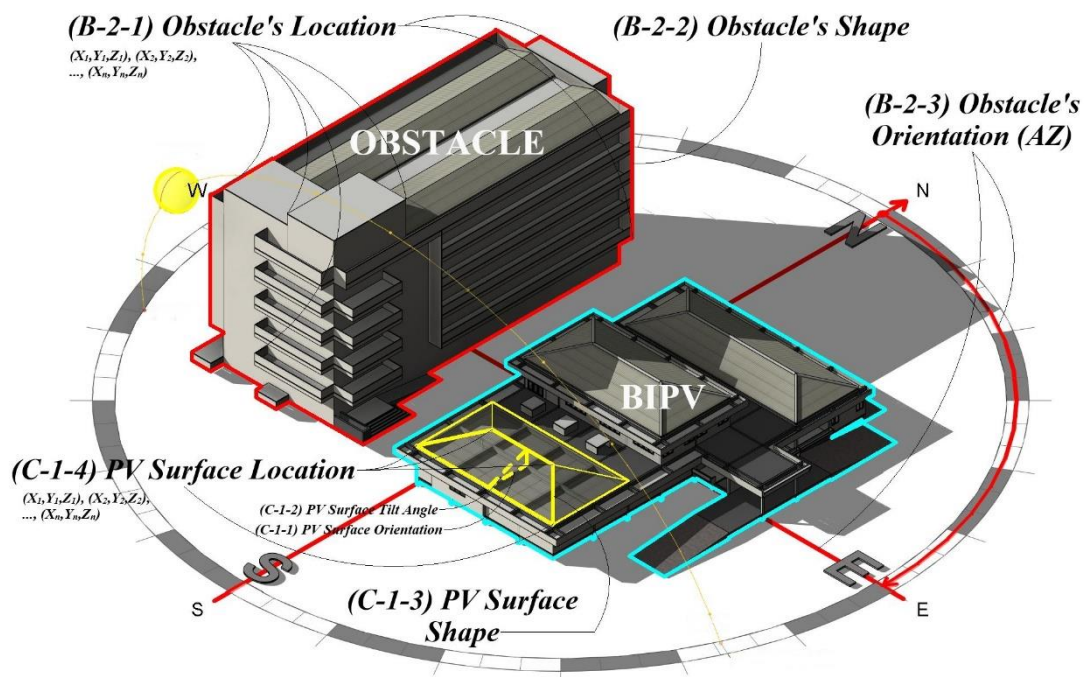
(B-2) Parameter ของ สิ่งกีดขวางแวดล้อม (Surrounding Obstacle) ประกอบด้วย (B-2-1) ตำแหน่งของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Location) (B-2-2) รูปร่างของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Shape) และ (B-2-3) การวางทิศทางของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Orientation) ดังที่แสดงใน รูปที่ 2.5 โดย Surrounding Obstacle นั้นกีดขวาง Beam Radiation ให้ไม่สามารถตกกระทบบนพื้นผิว PV ได้อย่างเต็มที่ โดยรังสีอาทิตย์จะฉายผ่านและกระทบรูปทรงของ Surrounding Obstacle ที่ประกอบด้วย จุดในพิกัดคาร์ทีเซียนสามมิติ (Three Dimensional Cartesian

Coordinates) จำนวนมาก ที่แต่ละพิกัดอยู่ใน **ปริภูมิสามมิติ (3D Space)** สามารถแสดงให้อยู่ในรูปสามสิ่งอันดับ (x,y,z) เช่น $(x_1,y_1,z_1), (x_2,y_2,z_2), \dots, (x_n,y_n,z_n)$ และตกกระทบลงบน PV Surfaces ที่ประกอบด้วยจุดในพิกัดคาร์ทีเซียนสามมิติดังกล่าวเช่นเดียวกันแต่เป็นคนละตำแหน่ง โดยพิกัดดังกล่าวนั้นจะคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งของ Surrounding Obstacle และของ PV Surfaces โดยสิ่งที่กำหนดรูปร่างและพื้นที่ของเงาที่ทอดออกจาก Surrounding Obstacle คือ Altitude Angle และ Azimuth ของดวงอาทิตย์ ที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาในช่วงเวลาระหว่างวันตลอดทั้งปี การเปลี่ยนรูปร่างอยู่ตลอดเวลาของเงานี้ ทำให้ Surrounding Obstacle Parameter นั้นเป็นปัจจัยที่คาดการณ์ถึงผลกระทบได้ยากที่สุด แต่การสร้างทำความเข้าใจให้ผู้ออกแบบสามารถคาดการณ์ถึงผลกระทบของ Parameter นี้ได้ จะทำให้สามารถประเมินผลกระทบของ Partial Shading Effects ได้อย่างแม่นยำมากขึ้น

(C) Parameter ของ องค์ประกอบที่สัมพันธ์กับ BIPV (Related-BIPV) ประกอบด้วยสองหมวดย่อยได้แก่

(C-1) Parameter ของ เรขาคณิตของพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Surface Geometry) ประกอบด้วย (C-1-1) การวางทิศทางของพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Surface Orientation) (C-1-2) มุมเอียงของของพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Surface Tilt Angle) (C-1-3) รูปร่างของพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Surface Shape) และ (C-1-4) พิกัดของพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Surface Location) รูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของ Parameter ดังกล่าวกับ Surrounding Obstacle Parameter

(C-2) Parameter ของ คุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module Properties) ซึ่งประกอบด้วย (C-2-1) วัสดุเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Materials) (C-2-2) ชนิดของผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ (BIPV Product Type) และ (C-2-3) ประเภทของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (BIPV System Type) (Chaianong & Pharino, 2015; Shukla, Sudhakar, & Baredar, 2016)

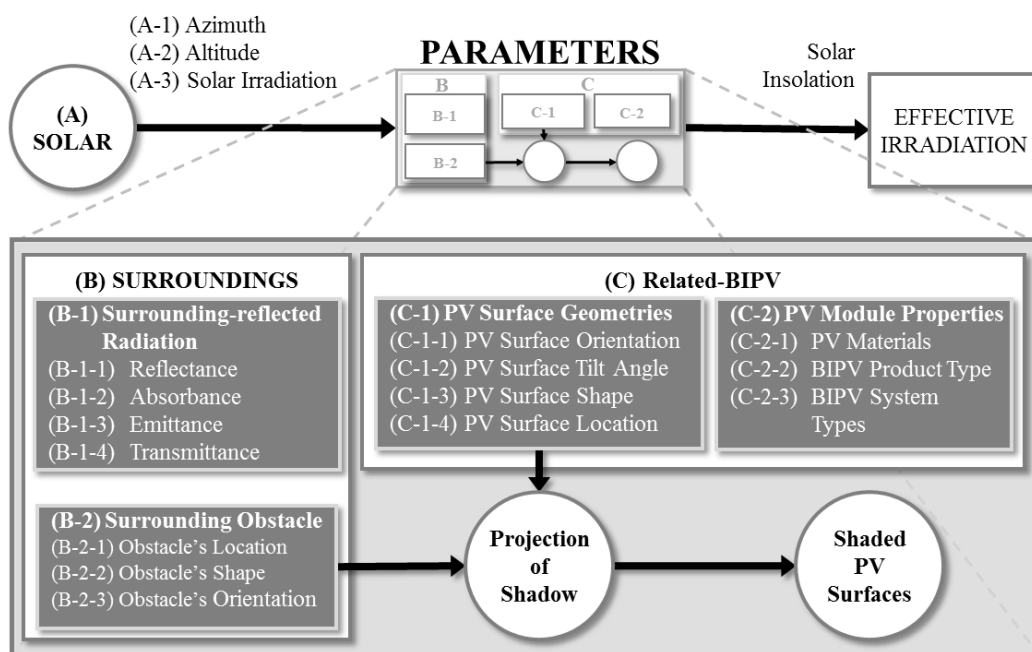


รูปที่ 2.4 Parameter ของ (B-2) Surrounding Obstacle และ (C-1) PV surface geometry

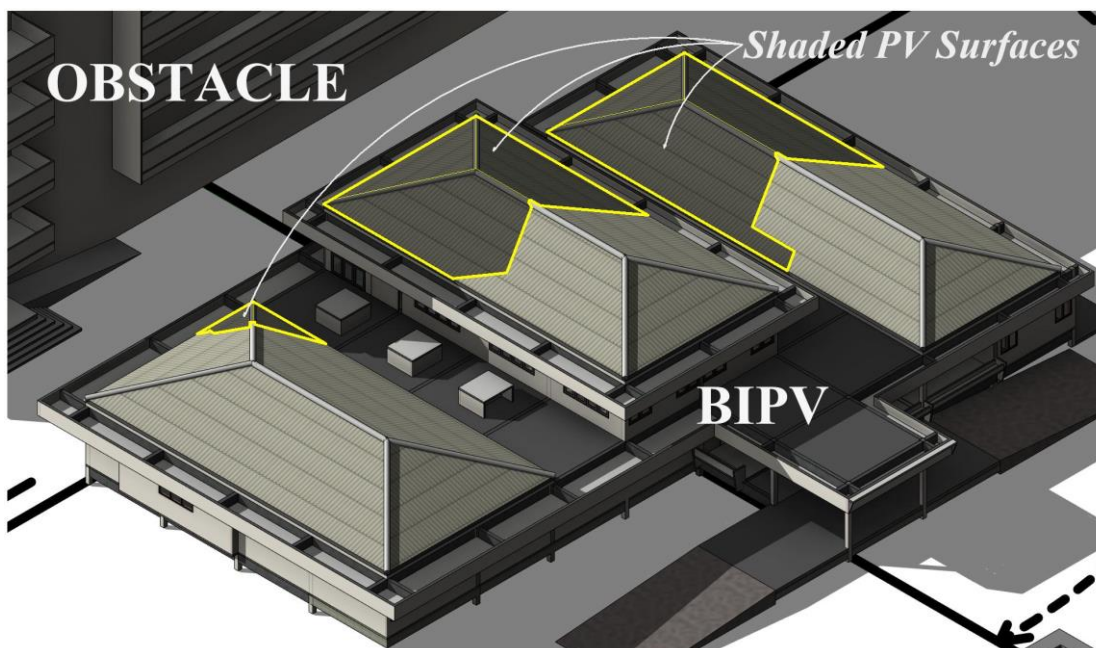
Parameter (C-2-2) ชนิดของผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ (BIPV Product Type) มีทั้งหมด 4 ประเภทและประเภท BAPV อีก 1 ประเภท (Jelle, Breivik, และ Røkenes, 2012; Chaianong และ Pharino, 2015; Shukla, Sudhakar, และ Baredar, 2016) Parameter (C-2-3) ประเภทของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (BIPV System Type) (Biyik et al., 2017; Strong, 2016)

สิ่งที่ได้กล่าวไปนั้นคือ พารามิเตอร์ (Parameter) ที่เป็นตัวแทนของ Partial Shading Effects อันเป็นสิ่งที่ขวางกั้นอยู่ตรงกลางระหว่างการแผ่รังสีอาทิตย์ (Solar Radiation) กับพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Surfaces) ที่ส่งผลให้ Solar Radiation ที่ตกลงบน PV Surfaces มีปริมาณแตกต่างกันระหว่าง PV Surfaces ที่ได้รับผลจาก Partial Shading Effects และไม่ได้รับผลจาก Partial Shading Effects ดังที่แสดงในรูปที่ 2.5

รูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นถึงลักษณะและรูปร่างการทอดเงาที่ปรากฏของ Surrounding Obstacle ที่ฉายลงสู่พื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีรูปร่างที่ซับซ้อน ทอดตาไปบน PV Surfaces ทั้งปริมิตสามมิติ โดยรูปร่างและขนาดพื้นที่ของเงานั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ตามการเคลื่อนตำแหน่งของดวงอาทิตย์ คือ Altitude Angle และ Azimuth



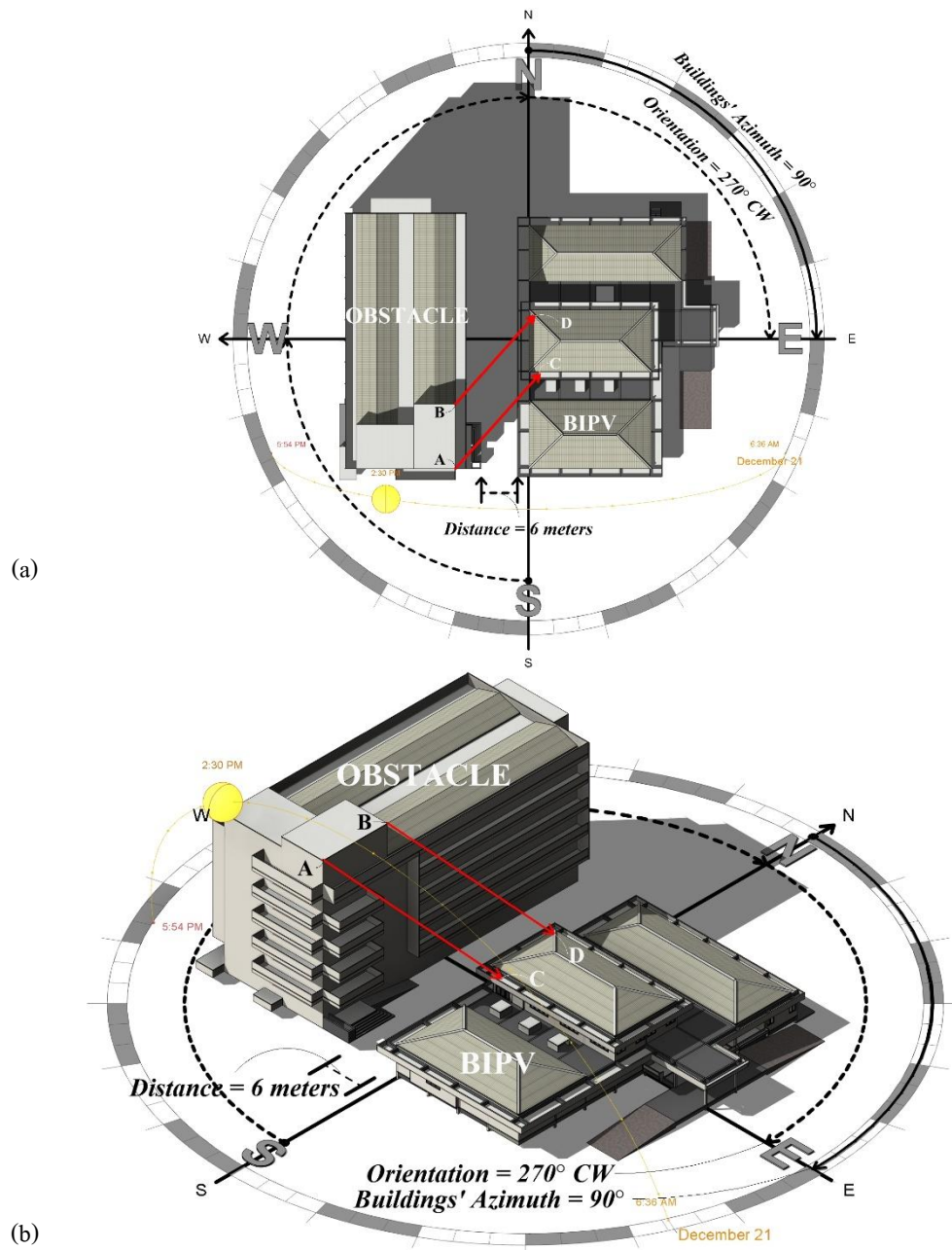
รูปที่ 2.5 กรอบเชื่อมโยง Parameter ของ Partial Shading Effects



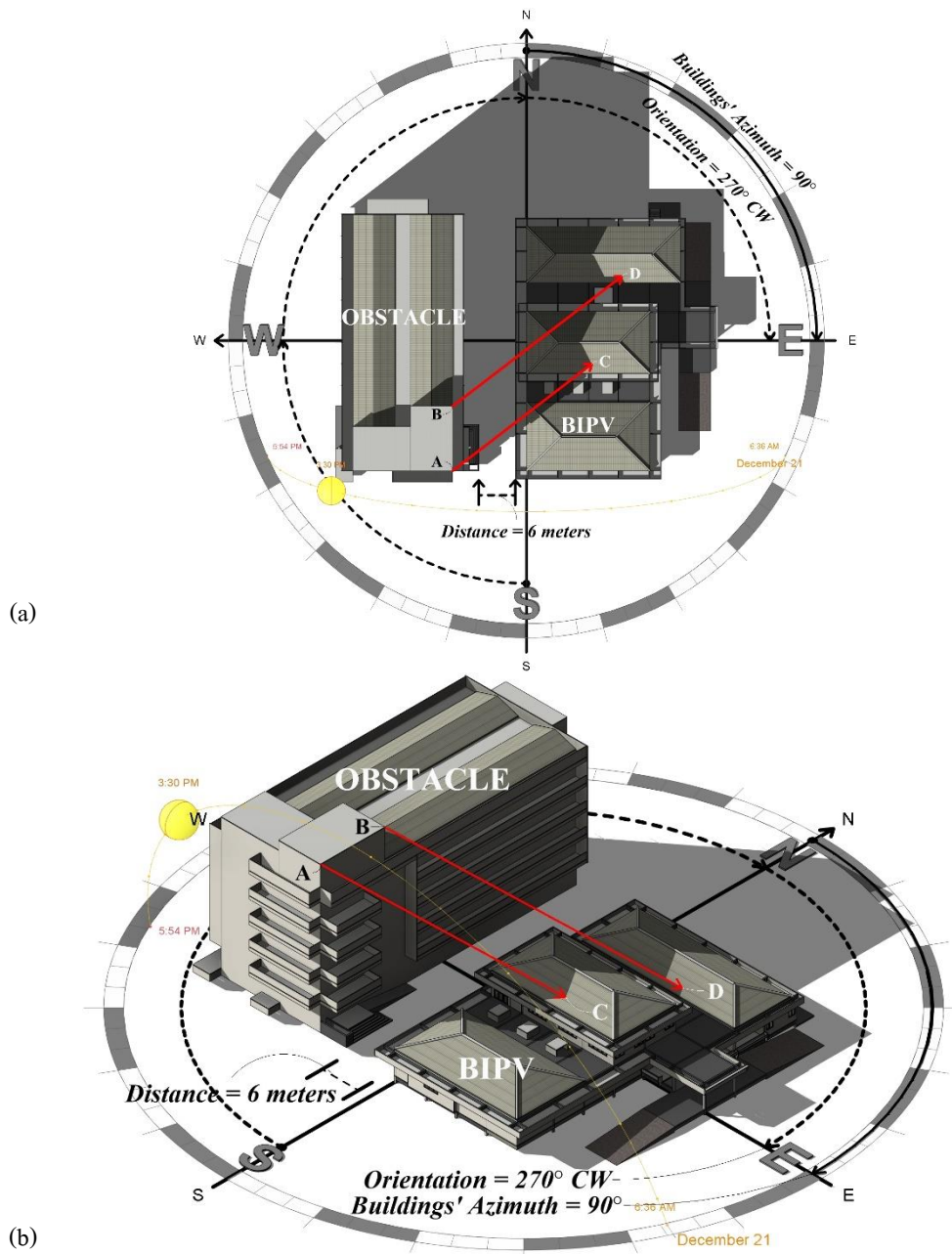
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงรูปร่างที่ซับซ้อนของเงาที่ทอดจาก Surrounding Obstacle ลงบนสู่พื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 2.7 และ 2.8 แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงเงาที่ทอดลงบนพื้นผิวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในเวลา 14.30 น. และ 15.30 น. ในวันเพ็ญ (Winter Solstice) สำหรับอาคารสองหลังที่ตั้งอยู่ในกรุงเทพฯ ประเทศไทย ซึ่งตั้งอยู่ ณ พิกัด 13° เหนือ $100^{\circ}30'$ ตะวันออก หันหน้าอาคารออกสู่ทิศตะวันออกทั้งสองอาคาร โดยรูปที่ 2.7 และ 2.8 แสดงให้เห็นถึงอาคาร BIPV (อาคารเดี่ยว) ที่ตั้งอยู่ขวามือของภาพ นั้นถูกเงาที่ทอดยาวมาจากอาคารข้างเคียง ที่เป็น Surrounding Obstacle ที่มีความสูงมากกว่าอาคาร BIPV โดยจุด A และจุด B เป็นพิกัดสามมิติที่ตั้งอยู่บนเรขาคณิต Surrounding Obstacle อันเป็นตัวแทนของพิกัดของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Location)

ขณะที่จุด C และจุด D คือจุดของเงาที่เกิดขึ้นจากจุด A และจุด B ตามลำดับ อันถูกกำหนดขึ้นโดยอย่างมีความสัมพันธ์กับ Altitude Angle และ Azimuth ของดวงอาทิตย์ จากรูปที่ 2.7 และ 2.8 จะเห็นได้ว่าพิกัดสามมิติของ Surrounding Obstacle (จุด A และจุด B) และอาคาร BIPV นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่จุดตำแหน่งเงา (จุด C และจุด D) ที่อยู่บนแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีการย้ายตำแหน่ง พื้นที่และรูปร่างของเงาได้มีความเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมาก ดังที่แสดงในรูปที่ 2.8 (a) และ 2.8 (b) การเปลี่ยนแปลงของการทอดเงา (Projected Shadow) นี้ได้ส่งผลกระทบให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของระดับ Solar Insolation บนผิวเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอย่างมาก (Ning, et al., 2017)



