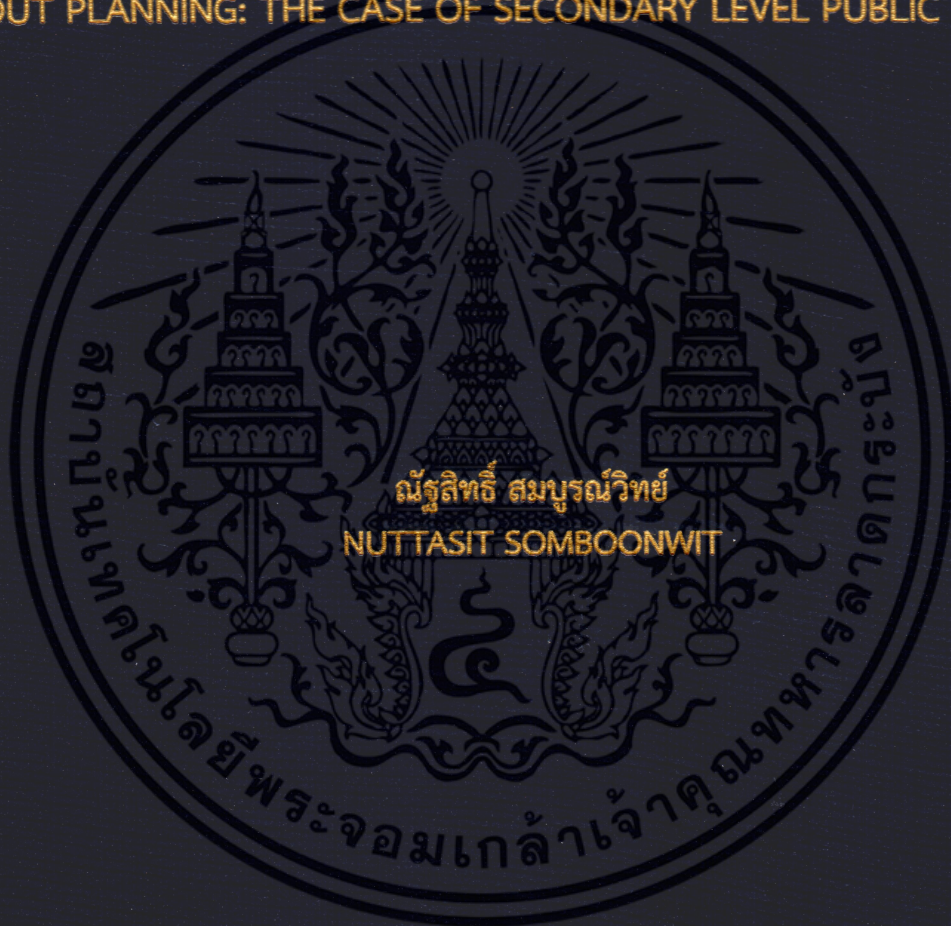


การจำลองสมรรถนะแบบอัตโนมัติปัจจัยด้านสิ่งกีดขวางแวดล้อมประเภท
อาคารเพื่อสนับสนุนการวางผังอาคารผสมเซลล์แสงอาทิตย์: กรณีศึกษา
โรงพยาบาลภาครัฐระดับทุติยภูมิ

AUTOMATED SIMULATION OF BUILDING-SURROUNDED OBSTACLE
PARAMETER TO SUPPORT BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAIC (BIPV)
LAYOUT PLANNING: THE CASE OF SECONDARY LEVEL PUBLIC HOSPITALS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาสหวิทยาการการวิจัยเพื่อการออกแบบ
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560
KMITL-2017-AR-D-007-046

การจำลองสมรรถนะแบบอัตโนมัติปัจจัยด้านสิ่งกีดขวางแวดล้อมประเภท
อาคารเพื่อสนับสนุนการวางผังอาคารผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์: กรณีศึกษา
โรงพยาบาลภาครัฐระดับทุติยภูมิ

AUTOMATED SIMULATION OF BUILDING-SURROUNDED OBSTACLE
PARAMETER TO SUPPORT BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAIC (BIPV)
LAYOUT PLANNING: THE CASE OF SECONDARY LEVEL PUBLIC HOSPITALS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาสหวิทยาการการวิจัยเพื่อการออกแบบ

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-AR-D-007-046

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AUTOMATED SIMULATION OF BUILDING-SURROUNDED OBSTACLE
PARAMETER TO SUPPORT BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAIC (BIPV)
LAYOUT PLANNING: THE CASE OF SECONDARY LEVEL PUBLIC HOSPITALS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ARCHITECTURE PROGRAM IN MULTIDISCIPLINARY DESIGN RESEARCH
FACULTY OF ARCHITECTURE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017
KMITL-2017-AR-D-007-046

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ARCHITECTURE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การจำลองสมรรถนะแบบอัตโนมัติปัจจัยด้านสิ่งกีดขวางแวดล้อมประเภทอาคารเพื่อสนับสนุน
การวางผังอาคารผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์: กรณีศึกษา โรงพยาบาลภาครัฐระดับทุติยภูมิ
AUTOMATED SIMULATION OF BUILDING-SURROUNDED OBSTACLE PARAMETER
TO SUPPORT BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAIC (BIPV) LAYOUT PLANNING:
THE CASE OF SECONDARY LEVEL PUBLIC HOSPITALS

นักศึกษา

นายณัฐสิทธิ์ สมบูรณ์วิทย์

รหัสประจำตัว

54621052

ปริญญา

สถาปัตยกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา

สหวิทยาการการวิจัยเพื่อการออกแบบ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร.อมร บุญต่อ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร.อมร บุญต่อ	
ดร.ประพัทธ์พงษ์ อุปลา	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ญาณินทร์ รังวงศ์วาน	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปณายุ ไชยรัตนานนท์	
ดร.ปรีชญา ครูเกษตร	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 14 ธันวาคม 2560

สถานที่สอบ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์รับรองแล้ว

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อันธิกา สวัสดิ์ศรี)

คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

วันที่... 29 ...เดือน... ธันวาคม พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองสมรรถนะแบบอัตโนมัติปัจจัยด้านสิ่งกีดขวางแวดล้อม
นักศึกษ	ประเภทอาคารเพื่อสนับสนุนการวางผังอาคารผสมเซลล์
รหัสประจำตัว	แสงอาทิตย์: กรณีศึกษา โรงพยาบาลภาครัฐระดับทุติยภูมิ
ปริญญา	นายณัฐสิทธิ์ สมบูรณ์วิทย์
สาขาวิชา	54621052
พ.ศ.	สถาปัตยกรรมศาสตร์ดุษฎีบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	สหวิทยาการการวิจัยเพื่อการออกแบบ
	2560
	ดร. อมร บุญต่อ

บทคัดย่อ

การศึกษามีวัตถุประสงค์สร้างสถานการณ์จำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลจากปัจจัยด้านสิ่งกีดขวางแวดล้อมประเภทอาคารที่สูงกว่าอาคารผสมเซลล์แสงอาทิตย์ ในตัวแปรประเภทการวางทิศทางของสิ่งกีดขวางแวดล้อม และระยะห่างของสิ่งกีดขวางแวดล้อม ที่มีผลต่อปริมาณการรับความเข้มรังสีอาทิตย์ในหนึ่งหน่วยเวลา ของอาคารผสมเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา โดยการใช้งานการจำลองสมรรถนะอาคารแบบอัตโนมัติ ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันของ ระบบแบบจำลองสารสนเทศ และ ระบบสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคารที่ใช้เทคโนโลยีการประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ ในการประมวลผลสมรรถนะอาคาร และเพื่อสร้างแนวทางการวางผังอาคาร อันเป็นตัวแทนของอาคารผสมเซลล์แสงอาทิตย์ ที่จำเป็นต้องตั้งอยู่ใกล้สิ่งกีดขวางแวดล้อมประเภทอาคารที่สูงกว่าอาคารผสมเซลล์แสงอาทิตย์

แบบก่อสร้างมาตรฐานอาคารผู้ป่วยนอก สูง 2 ชั้นถูกคัดเลือกเป็นตัวอย่างอาคารผสมเซลล์แสงอาทิตย์ และ แบบก่อสร้างมาตรฐานอาคารพักผู้ป่วยใน สูง 5 ชั้น ถูกคัดเลือกเป็นตัวอย่างสิ่งกีดขวางแวดล้อมประเภทอาคาร เพื่อการสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคาร เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของ ปริมาณการรับความเข้มรังสีอาทิตย์ในหนึ่งหน่วยเวลาของอาคารผสมเซลล์แสงอาทิตย์ จากการหัน 8 การวางทิศทางของสิ่งกีดขวางแวดล้อม และระยะห่างของสิ่งกีดขวางแวดล้อมทั้งหมด 43 ระยะรวมทั้งหมด 344 สถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคาร

การศึกษานี้พบว่า การวางทิศทางของสิ่งกีดขวางแวดล้อมเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความเข้มรังสีอาทิตย์ในหนึ่งหน่วยเวลาของอาคารผสมเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอย่างมากในทุกการวางทิศทาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระยะห่างของสิ่งกีดขวางแวดล้อมน้อย โดยปัจจัยการวางทิศทางของสิ่งกีดขวางแวดล้อมจะมีการเสื่อมอิทธิพลเมื่อระยะห่างของสิ่งกีดขวางแวดล้อมเกิน 17.00 เมตร นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยระยะห่างของสิ่งกีดขวางแวดล้อมนั้นมีผลกระทบต่อความเข้มรังสีอาทิตย์ในหนึ่งหน่วยเวลาของอาคารผสมเซลล์แสงอาทิตย์ในบางการวางทิศทางของสิ่งกีดขวางแวดล้อมเท่านั้น โดยเฉพาะทิศทาง $90^{\circ}CW$, $135^{\circ}CW$, $225^{\circ}CW$ and $270^{\circ}CW$ โดยปัจจัยระยะห่างของสิ่งกีดขวางแวดล้อมจะมีการเสื่อมอิทธิพลเมื่อระยะห่างของสิ่งกีดขวางแวดล้อมเกิน 27.00 เมตร

Thesis	Automated Simulation of Building-Surrounded Obstacle Parameter to Support Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Layout Planning: The case of Healthcare Facilities, Thailand
Student	Mr. Nuttasit Somboonwit
Student ID.	54621052
Degree	Doctor of Architecture
Program	Multidisciplinary Design Research
Year	2017
Thesis Advisor	Dr. Amon Boontore

ABSTRACT

This study aims to explore the comparative effects between obstacle's distance and orientation parameters that cause Partial Shading Effects (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 eight different orientations and forty-three different distances between the BIPV and building obstacles. The case study buildings are two public secondary level hospital buildings; an OPD building and a ward building that are widely established throughout Thailand. This study also explored how orientation and distance of a surrounding obstacle influence the annual cumulative insolation of PV surfaces of a BIPV in different settings. In 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, 90°CW, 135°CW, 225°CW and 270°CW. The effects of the Obstacle's Distance also deteriorated when the Obstacle's Distance exceeded 27.00 meters.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จาก อ.ดร.อมร บุญต่อ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาแนะนำ สอน แลกเปลี่ยน แม้กระทั่งสร้างแรงบันดาลใจและให้กำลังใจ ขอขอบพระคุณอาจารย์ ที่เป็นทั้งอาจารย์ เป็นทั้งพี่เลี้ยง เป็นทั้งแรงกระตุ้น และเป็นทั้งเพื่อน พร้อมทั้งยังช่วยเหลือ ตรวจสอบข้อบกพร่องและกรุณาช่วยปรับปรุงจนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ญาณินทร์ รักวงศ์วาน ที่ได้เมตตาให้คำปรึกษา แนะนำองค์ความรู้ และประสบการณ์ รวมถึงให้การดูแลด้านการศึกษาระดับปริญญาของข้าพเจ้าตลอดช่วงเวลาที่ผ่านมา

ขอขอบพระคุณ Professor Dr. Sabarinah Sh. Armad และ Dr. Rostam Bin Yaman ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา และช่วยอำนวยความสะดวกในทุกสิ่ง ในช่วงเวลาที่ข้าพเจ้าเป็นนักวิจัย แลกเปลี่ยนที่ Universiti Teknologi MARA

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.นพดล สหชัยเสรี ครูผู้เหมือนบิดา

ขอขอบพระคุณ คุณประจวบ สุโพธิ์ และ คุณวัฒนา สุธิรนาถ รวมถึงสถาปนิกทุกท่านของกลุ่มมาตรฐานสถาปัตยกรรม กองแบบแผน กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ ที่กรุณาให้โอกาสและให้การสนับสนุนในทุกทาง ให้ข้าพเจ้าสามารถดำเนินการทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงลงได้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่หลักสูตรฯและคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ ทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวก ให้คำปรึกษา และช่วยดำเนินการในหลายสิ่งหลายอย่างให้เรื่องยากกลายเป็นเรื่องง่าย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ชาวสหฯทุกคน ที่ได้ช่วยเหลือกัน ประคับประคองให้กำลังใจ และสร้างแรงกระตุ้นกันในทุกๆทาง จนสามารถฝ่าฟันอุปสรรคทั้งหลายให้ผ่านพ้นไปได้

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่สาว น้องชาย และคุณสุรัสวดี สุวรรณสุขุม ที่ให้การช่วยเหลือและสนับสนุนในทุกๆทาง ตลอดมา

ณัฐสิทธิ์ สมบูรณ์วิทย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูปภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายของการศึกษา.....	6
1.3 วัตถุประสงค์.....	7
1.4 สมมุติฐานของการศึกษา.....	7
1.5 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	7
1.6 ขอบเขตของการวิจัย.....	8
1.7 ข้อตกลงเบื้องต้น และข้อจำกัดของการศึกษา.....	8
1.8 ขั้นตอนของการศึกษา.....	9
1.9 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
1.10 นิยามศัพท์สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย.....	10
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.1 พลังงานแสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์ และอาคารผสมผสานแสงอาทิตย์.....	12
2.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์.....	12
2.1.2 วัสดุเซลล์แสงอาทิตย์.....	13
2.1.3 อาคารผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์.....	17
2.1.4 ประเภทของผลิตภัณฑ์ BIPV.....	19
2.2 ผลกระทบจากการโดนบังเงาบางส่วน.....	22
2.3 อาคารผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ กับระบบสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคาร.....	29
2.3.1 ระบบระบบสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคาร.....	29
2.3.2 ระบบระบบสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคารแบบอัตโนมัติ.....	31
2.3.3 ระบบแบบจำลองสารสนเทศ.....	31
2.3.4 การกำหนดระดับความละเอียดของการพัฒนาแบบจำลองสารสนเทศ.....	33
2.3.5 ระบบจำลองสมรรถนะอาคาร และการปฏิบัติการร่วมกับระบบแบบจำลองสารสนเทศ.....	38
2.4 อาคารสถานบริการสุขภาพภาครัฐในประเทศไทย.....	40
2.4.1 อาคารสถานบริการสุขภาพภาครัฐ.....	40
2.4.2 แบบก่อสร้างมาตรฐาน.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 รูปแบบการขยายตัวของสถานบริการสุขภาพภาครัฐในประเทศไทย.....	42
2.4.4 นโยบายส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในอาคารภาครัฐ.....	48
2.5 การวางผังอาคารสถานบริการสุขภาพภาครัฐในประเทศไทย.....	49
2.5.1 กลุ่มบริการผู้ป่วยนอกและอุบัติเหตุ-ฉุกเฉิน.....	50
2.5.2 กลุ่มวินิจฉัยและรักษา.....	50
2.5.3 กลุ่มพักผู้ป่วยใน.....	50
2.5.4 กลุ่มบริการสนับสนุน.....	51
2.5.5 กลุ่มบริหารจัดการและสวัสดิการ.....	51
2.5.6 องค์ประกอบด้านการวางผังอาคารสถานบริการสุขภาพ.....	51
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	56
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	60
3.1 ตัวแปร.....	60
3.2 ประชากรและการเลือกตัวอย่างเพื่อเป็นกรณีศึกษาในงานวิจัย.....	60
3.2.1 รายละเอียดของอาคารกลุ่มตัวอย่างที่ 1.....	61
3.2.2 รายละเอียดของอาคารกลุ่มตัวอย่างที่ 1.....	63
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย.....	65
3.4 ขั้นตอนของการวิจัย.....	66
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	72
4.1 ผลลัพธ์จากการสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคารแบบอัตโนมัติ.....	72
4.2 การวิเคราะห์ผล.....	76
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	88
5.1 สรุปผล.....	88
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	93
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต.....	90
บรรณานุกรม.....	97
ภาคผนวก.....	106
ภาคผนวก ก ผลลัพธ์ Solar Insolation จากการสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะ อาคารแบบอัตโนมัติ.....	107
ภาคผนวก ข รายละเอียดค่าความชันกราฟของทั้ง 8 Obstacle's Orientation.....	110
ประวัติผู้เขียน.....	113

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติวัสดุซับแสงในเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์แผ่นบาง.....	15
2.2 สรุปความหมาย Level of Detail / Level of Development ในวรรณกรรมต่างๆ.....	33
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านปรากฏการณ์ PSE.....	57
3.1 นิยามตัวแปร.....	61
3.2 สรุปรายละเอียดกลุ่มตัวอย่างการวิจัย.....	65
4.1 ค่าความชันของเส้นกราฟภาพรวมของ Annual Cumulative Insolation ทั้ง 8 Obstacle's Orientations เรียงลำดับจากน้อยไปมาก.....	76
4.1 Slope ภาพรวมของกราฟ Annual Cumulative Insolation ของทั้ง 8 Orientations.....	76



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 กรอบแนวคิดแสดงความเชื่อมโยง Parameter ของ Partial Shading Effects ที่ส่งผลกระทบต่อ Solar Insolation บนพื้นผิวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	5
2.1 กรอบแนวคิดการวิจัย.....	12
2.2 เทคโนโลยีวัสดุเซลล์แสงอาทิตย์.....	13
2.3 ผังเส้นเวลาแสดงถึง ประสิทธิภาพสูงสุดของเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ จากการทดลองและมีการบันทึก.....	17
2.4 แผนภาพระบบ BIPV.....	18
2.5 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ประเภท Foil.....	21
2.6 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ประเภท BIPV Tiles.....	21
2.7 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทกระจกใส.....	22
2.8 แสดง Parameter ของ (B-2) Surrounding Obstacle และ (C-1) PV surface geometry.....	25
2.9 กรอบเชื่อมโยง Parameter ของ Partial Shading Effects.....	26
2.10 ตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงรูปร่างที่ซับซ้อนของเงาที่ทอดจาก Surrounding Obstacle ลงบนสู่ พื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์.....	26
2.11 ตัวอย่างที่แสดงความเปลี่ยนแปลงของเงาที่ทอดจาก Surrounding Obstacle ลงบนสู่ พื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาอาคาร BIPV ในเวลา 14.30 น. วันหิมายัน (Winter Solstice).....	27
2.12 ตัวอย่างที่แสดงความเปลี่ยนแปลงของเงาที่ทอดจาก Surrounding Obstacle ลงบนสู่ พื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาอาคาร BIPV ในเวลา 15.30 น. วันหิมายัน (Winter Solstice).....	28
2.13 การแสดงตัวอย่างการเพิ่มขึ้นของข้อมูลในระดับ Level of Development ตั้งแต่ LOD100 ถึง LOD500.....	35
2.14 การแสดงตัวอย่างการเพิ่มขึ้นของข้อมูลในระดับ Level of Detail ของแบบจำลองสารสนเทศก่อสร้างตามการแบ่งระดับ AEC (UK) BIM Protocol.....	35
2.15 ตัวอย่างภาพจากโปรแกรม Autodesk Revit.....	36
2.16 ตัวอย่างภาพจากโปรแกรม ArchiCAD.....	37
2.17 ตัวอย่างภาพจากโปรแกรม MicroStation.....	37
2.18 ตัวอย่างภาพจากโปรแกรม Vectorwork.....	38
2.19 ส่วนหนึ่งของผังแม่บทของโรงพยาบาลนาวัง จ.หนองบัวลำภู.....	44
2.20 ส่วนหนึ่งของผังแม่บทของโรงพยาบาลหนองปรือ จ.กาญจนบุรี.....	44
2.21 ส่วนหนึ่งของผังแม่บทของโรงพยาบาลยี่งอ จ.นราธิวาส.....	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22 ภาพเชิงมโนทัศน์ (Conceptual Illustration) ของการวางอาคารหลักโดยทั่วไปของการขยายขนาดโรงพยาบาลระดับทุติยภูมิตะดับ 1 (GBD _{SE1}) โดยการใช้งานอาคาร Wards ขนาด 30 เตียง 1 หลัง.....	46
2.23 การวางอาคารหลักโดยทั่วไปของการขยายขนาดโรงพยาบาลระดับทุติยภูมิตะดับ 2 (GBD _{SE2}) โดยการใช้งานอาคาร Wards ขนาด 30 เตียง 2 หลัง.....	46
2.24 การวางอาคารหลักโดยทั่วไปของการขยายขนาดโรงพยาบาลระดับทุติยภูมิตะดับ 3 (GBD _{SE3}) โดยการใช้งานอาคาร Wards ขนาด 30 เตียง 3 หลัง.....	47
2.25 การวางอาคารหลักโดยทั่วไปของการขยายขนาดโรงพยาบาลระดับทุติยภูมิตะดับ 4 (GBD _{SE4}) โดยการใช้งานอาคาร Wards ขนาด 30 เตียง 4 หลัง.....	47
2.26 การวางอาคารหลักโดยทั่วไปของการขยายขนาดโรงพยาบาลระดับทุติยภูมิตะดับ 5 (GBD _{SE5}) โดยการใช้งานอาคาร Wards เป็นอาคารสูง.....	48
2.27 แผนภาพการกำหนดเขต (Zones) ต่างๆ และเส้นทางการสัญจรหลักของสถานบริการสุขภาพประเภทโรงพยาบาล.....	54
2.28 แผนภาพการกำหนดพื้นที่ใช้งานต่างๆ และการสัญจรของเจ้าหน้าที่ภายในสถานบริการสุขภาพประเภทโรงพยาบาล.....	55
2.29 แผนภาพการกำหนดพื้นที่ใช้งานต่างๆ และการสัญจรของผู้ป่วยและผู้รับบริการภายในสถานบริการสุขภาพประเภทโรงพยาบาล.....	56
3.1 อาคารผู้ป่วยนอก (OPD) เลขที่แบบ 3130/2536 กระทรวงสาธารณสุข.....	62
3.2 ผังพื้นของ GBD อาคารผู้ป่วยนอก (OPD) เลขที่แบบ 3130/2536 กระทรวงสาธารณสุข.....	63
3.3 อาคารพักผู้ป่วยใน เลขที่แบบ 8605 กระทรวงสาธารณสุข.....	64
3.4 ผังพื้นของ GBD อาคารพักผู้ป่วยใน เลขที่แบบ 8605 กระทรวงสาธารณสุข.....	64
3.5 แบบจำลองสารสนเทศ (BIM Model) LOD300 ของ GBD อาคาร OPD เลขที่แบบ 3130/2536 กระทรวงสาธารณสุข กลุ่มตัวอย่างอาคาร BIPV.....	68
3.6 BIM Model และเส้นสมมุติที่กึ่งกลางของ (a) อาคาร BIPV และ (b) อาคาร Surrounding Obstacle.....	68
3.7 Baseline Model (0° CW) (a) มุมมอง Layout Plan และ (b) มุมมอง Isometric.....	69
3.8 Baseline Model (0° CW) มุมมองจากรูปด้านทิศตะวันออก.....	69
3.9 ตัวอย่าง Baseline Model เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างอาคาร BIPV กับอาคาร Obstacle (a) 6.00 เมตร (b) 10.00 เมตร และ (c) 14.00 เมตร.....	70
3.10 ทิศทางการหมุนอาคารกลุ่มตัวอย่างทั้ง 8 ทิศ.....	71
4.1 ผลลัพธ์การประมวลผลจาก Automated BPS ของอาคารกลุ่มตัวอย่าง 0° CW.....	73
4.2 ตัวอย่างผลลัพธ์ของการประมวลผล 1 Simulation จาก Automated BPS ของอาคารกลุ่มตัวอย่าง 315° CW ที่ระยะห่าง 11 เมตร.....	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ผลลัพธ์จาก Automated BPS ของการทดลองจาก 8 Orientations และ 43 Distances มีจำนวนทั้งหมด 344 Simulations.....	74
4.4 Annual Cumulative Insolation ของทั้ง 8 Orientations.....	75
4.5 (a) การคำนวณความชันกราฟเส้นตรง (b) วิธีตรีโกณมิติ.....	75
4.6 ตัวอย่างเส้นกราฟ 135° CW แสดงช่วงความชันของเส้นโค้ง 3 ช่วง	76
4.7 Slope แบบละเอียดของกราฟ Annual Cumulative Insolation ของทั้ง 8 Orientations เมื่อพิจารณาแต่ละช่วงระยะ (Intervals) 42 ช่วง ของ 43 Distances.....	78
4.8 สรุปผลลัพธ์ของกลุ่ม A ₁ และกลุ่ม A ₂	82
4.9 สรุปผลลัพธ์ของกลุ่ม B.....	86
5.1 (a) 270° CW (PSE#1) (b) 90° CW (PSE#2) (c) 225° CW (PSE#3) (d) 135° CW (PSE#4).....	91
5.2 สรุปผลลัพธ์ทั้งหมดของแต่ละ Orientation ทั้ง 8 ทิศ.....	92
5.3 Orientations ที่มีศักยภาพสูงสุดของแต่ละช่วงระยะ Distance.....	94

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบบริการสุขภาพ อันเป็นหนึ่งใน 6 ด้านหลักของระบบบริการสาธารณสุขไทย ซึ่งเป็นกลไกภาครัฐที่มีหน้าที่รับผิดชอบโดยตรงด้านสุขภาพของประชาชนทั้งประเทศ 4 ด้านได้แก่ การรักษา การป้องกัน การส่งเสริม และการฟื้นฟู ให้ประชาชนมีสุขภาพที่ดี โดยระบบบริการสุขภาพได้กำหนดให้สถานบริการสุขภาพภาครัฐนั้นมี 4 ระดับ ได้แก่ บริการระดับปฐมภูมิ (Primary Care) บริการระดับทุติยภูมิ (Secondary Care) บริการระดับตติยภูมิ (Tertiary Care) และบริการระดับตติยภูมิระดับสูง (Excellence Center) โดยการให้บริการสุขภาพแต่ละระดับจะครบทั้ง 4 ด้านแต่มีความแตกต่างกันที่ระดับความซับซ้อนของการให้บริการ ตั้งแต่การให้บริการทางการแพทย์แบบทั่วไป จนถึงการให้บริการทางการแพทย์แบบเฉพาะทาง และตั้งแต่การบริการที่รองรับประชากรจำนวนน้อย จนถึงจำนวนมาก (กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ, 2559; คณะทำงานโครงการจัดทำแผนแม่บทด้านอาคารและสภาพแวดล้อม, 2559) โดยสถานบริการสุขภาพภาครัฐระดับทุติยภูมิ ซึ่งประกอบด้วยโรงพยาบาลชุมชนและโรงพยาบาลทั่วไปขนาดเล็ก มีจำนวน 780 แห่งทั่วประเทศ อันเป็นสถานบริการสุขภาพภาครัฐประเภทโรงพยาบาลที่มีขนาดเล็กที่สุดและมีจำนวนมากเป็นกลุ่มใหญ่ของประเทศ และยังเป็นโรงพยาบาลด่านแรกที่ใกล้ชิดประชาชนที่สุดของการให้บริการด้านสุขภาพตามนโยบายการสร้างหลักประกันสุขภาพถ้วนหน้า คุณภาพของอาคารสถานบริการสุขภาพกลุ่มนี้ จะส่งผลกระทบต่อประชาชนชาวไทยส่วนใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประชาชนผู้มีรายได้น้อยและอยู่ห่างไกลจากการบริการสุขภาพระดับสูง

อาคารสถานบริการสุขภาพภาครัฐระดับทุติยภูมินั้นส่วนใหญ่ถูกก่อสร้างโดยใช้แบบก่อสร้างมาตรฐาน (Generalizable Building Design: GBD) อันหมายถึงแบบก่อสร้างอาคารที่ถูกออกแบบด้วยแนวความคิด “แบบเดียว ใช้ก่อสร้างได้ทุกที่ (One Size Fits All)” โดยเมื่อถูกนำไปใช้ซ้ำในการก่อสร้างอาคารสถานบริการสุขภาพภาครัฐต่างๆ ที่ตั้งอยู่ในทุกภูมิภาคของประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งสถานบริการสุขภาพขนาดเล็กและขนาดกลางที่มีจำนวนมากและมีลักษณะการใช้สอยอาคารเป็นแบบทั่วไป การใช้ GBD มีประโยชน์ในการลดขั้นตอน ลดเวลา และลดการใช้กำลังคน รวมทั้งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนต่อหน่วยในกระบวนการออกแบบอาคาร และมีเป้าประสงค์สำคัญคือ เพื่อให้ GBD ถูกนำไปใช้ก่อสร้างทั่วทุกภูมิภาคของประเทศไทยได้อย่างสะดวก โดยช่างและผู้รับเหมาก่อสร้างท้องถิ่น ให้สามารถดำเนินการก่อสร้างได้โดยใช้วัสดุก่อสร้าง เทคโนโลยี เครื่องมือ และอุปกรณ์ ที่จัดหาได้ง่ายในท้องถิ่น และต้องมีต้นทุนในการก่อสร้างต่อตารางเมตรต่ำ (ณัฐสิทธิ์ สมบูรณ์วิทย์, 2552; สำนักบริหารการสาธารณสุข สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข, 2559; Somboonwit, 2011; Somboonwit และ Sahachaisaeree, 2012)

โดยทั่วไป การวางแผนสถานบริการสุขภาพโดยเฉพาะโรงพยาบาลระดับทุติยภูมิ ได้ถูกวางแผนให้สามารถขยายตัวเพื่อรองรับปริมาณผู้ป่วยได้เพิ่มขึ้นและให้บริการทางการแพทย์ที่มีความซับซ้อนเฉพาะทางได้มากขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงของบริบททางสังคม ตัวอย่างเช่น โรงพยาบาลขนาด 30 เตียงบางแห่ง สามารถที่จะขยายตัวได้จนเป็นโรงพยาบาลขนาด 120 เตียงได้ ซึ่งการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการตัดสินใจใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขยายตัวดังกล่าวสามารถทำได้โดยวางผังให้โรงพยาบาลมี GBD อาคารหลักที่ใช้ในการให้บริการทางการแพทย์ 2 ประเภทอาคาร (ไม่นับรวมอาคารสนับสนุนและอาคารพักอาศัย ได้แก่ อาคารซ่อมบำรุง อาคารโภชนาการ อาคารซักฟอก-จ่ายกลาง และอาคารพักเจ้าหน้าที่ ที่เป็นอาคารชั้นเดียวขนาดเล็ก และมีแบบที่หลากหลาย) คือ (1) อาคารผู้ป่วยนอก (Outpatient Department: OPD) ที่มีความสามารถให้บริการทางการแพทย์พื้นฐานได้ครบถ้วน 1 หลัง และ (2) อาคารพักผู้ป่วยใน (Wards) ขนาด 30 เตียงอีก 1 หลัง เมื่อโรงพยาบาลระดับทุติยภูมิมีการขยายตัวเพิ่มจาก 30 เตียง เป็น 60 เตียง 90 เตียง และ 120 เตียง โรงพยาบาลจะมีการเพิ่ม GBD อาคารพักผู้ป่วยใน จาก 1 หลัง เป็น 2 ถึง 4 หลัง เพื่อให้สามารถรองรับปริมาณผู้ป่วยในได้ตามเป้าหมายการขยายตัว (กองแบบแผน, 2547) ดังที่ได้แสดงการขยายตัวของโรงพยาบาลระดับทุติยภูมิ (รูปที่ 2.18 ถึงรูปที่ 2-21) โดยรายละเอียดของระดับในการขยายตัวของโรงพยาบาลระดับทุติยภูมิได้แจกแจงในหัวข้อ 2.4.3

เนื่องด้วยการเปลี่ยนแปลงด้านราคาที่ดินที่มีราคาแพง และมีการขยายตัวของเขตเมืองในทุกๆภูมิภาคของประเทศ ทำให้สถานบริการสุขภาพภาครัฐไม่สามารถสร้างอาคารและสิ่งปลูกสร้างต่างๆ ให้ขยายตัวไปในแนวราบได้สะดวกดังเช่นที่เคยเป็นมาในอดีตได้อีกต่อไป พื้นที่ที่ดินของสถานบริการสุขภาพต้องถูกใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด การขยายตัวของอาคารเพื่อรองรับความต้องการการใช้งานทางการแพทย์จึงเปลี่ยนแปลงโดยการก่อสร้างอาคารในที่ดินที่มีความสูงมากขึ้น ซึ่งเป็นการสร้างอาคารและสิ่งปลูกสร้างต่างๆ ให้มีพื้นที่ใช้สอยเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบต่อพื้นที่ฐานอาคาร (Building's Footprint) ในทางปฏิบัติคือการเพิ่มขึ้นอาคารให้มากขึ้น ทำให้ได้พื้นที่ใช้สอยมากขึ้นโดยไม่กระทบต่อการใช้พื้นที่ที่ดิน ซึ่งทำให้ต้องมีการเปลี่ยนรูปแบบการวางผังและการเลือกใช้ GBD เพื่อนำมาก่อสร้างในสถานบริการสุขภาพอย่างหลีกเลี่ยงไม่พ้น ดังที่ได้อธิบายรูปแบบการขยายตัวโดยการใช้แบบก่อสร้างมาตรฐานโรงพยาบาลระดับทุติยภูมิขยายตัวระดับ 5 (GBD_{SE5}) (หัวข้อที่ 2.4.3 และรูปที่ 2.22) (กองแบบแผน, 2015) และยังพบว่าสถานบริการสุขภาพภาครัฐ นั้นมักจะถูกก่อสร้างในที่ดินราชพัสดุ ที่ดินของรัฐบาล หรือในที่ดินที่ได้มาจากการบริจาคจากประชาชนหรือจากองค์กรต่างๆ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ที่ดินที่ได้รับบริจาคมานั้นมักมีรูปร่าง ขนาด การเข้าถึงจากถนนทางเข้าหลัก ทิศทางการทำมุมของที่ดิน รวมทั้งบริบทของสิ่งแวดล้อมรอบข้าง ที่มีหลากหลายและไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งทำให้สถานบริการสุขภาพจำนวนมากต้องก่อสร้างในที่ดินที่มีข้อจำกัดต่างๆ ในหลายบริบทที่ทำให้วางผังได้ยาก (Somboonwit, Boontore, & Rugwongwan, 2017)

โรงพยาบาลนั้นเป็นประเภทอาคารที่มีความสำคัญเพื่อการวินิจฉัย รักษาโรค และยังเป็นสถานที่ให้การพยาบาลผู้ป่วยที่มีความอ่อนแอทางกายและมักรวมถึงความอ่อนแอด้านจิตใจ ดังนั้นการใช้พลังงานของโรงพยาบาลนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญในการตอบสนองการให้บริการทางการแพทย์ และพลังงานนั้นต้องมีความสม่ำเสมอต่อเนื่องตลอดทั้ง 24 ชั่วโมงทุกวันไม่มีวันหยุด การมีปัญหาด้านคุณภาพของพลังงานไฟฟ้าจะส่งผลให้เกิดปัญหาแก่ผู้ป่วยในท้ายที่สุด แต่สิ่งที่เป็นเป้าหมายสำคัญของสถานบริการสุขภาพภาครัฐทุกแห่งทั่วประเทศคือการลดการใช้และเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน เช่นโดยการเลือกใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ประหยัดพลังงาน และการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมผู้ใช้อาคาร เป็นต้น รวมถึงการเลือกใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน ซึ่งหนึ่งในนั้นคือ พลังงานแสงอาทิตย์ อันนับเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ล้นเหลือที่สุด ไม่ลดน้อยลง และเป็นพลังงานสะอาด (Parida, Iniyan, & Goic, 2011; มณฑาสินี หอมหวาน, 2555) พลังงานที่ส่งมาจากดวงอาทิตย์ตกกระทบผิวเปลือกโลกนั้นมีปริมาณเฉลี่ยสูงถึง 90,000 - 120,000 terawatts ซึ่งเป็นปริมาณที่มากกว่าความต้องการใช้พลังงานของทั้งโลกถึงมากกว่า 7,000 เท่า (Blankenship, และคนอื่นๆ, 2011; เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Botkin และ Keller, 2011) ประเทศไทยเป็นประเทศที่ตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรและมีศักยภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากรังสีดวงอาทิตย์สูง โดยพบว่าประเทศไทยมีระดับของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปีสูงถึง 4-5 kW/ชั่วโมง/ตารางเมตร (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, n.d.; ชีวะเกตุ, 2543) พลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ดังกล่าวสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ ได้อย่างมากมาย รวมถึงการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) คืออุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนรังสีดวงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง PV โดยการนำ PV มาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ในอาคารแบบที่มีส่วนทางกายภาพเชื่อมต่อกับตัวอาคารมี 2 ประเภท ได้แก่ (1) PV แบบยึดเข้ากับอาคาร (Building Attached Photovoltaic: BAPV) หมายถึงการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV module) ยึดติดเข้ากับตัวอาคารด้วยโครงคร่าวและราง (Rack-mounted PV systems) และ (2) PV แบบผสานเข้ากับวัสดุอาคาร หรือ อาคารผสานเซลล์แสงอาทิตย์ (Building Integrated Photovoltaic: BIPV) นั้นหมายถึงการนำ PV module มาติดตั้ง เพื่อทดแทนหรือเป็นส่วนหนึ่งกับวัสดุอาคาร เช่น กระเบื้องหลังคา อุปกรณ์บังแดด กระจกในช่องเปิดอาคารหรือ Skylight และส่วนหน้าอาคาร (Façade) เป็นต้น โดยยังคงรักษาคุณสมบัติในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างครบถ้วน (Strong, 2011; Hall, 2014; Yang, 2015) ข้อได้เปรียบของ BIPV ที่มีเหนือ BAPV คือ BIPV นั้นถูกผสมเข้าไปอย่างกลมกลืนเป็นส่วนหนึ่งกับอาคาร สามารถที่จะก่อสร้างให้กลมกลืนไปกับการออกแบบอาคารโดยไม่เป็นส่วนเพิ่มหรือส่วนเกิน ด้านองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรม (Hall, 2014) นอกจากนี้ BIPV ซึ่งใช้ PV module ติดตั้งทดแทนวัสดุก่อสร้างอาคารปกติ ทำให้ลดการใช้วัสดุก่อสร้างและมีต้นทุนในการติดตั้งน้อยกว่า PV module แบบ BAPV เป็นการลดต้นทุนทั้งทางด้านแรงงาน ทั้งทางวัสดุก่อสร้าง ได้พลังงานสะอาดที่ไม่มีวันหมดมาใช้ในอาคาร รวมถึงยังเป็นการลดความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด (Peak Load) ของอาคารได้อีกด้วย (Peng, Huang, & Wu, 2011; Strong, 2011; Jelle, Breivik, & Røkenes, 2012) โดยพบว่าการติดตั้ง PV บริเวณหลังคา (Solar Rooftop PV Modules) นั้นมีประสิทธิภาพในการสร้างพลังงานจากรังสีอาทิตย์มากที่สุด และสามารถลดการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศภายในอาคาร บริเวณพื้นที่ใต้หลังคาได้สูงถึง 38% เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่เป็นวัสดุเปลือกอาคารที่สามารถลดการส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์สู่ภายในอาคารอีกด้วย (Dominguez, Kleissl, & Luvall, 2011; Kanters, 2015)

ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะถือว่าเป็นประเทศที่มีศักยภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานรังสีอาทิตย์ได้สูงก็ตาม แหล่งพลังงานนี้ยังไม่สามารถตอบสนองความต้องการใช้พลังงานของประเทศในรูปแบบของ การใช้ไฟฟ้าฐาน (Base Load) ซึ่งหมายถึงการจ่ายกระแสไฟฟ้าได้เสถียรต่อเนื่องทั้ง 24 ชั่วโมงในแต่ละวันได้ เนื่องจากการผลิตพลังงานจากรังสีอาทิตย์นั้นจะกระทำเฉพาะเวลากลางวันทั้งในรูปแบบของโซลาร์ฟาร์มและ BIPV และจะมีช่วงเวลาเฉลี่ยที่มีระดับความเข้มการแผ่รังสีอาทิตย์ที่สามารถสร้างพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพได้เพียง 5.04 ชั่วโมงต่อวัน แต่การผลิตพลังงานไฟฟ้าของ BIPV ในรูปแบบ Solar Rooftop PV นั้นสามารถทำให้อาคารสามารถผลิตไฟฟ้าใช้เองได้ในช่วงเวลาใช้ไฟฟ้าสูงสุด (Peak Load) ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ค่าไฟฟ้ามีราคาสูง ซึ่งการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานรังสีอาทิตย์นี้มีความเหมาะสมกับต้องการใช้พลังงานในรูปแบบ การใช้ไฟฟ้าแบบสุ่ม (Stochastic Load) ซึ่งเป็นรูปแบบการใช้ไฟฟ้าที่มีความไม่แน่นอน แต่มีความต้องการมากในช่วงเวลาสั้นๆ ไม่เสถียร และการใช้พลังงานรูปแบบนี้อาจก่อให้เกิดปัญหาแก่ระบบไฟฟ้าสาธารณะได้ เช่น อาจเกิดไฟฟ้าดับ (Blackout/Power Outage) เมื่อมีความต้องการการใช้ไฟฟ้าอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กะทันหันและมีปริมาณเกินพิกัด (Overload) ที่โรงไฟฟ้าจะสามารถจ่ายให้กับผู้ใช้ได้ (Ketjoy, 2012; การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2017) ซึ่งการใช้งานระบบ BIPV นั้นเป็นทั้งการป้องกัน Overload อันเนื่องจาก Stochastic Load และยังมีการสูญเสียพลังงานต่ำมากเมื่อเทียบในระบบสายส่งไฟฟ้าจากโซลาร์ฟาร์มที่มีการสูญเสียพลังงานสูงถึง 6% (IEA Statistics, 2014)

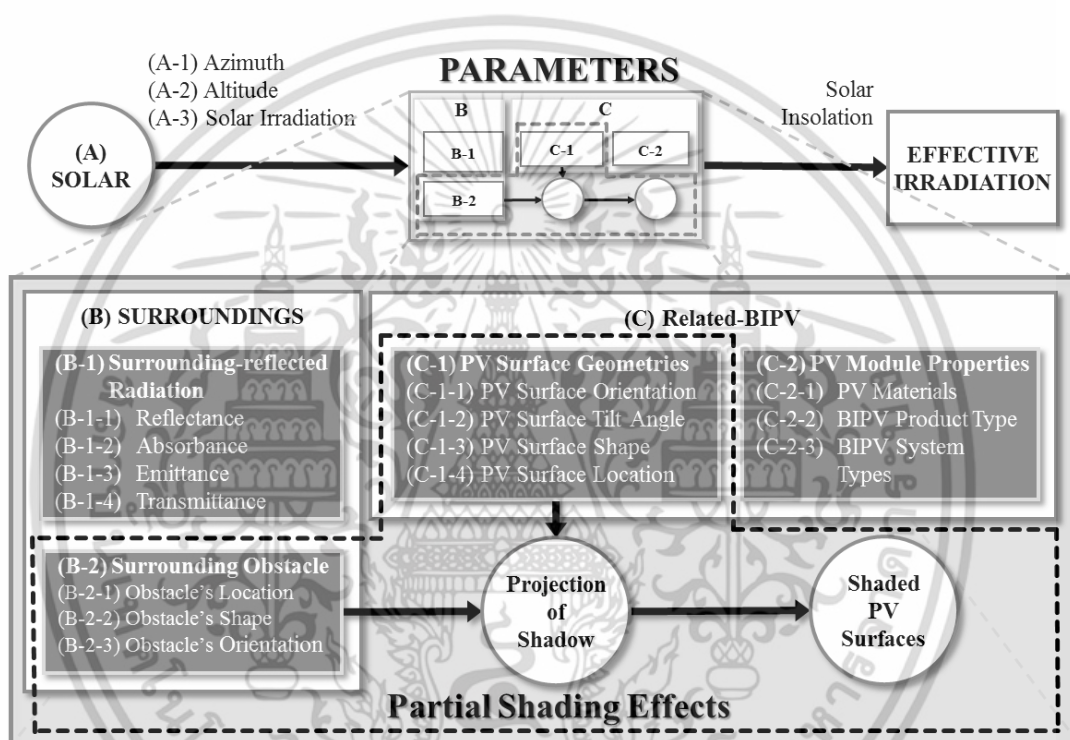
ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556 เป็นต้นมา รัฐบาลไทยได้มีนโยบายต่างๆ เพื่อผลักดันและสนับสนุนการใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานแสงอาทิตย์ ได้แก่ แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ. 2555 – 2564) (DEDE, 2017) โครงการนำร่องการส่งเสริมติดตั้งโซลาร์รูฟเสรี (กรมประชาสัมพันธ์, 2015; คณะกรรมการการพลังงาน สภานิติบัญญัติแห่งชาติ, 2017) คำสั่งนายกรัฐมนตรีเพื่อเร่งรัดการติดตั้งโซลาร์รูฟท็อปในหน่วยงานราชการต่างๆ ทั่วประเทศ (Energy News Center, 2016) โครงการ GREEN & CLEAN Hospital อันเป็นโครงการภายใต้ยุทธศาสตร์ชาติระยะ 20 ปี ตามนโยบายการปฏิรูปประเทศไทยของรัฐบาล (สำนักงานอนามัยสิ่งแวดล้อม, 2016; กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2017) โดยรายละเอียดของนโยบายส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในอาคารภาครัฐและรูปแบบของการลงทุนติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์สำหรับอาคารภาครัฐ ได้ถูกอธิบายในหัวข้อที่ 2.4.4

ถึงแม้ว่าการพัฒนา BIPV ในอาคารภาครัฐด้วยการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา (Solar Rooftop PV) นั้นเป็นการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนที่ได้รับการผลักดันและสนับสนุนด้านการลงทุนหลายทางทั้งจากทางภาครัฐและภาคเอกชนก็ตาม แต่การผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยพลังงานแสงอาทิตย์นั้นมีความไม่แน่นอนและมีความเสี่ยงที่จะทำให้ระบบนั้นไม่สามารถบรรลุประสิทธิภาพได้ตามวัตถุประสงค์ได้ เช่น ความเสี่ยงจากภัยธรรมชาติ ความเสี่ยงจากการออกแบบ การติดตั้ง และการทำงานของระบบ BIPV ที่ผิดพลาด เป็นต้น ซึ่งความไม่แน่นอนและความเสี่ยงนั้นๆ จะส่งผลให้อาคารเหล่านั้นเป็น BIPV ที่ไม่มีประสิทธิภาพได้ (จุฬารัตน์ จำปีรัตน์, 2558; Lam, Close, & E.W.C., 2006; Celik, Karatepe, Silvestre, Gokman, & Chouder, 2015; Yang, 2015)

หนึ่งในความไม่แน่นอนและความเสี่ยงของระบบ BIPV นั้นคือธรรมชาติของ PV ซึ่งผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยตรงจากรังสีอาทิตย์ นั้นมีความอ่อนไหวต่อระดับความเข้มรังสีอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในธรรมชาติเป็นอย่างมาก ส่งผลกระทบต่อการออกแบบระบบ PV ที่ต้องสร้างความสมดุลของปริมาณไฟฟ้าระหว่างด้านการผลิตและการใช้ จึงจะทำให้ระบบ BIPV นั้นเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพได้ (Yoo, 2011; Celik, Karatepe, Silvestre, Gokman, & Chouder, 2015) ผลกระทบที่สำคัญและมีความซับซ้อนมากที่สุดสิ่งหนึ่งต่อประสิทธิภาพของระบบ BIPV คือ ผลกระทบจากการโดนบังเงาบางส่วน (Partial Shading Effects: PSE) หมายถึง PV Modules ถูกบังไม่ให้ได้รับลำแสงอาทิตย์ตกกระทบลงบนพื้นผิว PV โดยตรง อันเกิดจาก Parameters 2 ตัว ได้แก่ (1) เรขาคณิตของพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Surface Geometry) หมายถึง PV Modules บังตัวเอง และ (2) สิ่งกีดขวางแวดล้อม (Surrounding Obstacle) หมายถึง PV Modules ถูกบังจากวัตถุข้างเคียงเช่นอาคาร ต้นไม้ เป็นต้น ซึ่ง PSE นั้นไม่เพียงส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ BIPV เป็นอย่างมากเท่านั้น แต่ยังส่งผลให้ผู้ออกแบบระบบสามารถประเมินสมรรถนะของระบบ BIPV ได้ยาก เนื่องจาก PSE นั้น มีความซับซ้อน ไม่สม่ำเสมอ และมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบ BIPV ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมที่สิ่งปลูกสร้างหนาแน่น ดังเช่นในสถานบริการสุขภาพภาครัฐ ที่แต่ละแห่งจะไม่ได้มีอาคารตั้งอยู่แต่เพียงหลังเดียว แต่จะประกอบด้วยอาคารน้อย-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใหญ่ สูง-เตี้ย ประกอบกันเป็นสถานบริการสุขภาพที่สมบูรณ์ PV Modules ที่ถูกบังเงาบางส่วนจะได้รับรังสีน้อยกว่า จึงสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้น้อยกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่โดนบังเงาเนื่องจากสิ่งบังเงาแวดล้อมจะกั้นไม่ให้ Beam Radiation ซึ่งเป็นองค์ประกอบของการแผ่รังสีอาทิตย์ (Solar Radiation) ที่มีระดับพลังงานสูงสุด ตกลงบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรง นอกจากนี้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้รับผลกระทบจาก PSE อาจเกิดความเสียหายกับตัวแผง เนื่องจากผลกระทบจากภาวะจุดร้อน (Hot Spot Effect) อีกด้วย PSE นั้นอาจทำให้ประสิทธิภาพการสร้างพลังงานของระบบ BIPV ลดลงไปได้ถึง 20% (Ikedi, Okoroh, Dean, & Omer, 2010) นอกจากนี้ตัวอาคารเองอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการบังเงาบนระบบ BIPV ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการสร้างพลังงานของระบบ BIPV ลดลงไป 5 - 10% (Yoon, Song, & Lee, 2011)



รูปที่ 1.1 กรอบแนวคิดแสดงความเชื่อมโยง Parameter ของ Partial Shading Effects ที่ส่งผลกระทบต่อ Solar Insolation บนพื้นผิวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นถึงสาเหตุของ PSE ซึ่งได้รับอิทธิพลจาก Parameter สองกลุ่มคือ (B-2) Surrounding Obstacle และ (C-1) PV Surface Geometry โดยพบว่ามีการศึกษาเกี่ยวกับ PV Surface Geometry เป็นจำนวนมาก (Norton, et al., 2011; Yoo, 2011; Alam, Coors, Zlatanova, & Oosterom, 2012; Celik, Karatepe, Gokman, & Silvestre, 2013; Masa-bote & Caamaño-Martín, 2014; Kanters & Wall, 2014; Eke & Demircan, 2015; Hong, Lee, Koo, Jeong, & Kim, 2017; Tripathy, Yadav, Sadhu, & Panda, 2017; Zomer & Rüther, 2017) แต่การศึกษาเรื่อง Surrounding Obstacle ที่มีอิทธิพลต่อ PSE นั้นยังไม่มีการศึกษาเท่ากลุ่มแรก (Celik, Karatepe, Gokman, & Silvestre, 2013; Kanters & Wall, The impact of urban design decisions on net zero energy solar buildings in Sweden, 2014; Kanters, Planning for เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

solar buildings in urban environments: An analysis of the design process, methods and tools, 2015) ดังนั้น คำถามหลักของการวิจัยคือ Surrounding Obstacle มีผลกระทบต่อ Solar Insolation บน PV Surfaces หรือไม่? และส่งผลกระทบต่ออย่างไร? โดยการศึกษาเน้นไปที่ Surrounding Obstacle ประเภทอาคารซึ่งมีตัวแปรสามตัวหลัก อันได้แก่ Obstacle's Location, Obstacle's Shape และ Obstacle's Orientation ที่เป็นตัวกำหนดการฉายเงาลงสู่พื้นผิวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Surrounding Obstacle ประเภทอาคาร ที่มีความสัมพันธ์กับการขยายตัวแนวราบโดยการสร้างอาคารข้างเคียงที่มีความสูงมากกว่าของสถานบริการสุขภาพอันเป็นสาเหตุของ PSE บน BIPV ที่มีความสูงน้อยกว่า ดังที่แสดงในบทที่ 2 รูปที่ 2.21 ถึง 2.25

1.2 ความมุ่งหมายของการศึกษา

สิ่งสำคัญที่เป็นตัวกำหนดรูปทรงและพื้นที่ของเงาที่ทอดทับไปบน PV Surfaces แล้วทำให้เกิด Partial Shading Effects คือ PV Surface Geometry และ Surrounding Obstacle ที่เป็นสิ่งกีดขวาง Beam Radiation ให้ไม่สามารถตกกระทบบนพื้นผิว PV ได้อย่างเต็มที่ โดยรังสีอาทิตย์จะฉายผ่านและกระทบ Surrounding Obstacle และตกกระทบบน PV Surfaces โดยสิ่งที่กำหนดรูปทรงและพื้นที่ของเงาที่ทอดลงบน PV Surfaces คือ Parameter สามตัวหลักของ Surrounding Obstacle ประเภทอาคารอันได้แก่ Obstacle's Location, Obstacle's Shape และ Obstacle's Orientation

ทั้งนี้ การศึกษานี้ไม่ได้ทำการศึกษาตัวแปรประเภท Obstacle's Shape เนื่องจากผลกระทบที่เกิดจาก Shape ของ Surrounding Obstacle ที่เป็นประเภทอาคารนั้นส่วนใหญ่อยู่นอกเหนืออำนาจของเจ้าของอาคาร BIPV หรือ Shape ของอาคารเหล่านั้น ได้ถูกกำหนดหน้าที่การใช้งานไว้อย่างชัดเจนแล้ว รวมถึงรูปลักษณ์ทางความสวยงามไว้อยู่แล้ว จึงเป็นการยากที่จะดำเนินการรีดถอนหรือดัดแปลง รวมทั้งการศึกษาก่อสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคารของ Obstacle's Shape ขัดแย้งกับรูปแบบอาคาร Obstacle ที่ถูกกำหนดไว้แล้ว ซึ่งส่งผลทำให้ไม่สามารถเข้าไปจัดการป้องกันไม่ให้เกิด Partial Shading Effects ได้แต่ประการใด ดังนั้นการศึกษานี้จึงไม่ได้ศึกษา Obstacle's Shape ด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวไป และมุ่งเน้นในการศึกษา Obstacle's Location และ Obstacle's Orientation

ตำแหน่งของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Location) ประกอบด้วยจุดในพิกัดคาร์ทีเซียนสามมิติ (Three Dimensional Cartesian Coordinates) ที่มีปฏิสัมพันธ์กับ BIPV ผ่านทางความเป็นตัวแทน (Proxy) คือ ระยะห่างของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Distance) อันหมายถึง ระยะห่างระหว่างอาคารสิ่งกีดขวางแวดล้อมกับอาคาร BIPV และการวางทิศทางของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Orientation) อันหมายถึงทิศ (Compass Directions) ที่อาคารสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Surrounding Obstacle) วางตัวสัมพันธ์กับอาคาร BIPV โดยหันหน้าอาคารทั้งสองไปในทิศเดียวกัน หรือที่สามารถอธิบายได้อีกนัยหนึ่งคือ การวางทิศทางของสิ่งกีดขวางแวดล้อมที่สัมพันธ์กับการวางทิศทางของอาคาร BIPV นั่นเอง ซึ่งเห็นได้ว่าตำแหน่งการวางอาคาร BIPV ให้มีความเหมาะสมกับตำแหน่งของการวางอาคารสิ่งกีดขวางแวดล้อม นั้นมีความซับซ้อนและเป็นอุปสรรคสำหรับผู้ออกแบบอาคาร BIPV และผู้วางผังบริเวณอาคาร ในการสร้างทางเลือกที่ดีที่สุดใ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานระบบเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีความคุ้มค่าสูงสุด (Kanters & Wall, 2014; Kanters, 2015; Ning, et al., 2017)

ดังนั้นคำถามหลักของการวิจัย (Research Questions) นี้คือ

ปัจจัยด้านสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Surrounding Obstacle Parameter) ส่งผลต่อศักยภาพการสร้างพลังงานของ BIPV อย่างไร?

1.3 วัตถุประสงค์ (Objectives)

วัตถุประสงค์หลักของการวิจัยนี้มีสองข้อหลักดังนี้

1.3.1 เพื่อสร้างสถานการณ์จำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลจาก Surrounding Obstacle Parameter ประเภทอาคารที่สูงกว่าอาคาร BIPV ในตัวแปรประเภทการวางทิศทางของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Orientation) และระยะห่างของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Distance) ที่มีผลต่อปริมาณการรับความเข้มรังสีอาทิตย์ในหนึ่งหน่วยเวลา (Solar Insolation) ของอาคารผืนเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา (Rooftop BIPV)

1.3.2 เพื่อสร้างแนวทางการวางผังอาคาร (Layout Planning) อันเป็นตัวแทนของอาคาร BIPV ที่ตั้งอยู่ใกล้สิ่งกีดขวางแวดล้อมประเภทอาคาร (Building-Surrounded Obstacle) ที่มีความสูงมากกว่าอาคาร BIPV

1.4 สมมุติฐานของการศึกษา

การศึกษานี้มีสมมุติฐานของการศึกษา 2 ข้อ ได้แก่

สมมุติฐานข้อที่ 1 คือ การวางทิศทางของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Orientation) มีผลกระทบต่อ Solar Insolation ของอาคาร BIPV

สมมุติฐานข้อที่ 2 คือ ระยะห่างของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Distance) มีผลกระทบต่อ Solar Insolation ของอาคาร BIPV

1.5 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

1.5.1 พลังงานแสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์ และอาคารผืนเซลล์แสงอาทิตย์

1.5.2 ผลกระทบจากการโดนบังเงาบางส่วน (Partial Shading Effects) ของอาคารผืนเซลล์แสงอาทิตย์ (BIPV) เนื่องจากสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Surrounding Obstacle)

1.5.3 อาคารผืนเซลล์แสงอาทิตย์ (BIPV) กับระบบสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคาร (Building Performance Simulation: BPS)

1.5.4 อาคารสถานบริการสุขภาพภาครัฐในประเทศไทย

1.5.5 การวางผังอาคารสถานบริการสุขภาพภาครัฐในประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยนี้เป็น การวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยใช้วิธีการทางวิทยาศาสตร์ที่มุ่งเน้นการศึกษาความเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เกี่ยวข้องภายใต้เงื่อนไขที่มีการควบคุม โดยกระบวนการวิจัย โดยมีขอบเขตของการวิจัยดังนี้

1.6.1 ขอบเขตด้านแนวความคิดและทฤษฎี ประกอบด้วย ทฤษฎีด้านเรขาคณิตสุริยะ (Solar Geometry) แนวคิดด้านเทคนิคเซลล์แสงอาทิตย์ แนวคิดด้านอาคารผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ แนวคิดด้าน Partial Shading Effects แนวคิดด้านกระบวนการออกแบบแบบบูรณาการ (Integrated Design Process) แนวคิดด้านระบบแบบจำลองสารสนเทศ แนวคิดด้านระบบตรวจวัดสมรรถนะอาคาร แนวคิดด้านตรวจวัดสมรรถนะอาคารแบบอัตโนมัติ แนวคิดด้านระบบสุขภาพภาครัฐของประเทศไทย และ แนวคิดด้านอาคารและสภาพแวดล้อมสถานบริการสุขภาพในประเทศไทย

1.6.2 ขอบเขตด้านตัวแปร

1.6.2.1 ตัวแปรอิสระ ได้แก่ การวางทิศทางของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Orientation) และ ระยะห่างของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Distance)

1.6.2.2 ตัวแปรตาม ได้แก่ ปริมาณการรับความเข้มรังสีอาทิตย์ในหนึ่งหน่วยเวลารวมต่อปี (Annual Cumulative Insolation) ของอาคาร BIPV

1.6.3 ขอบเขตด้านประชากรและการเลือกตัวอย่างเพื่อเป็นกรณีศึกษาในงานวิจัย การวิจัยนี้ศึกษาการใช้แบบก่อสร้างมาตรฐานโรงพยาบาลระดับตติยภูมิขยายตัวระดับ 5 (GBD_{SE5}) ดังรายละเอียดในหัวข้อ 2.4.3 ซึ่งประกอบด้วย 2 อาคาร (รูปที่ 2.6) เนื่องจากมีความเป็นตัวแทนได้แก่ GBD อาคาร OPD เลขที่แบบ 3130/2536 (รูปที่ 3.1) ซึ่งมีการใช้งาน 47.50% ของ GBD_{SE5} และอาคารพักผู้ป่วยใน เลขที่แบบ 8605 (รูปที่ 3.3) ซึ่งมีการใช้งาน 91% ของ GBD_{SE5}

1.6.4 ขอบเขตด้านสถานที่ในการสร้างสถานการณ์จำลอง

สถานที่ตั้งอาคารเพื่อทำการทดลอง จังหวัดกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ซึ่งตั้งอยู่ ณ พิกัด 13°เหนือ 100°30'ตะวันออก อันเป็นตัวแทนของตำแหน่งกึ่งกลางของประเทศไทย มีความเป็นตัวแทนเรขาคณิตของแสงอาทิตย์ (Solar Geometry) ของประเทศไทย นอกจากนั้นระดับการฉายรังสีดวงอาทิตย์ (Solar Irradiation) ของกรุงเทพมหานครนั้นมีค่าเฉลี่ย 2,181.25 kWh/m²/วัน ที่มีความใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของทั้งประเทศไทยคือ 2,181.42 kWh/m²/วัน (DEDE, 2550; วิทยา ยงประยูร และ วศินวิโรจน์ เนติศักดิ์, 2552) สามารถเป็นตัวแทนของตำแหน่งอื่นๆ ในประเทศไทยได้ (Exell & Saricali, Solar radiation tables for Thailand, 1975; Exell, The solar radiation climate of Thailand, 1976; Janjai, 2012; Waewsak, Chancham, Mani, & Gagnon, 2014)

1.7 ข้อตกลงเบื้องต้น (Assumptions) และข้อจำกัดของการศึกษา

1.7.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ระบบสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคาร (BPS Application) นั้นมีความถูกต้องเที่ยงตรง สามารถให้ผลลัพธ์ของการทดลองที่เป็นจริง เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้ไม่มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และไม่ได้ดำเนินการศึกษาเพื่อค้นหาคำตอบด้านความถูกต้องเที่ยงตรงของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.7.2 โครงการติดตั้ง PV System ในอาคารสถานบริการสุขภาพ อาจติดตั้งบนหลายอาคารในโครงการให้เป็น BIPV หรือใช้การติดตั้งแบบ BAPV หรือแบบแผงตั้งกลางแจ้ง เช่น หลังคาลานจอดรถ เป็นต้น เพื่อให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ในปริมาณที่ต้องการ แต่การวิจัยนี้ศึกษาเพียงอาคาร BIPV ที่มีความสูงอาคารน้อยกว่า Obstacle ที่เป็นประเด็นปัญหาของการศึกษาเท่านั้น

1.7.3 การวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาประสิทธิภาพด้านพลังงานของอาคาร ได้แก่ การใช้พลังงานภายในอาคาร และประสิทธิภาพด้านพลังงานของอาคารที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการติดตั้ง PV Modules ประเภท Solar Rooftop ที่ทำให้การส่งผ่านพลังงานความร้อนจากหลังคาเนื่องจากรังสีอาทิตย์เปลี่ยนไป (Dominguez, Kleissl, และ Luvall, 2011)

1.7.4 เพื่อเป็นการจำกัดอิทธิพลของ PV Properties รายละเอียดได้ถูกกล่าวถึงในในบทที่ 2 ข้อที่ 2.1.2 โดยการศึกษาที่ใช้ PV ประเภทเดียวกันทุก Simulation เพื่อให้สามารถควบคุมผลลัพธ์และสามารถเปรียบเทียบได้

1.7.5 การศึกษานี้ไม่ได้ศึกษาอาคารสนับสนุนและอาคารพักอาศัย ได้แก่ อาคารซ่อมบำรุง อาคารโภชนาการ อาคารซักฟอก-จ่ายกลาง อาคารพักเจ้าหน้าที่ รวมถึงอาคารอุบัติเหตุและฉุกเฉิน สำหรับการขยายตัวจากโรงพยาบาลชุมชนขนาดเล็กเป็นโรงพยาบาลทั่วไปขนาดเล็ก เนื่องจากอาคารดังกล่าวทั้งหมดเป็นอาคารชั้นเดียว มีความสูงน้อย บางหลังมีขนาดเล็ก และอาคารดังกล่าวเหล่านี้มีแบบที่หลากหลาย ไม่มีการใช้แบบอาคารใดแบบหนึ่งเป็นกลุ่มใหญ่ ซึ่งอาคารเหล่านี้ไม่มีผลต่อ BIPV ด้าน Partial Shading Effects แต่อย่างไร (กองแบบแผน, 2547; Celik, Karatepe, Silvestre, Gokman, และ Chouder, 2015; Zomer และ Rüther, 2017)

1.8 ขั้นตอนของการศึกษา

1.8.1 ทบทวนวรรณกรรมในทฤษฎี แนวความคิด และเทคนิค ที่เกี่ยวข้องดังที่ระบุไว้ในข้อที่ 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

1.8.2 กำหนดอาคารกลุ่มตัวอย่างของการศึกษา ที่ประกอบด้วย อาคาร BIPV และอาคาร Surrounding Obstacle

1.8.3 สร้างแบบจำลองสารสนเทศ (BIM Modeling) อาคารกลุ่มตัวอย่าง ดังต่อไปนี้

1.8.3.1 สร้างแบบจำลองสารสนเทศ อาคารผสานเซลล์แสงอาทิตย์ (BIPV) มีระดับรายละเอียดของแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Level of Development: LOD) LOD300

1.8.3.2 สร้างแบบจำลองสารสนเทศ สิ่งกีดขวางแวดล้อม (Surrounding Obstacle) มีระดับรายละเอียดของแบบจำลองสารสนเทศอาคาร LOD200

1.8.4 สร้างสิ่งแวดล้อมดิจิทัล (Digital Environment) ในโครงการแบบจำลองสารสนเทศ (BIM Project) กำหนดตำแหน่งพิกัดบอกตำแหน่งบนพื้นโลก (Geographic Coordinate System) และกำหนดข้อมูลสภาพภูมิอากาศ (Weather Data) เพื่อใช้ในการจำลองสมรรถนะอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.8.5 นำเข้าแบบจำลองสารสนเทศของกลุ่มตัวอย่าง (BIM Models) เข้าสู่สิ่งแวดล้อมดิจิทัล จัดวาง BIM Models อาคาร BIPV และอาคาร Surrounding Obstacle ใน BIM Project

1.8.6 ดำเนินการทดลองด้วย Automated BPS รวบรวมผลลัพธ์และวิเคราะห์ผล

1.8.7 สรุปผลและเสนอแนะ

1.9 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.9.1 ได้ทราบถึงอิทธิพลของปัจจัย Partial Shading Effects ที่มีต่อศักยภาพการผลิตพลังงานของ BIPV แบบ Rooftop ของอาคารโรงพยาบาลภาครัฐระดับทุติยภูมิ

1.9.2 ได้แนวทางการประยุกต์ใช้ Automated BPS เพื่อสนับสนุนกระบวนการวางผังอาคารสถานบริการสุขภาพภาครัฐในประเทศไทย

1.9.3 ได้แนวทางการวางผังอาคาร อันเป็นตัวแทนของ BIPV ที่จำเป็นต้องตั้งอยู่ใกล้ Building-Surrounded Obstacle ที่มีความสูงมากกว่าอาคาร BIPV

1.9.4 ได้แนวทางสนับสนุนการตัดสินใจระดับนโยบาย ด้านการสนับสนุนการติดตั้ง PV Systems ประเภท Solar Rooftop สำหรับอาคารภาครัฐเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในสถานการณ์จริง

1.10 นิยามศัพท์สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

1.10.1 อาคารผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ (Building Integrated Photovoltaic: BIPV) หมายถึง การนำผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ (PV Products) มาติดตั้ง เพื่อเป็นส่วนหนึ่งขององค์ประกอบเปลือกอาคาร เช่น ผนังอาคาร กระจกเบื้องหลังคา อุปกรณ์บังแดด กระจกในช่องเปิดอาคารหรือหลังคาอาคาร เป็นต้น โดยยังคงรักษาคุณสมบัติในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างครบถ้วน (Strong, 2011; Jelle, Breivik, และ Røkenes, 2012; Hall, 2014; Yang, 2015)

1.10.2 ผลกระทบจากการโดนบังเงาบางส่วน (Partial Shading Effects) หมายถึง การที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Modules / Arrays) ถูกสิ่งบังเงาแวดล้อม (Surrounding Obstacles) เช่น อาคารข้างเคียง ต้นไม้ เป็นต้น กั้นไม่ให้ ลำแสงอาทิตย์ (Beam Radiation) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของการแผ่รังสีอาทิตย์ (Solar Radiation) ที่มีระดับพลังงานสูงสุด ตกลงบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรง เมื่อ PV Modules ได้รับผลกระทบจากการโดนบังเงาบางส่วน ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบ PV นั้นๆ จะมีรูปแบบที่ไม่เสถียรด้วยการผลิตพลังงานสูงสุดที่ไม่สม่ำเสมอ (Multiple Peaks) และจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของ PV System ในภาพรวมลดลง (Kanters, Planning for solar buildings in urban environments: An analysis of the design process, methods and tools, 2015; Kanters & Wall, The impact of urban design decisions on net zero energy solar buildings in Sweden, 2014; Lin, Chai, & Ay, 2017; Ning, et al., 2017)

1.10.3 สิ่งกีดขวางแวดล้อม (Surrounding Obstacle) หมายถึง วัตถุอันได้แก่ อาคาร ต้นไม้ เสา ฯลฯ ที่มีอยู่ไม่ว่าจะอยู่ในพื้นที่ดินเดียวกันหรือคนละผืนกับอาคาร BIPV ซึ่งวัตถุนั้นกั้นไม่ให้ Beam Radiation ตกลงบน PV Surfaces โดยตรง (Yoon, Song, & Lee, 2011; Celik, Karatepe, Gokman, & Silvestre, 2013)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.10.4 การวางทิศทางของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Orientation) หมายถึง ทิศทางการหันของด้านหน้าอาคารของ Surrounding Obstacle ที่หันไปทางเดียวกับทิศทางการหันด้านหน้าอาคารของอาคาร BIPV

1.10.5 ระยะห่างระหว่างสิ่งกีดขวางแวดล้อมกับ BIPV (Obstacle's Distance) หมายถึง ระยะห่างจากขอบนอกสุดของอาคาร BIPV กับ Surrounding Obstacle ที่ BIPV กับ Surrounding Obstacle หันหน้าอาคารไปทางทิศเดียวกันตาม Aligned Axes

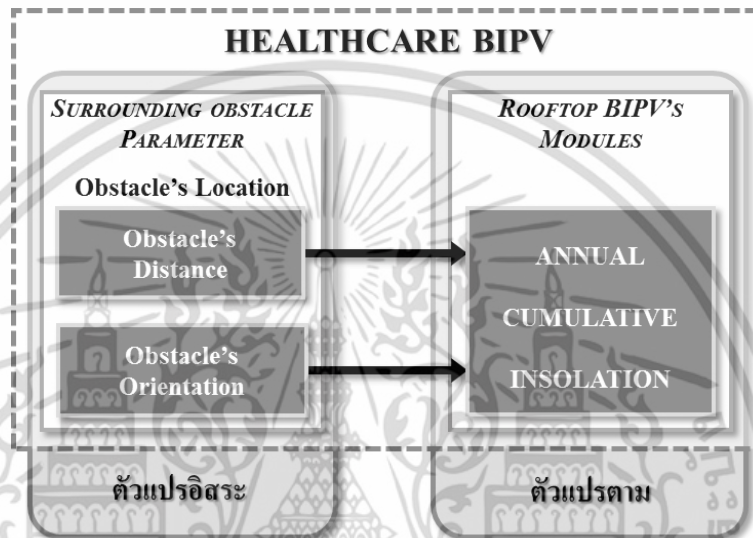
1.10.6 ศัพท์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย ดังนี้

- การแผ่รังสีแสงอาทิตย์ทั้งหมด (Total Solar Radiation)
- ลำแสงอาทิตย์ (Beam Radiation)
- รังสีกระจายจากท้องฟ้า (Diffuse Radiation)
- รังสีสะท้อนจากสภาพแวดล้อมล้อมรอบ (Surrounding-Reflected Radiation)
- การสะท้อนจากสภาพแวดล้อม (Surrounding Reflectance)
- การดูดซับรังสี (Absorbance)
- การแผ่รังสี (Emittance)
- การส่งผ่านพลังงาน (Transmittance)
- เรขาคณิตของแสงอาทิตย์ (Solar Geometry)
- มุมทิศ (Azimuth)
- มุมระดับความสูง (Altitude Angle)
- การแผ่รังสีอาทิตย์ (Solar Radiation)
- การฉายรังสีดวงอาทิตย์ (Solar Irradiation)
- ปริมาณการรับรังสีอาทิตย์ในหนึ่งหน่วยเวลา (Solar Insolation)
- ความเข้มรังสีอาทิตย์ (Solar Radiation)
- การฉายรังสีอาทิตย์ที่เกิดประสิทธิผล (Effective Irradiance)

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากที่ได้กล่าวไปในบทที่ 1 ที่ได้กล่าวถึงคำถามการวิจัยคือ Parameter ด้าน Surrounding Obstacle คือ Obstacle's Distance และ Obstacle's Orientation นั้นส่งผลกระทบต่อ Solar Insolation บน PV Surfaces อย่างไร จึงสามารถสรุปกรอบการวิจัยได้ดังนี้



รูปที่ 2.1 กรอบแนวคิดการวิจัย

2.1 พลังงานแสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์ และอาคารผสมแสงอาทิตย์

2.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV)

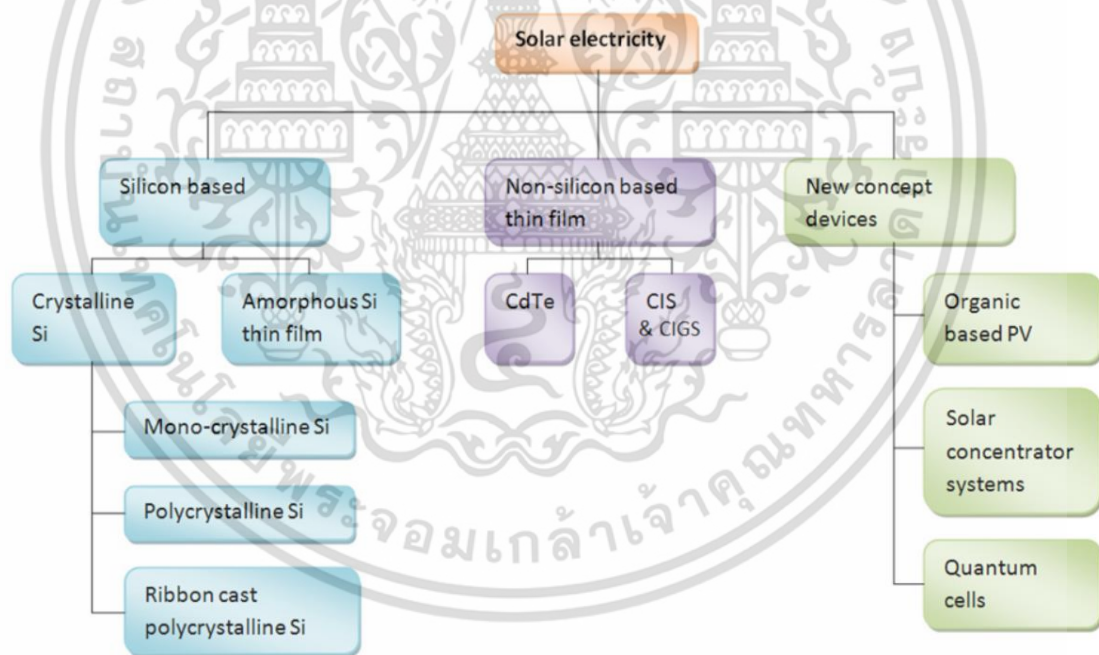
เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) คืออุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนรังสีดวงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current: DC) ได้โดยตรง โดยเซลล์แสงอาทิตย์นับเป็นสิ่งประดิษฐ์ อิเลคทรอนิกส์เชิงแสง (Optoelectronics) (สามารถ รุกพล, 2555) ซึ่งผลิตขึ้นมาจาก สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น Silicon เป็นต้น โดยมีหลักการทำงานคือ เมื่อมีรังสีดวงอาทิตย์มากระทบกับ เซลล์แสงอาทิตย์ จะส่งผลให้เกิดกระบวนการสองขั้นตอนที่ต่อเนื่องกัน คือ กระบวนการดูดซับรังสี โดยวัสดุที่เป็น Semiconductor จะดูดซับพลังงานจากรังสีอาทิตย์ ทั้งที่เป็นแสง และรังสีที่อยู่ในช่วง ความยาวคลื่น Infrared ไว้ และ กระบวนการกระจายพลังงาน ที่ดูดซับไว้กระตุ้นให้ Electron ใน สาร Semiconductor หลุดออกจากวงโคจรและเคลื่อนที่อย่างอิสระ การเคลื่อนที่หรือการไหลของ Electron นั้นก็คือการไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อนำหน้าสัมผัสที่เป็นโลหะติดตั้งที่ผิวของเซลล์ แสงอาทิตย์ จะสามารถนำกระแสไฟฟ้ามาใช้งานได้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, n.d.; Lau, 2015)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างพลังงานไฟฟ้าจากรังสีดวงอาทิตย์ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์นั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ ได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ การเชื่อมต่อทางเครื่องกลและระบบไฟฟ้า อุปกรณ์หรือรายปี รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมกระแสไฟฟ้าที่เป็นผลผลิตของระบบ (Parida, Iniyana, & Goic, 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 % (Solar-is-Future.com, 2016)

2.1.2 วัสดุเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Materials)

เซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถเปลี่ยนรังสีดวงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ต่อเมื่อมีรังสีดวงอาทิตย์มากระทบกับ วัสดุดูดซับแสง (Light Absorbing Materials) (Parida, Iniyana, & Goic, 2011) ที่ถูกติดตั้งอยู่ในเซลล์แสงอาทิตย์ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.1 อันได้แก่



รูปที่ 2.2 เทคโนโลยีวัสดุเซลล์แสงอาทิตย์ ปรับจาก Jelle, Breivik, & Røkenes (2012)

2.1.2.1 ซิลิคอนรูปผลึก (Crystallized Silicon) ชนิด ผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon / Monocrystalline Silicon: mono-Si) ที่มีความบริสุทธิ์สูง และมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแสงอาทิตย์ ให้เป็นไฟฟ้าได้ประมาณ 15-20% และถือว่าเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่สูง (Space Efficient) โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้สามารถผลิตไฟฟ้ามากเป็นสี่เท่าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบแผ่นบาง (Thin Film Solar Panels) เซลล์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงอาทิตย์ Mono-Si นี้มีอายุการใช้งานและคงประสิทธิภาพยาวนาน นอกจากนั้นยังมีประสิทธิภาพในสถานที่ที่มีอากาศร้อนและสภาพแสงน้อยที่ดีอีกด้วย แต่ราคาเซลล์แสงอาทิตย์แบบนี้มีราคาแพงเนื่องจาก Crystalline Silicon เป็นส่วนประกอบสำคัญของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จึงมีคุณค่าเพิ่ม (Value Added) ที่สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนั้นกรรมวิธีในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จาก Crystalline Silicon ที่จะต้องนำมาเลื่อยให้เป็นแผ่น (Wafer) บางๆ จึงทำให้เกิดการสูญเสีย ในลักษณะที่น้อยกว่าครั้ง ในการติดตั้งเพื่อใช้งานควรระมัดระวังไม่ให้ส่วนใดส่วนหนึ่งของแผ่น (Panel) โดนบังแสง (Partial Shading) เพราะอาจทำให้ระบบเสียหายได้ (ชาย ชีวะเกตุ, 2543; Parida, Iniyani, & Goic, 2011; Maehlum, Which Solar Panel Type is Best? Mono- vs. Polycrystalline vs. Thin Film, 2015) โดย เซลล์แสงอาทิตย์ Mono-Si นี้มี ข้อดี ได้แก่ ประสิทธิภาพสูง (15-20%) ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่สูง ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าต่อสภาพแสงน้อยสูงเหมาะในการใช้งานในภูมิอากาศร้อนอายุการใช้งานยาวนาน (25-30 ปี) และมี ข้อเสีย คือ แพง สูญเสียวัสดุเป็นขยะมาก ต้องระมัดระวังในการติดตั้งและการดูแลรักษา

2.1.2.2 ซิลิคอนรูปผลึก (Crystallized Silicon) ชนิด ซิลิคอนผลึกกรม (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 ได้รับความนิยมนสูงหาซื้อง่าย สูญเสียวัสดุเป็นขยะน้อย แต่มี ข้อเสีย คือประสิทธิภาพต่ำกว่า mono-Si (16-24%) และมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อติดตั้งในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง (Jelle, Breivik, & Røkenes, 2012; Khan, 2014; Maehlum, Which Solar Panel Type is Best? Mono- vs. Polycrystalline vs. Thin Film, 2015)

2.1.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด เซลล์แสงอาทิตย์แผ่นบาง (Thin Film Photovoltaic Cells: TFPV) มีรายละเอียดด้านเทคนิค และการเปรียบเทียบข้อดี/ข้อเสีย ดังรายละเอียดใน ตารางที่ 1 โดย TFPV คือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้เป็นการผสมชั้นบางๆ ของวัสดุชั้นแสงจำนวนอย่างน้อยหนึ่งชั้นหรือมากกว่าบนพื้นผิว (Substrate) ต่างๆ โดยวัสดุชั้นแสงที่ใช้ผลิต TFPV นั้น ได้แก่ Amorphous silicon (a-Si), Cadmium Telluride / Cadmium Sulphide (CdTe/CdS) และ Copper Indium Gallium Selenide (CIGS/CIS) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

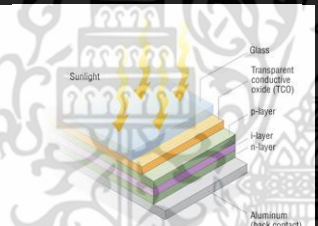
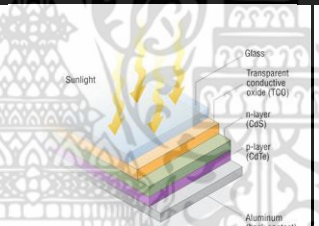
2.1.2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด ซิลิคอนที่ไม่เป็นผลึก (Amorphous silicon: a-Si) ซึ่งเป็นประเภทรอง (subcategory) ของเทคโนโลยี เซลล์แสงอาทิตย์แบบแผ่นบาง (Thin-film) ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด โดยมีประสิทธิภาพ 5-7% และ 8-10% ในประเภท Double และ Triple Junction หรือเรียกว่า Stacking โดย Amorphous Silicon นี้สามารถเคลือบลงแผ่นกระจกหรือแผ่นโลหะ ทำให้ติดตั้งในส่วนที่เป็นวัสดุอาคารได้ แต่วัสดุชั้นแสงชนิดนี้มีจุดด้อยที่สำคัญคือมีการเสื่อมสภาพที่เร็วกว่า Crystalline Silicon (ชาย ชีวะเกตุ, 2543; Parida, Iniyani, & Goic, 2011) เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้ใช้ซิลิคอนปริมาณเพียง 1% ที่ใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบอื่น แต่