รูปที่ 2.7 (a) และ (b) ตัวอย่างที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของเงาที่ทอดจาก Surrounding Obstacle ลงบนสู่ พื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาอาคาร BIPV ในเวลา 14.30 น. วัน เหมยัน (Winter Solstice)



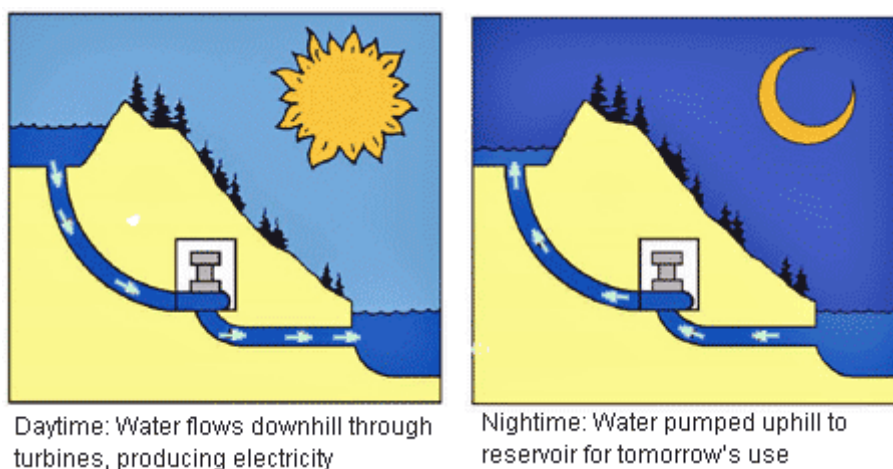
รูปที่ 2.8 (a) และ (b) ตัวอย่างที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของเงาที่ทอดจาก Surrounding Obstacle ลงบนสู่ พื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาอาคาร BIPV ในเวลา 15.30 น. วันเพ็ญ (Winter Solstice)

จากรายละเอียดที่ได้กล่าวไปในข้างต้นนั้นแสดงให้เห็นภาพรวมของปัจจัยสำคัญทั้ง 4 กลุ่มใหญ่ อันเป็นสิ่งที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ PSE ซึ่งได้แก่ Surrounding-reflected Radiation, Surrounding Obstacle, PV Surface Geometries และ PV Module Properties

■ พลังงานน้ำ (Hydropower หรือ Water Power)

พลังงานน้ำนั้นถือเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาด โดยมีกลไกการได้มาของพลังงานคือการเก็บกักน้ำด้วยสิ่งก่อสร้างเช่นเขื่อน ให้ระดับน้ำเหนือเขื่อนสูงกว่าอีกด้านของเขื่อน (ท้ายเขื่อน) แล้วปล่อยน้ำจากที่ระดับน้ำสูงกว่าให้ไหลผ่านกังหันปั่นกระแสไฟฟ้าไปสู่ที่ระดับน้ำต่ำกว่า โดยในปีพ.ศ. 2556 ประเทศไทยมีกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานน้ำสูงถึง 3,497 MW และพบว่าประเทศไทยมีศักยภาพที่จะสามารถผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำสูงถึง 15,155 MW หรือนับเป็นสี่เท่าของกำลังการผลิตในปัจจุบัน (Aroonrat & Wongwises, 2015)

การนำพลังงานน้ำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้านั้นมิได้ถูกจำกัดเพียงแค่การผลิตกระแสไฟฟ้าในเขื่อนขนาดใหญ่เท่านั้น แต่ยังสามารถนำมาใช้ในโครงการขนาดเล็กระดับอาคารได้อีกด้วยระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานน้ำขนาดเล็ก (Small-scale hydropower systems) คือ ระบบที่มีกำลังการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กกว่า 100 kW (Botkin & Keller, 2011) โดยสามารถติดตั้งระบบดังกล่าวในแหล่งน้ำธรรมชาติที่มีการไหลของกระแสน้ำที่อยู่ไม่ไกลจากอาคาร โดยพบว่าประเทศไทยมีศักยภาพผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยระบบขนาดเล็กนี้ได้ไม่น้อยกว่า 1,500 MW (Aroonrat & Wongwises, 2015) ซึ่งความสามารถการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยระบบนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของการไหลของน้ำในแหล่งน้ำเป็นหลัก และจำเป็นต้องคำนึงถึงการรบกวนต่อแหล่งน้ำและสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับแหล่งน้ำนั้นๆ เป็นสำคัญ เนื่องจากระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานน้ำสามารถรบกวนการดำรงชีพของสัตว์น้ำและอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสน้ำได้



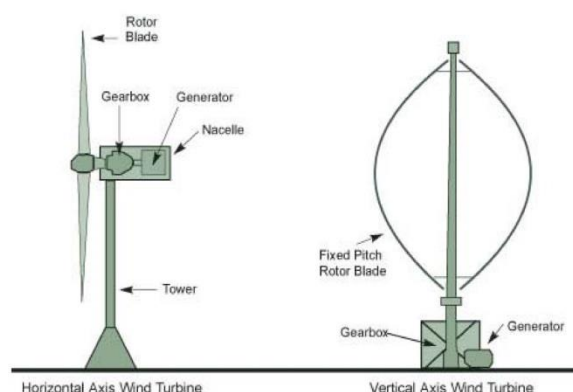
รูปที่ 2.9 กลไกการทำงาน ของวิธีการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานน้ำด้วยรูปแบบ Pump Storage (U.S. Geological Survey, 2018)

นอกจากนี้ยังมีวิธีการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานน้ำด้วยรูปแบบที่เรียกว่า Pump Storage โดย Pump Storage คือ ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานน้ำที่ใช้ประโยชน์จากราคากระแสไฟฟ้าจากระบบสาธารณูปโภคภายนอกในช่วงเวลาที่มีราคาถูก (off-peak) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นช่วงเวลากลางคืน มาใช้สูบน้ำจากบริเวณแหล่งน้ำที่มีระดับต่ำกว่าไปสู่แหล่งเก็บน้ำที่มีระดับสูงกว่า เมื่อถึงเวลาที่ต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูง (เช่น ในช่วงบ่าย ที่ต้องการใช้ไฟฟ้าในการปรับอากาศ) จึงปล่อยน้ำที่เก็บกักไว้มาผลิตกระแสไฟฟ้า (Botkin & Keller, 2011)

■ พลังงานลม (Wind Power)

พลังงานลมเป็นพลังงานจากธรรมชาติที่มีอยู่อย่างล้นเหลือ มีอยู่ทั่วไปไม่ต้องซื้อหา และเป็นพลังงานที่สะอาด ไม่มีการปล่อยของเสียสู่สิ่งแวดล้อม โดยมนุษย์สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลมด้วยการใช้ กังหันลม (Wind Turbine) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจลน์ของกระแสลม ด้วยการเปลี่ยนการไหลของกระแสลมผ่านใบกังหัน เป็นพลังงานกลด้วยการทำให้ใบกังหันหมุนรอบแกน จากนั้นจึงนำพลังงานกลมาเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กังหันลมนั้นได้รับการพัฒนาจนเกิดเป็นรูปแบบที่หลากหลาย แต่สามารถสรุปได้เป็น สองประเภทหลัก นั่นคือ กังหันลมแนวแกนนอน และ กังหันลมแนวแกนตั้ง

กังหันลมแนวแกนนอน (Horizontal axis wind turbine: HAWT) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานไปกับทิศทางกับทิศทางของกระแสลม เรียกว่า หางเสือ และมีอุปกรณ์ป้องกันกังหันชำรุดเสียหายขณะเกิดลมพัดแรง กังหันลมประเภทนี้ยังแบ่งออกเป็นหลายชนิด เช่น กังหันลมวินด์มิลล์ (Windmills) กังหันลมใบเสื่อลำแพน กังหันลมแบบกังล้อจักรยาน และกังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้าแบบ Propeller เป็นต้น ส่วน **กังหันลมแนวแกนตั้ง (Vertical axis wind turbine: VAWT)** นั้นเป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนและใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของกระแสลมในแนวราบ ซึ่งทำให้สามารถรับกระแสลมในแนวราบได้ทุกทิศทาง ซึ่งกังหันลมแบบนี้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย



รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบกังหันลมแนวแกนนอน (HAWT) และกังหันลมแนวแกนตั้ง (VAWT) (Sajuh, 2015)

กังหันลมทั้งสองประเภทนี้มีข้อได้เปรียบและความเหมาะสมต่อการใช้งานที่แตกต่างกัน ดังรายละเอียดที่ระบุใน ตารางที่ 2.1 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติกังหันลมประเภท HAWT และ VAWT
(Aslam Bhutta et al., 2012)

คุณสมบัติ	กังหันลมแนวแกนนอน (HAWT)	กังหันลมแนวแกนตั้ง (VAWT)
ขนาดของเสา	ใหญ่	เล็ก
การก่อให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	มี	ไม่มี
กลไกการสาย	มี	ไม่มี
ความทนทานต่อกระแสลมพายุ	ไม่ทนทาน	ทนทาน

คุณสมบัติ	กังหันลมแนวแกนนอน (HAWT)	กังหันลมแนวแกนตั้ง (VAWT)
การบำรุงรักษา	ซับซ้อน	สะดวก
ความเร็วกระแสลมต่ำสุดที่ ต้องการ	ความเร็วสูง (2.5-5 เมตร/วินาที)	ความเร็วต่ำ (1.5-3 เมตร/วินาที)
ผลกระทบต่อมนุษย์	อาจทำให้เวียนศีรษะ	ไม่มี
ตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	ไม่ได้อยู่บนระดับพื้นดิน	อยู่บนระดับพื้นดิน
ความสูงจากระดับพื้นดิน	สูงจากระดับพื้นดิน	ใกล้กับระดับพื้นดิน
รัศมีการหมุนของใบกังหัน	มาก	น้อย
การก่อให้เกิดเสียงรบกวน	ค่อนข้างมาก	น้อย
ทิศทางกระแสลม	ขึ้นกับทิศทางกระแสลม	เป็นอิสระจากทิศทางกระแสลม
การรบกวนต่อนก	มาก	น้อย
ประสิทธิภาพในอุดมคติ	50-60%	มากกว่า 70%

โดยทั่วไป ประเทศไทยมีศักยภาพด้านการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในระดับต่ำถึงปานกลาง โดยมีระดับความเร็วลมเฉลี่ย 3-5 เมตร/วินาที แต่ บริเวณที่มีความเหมาะสมต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลมนี้ควรมีระดับความเร็วลมเฉลี่ยไม่ควรต่ำกว่า Class 3 ของมาตรฐาน IEC (International Electrotechnical Commission) ซึ่งมีความเร็วลม 6.4-7.0 เมตร/วินาที หรือมีพลังงานลม 300-400 W/ตารางเมตร ณ ระดับความสูง 50 เมตร เพราะฉะนั้นจึงมีสถานที่จำนวนไม่มากในประเทศไทยที่มีความเร็วลมเฉลี่ยระดับนั้น เช่น ภาคใต้บริเวณชายฝั่งด้านอ่าวไทย อ.หัวไทร จ.นครศรีธรรมราช ที่มีระดับความเร็วลมเฉลี่ย Class 3 และอุทยานแห่งชาติไทรโยค จ.สุราษฎร์ธานี ที่มีระดับความเร็วลมเฉลี่ย Class 6-7 (8.00-11.90 เมตร/วินาที หรือมีพลังงานลม 600 W/ตารางเมตร) เป็นต้น (Chingulpitak & Wongwises, 2014)

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม นั้นมีได้มีเพียงแต่ ทิศทาง ความเร็ว และความสม่ำเสมอของกระแสลม แต่ยังมี สภาพภูมิประเทศ และ ความแตกต่างของ อุณหภูมิในบรรยากาศอันเป็นสาเหตุทำให้เกิดกระแสลมซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญอีกด้วย (Botkin & Keller, 2011) ตัวอย่างเช่น ความเร็วของกระแสลมมักจะมีการเพิ่มความเร็วที่บริเวณยอดเนินเขาหรือช่องเขา เป็นต้น

การใช้ประโยชน์จากพลังงานลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าในเขตเมืองและในอาคารเช่น โรงพยาบาลนั้นมิใช่ข้อจำกัดในการติดตั้งและใช้งานกังหันลมทั้งสองประเภทดังที่กล่าวไป เนื่องจากมีขนาดใหญ่ และต้องการสถานที่ติดตั้งเฉพาะแต่สามารถทำได้ในรูปแบบ อาคารผสมผสานกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้า (Building Integrated Wind Turbine: BIWT / Building Mounted Wind Turbine) ซึ่งมีการติดตั้งกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (ขนาดรวมไม่เกิน 100 kW) ผสมผสานเป็นส่วนหนึ่งกับอาคาร (J. Smith, Forsyth, Sinclair, & Oteri, 2012) ซึ่งส่วนใหญ่จะติดตั้งบริเวณจุดสูงสุดของอาคาร เนื่องจาก ความเร็วของกระแสลมจะเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับความสูงจากพื้นดิน และได้รับผลกระทบน้อยจากอุปสรรคขวางกระแสลม เช่น ต้นไม้ และ อาคารข้างเคียง

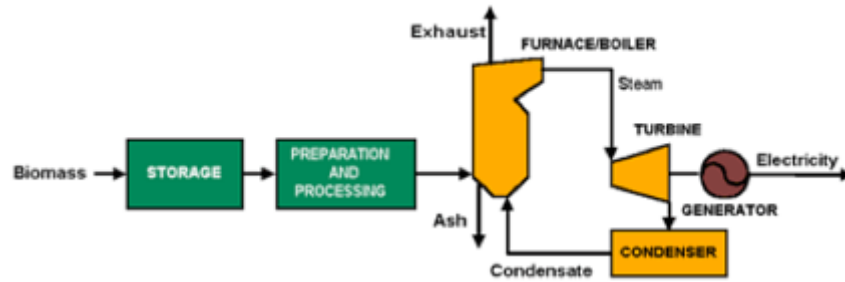
■ พลังงานชีวมวล (Biomass)

พลังงานชีวมวลนับเป็นแหล่งพลังงานสำคัญสำหรับคนไทยมาเป็นเวลายาวนาน ปัจจุบันที่สังคมไทยเปลี่ยนจากสังคมเกษตรกรรมมาเป็นสังคมอุตสาหกรรมมากขึ้น ความต้องการใช้พลังงานจากแหล่งชีวมวลนั้นไม่ได้ลดลงแต่กลับมากขึ้นตามลำดับ ทั้งการใช้พลังงานภาคครัวเรือนและภาคการผลิตอื่นๆ (Prasertsan & Sajjakulnukit, 2006) ชีวมวล หรือ มวลชีวภาพ (Biomass) คือสารอินทรีย์ทั่วไปจากธรรมชาติ ที่จะสะสมพลังงานเก็บเอาไว้ในตัวของมันเอง และสามารถนำพลังงานของมันที่เก็บสะสมเอาไว้มาใช้ประโยชน์ได้ ตัวอย่างของสารอินทรีย์เหล่านั้น เช่น เศษหญ้า เศษไม้ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรหรือจากการอุตสาหกรรม เช่น ชี้เลี้ยง ฟาง แกลบ ชานอ้อย เป็นต้นรวมทั้งมูลสัตว์ เช่น ไก่ หมู วัว เป็นต้น การนำชีวมวลมาใช้ประโยชน์ในการเป็นแหล่งพลังงานนั้นสามารถทำได้สองวิธีคือ ใช้ในการทำความร้อน และ ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า (Torcellini, Pless, & Deru, 2006) แต่รูปแบบที่มีศักยภาพสูงได้แก่ การใช้กากของเหลือในโรงงานอุตสาหกรรมเกษตรเป็นเชื้อเพลิงในระบบการผลิตพลังงานร่วม (Cogeneration) ซึ่งจากรายงานของบริษัทที่ปรึกษาที่เสนอต่อคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ การใช้กากของเหลือมาผลิตกระแสไฟฟ้าจะมีศักยภาพสูงถึง 3,000 MW แต่อุปสรรคของการพัฒนาพลังงานชีวมวลในประเทศไทย คือ ปัจจุบันในประเทศไทย มีผู้ผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลแล้วไม่ต่ำกว่า 20 ราย ทั้งที่เป็นโรงงานน้ำตาล (ใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิง) โรงสีข้าว (ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง) คิดเป็นกำลังการผลิตรวมถึง 440 เมกะวัตต์ ปัญหาที่ทำให้การพัฒนาพลังงานชีวมวลไม่เต็มศักยภาพที่มีอยู่จึงมีใช้ปัญหาด้านเทคโนโลยี แต่ปัญหาที่สำคัญคือ ราคารับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้ารายย่อยจากพลังงานชีวมวล (ประมาณ 1.26 บาทต่อหน่วย) นั้นยังต่ำกว่าราคารับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตรายใหญ่จากเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ (Fossil fuel) (ประมาณ 1.6 บาทต่อหน่วย) อยู่มาก ดังนั้นจึงทำให้แรงจูงใจในการลงทุนและการพัฒนาพลังงานจากชีวมวลลดลง

การผลิตกระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานชีวมวลนั้น โดยส่วนใหญ่ใช้วิธีเผาไหม้เพื่อต้มน้ำให้เกิดไอน้ำแรงดันสูงไปหมุนใบพัดในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Direct-fired Combustion Systems) นอกจากนั้นยังมีวิธีอื่นๆ ได้แก่ กระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส (Gasification) เป็นการเปลี่ยนรูปพลังงานเคมีภายในของคาร์บอนในชีวมวลไปเป็นแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้ วิธีการ Pyrolysis คือกระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้ความร้อนในสภาวะไร้อากาศ โดยเกิดการแตกของพันธะโมเลกุลในองค์ประกอบให้กลายเป็นก๊าซเชื้อเพลิงและของเหลว (น้ำมัน) และ วิธีการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) เป็นการย่อยสลายชีวมวลโดยแบคทีเรียในสภาพแวดล้อมที่ปราศจากออกซิเจน เพื่อผลิตแก๊สชีวภาพที่ประกอบด้วย Methane เป็นส่วนใหญ่ที่สามารถนำไปเผาไหม้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าได้

ปัจจัยที่มีความสำคัญสูงสุดในการวางแผนเพื่อก่อสร้างและใช้งานชีวมวลเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าคือการประเมินความเพียงพอของแหล่งชีวมวล (Resource Assessment) ซึ่งมีความจำเป็นเนื่องจาก แหล่งชีวมวลนั้น ต้องมีประเภทที่เหมาะสม ต้องมีปริมาณที่เพียงพอ และต้องขนส่งเข้าสู่โรงงานได้ตรงเวลาอีกด้วย นอกจากนั้นปัจจัยสำคัญต่อมาคือ การปล่อยก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ (Combustion Emissions) จะต้องได้รับการตรวจวัดและประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างรอบคอบ เมื่อนำระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานชีวมวลมาใช้ในอาคารนั้นจะมีปัจจัยที่ต้องคำนึงเพิ่มเติม ได้แก่ การเก็บแหล่งชีวมวลในอาคาร ที่จะต้องระมัดระวังเรื่องฝุ่นผงที่เกิดจากชีวมวลเหล่านั้น อันก่อให้เกิดความสกปรก และมีความเสี่ยงที่จะติดไฟและเกิดการระเบิดได้ นอกจากนั้นถ้าการเก็บแหล่งชีวมวลมีความชื้นสูง ก็จะเป็นแหล่งสะสมและแพร่กระจายของจุลินทรีย์ เช่น เชื้อรา ได้ (U.S. Department of Energy Federal Energy Management Program (FEMP), 2016)

Direct Combustion / Steam Turbine System



รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงการทำงานของ Direct-fired Combustion Systems (U.S. Department of Energy Federal Energy Management Program (FEMP), 2016)

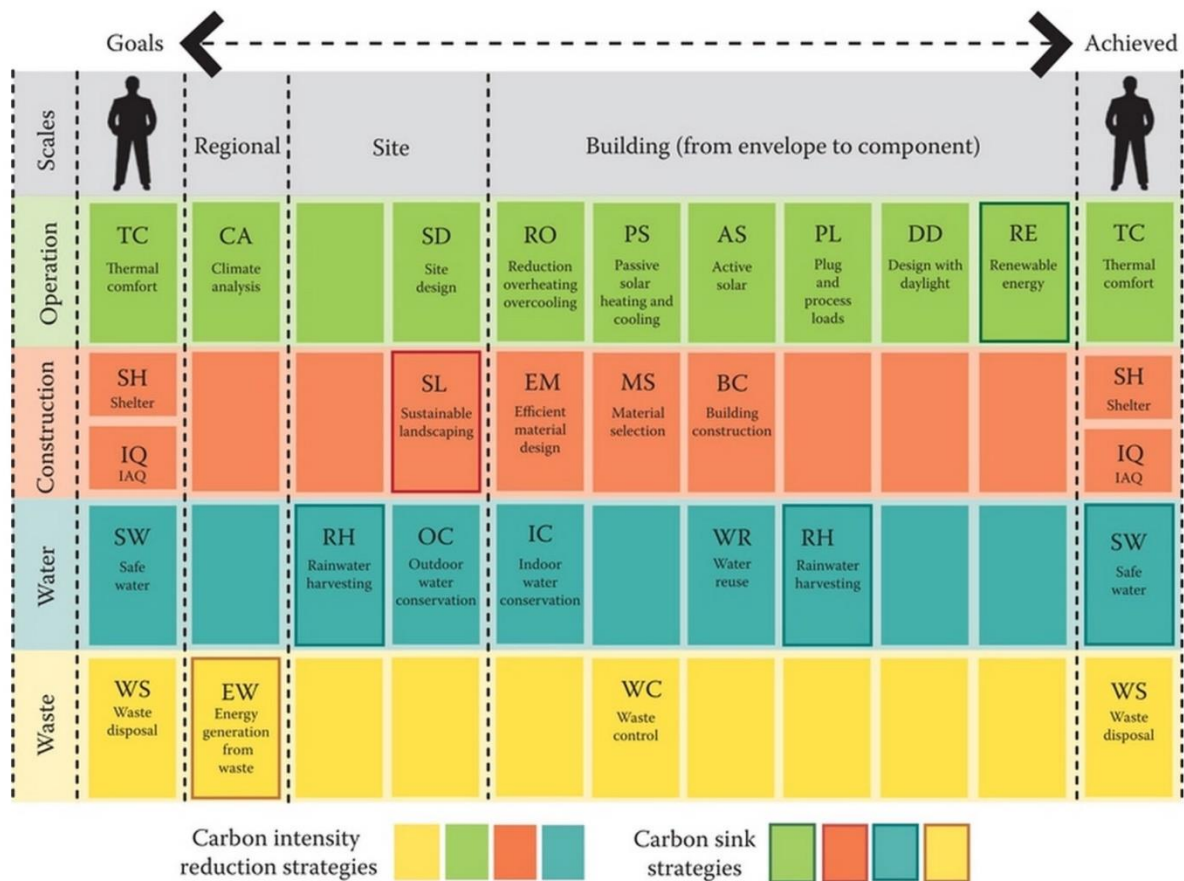
■ ระบบผลิตพลังงานร่วม (Cogeneration)

ระบบผลิตพลังงานร่วม (Cogeneration) คือ ระบบที่ให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานกล และมีการใช้ประโยชน์จากพลังงานความร้อนควบคู่ไปด้วยในขณะเดียวกัน โดยอาศัยเชื้อเพลิงแหล่งเดียวกัน ประสิทธิภาพของระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วมนั้นสูงถึง 80% เมื่อเทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียวที่มีประสิทธิภาพเพียง 40% เท่านั้นเนื่องจากพลังงานความร้อนที่เหลือจากการผลิตไฟฟ้าจะถูกปล่อยทิ้งให้กับบรรยากาศโดยไม่ได้นำไปใช้งาน

เมื่อกระบวนการ Balancing Emissions คือการลดการใช้พลังงานของอาคารจากแหล่งพลังงานที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้ต่ำที่สุดเท่าที่สามารถเป็นไปได้ ด้วยสองกระบวนการย่อยคือ การลดการใช้พลังงานที่เกิดจากการใช้งานอาคาร และการติดตั้งระบบสร้างพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทน แล้วยังมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนจากอาคารลงเหลือจึงค่อยดำเนินการกระบวนการหักกลบลบกันของการปล่อยก๊าซคาร์บอน (Carbon Offset) ต่อไป

2.1.3 กระบวนการหักกลบลบกันของการปล่อยก๊าซคาร์บอน (Carbon Offset)

กระบวนการ Carbon Offset นั้นสามารถทำให้อาคารที่ยังมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนลงเหลือจากกระบวนการ Balancing Emissions เป็น Carbon Neutral Building ได้ด้วยการใช้ การดักจับและกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture and Sequestration) หรือ การดูดซับก๊าซเรือนกระจก (Carbon Sinks) และอาจร่วมกับ การลงทุนในโครงการดักจับและจัดเก็บคาร์บอน (Carbon Projects Funding) (Roche, 2017; Sheppard & Socolow, 2007; องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2555) ซึ่งในภาคปฏิบัติด้านการออกแบบ ก่อสร้าง และการใช้งานอาคารนั้นไม่นิยมนำกระบวนการ Carbon Capture and Sequestration มาใช้เนื่องจากเป็นวิธีการปฏิบัติด้านการดักจับและกักเก็บคาร์บอนในภาคอุตสาหกรรมและการผลิตพลังงาน เช่น การดักจับและกักเก็บคาร์บอนในโรงไฟฟ้าถ่านหิน เป็นต้น ซึ่งภาคอาคารนั้นมีความแตกต่างด้านวิธีการลดก๊าซคาร์บอน และวิธีการที่เหมาะสมกว่าคือใช้วิธี การดูดซับก๊าซเรือนกระจก (Carbon Sinks) เป็นสำคัญ (Roche, 2017; Sheppard & Socolow, 2007) ซึ่งวิธีการ Carbon Sinks นี้ใช้หลักการตามแนวคิดการหักกลบลบกันของการปล่อยก๊าซคาร์บอนอย่างเต็มรูปแบบ ด้วยกลยุทธ์ตามแนวความคิด Carbon Neutral Design Process (CNDP) Matrix (Roche, 2017) (รูปที่ 2.12)



รูปที่ 2.12 Carbon Neutral Design Process (CNDP) Matrix (Roche, 2017)

Carbon Neutral Design Process (CNDP) Matrix นั้นถูกนำเสนอผ่านตารางขนาด 4 แถว 5 คอลัมน์ โดยแถวทั้ง 4 นั้นเป็นตัวแทนของ แหล่งกำเนิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนหลัก (Sources of Emissions) ทั้ง 4 ได้แก่ การใช้งานอาคาร (Operation) การก่อสร้างอาคาร (Construction) การใช้น้ำ (Water) และ ขยะ (Waste) และคอลัมน์ทั้ง 5 นั้นเป็น ขอบเขตของมาตรการกระบวนการหักกลบลบกันของการปล่อยก๊าซคาร์บอน (Carbon Offset) ต่างๆ ไล่จากขอบเขตที่ใหญ่ที่สุดสู่ขอบเขตเล็กที่สุด โดยคอลัมน์แรกด้านซ้ายสุดคือ จุดอ้างอิงด้านการปล่อยก๊าซคาร์บอนของอาคาร (Emission Baseline) ของแต่ละ Sources of Emissions ดังที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 2.1.1 ส่วนคอลัมน์สุดท้ายด้านขวาสุดคือ ผลสำเร็จด้านการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอน (Outcomes) คอลัมน์ระหว่างคอลัมน์ซ้ายสุดและขวาสุดมีจำนวน 3 คอลัมน์ ได้แก่ มาตรการ Carbon Offset ระดับเมือง (Regional-urban Scale) คอลัมน์ถัดมาด้านขวามือคือ มาตรการ Carbon Offset ระดับที่ดิน (Site) และ อีกคอลัมน์ถัดมาด้านขวามือคือ มาตรการ Carbon Offset ระดับอาคาร (Building) ที่ในคอลัมน์นี้ยังมีคอลัมน์ย่อยที่ไล่เรียงระดับภายในอาคารจากใหญ่ไปเล็ก จากซ้ายมือไปขวามือ คือจากระดับเปลือกอาคาร ไล่จนถึงระดับอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า เซลล์ในตารางที่เป็นจุดตัดระหว่างแถวและคอลัมน์นั้นแสดงให้เห็นถึงมาตรการ Carbon Offset ที่จำเพาะไปถึง ระดับขอบเขตองค์ความรู้ (Knowledge Areas) ที่นำมาดำเนินการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอน (Roche, 2017)

Knowledge Areas บางองค์ความรู้นั้นสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนได้เป็นอย่างมาก ในปริมาณที่สามารถเทียบเท่าปริมาณก๊าซที่ถูกปล่อยออกมา Knowledge Areas นั้นๆ จึงกลายเป็น การดูดซับก๊าซเรือนกระจก (Carbon Sinks) ที่มีศักยภาพในหักกลบลบกันกับก๊าซคาร์บอนที่ถูกปล่อยออกมาได้

จากรูปที่ 2.12 Knowledge Areas ที่เป็น **Carbon Sinks** นั้นถูกแสดงในเซลล์ในตารางที่เป็นจุดตัดระหว่างแถวและคอลัมน์ที่มีเส้นกรอบสีเขียว อันได้แก่

- การสร้างพลังงานจากขยะ (Energy Generation from Waste: EW) เป็นจุดตัดระหว่างคอลัมน์ ระดับเมือง (Regional-urban Scale) กับ Sources of Emissions ประเภทขยะ (Waste)
- การจัดภูมิทัศน์ที่ยั่งยืน (Sustainable Landscaping: SL) เป็นจุดตัดระหว่างคอลัมน์ระดับที่ดิน (Site) กับ Sources of Emissions ประเภทการก่อสร้างอาคาร (Construction)
- การใช้ประโยชน์จากน้ำฝน (Rainwater Harvesting: RH) เป็นจุดตัดระหว่างคอลัมน์ระดับที่ดิน (Site) กับ Sources of Emissions ประเภทการใช้น้ำ (Water)
- การใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทน (Renewable Energy: RE) เป็นจุดตัดระหว่างคอลัมน์ระดับอาคาร (Building) กับ Sources of Emissions ประเภทการใช้งานอาคาร (Operation)

ในอดีต กระบวนการออกแบบเพื่อการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนและเพิ่มประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานของอาคารนั้นมีความยุ่งยากซับซ้อนมาก ทั้งทางด้านการประเมินสมรรถนะอาคาร (Building Performance Evaluation) และการสร้างทางเลือกด้านการออกแบบเพื่อให้ผู้เกี่ยวข้องสามารถตัดสินใจเลือกทางเลือกแบบอาคาร (Design Alternatives) ที่ตรงความต้องการและมีสมรรถนะอาคารที่ดีที่สุด เนื่องจากกระบวนการนี้ในอดีตต้องใช้การเก็บข้อมูล ประมวลผล และจำลองสถานการณ์สมรรถนะอาคาร (Building Performance Simulation) ด้วยระบบมือ (Roche, 2017) แต่ในปัจจุบันได้มีกระบวนการออกแบบ-ก่อสร้างอาคารที่เข้ามาทดแทนระบบเดิม และจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

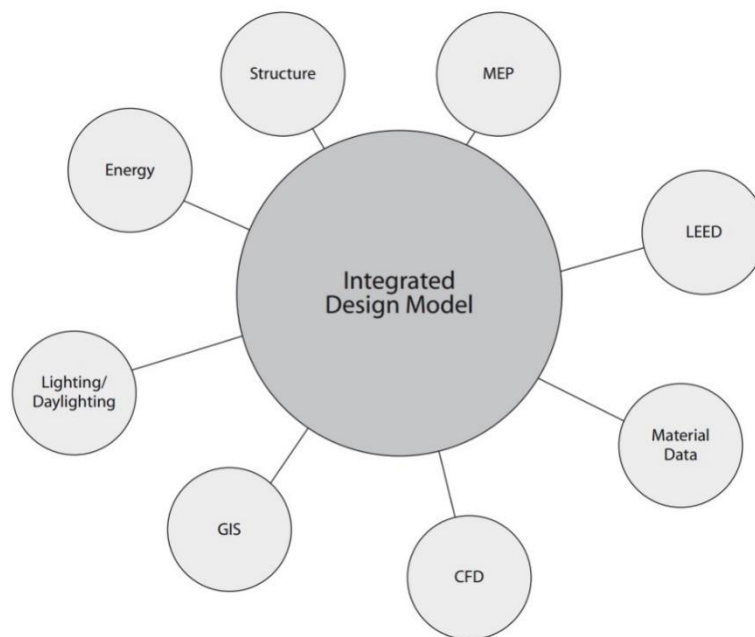
2.2 กระบวนการออกแบบอาคารที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ (Carbon-neutral Building Design Process: CNDP) ด้วยกระบวนการออกแบบบูรณาการ (Integrated Design Processes: IDP)

2.2.1 กระบวนการออกแบบบูรณาการ (Integrated Design Processes: IDP)

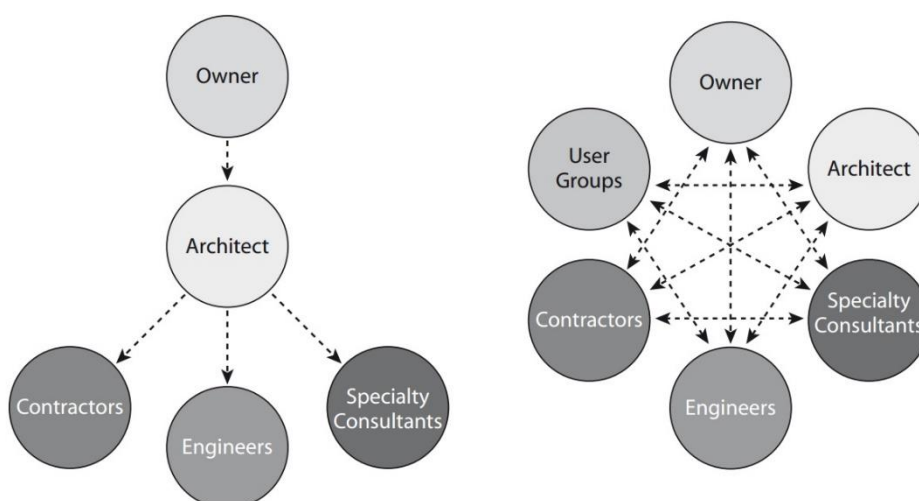
The International council for Research and Innovation in Construction (CIB) ได้ให้ความหมายของ กระบวนการออกแบบบูรณาการ (Integrated Design Processes: IDP) ซึ่งหมายถึง กระบวนการออกแบบที่ใช้การทำงานและทักษะร่วมกัน โดยการบูรณาการ ระบบข้อมูล สารสนเทศ และการจัดการองค์ความรู้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างและกระบวนการ และเพื่อเพิ่มคุณค่าของงานระหว่างกระบวนการออกแบบ สร้าง และการใช้งานอาคาร รวมถึงข้ามไปยังโครงการก่อสร้างอื่นๆอีกด้วย (Hansen & Knudstrup, 2005) โดยกระบวนการ IDP นั้นถูกนำมาใช้เพื่อทดแทนกระบวนการออกแบบประเภททำงานตามลำดับ (Traditional Sequential Process) ที่เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมในช่วงเวลาหลายสิบปีที่ผ่านมา แต่พบว่ากระบวนการประเภทนี้มีข้อเสียเปรียบกระบวนการ IDP เป็นอย่างมาก เนื่องจาก Traditional Sequential Process นั้นมีความล่าช้า มีความผิดพลาดและความซ้ำซ้อนในกระบวนการทำงาน (Eastman, Teicholz, Sacks, & Liston, 2011; Hansen & Knudstrup, 2005) (รูปที่ 2.14) แตกต่างจากกระบวนการ IDP ซึ่งเป็นการดำเนินการออกแบบอาคารร่วมกันทั้งกระบวนการ ในรูปแบบสหสาขา (Multidisciplinary) ทั้งสถาปนิก วิศวกร ผู้จัดการโครงการ เจ้าของโครงการ ฯลฯ ตั้งแต่เริ่มกระบวนการออกแบบ และยังร่วมกันวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในการออกแบบ ทั้งทางด้านรูปทรง การเลือกใช้วัสดุ การจัดการ

ทรัพยากร การเลือกใช้พืชพรรณในโครงการก่อสร้าง และยังรวมถึงการวิเคราะห์สมรรถนะด้านพลังงาน การระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ และการผลิตพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทนอีกด้วย (Yao, 2013)

กระบวนการ IDP นี้ต้องมีการทุ่มสรรพกำลังของผู้เกี่ยวข้องในการออกแบบเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นกระบวนการออกแบบ ซึ่งเป็นช่วงที่เป็นโอกาสที่ดีที่สุดในการปรับปรุงให้แบบอาคารมีความสมบูรณ์โดยมีต้นทุนต่ำสุด อันเป็นสิ่งที่แตกต่างจาก Traditional Sequential Process ที่ไม่มีการบูรณาการในกระบวนการออกแบบ มีการดำเนินกระบวนการออกแบบทีละวิชาชีพ โดยไม่ได้มีการทำงานร่วมกัน เมื่อโครงการก่อสร้างได้ดำเนินการไปในขั้นตอน (Phases) ต่างๆ การปรับปรุงอาคารนั้นจะทำได้ยากขึ้น และจะมีต้นทุนสูงขึ้น มากขึ้นตามระยะเวลาของขั้นตอนการออกแบบ-ก่อสร้างอาคารเพิ่มขึ้น (Zimmerman & Eng, 2006) ดังรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ 2.15

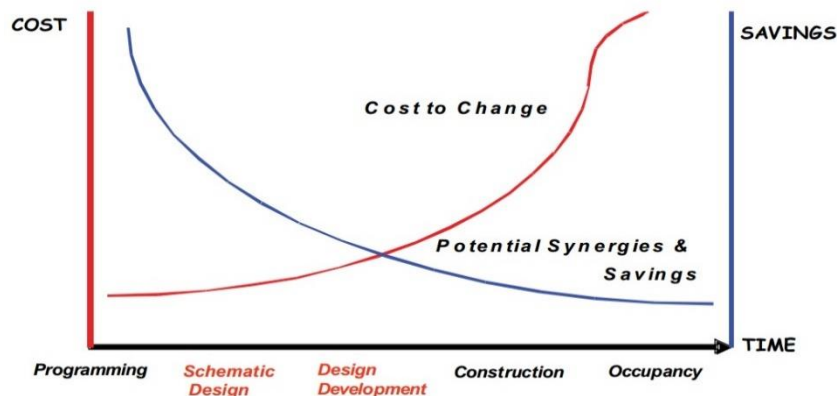


รูปที่ 2.13 แผนภาพแสดงแนวความคิดกระบวนการออกแบบบูรณาการ (IDP) (Krygiel & Nies, 2008)



รูปที่ 2.14 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบกระบวนการออกแบบแบบตามลำดับ (ซ้าย) กับกระบวนการออกแบบบูรณาการ (IDP) (ขวา) (Krygiel & Nies, 2008)

Opportunities for Change and the Design Sequence



รูปที่ 2.15 โอกาสและต้นทุนในการปรับปรุงอาคาร ในช่วงขั้นตอน (Phases) ต่างๆในช่วงชีวิตอาคาร (Zimmerman & Eng, 2006)

2.2.2 ระบบสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคาร (Building Performance Simulation: BPS)

การออกแบบอาคาร Carbon Neutral และการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ของอาคารผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ (Building Integrated Photovoltaic: BIPV) ที่มีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องมีการคาดการณ์ผลผลิตภาพ (Photovoltaic Productivity Estimation) พลังงานไฟฟ้าที่จะได้รับจากระบบได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากต้องให้มีความสมดุลกับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการเพื่อตอบสนองการใช้งานใน BIPV อย่างเพียงพอแต่ไม่มากเกินไปจนความจำเป็นเพื่อประสิทธิภาพในการใช้ต้นทุน (Cost Effective) ที่ดี แต่หนึ่งในปัญหาสำคัญที่สุดที่ทำให้การคาดการณ์ผลผลิตภาพดังกล่าว ทำได้ยาก หรือคลาดเคลื่อน ผิดพลาดจากความเป็นจริง คือ สภาพอากาศโดนบังเงาบางส่วนนั่นเอง เนื่องจากสภาวะนี้ มีความซับซ้อน ไร้รูปแบบตายตัว และมีสภาพอันเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบ PV อยู่ในบริบทคล้ายเมืองที่มีความหนาแน่นของอาคารและมีวัตถุแวดล้อม (Kanters & Wall, 2014)

ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีอาคารผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ (BIPV) จะมีศักยภาพในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอันเกิดจากกระบวนการผลิตพลังงานภาคอาคารก็ตาม แต่ยังพบว่าการออกแบบ BIPV นั้นยังมีอุปสรรคสำคัญคือ ผู้ออกแบบไม่สามารถคาดการณ์ประสิทธิภาพและผลลัพธ์ของการผลิตพลังงานจากรังสีอาทิตย์ของ BIPV ได้อย่างถูกต้อง และเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องนำหลัก การออกแบบอย่างมีหลักฐาน (Evidence-based Design) เข้ามาใช้ในการออกแบบ BIPV เพื่อสนับสนุนให้ผู้ออกแบบทราบถึงผลผลิตพลังงานจากระบบ PV ของทางเลือกการออกแบบแต่ละทางเลือกอย่างเที่ยงตรง ทำให้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการใช้งานอย่างสูงสุด และเป็นสิ่งสร้างความเชื่อมั่นแก่ผู้ลงทุนในโครงการก่อสร้าง BIPV ให้เห็นถึงความคุ้มค่าของโครงการอีกด้วย (Kuo, Hsieh, Guo, & Chan, 2016)

สิ่งสำคัญที่ผู้ออกแบบ BIPV จะต้องดำเนินการเพื่อประเมินความคุ้มค่าของระบบ PV คือ ต้องสามารถประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานที่จะได้รับจากระบบ PV โดย การประเมินทางปริมาณ (Quantitative Assessment) ของปริมาณรังสีอาทิตย์ (irradiance) ที่ตกลงบนพื้นผิวรับรังสีของระบบ PV