การ Stacking นั้นมีต้นทุนการผลิตสูง (Maehlum, Which Solar Panel Type is Best? Mono- vs. Polycrystalline vs. Thin Film, 2015) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Polycrystalline vs. Thin Film, 2015) โดย ข้อดี ข้อเสีย และคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ a-Si นั้นถูกเปรียบเทียบใน ตารางที่ 1 เซลล์แสงอาทิตย์แผ่นบาง (Thin Film Photovoltaic Cells: TFPV)

2.1.2.5 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Cadmium Telluride (CdTe) และ Cadmium Sulphide (CdS) โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe/CdS นั้นเป็นประเภทรอง (Subcategory) ของเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์แบบแผ่นบาง (Thin-film) มีความสามารถสูงมากในการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์และปล่อยอิเล็กตรอน ด้วยความหนาของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้เพียง 3 ไมครอน นั้นมีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงถึง 15% หรือมากกว่า (Muller, 2012; Clover, First Solar raises bas for CdTe with 21.5% efficiency record, 2015) และ มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าปกติที่ 9-11% (Khan, 2014) ข้อดี ข้อเสีย และคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ CdTe/CdS นั้นถูกเปรียบเทียบใน ตารางที่ 1 เซลล์แสงอาทิตย์แผ่นบาง (Thin Film Photovoltaic Cells: TFPV)

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติวัสดุซับแสงในเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์แผ่นบาง (Clover, First Solar raises bas for CdTe with 21.5% efficiency record, 2015; Maehlum, Best Thin Film Solar Panels - Amorphous, Cadmium Telluride or CIGS?, 2015)

คุณสมบัติ	a-Si	CdTe/CdS	CIGS/CIS
			
ประสิทธิภาพสูงสุด (ในห้องทดลอง)	13.4%	21.5%	20.4%
ประสิทธิภาพสูงสุด (ในการใช้งานจริง)	8.1%	14.4%	14.5%
ส่วนแบ่งการตลาด	32%	43%	25%
ข้อดี	เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนานาน เจริญเต็มที่ เหมาะสมในการใช้งานกับอุปกรณ์ขนาดเล็ก	ต้นทุนการผลิตต่ำ	ประสิทธิภาพสูง เหมาะสมในการใช้งานร่วมกับพื้นผิวกระจกและวัสดุอาคารที่ติดตั้ง
ข้อเสีย	ประสิทธิภาพต่ำ และมีต้นทุนอุปกรณ์อื่นๆแพง	ประสิทธิภาพปานกลาง และมีส่วนประกอบคือ Cadmium ที่เป็นพิษร้ายแรง	มีราคาแพง และมีส่วนประกอบที่มีแนวโน้มที่จะขาดแคลนในอนาคต คือ Indium (Muller, 2012)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

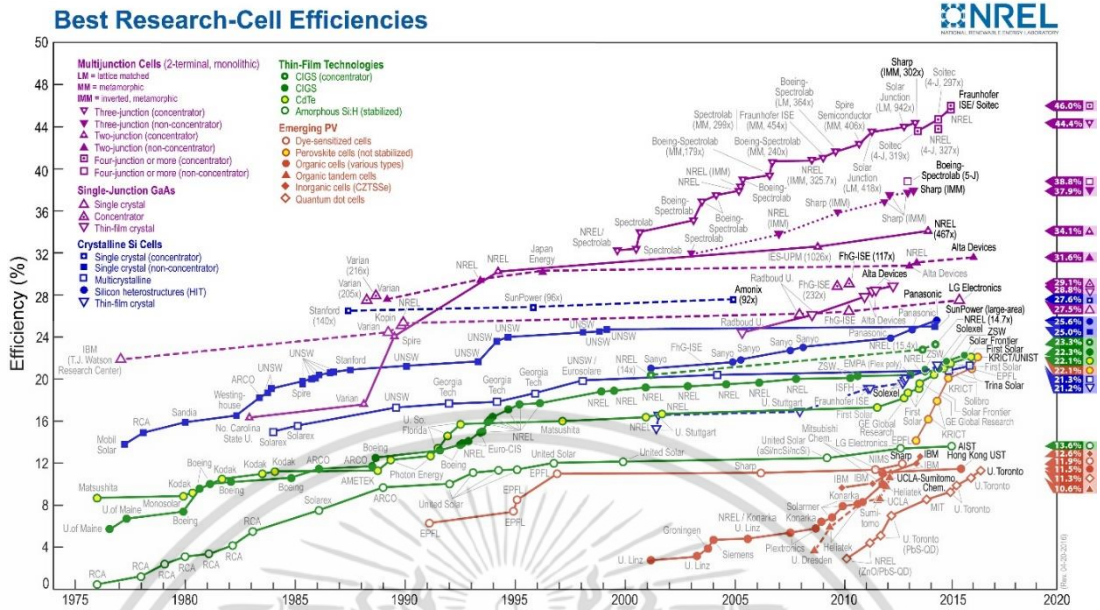
2.1.2.6 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Copper Indium Gallium Selenide (CIGS/CIS) โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIGS/CIS นั้นเป็นประเภทรอง (Subcategory) ของเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์แบบแผ่นบาง (Thin-film) อีกหนึ่งประเภทที่มีวัสดุชั้นบางเป็นสารประกอบของ Copper, Indium, Gallium และ Selenide ควบลงบนวัสดุแผ่นเรียบเช่น พลาสติกหรือกระจก ที่ประกอบด้วย Anode และ Cathode (Electrodes) ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIGS/CIS นี้มีประสิทธิภาพเฉลี่ยที่ 11-14% ข้อดี ข้อเสีย และคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ CIGS/CIS นั้นถูกเปรียบเทียบใน ตารางที่ 1 เซลล์แสงอาทิตย์แผ่นบาง (Thin Film Photovoltaic Cells: TFPV)

เซลล์แสงอาทิตย์ดังที่ได้กล่าวถึงไปนั้นเป็น เซลล์แสงอาทิตย์ที่อยู่ในช่วงการพัฒนา รุ่นที่ 1 (First Generation Photovoltaic Cells) คือแบบ Mono-crystalline และ Poly-crystalline และเซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่ 2 (Second Generation Photovoltaic Cells) คือ Amorphous Silicon, CdTe และ CIGS โดยเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองรุ่นนั้นยังคงเป็นที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน แต่ด้วยข้อจำกัดดังที่ได้กล่าวไปนั้นจึงได้เกิดการพัฒน เซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่ 3 (Third Generation Photovoltaic Cells) ซึ่งมีวัตถุประสงค์สำคัญในการพัฒนา 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, 2016)

การนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ในอาคารนั้นมีสองประเภท ได้แก่ ประเภทแผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งเข้ากับรางยึด (Rack-mounted PV systems) ซึ่งเป็นประเภทที่ได้รับความนิยมสูงสุด และ ประเภทการผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับวัสดุอาคาร (Building Integrated Photovoltaic: BIPV) ซึ่งยังมีจำนวนน้อยในปัจจุบันแต่มีการอัตราการเติบโตสูง โดยคาดการณ์ว่าจะมีการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบ BIPV เป็นปริมาณสูงถึง 1.15 GW ทั่วโลกในปี ค.ศ.2019 ซึ่งเติบโตจากปริมาณ การติดตั้ง 343.10 MW ในปี ค.ศ.2012 (James, Goodrich, Woodhouse, Margolis, และ Ong, 2011; Clover, BIPV sector to reach 1.15 GW by 2019, says report, 2014)

วัสดุเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีความหลากหลายทั้งด้านราคา ประสิทธิภาพ และรูปแบบการติดตั้ง ซึ่งแต่ละชนิดนั้นล้วนแล้วแต่มีข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบที่แตกต่างกันไปดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น การทดลองของการวิจัยนี้สามารถเลือกใช้เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทใดก็ได้ แต่ผู้วิจัยเลือกใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนรูปผลึก (Crystallized Silicon) ชนิดซิลิคอนผลึกรวม (Polycrystalline Silicon: p-Si / Multi-crystalline Silicon: mc-Si) ในขั้นตอนการทดลองด้วยการสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคารในทุก Simulations เพื่อสามารถควบคุมให้การทดลองมีความคงที่สามารถเปรียบเทียบผลลัพธ์ได้ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง (12 - 18%) มีราคาไม่แพงด้วยเหตุที่มีการแข่งขันในตลาด PV สูง ปัญหาด้านการติดตั้งและใช้งานค่อนข้างน้อยในการติดตั้งเนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้เป็นผลิตภัณฑ์มาตรฐานในอุตสาหกรรม รวมทั้งช่างผู้ติดตั้งระบบมีความคุ้นชินจนเกิดความชำนาญและการประยุกต์ใช้งานในภาคปฏิบัติ (Jelle, Breivik, & Røkenes, 2012; Shukla, Sudhakar, & Baredar, 2016) โดยสรุปแล้วเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์สมรรถนะอาคารประเภทนี้มีความเป็นไปได้สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ผังเส้นเวลาแสดงถึง ประสิทธิภาพสูงสุดของเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ จากการทดลองและมีการบันทึก (The National Center for Photovoltaics, 2016)

2.1.3 อาคารผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ (Building Integrated Photovoltaic: BIPV)

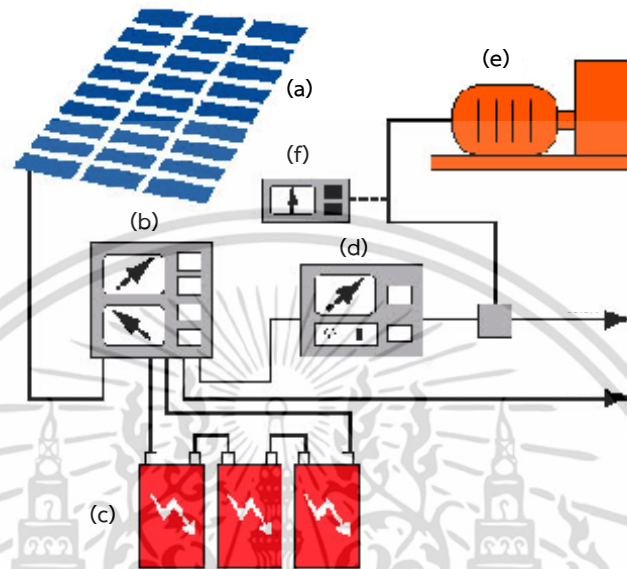
การนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ในอาคารแบบที่มีส่วนทางกายภาพเชื่อมต่อกับตัวอาคารมี 2 ประเภท ได้แก่ (1) เซลล์แสงอาทิตย์แบบยึดเข้ากับอาคาร (Building Attached Photovoltaic: BAPV) หมายถึงการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV module) ยึดติดเข้ากับตัวอาคารด้วยโครงคร่าวและราง (Rack-mounted PV systems) และ (2) เซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสานเข้ากับวัสดุอาคาร หรือ อาคารผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ (Building Integrated Photovoltaic: BIPV) อาคารผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ (Building Integrated Photovoltaic: BIPV) นั้นหมายถึงการนำผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ (PV Products) มาติดตั้ง เพื่อเป็นส่วนหนึ่งขององค์ประกอบเปลือกอาคาร เช่น ผนังอาคาร กระจกเบื้องหลังคา อุปกรณ์บังแดด กระจกในช่องเปิดอาคารหรือหลังคาอาคาร เป็นต้น โดยยังคงรักษาคุณสมบัติในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างครบถ้วน (Strong, 2011; Jelle, Breivik, และ Røkenes, 2012; Hall, 2014; Yang, 2015) ซึ่ง BIPV ที่มีข้อได้เปรียบเหนือกว่าการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปและ BAPV ไป คือ BIPV นั้นถูกผสมผสานเข้าไปอย่างกลมกลืนเป็นส่วนหนึ่งกับอาคาร สามารถที่จะก่อสร้างให้กลมกลืนไปกับการออกแบบอาคารโดยไม่เป็นส่วนเพิ่มหรือส่วนเกินด้านองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรม (Hall, 2014)

นอกจากนั้น BIPV ซึ่งใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งทดแทนวัสดุก่อสร้างอาคารปกติ ทำให้ลดการใช้วัสดุก่อสร้างและมีต้นทุนในการติดตั้งน้อยกว่า Rack-mounted PV systems เป็นการลดต้นทุนทั้งทางด้านแรงงาน ทั้งทางวัสดุก่อสร้าง ได้พลังงานสะอาดที่ไม่มีวันหมดมาใช้ในอาคาร และเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าได้เต็มประสิทธิภาพเนื่องจากได้ใช้ไฟฟ้าใกล้กับระบบสร้างไฟฟ้า มีการสูญเสียพลังงานต่ำมากเมื่อเทียบในระบบสายส่งไฟฟ้าที่มีการสูญเสียพลังงานสูงถึง 6% (IEA Statistics, 2014) รวมถึงการใช้งาน BIPV นั้นยังเป็นการลดความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด (Peak

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาก็หาไม่อนุญาติให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการคัด

ไม่ว่าการฉ้อโกง ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load) ของอาคารได้อีกด้วยเนื่องจากระบบ BIPV นั้นจะสามารถสร้างพลังงานได้สูงสุดในเวลาที่มีความต้องการใช้พลังงานสูงสุดอันเกิดจากระบบปรับอากาศในอาคารเช่นเดียวกัน (Peng, Huang, & Wu, 2011; Strong, 2011; Jelle, Breivik, & Røkenes, 2012) โดยระบบ BIPV ที่สมบูรณ์นั้นมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้ (Strong, 2011)



รูปที่ 2.4 แผนภาพระบบ BIPV (Strong, 2011)

- (a) ผลิตภัณฑ์ BIPV หรือ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Modules) ซึ่งมีหลากหลายรูปแบบและหลากหลายวัสดุซับแสง ดังรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.1.2
- (b) ส่วนควบคุมกระแสไฟฟ้าเข้า-ออกระบบ (Charger Controller) ทำหน้าที่จัดการปริมาณและทิศทางกระแสไฟฟ้า 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) อุปกรณ์รายมัดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สายไฟฟ้า และอุปกรณ์ประกอบเพื่อความปลอดภัยอื่นๆ

จากที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-3 องค์ประกอบของ BIPV อันได้แก่ (b), (c), (d), (e) และ (f) ทั้งหมดคือ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (BIPV System Type) ซึ่งเป็น Parameter (C-2-3) ใน (C-2) Parameter ของ คุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module Properties) ที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 1.1.5 โดยระบบนี้เป็นระบบจัดเก็บพลังงานแบบผสมผสาน ซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าสู่แบตเตอรี่ ระบบจัดเก็บพลังงานหรือแบตเตอรี่ อุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้าจาก

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ หากมีการนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต จะถือว่าผิดกฎหมาย

กระแสตรงเป็นกระแสสลับ รวมถึงอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ (Inverter) และอาจรวมถึงระบบกำเนิดไฟฟ้าสำรอง เช่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล เป็นต้น (Strong, 2011; Biyik, et al., 2017)

ปัจจุบันมีการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้งานภาคอาคารในรูปแบบของอาคารผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ (BIPV) ในสามรูปแบบ (White, 2015) ได้แก่

ประเภทที่ 1 แบบเชื่อมต่อระบบสายส่งไฟฟ้า (Grid-tied หรือ Utility-interactive PV Systems) ซึ่งระบบ PV แบบนี้เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมมากที่สุด

ประเภทที่ 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 กักับการสร้างพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

ประเภทที่ 3 แบบผสมการเชื่อมต่อระบบสายส่งไฟฟ้าและใช้แบตเตอรี่สำรอง (Grid-tied-battery-backup หรือ Multimodal PV Systems)

2.1.4 ประเภทของผลิตภัณฑ์ BIPV

การนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV module) มาติดตั้งเพื่อทดแทนเป็นวัสดุ ผสานเป็นอันหนึ่งอันเดียวกับอาคาร หรือที่เรียกว่า ผลิตภัณฑ์ BIPV (BIPV Products) นั้นมี 5 ประเภท (Jelle, Breivik, & Røkenes, 2012; Shukla, Sudhakar, & Baredar, 2016) ได้แก่

2.1.4.1 ผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแผ่น (BIPV Foil Products)

ผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ประเภท Foil นี้ มีคุณสมบัติเฉพาะคือ มีน้ำหนักเบา ยืดหยุ่นได้ สามารถติดตั้งบนพื้นผิวที่มีรูปทรงซับซ้อนและมีข้อจำกัดด้านโครงสร้างในการรับน้ำหนักได้สะดวก ส่วนใหญ่เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเซลล์แสงอาทิตย์แผ่นบาง (Thin Film Photovoltaic Cells: TFPV) ซึ่งทำให้ PV ประเภทนี้สามารถรักษาประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ดี เมื่อนำไปติดตั้งบนพื้นผิวที่มีการระบายอากาศไม่ดีและมีอุณหภูมิสูง แต่พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้มีข้อจำกัดที่จะเลือกมาใช้เป็นองค์ประกอบอาคาร ได้แก่ มีคุณสมบัติ Fill Factor ต่ำ เนื่องจากมีประสิทธิภาพต่ำและมีความต้านทานในเซลล์สูงเนื่องจากส่วนใหญ่ผลิตจากวัสดุ Amorphous Silicon และมีจำนวนผลิตภัณฑ์ในตลาดน้อย

2.1.4.2 ผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทกระเบื้องหลังคา (BIPV Tile Products)

ผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้ผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทกระเบื้องหลังคา (BIPV Tiles) เพื่อทดแทนกระเบื้องหลังคาปกติได้ทั้งพื้นหลังคา หรือจะเลือกติดตั้ง BIPV Tiles เพียงบางส่วนของพื้นหลังคา เพราะผลิตภัณฑ์ BIPV ประเภทนี้ถูกออกแบบและผลิตให้มีมิติและรูปลักษณ์ที่คล้ายคลึงสอดคล้องกับวัสดุหลังคาทั่วไป แต่ด้วยเหตุนี้ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของ BIPV Tiles มักไม่เป็นไปตามเอกสารจากผู้ผลิต แม้ว่าจะผลิตด้วยวัสดุซับแสงที่มีประสิทธิภาพสูงก็ตาม เนื่องจากข้อจำกัดที่จะต้องผลิต BIPV Tiles ให้มีลักษณะเป็นลอนกระเบื้องที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้วัสดุไม่สามารถรับรังสีอาทิตย์ได้เต็มที่ และผลิตภัณฑ์ BIPV Tiles นั้นมักมีราคาแพง ทั้งราคาวัสดุ และราคาค่าแรงในการติดตั้งระบบ

2.1.4.3 ผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแผง (BIPV Module Products)

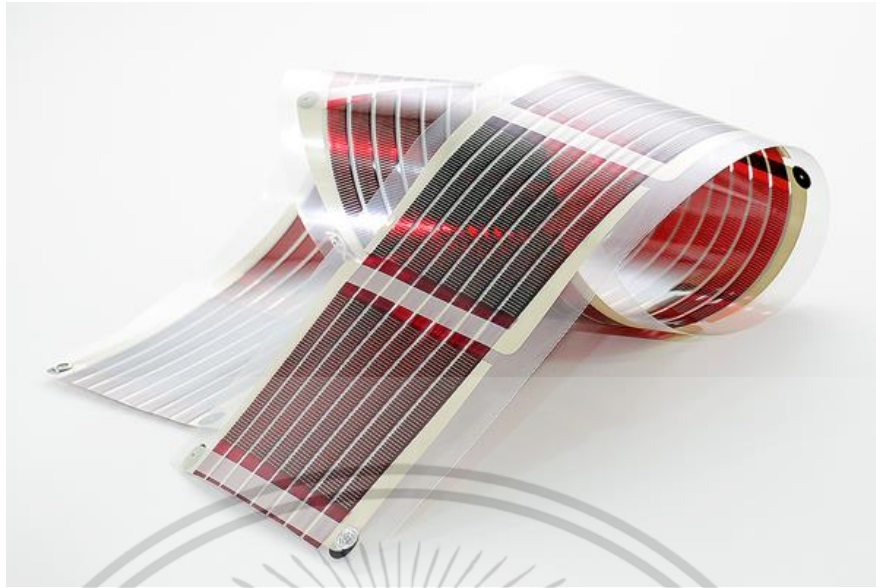
ผลิตภัณฑ์ BIPV ประเภทนี้มีความคล้ายคลึงกับแผงโซลาร์เซลล์ทั่วไป แต่ผลิตภัณฑ์ BIPV Modules จะมีคุณสมบัติที่สามารถนำมาติดตั้งทดแทนวัสดุอาคาร ไม่ว่าจะเป็นผนังหรือหลังคาอาคาร ผลิตภัณฑ์ BIPV Modules นั้นมีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูง (12% - 20%) (Jelle, Breivik, และ Røkenes, 2012) แต่มีข้อจำกัดสำคัญคือ ระบบยึดกับอาคารที่ต้องมีความแข็งแรงและถูกออกแบบให้กลมกลืนเป็นอันหนึ่งอันเดียวกับรูปลักษณ์อาคาร

2.1.4.4 ผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทกระจกใส (Solar Cell Glazing Products)

ผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทกระจกใสนี้สามารถใช้งานได้หลากหลาย เช่น การใช้เป็นวัสดุทดแทนกระจกสำหรับหน้าต่าง ผนังกระจกทั้งแบบผนังแนวตั้งหรือเอียง หรือสำหรับหลังคา Skylight ผลิตภัณฑ์ BIPV ประเภทนี้มีหลากหลายทางเลือกให้ผู้ออกแบบอาคารสามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงานออกแบบ เช่น สี และระดับความโปร่งใส

วิธีการติดตั้งเพื่อใช้งานผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทกระจกใสคือ ผู้ผลิตพ่นสารขับแสง ซึ่งมีหลากหลายชนิดเช่น Monocrystalline / Polycrystalline / Amorphous Silicon ลงบนวัสดุกระจก โดยผลิตภัณฑ์บางชนิดจะมีความทึบของวัสดุขับแสงมาก แต่จะมีการเว้นระยะระหว่างเซลล์ให้แสงส่องผ่านได้ บางชนิดจะมีความโปร่งแสงอยู่ในเนื้อของวัสดุขับแสงซึ่งทำให้ไม่จำเป็นต้องมีช่องว่างภายในแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ ผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทกระจกใสจะมีความโปร่งใส ตั้งแต่ 16% - 41% และมีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ตั้งแต่ 5% - 22% (Jelle, Breivik, และ Røkenes, 2012)

ผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีความหลากหลายดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น การวิจัยนี้สามารถเลือกใช้เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทใดก็ได้ ผู้วิจัยเลือกใช้ผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแผง (BIPV Module Products) แบบติดตั้งบนโครงสร้างหลังคาอาคารในขั้นตอนการทดลองด้วยการสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคาร ในทุก Simulations เพื่อสามารถควบคุมให้การทดลองมีความคงที่สามารถเปรียบเทียบผลลัพธ์ได้ และผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ประเภท BIPV Module Products นี้มีความเหมาะสมในการใช้งานในการติดตั้งบนหลังคาอาคารสถานบริการสุขภาพ เนื่องจากราคาไม่แพงด้วยเหตุที่มีการแข่งขันในตลาด PV สูง ส่งผลให้มีการนำไปใช้งานจริงสูง ชนิดนี้เป็นผลิตภัณฑ์มาตรฐานในอุตสาหกรรม รวมทั้งช่างผู้ติดตั้งระบบมีความคุ้นชินจนเกิดความชำนาญ และการประยุกต์ใช้งานในภาคปฏิบัติ (Jelle, Breivik, & Røkenes, 2012; Shukla, Sudhakar, & Baredar, 2016)



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ประเภท Foil (Infinity PV, 2016)



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ประเภท BIPV Tiles (The Green Energy Society, n.d.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทกระจกใส (Onyx Solar, 2016)

เซลล์แสงอาทิตย์และผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์นั้นมียู้อย่างมากมายในท้องตลาด การวิจัยนี้สามารถเลือกใช้เซลล์แสงอาทิตย์และผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทใดก็ได้ แต่เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานระบบ BIPV ในสถานการณ์ที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ผู้วิจัยจึงเลือกใช้เซลล์แสงอาทิตย์ประเภท Crystallized Silicon ชนิด Polycrystalline Silicon และผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแผง แบบติดตั้งบนโครงสร้างหลังคาอาคาร

2.2 ผลกระทบจากการโดนบังเงาบางส่วน (Partial Shading Effects)

เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) คืออุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนรังสีดวงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง โดยพลังงานไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้จากระบบ PV นั้นจะมีปริมาณมาก-น้อยเท่าใดจะขึ้นอยู่กับปริมาณการได้รับรังสีอาทิตย์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ นั่นคือ การแผ่รังสีแสงอาทิตย์ทั้งหมด (Total Solar Radiation) ที่ตกกระทบลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ โดย Total Solar Radiation นี้ประกอบด้วยองค์ประกอบสามส่วน ได้แก่ ลำแสงอาทิตย์ (Beam Radiation) รังสีกระจายจากท้องฟ้า (Diffuse Radiation) และ รังสีสะท้อนจากสภาพแวดล้อมล้อมรอบ (Surrounding-Reflected Radiation) โดยมีรายละเอียดขององค์ประกอบทั้งสาม ดังต่อไปนี้ Beam Radiation คือ ลำแสงอาทิตย์ ที่เป็นรังสีอาทิตย์โดยตรง ไม่เป็นรังสีที่ฟุ้งกระจายอยู่ในบรรยากาศ แต่ Diffuse Radiation คือ รังสีกระจายจากท้องฟ้า จะมีรูปแบบของรังสีที่กระจัดกระจายเนื่องจากอนุภาคต่างๆ ของฝุ่นละอองหรือ เมฆ หมอกควันในชั้นบรรยากาศ การคำนวณ Beam Radiation นั้นขึ้นอยู่กับเรขาคณิตของแสงอาทิตย์ (Solar Geometry) ได้แก่ มุมทิศ (Azimuth) และ มุมระดับความสูง (Altitude Angle) ได้อย่างตรงไปตรงมา ในทางกลับกัน Surrounding-Reflected Radiation คือ รังสีสะท้อนจากสภาพแวดล้อมล้อมรอบ นั้นมีรูปแบบที่ซับซ้อนสามารถคำนวณและประมาณได้ยาก เนื่องจากรังสีชนิดนี้เกิดขึ้นโดยทั้ง Beam Radiation และ Diffuse Radiation ที่สะท้อนจากบริเวณโดยรอบ เช่นอาคารข้างเคียงและพื้นดิน จึงจะสะท้อนเข้าสู่วัสดุเซลล์แสงอาทิตย์ Surrounding-Reflected Radiation นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ Surrounding Reflectance (การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะท้อนจากสภาพแวดล้อม) Absorbance (การดูดซับรังสี) Emittance (การแผ่รังสี) และ Transmittance (การส่งผ่านพลังงาน) ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อการสะท้อนรังสีอาทิตย์เข้าสู่ระบบ BIPV ทั้งสิ้น (Yoo, 2011; Gökmen, et al., 2016)

ถึงแม้เทคโนโลยีการนำพลังงานจากรังสีอาทิตย์ มาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อการใช้งาน ภาคอาคารจะมีการพัฒนาและมีความก้าวหน้ามากขึ้นเป็นอย่างมาก 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 กั้นไม่ให้ 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 มาทาบทับและมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ 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 สภาวะการสูญเสียพลังงาน (Shading Loss) ของ PV System ก็จะมีรุนแรงมากขึ้นเท่านั้น (Masa-bote & Caamaño-Martín, 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 คุณสมบัตินี้ของ PV Systems และการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า (Electricity Losses) ภายใน PV Systems เป็นหลักโดยไม่ได้ศึกษาการสูญเสียการรับรังสีอาทิตย์ (Irradiation Losses) โดยมีการศึกษาจำนวนน้อยที่ได้มุ่งเน้นค้นหา การฉายรังสีอาทิตย์ที่เกิดประสิทธิผล (Effective Irradiance) (Drif, Pérez, Aguilera, & Aguilar, 2008; Masa-bote & Caamaño-Martín, 2014) แต่การศึกษาวิจัยที่ได้กล่าวมาทั้งหมด ไม่ได้ศึกษาปัจจัยที่เกิดจาก Surrounding Obstacle แต่อย่างใด

การออกแบบระบบ BIPV ที่จะให้บรรลุถึงประสิทธิภาพนั้น ผู้ออกแบบ BIPV จำเป็นต้องสามารถเข้าใจและคาดการณ์ถึง Partial Shading Effects ที่ส่งผลกระทบต่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์นั้นได้ โดยจำเป็นต้องมีการพิจารณาให้ความสำคัญต่อพารามิเตอร์ (Parameter) สามตัวหลักของ Partial Shading Effects อันได้แก่ (A) คุณสมบัติรังสีอาทิตย์ (Solar Properties Parameter) (B) สภาพแวดล้อม (Surrounding Parameter) และ (C) องค์ประกอบที่สัมพันธ์กับ BIPV (Related-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BIPV Parameter) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (Yoo, 2011; Celik, Karatepe, Gokman, & Silvestre, 2013; Masa-bote & Caamaño-Martín, 2014)

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

(B) Parameter ของ สภาพแวดล้อม (Surrounding) ประกอบด้วยสองหมวดย่อยได้แก่ (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

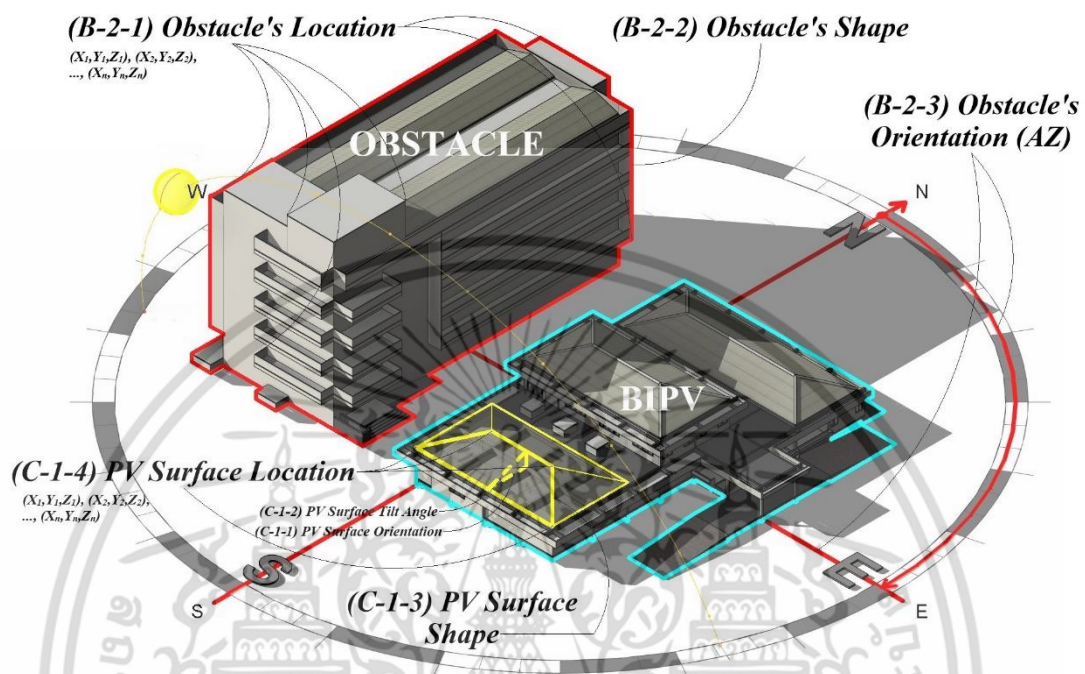
(B-2) Parameter ของ สิ่งกีดขวางแวดล้อม (Surrounding Obstacle) ประกอบด้วย (B-2-1) ตำแหน่งของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Location) (B-2-2) รูปร่างของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Shape) และ (B-2-3) การวางทิศทางของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Orientation) ดังที่แสดงใน รูปที่ 1-1 โดย Surrounding Obstacle นั้นกีดขวาง Beam Radiation ให้ไม่สามารถตกกระทบลงบนพื้นผิว PV ได้อย่างเต็มที่ โดยรังสีอาทิตย์จะฉายผ่านและกระทบรูปทรงของ Surrounding Obstacle ที่ประกอบด้วยจุดในพิกัดคาร์ทีเซียนสามมิติ (Three Dimensional Cartesian Coordinates) จำนวนมาก ที่แต่ละพิกัดอยู่ในปริภูมิสามมิติ (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 โดยพิกัดดังกล่าวนั้นจะคงที่ไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงทั้งของ Surrounding Obstacle และของ PV Surfaces โดยสิ่งที่กำหนดรูปทรงและพื้นที่ของเงาที่ทอดออกจาก Surrounding Obstacle คือ Altitude Angle และ Azimuth ของดวงอาทิตย์ ที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาในช่วงเวลาระหว่างวันตลอดทั้งปี การเปลี่ยนรูปร่างอยู่ตลอดเวลาของเงานี้ ทำให้ Surrounding Obstacle Parameter นั้นเป็นปัจจัยที่คาดการณ์ถึงผลกระทบได้ยากที่สุด แต่การสร้างความเข้าใจให้ผู้ออกแบบสามารถคาดการณ์ถึงผลกระทบของ 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 1-1 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของ Parameter ดังกล่าว กับ Surrounding Obstacle Parameter

(C-2) Parameter ของ คุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module Properties) ซึ่งประกอบด้วย (C-2-1) วัสดุเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Materials) (C-2-2) ชนิดของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ (BIPV Product Type) และ (C-2-3) ประเภทของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (BIPV System Type) โดยรายละเอียดของ PV Materials นั้นได้ถูกกล่าวถึงในในบทที่ 2 ข้อที่ 2.1.2 (Chaianong & Pharino, 2015; Shukla, Sudhakar, & Baredar, 2016)



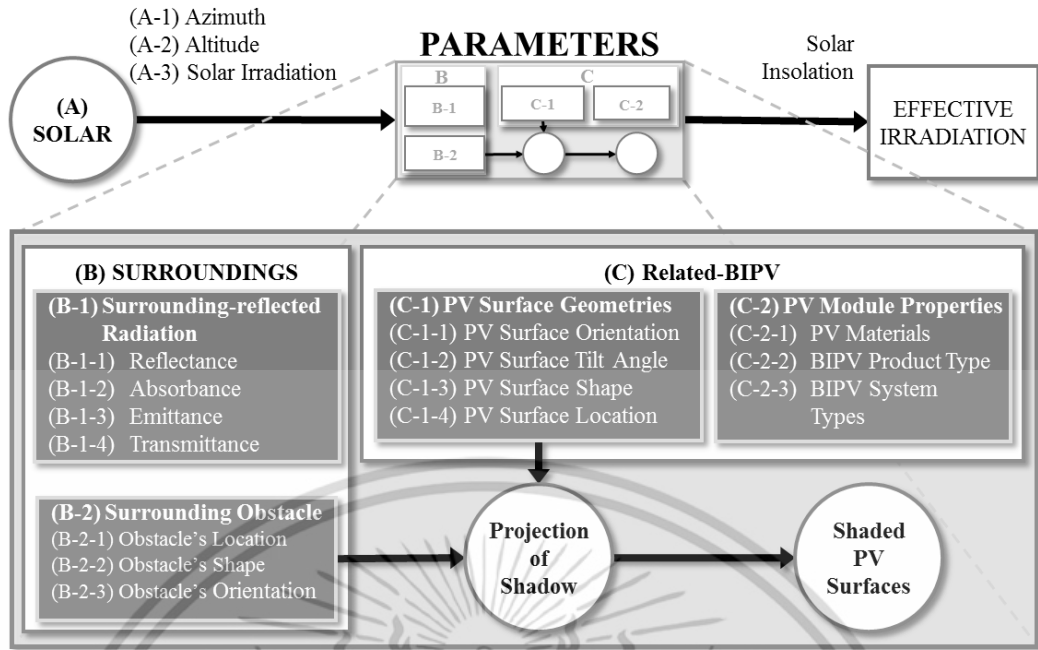
รูปที่ 2.8 Parameter ของ (B-2) Surrounding Obstacle และ (C-1) PV surface geometry

Parameter (C-2-2) ชนิดของผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ (BIPV Product Type) มีทั้งหมด 4 ประเภทและประเภท BAPV อีก 1 ประเภท ดังรายละเอียดในข้อที่ 1.1.3 และในบทที่ 2 ข้อที่ 2.1.4 (Jelle, Breivik, และ Røkenes, 2012; Chaianong และ Pharino, 2015; Shukla, Sudhakar, และ Baredar, 2016) Parameter (C-2-3) ประเภทของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (BIPV System Type) ดังรายละเอียดในบทที่ 2 ข้อที่ 2.1.3 (Strong, 2011; Biyik, และคนอื่นๆ, 2017)

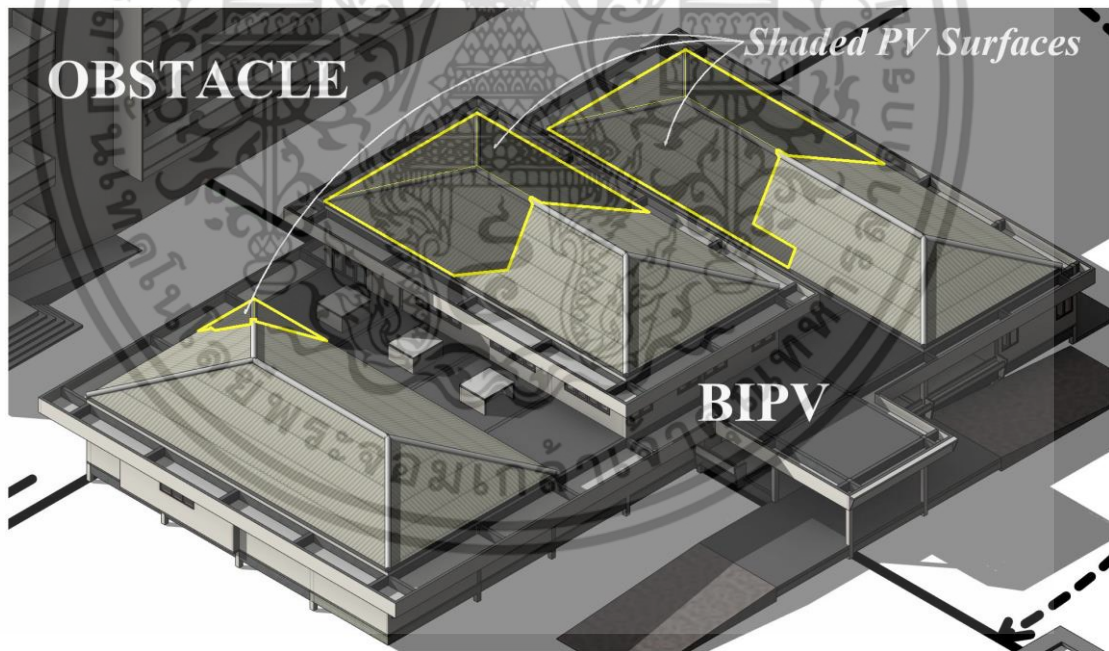
สิ่งที่ได้กล่าวไปนั้นคือ พารามิเตอร์ (Parameter) ที่เป็นตัวแทนของ Partial Shading Effects อันเป็นสิ่งที่ขวางกั้นอยู่ตรงกลางระหว่างการแผ่รังสีอาทิตย์ (Solar Radiation) กับพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Surfaces) ที่ส่งผลให้ Solar Radiation ที่ตกลงบน PV Surfaces มีปริมาณแตกต่างกันระหว่าง PV Surfaces ที่ได้รับผลจาก Partial Shading Effects และไม่ได้รับผลจาก Partial Shading Effects ดังที่แสดงในรูปที่ 2.9

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



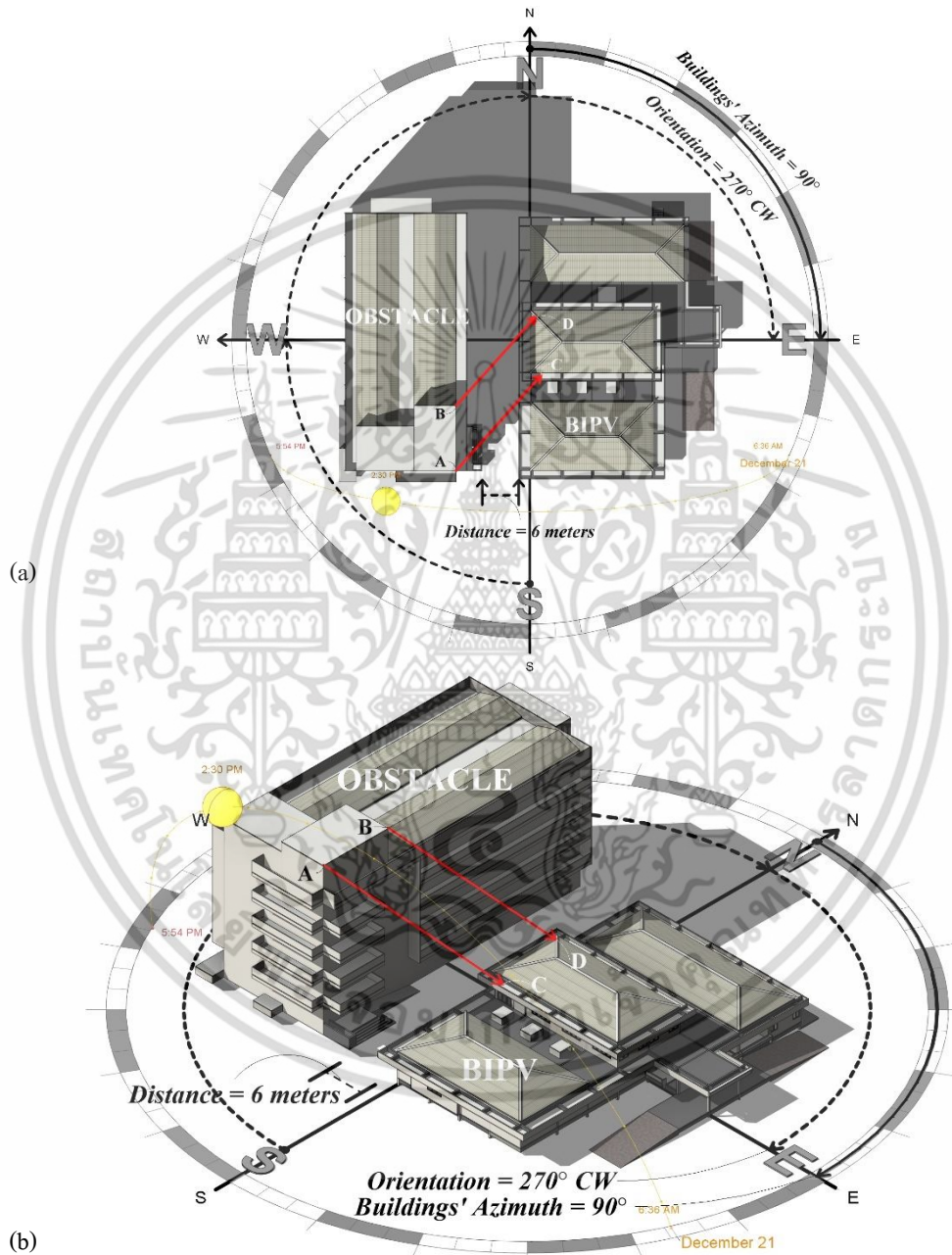
รูปที่ 2.9 กรอบเชื่อมโยง Parameter ของ Partial Shading Effects