ด้วยการใช้ เครื่องมือสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคาร (Simulation Tools / Building Performance Simulation: BPS) (Ning et al., 2017)

ระบบสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคาร (Building Performance Simulation: BPS) คือเครื่องมือที่ถูกพัฒนาขึ้นด้วยวัตถุประสงค์เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในการออกแบบอาคารโดย (1) การจำลองและแสดงผลพหุคุณลักษณะทางกายภาพด้านใดด้านหนึ่งของอาคารด้วยการใช้แบบจำลองการคำนวณ อันเป็นตัวแทนคุณลักษณะทางกายภาพนั้นๆ ตัวอย่างเช่น การจำลองสมรรถนะอาคารด้านการส่งผ่านความร้อนผ่านเปลือกอาคาร ด้วยการใช้แบบจำลองการคำนวณด้านการส่งผ่านความร้อนผ่านวัสดุอาคาร เป็นต้น และโดย (2) การแสดงผลพหุคุณลักษณะดังกล่าวอย่างสม่ำเสมอ ถูกต้อง และเที่ยงตรง อยู่ในเกณฑ์ที่เป็นที่ยอมรับตามมาตรฐานในมิติของการตรวจวัดสมรรถนะอาคารด้านนั้นๆ (Bazjanac et al., 2011; Clarke & Hensen, 2015)

BPS ที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการออกแบบอาคารนั้นสามารถจำแนกออกเป็นประเภทตามความสามารถการสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคารต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้ (พันธุ์ดา พุฒิไพโรจน์, 2557; IBPSA-USA, 2015)

- การสถานการณ์จำลองค่าพลังงานของอาคารทั้งหมด (Whole-Building Energy Simulation)
- การคำนวณภาระการปรับอากาศ (Load Calculations)
- การคัดเลือกและกำหนดขนาดระบบปรับอากาศ (HVAC System Selection and Sizing)
- การวิเคราะห์ตัวแปรและการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Parametrics & Optimization)
- การปรับค่าการนำเข้าข้อมูลแบบจำลองอาคาร (Model Input Calibration)
- การวัดค่าการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Conservation Measure)
- การปฏิบัติตามกฎหมาย (Code Compliance)
- การประเมินระดับและการรับรองการตรวจวัด (Ratings and Certificates)
- การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายด้านสาธารณูปโภค (Utility Bill & Meter Data Analysis)
- การตรวจสอบการใช้พลังงานของอาคาร (Building Energy Auditing)
- การสร้างเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะด้านพลังงานของอาคาร (Building Energy Benchmarking)
- การจำลองสมรรถนะด้านแสงสว่างของอาคาร (Lighting Simulation)
- การจำลองสมรรถนะด้านคุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality Simulation)
- การวิเคราะห์วงจรชีวิตของอาคาร (Life-cycle Analysis)
- การจำลองสมรรถนะของกรอบอาคาร (Detailed Envelope Simulation)
- การจำลองสมรรถนะของระบบประกอบอาคาร (Detail Component Simulation)

BPS แต่ละโปรแกรมนั้น อาจมีความสามารถในการจำลองสมรรถนะอาคารมากกว่าหนึ่งประเภท ตัวอย่างเช่น โปรแกรม EnergyPlus นั้นถูกจัดให้มีความสามารถสามประเภท ได้แก่ Whole-Building Energy Simulation, HVAC System Selection and Sizing และ Code Compliance และโปรแกรม Autodesk Green Building Studio และ Insight 360 นั้นถูกจัดให้มีความสามารถสามประเภท ได้แก่ Whole-Building

2.2.3 ระบบสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคารแบบอัตโนมัติ (Automated BPS)

แม้ว่าในปัจจุบันเทคโนโลยี BPS จะมีการพัฒนาไปเป็นอย่างมากจากในอดีต ทั้งทางความสะดวกในการใช้งาน ความถูกต้องเที่ยงตรง และความหลากหลายเฉพาะทาง แต่ยังคงพบว่าเครื่องมือ BPS ยังมีอุปสรรคสำคัญที่ทำให้ไม่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้ออกแบบ BIPV ได้อย่างครบถ้วนคือ การรวบรวมและแปลงข้อมูลอาคารเพื่อเป็นข้อมูลนำเข้าสู่ระบบ BPS ด้วย ระบบมือหรือระบบไม่อัตโนมัติ (Manual / Non-automatic) ซึ่งเป็นวิธีการที่ถูกใช้โดยผู้ออกแบบระบบ PV มาเป็นเวลานานจวบจนปัจจุบัน อันเป็นสาเหตุสำคัญของความผิดพลาดและความล่าช้าในการจำลองสมรรถนะอาคาร เนื่องจากระบบ BPS ที่จำลองสมรรถนะแต่ละด้านนั้น มีข้อมูลนำเข้าเป็นปริมาณมหาศาล ทั้งข้อมูลด้านเรขาคณิตอาคาร ข้อมูลด้านคุณลักษณะทางพลังงานของวัสดุอาคาร ข้อมูลด้านภูมิอากาศ เป็นต้น ยิ่งไปกว่านั้นพบว่าการใช้งานระบบ BPS ในความเป็นจริงนั้น ผู้สร้างแบบจำลองด้านสมรรถนะ/พลังงานอาคาร (Energy Modelers) แต่ละคนจะมีวิธีการสร้างแบบจำลองและป้อนข้อมูลนำเข้า BPS ระบบมือที่แตกต่างกัน และยังคงพบ Energy Modeler แต่ละคนจะมี การป้อนข้อมูลนำเข้าระบบ BPS โดยพลการ/โดยเดาสุ่ม (Arbitrary Data) ซึ่งสร้างความเสี่ยงให้ผลลัพธ์จาก BPS นั้นผิดพลาดและไม่น่าเชื่อถือ (Bazjanac et al., 2011; Clarke & Hensen, 2015; Hitchcock & Wong, 2011) จึงทำให้เกิดวิธีการใหม่ที่ถูกใช้เพื่อกำจัดข้อบกพร่องดังกล่าว ของการสร้างแบบจำลองสมรรถนะอาคารและป้อนข้อมูลนำเข้าด้วยระบบมือ คือการใช้งาน ระบบการสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคาร การแปลงข้อมูล และการนำเข้าข้อมูลเข้าสู่ BPS แบบอัตโนมัติ (Automated BPS) วิธีการนี้สามารถลดข้อผิดพลาดในกระบวนการที่ได้กล่าวไปอันเกิดจากความผิดพลาดที่เกิดจากมนุษย์ (Human Error) นอกจากนั้น Automated BPS ยังสนับสนุนให้สามารถนำข้อมูลอาคารและข้อมูลแบบจำลองสมรรถนะอาคารกลับมาใช้ซ้ำได้ผ่านกระบวนการปฏิบัติการร่วม (Interoperability) แบบสนับสนุนการส่งข้อมูลแบบไป-กลับ (Bi-directional Data Exchange) ระหว่างระบบการสร้างแบบจำลองกับระบบ BPS อีกด้วย (O'Donnell et al., 2011)

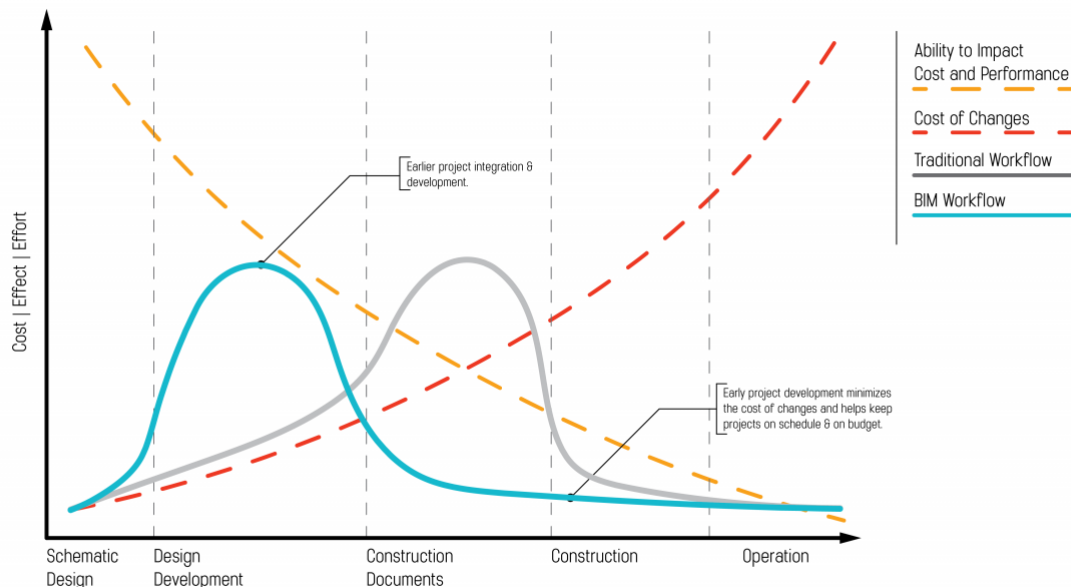
2.2.4 ระบบแบบจำลองสารสนเทศ (Building Information Modeling: BIM)

กว่าทศวรรษที่ผ่านมาอุตสาหกรรมด้านสถาปัตยกรรม วิศวกรรม การก่อสร้างอาคาร และการใช้งานอาคาร (Architecture, Engineering, Construction and Operation: A/E/C/O)ได้นำเทคโนโลยีและกระบวนการ ระบบแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling: BIM) มาใช้ โดย BIM คือ ระบบแบบจำลองสารสนเทศอาคารที่มีความเที่ยงตรงในรูปแบบดิจิทัล อันเป็นตัวแทนอาคารที่จะก่อสร้างในขั้นตอนต่างๆในกระบวนการก่อสร้าง ทั้งทางด้านเรขาคณิตและสารสนเทศของอาคารนั้นๆ ในขั้นตอนออกแบบ ก่อสร้าง แบ่งงวดงาน-งวดเงิน จนถึงขั้นตอนการส่งมอบอาคารโดยแบบจำลองสารสนเทศอาคารนี้สามารถสนับสนุนการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ-ก่อสร้างอาคารได้อย่างถูกต้อง รวมถึงการจัดทำเอกสารแบบก่อสร้างอาคารได้ และ BIM นั้นนับเป็นเทคโนโลยี-เครื่องมือ-กระบวนการที่สำคัญในการสนับสนุนกระบวนการออกแบบบูรณาการ (Integrated Design Processes: IDP) อันจะส่งผลให้เพิ่มคุณภาพของอาคารที่ก่อสร้าง โดยลดต้นทุนและระยะเวลาการก่อสร้างอีกด้วย (Agugiaro, 2016; Eastman et al., 2011; Krygiel & Nies, 2008; Kuo et al., 2016; Kymmell, 2007; Ladenhauf et al., 2016; Somboonwit, Boontore, & Rugwongwan, 2017) ระบบ BIM นั้นมีความสำคัญ คือการส่งผ่าน

ข้อมูลเรขาคณิตอาคารออกไปเพื่อทำงานร่วมกับระบบ BPS เพื่อศึกษาหาทางเลือกในการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานและการใช้พลังงานทดแทน โดยการเชื่อมต่อการทำงานระหว่าง BIM และ BPS มีการส่งผ่านข้อมูลต่อกันเป็นแบบปัจจุบันมีการประมวลผลแบบทันที (Runtime Level) และสามารถส่งผลลัพธ์ด้านสมรรถนะอาคารกลับไปยังระบบ BIM เพื่อแสดงผลลัพธ์ต่อผู้ออกแบบอาคาร เป็นการสนับสนุนการตัดสินใจตั้งแต่ขั้นตอนแรกของกระบวนการออกแบบ ส่งเสริมให้การออกแบบอาคาร โดยเฉพาะ BIPV ให้มีความรวดเร็วและมีความถูกต้องด้านข้อมูลสนับสนุนการสร้างทางเลือก และเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบระบบ PV ให้บรรลุสูงสุด (Optimization) (Ning et al., 2017)

ระบบแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling: BIM) หมายถึง แนวคิด กระบวนการ และเครื่องมือ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างและจัดการ สารสนเทศแบบจำลอง โครงการก่อสร้างอย่างเป็นพลวัต ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ที่ประกอบด้วยแบบจำลอง 3 มิติขององค์ประกอบต่างๆ ของโครงการ ที่มีการเชื่อมโยงสารสนเทศทั้งหมดเข้าด้วยกันตลอดช่วงชีวิตอาคาร และสามารถปฏิบัติการในสารสนเทศร่วมกัน (interoperable) ระหว่างผู้ถือผลประโยชน์ร่วมของโครงการได้อย่างสอดคล้องกัน (coordinated) และสามารถคำนวณได้ (computable) (Kymmell, 2008; Lamb, Reed, และ Khanzode, 2009; Eastman, Teicholz, Sacks, และ Liston, 2011; Aubin, 2012) เมื่ออธิบายอย่างง่าย BIM นั้นหมายถึง การสร้างแบบจำลองอาคารในรูปแบบดิจิทัล โดยมีการบูรณาการการสร้าง การสื่อสาร และการวิเคราะห์แบบจำลองอาคารนั้นๆในกลุ่มของผู้มีส่วนร่วมทั้งข้อมูลกราฟิก (Graphics) ทั้ง 2 และ 3 มิติ เช่น ขนาด สี ระยะ เป็นต้น และข้อมูลที่ไม่ใช่กราฟิก (Non-graphics) เช่น ข้อมูลผู้ผลิต รุ่น ราคา เป็นต้น (Eastman, Teicholz, Sacks, และ Liston, 2011; สมาคมสถาปนิกสยามในพระบรมราชูปถัมภ์, 2558) โดยแบบจำลองสารสนเทศอาคารนั้น จะต้องมีความคุณลักษณะดังต่อไปนี้ (Eastman, Teicholz, Sacks, และ Liston, 2011)

- องค์ประกอบอาคารในแบบจำลองอาคาร (Building Components) นั้นต้องมีภาพการแสดงผลและคุณลักษณะของข้อมูลที่สามารถคำนวณได้ (Computable Graphic and Data Attributes) และในแบบจำลองจะต้องมีกฎที่สามารถคำนวณได้ (Parametric Rules) เพื่อให้สามารถจัดการกับแบบจำลองได้
- องค์ประกอบอาคารในแบบจำลองอาคาร (Building Components) นั้นต้องมีข้อมูลที่สนับสนุนกระบวนการออกแบบและการวิเคราะห์ เช่น ข้อมูลด้านราคา ข้อมูลด้านพลังงาน เป็นต้น
- องค์ประกอบอาคารในแบบจำลองอาคาร (Building Components) นั้นต้องมีข้อมูลดังที่กล่าวไปข้างต้น ที่ต้องมีความสอดคล้องไม่ขัดแย้งแต่ต้องไม่ซ้ำซ้อนกัน (Consistent and Nonredundant)
- ข้อมูลในแบบจำลองอาคารที่ทำงานประสานไปพร้อมกัน (Coordinated Data) นั้นจะต้องถูกนำเสนอในภาพต่างๆ (Views เช่น แพลน รูปด้าน รูปตัด ฯลฯ) อย่างประสานไปพร้อมกันเช่นกัน (Represented in a Coordinated Way)



รูปที่ 2.16 ประโยชน์ของการใช้งาน BIM ในกระบวนการออกแบบบูรณาการ (IDP)
(Stevens Institute of Technology, 2015)

2.2.5 การกำหนดระดับความละเอียดของการพัฒนาแบบจำลองสารสนเทศ (Level of Detail / Level of Development: LOD)

Level of Detail / Level of Development (LOD หรือ LoD) คือ การกำหนดระดับรายละเอียดขององค์ประกอบอาคารและแบบจำลองสารสนเทศอาคาร รวมทั้งข้อมูลสารสนเทศประกอบให้สอดคล้องกับการทำงานในขั้นตอนต่างๆ ในงานออกแบบสถาปัตยกรรม (สมาคมสถาปนิกสยามในพระบรมราชูปถัมภ์, 2558) จุดประสงค์สำคัญที่ทำให้เกิดการกำหนดระดับ LOD คือ (Bedrick J. , 2013)

- เพื่อช่วยให้ผู้มีส่วนร่วมในโครงการ (รวมถึงเจ้าของโครงการ) สามารถกำหนดรายละเอียดของการส่งมอบ BIM (BIM Deliverables) ให้กันและกันในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการออกแบบ-ก่อสร้างอาคารได้
- เพื่อช่วยให้ผู้จัดการกระบวนการออกแบบ สามารถสื่อสารกับคณะผู้ออกแบบเกี่ยวกับสารสนเทศอาคารและรายละเอียดที่ต้องการในกระบวนการออกแบบแต่ละขั้นตอนได้
- เพื่อจัดให้มีมาตรฐานกลางที่สามารถใช้อ้างอิงในกระบวนการทำสัญญาจัดจ้างและการลงมือพัฒนา BIM ของโครงการออกแบบ-ก่อสร้างอาคารนั้นๆ
- โดย LOD สามารถหมายถึงได้ทั้ง Level of Detail หรือ Level of Development จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่ามีการให้คำจำกัดความที่ต่างกันดังที่แสดงใน ตารางที่ 2.2

โดย American Institute of Architecture (AIA) ได้กำหนดความหมายของ LOD (Level of Development) ดังต่อไปนี้ (Van, 2008; American Institute of Architecture (AIA), 2013)

- LOD 100: มีการแสดงถึงองค์ประกอบอาคารเป็นเพียงสัญลักษณ์หรือการอธิบายทั่วไประดับข้อมูล LOD 100 นี้มีเพื่อใช้จัดทำแบบเพื่อการวิเคราะห์แบบร่างเท่านั้นแบบจำลอง (Model) ควรประกอบด้วยก้อนทรงอาคาร (Massing) ในภาพรวมอย่างคร่าวๆและ

ข้อมูลประกอบโครงการต่างๆ เช่น ประเภทของอาคาร ปริมาตร ทิศทางการหันอาคาร เป็นต้น

- LOD 200-400: มีการสร้างองค์ประกอบอาคารให้เป็นวัตถุ(objects) โดยอาจมีการบันทึกข้อมูลที่ไม่ใช่ข้อมูลภาพ (Nongraphic Data) เข้าสู่วัตถุนั้น โดยวัตถุที่เป็นองค์ประกอบอาคารนี้จะต้องมีความถูกต้องของลักษณะทางเรขาคณิต (Accuracy of the geometry) ไม่ว่าจะเป็น ปริมาณ ขนาด รูปทรง การวาง-ติดตั้ง และทิศทาง โดยเฉพาะระดับข้อมูล LOD 400 นั้นถือว่าจะต้องมีความละเอียดของเรขาคณิตและข้อมูลประกอบเทียบเท่า Shop Drawingและในวัตถุอาจมีข้อมูลด้านราคา ด้านผู้ผลิต ฯลฯ บันทึกอยู่ด้วย
- LOD 500: เรขาคณิตของวัตถุองค์ประกอบอาคารนั้นจะต้องถูกตรวจสอบความถูกต้อง วัตถุนั้นๆอาจจะมีการบรรจุข้อมูลด้านการใช้อาคาร (Operation) และการบำรุงรักษาอาคาร (Maintenance) ไว้ด้วยและจะต้องมีความละเอียดของเรขาคณิตและข้อมูลประกอบเทียบเท่า As-built Construction

ตารางที่ 2.2 สรุปความหมาย Level of Detail / Level of Development ในวรรณกรรมต่างๆ (Volk, Stengel, & Schultmann, 2014a, 2014b)

Level of Detail	เรขาคณิตอย่างคร่าว / เรขาคณิตอย่างละเอียด / การขึ้นรูประดับอาคาร / การจัดทำเอกสารก่อสร้าง (Leite, Akcamete, Akinci, Atasoy, & Kizitas, 2011)
	แบบแนวความคิด / เรขาคณิตอย่างคร่าว / เรขาคณิตอย่างละเอียด / การขึ้นรูปอาคาร / เสมือนอาคารสร้างเสร็จ (Bedrick J. , Organizing the development of a building information model, 2008; Bedrick & Aligning, Aligning LOD, LoD and OEM into a project collaboration framework, 2012)
	เสมือนแบบ / เสมือนอาคารสร้างเสร็จ / เสมือนอาคารขณะใช้งาน (Tang, Anil, Akinci, & Huber, 2011; Adan, Xiong, Akinci, & Huber, 2011)
	แบบร่าง / แบบละเอียด / ระดับของการขึ้นรูปอาคาร (Eastman, Teicholz, Sacks, & Liston, 2011)
Level of Development	LOD 100, LOD 200, LOD 300, LOD 400, LOD 500 (American Institute of Architecture (AIA), 2013)

LOD นั้นเป็นเป็นสิ่งที่สะสมเพิ่มขึ้นตามลำดับขั้น(Cumulative) ตัวอย่างเช่น LOD 300 นั้นจะต้องมีลักษณะของความละเอียดข้อมูลที่ครบถ้วนของ LOD 100 และ LOD 200 มาแล้วเป็นต้น และในโครงการก่อสร้างจริงนั้น การกำหนดระดับ LOD ให้เป็นค่าตายตัวในแต่ละขั้นตอนของโครงการนั้นทำได้ยาก ดังนั้นการเปิดกว้างให้วัตถุองค์ประกอบอาคารสามารถมี ระดับ LOD ที่แตกต่างกัน (Variable LODs) ภายในแบบจำลองสารสนเทศ (BIM) ในแต่ละขั้นตอนของโครงการก่อสร้างได้ (Dougherty, 2015) อย่างไรก็ตาม ผู้รับผิดชอบโครงการออกแบบอาคารนั้นจำเป็นต้องกำหนด LOD ในกระบวนการออกแบบแต่ละขั้นตอนให้เหมาะสม เนื่องจาก การเพิ่มระดับรายละเอียดขององค์ประกอบอาคารและแบบจำลองสารสนเทศอาคารขึ้นไป

แต่ละชั้น LOD นั้น จำเป็นต้องใช้เวลาและความพยายามเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 2 เท่า ถึง 11 เท่าตัว (Leite, Akcamete, Akinci, Atasoy, & Kiziltas, 2011)

LEVEL of DEVELOPMENT

LOD 100 LOD 200 LOD 300 LOD 400 LOD 500

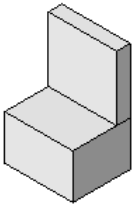
				
Concept (Presentation)	Design Development	Documentation	Construction	Facilities Management
DESCRIPTION: Office Chair Arms, Wheels WIDTH: DEPTH: HEIGHT: MANUFACTURER: Herman Miller, Inc. MODEL: Mirra LOD: 100	DESCRIPTION: Office Chair Arms, Wheels WIDTH: 700 DEPTH: 450 HEIGHT: 1100 MANUFACTURER: Herman Miller, Inc. MODEL: Mirra LOD: 200	DESCRIPTION: Office Chair Arms, Wheels WIDTH: 700 DEPTH: 450 HEIGHT: 1100 MANUFACTURER: Herman Miller, Inc. MODEL: Mirra LOD: 300	DESCRIPTION: Office Chair Arms, Wheels WIDTH: 685 DEPTH: 430 HEIGHT: 1085 MANUFACTURER: Herman Miller, Inc. MODEL: Mirra LOD: 400	DESCRIPTION: Office Chair Arms, Wheels WIDTH: 685 DEPTH: 430 HEIGHT: 1085 MANUFACTURER: Herman Miller, Inc. MODEL: Mirra PURCHASE DATE: 01/02/2013

(Only data in red is useable)

practicalBIM.net © 2013

รูปที่ 2.17 การแสดงตัวอย่างการเพิ่มขึ้นของข้อมูลในระดับ Level of Development ตั้งแต่ LOD100 ถึง LOD500 (สมาคมสถาปนิกสยามในพระบรมราชูปถัมภ์, 2558; McPhee, 2013)

LEVEL of DETAIL

G0	G1	G2	G3
			
Schematic	Concept	Defined	Rendered
DESCRIPTION: Office Chair WIDTH: DEPTH: HEIGHT: MANUFACTURER: MODEL:	DESCRIPTION: Office Chair WIDTH: 700 DEPTH: 450 HEIGHT: 1100 MANUFACTURER: MODEL:	DESCRIPTION: Office Chair Arms, Wheels WIDTH: 700 DEPTH: 450 HEIGHT: 1100 MANUFACTURER: Herman Miller, Inc. MODEL: Mirra	DESCRIPTION: Office Chair Arms, Wheels WIDTH: 700 DEPTH: 450 HEIGHT: 1100 MANUFACTURER: Herman Miller, Inc. MODEL: Mirra

(based on AEC [UK] BIMprotocol v2.0 - Component Grade)

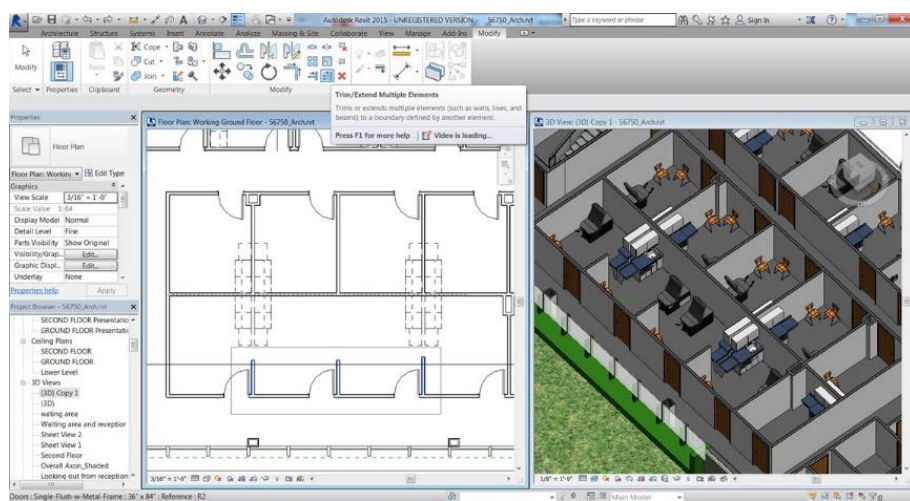
practicalBIM.net © 2013

รูปที่ 2.18 การแสดงตัวอย่างการเพิ่มขึ้นของข้อมูลในระดับ Level of Detail ของแบบจำลองสารสนเทศก่อสร้างตามการแบ่งระดับ AEC (UK) BIM Protocol (McPhee, 2013)

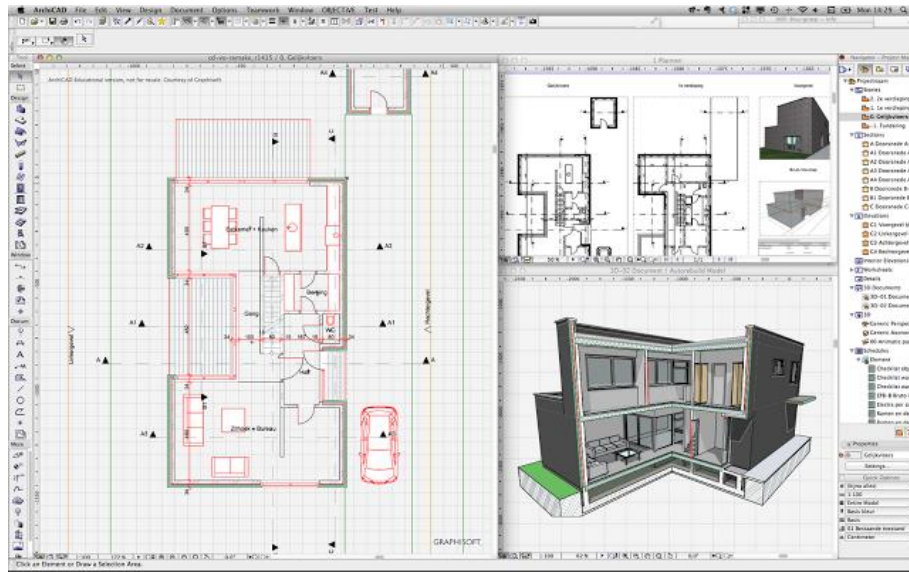
จากรายละเอียดด้าน LOD ดังที่กล่าวไป การวิจัยนี้เลือกพัฒนาแบบจำลองสารสนเทศ (BIM Model) อาคาร BIPV ด้วย LOD300 เพื่อให้แบบจำลองนั้นมีรายละเอียดคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับด้านพลังงาน ครอบคลุม และเลือกพัฒนา BIM Model อาคาร Obstacle ด้วย LOD200 เพื่อลดการใช้พลังงานประมวลผลในกระบวนการจำลองสถานการณ์สมรรถนะอาคารให้ต่ำที่สุด โดยคงคุณสมบัติด้านพลังงานเท่าที่จำเป็น ให้เหมือนกันในขั้นตอนการทดลองด้วยการสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคารทุก Simulations

ปัจจุบันมีระบบ BIM ในรูปแบบซอฟต์แวร์สำเร็จรูปจำหน่ายในท้องตลาดอยู่เป็นจำนวนมาก ได้แก่ Autodesk Revit, Graphisoft ArchiCAD, Nemetschek Vectorwork, Bentley MicroStation เป็นต้น (CAD Addict, 2010; Eastman, Teicholz, Sacks, & Liston, 2011)

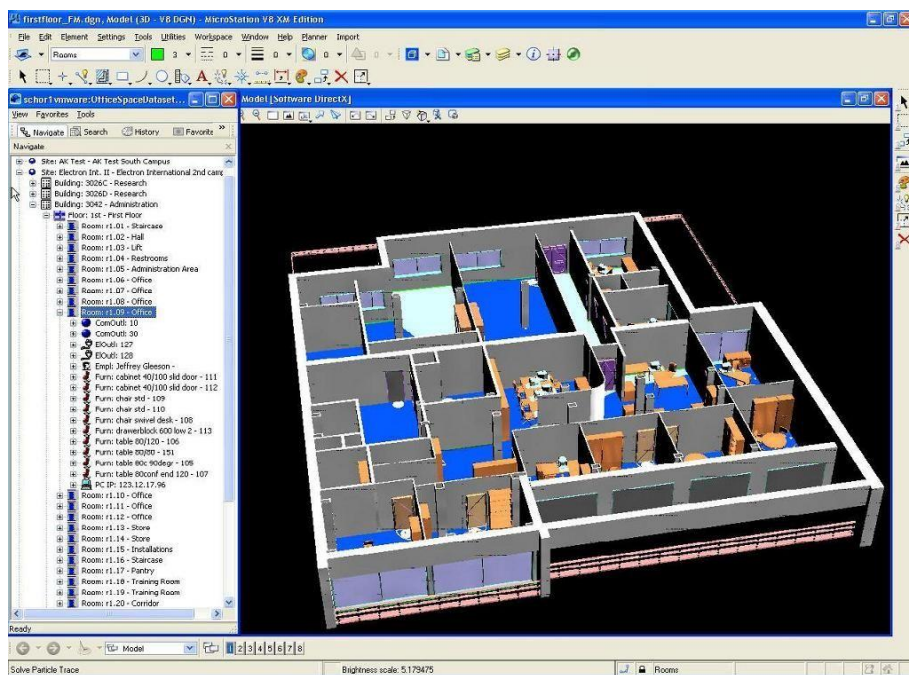
ระบบ BIM ในมุมมองของความเป็นเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการออกแบบนั้นนับว่ามีตัวเลือกที่มีความหลากหลายในท้องตลาด แต่ละโปรแกรมต่างมีข้อเด่นและข้อจำกัดที่แตกต่างกันไป แต่ในความเป็นเครื่องมือของระบบ BIM เหล่านี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อการตอบสนองกระบวนการและระเบียบวิธี (Processes and Methodology) แบบ BIM คือ การมีข้อมูลที่ประสานกัน (Coordinated) ความสอดคล้องของข้อมูล (Consistent) และสามารถคำนวณได้ (Computable) โดยสิ่งสำคัญที่จะทำให้การใช้งานเครื่องมือกระบวนการ และระเบียบวิธีแบบ BIM ให้ประสบความสำเร็จได้ โดยเฉพาะการนำระบบ BIM มาวิเคราะห์สมรรถนะอาคาร นั้นจำเป็นต้องมีองค์ประกอบหลายอย่างอีกมากมายนอกจากการมี Hardware และ Software ตัวอย่างเช่น กระบวนการทำงานแบบ BIM (BIM Workflow) ความเข้าใจถึง การกำหนดระดับความละเอียด / ระดับขั้นในการพัฒนาแบบจำลองสารสนเทศ (Level of Detail / Level of Development: LOD) เป็นต้น (สมาคมสถาปนิกสยามในพระบรมราชูปถัมภ์, 2558; Eastman, Teicholz, Sacks, และ Liston, 2011; Aubin, 2012; Kuo, Hsieh, Guo, และ Chan, 2016)



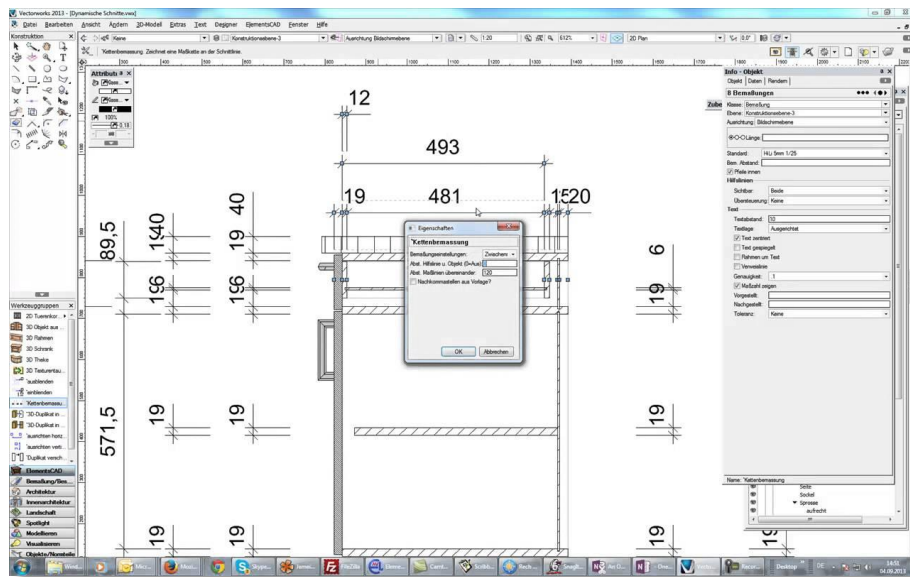
รูปที่ 2.19 ตัวอย่างภาพจากโปรแกรม Autodesk Revit



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างภาพจากโปรแกรม ArchiCAD



รูปที่ 2.21 ตัวอย่างภาพจากโปรแกรม MicroStation



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างภาพจากโปรแกรม Vectorwork

2.2.6 ระบบจำลองสมรรถนะอาคาร และการปฏิบัติการร่วมกับระบบแบบจำลองสารสนเทศ

ตั้งแต่อดีตที่ผ่านมา กระบวนการวิเคราะห์สมรรถนะอาคาร เช่น สมรรถนะด้านพลังงานของอาคาร สมรรถนะด้านการสร้างภาวะน่าสบายแก่ผู้ใช้อาคารด้วยวิธีธรรมชาติ (Passive Design) ฯลฯ นั้นมีความซับซ้อนมีความเสี่ยงต่อความผิดพลาด ใช้เวลาในการวิเคราะห์มาก และจำเป็นต้องใช้ทักษะของผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านในการดำเนินการวิเคราะห์ด้วยการใช้งาน ระบบจำลองสมรรถนะอาคาร (Building Performance Simulation: BPS) แต่ในปัจจุบัน ระบบแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) นั้นสามารถสร้างความสะดวกด้านการวิเคราะห์สมรรถนะอาคารแก่ผู้ออกแบบอาคารได้ดียิ่งกว่าผู้เชี่ยวชาญดังกล่าว โดย BIM มีบทบาทสำคัญในการช่วยเหลือผู้ออกแบบอาคารให้มีความเข้าใจถึงสมรรถนะอาคารที่ตนกำลังออกแบบอยู่ และในการสร้างทางเลือกเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจแก่ผู้ออกแบบอาคาร ได้ตั้งแต่ช่วงแรกของกระบวนการออกแบบ เนื่องจาก BIM สามารถทำให้ขั้นตอนระหว่างการสร้างแบบจำลองอาคารด้านพลังงาน (Energy Model) และการประเมินทางเลือกด้านการออกแบบ (Evaluation Design Decisions) นั้นสั้นลง ด้วยเหตุผลที่องค์ประกอบอาคารใน BIM นั้นประกอบไปด้วยข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะอาคารฝังตัวเป็นหนึ่งเดียวร่วมกับข้อมูลด้านเรขาคณิต เป็นการเอื้อให้สามารถนำข้อมูลอาคารนี้กลับมาทดลองซ้ำ (Iterations) ช่วยให้ออกแบบอาคารทำงานได้สะดวกขึ้นด้วยการแสดงภาพอาคารสามมิติ (Advanced Building Visualization) และสนับสนุนการปฏิบัติการร่วมระหว่างซอฟต์แวร์ (Interoperability) (Dougherty, 2015)

การปฏิบัติการร่วม (Interoperability) คือ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนข้อมูล (The ability to exchange data) ระหว่างระบบหรือโปรแกรม (Applications) เป็นการสนับสนุนให้กระบวนการออกแบบนั้นมีความราบรื่นและอาจทำให้กระบวนการนั้นดำเนินไปได้อย่างอัตโนมัติ (Eastman, Teicholz, Sacks, และ Liston, 2011) ดังที่กล่าวไป ปัจจุบันระบบแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ได้มีความสามารถในการปฏิบัติการร่วม (Interoperability) กับการใช้งานระบบจำลองสมรรถนะอาคาร (BPS) เนื่องจากอุปสรรคสำคัญในการใช้งานระบบ BPS คือ ความซับซ้อนในการป้อนข้อมูลที่มีอยู่มากมายเข้าสู่ระบบ ไม่ว่าจะเป็นข้อมูลเรขาคณิตของอาคาร ข้อมูลคุณสมบัติด้านพลังงานของวัสดุอาคาร ข้อมูลด้านสภาพภูมิอากาศ ข้อมูลด้าน

งานระบบเครื่องกลของอาคาร เป็นต้น ซึ่งข้อมูลทั้งหมดมีปริมาณมากและมีความซับซ้อนสูง ต้องการเวลามากในการป้อนข้อมูลเข้าสู่ระบบ BPS และยังมีความเสี่ยงที่จะเกิดความผิดพลาดอีกด้วยดังนั้นการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการจำลองสมรรถนะอาคาร และการป้อนข้อมูลเข้าสู่ระบบ BPS ด้วยระบบมือ (Manually Transforming Information) นั้นถือว่าเป็นกระบวนการที่ไม่มีมาตรฐานตายตัว (Non-standardized Process) ผู้จำลองสมรรถนะอาคาร (Energy Modeler) แต่ละคนจะมีวิธีการดำเนินการไม่เหมือนกัน และจะได้ผลลัพธ์ที่ไม่เหมือนกันอีกด้วย (Gupta, Cemesova, Hopfe, Rezgui, และ Sweet, 2014) การปฏิบัติการร่วม (Interoperability) ของระบบ BIM และ BPS จึงกำเนิดขึ้นเพื่อกำจัดอุปสรรคสำคัญนี้ เนื่องจากทำให้เกิดกระบวนการที่เป็นมาตรฐาน (Standardized Process) และดำเนินการโดยอัตโนมัติ ซึ่งไม่เพียงเป็นการกำจัดอุปสรรคดังที่ได้กล่าวไปยังทำให้กระบวนการจำลองสมรรถนะอาคารนั้น ปราศจาก การตัดสินใจโดยไม่มีเหตุผล-ผลการเดาสุ่ม (Arbitrary Judgment) ของผู้จำลองสมรรถนะอาคาร (Energy Modeler) อีกด้วย (Bazjanac, และคนอื่นๆ, 2011)

ในอดีต การปฏิบัติการร่วม (Interoperability) นั้นถูกจำกัดอยู่เพียงการแลกเปลี่ยนข้อมูลเรขาคณิต (Geometry) เท่านั้น เช่น ไฟล์รูปแบบ DXF (Drawing eXchange Format) และ IGES (Initial Graphic Exchange Specification) แต่นับจากการสร้างและเผยแพร่มาตรฐานใหม่ของการปฏิบัติการร่วม คือ แบบจำลองข้อมูล (Data Models) ที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อสนับสนุนการสร้างแบบจำลอง ผลิตภัณฑ์ (Product Model) และ วัตถุ (Object Model) เพื่อการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างภาคอุตสาหกรรมการออกแบบ-ก่อสร้างอาคารโดยความพยายามผลักดันของ ISO-STEP International Standards

ในการใช้การปฏิบัติการร่วมนั้น หนึ่งใน แบบจำลองข้อมูลผลิตภัณฑ์ด้านอาคารหลัก (Main Building Product Data Models) ที่ใช้เป็นสื่อกลางในการปฏิบัติการร่วมนั้นได้แก่ International Foundation Classes (IFC) สำหรับการเป็นสื่อกลางเพื่อการวางแผน ออกแบบ ก่อสร้าง และบริหารจัดการโครงการก่อสร้าง โดย โครงสร้างข้อมูล IFC (IFC Schema) นั้นถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการออกแบบบูรณาการ (Integrated Design Process: IDP) ตลอดช่วงชีวิตของอาคาร โดยการผลักดันขององค์กร buildingSmart (เดิมคือ International Alliance for Interoperability: IAI) ตั้งแต่มีการพัฒนาขึ้นมาเมื่อกลางทศวรรษที่ 1990 (Hetherington, Laney, Peake, และ Oldham, 2011; Eastman, Teicholz, Sacks, และ Liston, 2011) แบบจำลอง IFC (IFC Models) นั้นมีความสมบูรณ์ของสารสนเทศอาคารแต่มีความซ้ำซ้อนเป็นอย่างมาก เปิดโอกาสให้นิยามข้อมูลอาคารได้หลากหลายรูปแบบ ทั้งวัตถุอาคาร ความสัมพันธ์ของวัตถุอาคาร และคุณลักษณะของวัตถุอาคาร (Hetherington, Laney, Peake, และ Oldham, 2011)