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงรูปร่างที่ซับซ้อนของเงาที่ทอดจาก Surrounding Obstacle ลงบนสู่ พื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์

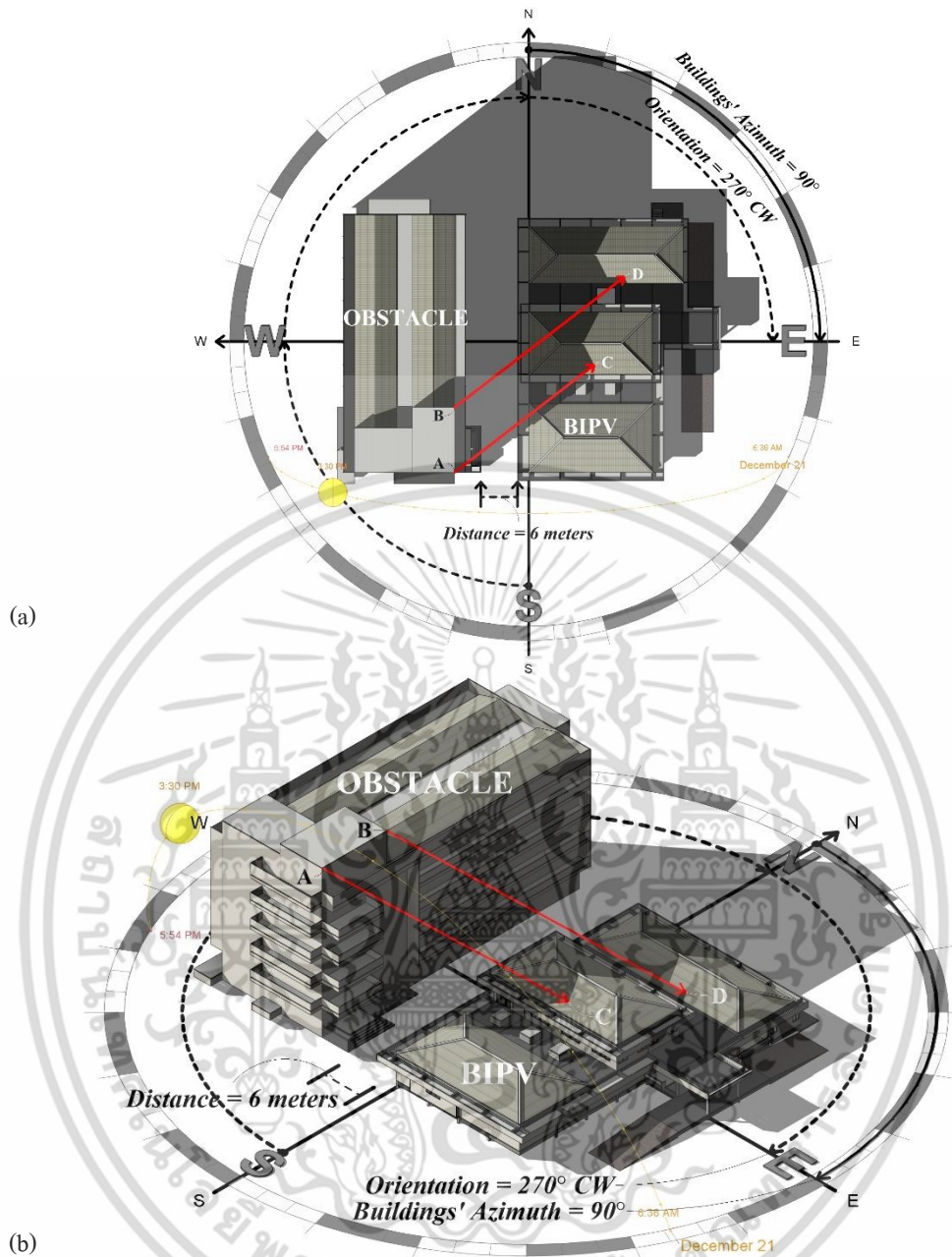
รูปที่ 2.11 และ 2.12 แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงเงาที่ทอดลงบนพื้นผิวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในเวลา 14.30 น. และ 15.30 น. ในวันเพ็ญ (Winter Solstice) สำหรับอาคารสองหลังที่ตั้งอยู่ในกรุงเทพฯ ประเทศไทย ซึ่งตั้งอยู่ ณ พิกัด 13° เหนือ $100^{\circ}30'$ ตะวันออก หันหน้าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาคารออกสู่ทิศตะวันออกทั้งสองอาคาร โดยรูปที่ 2.11 และ 2.12 แสดงให้เห็นถึงอาคาร BIPV (อาคารเตี้ย) ที่ตั้งอยู่ขวามือของภาพ นั้นถูกเงาที่ทอดยาวมาจากอาคารข้างเคียง ที่เป็น Surrounding Obstacle ที่มีความสูงมากกว่าอาคาร BIPV โดยจุด A และจุด B เป็นพิกัดสามมิติที่ตั้งอยู่บนระนาบดิน Surrounding Obstacle อันเป็นตัวแทนของ พิกัดของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Location)



รูปที่ 2.11 (a) และ (b) ตัวอย่างที่แสดงความเปลี่ยนแปลงของเงาที่ทอดจาก Surrounding Obstacle ลงบนสู่ พื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาอาคาร BIPV ในเวลา 14.30 น. วันเพ็ญ (Winter Solstice)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 (a) และ (b) ตัวอย่างที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของเงาที่ทอดจาก Surrounding Obstacle ลงบนสู่ พื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาอาคาร BIPV ในเวลา 15.30 น. วันเพ็ญยัน (Winter Solstice)

ขณะที่จุด C และจุด D คือจุดของเงาที่เกิดขึ้นจากจุด A และจุด B ตามลำดับ อันถูกกำหนดขึ้นโดยอย่างมีความสัมพันธ์กับ Altitude Angle และ Azimuth ของดวงอาทิตย์ จากรูปที่ 2.11 และ 2.12 จะเห็นได้ว่าพิกัดสามมิติของ Surrounding Obstacle (จุด A และจุด B) และอาคาร BIPV นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่จุดตำแหน่งเงา (จุด C และจุด D) ที่อยู่บนแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีการย้ายตำแหน่ง พื้นผิวและรูปร่างของเงาได้มีความเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมาก ดังที่แสดงในรูปที่ 2.12 (a) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 (b) การเปลี่ยนแปลงของการทอดเงา (Projected Shadow) นี้ได้ส่งผลกระทบต่อให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของระดับ Solar Insolation บนผิวเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอย่างมาก (Ning, et al., 2017) จากรายละเอียดที่ได้กล่าวไปในข้างต้นนั้นแสดงให้เห็นภาพรวมของปัจจัยสำคัญทั้ง 4 กลุ่มใหญ่ อันเป็นสิ่งที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ PSE ซึ่งได้แก่ Surrounding-reflected Radiation, Surrounding Obstacle, PV Surface Geometries และ PV Module Properties โดยจะสรุปข้อมูลเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 2.6 เพื่อได้กล่าวถึงรายละเอียดของปัจจัยที่ได้มีการศึกษาในการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3 อาคารผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ กับระบบสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคาร

2.3.1 ระบบสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคาร (Building Performance Simulation: BPS)

การออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ของอาคารที่มีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องมีการคาดการณ์ผลิตภาพ (Photovoltaic Productivity Estimation) พลังงานไฟฟ้าที่จะได้รับจากระบบได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากต้องให้มีความสมดุลกับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการเพื่อตอบสนองการใช้งานใน BIPV อย่างเพียงพอแต่ไม่มากเกินไปจนความจำเป็นเพื่อประสิทธิภาพในการใช้ต้นทุน (Cost Effective) ที่ดี แต่หนึ่งในปัญหาสำคัญที่สุดที่ทำให้การคาดการณ์ผลิตภาพดังกล่าว ทำได้ยาก หรือคลาดเคลื่อน ผิดพลาดจากความเป็นจริง คือสภาวะการโดนบังเงาบางส่วนนั่นเอง เนื่องจากสภาวะนี้มีความซับซ้อน ไร้รูปแบบตายตัว และมีสภาพอันเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบ PV อยู่ในบริบทคล้ายเมืองที่มีความหนาแน่นของอาคารและมีวัตถุแวดล้อม (Kanters & Wall, 2014; Kanters, 2015)

ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีอาคารผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ (BIPV) จะมีศักยภาพในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอันเกิดจากกระบวนการผลิตพลังงานภาคอาคารก็ตาม แต่ยังคงพบว่าการออกแบบ 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 โดยการประเมินทางปริมาณ (Quantitative Assessment) ของปริมาณรังสีอาทิตย์ (irradiance) ที่ตกลงบนพื้นผิวรับรังสีของระบบ PV ด้วยการ ใช้ เครื่องมือสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคาร (Simulation Tools / Building Performance Simulation: BPS) (Ning, และคนอื่นๆ, 2017)

ระบบสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคาร (Building Performance Simulation: BPS) คือเครื่องมือที่ถูกพัฒนาขึ้นด้วยวัตถุประสงค์เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบอาคารโดย (1) การจำลองและแสดงผลฟังก์ชันลักษณะทางกายภาพด้านใดด้านหนึ่งของอาคารด้วยการใช้แบบจำลองการคำนวณ อันเป็นตัวแทนคุณลักษณะทางกายภาพนั้นๆ ตัวอย่างเช่น การจำลองสมรรถนะอาคารด้านการส่งผ่านความร้อนผ่านเปลือกอาคาร ด้วยการใช้แบบจำลองการคำนวณด้านการส่งผ่านความร้อนผ่านวัสดุอาคาร เป็นต้น และโดย (2) การแสดงผลฟังก์ชันดังกล่าวอย่างสม่าเสมอ ถูกต้อง และเที่ยงตรง อยู่ในเกณฑ์ที่เป็นที่ยอมรับตามมาตรฐานในมิติของการตรวจวัดสมรรถนะอาคารด้านนั้นๆ (Bazjanac, และคนอื่นๆ, 2011; Clarke และ Hensen, 2015)

BPS ที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการออกแบบอาคารนั้นสามารถจำแนกออกเป็นประเภทตามความสามารถการสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคารต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้ (พันธูตา 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 อาจมีความสามารถการจำลองสมรรถนะอาคารมากกว่าหนึ่งประเภท 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 Energy Simulation, Parametrics & Optimization และ Energy Conservation Measure เป็นต้น (IBPSA-USA, 2015)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ระบบสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคารแบบอัตโนมัติ (Automated BPS)

แม้ว่าในปัจจุบันเทคโนโลยี BPS จะมีการพัฒนาไปเป็นอย่างมากจากในอดีต ทั้งทางความสะดวกในการใช้งาน ความถูกต้องเที่ยงตรง และความหลากหลายเฉพาะทาง แต่ยังคงพบว่าเครื่องมือ BPS ยังมีอุปสรรคสำคัญที่ทำให้ไม่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้ออกแบบ BIPV ได้ อย่างครบถ้วนคือ 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 และยังคงพบว่า Energy Modeler แต่ละคนจะมี การป้อนข้อมูลนำเข้าระบบ BPS โดยพลการ/โดยเดาสุ่ม (Arbitrary Data) ซึ่งสร้างความเสี่ยงให้ผลลัพธ์จาก BPS นั้นผิดพลาดและไม่น่าเชื่อถือ (Bazjanac, et al., 2011; Hitchcock & Wong, 2011; Clarke & Hensen, 2015) จึงทำให้เกิดวิธีการใหม่ที่ถูกใช้เพื่อกำจัดข้อบกพร่องดังกล่าว ของการสร้างแบบจำลองสมรรถนะอาคารและป้อนข้อมูลนำเข้าด้วยระบบมือ คือการใช้งานระบบการสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคาร การแปลงข้อมูล และการนำเข้าข้อมูลเข้าสู่ BPS แบบอัตโนมัติ (Automated BPS) วิธีการนี้สามารถลดข้อผิดพลาดในกระบวนการที่ได้กล่าวไปอันเกิดจากความผิดพลาดที่เกิดจากมนุษย์ (Human Error) นอกจากนี้ Automated BPS ยังสนับสนุนให้สามารถนำข้อมูลอาคารและข้อมูลแบบจำลองสมรรถนะอาคารกลับมาใช้ซ้ำได้ผ่านกระบวนการปฏิบัติการร่วม (Interoperability) แบบสนับสนุนการส่งข้อมูลแบบไป-กลับ (Bi-directional Data Exchange) ระหว่างระบบการสร้างแบบจำลองกับระบบ BPS อีกด้วย (O'Donnell, et al., 2011)

2.3.3 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 (Krygiel และ Nies, 2008; Kymmell, 2008; Eastman, Teicholz, Sacks, และ Liston, 2011; Matthew, Jason, Melissa, Seokho, และ Fiona, 2013; Ladenhauf, และคนอื่นๆ, 2015; Agugiaro, 2016; Kuo, Hsieh,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและข้อมูลอื่นที่เกี่ยวข้องกับการนำข้อมูลไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Guo, และ Chan, 2016; Somboonwit, Boontore, และ Rugwongwan, 2017) ระบบ BIM นั้นมีความสำคัญ คือการส่งผ่านข้อมูลเรขาคณิตอาคารออกไปเพื่อทำงานร่วมกับระบบ BPS เพื่อศึกษาหาทางเลือกในการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานและการใช้พลังงานทดแทน โดยการเชื่อมต่อการทำงานระหว่าง BIM และ BPS มีการส่งผ่านข้อมูลต่อกันเป็นแบบปัจจุบันมีการประมวลผลแบบทันที (Runtime Level) และสามารถส่งผลลัพธ์ด้านสมรรถนะอาคารกลับไปยังระบบ BIM เพื่อแสดงผลต่อผู้ออกแบบอาคาร เป็นการสนับสนุนการตัดสินใจตั้งแต่ขั้นตอนแรกๆ ของกระบวนการออกแบบ ส่งเสริมให้การออกแบบอาคาร โดยเฉพาะ BIPV ให้มีความรวดเร็วและมีความถูกต้องด้านข้อมูลสนับสนุนการสร้างทางเลือก และเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบระบบ PV ให้บรรลุสูงสุด (Optimization) (Ning, et al., 2017)

ระบบแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling: BIM) หมายถึงแนวคิด กระบวนการ และเครื่องมือ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างและจัดการสารสนเทศแบบจำลองโครงการก่อสร้างอย่างเป็นพลวัต 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 และการวิเคราะห์แบบจำลองอาคารนั้นๆ ในกลุ่มของผู้มีส่วนร่วมทั้งข้อมูลกราฟิก (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 จะต้องมีความสอดคล้องดังต่อไปนี้ (Eastman, Teicholz, Sacks, และ Liston, 2011)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 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)

2.3.4.1 เพื่อช่วยให้ผู้มีส่วนร่วมในโครงการ (รวมถึงเจ้าของโครงการ) สามารถกำหนดรายละเอียดของการส่งมอบ BIM (BIM Deliverables) ให้กันและกันในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการออกแบบ-ก่อสร้างอาคารได้

2.3.4.2 เพื่อช่วยให้ผู้จัดการกระบวนการออกแบบ สามารถสื่อสารกับคณะผู้ออกแบบเกี่ยวกับสารสนเทศอาคารและรายละเอียดที่ต้องการในกระบวนการออกแบบแต่ละขั้นตอนได้

2.3.4.3 เพื่อจัดให้มีมาตรฐานกลางที่สามารถใช้อ้างอิงในกระบวนการทำสัญญาจัดจ้างและการลงมือพัฒนา BIM ของโครงการออกแบบ-ก่อสร้างอาคารนั้นๆ

โดย LOD สามารถหมายถึงได้ทั้ง Level of Detail หรือ Level of Development จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่ามีการให้คำจำกัดความที่ต่างกันดังที่แสดงใน ตารางที่ 2.2

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

Level of Detail	เรขาคณิตอย่างคร่าว / เรขาคณิตอย่างละเอียด / การขึ้นรูประดับอาคาร / การจัดทำเอกสารก่อสร้าง (Leite, Akcamete, Akinci, Atasoy, & Kizitas, 2011)
	แบบแนวความคิด / เรขาคณิตอย่างคร่าว / เรขาคณิตอย่างละเอียด / การขึ้นรูปอาคาร / เหมือนอาคารสร้างเสร็จ (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 / เหมือนอาคารสร้างเสร็จ / เหมือนอาคารขณะใช้งาน (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)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

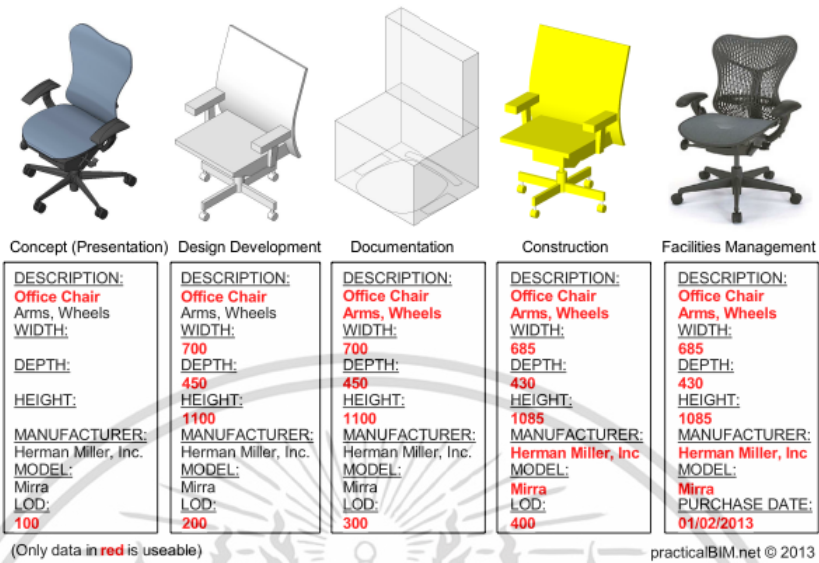
- LOD 100: มีการแสดงถึงองค์ประกอบอาคารเป็นเพียงสัญลักษณ์หรือการอธิบายทั่วไป ระดับข้อมูล LOD 100 นี้มีเพื่อใช้จัดทำแบบเพื่อการวิเคราะห์แบบร่างเท่านั้นแบบจำลอง (Model) ควรประกอบด้วยก้อนทรงอาคาร (Massing) ในภาพรวมอย่างคร่าวๆและข้อมูลประกอบโครงการต่างๆ เช่น ประเภทของอาคาร ปริมาตร ทิศทางการหันอาคาร เป็นต้น
- 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 Drawingsและในวัตถุอาจมีข้อมูลด้านราคา ด้านผู้ผลิต ฯลฯ บันทึกอยู่ด้วย
- LOD 500: เรขาคณิตของวัตถุองค์ประกอบอาคารนั้นจะต้องถูกตรวจสอบความถูกต้อง วัตถุนั้นๆอาจจะมีการบรรจุข้อมูลด้านการใช้อาคาร (Operation) และการบำรุงรักษาอาคาร (Maintenance) ไว้ด้วยและจะต้องมีความละเอียดของเรขาคณิตและข้อมูลประกอบเทียบเท่า As-built Construction

LOD นั้นเป็นเป็นสิ่งที่สะสมเพิ่มขึ้นตามลำดับขั้น(Cumulative) ตัวอย่างเช่น LOD 300 นั้นจะต้องมีลักษณะของความละเอียดข้อมูลที่ครบถ้วนของ LOD 100 และ LOD 200 มาแล้ว เป็นต้น และในโครงการก่อสร้างจริงนั้น การกำหนดระดับ LOD ให้เป็นค่าตายตัวในแต่ละขั้นตอนของโครงการนั้นทำได้ยาก ดังนั้นการเปิดกว้างให้วัตถุองค์ประกอบอาคารสามารถมี ระดับ LOD ที่แตกต่างกัน (Variable LODs) ภายในแบบจำลองสารสนเทศ (BIM) ในแต่ละขั้นตอนของโครงการก่อสร้างได้ (Dougherty, 2015) อย่างไรก็ตาม ผู้รับผิดชอบโครงการออกแบบอาคารนั้นจำเป็นต้องกำหนด LOD ในกระบวนการออกแบบแต่ละขั้นตอนให้เหมาะสม เนื่องจาก การเพิ่มระดับรายละเอียดขององค์ประกอบอาคารและแบบจำลองสารสนเทศอาคารขึ้นไปแต่ละขั้น LOD นั้นจำเป็นต้องใช้เวลาและความพยายามเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 2 เท่า ถึง 11 เท่าตัว (Leite, Akcamete, Akinci, Atasoy, & Kizitas, 2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

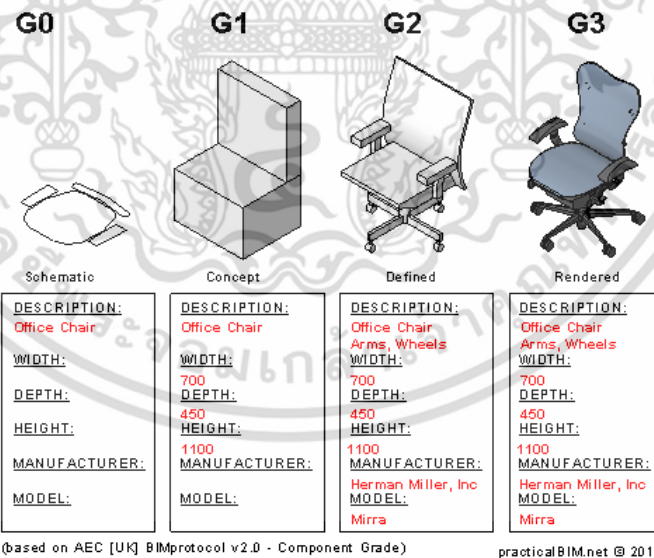
LEVEL of DEVELOPMENT

LOD 100 LOD 200 LOD 300 LOD 400 LOD 500



รูปที่ 2.13 การแสดงตัวอย่างการเพิ่มขึ้นของข้อมูลในระดับ Level of Development ตั้งแต่ LOD100 ถึง LOD500 (สมาคมสถาปนิกสยามในพระบรมราชูปถัมภ์, 2558; McPhee, 2013)

LEVEL of DETAIL



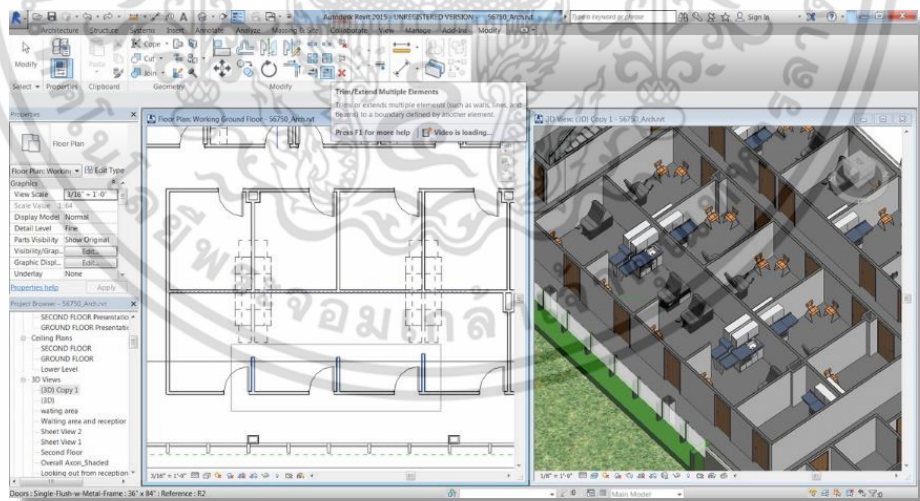
รูปที่ 2.14 การแสดงตัวอย่างการเพิ่มขึ้นของข้อมูลในระดับ Level of Detail ของแบบจำลองสารสนเทศก่อสร้างตามการแบ่งระดับ AEC (UK) BIM Protocol (McPhee, 2013)

จากรายละเอียดด้าน LOD ดังที่กล่าวไป การวิจัยนี้เลือกพัฒนาแบบจำลองสารสนเทศ (BIM Model) อาคาร BIPV ด้วย LOD300 เพื่อให้แบบจำลองนั้นมีรายละเอียดคุณสมบัติเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เกี่ยวข้องกับด้านพลังงานครบถ้วน และเลือกพัฒนา BIM Model อาคาร Obstacle ด้วย LOD200 เพื่อลดการใช้พลังงานประมวผลในกระบวนการจำลองสถานการณ์สมรรถนะอาคารให้ต่ำที่สุด โดยคงคุณสมบัติด้านพลังงานเท่าที่จำเป็น ให้เหมือนกันในขั้นตอนการทดลองด้วยการสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคารทุก Simulations

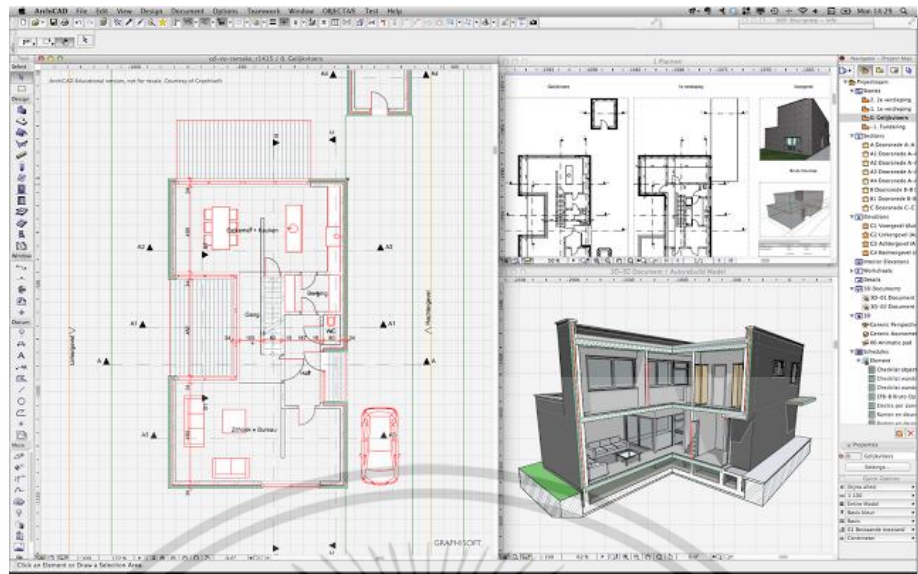
ปัจจุบันมีระบบ BIM ในรูปแบบซอฟต์แวร์สำเร็จรูปจำหน่ายในท้องตลาดอยู่เป็นจำนวนมาก ได้แก่ Autodesk Revit, Graphisoft ArchiCAD, Nemetschek Vectorwork, Bentley MicroStation เป็นต้น (CAD Addict, 2010; Eastman, Teicholz, Sacks, & Liston, 2011)

ระบบ BIM ในมุมมองของความเป็นเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการออกแบบนั้นนับว่ามีตัวเลือกที่มีความหลากหลายในท้องตลาด แต่ละโปรแกรมต่างมีข้อเด่นและข้อจำกัดที่แตกต่างกันไป แต่ในความเป็นเครื่องมือของระบบ BIM เหล่านี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อการตอบสนองของกระบวนการและระเบียบวิธี (Processes and Methodology) แบบ BIM คือ การมีข้อมูลที่ประสานกัน (Coordinated) ความสอดคล้องของข้อมูล (Consistent) และสามารถคำนวณได้ (Computable) โดยสิ่งสำคัญที่จะทำให้การใช้งานเครื่องมือ กระบวนการ 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)

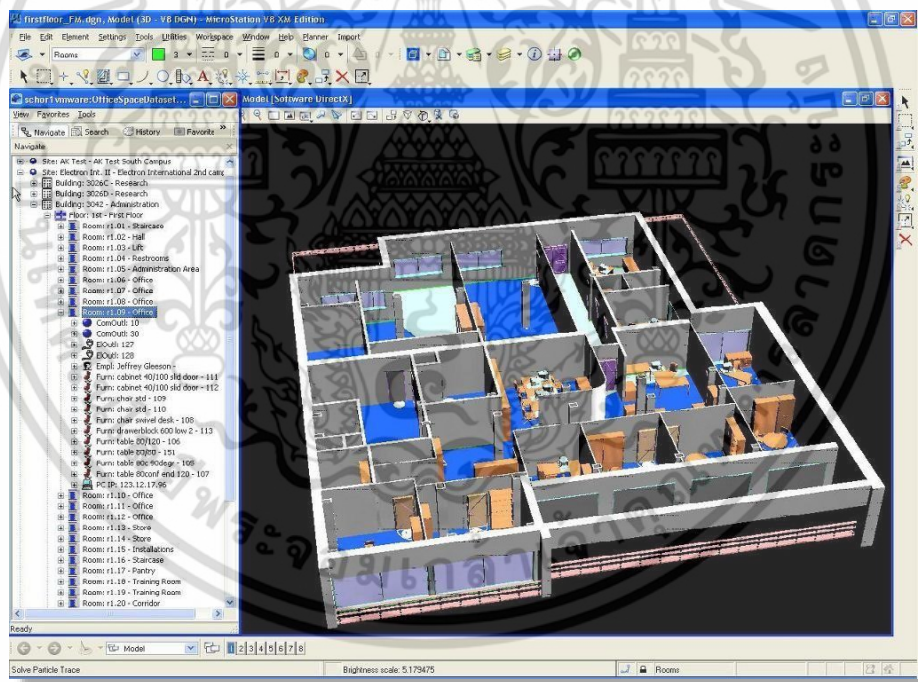


รูปที่ 2.15 ตัวอย่างภาพจากโปรแกรม Autodesk Revit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

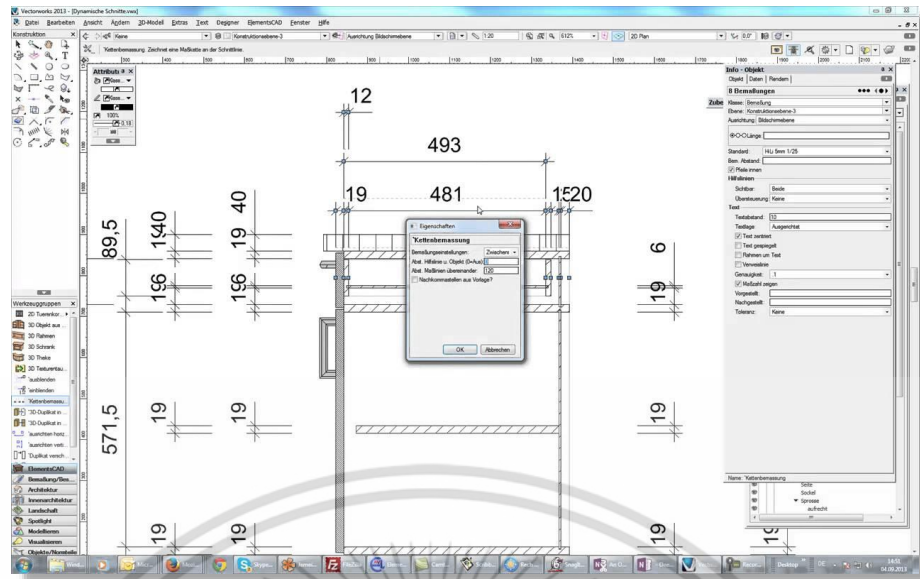


รูปที่ 2.16 ตัวอย่างภาพจากโปรแกรม ArchiCAD



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างภาพจากโปรแกรม MicroStation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างภาพจากโปรแกรม Vectorwork

2.3.5 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) ช่วยให้ผู้ออกแบบอาคารทำงานได้สะดวกขึ้นด้วยการแสดงผลอาคารสามมิติ (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 ปัจจุบันระบบแบบจำลองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวนว่สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารสนเทศอาคาร (BIM) ได้มีความสามารถในการปฏิบัติการร่วม (Interoperability) กับการใช้งานระบบจำลองสมรรถนะอาคาร (BPS) เนื่องจาก อุปสรรคสำคัญในการใช้งานระบบ BPS คือ ความซับซ้อนในการป้อนข้อมูลที่มีอยู่มากมายเข้าสู่ระบบ ไม่ว่าจะเป็น ข้อมูลเรขาคณิตของอาคาร ข้อมูลคุณสมบัติด้านพลังงานของวัสดุอาคาร ข้อมูลด้านสภาพภูมิอากาศ ข้อมูลด้านงานระบบเครื่องกลของอาคาร 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-ผลการ-เดาสุ่ม (Arbitrary Judgment) ของผู้จำลองสมรรถนะอาคาร (Energy Modeler) อีกด้วย (Bazjanac, และ คนอื่นๆ, 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: IA) 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) แบบหนึ่งซึ่งเป็นมาตรฐานหลักที่ใช้ส่งผ่านข้อมูลสารสนเทศด้านพลังงาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอาคาร 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) ซึ่งพบว่า กระบวนการ Interoperability ดังกล่าวนั้นผู้พัฒนาระบบ BIM และระบบ BPS มุ่งเน้นพัฒนาให้เป็นกระบวนการแบบกล่องดำ (Black-box Approach) อันเป็นกระบวนการที่ผู้ใช้งานระบบไม่สามารถรับรู้ความถูกต้องของการเปลี่ยนรูปแบบข้อมูลในกระบวนการนั้นๆได้ (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) นั้น จำเป็นต้องดำเนินการตามแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุด (Best Practices) เพื่อให้เกิดความถูกต้องเที่ยงตรงสูงสุดของผลลัพธ์ของการจำลองสมรรถนะอาคาร ภาพรวมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะถูกอธิบายในหัวข้อ 2.6

2.4 อาคารสถานบริการสุขภาพภาครัฐในประเทศไทย

2.4.1 อาคารสถานบริการสุขภาพภาครัฐ (Public Healthcare Facility Buildings)

สถานบริการสุขภาพภาครัฐ หมายถึง สถานที่ที่ประกอบด้วยอาคาร และองค์ประกอบสภาพแวดล้อม ที่ถูกจัดให้มีไว้เพื่อตอบสนองการใช้งานของระบบสุขภาพของประเทศ ไทย ภายใต้การควบคุม กำกับ ดูแล โดยรัฐบาลไทย ตัวอย่างของอาคารสถานบริการสุขภาพภาครัฐในประเทศไทย ได้แก่ อาคารต่างๆในโรงพยาบาลภาครัฐ เช่น โรงพยาบาลศูนย์ โรงพยาบาลประจำจังหวัด โรงพยาบาลประจำอำเภอ โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพระดับตำบล และหน่วยบริการสุขภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฐมภูมิ (Primary Care Unit: PCU) เป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่นั้นอยู่ภายใต้การกำกับ ดูแล และบริหาร โดยกระทรวงสาธารณสุข ซึ่งเป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบโดยตรงเกี่ยวกับสุขภาพของประชาชน ทั้งประเทศ ทั้งด้านการป้องกัน การรักษา การฟื้นฟู และการส่งเสริม ให้ประชาชนมีสุขภาพที่ดี แต่การมีอาคารสถานบริการสุขภาพภาครัฐที่ดี นั้นจำเป็นต้องถึงพร้อมด้วยองค์ประกอบต่างๆ ที่แตกต่างจากอาคารทั่วไป ทั้งทางด้านวางผังแม่บท (Master Plan) ด้านพื้นที่ใช้สอย (Functional Areas) ด้านองค์ประกอบและวัสดุอาคาร (เช่น วัสดุพื้น ผนัง ฝ้าเพดาน ประตู หน้าต่าง เป็นต้น) ด้านระบบการสัญจร (Circulation Systems) ด้านการป้องกันการติดเชื้อ (Infectious Controls) ด้านระบบอาคาร เช่น งานตกแต่งภายในและเฟอร์นิเจอร์ งานวิศวกรรมโครงสร้าง งานวิศวกรรมไฟฟ้าและการสื่อสาร งานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และงานวิศวกรรมเครื่องกล เป็นต้น (กองแบบแผน, 2558) ซึ่งทำให้การออกแบบทางสถาปัตยกรรมและวิศวกรรม การก่อสร้าง การใช้งานอาคาร (Architecture, Engineering, Construction and Operation: A/E/C/O) ของอาคารสถานบริการสุขภาพภาครัฐ นั้นมีความซับซ้อน ต้องการผู้ดำเนินการที่มีความเชี่ยวชาญ และมีความต้องการทรัพยากรด้านต่างๆ เป็นอย่างมาก ทั้งทางด้านกำลังคน อุปกรณ์ เวลา และงบประมาณ โดยองค์ประกอบด้านกายภาพของอาคารสถานบริการสุขภาพภาครัฐภายใต้สังกัดกระทรวงสาธารณสุขส่วนใหญ่ถูกก่อสร้างจากการออกแบบและการดูแลด้านการก่อสร้างของ กองแบบแผน กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ กระทรวงสาธารณสุข โดยกองแบบแผนเป็นองค์กรภาครัฐที่มีพันธกิจที่สำคัญในการพัฒนาเกณฑ์ มาตรฐาน รูปแบบ ศึกษาวิจัย รวมถึงการออกแบบด้านสถาปัตยกรรม วิศวกรรม การจัดทำแบบก่อสร้างและการอำนวยความสะดวกก่อสร้าง อาคารและสภาพแวดล้อมสาธารณสุข ซึ่งเป็นการให้บริการทั้งทางด้านวิชาการ และด้านวิชาชีพ เพื่อให้สถานบริการสุขภาพมีคุณภาพตามมาตรฐานด้านอาคารสถานที่ (ณัฐสิทธิ์ สมบูรณ์วิทย์, 2552)

2.4.2 แบบก่อสร้างมาตรฐาน (Generalizable Building Design: GBD)

ด้วยสาเหตุดังกล่าว ทำให้ตลอดระยะเวลาหลายสิบปีที่ผ่านมา กองแบบแผน จำเป็นต้องมีการพัฒนา แบบก่อสร้างมาตรฐาน (Generalizable Building Design: GBD หรือ Cookie-cutter Design) คือแบบก่อสร้างอาคารที่ถูกออกแบบด้วยแนวความคิด “แบบเดียว ใช้ก่อสร้างได้ทุกที่” “One Size Fits All” และเมื่อจัดทำเสร็จจะถูกนำไปใช้ซ้ำในการก่อสร้างอาคารในสถานบริการสุขภาพภาครัฐ (เช่น โรงพยาบาล สถานิอนามัย สำนักงานสาธารณสุข ฯลฯ) ที่ตั้งอยู่ในทุกภูมิภาคของประเทศไทย ที่มีความต้องการอาคารตรงตามการใช้สอยและขนาดของอาคารนั้นๆ เพื่อลดขั้นตอน ลดเวลา และลดการใช้กำลังคน ที่จะต้องทุ่มลงไปในทุกๆ ครั้งของกระบวนการออกแบบอาคาร และเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพ และลดต้นทุนต่อหน่วย (Unit Cost) ในกระบวนการออกแบบอาคาร โดยมีเป้าประสงค์สำคัญ คือเพื่อให้ GBD ถูกนำไปใช้ก่อสร้างทั่วทุกภูมิภาคของประเทศไทยได้อย่างไม่ยากลำบาก โดยช่างและผู้รับเหมาก่อสร้างท้องถิ่น ให้สามารถดำเนินการก่อสร้างได้โดยใช้วัสดุก่อสร้าง เทคโนโลยี เครื่องมือ และอุปกรณ์ ที่จัดหาได้ง่ายในท้องถิ่น และต้องมีต้นทุนในการก่อสร้างต่อตารางเมตรต่ำ ดังนั้น GBD จะมีรูปแบบที่ตอบสนองต่อการใช้งานอย่างเรียบง่าย และไม่ซับซ้อน ไม่สร้างความสับสนต่อผู้ก่อสร้าง ซึ่ง GBD นั้นถูกนำไปใช้ก่อสร้างในสถานบริการสุขภาพต่างๆ ทั่วประเทศเป็นจำนวนมาก แต่ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นคือ ส่วนใหญ่การนำ GBD ไปใช้ก่อสร้างนั้นมีจุดประสงค์หลักเพื่อมุ่งเน้นตอบสนองต่อการใช้สอยด้านพื้นที่เป็นสำคัญ การตระหนักถึงบริบทด้านสภาพแวดล้อมและสภาพภูมิอากาศของสถานที่ตั้งอาคาร เช่น ทิศทางลม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางการรังสีอาทิติย์ ลักษณะตึกข้างเคียง ลักษณะภูมิศาสตร์บริเวณข้างเคียง นั้นเป็นจุดประสงค์รอง ที่ผู้ออกแบบอาคารตระหนักเป็นประเด็นที่มีความสำคัญน้อย ซึ่งสิ่งต่างๆที่ได้กล่าวไปนั้นล้วนเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการใช้พลังงานทั้งสิ้น รวมถึงศักยภาพในการสร้างพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทน (เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น) ของ GBD อย่างหลีกเลี่ยงไม่พ้น (Somboonwit, 2011; Somboonwit และ Sahachaisaeree, 2012) และยิ่งพบว่า สถานบริการสุขภาพภาครัฐ นั้นมักจะถูกก่อสร้างในที่ดินราชพัสดุ (ที่ดินของรัฐบาล) หรือในที่ดินที่ได้มาจากการบริจาคจากประชาชนหรือจากองค์กรต่างๆ ดังนั้นที่ดินดังกล่าวจึงมักมีรูปร่าง ขนาด ทิศทางการตั้ง และบริบทของสิ่งแวดล้อมรอบข้าง ที่มีหลากหลายและไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งทำให้สถานบริการสุขภาพจำนวนมากต้องก่อสร้างในที่ดินที่ถูกแวดล้อมด้วยอาคารสูง และแหล่งชุมชน และมีรูปร่างที่ไม่ส่งเสริมให้มีการวางผังที่ดี เช่น มีรูปร่างที่ดินที่คดเคี้ยว มีส่วนแคบคอดของที่ดิน และมีสถานที่ตั้งของที่ดินที่บังคับให้ต้องวางผังอาคารให้มีการหันอาคารไปยังทิศที่ไม่เหมาะสม (เช่น หันหน้าอาคารออกทิศตะวันตก) เป็นต้น