อีกหนึ่งสื่อกลางของการปฏิบัติการร่วมนั้นคือ โครงสร้างข้อมูล gbXML (Green Building XML Schema) ซึ่งเป็นหนึ่งในมาตรฐานกลางการส่งผ่านข้อมูลของอุตสาหกรรม AEC (Architecture, Engineering, and Construction: AEC Industries) โดย gbXML นั้นเป็นรูปแบบไฟล์ดิจิทัล (File Format) แบบหนึ่งซึ่งเป็นมาตรฐานหลักที่ใช้ส่งผ่านข้อมูลสารสนเทศด้านพลังงานของอาคาร ระหว่างระบบ BIM และระบบ BPS (Hetherington, Laney, Peake, และ Oldham, 2011; Ham และ Golparvar-Fard, 2015) เนื่องจาก gbXML นั้นไม่ได้เป็นเพียงสื่อกลางในการแลกเปลี่ยน ข้อมูลด้านเรขาคณิต (Geometry) ของอาคารเท่านั้น แต่ยังแลกเปลี่ยน ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุอาคารด้านอุณหภาพ (Thermal Properties) เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) และค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ของวัสดุจากระบบ BIM เข้าสู่ระบบ BPS ได้โดยตรง เป็นการลดระยะเวลาและขั้นตอนในการทำงานได้เป็นอย่างมาก เนื่องจากทำให้ไม่จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองอาคารใน BPS ซ้ำ (Model Recreating) (Ham และ Golparvar-Fard, 2015)

มีการศึกษาที่ผ่านมาจำนวนมากที่ได้ระบุถึงปัญหาความไม่สมบูรณ์ของการปฏิบัติการร่วม (Interoperability) ไม่ว่าจะเป็นการปฏิบัติการร่วมระหว่างระบบ BIM กับระบบ BIM (Howell & Batcheler, 2005; Olofsson, Lee, & Eastman, 2008; Coates, et al., 2010; Eastman, Teicholz, Sacks, & Liston, 2011) และระหว่างระบบ BIM กับระบบ BPS (Maile, Fischer, & Bazjanac, 2007; Bazjanac, et al., 2011; Hitchcock & Wong, 2011; O'Donnell, et al., 2011; Moon, Choi, Kim, & Ryu, 2011; Somboonwit, 2011; Somboonwit & Sahachaisaeree, 2012; Somboonwit, Boontore, & Rugwongwan, 2017) ซึ่งพบว่ากระบวนการ Interoperability ดังกล่าวนั้นผู้พัฒนาระบบ BIM และระบบ BPS มุ่งเน้นพัฒนาให้เป็นกระบวนการแบบกล่องดำ (Black-box Approach) อันเป็นกระบวนการที่ผู้ใช้งานระบบไม่สามารถรับรู้ความถูกต้องของการเปลี่ยนรูปแบบข้อมูลในกระบวนการนั้นๆ ได้ (Crawley, 2015) อันเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้ผู้ใช้งานระบบ BIM และระบบ BPS ต้องมีความตระหนักถึงและมีกระบวนการตรวจสอบความถูกต้องของกระบวนการปฏิบัติการร่วมเพื่อสร้างและดำเนินการตามแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุด (Best Practices) เนื่องจากปัญหาดังกล่าวไม่ได้มีแนวทางป้องกันแนวทางอื่นแต่ประการใด

การปฏิบัติการร่วม (Interoperability) นั้นเป็นกระบวนการและกลไกสำคัญที่ทำให้กระบวนการจำลองสมรรถนะอาคารแบบอัตโนมัติ (Automated BPS) ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ใช้งาน แต่พบว่ากระบวนการนี้ยังพบข้อบกพร่องดังที่กล่าวไปข้างต้น โดยผู้ใช้งานระบบ BIM และระบบ BPS เพื่อดำเนินการ Automated BPS ที่มีกระบวนการ Interoperability แบบเป็นกระบวนการแบบกล่องดำ (Black-box Approach) (Bazjanac et al., 2011; Somboonwit et al., 2017) นั้น จำเป็นต้องดำเนินการตามแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุด (Best Practices) เพื่อให้เกิดความถูกต้องเที่ยงตรงสูงสุดของผลลัพธ์ของการจำลองสมรรถนะอาคาร

หนังสืออ้างอิง

- Agugiaro, G. (2016). Energy planning tools and CityGML-based 3D virtual city models: experiences from Trento (Italy). *Applied Geomatics*, 8(1), 41–56.
<https://doi.org/10.1007/s12518-015-0163-2>
- Aksoy, U. T., & Inalli, M. (2006). Impacts of some building passive design parameters on heating demand for a cold region. *Building and Environment*, 41(12), 1742–1754.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.011>
- Aroonrat, K., & Wongwises, S. (2015). Current status and potential of hydro energy in Thailand: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46, 70–78.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.010>
- Aslam Bhutta, M. M., Hayat, N., Farooq, A. U., Ali, Z., Jamil, S. R., & Hussain, Z. (2012). Vertical axis wind turbine – A review of various configurations and design techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 1926–1939.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.12.004>
- Attia, S. (2016). Towards regenerative and positive impact architecture: A comparison of two net zero energy buildings. *Sustainable Cities and Society*, 26, 393–406.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.04.017>

- Bazjanac, V., Maile, T., Rose, C., O'Donnell, J. T., Morrissey, E., & Welle, B. R. (2011). AN ASSESSMENT OF THE USE OF BUILDING ENERGY PERFORMANCE SIMULATION IN EARLY DESIGN. In *Proceeding of Building Simulation 2011* (pp. 1579–1585). Sydney, Australia: International Building Performance Simulation Association.
- Biyik, E., Araz, M., Hepbasli, A., Shahrestani, M., Yao, R., Shao, L., ... Atli, Y. B. (2017). A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(3), 833–858.
<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2017.01.009>
- Botkin, D. B., & Keller, E. A. (2011). *Environmental Science: Earth as a Living Planet* (8 edition). Hoboken, NJ: Wiley.
- Celik, B., Karatepe, E., Gokmen, N., & Silvestre, S. (2013). A virtual reality study of surrounding obstacles on BIPV systems for estimation of long-term performance of partially shaded PV arrays. *Renewable Energy*, 60, 402–414.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.05.040>
- Celik, B., Karatepe, E., Silvestre, S., Gokmen, N., & Chouder, A. (2015). Analysis of spatial fixed PV arrays configurations to maximize energy harvesting in BIPV applications. *Renewable Energy*, 75, 534–540. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.041>
- Chingulpitak, S., & Wongwises, S. (2014). Critical review of the current status of wind energy in Thailand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 312–318.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.038>
- Clarke, J. A., & Hensen, J. L. M. (2015). Integrated building performance simulation: Progress, prospects and requirements. *Building and Environment*, 91, 294–306.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.002>
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. John Wiley & Sons.
- Elasfour, A. S., Maraqa, R., & Tabbalat, R. (1991). Shading control by neighbouring buildings: application to buildings in Amman, Jordan. *International Journal of Refrigeration*, 14(2), 112–116. [https://doi.org/10.1016/0140-7007\(91\)90083-S](https://doi.org/10.1016/0140-7007(91)90083-S)
- Fournier, C., & Wirz-Justice, A. (2010). Light, Health and Wellbeing: Implications from chronobiology for architectural design. *World Health Design: Architecture, Culture, Technology*, 3, 44–49.
- Givoni, B. (1994). *Passive Low Energy Cooling of Buildings*. John Wiley & Sons.
- Hansen, H. T. R., & Knudstrup, M.-A. (2005). The Integrated Design Process (IDP) - a more holistic approach to sustainable architecture. Retrieved September 17, 2018, from <https://www.irb.fraunhofer.de/CIBlibrary/search-quick-result-list.jsp?A&idSuche=CIB+DC3523>

- Hitchcock, R. J., & Wong, J. (2011). TRANSFORMING IFC ARCHITECTURAL VIEW BIMS FOR ENERGY SIMULATION: 2011. In *Proceeding of Building Simulation 2011* (pp. 1089–1095). Sydney, Australia: International Building Performance Simulation Association.
- Ionescu, C., Baracu, T., Vlad, G.-E., Necula, H., & Badea, A. (2015). The historical evolution of the energy efficient buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 243–253. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.062>
- Jelle, B. P., & Breivik, C. (2012). State-of-the-art Building Integrated Photovoltaics. *Energy Procedia*, 20, 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.03.009>
- Kanters, J., & Wall, M. (2014). The impact of urban design decisions on net zero energy solar buildings in Sweden. *Urban, Planning and Transport Research*, 2(1), 312–332. <https://doi.org/10.1080/21650020.2014.939297>
- Krygiel, E., & Nies, B. (2008). *Green BIM: Successful Sustainable Design with Building Information Modeling*. Alameda, CA, USA: SYBEX Inc.
- Kuo, H.-J., Hsieh, S.-H., Guo, R.-C., & Chan, C.-C. (2016). A verification study for energy analysis of BIPV buildings with BIM. *Energy and Buildings*, 130, 676–691. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.048>
- Kymmell, W. (2007). *Building Information Modeling: Planning and Managing Construction Projects with 4D CAD and Simulations (McGraw-Hill Construction Series): Planning and Managing Construction Projects with 4D CAD and Simulations*. McGraw Hill Professional.
- Ladenhauf, D., Battisti, K., Berndt, R., Eggeling, E., Fellner, D. W., Gratzl-Michlmair, M., & Ullrich, T. (2016). Computational geometry in the context of building information modeling. *Energy and Buildings*, 115, 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.056>
- Lau, P. (2015). Building Integrated Photovoltaics in Hawaii: Testing Three Façade Schemes for Tropical Retrofit. Retrieved from <http://scholarspace.manoa.hawaii.edu/handle/10125/45602>
- Leite, F., Akcamete, A., Akinci, B., Atasoy, G., & Kiziltas, S. (2011). Analysis of modeling effort and impact of different levels of detail in building information models. *Automation in Construction*, 20(5), 601–609. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.11.027>
- Maehlum, M. (2018). Which Solar Panel Type is Best? Mono-, Polycrystalline or Thin Film? Retrieved September 14, 2018, from <http://energyinformative.org/best-solar-panel-monocrystalline-polycrystalline-thin-film/>
- Masa-Bote, D., & Caamaño-Martín, E. (2014). Methodology for estimating building integrated photovoltaics electricity production under shadowing conditions and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 492–500. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.019>

- National Center for Photovoltaics. (2018, July 17). Research Cell Efficiency Records. Retrieved September 14, 2018, from <https://www.nrel.gov/pv/national-center-for-photovoltaics.html>
- Ning, G., Junnan, L., Yansong, D., Zhifeng, Q., Qingshan, J., Weihua, G., & Geert, D. (2017). BIM-based PV system optimization and deployment. *Energy and Buildings*, 150, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.082>
- O'Donnell, J., See, R., Rose, C., Maile, T., Bazjanac, V., & Haves, P. (2011). SIMMODEL: A DOMAIN DATA MODEL FOR WHOLE BUILDING ENERGY SIMULATION. In *Proceeding of Building Simulation 2011* (pp. 382–389). Sydney, Australia.
- Pacheco, R., Ordóñez, J., & Martínez, G. (2012). Energy efficient design of building: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3559–3573. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045>
- Parida, B., Iniyar, S., & Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1625–1636. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.032>
- Peng, C. (2016). Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling. *Journal of Cleaner Production*, 112, 453–465. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.078>
- Prasertsan, S., & Sajjakulnukit, B. (2006). Biomass and biogas energy in Thailand: Potential, opportunity and barriers. *Renewable Energy*, 31(5), 599–610. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.08.005>
- Roche, P. M. L. (2017). *Carbon-Neutral Architectural Design, Second Edition*. CRC Press.
- Sajuh, N. (2015, March 16). Green Power: Homemade vertical wind turbine design. Retrieved September 14, 2018, from <http://buildalternatif.blogspot.com/2015/03/homemade-vertical-wind-turbine-design.html>
- Sheppard, M. C., & Socolow, R. H. (2007). Sustaining fossil fuel use in a carbon-constrained world by rapid commercialization of carbon capture and sequestration. *AIChE Journal*, 53(12), 3022–3028. <https://doi.org/10.1002/aic.11356>
- Shukla, A. K., Sudhakar, K., & Baredar, P. (2017). Recent advancement in BIPV product technologies: A review. *Energy and Buildings*, 140, 188–195. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.015>
- Smith, J., Forsyth, T., Sinclair, K., & Oteri, F. (2012). Built-Environment Wind Turbine Roadmap. *Renewable Energy*, 58.
- Smith, K. (2007). *The Carbon Neutral Myth: Offset Indulgences for Your Climate Sins*. Transnationals Information Exchange.
- Somboonwit, N., Boontore, A., & Rugwongwan, Y. (2017). Obstacles to the Automation of Building Performance Simulation: Adaptive Building Integrated Photovoltaic (BIPV)

- design. *Environment-Behaviour Proceedings Journal*, 2(5), 343–354.
<https://doi.org/10.21834/e-bpj.v2i5.619>
- Strong, S. (2016, October 19). Building Integrated Photovoltaics (BIPV) | WBDG Whole Building Design Guide. Retrieved September 14, 2018, from
<https://www.wbdg.org/resources/building-integrated-photovoltaics-bipv>
- Torcellini, P., Pless, S., & Deru, M. (2006). Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition; Preprint, 15.
- U.S. Department of Energy Federal Energy Management Program (FEMP). (2016, September 15). Biomass for Electricity Generation | WBDG Whole Building Design Guide. Retrieved September 14, 2018, from <https://www.wbdg.org/resources/biomass-electricity-generation>
- U.S. Geological Survey. (2018). Hydroelectric Power: How it works, USGS Water-Science School. Retrieved September 14, 2018, from
<https://water.usgs.gov/edu/hyhowworks.html>
- Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014a). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109–127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>
- Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014b). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109–127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>
- White, S. (2015). Solar Photovoltaic Basics: A Study Guide for the NABCEP Entry Level Exam: Sean White: 9780415713351: Amazon.com: Books. Retrieved September 14, 2018, from <https://www.amazon.com/Solar-Photovoltaic-Basics-Study-NABCEP/dp/0415713358>
- Yang, R. J. (2015). Overcoming technical barriers and risks in the application of building integrated photovoltaics (BIPV): hardware and software strategies. *Automation in Construction*, 51, 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.12.005>
- Yao, R. (Ed.). (2013). *Design and Management of Sustainable Built Environments* (2013 edition). Springer.
- Yoo, S.-H. (2011). Simulation for an optimal application of BIPV through parameter variation. *Solar Energy*, 85(7), 1291–1301. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.03.004>
- Zimmerman, A., & Eng, P. (2006). Integrated Design Process Guide, 18.
- องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2555). อภิธานศัพท์และคำย่อด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก ปี 2555. Retrieved February 6, 2018, from http://www.tgo.or.th/2015/thai/download_detail.php?id=47

ภาคผนวก

- ภาคผนวก ก บทคัดย่อแบบยาวรายงานการวิจัย เพื่อการเข้าร่วมการประชุมวิชาการ Passive and Low Energy Architecture 2018 ณ ประเทศฮ่องกง
- ภาคผนวก ข รายงานการวิจัยฉบับเต็ม ที่ได้รับการคัดเลือกเข้าร่วมการประชุมวิชาการ Passive and Low Energy Architecture 2018 ณ ประเทศฮ่องกง
- ภาคผนวก ค คำสั่งแต่งตั้งคณะทำงาน



Nuttasit Somboonwit <nuttasit.somboonwit@gmail.com>

PLEA 2018 - Extended Abstract Result Announcement

1 message

PLEA 2018 Secretariat <plea2018@conftool.com>

Thu, Mar 15, 2018 at 1:54 PM

Reply-To: reg@plea2018.org

To: nuttasit.somboonwit@gmail.com

Cc: don.nuttasit@gmail.com, ultra_mon@hotmail.com

Dear Dr. Nuttasit Somboonwit,

Congratulations, your extended abstract "Automated Simulation of Building-surrounded Obstacle Parameter to Support Public Healthcare Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Layout Planning in Thailand" has been accepted for PLEA 2018 being held on 10-12 December 2018 in Hong Kong.

CONTRIBUTION DETAILS

ID: 503

Title: Automated Simulation of Building-surrounded Obstacle Parameter to Support Public Healthcare Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Layout Planning in Thailand

REVIEW RESULT OF THE PROGRAMME COMMITTEE:

Extended Abstract Accepted as 6-pg Long Paper

Your extended abstract was accepted for long paper. Please submit your 6-page long paper on or before 1 Jun 2018.

OVERVIEW OF REVIEWS

Review 1

=====

Comments for the Authors

Methodology should be expanded; give a step by step clarification. Names of software should be mentioned.

Figure 1 is not clear.

Repetitions should be deleted from the text

Review 2

=====

Comments for the Authors

1. The Introduction section could exclude some of the general knowledge type facts such as the

second sentence.

2. The first paragraph of Section 2 could be merged with the Introduction section.

3. The second paragraph of Section 2 should be labeled as Scope & Objective of the Study”

4. Figure 1 is beyond comprehension and needs to be replaced by an image with much higher resolution.

5. The Methodology section is well written however, the name of the “cloud based building performance analysis tool” needs to be mentioned.

6. Results section needs to be reinforced with graphs. The mentioned distinction among the nature of the curves could be easily comprehended if graphs were included.

7. The Conclusion section needs to be rewritten. After giving enough effort, this reviewer understood the following: effect of Obstacle Orientation is high if Obstacle Distance is low. The section mentions how some specific values of Obstacle Distance effects PV productivity. Reader would like to know which Obstacle Orientation has significant effect on PV productivity as well. The Conclusion section only talked about the “third group” of Obstacle Orientation but it is not enough.

Please prepare and submit your full paper via ConfTool system at www.conftool.com/plea2018 **by 1 June 2018 (HK local time)**. Paper submission templates and further submission instructions are available at www.plea2018.org.

Thank you very much and we look forward to receiving the full paper.

With best regards,

Your PLEA 2018 organiser

--

PLEA 2018 Secretariat

Conference website: www.plea2018.org

Enquiry: reg@plea2018.org

Automated Simulation of Building-surrounded Obstacle Parameter to Support Public Healthcare Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Layout Planning in Thailand

Double-blind review process

Do not include authors in the body text at this time

1. INTRODUCTION

The potential for solar energy to make a significant contribution to global electricity demand has been widely recognized and solar photovoltaic (PV) is considered as a major contributor to solar energy supply. Photovoltaic systems harnesses solar energy in a form of clean electricity production, which is easy to install in an urban and off-grid environment. Building integrated photovoltaics (BIPVs) are solar PV materials that replace conventional building materials in parts of the building envelopes, such as the rooftop or walls that serve as building envelope material and generate power for the building simultaneously. Additionally, the BIPV technology also reduces the total building and mounting cost as BIPV panels serve as building components [1-3]. A BIPV system directly converts sunlight into electricity so it is sensitively affected with the change in the intensity of solar radiation. These fluctuations cause discrepancies between demand and supply and reduce the power quality [4]. One of the most challenging issues concerning BIPV applications is partial shading effects (PSE) on PV modules due to the surrounding obstacles. PSE plays an important role in the efficiency of PV systems by their complex, non-uniform and dynamic conditions, especially when the PV system is located in a dense urban environment [5,6]

2. PARTIAL SHADING EFFECTS (PSE)

PSE is an unavoidable condition in BIPV systems, and it can be seen from Figure 1 that such effect is principally influenced by two groups of parameters—1) PV surface geometries and 2) surrounding obstacle. Numerous studies have examined the parameter of PV surface geometries while the investigations of the parameter of surrounding obstacles are still scanty.

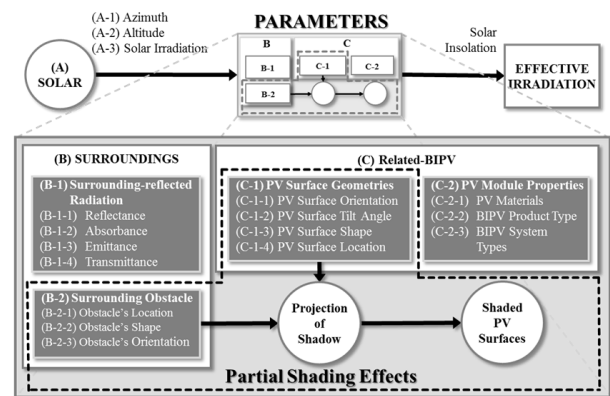


Figure 1: Relationship among parameters of partial shading effects influencing solar insolation of PV surfaces.

Consequently, this study focuses on the parameter of surrounding obstacle determining the projection of shadow on PV surfaces. The shadow projected on BIPV obtained as shaded PV surfaces is determined in terms of the solar azimuth, altitude angles and surrounding obstacle's location and obstacle's orientation. Obstacle's location is assumed to be composed of point particles (three-dimensional coordinates) which reflects its interaction with a BIPV, i.e., through the proxy of distance between two buildings—Obstacle's Distance. Obstacle's Orientation refers to both the direction that BIPV faces towards and the location of building obstacle in relationship with the BIPV in terms of compass direction. Therefore, this leads to the research question of how the distance between building obstacle and BIPV, the orientation of BIPV and the orientation between building obstacle and BIPV affect the potential to generate power of a BIPV. This study aims to explore the comparative effects between Obstacle's Distance and Obstacle's Orientation parameters that cause PSE

and influence the potential solar power generation of a building integrated photovoltaic (BIPV) system.