2.4.3 รูปแบบการขยายตัวของสถานบริการสุขภาพภาครัฐในประเทศไทย

ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2540 เป็นต้นมา สถานบริการสุขภาพภาครัฐได้มีการขยายตัวด้านอาคารและสภาพแวดล้อมอย่างรวดเร็ว เนื่องจากได้รับผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของประชากร การมีโรคอุบัติใหม่เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีทางการแพทย์ และการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทางการแพทย์ของประชาชน ทำให้ต้องมีการก่อสร้างอาคารต่างๆ ในสถานบริการสุขภาพขึ้นมาใหม่เป็นจำนวนมาก และจำเป็นต้องมีการกำหนดแผนแม่บท (Master Planning) และการวางผังสถานบริการสุขภาพ (Layout Planning) อย่างรัดกุม ให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการในปัจจุบันและอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ และต้องมีความสอดคล้องกับนโยบายกระทรวงสาธารณสุข และนโยบายระบบบริการสุขภาพ (Service Plan) คือ การจัดให้มีการสร้างระบบเครือข่ายของสถานบริการสุขภาพที่ถูกแบ่งออกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ บริการระดับปฐมภูมิ (Primary Care) บริการระดับทุติยภูมิ (Secondary Care) บริการระดับตติยภูมิ (Tertiary Care) และบริการระดับตติยภูมিরะดับสูง (Excellence Center) โดยการให้บริการแต่ละระดับจะมีความแตกต่างกัน ไล่ระดับตั้งแต่การให้บริการทางการแพทย์แบบทั่วไป จนถึงการให้บริการทางการแพทย์แบบเฉพาะทาง และไล่ระดับตั้งแต่การบริการที่รองรับประชากรจำนวนน้อยจนถึงจำนวนมาก (คณะทำงานโครงการจัดทำแผนแม่บทด้านอาคารและสภาพแวดล้อม, 2559)

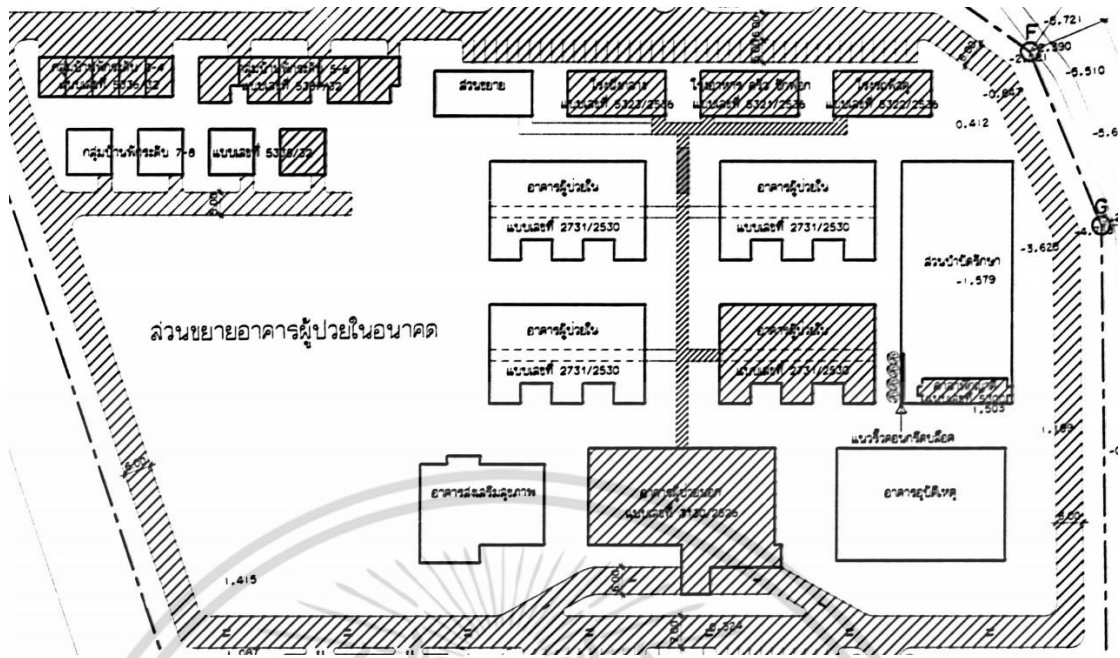
พบว่า การวางผังสถานบริการสุขภาพ (Layout Planning) ของสถานบริการสุขภาพขนาดเล็ก เช่น สถานีอนามัย ศูนย์สุขภาพชุมชน หน่วยบริการสุขภาพปฐมภูมิ (PCU) โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพระดับตำบล (ระดับปฐมภูมิ) ซึ่งมีจำนวน 9,766 แห่งทั่วประเทศ จนถึงโรงพยาบาลทั่วไปขนาดเล็ก (ระดับทุติยภูมิ) ซึ่งมีจำนวน 780 แห่งทั่วประเทศ (สำนักบริหารการสาธารณสุข สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข, 2016) นั้นส่วนใหญ่ได้นำแบบก่อสร้างมาตรฐาน (GBD) ไปใช้ก่อสร้างอาคาร ดังเหตุผลที่ได้กล่าวไปใน ข้อ 1.1.2 เนื่องจากสถานบริการสุขภาพกลุ่มดังกล่าวนี้มีจำนวนมาก เป็นกลุ่มใหญ่ของประเทศ และยังเป็นด่านแรกที่ใกล้ชิดประชาชนที่สุดของการให้บริการด้านสุขภาพตามนโยบายการสร้างหลักประกันสุขภาพถ้วนหน้า คุณภาพของอาคารสถานบริการสุขภาพกลุ่มนี้ จะส่งผลกระทบต่อประชาชนชาวไทยส่วนใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประชาชนผู้มีรายได้น้อยและอยู่ห่างไกลจากการบริการสุขภาพระดับสูง ดังนั้นจะเห็นได้ว่า อาคารสถานบริการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

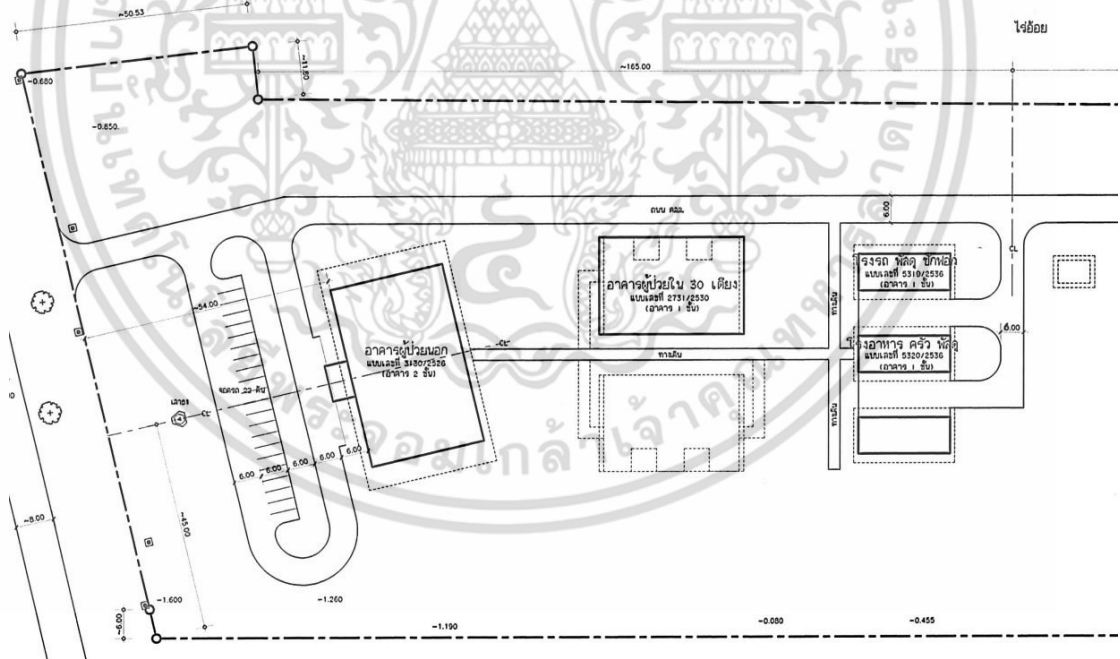
สุขภาพที่ก่อสร้างจาก GBD นั้นสร้างผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของประชาชนและต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งทางด้านบวกและด้านลบได้อย่างมากมาย (ณัฐสิทธิ์ สมบูรณ์วิทย์, 2552; Somboonwit, Modeling for building energy performance improvement in accordance with the local climatic settings: A case of a generalizable building design of intermediate health care facilities in Thailand, 2011)

โดยปกติ การวางผังสถานบริการสุขภาพโดยเฉพาะโรงพยาบาลชุมชนขนาดเล็ก จะถูกวางแผนให้สามารถขยายตัวเพื่อรองรับปริมาณผู้ป่วยได้เพิ่มขึ้นและให้บริการทางการแพทย์ที่มีความซับซ้อนเฉพาะทางได้มากขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงของบริบททางสังคม ตัวอย่างเช่น โรงพยาบาลชุมชนขนาด 30 เตียง ที่สามารถขยายตัวได้จนเป็นโรงพยาบาลชุมชนขนาด 120 เตียงได้ ซึ่งการขยายตัวดังกล่าวสามารถทำได้โดยวางผังให้โรงพยาบาลมีอาคารหลักที่ใช้ในการให้บริการทางการแพทย์ 2 อาคาร (ไม่นับรวมอาคารสนับสนุนและอาคารพักอาศัย ได้แก่ อาคารซ่อมบำรุง อาคารโภชนาการ อาคารซักฟอก-จ่ายกลาง และอาคารพักเจ้าหน้าที่ ที่เป็นอาคารชั้นเดียวขนาดเล็กและมีแบบที่หลากหลาย) คืออาคารผู้ป่วยนอก (Outpatient Department: OPD) ที่มีความสามารถให้บริการทางการแพทย์พื้นฐานได้ครบถ้วน 1 หลัง ที่มีการใช้งานเป็นห้องตรวจ ห้องฉุกเฉิน ห้องรังสีวินิจฉัย (หรือห้องเอ็กซเรย์) ห้องผ่าตัดเล็ก-ฉีดยา-ทำแผล แผนกทันตกรรม แผนกเภสัชกรรม ห้องเก็บเวชระเบียน และห้องสำนักงานได้ และมีอาคารพักผู้ป่วยใน (Inpatient Wards หรือ Wards) ขนาด 30 เตียง ซึ่งเป็นขนาด GBD สำหรับการใช้งานเป็น Wards ที่เล็กที่สุดที่มีการใช้งานในปัจจุบันอีก 1 หลัง เมื่อโรงพยาบาลมีการขยายตัวเพิ่มจาก 30 เตียง หมายถึงการขยายตัวของโรงพยาบาลระดับทุติยภูมิระดับ 1 (GBD Secondary Expansion Level 1: GBD_{SE1}) เป็น 60 (การขยายตัวของโรงพยาบาลระดับทุติยภูมิระดับ 2: GBD_{SE2}) 90 (การขยายตัวของโรงพยาบาลระดับทุติยภูมิระดับ 3: GBD_{SE3}) และ 120 (การขยายตัวของโรงพยาบาลระดับทุติยภูมิระดับ 4: GBD_{SE4}) โรงพยาบาลจะมีการเพิ่ม GBD อาคารพักผู้ป่วยใน จาก 1 หลัง เป็น 2 – 4 หลัง เพื่อให้สามารถรองรับปริมาณผู้ป่วยใน (Inpatients) ได้ตามเป้าหมายการขยายตัว ตัวอย่างของผังโรงพยาบาลชุมชนที่มีการวางผังดังกล่าวได้แสดงในรูปที่ 2-15 ถึงรูปที่ 2-17 การขยายตัวดังกล่าวจะต้องมีการปรับการใช้งานอาคาร OPD เนื่องจาก เมื่อโรงพยาบาลมีการขยายตัวเป็น 90 เตียงหรือ 120 เตียง อาคาร OPD นั้นๆ จะไม่สามารถรองรับปริมาณการใช้งานได้อีกต่อไป จะต้องมีการปรับการใช้งานอาคาร OPD ให้เป็นการให้บริการผู้ป่วยนอกแต่เพียงอย่างเดียว และจะมีการสร้างอาคารแผนกฉุกเฉินและรังสีวินิจฉัยแยกออกมาต่างหากอีกอาคารหนึ่ง เมื่อโรงพยาบาลชุมชนขนาด 30 เตียง ขยายตัวเต็มศักยภาพเป็นโรงพยาบาลขนาด 120 เตียง จะมีการเพิ่มอาคารจาก 2 หลัง (OPD 1 หลัง และ Wards 1 หลัง) เป็น 6 หลัง (OPD 1 หลัง อาคารแผนกฉุกเฉินและรังสีวินิจฉัย 1 หลัง Wards 4 หลัง) ดังที่ได้แสดง ภาพเชิงมโนทัศน์ (Conceptual Illustration) ของการขยายตัวของโรงพยาบาลชุมชนดังกล่าวในรูปที่ 2.19 ถึงรูปที่ 2.21 (กองแบบแผน, 2547)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

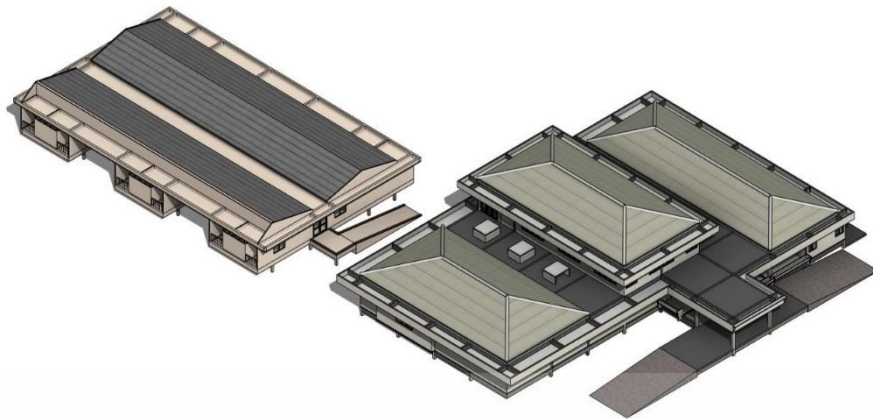


รูปที่ 2.19 ส่วนหนึ่งของผังแม่บทของโรงพยาบาลนาหวัง จ.หนองบัวลำภู



รูปที่ 2.20 ส่วนหนึ่งของผังแม่บทของโรงพยาบาลหนองปรือ จ.กาฬจนบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

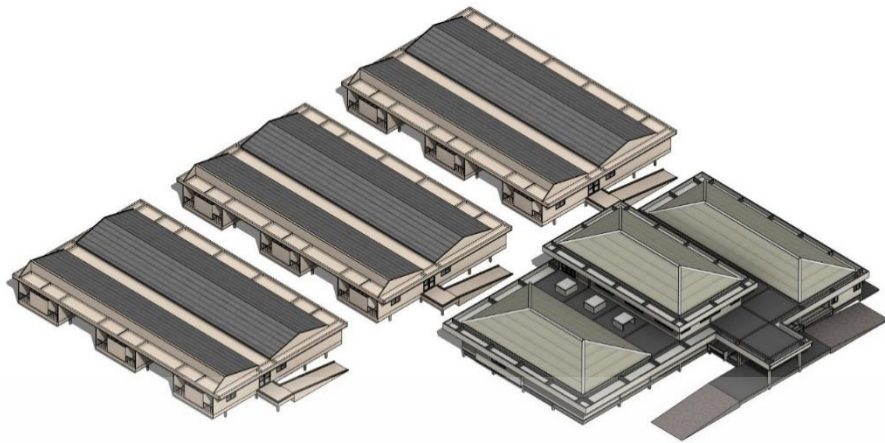


รูปที่ 2.22 ภาพเชิงมนทัศน์ (Conceptual Illustration) การวางอาคารหลักโดยทั่วไปของการขยายขนาดโรงพยาบาลระดับทุติยภูมิขนาดระดับ 1 (GBD_{SE1}) โดยการใช้งานอาคาร Wards ขนาด 30 เตียง 1 หลัง

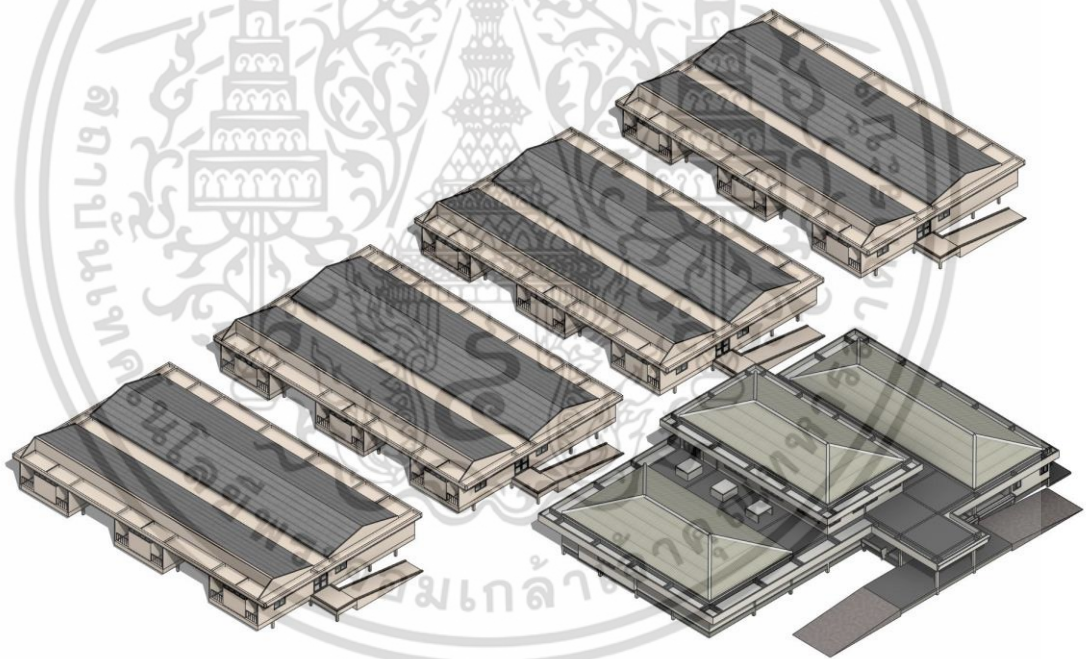


รูปที่ 2.23 ภาพเชิงมนทัศน์ การวางอาคารหลักโดยทั่วไปของการขยายขนาดโรงพยาบาลระดับทุติยภูมิขนาดระดับ 2 (GBD_{SE2}) โดยการใช้งานอาคาร Wards ขนาด 30 เตียง 2 หลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

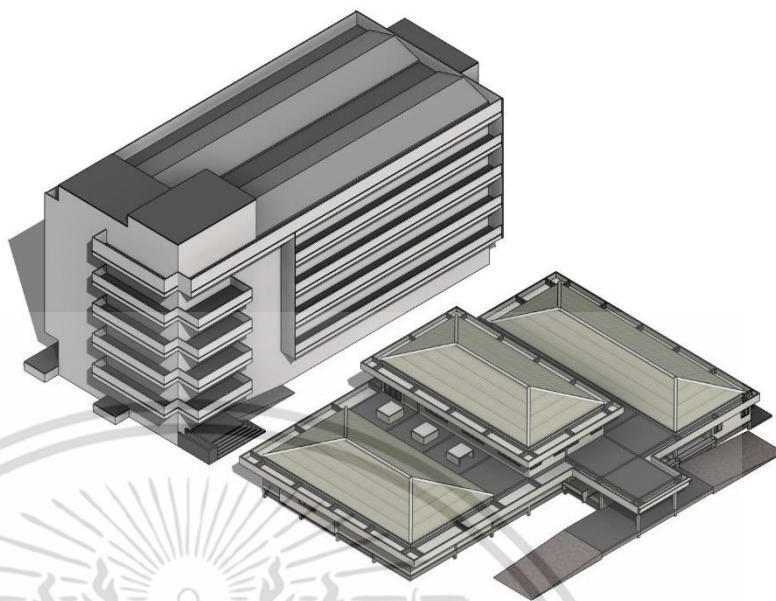


รูปที่ 2.24 ภาพเชิงมโนทัศน์ การวางอาคารหลักโดยทั่วไปของการขยายขนาดโรงพยาบาลระดับ
ทุติยภูมิตระดับ 3 (GBD_{SE3}) โดยการใช้งานอาคาร Wards ขนาด 30 เตียง 3 หลัง



รูปที่ 2.25 ภาพเชิงมโนทัศน์ การวางอาคารหลักโดยทั่วไปของการขยายขนาดโรงพยาบาลระดับ
ทุติยภูมิตระดับ 4 (GBD_{SE4}) โดยการใช้งานอาคาร Wards ขนาด 30 เตียง 4 หลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 ภาพเชิงมนทัศน์ การวางอาคารหลักโดยทั่วไปของการขยายขนาดโรงพยาบาลระดับ
ทุติยภูมิตระดะดับ 5 (GBD_{SES}) โดยการใช้งานอาคาร Wards เป็นอาคารสูง

2.4.4 นโยบายส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในอาคารภาครัฐ

ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556 เป็นต้นมา รัฐบาลไทยโดยกระทรวงพลังงานได้อนุมัติเงินงบประมาณเพื่อดำเนินการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) ให้อาคารภาครัฐ โดยดำเนินโครงการดังกล่าวเป็นไปตามแผนการผลิตพลังงานทดแทนจากแสงอาทิตย์ที่อยู่ภายใต้แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ. 2555 – 2564) เท่ากับ 2,000 เมกะวัตต์ โดยมีเป้าหมายเฉพาะระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา คือ 1,000 เมกะวัตต์ (DEDE, 2017) และในปีพ.ศ. 2558 รัฐบาลได้อนุมัติการส่งเสริมการติดตั้งโซลาร์รูฟอย่างเสรี ในนาม “โครงการนำร่องการส่งเสริมติดตั้งโซลาร์รูฟเสรี” ที่ผลักดันให้ภาคประชาชนเข้ามามีส่วนร่วมในการผลิตไฟฟ้า โดยเฉพาะภาคอาคารที่มีการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน ในปริมาณสูง ถึงแม้ในช่วงเวลาก่อนหน้านี้ส่วนใหญ่ของการส่งเสริมการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์จะอยู่ในรูปแบบโซลาร์ฟาร์ม (Solar Farm) ซึ่งเป็นการลงทุนโดยธุรกิจขนาดใหญ่และส่วนหนึ่งนั้นเป็นการลงทุนโดยกลุ่มทุนต่างชาติ การส่งเสริมให้เกิดโซลาร์รูฟเสรีนี้จะทำให้ภาคครัวเรือนและภาคอาคารมีส่วนร่วมกับการผลิตพลังงานมากขึ้น โดยอนุมัติให้ภาคครัวเรือนและภาคอาคารติดตั้งโซลาร์รูฟได้อย่างเสรี ไม่จำกัดปริมาณและพื้นที่ ไม่จำกัดช่วงเวลา และไม่มีโควต้า เนื่องจากรัฐบาลเห็นว่าการติดตั้งโซลาร์รูฟนั้นก่อให้เกิดประโยชน์ต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไปในข้อ 1.1.6 และยังเห็นว่าเป็นการสร้างมูลค่าให้กับพื้นที่หลังคาของอาคารอีกด้วย โดยวัตถุประสงค์ของโครงการนี้มุ่งเน้นไปเพื่อการผลิตพลังงานเพื่อใช้งานในอาคารเองเป็นหลัก โดยจะสามารถช่วยลดความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด (Peak Demand) ในช่วงเวลากลางวัน ส่วนที่เหลือสามารถขายเข้าระบบได้ (กรมประชาสัมพันธ์, 2558; คณะกรรมาธิการการพลังงาน สภานิติบัญญัติแห่งชาติ, 2560)

พฤศจิกายน พ.ศ. 2559 นายกรัฐมนตรีได้มีคำสั่งให้เร่งรัดการติดตั้งโซลาร์รูฟท็อปในหน่วยงานราชการต่างๆ ทั่วประเทศ โดยให้สำนักงบประมาณอำนวยความสะดวกด้านการตั้งงบประมาณ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และให้กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) เป็นหน่วยงานที่รับผิดชอบดูแล ให้คำแนะนำเทคนิคการติดตั้งระบบโซลาร์รูฟท็อปให้แก่หน่วยงานราชการต่างๆ โดยตรง และยังเตรียมการใช้จ่ายเงินกองทุนเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน 6,000 ล้านบาท สนับสนุนหน่วยงานราชการดำเนินโครงการที่เกี่ยวข้องกับการอนุรักษ์พลังงานและพลังงานทดแทน รวมถึงโครงการติดตั้งระบบโซลาร์รูฟท็อปในหน่วยงานราชการทั่วประเทศ ตามนโยบายนายกรัฐมนตรีดังกล่าว (Energy News Center, 2016)

รูปแบบของ การลงทุนติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์สำหรับอาคารภาครัฐนั้นมีสองรูปแบบ (1) คือ การลงทุนเองของภาครัฐในรูปแบบงบลงทุนโดยการสนับสนุนของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) และสำนักงบประมาณ ตัวอย่างของอาคารภาครัฐที่ใช้วิธีการลงทุนระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์รูปแบบนี้คือ ศูนย์ราชการเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา 5 ธันวาคม 2550 ที่มีพื้นที่ Solar Rooftop PV มากถึง 1,039,250 ตารางเมตร มีระยะเวลาในการคืนทุน 12 ปี อาคารกรมบัญชีกลาง ซึ่งมีระยะเวลาในการคืนทุน 10 ปี และอาคารทำเนียบรัฐบาล ที่สามารถลดค่าไฟฟ้าได้ประมาณ 9% เป็นต้น และรูปแบบการลงทุนแบบที่ (2) คือ การลงทุนโดยบริษัทเอกชนทั้งหมดและหน่วยงานเจ้าของอาคารจะซื้อไฟฟ้าจากบริษัทผู้ลงทุนในราคาที่เหมาะสมกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) แต่ไม่มีการคิดราคาไฟฟ้าแบบก้าวหน้า (Progressive Rate) ตัวอย่างของอาคารภาครัฐที่ใช้วิธีการลงทุนระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์รูปแบบนี้คือ อาคารมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต มีระยะเวลาการทำสัญญา 21 ปี เป็นต้น (กรมบัญชีกลาง, 2559; วรณโชค ไชยสะอาด, 2559; ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2559)

นอกจากนั้น ในปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 กระทรวงสาธารณสุขได้เริ่มดำเนินการโครงการ GREEN & CLEAN Hospital อันเป็นโครงการภายใต้ยุทธศาสตร์ชาติระยะ 20 ปี ตามนโยบายการปฏิรูปประเทศไทยของรัฐบาล ด้วยการบริหารจัดการสิ่งแวดล้อมในโรงพยาบาลโดยใช้หลักการสุขภาพอย่างยั่งยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยโครงการ GREEN & CLEAN Hospital นี้มีกิจกรรมสำคัญคือ E: Energy คือ การจัดการด้านพลังงาน หมายถึง การบริหารการใช้ทรัพยากรประเภทพลังงานภายในโรงพยาบาลอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อบรรลุเป้าหมายที่โรงพยาบาลตั้งไว้ โดยใช้มาตรการประหยัด ใช้มาตรการการลดใช้ หรือใช้พลังงานทดแทนอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานแสงอาทิตย์ โครงการนี้ส่งผลให้เกิดการดำเนินการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) ในโรงพยาบาลของรัฐหลายแห่ง เช่น โรงพยาบาลสมเด็จพระสังฆราชองค์ที่ 17 จังหวัดสุพรรณบุรี ที่เคยได้รับรางวัล Thailand Energy Awards ด้านอนุรักษ์พลังงาน ประเภทอาคารควบคุม และโรงพยาบาลจังหวัดกาฬสินธุ์ เป็นต้น และกำลังดำเนินการโครงการดังกล่าวในโรงพยาบาลเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา จำนวน 10 แห่ง รวมถึงโรงพยาบาลภาครัฐอื่นๆ ทั่วประเทศ ที่มีความต้องการพัฒนาโรงพยาบาลให้สามารถผ่านเกณฑ์ประเมิน GREEN & CLEAN Hospital อีกด้วย (สำนักงานอนามัยสิ่งแวดล้อม, 2559; กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2560)

2.5 การวางผังอาคารสถานบริการสุขภาพภาครัฐในประเทศไทย

การกำหนดตำแหน่งอาคารแต่ละแผนก แต่ละประเภทของสถานบริการสุขภาพ ต้องกำหนดให้ถูกต้องตามประเภทของการใช้งานและการบริการผู้ป่วย ตลอดจนเพื่อความสะดวกและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คล่องตัวในการให้บริการของเจ้าหน้าที่ ในสถานบริการสุขภาพภาครัฐในประเทศไทย จะแบ่งกลุ่มประโยชน์ใช้สอยของอาคารไว้ 5 กลุ่ม ประกอบด้วย กลุ่มบริการผู้ป่วยนอกและอุบัติเหตุ-ฉุกเฉิน กลุ่มวินิจฉัยและรักษา กลุ่มพักผู้ป่วยใน กลุ่มบริการสนับสนุน และกลุ่มบริหารจัดการและสวัสดิการ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (กองแบบแผน, 2558; คณะทำงานโครงการจัดทำแผนแม่บทด้านอาคารและสภาพแวดล้อม, 2559)

2.5.1 กลุ่มบริการผู้ป่วยนอกและอุบัติเหตุ-ฉุกเฉิน (Out-Patient Department & Emergency Department) คือ กลุ่มอาคารที่รองรับกิจกรรมการบริการคนไข้ที่มารับบริการการรักษาพยาบาล โดยไม่ต้องนอนพักในอาคารพักคนไข้ ในของโรงพยาบาล ตำแหน่งอาคารควรอยู่ด้านหน้าของสถานบริการสุขภาพมองเห็น และเข้าสู่อาคารได้สะดวกและรวดเร็ว โดยกลุ่มบริการผู้ป่วยนอกและอุบัติเหตุ-ฉุกเฉินประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

- ส่วนบริการคนไข้นอก (Out-Patient Department)
- ส่วนบริการคนไข้อุบัติเหตุและฉุกเฉิน (Accident and Emergency Department)
- ศูนย์สุขภาพชุมชน (Primary Care Unit: PCU) การบริการสุขภาพในระดับปฐมภูมิ (สถานที่ตั้งอาจอยู่ภายนอกโรงพยาบาลก็ได้)

2.5.2 กลุ่มวินิจฉัยและรักษา (Diagnostic & Treatment Department) คือ กลุ่มอาคารที่รองรับกิจกรรมด้านการวินิจฉัยและรักษาด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์การแพทย์ ให้บริการคนไข้ที่มารับการวินิจฉัยและรักษาทั้งคนไข้นอกและคนไข้ในของโรงพยาบาล ตำแหน่งอาคาร ควรอยู่ใกล้กลุ่มบริการผู้ป่วยนอกและอุบัติเหตุ-ฉุกเฉิน และกลุ่มพักผู้ป่วยใน โดยกลุ่มวินิจฉัยและรักษาประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

- ส่วนวินิจฉัยและรักษาด้วยรังสี (Radiology Department)
- ส่วนวินิจฉัยและรักษาด้วยการชันสูตร (Laboratory Department)
- ส่วนวินิจฉัยและรักษาด้วยเครื่อง CT Scanner/MRI (Technical Department)
- ส่วนวินิจฉัยรักษาด้วยการผ่าตัด (Surgical Suite Department)
- ส่วนวินิจฉัยรักษาด้วยการใช้การดูแลแบบ Intensive Treatment/Care หรือ I.T.CU./I.C.U.
- ส่วนวินิจฉัยรักษาด้วยการผ่าตัด (Surgical Suite Department)
- ส่วนวินิจฉัยรักษาด้วยการใช้การดูแลแบบ Intensive Treatment/Care หรือ I.T.CU./I.C.U.
- ส่วนการบำบัดรักษาโดยการฟื้นฟูสภาพร่างกาย (Rehabilitation Department)
- ส่วนคลอด (Delivery Suite Department)
- ส่วนวินิจฉัยและรักษาเฉพาะทาง เช่น ศูนย์ไตเทียม ศูนย์หัวใจ เป็นต้น

2.5.3 กลุ่มพักผู้ป่วยใน (In-Patient Department) คือกลุ่มที่รองรับการอภิบาลผู้ป่วยที่โรงพยาบาลรับไว้รักษาในโรงพยาบาล โดยแบ่งตามลักษณะของโรคหรือการรักษาพยาบาล เช่น อายุรกรรม สูติกรรม เป็นต้น และแบ่งตามความสะดวกของห้องพักได้แก่ ห้องพักสามัญ ห้องพักพิเศษ ตำแหน่งอาคารควรอยู่ใกล้กลุ่มวินิจฉัยและรักษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 กลุ่มบริการสนับสนุน (Service support Department) คือ กลุ่มที่รองรับกิจกรรมเพื่อสนับสนุนกิจกรรมของโรงพยาบาล ตำแหน่งอาคารควรอยู่ใกล้กลุ่มผู้ป่วยใน (In-Patient Department) โดยกลุ่มบริการสนับสนุนประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

- ส่วนเภสัชกรรม
- ส่วนจ่ายกลาง
- ส่วนพยาธิวิทยาและเก็บศพ
- ส่วนโภชนาการและโรงอาหาร
- ส่วนซักฟอก
- ส่วนพัสดุ
- ส่วนซ่อมบำรุง
- ส่วนจัดสวน ภูมิทัศน์และสิ่งแวดล้อม

2.5.5 กลุ่มบริหารจัดการและสวัสดิการ (Administration & Welfare Department) ประกอบด้วยส่วนอำนวยการ ส่วนพัสดุ ตำแหน่งอาคารควรแยกพื้นที่ออกจากกลุ่มให้บริการรักษาซึ่งประกอบด้วยกลุ่มบริการผู้ป่วยนอกและอุบัติเหตุ-ฉุกเฉิน กลุ่มวินิจฉัยและรักษา และกลุ่มผู้ป่วยใน และส่วนสนับสนุน ซึ่งประกอบด้วย ส่วนที่จอดรถ และส่วนนันทนาการและสนามกีฬา การติดต่อ สัญจร ระหว่างหน่วยงานต่างๆ (ไม่รวมส่วนพัสดุ) จะต้องไม่มีเส้นทางเดินของรถยนต์มาตัดกับเส้นทางสัญจรของคนโดยเด็ดขาด โดยใช้ทางเดินเชื่อมมีหลังคาคลุม เชื่อมต่อระหว่างอาคารประเภทต่างๆ ส่วนเส้นทางสัญจรของรถยนต์ จะอยู่รอบนอกอาคารและส่วนที่จำเป็น ดังรายละเอียดที่ได้อธิบายถึงเขตต่างๆ และเส้นทางการสัญจรหลักของโรงพยาบาล (รูปที่ 2.27) พื้นที่ใช้งาน (Functional Areas) ต่างๆ และการสัญจรของเจ้าหน้าที่ (รูปที่ 2.28) และพื้นที่ใช้งานต่างๆ และการสัญจรของผู้ป่วยและผู้รับบริการ ภายในโรงพยาบาล (รูปที่ 2.29)

การกำหนดระยะระหว่างอาคาร จะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของกฎหมาย เช่น อาคารขนาดใหญ่และอาคารสูง ต้องมีถนนโดยรอบอาคาร กว้างไม่น้อยกว่า 6.00 เมตร อาคารทั่วไปห่างจากแนวเขตที่ดินไม่น้อยกว่า 3.00 เมตร

นอกจากนั้น การกำหนดตำแหน่งอาคารในแต่ละเขต (Zone) ระยะห่างระหว่างอาคาร นอกจากกำหนดระยะห่างตามที่กฎหมายระบุแล้ว จะต้องคำนึงถึง เรื่องการระบายอากาศ และการรับแสงตามธรรมชาติด้วย

2.5.6 องค์ประกอบด้านการวางผังอาคารสถานบริการสุขภาพ

2.5.6.1 ปัจจัยด้านสถานที่ตั้งอาคาร

อาคารควรใช้ประโยชน์จากองค์ประกอบทางธรรมชาติของสถานที่ตั้งและสิ่งแวดล้อมรอบข้างให้มากที่สุด ซึ่งไม่เพียงเป็นการส่งเสริมให้มีภะวะน่าสบายแก่ผู้ใช้อาคารและการลดการใช้พลังงานในอาคารเท่านั้น แต่ยังช่วยลดปัญหาที่อาคารนั้นจะก่อแก่สิ่งแวดล้อมรอบข้าง เช่น ปัญหาน้ำท่วม และปัญหาเกาะความร้อน (Urban Heat Island) อีกด้วย

2.5.6.2 ปัจจัยด้านรูปทรงอาคาร

รูปทรงอาคารนั้นเป็นปัจจัยสำคัญในการรับความร้อนจากดวงอาทิตย์ ซึ่งส่งผลโดยตรงกับการใช้พลังงานของอาคารเนื่องจากรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบอาคารสามารถเพิ่มความ ต้องการการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศได้สูงถึง 25% (Elasfour, Maraga, และ Tabbalat, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1991) นอกจากนั้นรูปทรงของอาคารนั้นมิได้เพียงแค่นี้เป็นตัวชี้ถึงพื้นที่รวมของเปลือกอาคารและหลังคาที่รับรังสีอาทิตย์เท่านั้น แต่ยังชี้ถึงปริมาณพื้นที่ของเปลือกอาคารที่อาจมีการรั่วไหลของอากาศที่ถูกปรับสถานะแล้วออกสู่ภายนอก เป็นสาเหตุให้สิ้นเปลืองพลังงานได้ สำหรับการออกแบบอาคารที่มีการปรับอากาศ สัดส่วนของพื้นที่ผิวเปลือกอาคารกับปริมาตรรวมของอาคารนั้นควรมีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ พบว่ามีการศึกษาเพื่อค้นหารูปทรงของอาคารที่ส่งผลให้มีประสิทธิภาพด้านพลังงานสูงสุด ได้แก่ รูปครึ่งทรงกลม รูปทรง parallelepiped (รูปทรงลูกบาศก์ที่มีด้านขนานกัน แต่ไม่เป็นมุมฉาก) รูปทรงกระบอกห้าเหลี่ยม และรูปทรงกระบอกแปดเหลี่ยม เป็นต้น ซึ่งพบว่ารูปทรงดังกล่าวมักจะส่งผลให้อาคารมีประสิทธิภาพด้านพลังงานสูงขึ้น แต่กลับทำให้ประสบปัญหาด้านการใช้งานและส่งผลให้ยากลำบากในการก่อสร้างมากขึ้น

ตัวแปร (variables) ที่เกี่ยวข้องกับการปัจจัยด้านรูปทรงของอาคารที่มีอิทธิพลต่อการใช้พลังงานเพื่อการปรับอากาศของอาคารนั้นประกอบด้วย (Pacheco, Ordóñez, และ Martínez, 2012)

- ดัชนีความกระชับของอาคาร (Compactness Index) คืออัตราส่วนระหว่าง ปริมาตรอาคาร กับ พื้นที่เปลือกอาคาร ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบเปลือกอาคารและการรั่วของอากาศในอาคารปรับอากาศ อาคารที่มีค่า Compactness Index สูงนั้นหมายถึงอาคารที่มีพื้นที่เปลือกอาคารน้อย
- ปัจจัยรูปร่างอาคาร (Shape Factor) คืออัตราส่วนระหว่าง ความกว้างกับความยาวของอาคาร ปัจจัยรูปร่างอาคารนี้ใช้พิจารณาร่วมกับทิศการวางอาคาร (orientation) จะเป็นการบอกถึงร้อยละของผิวผนังที่ทำมุมกับทิศหลักแต่ละทิศ (เหนือ ใต้ ออก ตก) (Cardinal Points) พบว่าเมื่อออกแบบอาคารให้มีปัจจัยรูปร่างอาคารร่วมกับทิศการวางอาคารที่เหมาะสมนั้นสามารถลดการใช้พลังงานได้มากถึง 36% (Aksoy และ Inali, 2006) ตัวอย่างเช่น หันด้านแคบของอาคารออกทิศตะวันออก-ตะวันตก

2.5.6.3 ปัจจัยด้านทิศทางการวางอาคาร

ในบรรดาปัจจัยต่างๆที่มีผลด้านการออกแบบอาคารที่สัมพันธ์กับรังสีอาทิตย์ ปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุด คือ ปัจจัยด้าน ทิศทางการวางอาคาร (Orientation) ซึ่งเป็นตัวกำหนดระดับของการรับรังสีอาทิตย์ของเปลือกอาคาร เนื่องจากรังสีอาทิตย์นั้นประกอบด้วยแสงสว่างและพลังงานความร้อน การกำหนดทิศทางการวางอาคารที่เหมาะสมนั้นจะทำให้อาคารสามารถใช้ประโยชน์จากรังสีอาทิตย์ซึ่งเป็นสิ่งที่มีอยู่อย่างล้นเหลือในธรรมชาติได้อย่างเหมาะสม ปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวกำหนดทิศทางการวางอาคารได้อย่างเหมาะสมนั้นคือ มุมทิศ (Azimuth) คือการวัดขนาดของมุมทางราบที่วัดจากแนวทิศเหนือหลักเวียนตามเข็มนาฬิกามาบรรจบ กับแนวเป้าหมายที่ต้องการ มุมทิศนี้จะมีค่าตั้งแต่ 0 - 360 องศา (ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศภูมิศาสตร์กรุงเทพมหานคร, n.d.) ที่อาคารถูกวางไว้ และเป็นสิ่งสำคัญที่ใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบอุปกรณ์บังแดด และกำหนดสมรรถนะของ กรอบแสงอาทิตย์ (Solar Envelope) ประโยชน์ของการกำหนดทิศทางการวางอาคารที่เหมาะสมนั้นคือ เป็นสิ่งที่ไม่มิต้นทุนด้านการก่อสร้างเมื่อนำมาคำนึงในขั้นตอนออกแบบอาคาร และจะมีผลให้ลดการใช้พลังงานในอาคารอย่างมาก สามารถทำให้ลดการใช้ระบบการปรับอากาศแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

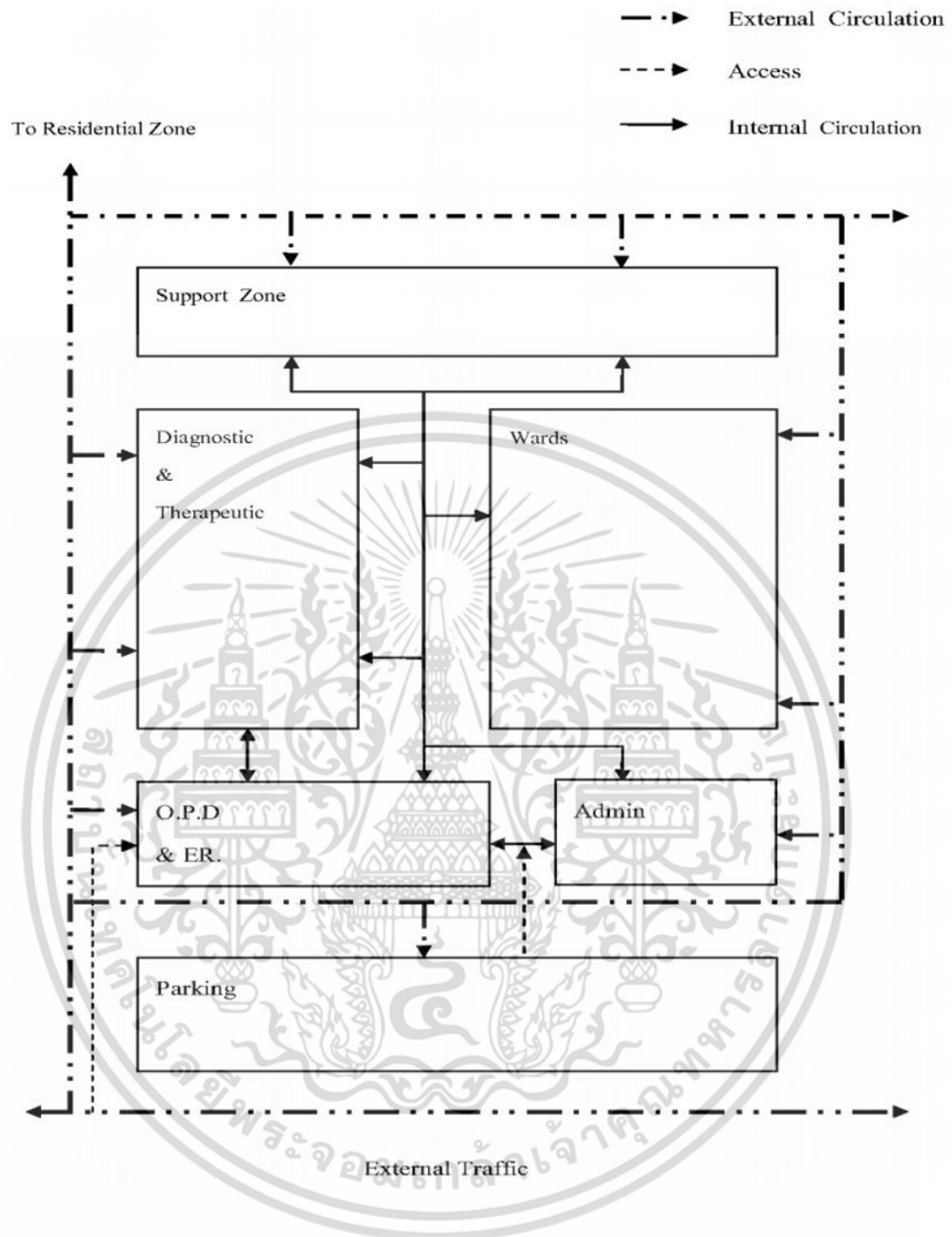
ภายในอาคารด้วยวิธีธรรมชาติที่มีความซับซ้อน (sophisticated passive systems) ประเด็นข้อ
 คำนึงด้านทิศทางการวางอาคาร มีดังต่อไปนี้ (Pacheco, Ordóñez, & Martínez, 2012)

ทิศทางการวางอาคารและการรับรังสีอาทิตย์ (Orientation and solar radiation received) นั้นเป็นประเด็นสำคัญเนื่องจาก อาคารในเขตร้อนชื้นเช่นประเทศไทยนั้น
 จำเป็นต้องควบคุมการรับรังสีอาทิตย์ให้มีความเหมาะสมตลอดทั้งปี ต่างจากประเทศที่อยู่ในเขต
 ภูมิอากาศอบอุ่นหรือหนาวเย็น ที่มักมีการออกแบบให้รับรังสีอาทิตย์ให้มากที่สุดใหน้าหนาวและรับ
 รังสีอาทิตย์ให้น้อยในหน้าร้อน ซึ่งในประเทศไทยแม้แต่ในหน้าหนาว การรับรังสีอาทิตย์โดยตรง ก็อาจ
 ทำให้ได้รับพลังงานความร้อนมากเกินไป เกิดเป็นภาระในการทำความเย็นในระบบปรับอากาศได้
 นอกจากนี้การวางทิศทางการวางอาคารนี้มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ต่อการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์
 แสงอาทิตย์ (Photovoltaic) และระบบผลิตความร้อนจากแสงอาทิตย์ (Solar Collector)

ทิศทางการวางอาคารและพื้นที่ฐานอาคาร (Orientation and ground plan) โดยMorrissey และคณะ (2011) พบว่าอาคารที่มีพื้นที่ฐานอาคาร (Footprint) ขนาดเล็กนั้น
 จะมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางการวางอาคารน้อย หมายถึงอาคารที่มีพื้นที่ฐานอาคาร
 น้อย เมื่อนำไปเปลี่ยนแปลงทิศทางการวางอาคาร สมรรถนะด้านการใช้พลังงานเพื่อการปรับสภาพ
 อากาศภายในจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับอาคารที่มีพื้นที่ฐานอาคารมากกว่า
 (Morrissey, Moore, และ Horne, 2011)

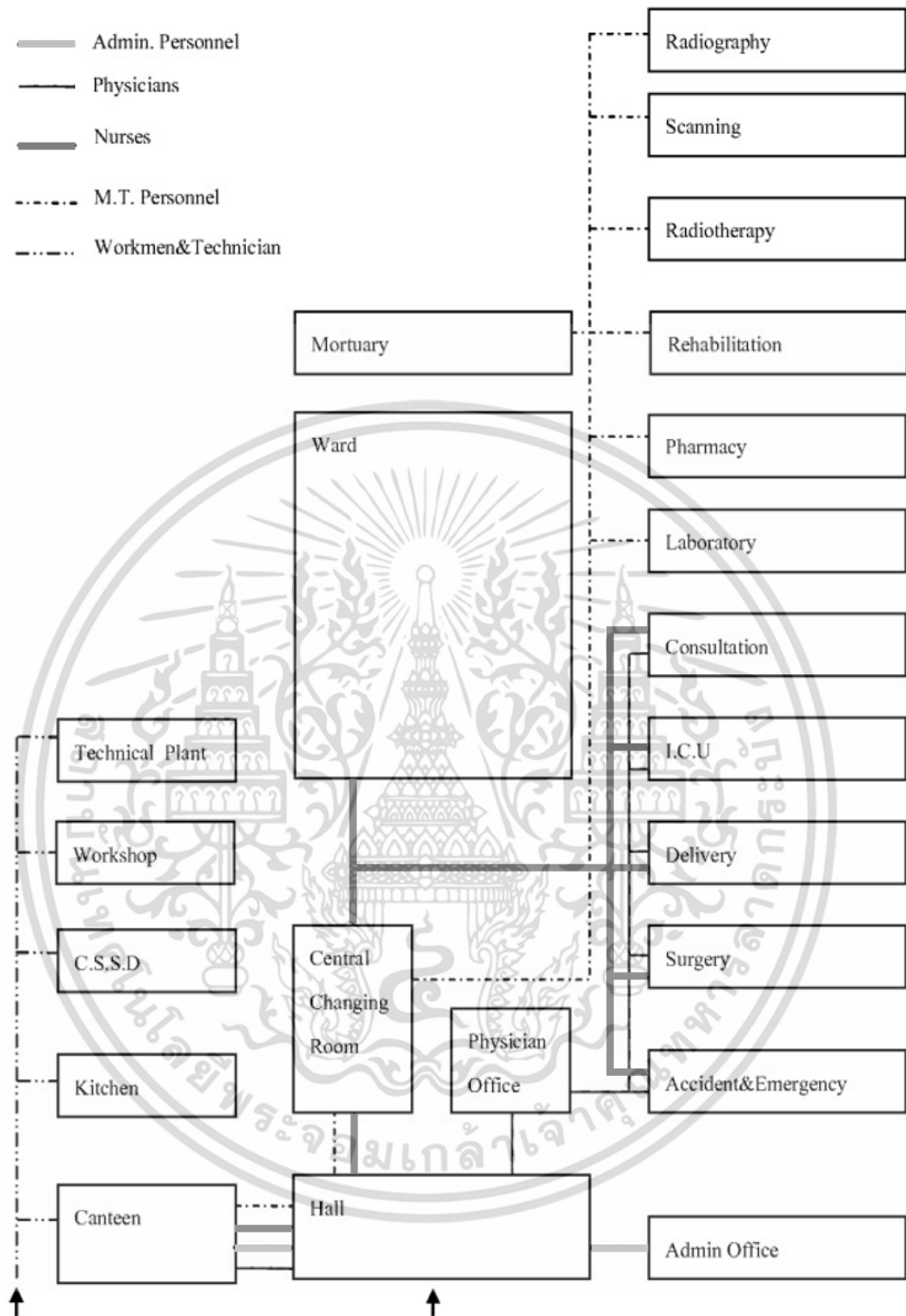
2.5.6.4 ปัจจัยด้านลักษณะกรอบอาคาร

กรอบอาคาร (Building Envelope) เป็นส่วนของอาคารที่เป็นกรอบนอก
 สุด ที่กั้นสภาพแวดล้อมภายในอาคารออกจากสภาพแวดล้อมภายนอก โดยกรอบอาคารได้แก่ ฐาน
 ราก หลังคา ผนัง ประตู และหน้าต่าง พบว่าโดยปกติแล้วภาระการปรับอากาศภายในอาคารนั้นจะ
 เป็นผลมาจาก ความร้อนที่ถ่ายเทจากภายนอกประมาณ 60% และที่เหลือจะเกิดจากความร้อนที่
 เกิดขึ้นภายในตัวอาคารเอง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2010) ความร้อนที่
 ถ่ายเทจากภายนอกจะเกิดจากรังสีอาทิตย์กระทบกับกรอบอาคาร และมีการส่งผ่านพลังงานเข้าสู่
 อาคารโดยตรง ผ่านพื้นผิวที่โปร่งแสง เช่น หน้าต่าง และหลังคาโปร่งแสง (Skylight) ผ่านพื้นผิวทึบ
 แสงเช่น ผนังทึบ พื้น และหลังคา นอกจากนี้สิ่งที่ควรคำนึงเพิ่มเติมคือ ความร้อนที่เกิดจากการรั่วซึม
 ของอากาศเข้า-ออกอาคาร (Infiltration) องค์ประกอบของกรอบอาคาร ที่เป็นส่วนสำคัญที่อิทธิพล
 โดยตรงต่อประสิทธิภาพด้านพลังงานของอาคาร มีดังต่อไปนี้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์
 พลังงาน, 2009; Pacheco, Ordóñez, และ Martínez, 2012)



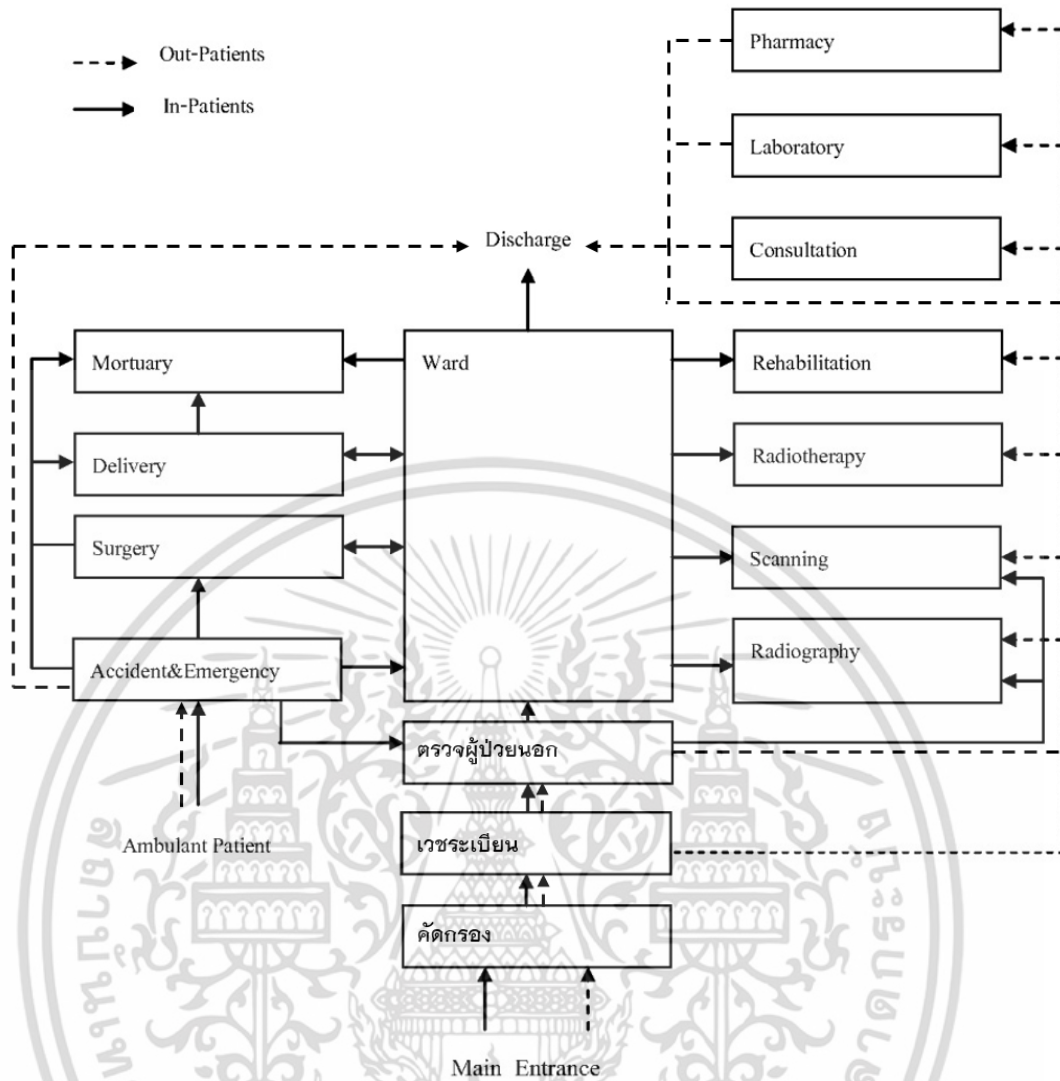
รูปที่ 2.27 แผนภาพการกำหนดเขต (Zones) ต่างๆ และเส้นทางการสัญจรหลักของสถานบริการสุขภาพประเภทโรงพยาบาล (คณะทำงานโครงการจัดทำแผนแม่บทด้านอาคารและสภาพแวดล้อม, 2559)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 แผนภาพการกำหนดพื้นที่ใช้งานต่างๆ และการสัญจรของเจ้าหน้าที่ ภายในสถานบริการสุขภาพประเภทโรงพยาบาล ปรับจาก คณะทำงานโครงการจัดทำแผนแม่บทด้านอาคารและสภาพแวดล้อม (2559)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 แผนภาพการกำหนดพื้นที่ใช้งานต่างๆ และการสัญจรของผู้ป่วยและผู้รับบริการ ภายในสถานบริการสุขภาพประเภทโรงพยาบาล ปรับจาก คณะทำงานโครงการจัดทำแผนแม่บทด้านอาคารและสภาพแวดล้อม (2559)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลกระทบจากการโดนบังเงาบางส่วน (Partial Shading Effects: PSE) นั้นมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมากมาย โดยมีรายละเอียดดังที่ได้ในตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านปรากฏการณ์ PSE

งานวิจัยด้านปรากฏการณ์ PSE		Surroundings		Related-BIPV	
		Surrounding-reflected Radiation	Surrounding Obstacle	PV Surface Geometries	PV Module Properties
Liu & Jordan	1960	●			
Clark, Klein, & Beckman	1984				●
Goswami, Kreith, & Kreider	2000	●			
Woyte, Nijs, & Belmans	2003		●	●	●
Alonso-Garcia, Ruiz, & Hermann	2006				●
Karatepe, Boztepe, & Çolak	2007				●
Eltawil & Zhao	2010				●
Norton, et al.	2011			●	●
Strong	2011			●	●
Yoo	2011	●	●	●	●
Yoon, Song, & Lee	2011	●		●	●
Alam, Coors, Zlatanova, & Oosterom	2012			●	●
Jelle, Breivik, & Røkenes	2012			●	●
Celik, Karatepe, Gokman, & Silvestre, 2013	2013		●	●	●
Dolara, Lazaroiu, Leva, & Manzolini	2013				●
Chen & Ger	2014			●	●
Ekici	2014			●	●
Goss, Cole, Betts, & Gottschalg	2014			●	●
Gupta, Cemesova, Hopfe, Rezgui, & Sweet	2014			●	●
Kanters & Wall	2014		●		
Kensek	2014			●	●

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

งานวิจัยด้านปรากฏการณ์ PSE		Surroundings		Related-BIPV	
		Surrounding- reflected Radiation	Surrounding Obstacle		Surrounding- reflected Radiation
Long, Wang, Zhou, & Zhang	2014			•	•
Masa-bote & Caamaño-Martín	2014	•	•	•	•
Asl, Zarrinmehr, Bergin, & Yan	2015			•	•
Bai, et al.	2015				•
Celik, Karatepe, Silvestre, Gokman, & Chouder	2015		•	•	•
Chaianong & Pharino	2015			•	•
Eke & Demircan	2015	•	•	•	•
Kanters	2015		•		
Kim, Asl, & Yan	2015			•	•
Negendahl	2015				
Yang	2015			•	•
Bhattacharjee, Noble, Kensek and Schiler	2016		•	•	
Frontini, Bouziri, Corbellini, & Medici	2016	•	•	•	•
Gökmen	2016			•	•
Hofer, Groenewolt, Jayathissa, Nagy, & Schlueter	2016			•	•
Kuo, Hsieh, Guo, & Chan	2016				•
Nagy, et al	2016	•		•	•
Shen & Lu	2016			•	
Shukla, Sudhakar, & Baredar	2016			•	•
Biyik, et al.	2017			•	•
Hong, Lee, Koo, Jeong, & Kim	2017	•	•		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

งานวิจัยด้านปรากฏการณ์ PSE		Surroundings		Related-BIPV	
		Surrounding- reflected Radiation	Surrounding Obstacle		Surrounding- reflected Radiation
Jakica	2017			●	●
Ning et al.	2017			●	●
Ramli, Twaha, Ishaque, & Al-Turki	2017			●	●
Somboonwit, Boontore, & Rugwongwan	2017		●		
Tripathy, Yadav, Sadhu, & Panda	2017			●	●
Zomer & Rüther	2017	●	●	●	●

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองโดยใช้วิธีการทางวิทยาศาสตร์ที่ศึกษาความเปลี่ยนแปลงของตัวแปรภายใต้เงื่อนไขที่มีการควบคุมโดยกระบวนการวิจัย เพื่อสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคารเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพจากปัจจัยด้านสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Surrounding Obstacle) อันได้แก่ Obstacle's Orientation Parameter และ Obstacle's Distance Parameter ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการรับความเข้มรังสีอาทิตย์ในหนึ่งหน่วยเวลา (Solar Insolation) ของอาคารผสมเซลล์แสงอาทิตย์ (BIPV) โดยการใช้งานการสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคารแบบอัตโนมัติ (Automated Building Performance Simulation: BPS) ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันของระบบแบบจำลองสารสนเทศ (Building Information Modeling: BIM) และ ระบบสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคาร (Building Performance Simulation: BPS) ที่ใช้เทคโนโลยีการประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ (Cloud Computing) ในการประมวลผลการสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคาร โดยมีรายละเอียดวิธีการดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 ตัวแปร

3.2.1 ตัวแปรอิสระ ได้แก่ การวางทิศทางของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Orientation) และ ระยะห่างของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Distance) (ตารางที่ 3.1)

3.2.2 ตัวแปรตาม ได้แก่ ปริมาณการรับความเข้มรังสีอาทิตย์ในหนึ่งหน่วยเวลารวมต่อปี (Annual Cumulative Insolation) ของอาคารผสมเซลล์แสงอาทิตย์ (BIPV) (ตารางที่ 3.1)

3.2 ประชากรและการเลือกตัวอย่างเพื่อเป็นกรณีศึกษาในงานวิจัย

จากที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 1.1 และ 2.4.3 ที่ได้อธิบายถึงการวางแผนอาคารสถานบริการสุขภาพภาครัฐของโรงพยาบาลระดับทุติยภูมิ ซึ่งมีจำนวนมากถึง 780 แห่งทั่วประเทศ (สำนักบริหารการสาธารณสุข สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข, 2559) นั้นมีลักษณะของการขยายตัว 5 ระดับ โดยการขยายตัวของโรงพยาบาลทุติยภูมิระดับ 5 (GBD₅) ซึ่งหมายถึงการขยายตัวแบบที่มีการก่อสร้างอาคารข้างเคียงเป็นอาคารสูง นั้นพบว่ามีการใช้งาน GBD อาคารผู้ป่วยนอก (OPD) เลขที่แบบ 3130/2536 ของกระทรวงสาธารณสุข ที่ออกแบบโดยกองแบบแผน กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ เป็นจำนวน 47.5% ของอาคารที่ก่อสร้างไปทั้งหมดซึ่งเป็นสัดส่วนที่มากที่สุด (กองแบบแผน, 2004; กองแบบแผน, 2558) และใช้งาน GBD อาคารพักรักษาผู้ป่วยใน (Wards) เลขที่แบบ 8605 (หรือแบบที่ปรับจากแบบก่อสร้างนี้) ของกระทรวงสาธารณสุข ที่ออกแบบโดยกองแบบแผน กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ ซึ่งมีการนำมาใช้สูงถึง 91% (กองแบบแผน, 2004; กองแบบแผน, 2558) ดังนั้น การศึกษานี้จึงสามารถกำหนดประชากรและกลุ่มตัวอย่างได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 นิยามตัวแปร

ตัวแปร	ตัวแปรเชิงมนัทศน์	ตัวแปรเชิงปฏิบัติการ	ระดับการวัดและหน่วยวัด	รายละเอียด
ตัวแปรอิสระ	Obstacle's Distance	ระยะห่างจากขอบนอกสุดของอาคาร BIPV กับ Surrounding Obstacle ที่ BIPV กับ Surrounding Obstacle หันหน้าอาคารไปทางทิศเดียวกันตาม Aligned Axes	Ratio Scale มีหน่วยเป็น เมตร	หัวข้อ 3.4.5 และ 3.4.7
	Obstacle's Orientation	ทิศทางการหันของด้านหน้าอาคารของสิ่งกีดขวางแวดล้อมที่หันไปทางเดียวกับทิศทาง การหันด้านหน้าอาคารของอาคาร BIPV	Nominal Scale แทนค่าด้วย องศา	หัวข้อ 3.4.9
ตัวแปรตาม	Annual Cumulative Insolation	พลังงานรังสีแสงอาทิตย์ที่ได้รับบนพื้นที่ผิว PV ทั้งหมดในช่วง 1 ปี	Ratio Scale มีหน่วยวัด เป็น กิโลวัตต์- ชั่วโมง (kWh)	หัวข้อ 3.4.6

- ประชากรของการวิจัยนี้คือ แบบก่อสร้างมาตรฐานโรงพยาบาลระดับทุติยภูมิขยายตัวระดับ 5 (GBD_{SE5}) รายละเอียดในหัวข้อที่ 2.4.3
- กลุ่มตัวอย่างการวิจัยคือ อาคารกลุ่มตัวอย่างที่ 1 คือ GBD อาคาร OPD เลขที่แบบ 3130/2536 กระทรวงสาธารณสุข และอาคารกลุ่มตัวอย่างที่ 2 คือ GBD อาคาร Wards เลขที่แบบ 8605 กระทรวงสาธารณสุข

3.2.1 รายละเอียดของอาคารกลุ่มตัวอย่างที่ 1

GBD อาคาร OPD เลขที่แบบ 3130/2536 กระทรวงสาธารณสุข ซึ่งมีการใช้งานหลักเป็นอาคารแผนกผู้ป่วยนอก โดยรายละเอียดคือ อาคารนี้เป็นอาคารสองชั้น มีพื้นที่ใช้สอยรวมทั้งหมด 1,125 ตารางเมตร มีลักษณะการใช้สอยพื้นที่แบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่

ส่วนที่ 1 พื้นที่บริการส่วนหน้าสำหรับผู้ป่วย ผู้รับบริการ และญาติผู้ป่วย พื้นที่ส่วนนี้ประกอบด้วย บริเวณรับ-ส่งผู้ป่วย ศูนย์แปล ที่พักรอผู้ป่วย-ญาติ ประชาสัมพันธ์ จุดซักประวัติ-คัดกรอง และสุขาผู้รับบริการ

ส่วนที่ 2 พื้นที่ปฏิบัติงานหลักของแผนก ประกอบด้วย ห้องตรวจโรคทั่วไป ห้องตรวจโรคติดต่อ ห้องตรวจภายใน ห้องรักษาพยาบาล (Treatment)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ห้องให้คำปรึกษา ห้องผ่าตัดเล็ก แผนกอุบัติเหตุ-ฉุกเฉิน แผนกเภสัชกรรม แผนกทันตกรรม แผนกพยาธิวิทยาคลินิก แผนกรังสีวินิจฉัย และห้องสำนักงาน

ส่วนที่ 3 พื้นที่สนับสนุนการให้บริการและการปฏิบัติงาน ประกอบด้วย ห้องพักเจ้าหน้าที่ ห้องเตรียมอาหาร ห้องเก็บอุปกรณ์ทางการแพทย์ ห้องเก็บของสะอาด และส่วนอำนวยความสะดวกแก่เจ้าหน้าที่

อาคารผู้ป่วยนอก (OPD) นั้นนับเป็นอาคารที่มีพื้นที่การใช้งานที่เป็นหลักและจำเป็นที่สุดของโรงพยาบาล และนับเป็นด่านแรกสุดของโรงพยาบาลที่ผู้รับบริการจะต้องเข้าถึงได้อย่างสะดวกที่สุด เนื่องจากอาคารนี้มีพื้นที่ใช้งานที่ต้องให้ประชาชนเข้าถึงได้โดยสะดวก ลักษณะอาคาร OPD จึงมักเป็นอาคารแนวราบ เพื่อลดการสัญจรทางตั้ง อันเป็นการลดความจำเป็นด้านการลงทุนก่อสร้างระบบทางลาดและระบบลิฟต์ และลดเวลาการเข้าถึงพื้นที่ใช้สอยของผู้รับบริการอีกด้วย

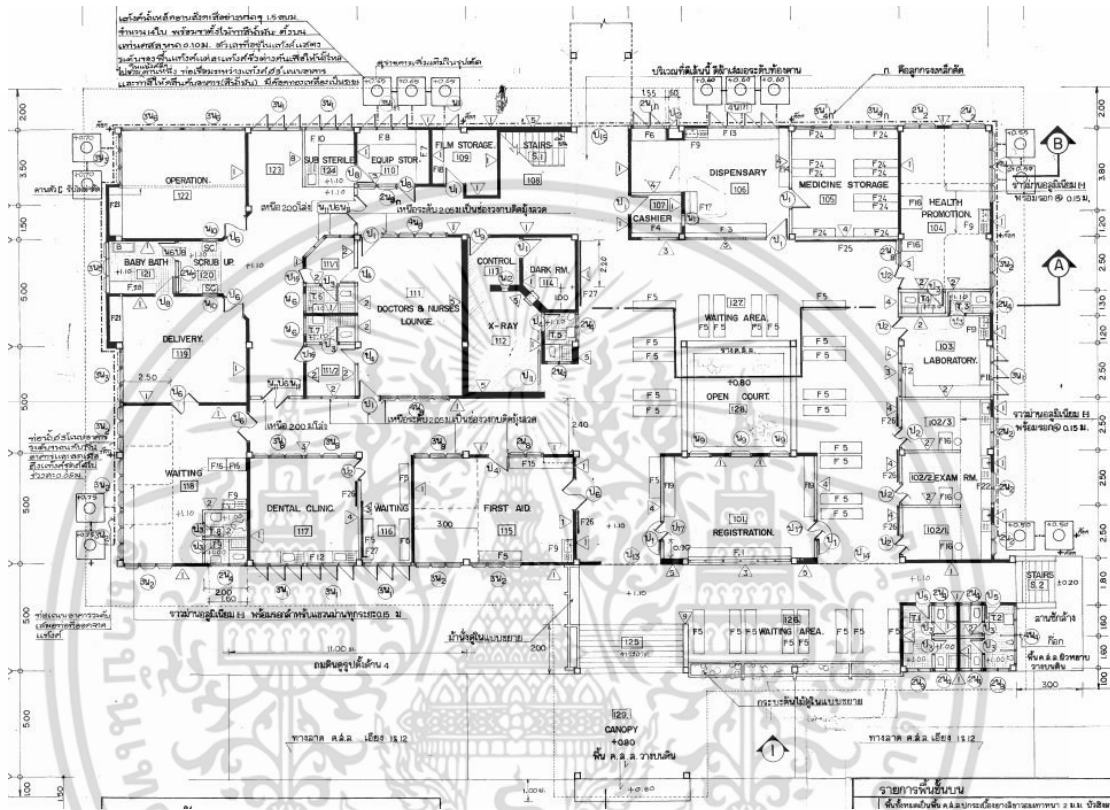
อาคารผู้ป่วยนอก (OPD) เลขที่แบบ 3130/2536 มีลักษณะทางกายภาพดังต่อไปนี้ อาคารนี้เป็น GBD ที่มีพื้นที่ฐานอาคาร (Footprint) กว้าง 33.00 เมตร ยาว 43.00 เมตร มีความสูงรวมจากระดับพื้นถึงยอดของหลังคาประมาณ 10 เมตร วัสดุก่อสร้าง GBD หลังนี้เป็นวัสดุก่อสร้างอาคารทั่วไปที่จัดหาได้ง่ายทั่วประเทศ และมีเทคนิคการก่อสร้างที่ไม่ซับซ้อน สามารถนำแบบ GBD นี้ไปก่อสร้างได้โดยผู้รับเหมาะก่อสร้างทั่วไปได้สะดวก อันได้แก่ โครงสร้างเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงสร้างหลังคาเป็นเหล็ก วัสดุผนังคือผนังก่ออิฐมวลเบาปูนเรียบทาสี พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กผิวหินขัด ฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ดและส่วนหนึ่งเป็นท้องพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก หลังคาส่วนหนึ่งเป็นแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็ก และส่วนหลังคาปั้นหยาเป็นกระเบื้องซีเมนต์ลอนคู่ มีความลาดชัน 20° ทั้งหมด วัสดุประตูทั่วไปยกเว้นประตูห้องเอกซเรย์และห้องสุขาคือประตูไม้อัดยาง วงกบเหล็กหรืออลูมิเนียม วัสดุหน้าต่างทั่วไปคือ กระจกใสหนา 6 มิลลิเมตร วงกบเหล็กหรืออลูมิเนียม



รูปที่ 3.1 อาคารผู้ป่วยนอก (OPD) เลขที่แบบ 3130/2536 กระทรวงสาธารณสุข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GBD อาคาร OPD เลขที่แบบ 3130/2536 นี้ถูกคัดเลือกให้เป็นอาคารกลุ่มตัวอย่าง เพื่อเป็นอาคารผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์เนื่องจากเป็นอาคารที่มีอัตราส่วนระหว่าง พื้นที่หลังคา ต่อ พื้นที่ใช้สอย สูงสุด โดยการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บริเวณพื้นที่หลังคา จะทำให้ระบบ BIPV นั้นมีประสิทธิภาพโดยรวมสูงกว่าการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บริเวณเปลือกอาคารชนิดอื่น (ผนัง แผงกันแดด หน้าต่าง ฯลฯ) (Kanters, 2015)



รูปที่ 3.2 ผังพื้นที่ของ GBD อาคารผู้ป่วยนอก (OPD) เลขที่แบบ 3130/2536 กระทรวงสาธารณสุข

3.2.2 รายละเอียดของอาคารกลุ่มตัวอย่างที่ 2

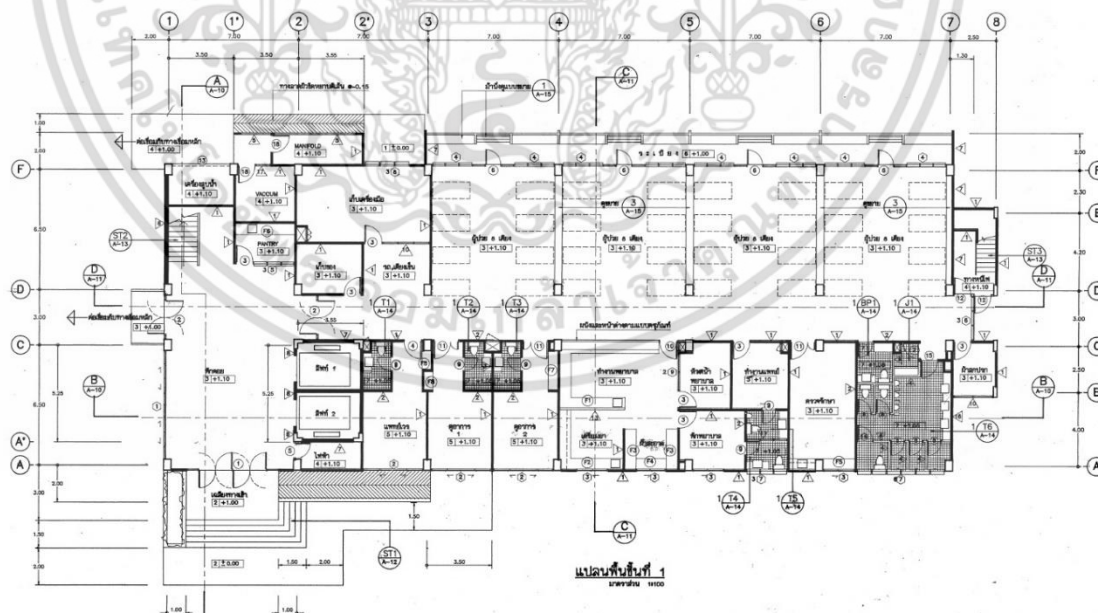
อาคารพักผู้ป่วยใน เลขที่แบบ 8605 กระทรวงสาธารณสุข ซึ่งมีรายละเอียดอาคาร คือ อาคารนี้เป็นอาคารห้าชั้น มีพื้นที่ใช้สอยรวมทั้งหมด 3,470 ตารางเมตร ไม่รวมพื้นที่หลังคา มีลักษณะการใช้สอยพื้นที่เป็นอาคารพักผู้ป่วยในแต่เพียงอย่างเดียว อาคารนี้เป็น GBD ที่มีพื้นที่ฐานอาคาร (Footprint) กว้าง 21.00 เมตร ยาว 46.50 เมตร มีความสูงรวมจากระดับพื้นถึงยอดของหลังคาประมาณ 24 เมตร วัสดุก่อสร้าง GBD อาคารพักผู้ป่วยใน เลขที่แบบ 8605 นี้ใช้วัสดุก่อสร้างอาคารเช่นเดียวกับอาคารกลุ่มตัวอย่างที่ 1 ดังที่ได้กล่าวไปในข้อ 3.2.1 อาคารหลังนี้ถูกคัดเลือกให้เป็นอาคารกลุ่มตัวอย่างเพื่อเป็นสิ่งกีดขวางแวดล้อม ด้วยสาเหตุที่ได้กล่าวไปในรายละเอียดในบทที่ 1 หัวข้อที่ 1.1 และ 2.4.3 อาคารพักผู้ป่วยใน เลขที่แบบ 8605 กระทรวงสาธารณสุข เป็น GBD ที่มีการไปก่อสร้างในประเทศไทยแล้วเป็นจำนวนมาก นอกจากนั้นยังถูกนำไปดัดแปลงจากแบบก่อสร้างนี้ เพื่อออกแบบเป็นอาคารที่มีการใช้งานอื่นๆที่หลากหลายออกไป แต่ยังคงอยู่ในกรอบโครงสร้างและมิติ

(Dimensions) เดิมของ GBD เลขที่แบบ 8605 อีกมากมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 อาคารพักผู้ป่วยใน เลขที่แบบ 8605 กระทรวงสาธารณสุข



รูปที่ 3.4 ผังพื้นของ GBD อาคารพักผู้ป่วยใน เลขที่แบบ 8605 กระทรวงสาธารณสุข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สรุปรายละเอียดกลุ่มตัวอย่างการวิจัย

อาคาร	การใช้งานหลัก	รายละเอียดการใช้งาน	จำนวนชั้นและความสูง	ขนาดกรอบอาคาร
GBD อาคารผู้ป่วยนอก (OPD) เลขที่แบบ 3130/2536	แผนกผู้ป่วยนอก	<ul style="list-style-type: none"> ■ แผนกตรวจผู้ป่วยนอก ■ แผนกเวชระเบียน ■ แผนกเภสัชกรรม ■ แผนกทันตกรรม ■ แผนกรักษาพยาบาล ■ แผนกอุบัติเหตุ-ฉุกเฉิน ■ แผนกเภสัชกรรม ■ แผนกทันตกรรม ■ แผนกพยาธิวิทยาคลินิก ■ แผนกรังสีวินิจฉัย ■ สำนักงาน 	2 ชั้น สูง 10 ม.	กว้าง 33 ม. ยาว 43 ม.
GBD อาคาร Wards เลขที่แบบ 8605	แผนกพักผู้ป่วยใน	<ul style="list-style-type: none"> ■ ห้องพักผู้ป่วยทั่วไป ■ ห้องพักผู้ป่วยพิเศษ ■ แผนกการพยาบาล 	5 ชั้น สูง 24 ม.	กว้าง 21 ม. ยาว 46.50 ม.