3. METHODOLOGY

An automatic collaboration between a Building Information Modelling (BIM) software and a cloud-based building performance analysis tool were used to simulate the annual cumulative insolation obtained from rooftop BIPV surfaces of 16 different orientations and 43 different distances between the BIPV and building obstacles. The case study buildings are two public healthcare buildings; an outpatient department (OPD) has been chosen to be BIPV and a ward building has been chosen to be obstacle, both buildings are widely established throughout Thailand. The case study carried out 688 simulations of annual cumulative insolation on the PV surfaces.

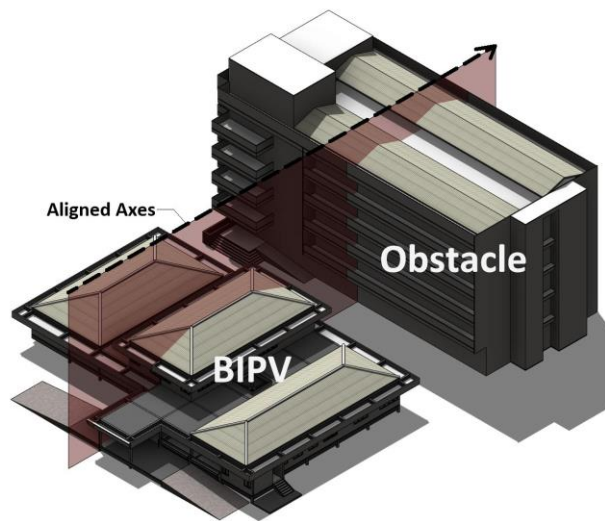


Figure 2: An illustration of BIPV, obstacle and the aligned axes.

4. RESULTS

The simulation results of all 16 Obstacle's Orientation shared just one thing in common; their curves are logarithmic shaped with periods of rapid increase at first, followed by periods where the gains increase slowly then reach the plateaus at their farthest distances. Using slope of curves calculation and analysis, there is a distinctive difference to separate the 16 curves into three groups: the 1st group consist of almost-linear curves which are curves that started at the highest annual cumulative insolation and increases at very slow rate while the distance is increasing, the 2nd group consist of curves that started at slightly lower annual cumulative insolation than the 1st group but increase at a faster rate while the distance is increasing, and the 3rd group that start at lower annual cumulative insolation than both the 1st and 2nd group but increase at much faster rate than both groups.

5. CONCLUSION

This study found that the Obstacle's Orientation Parameter immensely affected solar insolation on the BIPV, especially the near distances of Obstacle's Distance Parameter. The effects of the Obstacle's Orientation deteriorated when the Obstacle's Distance exceeded 17.00 meters. On the other hand, the Obstacle's Distance affected the solar insolation on the BIPV in just some Obstacle's Orientation, especially, the 3rd group. The effects of the Obstacle's Distance also deteriorated when the Obstacle's Distance exceeded 27.00 meters. The findings of this study also support decision making for BIPV designers and planners to select which the BIPV and the obstacle placement is highly effective, and which one is encountering a problem and its solution. The proposed methodology is based on the simulated annual cumulative insolation obtained from rooftop PV surfaces through an automatic collaboration of a BIM software and a cloud-based building performance analysis tool. BIM models of the two case study buildings have been built at different LODs (Level of Development) to provide a suitable level of details and functionalities while maintaining the simplicity of computational processes. The BIM-based automated simulations have been substantiated its usability that removed the deficiencies; time-consuming, cumbersome and error-prone of the non-automated processes.

REFERENCES

1. Shukla, A. K., Sudhakar, K., & Baredar, P. (2016). A comprehensive review on design of building integrated photovoltaic system. *Energy and Building*, 128, 99-110. doi:DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.06.077.
2. Hong, T., Lee, M., Koo, C., Jeong, K., & Kim, J. (2017, May 15). Development of method for estimating the rooftop solar photovoltaic (PV) potential by analyzing the available rooftop area using Hillshade analysis. *Applied Energy*, 194, 320-332. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.001.
3. Tripathy, M., Yadav, S., Sadhu, P., & Panda, S. (2017, April). Determination of optimum tilt angle and accurate insolation of BIPV panel influenced by adverse effect of shadow. *Renewable Energy*, 104, 211-223. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.034.
4. Ekici, B. B. (2014). A least squares support vector machine model for prediction of the next day solar insolation for effective use of PV systems. *Measurement*, 50, 255-262. doi:https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.01.010.
5. Masa-bote, D., & Caamaño-Martín, E. (2014). Methodology for estimating building integrated photovoltaics. *Renewable and Sustainable Energy*, 492-500. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.019.
6. Celik, B., Karatepe, E., Silvestre, S., Gokman, N., & Chouder, A. (2015, March). Analysis of spatial fixed PV arrays configurations to maximize energy harvesting in BIPV applications. *Renewable Energy*, 75, 534-540. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.041



Nuttasit Somboonwit <nuttasit.somboonwit@gmail.com>

PLEA 2018 - Announcement of Presentation Result

1 message

PLEA 2018 Secretariat <plea2018@conftool.com>

Mon, Sep 3, 2018 at 6:41 PM

Reply-To: reg@plea2018.org

To: nuttasit.somboonwit@gmail.com

Cc: don.nuttasit@gmail.com

Dear Nuttasit Somboonwit,

Congratulations. Your paper "Partial Shading Effects of Surrounding Obstacle Parameters on Building Integrated Photovoltaic (BIPV) System Efficiency in Thailand" has been accepted for PLEA 2018 being held on 10-12 December 2018 in Hong Kong.

CONTRIBUTION DETAILS

Paper ID: 1503

Title: Partial Shading Effects of Surrounding Obstacle Parameters on Building Integrated Photovoltaic (BIPV) System Efficiency in Thailand

Authors: Somboonwit, Nuttasit; Boontore, Amon

Presenting Author:

PRESENTATION RESULT

Long Paper Accepted for 15-min Oral Presentation

Your long paper has been accepted for a 15-min long presentation (12-minute presentation followed by 3-min Q&A).

Please check the above contribution details carefully, as all conference materials will be printed with this information. If there is any correction, please inform us as soon as possible by email to reg@plea2018.org.

At least one author of each accepted paper (short/long paper) to be presented and included in the proceedings must register to the conference (i.e. each paper requires a registration to be included).

TIME TO REGISTER FOR PLEA 2018

Conference registration opens **from 3 Sept to 17 Nov 2018 (Hong Kong local time)**. You are strongly encouraged to register as soon as possible to guarantee a place before 30 September to enjoy the early bird registration rate! For further registration details, please refer to the registration page on our conference website (www.plea2018.org).

An official invitation letter is now available for download in ConfTool system. If you need a letter for visa purposes, please contact PLEA 2018 Secretariat at reg@plea2018.org. Please book your accommodation as soon as possible, to ensure both reasonable prices and availability at the peak season in Hong Kong. Hotel rooms with conference rates are already available on conference website.

Please note that this acceptance letter is being sent to the submitting author. We kindly ask you to notify the presenting author and other co-author(s) of this paper acceptance if necessary. If you have changes to your contact information, or if you are unable to present at the conference, please inform us immediately. A formal letter with the date and time of your presentation as well as other logistic information will be sent to the presenting author in time prior to the conference.

If you have any queries, please do not hesitate to contact PLEA 2018 Secretariat at reg@plea2018.org.

We look forward to seeing you in Hong Kong!

With best regards,
PLEA 2018 Organiser

--

PLEA 2018 Secretariat
Conference website: www.plea2018.org
Enquiry: reg@plea2018.org

Partial Shading Effects of Surrounding Obstacle Parameters on Building Integrated Photovoltaic (BIPV) System Efficiency in Thailand

Double-blind review process

Do not include authors in the body text at this time

ABSTRACT: *This study aims to explore the comparative effects between Obstacle's Distance and Obstacle's Orientation parameters that cause partial shading effect (PSE) and influence the potential solar power generation of a building integrated photovoltaic (BIPV) system. An automatic collaboration between Building Information Modelling (BIM) software and a cloud-based building performance analysis tool were used to simulate the annual cumulative insolation obtained from rooftop BIPV surfaces of sixteen different Obstacle's Orientations and forty-three different distances between the BIPV and building obstacles—Obstacle's Distance. The case study are two axis-aligned public healthcare buildings; an outpatient department (OPD) building and a ward building that are widely established throughout Thailand. This study also explores the notion that Obstacle's Orientation and Obstacle's Distance of a surrounding obstacle are both important parameters that influence the annual cumulative insolation of PV surfaces but in the different contexts. The findings of this study also support decision making for BIPV designers and planners to select which the BIPV and the obstacle placement is highly effective, especially BIPV application on lower-rise buildings in dense urban environments, such as healthcare facilities.*

KEYWORDS: *Surrounding Obstacle, Partial Shading Effect, Building Integrated Photovoltaic, Obstacle's Orientation, Obstacle's Distance*

1. INTRODUCTION OF THE PROBLEM: PARTIAL SHADING EFFECTS (PSE)

The potential for solar energy to make a significant contribution to global electricity demand has been widely recognized and solar photovoltaic (PV) is considered as a major contributor to solar energy supply [1-2]. A Building integrated photovoltaic (BIPV) system directly converts sunlight into electricity so it is sensitively affected with the change in the intensity of solar radiation. These fluctuations cause discrepancies between demand and supply and reduce the power quality [1].

Environmental and surrounding factors, namely surrounding-reflected radiation and shading effects of the environmental obstacles significantly affect PV system performance [3-4]. Practically, BIPV performance estimation is significantly affected by partial shading effect (PSE) on PV modules due to the surrounding obstacles including surrounding buildings, trees, the BIPV itself and so on. Partial shading plays an important role in the efficiency of PV systems by their complex, non-uniform and dynamic conditions, especially when the PV system is located in a dense urban environment. Partially shaded PV modules receive less solar radiation than the unshaded PV modules and partial-shading effects

may cause irreversible damage to the module due to the hot spot effect [5-8].

1.1 Components of Partial Shading Effects

There are three main conceptual parameters of the shadow that project on a PV surface which are including solar properties, surroundings, and related-BIPV [3,5-6]. The parameter of solar properties includes the sun altitude, azimuth angle, and solar irradiation [9]. The parameter of surroundings consists of two subcategories; the parameter of surrounding-reflected radiation and surrounding obstacle. The parameter of surrounding-reflected radiation includes reflectance, absorptance, emittance and transmittance, while the parameter of a surrounding obstacle comprises of obstacle's location, obstacle's shape, and obstacle's orientation. The surrounding obstacles block and eliminate the beam element of the solar radiation from fully hitting on a PV surface.

The parameter of related-BIPV consists of two subcategories: the parameter of a PV surface geometry includes PV surface orientation, PV surface tilt angle, PV surface shape, and PV surface location. The parameter of PV module properties comprises of PV materials, BIPV product type, and BIPV system type [10].

The projection of shadow on PV modules directly determines the shaded PV surfaces. The shift of projected shadow significantly changes the level of received solar irradiation of the associated PV surfaces [11]. The impacts of PSE on the potential of power generation of a PV system can be calculated using the parameters of solar properties, surrounding and PV modules. The result is the effective irradiance over a time period called the solar insolation over PV surfaces.

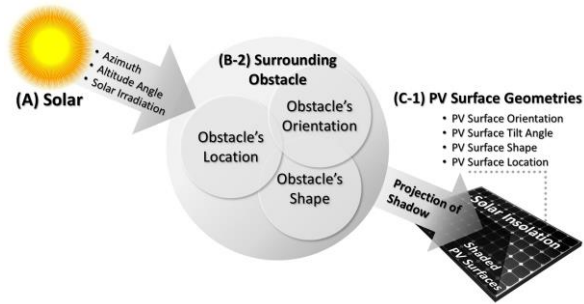


Figure 1: Parameters related to partial shading effects.

1.2 Scope and Objective of the Study

It can be seen from Figure 1 that such effect is principally influenced by two groups of parameters: surrounding obstacle and PV surface geometries. Numerous studies have examined the parameter of PV surface geometries while the investigations of the parameter of surrounding obstacles are still meager [12]. When considering surrounding obstacles, they are normally also not available for major alteration of their shape due to their variety of functions and aesthetic reason, not to mention the case that such building is not under the BIPV owner's authority.

The projected shadow on BIPV obtained as shaded PV surfaces is determined in terms of the solar azimuth, altitude angles and surrounding obstacle's location and orientation that dynamically change all the time during day. Obstacle's location is assumed to be composed of point particles (three-dimensional coordinates) interacting with a BIPV, i.e., through the proxy of distance between two buildings—Obstacle's Distance. Besides, Obstacle's Orientation refers to both the direction that BIPV faces towards and the location of building obstacle in relationship with the BIPV in terms of compass direction.

Therefore, this leads to the research question: of how the distance between building obstacle and BIPV, the orientation of BIPV and the orientation between building obstacle and BIPV affect the potential to generate power of a BIPV. The conceptual framework of the study can be established and illustrated in Figure 2. This study aims to explore the comparative effects between Obstacle's Distance and Obstacle's Orientation parameters that cause PSE and influence the

potential solar power generation of a building integrated photovoltaic (BIPV) system.

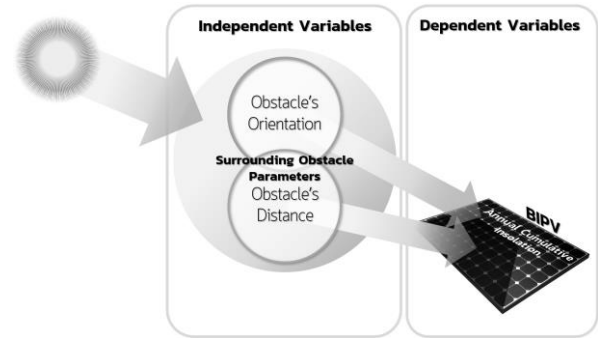


Figure 2: Conceptual framework of the study.

1.3 BIM and Automated Simulation of PSE

An intelligent approach to better deal with deficiencies in manual Building Performance Simulation (BPS), from the time-consuming, cumbersome and error-prone of manual data generation and use of improvised defined data that may invalidate the results, is the automation of BPS input data acquisition and transformation, it has been a goal of the buildings industry for decades [13–15]. Reuse of existing data by interoperable processes would significantly reduce the time and overhead associated with the creation of simulation models [14,16]. An interoperable, intelligent and object-oriented simulation model would enable bi-directional data exchange with a Building Information Modelling (BIM) authoring applications, reuse of geometric and other data from different models significantly reduces the overhead associated with the definition of input data and has the potential to eliminate error-prone manual processes [11,16].

With the growing adoption of Building Information Modeling (BIM) in the Architecture, Engineering, Construction, and Operations (AECO) industries. A BIM is an extensible approach to virtual design and construction involving the generation and management of digital representations of physical and functional characteristics of a facility which creates and uses the coordinated, consistent, and computable information of the 3D models of the project components interconnect with the holistic information that conceived as a source of shared knowledge to support decision-making, through the life cycle of the building [17–22]. The integration of a BIM and a BPS tools is fundamentally transforming building design into a faster, performance-aware and more flexible process, which eases the production of multiple design alternatives that provide model foundations for BIPV design optimization [11,23]. Furthermore, many buildings have already been modelled with BIM authoring tools, in which the features of most building components, e.g. shape,

size, materials, locations as well as building's environment, have been accurately described [11].

2. METHODOLOGY

The research approach is through an automatic collaboration of a BIM authoring software—Autodesk Revit, and Autodesk Insight 360—a cloud-based building performance analysis tool embedded within a BIM authoring software which is able to relieve energy modelers from necessity in setting up hardware and software infrastructures. It aims to explore the most critical parameters of PSE on PV surfaces caused by surrounding obstacles, namely the Obstacle's Orientation and the Obstacle's Distance that affect the annual cumulative insolation on photovoltaic modules that are attached to roof surfaces.

2.1 Case Study

In Thailand, most of the government healthcare facilities have been developed and administered using Generalizable Building Designs (GBDs), i.e. cookie-cutter healthcare building designs, from the concept of “one size fits all” for universal application on healthcare facilities design which list down the types, functions, sizes and work load capacities. The GBDs also minimize time and resources consumed during new building design processes and to be flexible to accommodate the healthcare construction projects in Thailand, especially in the rural and remote areas [12,24]. The case study comprises of two selected GBDs which are (1) an outpatient department (OPD) building was chosen as a case study to be the BIPV, where PV modules have been installed on the OPD's sloped roofs, and (2) a ward building was chosen as a case study to be the obstacle. These two GBDs are widely established in the community hospitals that provide secondary level of Thailand's healthcare services that serve more than 20 million of the population [24].

The physical settings of the case study are those of typical cost-control public health facilities: the structural construction is in situ reinforced concrete, the exterior opaque walls are of plastered brick walls, the glazing for windows is 6-millimeter clear float glass, and the roofs are made of fiber-cement roof tiles. The first building of the case study, an OPD building (Figure 3), this two-story building has an irregular-shaped footprint with gross floor area of 1,125 m² which contains functional areas to be fully operational outpatient department. The sloped roofs of the OPD building are three rectangle-based hipped roofs with 20° roof pitches. Total area of the sloped roof surfaces is 712 m², the surfaces of these roofing systems have been used to mount PV modules. The total cumulative solar insolation on the surfaces of the solar PV modules has been examined for

estimating solar potential and output energy of the PV systems. The height from the ground level to the highest point of the roof is approximately 10 meters.



Figure 3: A photograph of the OPD building.

The second building is a ward building which is a five-story rectangle shaped building with 21.00 meters wide, 46.50 meters long and 24.00 meters high. This ward building has been usually placed near the OPD building. The minimum distance equals to 6 meters, it is the minimum distance of separation between buildings in public healthcare facilities, from the outmost edge of a building to the outmost edge of another building with vertical clearance that is required along the buildings for fire safety and circulation routes. The maximum distance between an OPD building and a ward building is not greater than 48 meters. The axis of the OPD building has been aligned with the axis of the ward building, center to center of the two buildings. These aligned axes which are the representation of the interaction between geometries of the two buildings is kept stationary to maintain the consistency of the simulations.

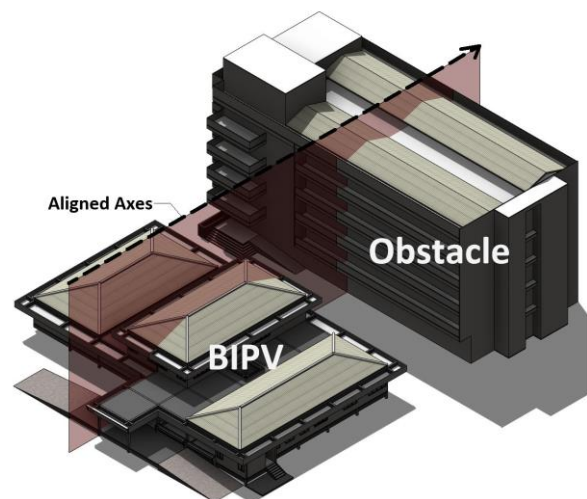


Figure 4: An illustration of the aligned axes of the BIPV and the obstacle.

To complete the case study, setting the orientation of the axis-aligned buildings to face south: true north-based azimuth (AZ) of 180°. The nearest distance between the two models has been set to 6 meters—the 6-meter Obstacle's Distance (Figure 4).

Then, setting a BIM project to create a digital environment for solar insolation simulation.

2.2 Steps of Automated BPS

BIM models of the case study have been developed using Autodesk Revit. The BIM model of the OPD building, has been developed at LOD 300. Otherwise, the development of the ward building's BIM model is at LOD 200. LOD (Level of Development) is concept to describe information richness of BIM objects, ranges from LOD 100 (basic/conceptual) to 500 (highly detailed/precise). LOD 300 is the Model Elements is graphically represented within the model as a specific system, and non-graphic information may also be attached to the Model Element [25–27]. The OPD has been chosen to be a BIPV, thus a development of its BIM model requires details and functionalities with a certain accuracy, information richness and actuality of the underlying data to support further design and modeling processes of PV systems (Figure 5).



Figure 5: The LOD-300 BIM model of the OPD building.

Otherwise, the development of the ward building's BIM model is at LOD 200, it has been utilized to be a building-surrounded obstacle, thus, its important BIM parameters are the obstacle's location and geometry that have been derived into three-dimensional coordinates that used to determine the projection of shadow on PV modules by the dynamic change of solar azimuth and altitude angles. That is very important to limit the LOD of the model to the minimum, due to more-detailed modeling needs more time and effort that ranging from doubling the effort to eleven folding them, and more computational power of the building performance simulation to acquire the results is also needed [28].

The location to simulate the annual cumulative insolation is Bangkok, Thailand. Its global coordinates are 13°N 100°30'E. The next step is to simulate the annual cumulative insolation on the PV surfaces of the BIM model of the OPD building using Autodesk Insight 360. To discover the influence of Obstacle's Distance, the baseline models which both buildings facing south (AZ = 180°) is 0° CW (Clockwise) rotation angle—the 0° Obstacle's Orientation, the simulations of annual cumulative insolation simulation at 1-meter intervals of the distance from 6 meters to 48 meters between the axis-aligned buildings have been performed. There are 43 simulations completed for 0° CW models.