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

3.3.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ ที่มีคุณสมบัติของเครื่องขั้นต่ำโดยสังเขปดังต่อไปนี้ (Autodesk, 2017)

- มีระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows 7 SP1 64-bit หรือ Microsoft Windows 8.1 64-bit หรือ Microsoft Windows 10 64-bit
- มี CPU แบบ Multi-Core
- มีหน่วยความจำ (RAM) อย่างน้อย 8 GB
- มีความสามารถด้านการแสดงผลที่รายละเอียดขั้นต่ำ 1680 x 1050 pixels
- มี Video Adapter แบบ DirectX 11 และ Shader Model 5
- มีพื้นที่ในหน่วยเก็บข้อมูลหลักอย่างน้อย 5 GB

3.3.2 โปรแกรมระบบแบบจำลองสารสนเทศ (Building Information Modeling: BIM) Autodesk Revit ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีคุณสมบัติของระบบ BIM ดังรายละเอียดในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.3.3 โดย Autodesk Revit นั้นเป็นโปรแกรม BIM ที่มีความแตกต่างกับโปรแกรม BIM อื่นๆ ในท้องตลาดคือ Autodesk Revit รองรับการทำงานของทุกสาขาวิชาชีพที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสถาปัตยกรรม วิศวกรรม การก่อสร้างอาคาร และการใช้งานอาคาร (Architecture, Engineering, Construction and Operation: A/E/C/O) วิศวกรรมโยธาในโปรแกรมเดียว โดยเฉพาะด้านวิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมเครื่องกล และวิศวกรรมไฟฟ้า ที่โปรแกรม BIM อื่นๆยังสนับสนุนได้ไม่สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นโปรแกรม Graphisoft ArchiCAD ยังไม่สนับสนุนการทำงานด้านวิศวกรรมโครงสร้าง และวิศวกรรมไฟฟ้า และโปรแกรม Nemetschek Vectorworks ยังไม่สนับสนุนการทำงานด้านวิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมเครื่องกล และวิศวกรรมไฟฟ้า เป็นต้น โดยโปรแกรมดังกล่าวนี้ต้องใช้การเชื่อมโยงข้อมูลแบบระบบปฏิบัติการร่วม (Interoperability) เพื่อการทำงานร่วมกับโปรแกรมด้านวิศวกรรมอื่นที่ไม่ได้รวมในความสามารถของโปรแกรม BIM เอง (Graphisoft, 2017; Software Insider, 2017) และที่สำคัญ Autodesk Revit ได้รวมการใช้งานด้านการวิเคราะห์สมรรถนะอาคารไว้เป็นส่วนหนึ่งของระบบ BIM อย่างเป็นทางการอันหนึ่งอันเดียวกัน ผู้ใช้ระบบ BIM สามารถทราบถึงสมรรถนะอาคารไปพร้อมกับกระบวนการออกแบบ

3.4.3 โปรแกรมระบบสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคาร (Building Performance Simulation: BPS) Autodesk Insight 360 วิเคราะห์ค่าพลังงานทั้งหมดของอาคาร (Whole-building Energy Analysis) ที่สามารถปฏิบัติการร่วม (Interoperable) กับระบบแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling: BIM) เพื่อการวิเคราะห์สมรรถนะอาคารด้านพลังงานที่ใช้การประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ (Cloud-based Energy-analysis Software) โดย Autodesk Insight 360 ใช้ DOE-2.2 เป็น Simulation Engine และมีส่วนขยายในการใช้งานด้านการสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะระบบปรับอากาศด้วยโปรแกรม EnergyPlus รวมถึงสามารถใช้งานสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะด้านการประเมินรังสีอาทิตย์ (Solar Analysis) ด้วยการใช้ Optimized Perez Sky Model และ Overshadowing Calculation (Stine, 2015)

3.4 ขั้นตอนของการวิจัย

การวิจัยนี้มีขั้นตอนการดำเนินการดังต่อไปนี้

3.4.1 ทบทวนวรรณกรรมในทฤษฎี แนวความคิด และเทคนิค ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยเฉพาะเรื่องเซลล์แสงอาทิตย์ อาคารผสมเซลล์แสงอาทิตย์ ผลกระทบจากการโดนบังเงาบางส่วน ระบบสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคาร (Building Performance Simulation: BPS) ระบบแบบจำลองสารสนเทศ (Building Information Modeling: BIM) และระบบสุขภาพและอาคารสถานบริการสุขภาพภาครัฐในประเทศไทย (หัวข้อ 2.1 – 2.4)

3.4.2 สร้างแบบจำลองสารสนเทศ (BIM Modeling) อาคารกลุ่มตัวอย่างที่คัดเลือกจาก GBD กองแบบแผน กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ กระทรวงสาธารณสุข จำนวน 2 แบบ ได้แก่ อาคารผู้ป่วยนอก (OPD) เลขที่แบบ 3130/2536 ให้มีระดับรายละเอียดของแบบจำลองสารสนเทศอาคาร LOD300 เพื่อเป็นกลุ่มตัวอย่างอาคาร BIPV ดังรูปที่ 3.5 (a) และ (b) และ อาคารพักผู้ป่วยใน เลขที่แบบ 8605 ให้มีระดับรายละเอียดของแบบจำลองสารสนเทศอาคาร LOD200 เพื่อเป็นกลุ่มตัวอย่าง Surrounding Obstacle (หัวข้อ 2.3.4)

3.4.3 สร้างสิ่งแวดล้อมดิจิทัล (Digital Environment) ในโครงการแบบจำลองสารสนเทศ (BIM Project) กำหนดตำแหน่งพิกัดบอกตำแหน่งบนพื้นโลก และกำหนดข้อมูลสภาพภูมิอากาศ (Weather Data) เพื่อใช้ในการจำลองสมรรถนะอาคาร โดยสถานที่ตั้งอาคารเพื่อดำเนินการทดลอง จังหวัดกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ซึ่งตั้งอยู่ ณ พิกัด 13° เหนือ $100^{\circ}30'$ ตะวันออก อันเป็นตัวแทนของตำแหน่งกึ่งกลางของประเทศไทย ที่มีจุดเหนือสุดที่พิกัด $20^{\circ}28'$ เหนือ $99^{\circ}58'$ ตะวันออก จุดใต้สุดที่พิกัด $5^{\circ}37'$ เหนือ $101^{\circ}08'$ ตะวันออก จุดตะวันออกสุดที่พิกัด $15^{\circ}38'$ เหนือ $105^{\circ}37'$

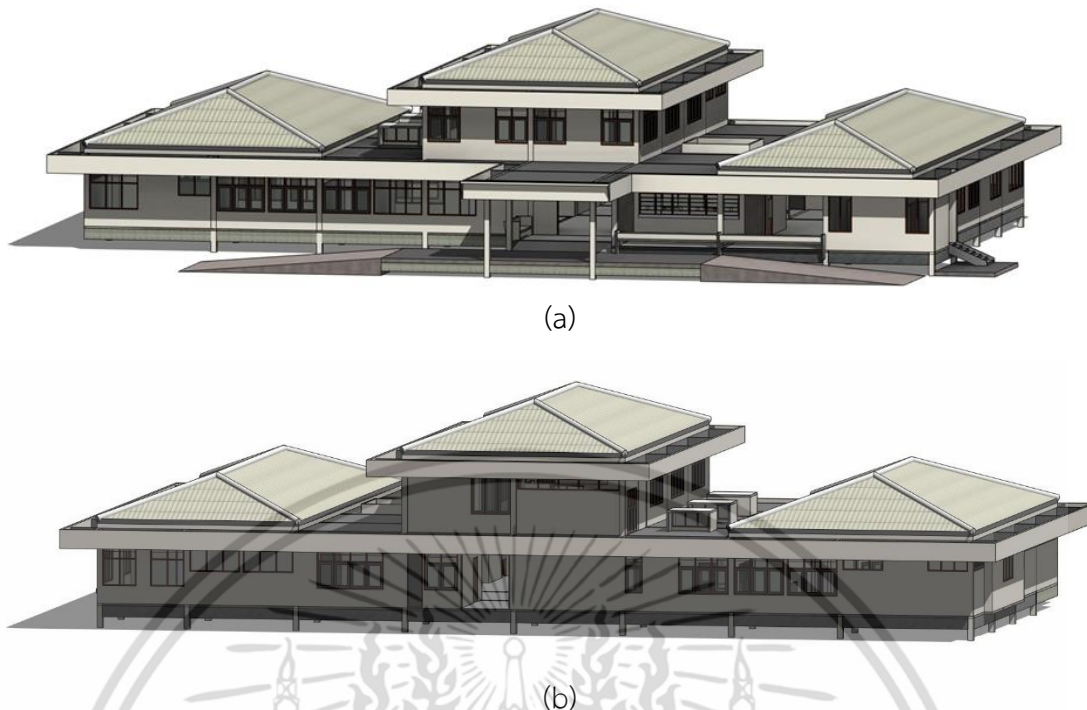
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตะวันออก จุดตะวันตกสุดที่พิกัด $18^{\circ}34'$ เหนือ $97^{\circ}21'$ ตะวันออก เพื่อเป็นพิกัดที่ตั้งที่กำหนดเรขาคณิตของแสงอาทิตย์ (Solar Geometry) ซึ่งเป็นตัวแทนของของกลุ่มตัวอย่าง นอกจากนั้นระดับการฉายรังสีดวงอาทิตย์ (Solar Irradiation) ของกรุงเทพมหานครนั้นมีค่าเฉลี่ย $2,181.25 \text{ kWh/m}^2/\text{วัน}$ ที่มีความใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของทั้งประเทศไทยคือ $2,181.42 \text{ kWh/m}^2/\text{วัน}$ (DEDE, 2550; วิทยา ยงประยูร และ วศินวิโรจน์ เนติศักดิ์, 2552) สามารถเป็นตัวแทนของตำแหน่งอื่นๆ ในประเทศไทยได้ (Exell & Saricali, Solar radiation tables for Thailand, 1975; Exell, The solar radiation climate of Thailand, 1976; Janjai, 2012; Waewsak, Chancham, Mani, & Gagnon, 2014)

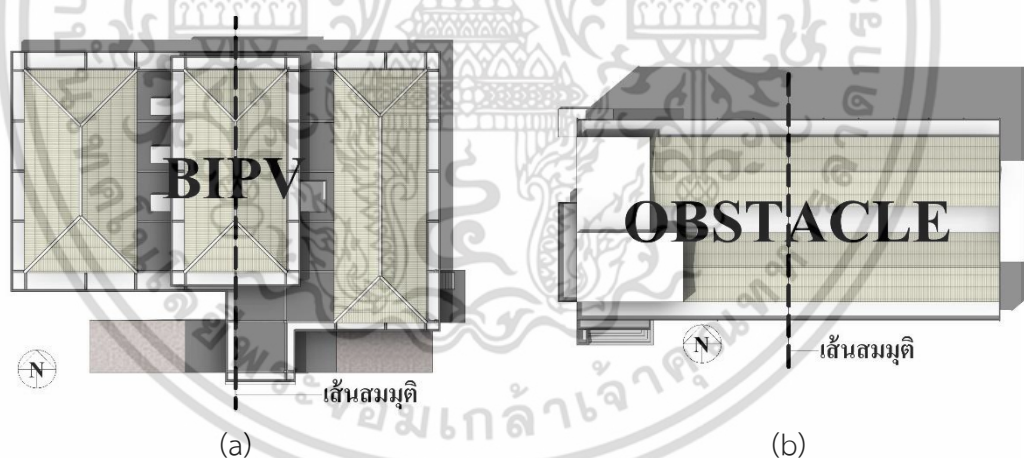
โดยมี Weather Data ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยนี้ดังนี้ (Autodesk, 2015; The British Broadcasting Corporation (BBC), 2015)

- รังสีอาทิตย์รวมแนวระนาบ (Global Horizontal Radiation) มีหน่วยเป็นวัตต์ ชั่วโมงต่อตารางเมตร (Wh/m^2)
- รังสีอาทิตย์ส่องตรงกระทบพื้นผิว (Direct Normal Radiation) มีหน่วยเป็นวัตต์ ชั่วโมงต่อตารางเมตร (Wh/m^2)
- รังสีอาทิตย์กระจายแนวราบ (Diffuse Horizontal Radiation) มีหน่วยเป็นวัตต์ ชั่วโมงต่อตารางเมตร (Wh/m^2)
- ค่าเมฆปกคลุมท้องฟ้า (Total Sky Cover) มีหน่วยเป็น Okta มีการวัดค่าออกเป็น 10 ค่า (ค่า 0-9) คือ ตั้งแต่ค่า 0 หมายถึง ท้องฟ้าโปร่งไม่มีเมฆเลย ค่า 1-8 จะแบ่งพื้นที่ท้องฟ้าออกเป็น 8 ส่วน แต่ละค่าที่เพิ่มขึ้นหมายถึงมีเมฆปกคลุมท้องฟ้าเพิ่มขึ้นค่าละ 1 ส่วน เช่นค่า 1 หมายถึง มีเมฆปกคลุมท้องฟ้า 1 ใน 8 ส่วน ค่า 2 หมายถึง มีเมฆปกคลุมท้องฟ้า 2 ใน 8 ส่วน เป็นต้น จนถึงค่า 8 หมายถึง มีเมฆปกคลุมท้องฟ้า 8 ใน 8 ส่วน ค่า 9 หมายถึง ท้องฟ้าถูกบังจากการมองเห็น

3.4.4 สร้างแบบจำลองฐาน (Baseline Model) โดยการนำเข้าแบบจำลองสารสนเทศของกลุ่มตัวอย่าง (BIM Models) ทั้งสองอาคารเข้าสู่สิ่งแวดล้อมดิจิทัล จัดวาง BIM Models อาคาร BIPV และอาคาร Surrounding Obstacle ใน BIM Project โดยให้ระดับการนำเข้า BIM Models ทั้งสองที่ระดับความสูง (Elevation) ที่ระดับเดียวกันคือระดับ 0.00 เมตร และสร้างแกนกึ่งกลาง BIM Models ของอาคาร BIPV และอาคาร Surrounding Obstacle ทั้งสองอาคาร โดยมีลักษณะเป็นเส้นสมมุติที่ลากผ่านจากด้านหน้าอาคารไปยังด้านหลังของอาคาร ผ่านจุดกึ่งกลางของอาคาร โดยเส้นกึ่งกลางนี้สามารถวัดระยะไปยังขอบนอกที่สุดของอาคารทั้งสองทั้งด้านซ้ายและด้านขวาให้มีระยะเท่ากัน โดยให้ BIM Models ทั้งสองหันด้านหน้าอาคารไปยังทิศใต้ (มุม Azimuth = 180°) ดังรูปที่ 3.6 (a) และ (b)



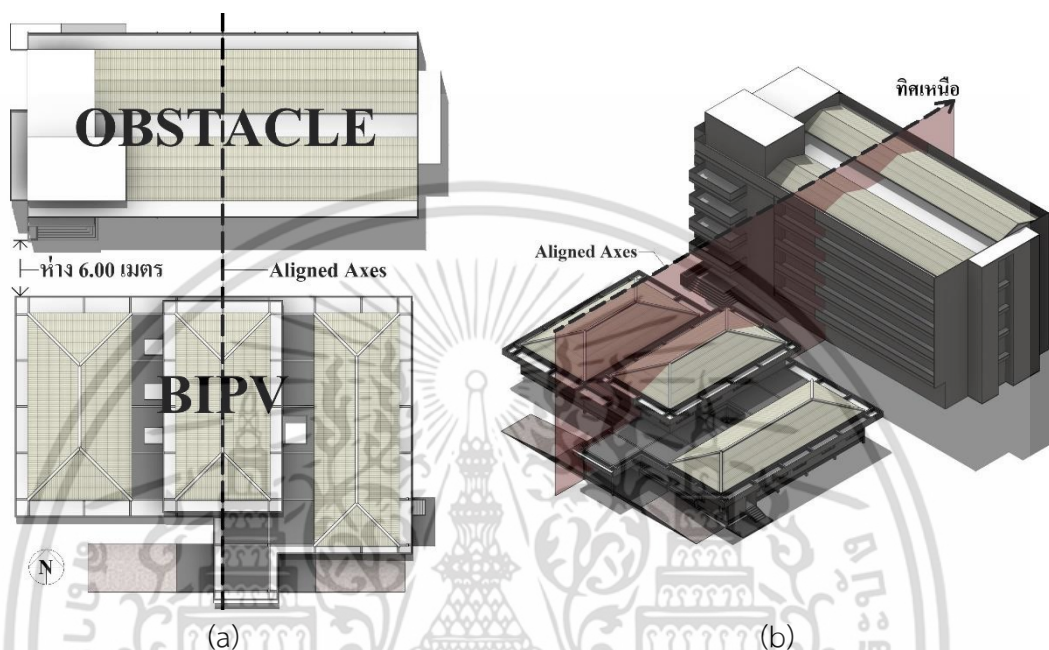
รูปที่ 3.5 (a) และ (b) แบบจำลองสารสนเทศ (BIM Model) LOD300 ของ GBD อาคาร OPD เลขที่แบบ 3130/2536 กระทรวงสาธารณสุข กลุ่มตัวอย่างอาคาร BIPV



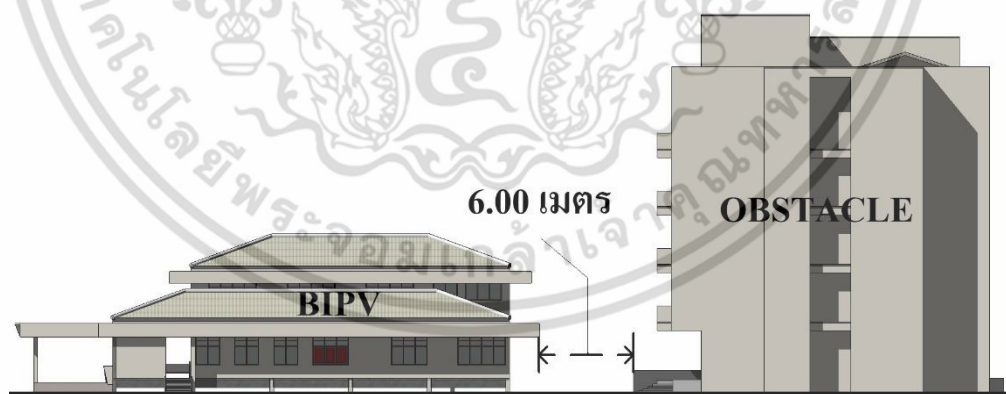
รูปที่ 3.6 BIM Model และเส้นสมมุติที่กึ่งกลางของ
(a) อาคาร BIPV และ (b) อาคาร Surrounding Obstacle

3.4.5 จัดวางให้ BIM Models ทั้งสองที่หันหน้าอาคารสู่ทิศใต้ (Azimuth = 180°) ให้เป็นแนวเดียวกันโดยกำหนดตำแหน่งให้อาคาร BIPV อยู่ด้านหน้า (ทิศใต้) ของอาคาร Surrounding Obstacle โดยจัดให้เส้นสมมุติแนวแกนกึ่งกลางของอาคารทั้งสองเป็นแนวเดียวกัน (Aligned Axes) ดังที่แสดงในรูปที่ 3.7 (a) และ (b) เพื่อกำหนด Obstacle's Orientation Parameter และจัดวางให้ BIM Models ทั้งสองมีระยะห่างกันจากขอบนอกที่สุดของ BIM Models ทั้งสองเป็นระยะ 6.00 เมตรดังที่แสดงในรูปที่ 3.8 เนื่องจากอาคาร Surrounding Obstacle เป็นอาคารสูงที่ต้องมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความกว้างของที่ว่างรอบอาคารไม่น้อยกว่า 6.00 เมตรตามกฎกระทรวง ฉบับที่ 33 (พ.ศ.2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 และเพื่อใช้เป็นทางสัญจรรอบอาคาร รวมทั้งเป็นระยะห่างที่เอื้อต่อการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติของอาคารสถานบริการสุขภาพ (กองแบบแผน, 2558; กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2560) เพื่อกำหนด Obstacle's Distance Parameter ได้เป็นแบบจำลองฐาน (Baseline Model) คือ 0° CW



รูปที่ 3.7 Baseline Model (0° CW) (a) มุมมอง Layout Plan และ (b) มุมมอง Isometric

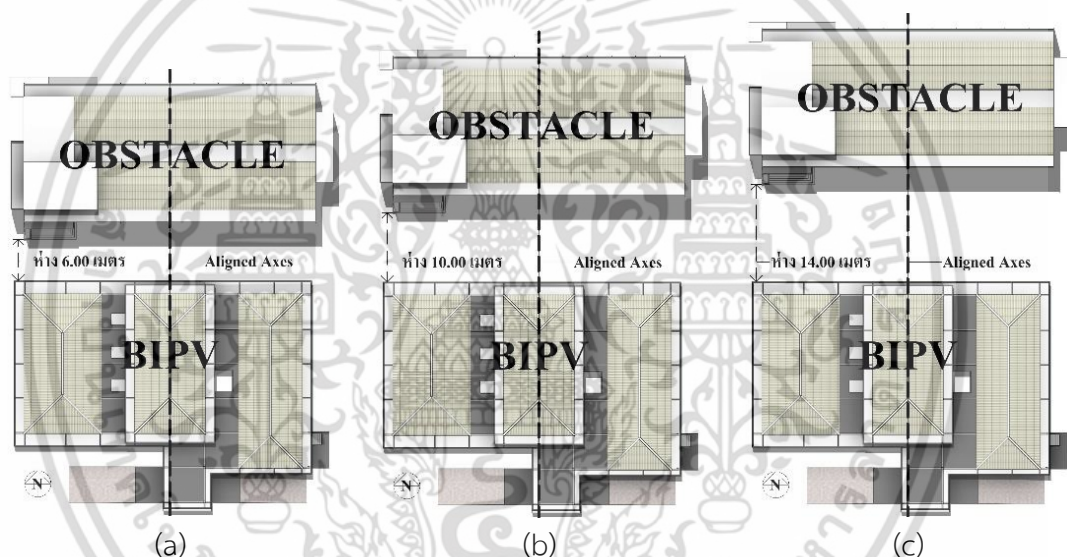


รูปที่ 3.8 Baseline Model (0° CW) มุมมองจากรูปด้านทิศตะวันออก

3.4.6 สร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคารเพื่อคำนวณค่า Solar Insolation บน PV Surfaces บริเวณหลังคาทรงปั้นหยาของ BIPV ใน Baseline Model (0° CW) โดย ปริมาณการรับรังสีรังสีอาทิตย์ในหนึ่งหน่วยเวลารวมต่อปี (Annual Cumulative Insolation) นั้นหมายถึง พลังงานรังสีแสงอาทิตย์ที่ได้รับบนพื้นที่ผิว PV คือการวัด การแผ่รังสีอาทิตย์ (Solar Radiation) ในช่วงเวลาที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนด บ่งบอก Solar Insolation ด้วยหน่วยวัดเป็น กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร (kWh/m^2) โดย ปริมาณ Solar Insolation จะมากหรือน้อยนั้นจะได้รับผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ เช่น ลักษณะ ภูมิอากาศ การปกคลุมของหมอกควันในอากาศ และ มุมรังสีอาทิตย์ โดยค่า Solar Insolation นั้นจะเป็นปัจจัยกำหนดจำนวนพลังงานที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดพื้นที่หนึ่งตารางเมตรสร้างพลังงานได้ในแต่ละวัน เมื่อค่า Solar Insolation ของพื้นที่นั้นมีค่าน้อย หมายถึงต้องใช้พื้นที่ PV มากขึ้นเพื่อสามารถสร้างพลังงานให้ได้ในปริมาณที่มากเพียงพอ (Sinovoltaics, 2014)

3.4.7 เพิ่มระยะห่างระหว่าง BIM Models ของอาคาร BIPV และอาคาร Surrounding Obstacle ครั้งละ 1.00 เมตร แล้วดำเนินการตรวจวัดค่า Annual Cumulative Insolation บนแผงเซลล์แสงอาทิตย์บริเวณหลังคาของ BIPV ด้วยวิธีการ Simulation และดำเนินการดั่งกล่าวข้างต้น ระยะห่างระหว่าง BIM Models ของอาคาร BIPV และอาคาร Surrounding Obstacle เป็น 48.00 เมตร เนื่องจากเป็นระยะห่างมากที่สุดระหว่างอาคาร OPD กับอาคาร Wards ในการวางผังโรงพยาบาลระดับทุติยภูมิ ดังรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.4.3 รวมช่วงระยะห่างทั้งหมด 43 ช่วงระยะ

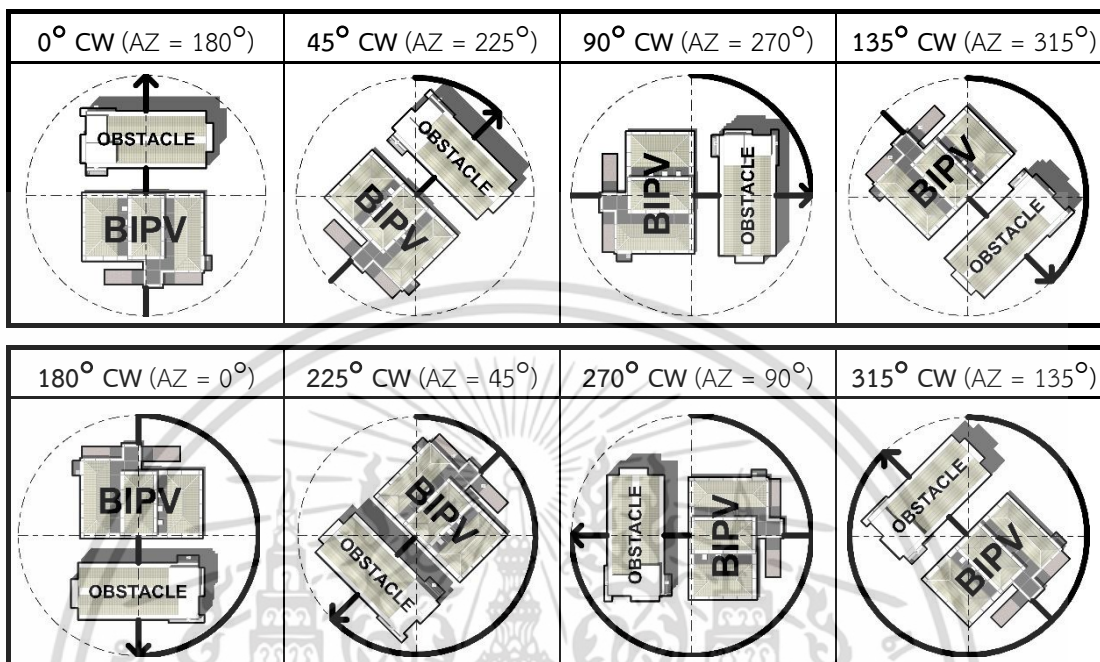


รูปที่ 3.9 ตัวอย่าง Baseline Model เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างอาคาร BIPV กับอาคาร Obstacle (a) 6.00 เมตร (b) 10.00 เมตร และ (c) 14.00 เมตร

3.4.8 ดำเนินการซ้ำในข้อ 3.5.6 ถึง 3.5.8 โดยหมุนแกน Aligned Axes ซึ่งทำให้ Baseline Model หมุนตามเข็มนาฬิกา ครั้งละ 45° อีกทั้งหมด 7 ทิศทาง เพื่อทดสอบ Obstacle's Orientation ได้แก่ 45° CW, 90° CW, 135° CW, 180° CW, 225° CW, 270° CW และ 315° CW รวมทั้งหมด 8 Obstacle's Orientations อันเป็นตัวแทนของทิศหลักที่ใช้ในการวางผังอาคาร 4 ทิศ อันได้แก่ ทิศเหนือ ทิศตะวันออก ทิศใต้ และทิศตะวันตก และการศึกษานี้ได้ศึกษาเพิ่มถึงตัวแทนทิศรองที่ใช้ในการวางผังอีก 4 ทิศ ได้แก่ ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ทิศตะวันออกเฉียงใต้ ทิศตะวันตกเฉียงใต้ และทิศตะวันตกเฉียงเหนือ และระยะห่างระหว่างอาคาร BIPV กับ Surrounding Obstacle (Obstacle's Distance) ตั้งแต่ 6.00 เมตร ถึง 48.00 เมตร ช่วงละ 1.00 เมตร รวมทั้งหมด 43 ช่วงระยะ ดังที่ได้แสดง Obstacle's Orientations ทั้งหมดในรูปที่ 3.10 โดยจะมีจำนวน Simulation เพื่อหาค่า Annual Cumulative Insolation ทั้งหมด 344 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.9 รวบรวมผลลัพธ์ Annual Cumulative Insolation ของทั้ง 8 Orientations และ 43 ช่วงระยะ ทั้งหมด 344 Simulations เพื่อสรุปผลการศึกษา



รูปที่ 3.10 ทิศทางการหมุนอาคารกลุ่มตัวอย่างทั้ง 8 ทิศ (8 Obstacle's Orientations)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

จากคำถามการวิจัยในหัวข้อที่ 1.2.1 และ 1.2.2 จึงการสร้างการทดลองเพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลจากปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (Surrounding Obstacle) คือ Obstacle's Orientation Parameter และ Obstacle's Distance Parameter คือปริมาณการรับความเข้มรังสีอาทิตย์ในหนึ่งหน่วยเวลา (Solar Insolation) โดยการใช้งานการสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคารแบบอัตโนมัติ (Automated Building Performance Simulation: BPS) ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันของระบบแบบจำลองสารสนเทศ (Building Information Modeling: BIM) และ ระบบจำลองสมรรถนะอาคาร (BPS) ที่ใช้เทคโนโลยีการประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ (Cloud Computing) ในการประมวลผลสมรรถนะอาคาร หมายถึง ระบบ BPS จะส่งข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการจำลองสมรรถนะอาคารเข้าสู่ระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เพื่อส่งข้อมูลดังกล่าวเข้าสู่หน่วยประมวลผลสมรรถนะอาคาร (Simulation Engine) ที่อยู่ในบริการแบบกลุ่มเมฆ (Cloud Services) ซึ่งหมายถึงการจำลองสมรรถนะอาคารนี้ไม่สามารถดำเนินการได้ถ้าไม่มีการเชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต และผลลัพธ์จากการจำลองสมรรถนะอาคารตามวัตถุประสงค์การศึกษา ข้อที่ 1 คือ ปริมาณการรับรังสีอาทิตย์ในหนึ่งหน่วยเวลารวมต่อปี (Annual Cumulative Insolation) โดยมีหน่วยเป็น กิโลวัตต์ ชั่วโมง (kWh) อันหมายถึง พลังงานรังสีแสงอาทิตย์ที่ได้รับบนพื้นที่ผิว PV คือการวัด การแผ่รังสีอาทิตย์ (Solar Radiation) ในช่วงเวลาที่กำหนดรวมทั้งหมดในช่วงเวลาหนึ่งปี

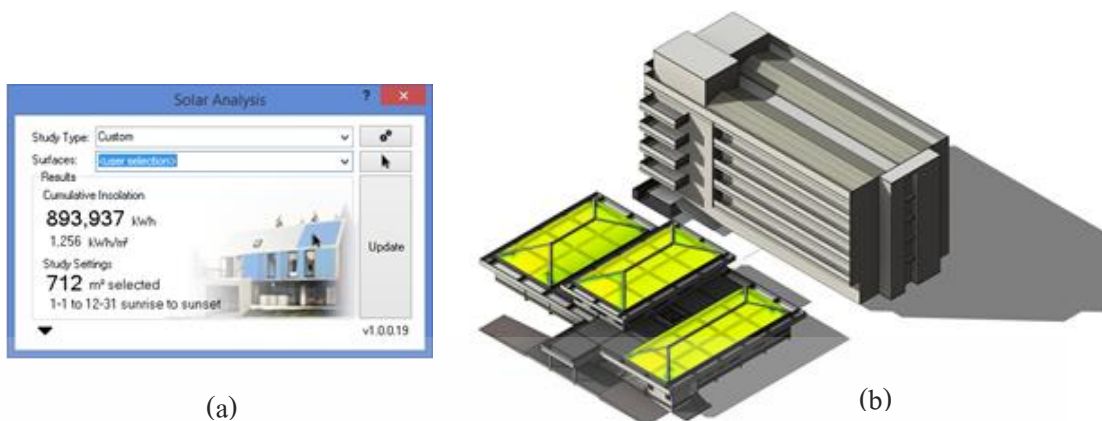
4.1 ผลลัพธ์จากการสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคารแบบอัตโนมัติ

เมื่อกระบวนการ Automated BPS แต่ละครั้งเสร็จสิ้น ระบบ BPS ที่เป็นโปรแกรมที่ฝัง (Embedded) อยู่ในระบบ BIM จะแสดงผลการประมวลผลที่ประกอบด้วย

- Annual Cumulative Insolation มีหน่วยเป็น kWh
- ปริมาณการรับรังสีรังสีอาทิตย์ในหนึ่งหน่วยเวลาต่อพื้นที่หนึ่งตารางเมตร (Cumulative Insolation per Square Meter) มีหน่วยเป็น kWh/m²
- ขนาดพื้นที่ที่ถูกกำหนดให้จำลองสมรรถนะอาคาร คือ พื้นที่ PV Surfaces จำนวน 712 ตารางเมตร บนพื้นที่หลังคาของอาคาร BIPV
- ช่วงเวลาที่กำหนดให้จำลองสมรรถนะอาคารคือ เป็นช่วงเวลาตลอด 365 วันตลอดทั้งปี โดยช่วงเวลาระหว่างวันคือตั้งแต่พระอาทิตย์ขึ้นจนพระอาทิตย์ตกนั้นจะแตกต่างกันในทุกวัน ช่วงเวลาตั้งแต่พระอาทิตย์ขึ้นจนพระอาทิตย์ตกของแต่ละวันจะเชื่อมโยงกับ Weather Data ที่เชื่อมต่อกับข้อมูลจากสถานีอากาศ (Weather Station) โดยอัตโนมัติซึ่งเป็นบริการที่อยู่ใน Cloud Service

ผลลัพธ์ดังกล่าวจะถูกแสดงเป็นภาพในหน้าต่างแบบผุดขึ้น (Pop-up Window) ภายในระบบ BIM ดังรูปที่ 4.1 (a) และค่า Annual Cumulative Insolation จะถูกแสดงผลบนพื้นที่ PV Surfaces บนอาคารกลุ่มตัวอย่างในลักษณะของแถบไล่สี (Gradient Colors) ที่สามารถตั้งค่าสีได้

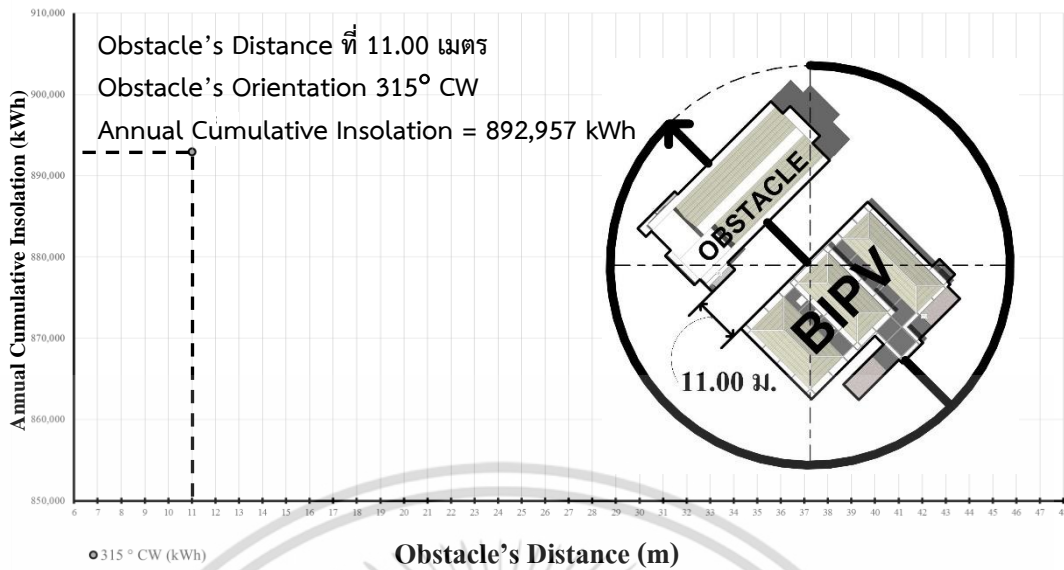
เอกสารนี้ตามความต้องการของผู้ใช้งาน ดังรูปที่ 4.1 (b) ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



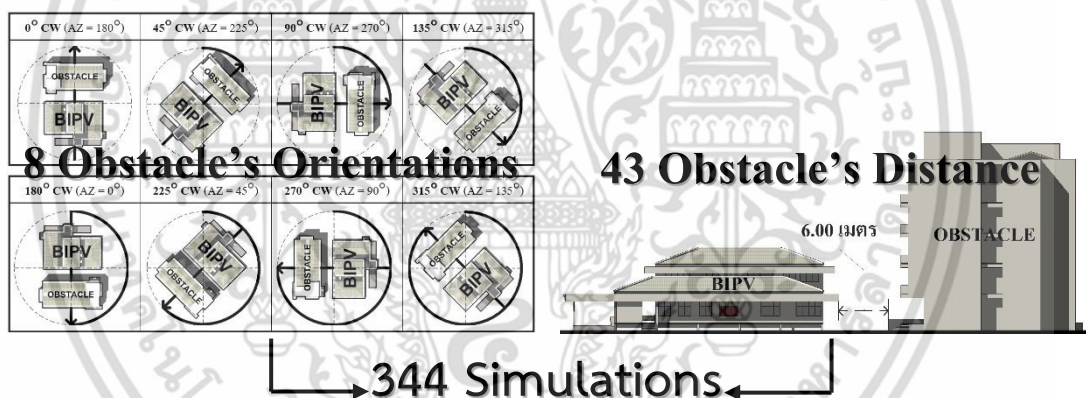
รูปที่ 4.1 (a) ผลลัพธ์การประมวลผลจาก Automated BPS ของอาคารกลุ่มตัวอย่าง 0° CW ที่ระยะห่าง 6 เมตร (b) ค่า Annual Cumulative Insolation จะถูกแสดงผลบนพื้นที่ PV Surfaces บนอาคารกลุ่มตัวอย่างในลักษณะของแถบไล่สี (Gradient Colors) ซึ่งไล่สีจากสีม่วงเข้มอันเป็นตัวแทนของบริเวณที่มีค่า Annual Cumulative Insolation ต่ำสุด จนถึงสีเขียวอ่อนอันเป็นตัวแทนของค่าสูงสุด มีหน่วยเป็น kWh

ดังที่ได้กล่าวไปในบทที่ 3 ว่าการศึกษานี้ได้ดำเนินการจำลองสมรรถนะอาคารเพื่อคำนวณหา Annual Cumulative Insolation จำนวน 344 Simulations จากการหันทิศทาง 8 Obstacle's Orientations ได้แก่ 0° CW, 45° CW, 90° CW, 135° CW, 180° CW, 225° CW, 270° CW และ 315° CW และระยะห่างของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Distance) คือระยะระหว่างอาคาร BIPV กับ Surrounding Obstacle โดยเพิ่มระยะห่างทุก 1 เมตร (Interval) ในแต่ละช่วง ตั้งแต่ระยะที่ใกล้ที่สุดคือ 6 เมตร จนถึง 48 เมตร รวมทั้งหมด 43 Distance โดยการทดลองแต่ละ Simulation จะมีค่า 1 จุดในกราฟแสดงผล ดังที่แสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.2 ผลลัพธ์จาก Automated BPS ทั้งหมดของการทดลองจาก 8 Obstacle's Orientations และ 43 Obstacle's Distance มีจำนวน 344 Simulation (รูปที่ 4-3) ซึ่งทุก Simulation มีหน่วยเป็นกิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh) ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบในรูปที่ 4-4 ซึ่งแสดงถึงปริมาณ Annual Cumulative Insolation ของแต่ละ Orientation ทั้ง 8 Obstacle's Orientation ที่มีปริมาณที่เปลี่ยนแปลงในทุกการวางช่วงระยะห่างที่เพิ่มขึ้น โดยแกน Y (แกนตั้ง) ของกราฟคือ ปริมาณ Annual Cumulative Insolation และแกน X (แกนนอน) ของกราฟคือ Obstacle's Distance ตั้งแต่ 6 เมตร จนถึง 48 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างผลลัพธ์ของการประมวลผล 1 Simulation จาก Automated BPS ของอาคารกลุ่มตัวอย่าง 315° CW ที่ระยะห่าง 11 เมตร

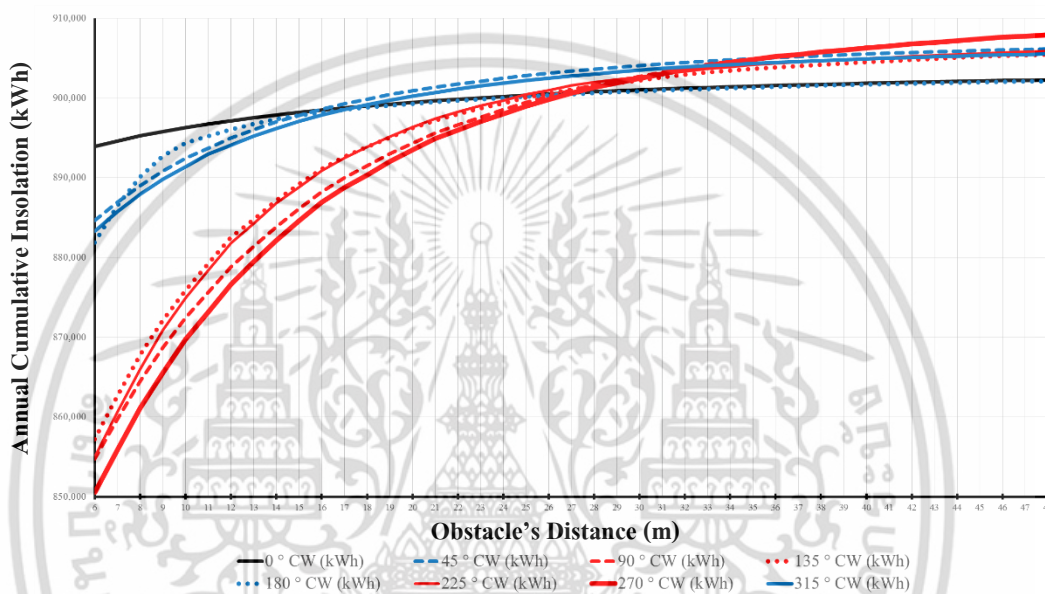


รูปที่ 4.3 ผลลัพธ์จาก Automated BPS ของการทดลองจาก 8 Orientation และ 43 Distance มีจำนวนทั้งหมด 344 Simulations

จาก รูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟของผลลัพธ์ Annual Cumulative Insolation ของทุก Obstacle's Orientation มีลักษณะเดียวกัน คือเป็นกราฟสองมิติที่มีลักษณะคล้ายกราฟของฟังก์ชันลอการิทึม (Graph of Logarithmic Functions) ซึ่งมีความหมายทางวิชาการคือ กราฟที่มีมาตรฐานบนแกนนอนเป็นมาตรฐานเลขคณิต และมีมาตรฐานบนแกนตั้งเป็นมาตรฐานลอการิทึม (ค่าระหว่างชั้นของสเกลจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงในอัตราที่เปลี่ยนไปแบบตัวคูณฐานสิบ) ที่มีรูปร่างเป็นเส้นโค้งที่มีความชันมากในขณะที่ค่าบนแกนนอนมีค่าน้อย และเส้นโค้งของกราฟจะมีความชันลดลงเมื่อค่าบนแกนนอนมีค่ามากขึ้นและเป็นกราฟที่มีลักษณะตรงข้ามกับกราฟของฟังก์ชันชี้กำลัง (Graph of Exponential Functions) (สุวิทย์ โวแสง, และคณะ, 2560; Stapel, 2017)

โดยเส้นกราฟ 1 เส้นของแต่ละ Obstacle's Orientation ที่เป็นผลลัพธ์จาก Automated BPS นั้นเป็นเส้นโค้งหนึ่งเส้นที่สร้างจาก 43 Simulations โดยมีลักษณะของเส้นโค้งแบ่งออกได้เป็น 3 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วง ดังที่แสดงในรูปที่ 4.6 (a) Obstacle’s Distance ช่วงเริ่มต้น เส้นโค้งมีความชันสูง (b) Obstacle’s Distance ช่วงกลาง ความชันของเส้นโค้งลดลง และ (c) Obstacle’s Distance ช่วงปลาย ความชันของเส้นโค้งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งความชัน (Slope หรือ Gradient) ของกราฟผลลัพธ์จากการทดลองนั้นนิยามตามอัตราของ “การยก” ทหารด้วย “การเคลื่อนที่” ระหว่างจุดสองจุดบนเส้นหรืออัตราส่วนสูงที่เปลี่ยนแปลงต่อระยะทางตามแนวอนระหว่างจุดสองจุดใดๆ บนเส้นกราฟนั้นๆ ให้สองจุดนั้นเป็น (x_1, y_1) และ (x_2, y_2) บนเส้นตรง ความชัน m ของเส้นตรงเป็นดังสมการที่แสดงในรูปที่ 4.5 (a) และวิธีตรีโกณมิติ ที่แสดงในรูปที่ 4.5 (b) (Math Open Reference, 2011)