To explore the comparative influence of Obstacle's Distance parameter and Obstacle's Orientation parameter, annual cumulative insolation simulations of 0° CW have been performed against fifteen other orientations which are: seven other major orientations clockwise (CW), i.e. 45° (AZ = 225°), 90° (AZ = 270°), 135° (AZ = 315°), 180° (AZ = 0°), 225° (AZ = 45°), 270° (AZ = 90°), and 315° (AZ = 135°) to explore the PSE impacts (Figure 6), and eight minor orientations clockwise, i.e. 22.5° (AZ = 202.5°), 67.5° (AZ = 247.5°), 112.5° (AZ = 292.5°), 157.5° (AZ = 337.5°), 202.5° (AZ = 22.5°), 247.5° (AZ = 67.5°), 292.5° (AZ = 112.5°), and 327.5° (AZ = 157.5°) to examine the transformation of the PSE impacts over those major orientations. There are total 688 annual cumulative insolation simulations have been performed in this study.

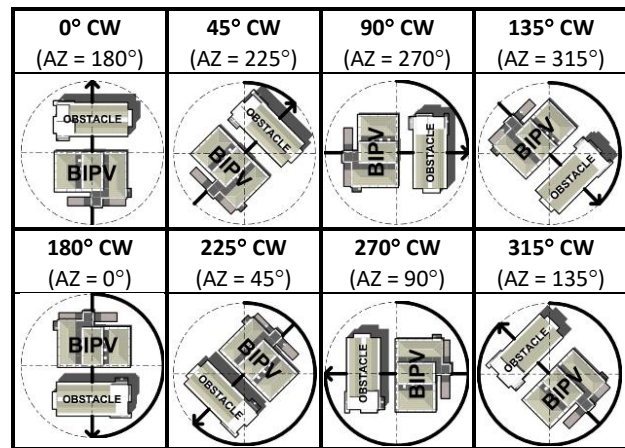


Figure 6: Eight major Obstacle's Orientations of the case study—the axis-aligned buildings.

3. RESULTS AND ANALYSIS

Once a simulation has been performed, the results are displayed automatically within the BIM authoring platform. Individually, each simulation provides a result of solar analysis—total cumulative insolation (kWh), as shown in Figure 7.

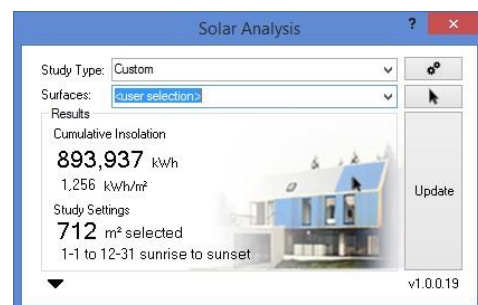


Figure 7: Solar Analysis results of the 0°CW at 6-meter Obstacle's Distance.

The analysis tool also provides graphical results within the BIM models as shown in Figure 8. The

annual cumulative insolation on the PV surfaces of the eight major Obstacle's Orientations is presented in Figure 9.

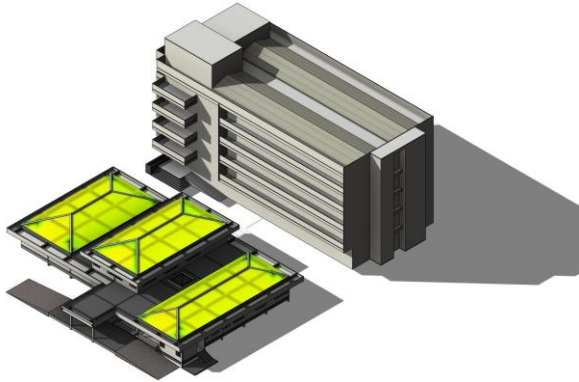


Figure 8: The graphical results of a solar analysis.

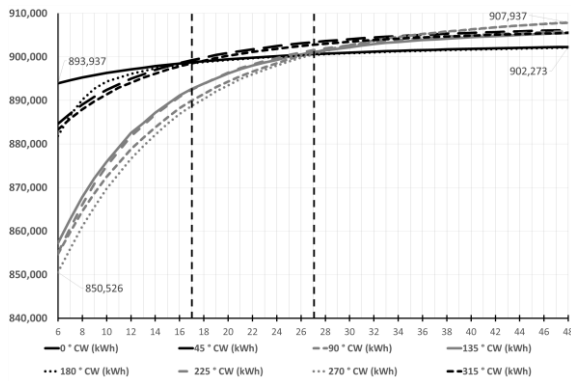


Figure 9: Annual cumulative insolation of the eight major Obstacle's Orientations and 43 Obstacle's Distance.

The annual cumulative insolation on the PV surfaces of all simulations is presented in Figure 10. The simulation results of every Obstacle's Orientations shared one thing in common; their curves are logarithmic shaped with periods of rapid increase at first, followed by periods where the gains increase slowly then reach the plateaus at their farthest distances.

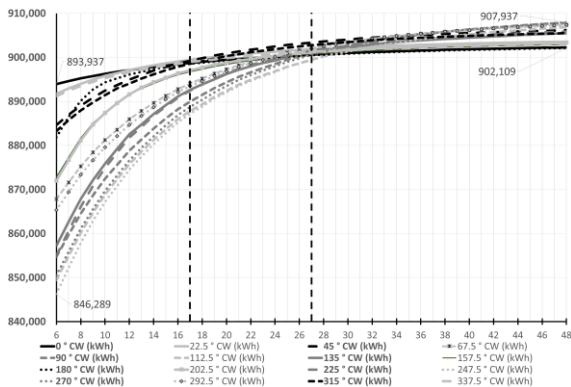


Figure 10: Annual cumulative insolation of all 688 Simulations; 16 Obstacle's Orientation, and 43 Obstacle's Distance.

Using general equation of a straight line (1), m , to analyze the partial slopes of each 1-meter intervals and the overall slopes of all sixteen curves between 6-meter and 48-meter Obstacle's Distance.

$$m = \Delta y / \Delta x \quad (1)$$

where m – slope of a curve

Δy – the difference of amount of the annual cumulative insolation between 6-meter and 48-meter Obstacle's Distance

Δx – the difference of distance between 6-meter and 48-meter Obstacle's Distance

There is a distinctive difference to separate the eight curves of the eight major Obstacle's Orientations into three groups: the first group (Group A₁) is only 0°CW Obstacle's Orientations, the curve is almost linear that starts at the highest annual cumulative insolation and increases at very slow rate while the distance is increasing, its overall slope (m) is 198.48; the second group (Group A₂) consists of curves that start at slightly lower annual cumulative insolation than Group A₁ but increase at a faster rate while the distance is increasing than Group A₁, the curves of Obstacle's Orientations in the Group A₂ are 45°CW ($m = 512.48$), 180°CW ($m = 482.05$) and 315°CW ($m = 530.60$) (Figure 11); and the third group (Group B) that start at lower annual cumulative insolation than both Group A₁ and Group A₂ but increase at much faster rate, which consists of 90°CW ($m = 1,265.07$), 135°CW ($m = 1,148.60$), 225°CW ($m = 1,211.79$) and 270°CW ($m = 1,366.93$) Obstacle's Orientations (Figure 12).

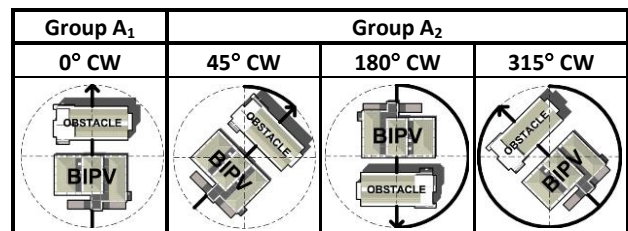


Figure 11: The first group (Group A₁) and the second group (Group A₂).

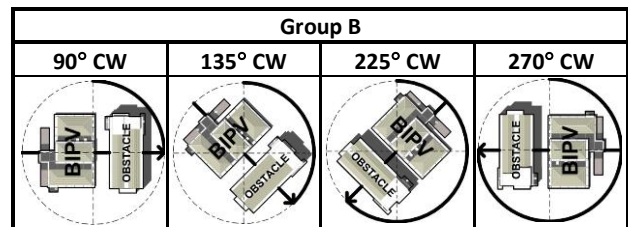


Figure 12: The third group (Group B).

At the 6-meter Obstacle's Distance, the compared potential solar power between 0°CW (Group A₁) and 270°CW (Group B) is dramatically different, it is 43,411 kWh or 5.1040% with 0°CW performing better than 270°CW. Contrarily, at 48-meter Obstacle's

Distance, 0°CW obtains less annual cumulative insolation than 270°CW does by 0.6277%.

Additionally, at 48-meter Obstacle's Distance, 0°CW gains more annual cumulative insolation than it does at the 6-meter Obstacle's Distance by just 0.93%. Despite the fact that at 48-meter Obstacle's Distance, 270°CW obtains more annual cumulative insolation than its 6-meter Obstacle's Distance does tremendously at 6.7501%. At 17-meter Obstacle's Distance, all curves of Group A₂ surpass A₁ as well as at 27-meter Obstacle's Distance all curves of Group B surpass Group A₁, as shown in Figure 9. Thus, it can be concluded that the effects of the Obstacle's Orientation are high from 6-meter Obstacle's Distance and become ineffective at 17-meter Obstacle's Distance. In different, the Obstacle's Distance affected the solar insolation on the BIPV in just some Obstacle's Orientations, especially, Group B. The Obstacle's Distance also becomes ineffective when the Obstacle's Distance exceeded 27.00 meters.

Results from this study show that at such Obstacle's Orientations of Group A₁ and Group A₂, the potential PV power generation of the BIPV is high since the nearest distance and almost consistent until the farthest distance between the BIPV and the obstacle. They are also the recommended BIPV placement for BIPV application on lower-rise buildings in urban environments, such as healthcare facilities, as they steadily receive solar irradiation with less sensitive to the Obstacle's Distance. That means the lower-rise BIPVs with these locations are capable of generating solar energy to reach their nearly full potential, no matter how far they are from a much-taller surrounding obstacle. On the conditions of the placement that define Obstacle's Orientations are not optimal, such as Group B, placing the two buildings farther from each other will enhance the energy output from the PV system, especially farther than 27.00 meters.

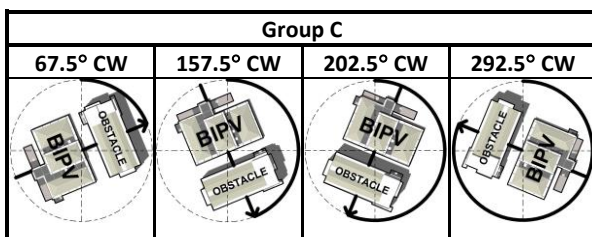


Figure 13: The fourth group (Group C).

For the other eight minor Obstacle's Orientations, there are two Obstacle's Orientations that share the same characteristics with Group A₁; 22.5°CW ($m = 282.52$) and 337.5°CW ($m = 280.21$), as well as 122.5°CW ($m = 1,367.07$) and 247.5°CW ($m = 1,441.90$) which their slopes are similar to the curves in Group B. On the other hand, there are curves that have distinctive slopes which are able to be

categorized into a new group: the fourth group (Group C) including 67.5°CW ($m = 941.95$), 157.5°CW ($m = 715.05$), 202.5°CW ($m = 747.07$) and 292.5°CW ($m = 1,001.69$) (Figure 13). It can clearly be seen that Group C is intermediate between Group A₂ and Group B, as shown in Figure 10, and Group C diminishes the clear distinction between them.

4. CONCLUSION

This study found that the Obstacle's Orientation parameter immensely affected solar insolation on the BIPV, especially the near distances of Obstacle's Distance parameter. The effect of Obstacle's Orientation is very high when the Obstacle's Distance is low in some Obstacle's Orientations, especially Group B—the Obstacle's Orientations that the obstacle located on the east, southeast, west, and southwest of the BIPV. The findings of this study also support decision making for BIPV designers and planners to select which the BIPV and the obstacle placement is highly effective, Group A₁ and Group A₂—the Obstacle's Orientations that the obstacle located on the north, northeast, northwest, and south of the BIPV, are suitable to be applied in dense urban environments. On the other hand, Group B is advisable to be applied in facilities with sufficient space. The proposed methodology is based on the simulated annual cumulative insolation obtained from rooftop PV surfaces through an automatic collaboration of a BIM software—Autodesk Revit, and a cloud-based building performance analysis tool—Autodesk Insight 360. BIM models of the case study have been built at different LODs to provide a suitable level of details and functionalities while maintaining the simplicity of computational processes. The BIM-based automated simulations have been substantiated its usability that removed the deficiencies; time-consuming, cumbersome and error-prone of the non-automated processes.

REFERENCES

- Ekici, B. B., (2014). A least squares support vector machine model for prediction of the next day solar insolation for effective use of PV systems. *Measurement*, 50: p. 255–262.
- Yang, R. J., (2015). Overcoming technical barriers and risks in the application of building integrated photovoltaics (BIPV): hardware and software strategies. *Automation in Construction*, 51: p. 92–102.
- Yoo, S-H., (2011). Simulation for an optimal application of BIPV through parameter variation. *Solar Energy*, 85(7): p. 1291–1301.
- Celik, B., Karatepe, E., Silvestre, S., Gokmen, N., Chouder, A., (2015). Analysis of spatial fixed PV arrays configurations to maximize energy harvesting in BIPV applications. *Renewable Energy*, 75: p. 534–540.
- Celik, B., Karatepe, E., Gokmen, N., Silvestre, S., (2013). A virtual reality study of surrounding obstacles on BIPV systems for estimation of long-term performance of

partially shaded PV arrays. *Renewable Energy*, 60: p. 402–414.

6. Masa-Bote, D., Caamaño-Martín E., (2014). Methodology for estimating building integrated photovoltaics electricity production under shadowing conditions and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31: p. 492–500.

7. Frontini, F., Bouziri, S, M., Corbellini, G., Medici, V., (2016). S.M.O Solution: An Innovative Design Approach to Optimize the Output of BIPV Systems Located in Dense Urban Environments. *Energy Procedia*, 91: p. 945–953.

8. Zomer, C., Rüther, R., (2017). Simplified method for shading-loss analysis in BIPV systems – part 1: Theoretical study. *Energy and Buildings*, 141: p. 69–82.

9. Garner, R., Solar Irradiance [Online], Available: http://www.nasa.gov/mission_pages/sdo/science/solar-irradiance.html [3 April 2015].

10. Shukla, A, K., Sudhakar, K., Baredar, P., (2017). Recent advancement in BIPV product technologies: A review. *Energy and Buildings*, 140: p. 188–195.

11. Ning, G., Junnan, L., Yansong, D., Zhifeng, Q., Qingshan, J., Weihua, G., et al., (2017). BIM-based PV system optimization and deployment. *Energy and Buildings*, 150: p. 13–22.

12. Somboonwit, N., Boontore, A., (2017). Identification of Building-Surrounded Obstacle Parameter Using Automated Simulation to Support Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Layout Planning in Thailand. *Asian Social Science*, 13(12): p. 142–159.

13. Clarke, J, A., Hensen, J, L, M., (2015). Integrated building performance simulation: Progress, prospects and requirements. *Building and Environment*, 91: p. 294–306.

14. Bazjanac, V., Maile, T., Rose, C., O'Donnell, J, T., Morrissey, E., Welle, B, R., (2011). AN ASSESSMENT OF THE USE OF BUILDING ENERGY PERFORMANCE SIMULATION IN EARLY DESIGN. In: Proceeding of Building Simulation 2011. Sydney, Australia: International Building Performance Simulation Association; p. 1579–1585.

15. Hitchcock, R, J., Wong, J., (2011). TRANSFORMING IFC ARCHITECTURAL VIEW BIMS FOR ENERGY SIMULATION: 2011. In: Proceeding of Building Simulation 2011. Sydney, Australia: International Building Performance Simulation Association; p. 1089–1095.

16. O'Donnell, J., See, R., Rose, C., Maile, T., Bazjanac, V., Haves, P., (2011). SIMMODEL: A DOMAIN DATA MODEL FOR WHOLE BUILDING ENERGY SIMULATION. In: Proceeding of Building Simulation 2011. Sydney, Australia; p. 382–9.

17. Krygiel, E., Nies, B., (2008). *Green BIM: Successful Sustainable Design with Building Information Modeling*. Alameda, CA, USA: SYBEX Inc.

18. Kymmell, W., (2007). *Building Information Modeling: Planning and Managing Construction Projects with 4D CAD and Simulations (McGraw-Hill Construction Series): Planning and Managing Construction Projects with 4D CAD and Simulations*. McGraw Hill Professional; 297 p.

19. Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., Liston, K., (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. John Wiley & Sons; 648 p.

20. Agugiaro, G., (2016). Energy planning tools and CityGML-based 3D virtual city models: experiences from Trento (Italy). *Applied Geomatics*, 8(1):41–56.

21. Kuo, H-J., Hsieh, S-H., Guo, R-C., Chan, C-C., (2016). A verification study for energy analysis of BIPV buildings with BIM. *Energy and Buildings*, 130: p. 676–691.

22. Somboonwit, N., Boontore, A., Rugwongwan, Y., (2017). Obstacles to the Automation of Building Performance Simulation: Adaptive Building Integrated Photovoltaic (BIPV) design. *Environment-Behaviour Proceedings Journal*, 2(5): p. 343–354.

23. Negendahl, K., (2015). Building performance simulation in the early design stage: An introduction to integrated dynamic models. *Automation in Construction*, 54: p. 39–53.

24. Somboonwit, N., Sahachaisaeree, N., (2012) Healthcare Building: Modelling the Impacts of Local Factors for Building Energy Performance Improvement in Thailand. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 50: p. 549–562.

25. Volk, R., Stengel, J., Schultmann, F., (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38: p. 109–27.

26. BIM Forum. LOD | BIMForum [Online], Available : <http://bimforum.org/lof/> [2017].

27. Autodesk Sustainability Workshop. Project Phases & Level of Development | Sustainability Workshop [Online], Available: <https://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/project-phases-level-development/> [20 May 2018].

28. Leite, F., Akcamete, A., Akinci, B., Atasoy, G., Kiziltas, S., (2011). Analysis of modeling effort and impact of different levels of detail in building information models. *Automation in Construction*, 20(5): p. 601–9.



คำสั่งกองแบบแผน กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ

ที่ ๕๓ / ๒๕๖๐

เรื่อง แต่งตั้งคณะกรรมการการศึกษาเพื่อกำหนดกรอบแนวคิด ทฤษฎี และเทคนิควิธีการ เพื่อกออกแบบอาคารสถานบริการสุขภาพต้นแบบที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ (Carbon Neutral Healthcare Facilities) ด้วยกระบวนการออกแบบบูรณาการ (Integrated Design Processes: IDP)

ตามที่กองแบบแผน ได้รับอนุมัติให้ดำเนินงานโครงการการศึกษาเพื่อกำหนดกรอบแนวคิด ทฤษฎี และเทคนิควิธีการ เพื่อกออกแบบอาคารสถานบริการสุขภาพต้นแบบที่ปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนสุทธิ (Carbon Neutral Healthcare Facilities) ด้วยกระบวนการออกแบบบูรณาการ (Integrated Design Processes: IDP) ในปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๖๑ แล้วนั้น

เพื่อให้การดำเนินงานโครงการดังกล่าวบรรลุวัตถุประสงค์และผลสัมฤทธิ์ ในการนี้ กองแบบแผน จึงแต่งตั้งคณะกรรมการซึ่งประกอบด้วยผู้มีรายชื่อดังต่อไปนี้

- | | | |
|-----------------|------------|------------------------|
| ๑. นายณัฐสิทธิ์ | สมบุญวิทย์ | ประธานคณะกรรมการ |
| ๒. นายชาติรี | दनัย | คณะกรรมการ |
| ๓. นายธนเศรษฐ์ | ร่วมชาติ | คณะกรรมการ |
| ๔. นางสาวเสาวภา | พินทอง | คณะกรรมการและเลขานุการ |

ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไป

สั่ง ณ วันที่ ๒๔ ตุลาคม พ.ศ. ๒๕๖๐

(นายนิรันดร์ คชรัตน์)

วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ (ด้านออกแบบและคำนวณ)

รักษาราชการแทนผู้อำนวยการกองแบบแผน

คำสั่งกองแบบแผน กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ
ที่ ๔๒ /๒๕๖๑

เรื่อง แต่งตั้งคณะกรรมการโครงการจัดทำรายงานการวิจัยเพื่อการเข้าร่วมประชุมวิชาการ Passive and Low Energy Architecture (PLEA) 2018 ณ ประเทศฮ่องกง

เพื่อให้การดำเนินงานโครงการจัดทำรายงานการวิจัยเพื่อการเข้าร่วมประชุมวิชาการ Passive and Low Energy Architecture (PLEA) 2018 ณ ประเทศฮ่องกง ระหว่างวันที่ ๑๐ - ๑๒ ธันวาคม ๒๕๖๑ บรรลุวัตถุประสงค์และผลสัมฤทธิ์ กองแบบแผนจึงแต่งตั้งคณะกรรมการดำเนินงานโครงการดังกล่าว ประกอบด้วยผู้มีรายนามดังต่อไปนี้

๑. นายวัฒนา สุถิ่นนาถ
๒. นายณัฐสิทธิ์ สมบูรณ์วิทย์

ที่ปรึกษาคณะกรรมการ
ประธานคณะกรรมการและเลขานุการ

ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไป

สั่ง ณ วันที่ ๑๓ พฤษภาคม พ.ศ. ๒๕๖๑



(นายนิรันดร์ คชรัตน์)
ผู้อำนวยการกองแบบแผน