รูปที่ 4.4 Annual Cumulative Insolation ของทั้ง 8 Orientations

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

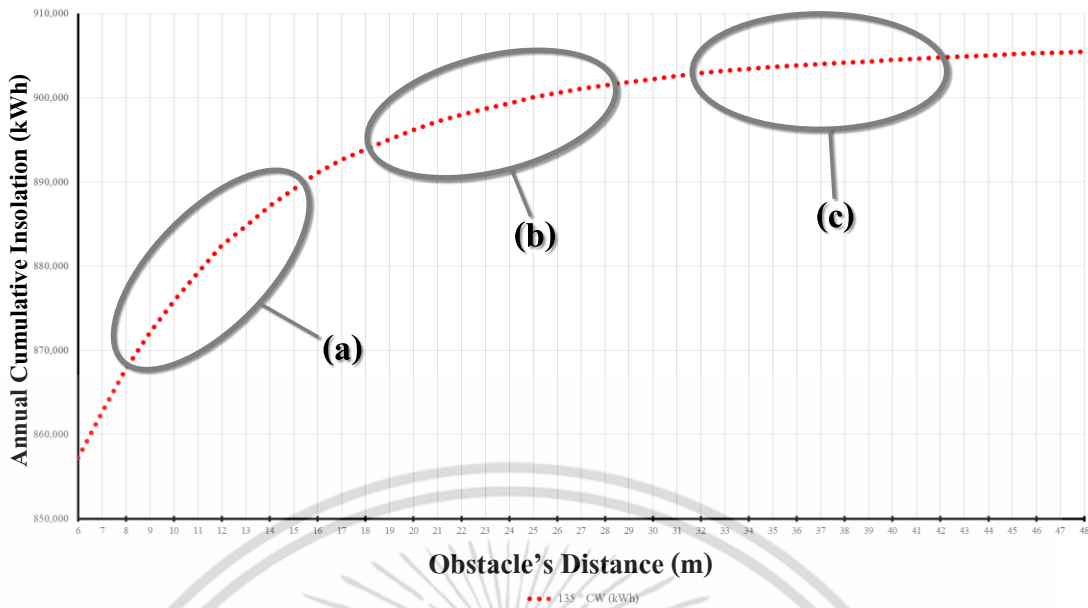
(a)

$$m = \tan \theta$$

(b)

รูปที่ 4.5 (a) การคำนวณความชันกราฟเส้นตรง (b) วิธีตรีโกณมิติ สมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

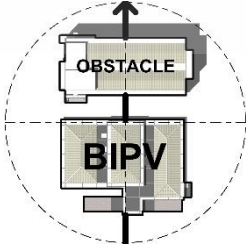


รูปที่ 4.6 ตัวอย่างเส้นกราฟ 135° CW แสดงช่วงความชันของเส้นโค้ง 3 ช่วง ได้แก่ (a) Obstacle's Distance ช่วงเริ่มต้น เส้นโค้งมีความชันสูง (b) Obstacle's Distance ช่วงกลาง ความชันของเส้นโค้งลดลง และ (c) Obstacle's Distance ช่วงปลายความชันของเส้นโค้งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

4.2 การวิเคราะห์ผล

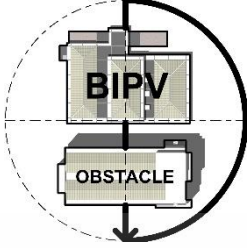
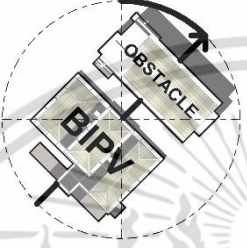
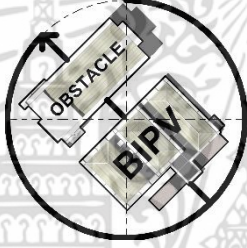
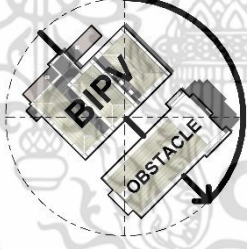
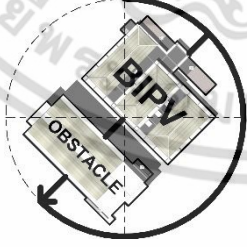
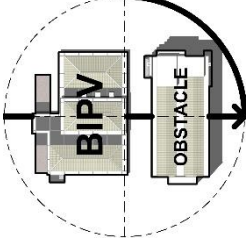
เมื่อวิเคราะห์ค่าความชันของเส้นกราฟภาพรวมของ Annual Cumulative Insolation ทั้ง 8 Obstacle's Orientation ของ Obstacle's Distance ที่ 6.00 เมตร กับ Obstacle's Distance ที่ 48.00 เมตร ที่ได้แสดงในรูปที่ 4.4 ด้วยวิธีการคำนวณที่ได้แสดงในรูปที่ 4.5 ได้ผลลัพธ์ความชันของเส้นกราฟภาพรวมดังที่แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความชันของเส้นกราฟภาพรวมของ Annual Cumulative Insolation ทั้ง 8 Obstacle's Orientations เรียงลำดับจากน้อยไปมาก

Model	ค่าความชันของเส้นกราฟ	ลำดับค่าความชันของเส้นกราฟ
0° CW 	198.48	ลำดับที่ 1 (น้อยที่สุด)

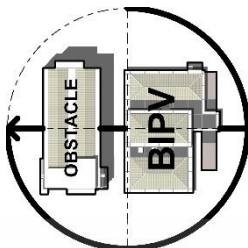
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

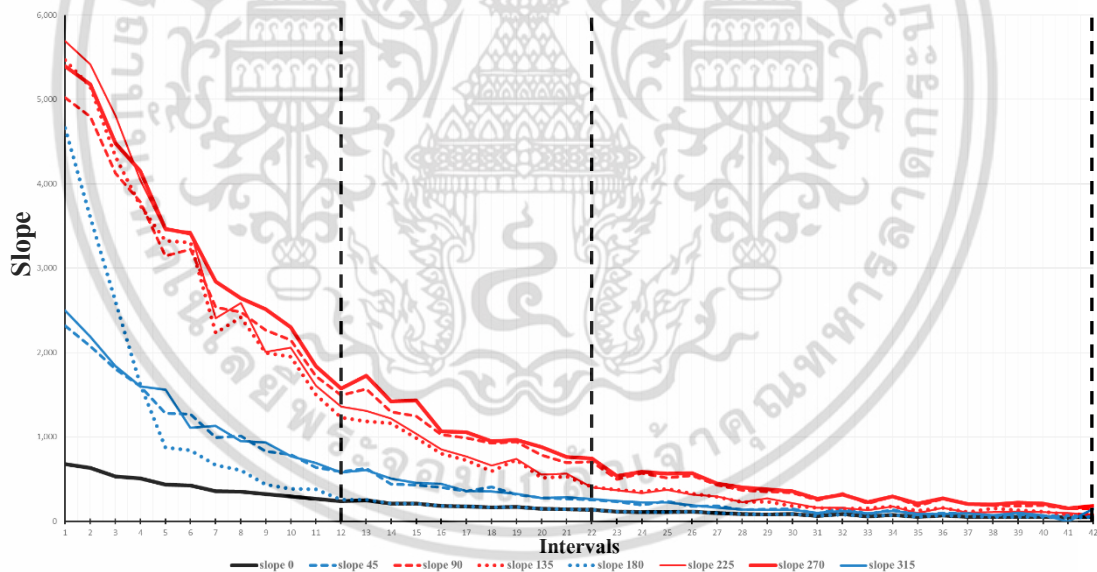
	Model	ค่าความชันของ เส้นกราฟ	ลำดับค่าความชันของ เส้นกราฟ
180° CW		482.05	ลำดับที่ 2
45° CW		512.48	ลำดับที่ 3
315° CW		530.60	ลำดับที่ 4
135° CW		1,148.60	ลำดับที่ 5
225° CW		1,211.79	ลำดับที่ 6
90° CW		1,265.07	ลำดับที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

Model	ค่าความชันของ เส้นกราฟ	ลำดับค่าความชันของ เส้นกราฟ
270° CW 	1,366.93	ลำดับที่ 8 (มากที่สุด)

และการวิเคราะห์ความชันของเส้นกราฟอย่างละเอียดของกราฟแต่ละเส้นที่ละ Intervals 1 เมตร ทั้งหมด 42 Intervals ของ 43 Obstacle's Distance ตัวอย่างเช่น Interval ระหว่าง Obstacle's Distance 6.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 7.00 เมตร นับเป็น Interval ที่ 1 ในขณะที่ Interval ระหว่าง Obstacle's Distance 7.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 8.00 เมตร นับเป็น Interval ที่ 2 จนกระทั่ง Interval ระหว่าง Obstacle's Distance 47.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 48.00 เมตร นับเป็น Interval ที่ 42 เป็นต้น ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 Slope แบบละเอียดของกราฟ Annual Cumulative Insolation ของทั้ง 8 Obstacle's Orientation เมื่อพิจารณาแต่ละช่วงระยะ (Interval) 42 ช่วง ของ 43 Obstacle's Distance

จากตารางที่ 4.1 จะสามารถเห็นได้ชัดเจนจากความชันของเส้นกราฟทั้ง 8 เส้นทั้งแบบภาพรวมและแบบละเอียดนั้น สามารถแบ่งออกได้ออกเป็นสามกลุ่ม ตามลักษณะและรูปแบบการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้นของค่า Annual Cumulative Insolation ที่เพิ่มขึ้นเมื่อ Obstacle's Distance เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.6 และรายละเอียดใน ภาคผนวก ก) โดยลักษณะของเส้นกราฟทั้งสามกลุ่มมีดังนี้

4.2.1 (1) กลุ่ม A₁ คือ เฉพาะเส้นกราฟของผลลัพธ์ค่า Annual Cumulative Insolation ของ ทิศทาง 0° CW เพียงเส้นเดียว เนื่องจากกราฟเส้นนี้มีลักษณะแตกต่างจากกราฟเส้นอื่นทั้งหมด มีรายละเอียดดังนี้

- กราฟเส้นนี้มีค่าความชันของเส้นกราฟแบบภาพรวม $\tan \theta = 198.48$ ต่ำที่สุดของทั้ง 8 Obstacle's Orientation
- เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของความชันของเส้นกราฟ 3 ช่วง ดังที่แสดงในรูปที่ 4.6 สามารถอธิบายความเปลี่ยนแปลงได้ด้วย 4 Interval ดังต่อไปนี้
 - กราฟ A₁ มีค่าความชันของเส้นกราฟ ของ Interval ที่ 1 (ระหว่าง Obstacle's Distance 6.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 7.00 เมตร) $\tan \theta = 678$
 - ค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ที่ 12 (ระหว่างช่วง (a) และ (b) ของรูป 4.6) ระหว่าง Obstacle's Distance 17.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 18.00 เมตร มีค่าความชันของเส้นกราฟ $\tan \theta = 236$
 - ค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ที่ 22 (ระหว่างช่วง (b) และ (c) ของรูป 4.6) ระหว่าง Obstacle's Distance 27.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 28.00 เมตร มีค่า $\tan \theta = 136$
 - ค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ที่ 42 (ช่วงสุดท้ายของรูป 4.6) ระหว่าง Obstacle's Distance 47.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 48.00 เมตร มีค่า $\tan \theta = 51$
- มีค่า Annual Cumulative Insolation ที่ Obstacle's Distance 6.00 เมตร คือ 893,937 kWh มากที่สุดของทั้งหมด 8 Obstacle's Orientation และมีการเพิ่มขึ้นของค่า Annual Cumulative Insolation ตาม Obstacle's Distance ที่เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ โดยมีค่าเฉลี่ยทั้งหมดของ Annual Cumulative Insolation (\bar{X}_{ACI}) ตั้งแต่ Obstacle's Distance 6.00 เมตร จนถึง Obstacle's Distance 48.00 เมตร มีปริมาณ 899,853 kWh ดังที่แสดงในรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟของกลุ่ม A₁ นั้นรูปร่างที่มีความใกล้เคียงกับกราฟเส้นตรงมากที่สุดของทั้ง 8 ทิศทาง

4.2.2 (2) กลุ่ม A₂ ประกอบด้วยกราฟ 3 เส้นของผลลัพธ์ค่า Annual Cumulative Insolation ของ ทิศทาง 45°CW, 180°CW และ 315°CW ลักษณะเฉพาะของกราฟกลุ่ม A₂ คือมีค่า Annual Cumulative Insolation เริ่มต้นที่ Obstacle's Distance ที่ใกล้ที่สุดคือ Obstacle's Distance 6.00 เมตร ต่ำกว่า A₁ เล็กน้อย แต่กลุ่ม A₂ นั้นมีอัตราการเพิ่มขึ้นของ Annual Cumulative Insolation รวดเร็วกว่ากลุ่ม A₁ ตาม Obstacle's Distance ที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.8) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.2.2.1 ทิศทาง 45°CW

- กราฟเส้นนี้มีค่าความชันของเส้นกราฟแบบภาพรวม $\tan \theta = 512.48$ ต่ำเป็นลำดับ 3 ของทั้ง 8 Obstacle's Orientation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของความชันเส้นโค้ง 3 ช่วง สามารถอธิบายความเปลี่ยนแปลงได้ด้วย 4 Interval ของ 45°CW ได้ดังต่อไปนี้
 - กราฟของ 45°CW มีค่าความชันของเส้นกราฟของ Interval ที่ 1 (ระหว่าง Obstacle's Distance 6.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 7.00 เมตร) $\tan \theta = 2,318$
 - มีค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ของ 12 (ระหว่าง Obstacle's Distance 17.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 18.00 เมตร) $\tan \theta = 585$
 - มีค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ที่ 22 (ระหว่าง Obstacle's Distance 27.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 28.00 เมตร) $\tan \theta = 257$
 - มีค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ที่ 42 (ระหว่าง Obstacle's Distance 47.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 48.00 เมตร) $\tan \theta = 71$
 - 45°CW มีค่า Annual Cumulative Insolation ที่ Obstacle's Distance 6.00 เมตร คือ 884,637 kWh มากเป็นอันดับที่ 2 ของทั้งหมด 8 Obstacle's Orientation (รูปที่ 4.4) มีค่าเฉลี่ยทั้งหมดของ Annual Cumulative Insolation (\bar{X}_{ACI}) ตั้งแต่ Obstacle's Distance 6.00 เมตร จนถึง Obstacle's Distance 48.00 เมตร มีปริมาณ 901,106 kWh
- 4.2.2.2 ทิศทาง 180°CW
- กราฟเส้นนี้มีค่าความชันของเส้นกราฟแบบภาพรวม $\tan \theta = 482.05$ ต่ำเป็นลำดับ 2 ของทั้ง 8 Obstacle's Orientation
 - เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของความชันเส้นโค้ง 3 ช่วง สามารถอธิบายความเปลี่ยนแปลงได้ด้วย 4 Interval ของ 180°CW ได้ดังต่อไปนี้
 - กราฟของ 180°CW มีค่าความชันของเส้นกราฟของ Interval ที่ 1 (ระหว่าง Obstacle's Distance 6.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 7.00 เมตร) $\tan \theta = 4,661$
 - มีค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ที่ 12 (ระหว่าง Obstacle's Distance 17.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 18.00 เมตร) $\tan \theta = 255$
 - มีค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ที่ 22 (ระหว่าง Obstacle's Distance 27.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 28.00 เมตร) $\tan \theta = 136$

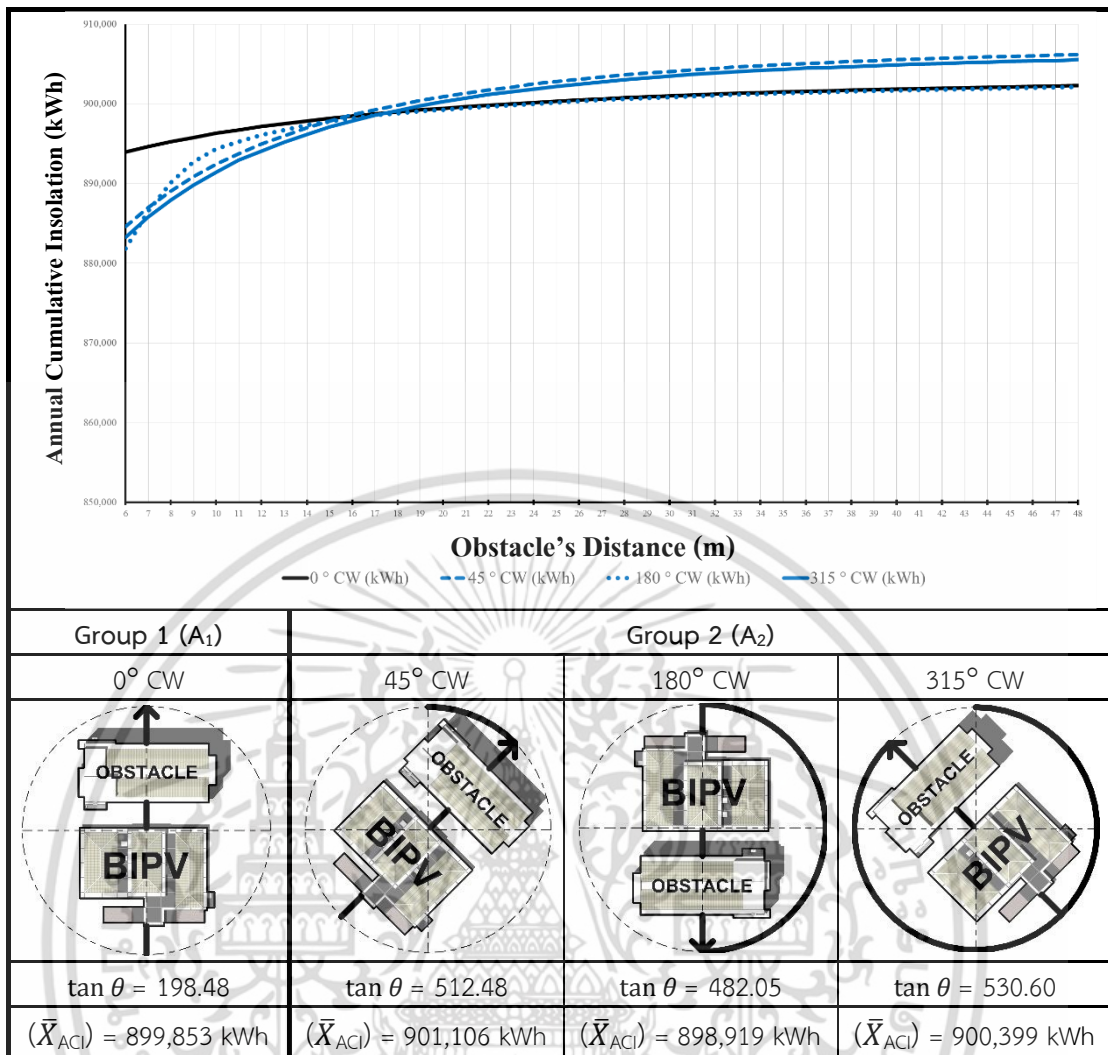
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ที่ 42 (ระหว่าง Obstacle's Distance 47.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 48.00 เมตร) $\tan \theta = 51$
- 180°CW มีค่า Annual Cumulative Insolation ที่ Obstacle's Distance 6.00 เมตร คือ 881,863 kWh มากเป็นอันดับที่ 4 ของทั้งหมด 8 Obstacle's Orientation (รูปที่ 4.4) มีค่าเฉลี่ยทั้งหมดของ Annual Cumulative Insolation (\bar{X}_{ACI}) ตั้งแต่ Obstacle's Distance 6.00 เมตร จนถึง Obstacle's Distance 48.00 เมตร มีปริมาณ 898,919 kWh

4.2.2.3 ทิศทาง 315°CW

- กราฟของ 315°CW นี้มีค่าความชันของเส้นกราฟแบบภาพรวม $\tan \theta = 530.60$ ต่ำเป็นลำดับ 4 ของทั้ง 8 Obstacle's Orientation
- เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความชันของเส้นกราฟ 3 ช่วง สามารถอธิบายความเปลี่ยนแปลงได้ด้วย 4 Interval ของ 315°CW ได้ดังต่อไปนี้
 - กราฟของ 315°CW มีค่าความชันของเส้นกราฟของ Interval ที่ 1 (ระหว่าง Obstacle's Distance 6.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 7.00 เมตร) $\tan \theta = 2,499$
 - มีค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ที่ 12 (ระหว่าง Obstacle's Distance 17.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 18.00 เมตร) $\tan \theta = 581$
 - มีค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ที่ 22 (ระหว่าง Obstacle's Distance 27.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 28.00 เมตร) $\tan \theta = 262$
 - มีค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ที่ 42 (ระหว่าง Obstacle's Distance 47.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 48.00 เมตร) $\tan \theta = 143$
- 315°CW มีค่า Annual Cumulative Insolation ที่ Obstacle's Distance 6.00 เมตร คือ 883,266 kWh มากเป็นอันดับที่ 3 ของทั้งหมด 8 Obstacle's Orientation (รูปที่ 4.4) มีค่าเฉลี่ยทั้งหมดของ Annual Cumulative Insolation (\bar{X}_{ACI}) ตั้งแต่ Distance 6.00 เมตร จนถึง Obstacle's Distance 48.00 เมตร มีปริมาณ 900,399 kWh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 สรุปผลลัพธ์ของกลุ่ม A₁ และกลุ่ม A₂

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบในภาพรวมแล้ว กราฟกลุ่ม A₁ และกราฟกลุ่ม A₂ เฉลี่ยทั้งกลุ่ม มีค่าความชันของเส้นกราฟ ของ Interval ที่ 1 $\tan \theta = 678$ และ 3,159 ตามลำดับ มีค่าความชันของเส้นกราฟ ของ Interval ที่ 12 $\tan \theta = 236$ และ 474 ตามลำดับ มีค่าความชันของเส้นกราฟ ของ Interval ที่ 22 $\tan \theta = 136$ และ 218 ตามลำดับ และมีค่าความชันของเส้นกราฟของ Interval ที่ 42 มีค่า $\tan \theta = 51$ และ 88 ตามลำดับ ค่าความชันของเส้นกราฟของทั้งสองกลุ่มดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากลุ่ม A₁ นั้นมีการเพิ่มของ Solar Insolation ในปริมาณที่น้อยกว่ากลุ่ม A₂ เมื่อ Obstacle's Distance เพิ่มขึ้น และถึงแม้ว่า กลุ่ม A₁ นั้นมีค่า Annual Cumulative Insolation สูงสุดตั้งแต่ Obstacle's Distance ที่ใกล้ที่สุดคือ 6.00 เมตร (893,937 kWh) และยังคงมีค่า Annual Cumulative Insolation สูงที่สุดจนถึง Obstacle's Distance 15.00 เมตร แต่เมื่อถึง Obstacle's Distance 16.00 เมตร กลุ่ม A₂ (90° CW) มีค่า Annual Cumulative Insolation จะมีค่ามากกว่า A₁ โดยแต่ละช่วงระยะ 1 เมตรที่เพิ่มขึ้น กลุ่ม A₁ จะมีค่า Annual Cumulative Insolation เพิ่มขึ้นในปริมาณเพียงเล็กน้อย และดังที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 4.2.1 ว่าเส้นกราฟของทิศทาง 0° CW นั้นรูปร่างที่มีความใกล้เคียงกับกราฟเส้นตรงมากที่สุดจากทั้งหมด 8 Orientations นั้นแสดงให้เห็นว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลุ่ม A₁ มีระดับความเปลี่ยนแปลง Annual Cumulative Insolation ตามความเปลี่ยนแปลงของ Obstacle's Distance น้อยที่สุด

4.2.3 (3) กลุ่ม B ประกอบด้วยกราฟ 4 เส้นของผลลัพธ์ค่า Annual Cumulative Insolation ของ ทิศทาง 90°CW, 135°CW, 225°CW และ 270°CW ลักษณะเฉพาะของกราฟกลุ่ม B คือมีค่า Annual Cumulative Insolation เริ่มต้นที่ Obstacle's Distance ที่ใกล้ที่สุดคือ Obstacle's Distance 6.00 เมตร ต่ำกว่าทั้งกลุ่ม A₁ และกลุ่ม A₂ แต่กลุ่ม B นั้นมีอัตราการเพิ่มขึ้นของ Annual Cumulative Insolation รวดเร็วกว่ากลุ่ม A₁ และกลุ่ม A₂ เป็นอย่างมาก (รูปที่ 4.9) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.2.3.1 ทิศทาง 90°CW

- กราฟเส้นนี้มีค่าความชันของเส้นกราฟแบบภาพรวม $\tan \theta = 1,265.07$ มากเป็นลำดับที่ 2 ของทั้ง 8 Obstacle's Orientation
- เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของความชันเส้นโค้ง 3 ช่วง สามารถอธิบายความเปลี่ยนแปลงได้ด้วย 4 Interval ของ 90°CW ได้ดังต่อไปนี้
 - กราฟของ 90°CW มีค่าความชันของเส้นกราฟของ Interval ที่ 1 (ระหว่าง Obstacle's Distance 6.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 7.00 เมตร) $\tan \theta = 5,020$
 - มีค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ที่ 12 (ระหว่าง Obstacle's Distance 17.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 18.00 เมตร) $\tan \theta = 1,497$
 - มีค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ที่ 22 (ระหว่าง Obstacle's Distance 27.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 28.00 เมตร) $\tan \theta = 706$
 - มีค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ที่ 42 (ระหว่าง Obstacle's Distance 47.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 48.00 เมตร) $\tan \theta = 148$
- 90°CW มีค่า Annual Cumulative Insolation ที่ Obstacle's Distance 6.00 เมตร คือ 854,723 kWh น้อยที่สุดเป็นอันดับที่ 2 ของทั้งหมด 8 Obstacle's Orientation (รูปที่ 4.4) มีค่าเฉลี่ยทั้งหมดของ Annual Cumulative Insolation (\bar{X}_{ACI}) ตั้งแต่ Obstacle's Distance 6.00 เมตร จนถึง Obstacle's Distance 48.00 เมตร มีปริมาณ 895,024 kWh

4.2.3.2 ทิศทาง 135°CW

- กราฟเส้นนี้มีค่าความชันของเส้นกราฟแบบภาพรวม $\tan \theta = 1,148.60$ มากเป็นลำดับที่ 4 ของทั้ง 8 Obstacle's Orientation
- เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของความชันเส้นโค้ง 3 ช่วง สามารถอธิบายความเปลี่ยนแปลงได้ด้วย 4 Interval ของ 135°CW ได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กราฟของ 90°CW มีค่าความชันของเส้นกราฟของ Interval ที่ 1 (ระหว่าง Obstacle's Distance 6.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 7.00 เมตร) $\tan \theta = 5,467$
- มีค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ของ 12 (ระหว่าง Obstacle's Distance 17.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 18.00 เมตร) $\tan \theta = 1,228$
- มีค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ที่ 22 (ระหว่าง Obstacle's Distance 27.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 28.00 เมตร) $\tan \theta = 405$
- มีค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ที่ 42 (ระหว่าง Obstacle's Distance 47.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 48.00 เมตร) $\tan \theta = 84$
- 135°CW มีค่า Annual Cumulative Insolation ที่ Obstacle's Distance 6.00 เมตร คือ 857,213 kWh น้อยที่สุดเป็นอันดับที่ 4 ของทั้งหมด 8 Obstacle's Orientation (รูปที่ 4.4) มีค่าเฉลี่ยทั้งหมดของ Annual Cumulative Insolation (\bar{X}_{ACI}) ตั้งแต่ Obstacle's Distance 6.00 เมตร จนถึง Obstacle's Distance 48.00 เมตร มีปริมาณ 895,470 kWh

4.2.3.3 ทิศทาง 225°CW

- กราฟเส้นนี้มีค่าความชันของเส้นกราฟแบบภาพรวม $\tan \theta = 1,211.79$ มากเป็นลำดับที่ 3 ของทั้ง 8 Obstacle's Orientation
- เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของความชันเส้นโค้ง 3 ช่วง สามารถอธิบายความเปลี่ยนแปลงได้ด้วย 4 Interval ของ 225°CW ได้ดังต่อไปนี้
 - กราฟของ 90°CW มีค่าความชันของเส้นกราฟของ Interval ที่ 1 (ระหว่าง Obstacle's Distance 6.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 7.00 เมตร) $\tan \theta = 5,690$
 - มีค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ของ 12 (ระหว่าง Obstacle's Distance 17.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 18.00 เมตร) $\tan \theta = 1,359$
 - มีค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ที่ 22 (ระหว่าง Obstacle's Distance 27.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 28.00 เมตร) $\tan \theta = 400$
 - มีค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ที่ 42 (ระหว่าง Obstacle's Distance 47.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 48.00 เมตร) $\tan \theta = 82$
- 225°CW มีค่า Annual Cumulative Insolation ที่ Obstacle's Distance 6.00 เมตร คือ 854,965 kWh น้อยที่สุดเป็นอันดับที่ 3 ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะบุคคลเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่เป็นวงกว้างได้ หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต ถือว่าผิดกฎหมาย และต้องรับผิดชอบต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

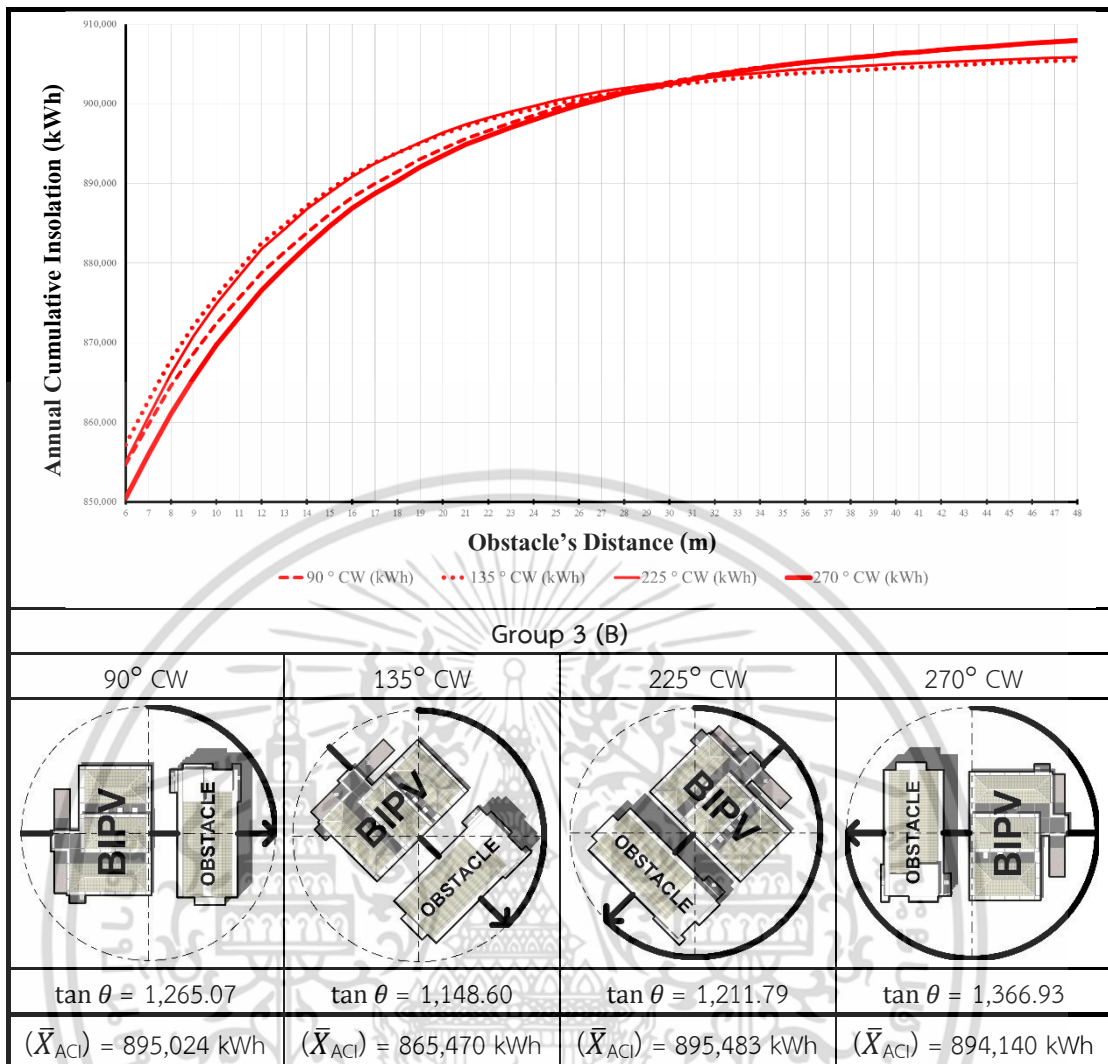
ทั้งหมด 8 Orientations (รูปที่ 4.4) มีค่าเฉลี่ยทั้งหมดของ Annual Cumulative Insolation (\bar{X}_{ACI}) ตั้งแต่ Obstacle's Distance 6.00 เมตร จนถึง Obstacle's Distance 48.00 เมตร มีปริมาณ 895,483 kWh

4.2.3.4 ทิศทาง 270°CW

- กราฟเส้นนี้มีค่าความชันของเส้นกราฟแบบภาพรวม $\tan \theta = 1,366.93$ มากที่สุดเป็นลำดับที่ 1 ของทั้ง 8 Obstacle's Orientation
- เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของความชันเส้นโค้ง 3 ช่วง สามารถอธิบายความเปลี่ยนแปลงได้ด้วย 4 Interval ของ 270°CW ดังต่อไปนี้
 - กราฟของ 270°CW มีค่าความชันของเส้นกราฟของ Interval ที่ 1 (ระหว่าง Obstacle's Distance 6.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 7.00 เมตร) $\tan \theta = 5,393$
 - มีค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ของ 12 (ระหว่าง Obstacle's Distance 17.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 18.00 เมตร) $\tan \theta = 1,576$
 - มีค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ที่ 22 (ระหว่าง Obstacle's Distance 27.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 28.00 เมตร) $\tan \theta = 748$
 - มีค่าความชันของเส้นกราฟใน Interval ที่ 42 (ระหว่าง Obstacle's Distance 47.00 เมตร กับ Obstacle's Distance 48.00 เมตร) $\tan \theta = 181$
- 270°CW มีค่า Annual Cumulative Insolation ที่ Obstacle's Distance 6.00 เมตร คือ 850,526 kWh น้อยที่สุดเป็นอันดับที่ 1 ของทั้งหมด 8 Obstacle's Orientation (รูปที่ 4.4) มีค่าเฉลี่ยทั้งหมดของ Annual Cumulative Insolation (\bar{X}_{ACI}) ตั้งแต่ Obstacle's Distance 6.00 เมตร จนถึง Obstacle's Distance 48.00 เมตร มีปริมาณ 894,140 kWh

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบในภาพรวมแล้ว กราฟกลุ่ม B เฉลี่ยทั้งกลุ่ม มีค่าความชันของเส้นกราฟ ของ Interval ที่ 1 $\tan \theta = 5,393$ (กลุ่ม A₁ และกราฟกลุ่ม A₂ เฉลี่ยทั้งกลุ่ม $\tan \theta = 678$ และ 3,159 ตามลำดับ) มีค่าความชันของเส้นกราฟ ของ Interval ที่ 12 $\tan \theta = 1,415$ (กลุ่ม A₁ และกราฟกลุ่ม A₂ เฉลี่ยทั้งกลุ่ม $\tan \theta = 236$ และ 474 ตามลำดับ) มีค่าความชันของเส้นกราฟ ของ Interval ที่ 22 $\tan \theta = 565$ (กลุ่ม A₁ และกราฟกลุ่ม A₂ เฉลี่ยทั้งกลุ่ม $\tan \theta = 136$ และ 218 ตามลำดับ) และมีค่าความชันของเส้นกราฟ ของ Interval ที่ 42 $\tan \theta = 124$ (กลุ่ม A₁ และกราฟกลุ่ม A₂ เฉลี่ยทั้งกลุ่ม $\tan \theta = 51$ และ 88 ตามลำดับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 สรุปผลลัพธ์ของกลุ่ม B

รูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่า กลุ่ม B ได้แก่ ทิศทาง 90°CW, 135°CW, 225°CW และทิศทาง 270°CW ซึ่งลักษณะเฉพาะของกราฟกลุ่ม B นี้คือ กราฟทั้งสี่เส้นของกลุ่ม B นั้นมีค่า Annual Cumulative Insolation เริ่มต้นที่ Distance ที่ใกล้ที่สุดคือ 6.00 เมตร น้อยที่สุดจากทั้งหมด 3 กลุ่ม โดยน้อยกว่าทั้งกลุ่ม A₁ และกลุ่ม A₂ แต่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของ Annual Cumulative Insolation ของกลุ่ม B อย่างรวดเร็วตาม Distance ที่เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4-1 และรูปที่ 4-7) จนทุกกราฟของกลุ่ม B มีค่ามากกว่า A₁ ตั้งแต่ Distance ที่ 25.00 เมตร (225°CW) ที่ 26.00 เมตร (135°CW) ที่ 27.00 เมตร (90°CW) และที่ 28.00 เมตร (270°CW) และกราฟของกลุ่ม B นี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อ Distance มีระยะเพิ่มมากขึ้น ค่า Annual Cumulative Insolation จะมีค่าสูงที่สุดเกือบทั้งกลุ่ม จากทั้งหมด 3 กลุ่ม เช่น ทิศทาง 225° ที่อยู่ในกลุ่ม B มีค่า Annual Cumulative Insolation มากกว่าทิศทาง 180° ที่อยู่ในกลุ่ม A₂ ที่ระยะ 25 เมตรโดยเฉพาะอย่างยิ่ง 270°CW ที่มีการเพิ่มของค่า Annual Cumulative Insolation มากที่สุดของทุก Orientations เนื่องจากที่ Distance ที่ใกล้ที่สุดคือที่ 6.00 เมตรนั้น 270°CW มีค่าน้อยที่สุดของทั้งหมด แต่มีค่าดังกล่าวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง จนกลายเป็น Orientation ที่มีค่า Annual Cumulative Insolation มากที่สุดตั้งแต่ Distance ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

45.00 เมตร จนถึงที่ 48.00 เมตร อันเป็นระยะที่มากที่สุดของการวิจัยนี้ พบว่า ที่ Distance 6.00 เมตร นั้น 0°CW มีปริมาณค่า Annual Cumulative Insolation มากกว่า 270°CW ได้รับแตกต่างกันมากถึง 43,411 kWh หรือนับเป็นความแตกต่างถึง 5.1040% โดยในทางกลับกัน ที่ Distance 48.00 เมตร 0°CW มีปริมาณค่า Annual Cumulative Insolation น้อยกว่า 270°CW ได้รับแตกต่างกันเพียง 0.6277% นอกจากนี้ที่ Distance 48.00 เมตร 0°CW มีปริมาณค่า Annual Cumulative Insolation มากกว่าที่ Distance 6.00 เมตรเพียง 0.93% ซึ่งต่างจาก 270°CW ที่มีความแตกต่างของ Annual Cumulative Insolation มากถึง 6.7501% ของ Distance ที่ 6.00 เมตร กับ 48.00 เมตร แต่จะมีสถานบริการสุขภาพภาครัฐจำนวนน้อยที่จะวางผังให้อาคารที่เป็นการใช้งานหลักทางการแพทย์อยู่ไกลกันมากถึง 45.00 เมตร เนื่องจากข้อจำกัดด้านขนาดที่ดินและความไม่สะดวกของการให้บริการทางการแพทย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 1.2 เรื่องคำถามการวิจัย กับหัวข้อที่ 1.4 สมมุติฐานของการศึกษา นั้น ผลลัพธ์จากการทดลองในบทที่ 4 พบว่าทั้ง Obstacle's Orientation และ Obstacle's Distance นั้นต่างมีผลกระทบต่อ Solar Insolation ทั้งคู่แต่ต่างบริบท ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.1.1 ดังที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 1.2 คำถามการวิจัย คือ ปัจจัยด้านสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Surrounding Obstacle Parameter) ส่งผลต่อศักยภาพการสร้างพลังงานของ BIPV อย่างไร? และหัวข้อที่ 1.4 สมมุติฐานข้อที่ 1 คือ การวางทิศทางของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Orientation) มีผลกระทบต่อปริมาณการรับความเข้มรังสีอาทิตย์ในหนึ่งหน่วยเวลา (Solar Insolation) ของอาคาร BIPV เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ Annual Cumulative Insolation จากการทดลองในบทที่ 4 แยกตาม Obstacle's Orientation ที่ Obstacle's Distance 6.00 เมตร เรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ

- ทิศทาง 0° CW คือ 893,937 kWh
- ทิศทาง 45° CW คือ 884,637 kWh
- ทิศทาง 315° CW คือ 883,266 kWh
- ทิศทาง 180° CW คือ 854,723 kWh
- ทิศทาง 135° CW คือ 857,213 kWh
- ทิศทาง 225° CW คือ 854,965 kWh
- ทิศทาง 90° CW คือ 854,723 kWh
- ทิศทาง 270° CW คือ 850,526 kWh

พบว่า Obstacle's Orientation มีผลต่อ Solar Insolation ในระดับน้อย โดยทิศทาง 45° CW, 315° CW และ 180° CW นั้นมีค่า Annual Cumulative Insolation ที่ใกล้เคียงกัน และทิศทาง 135° CW, 225° CW, 90° CW และ 270° CW นั้นก็มีค่า Annual Cumulative Insolation ที่ใกล้เคียงกันเป็นอีกกลุ่มหนึ่ง

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ Annual Cumulative Insolation แยกตาม Obstacle's Orientation เป็นกลุ่ม A₁ กลุ่ม A₂ และกลุ่ม B ที่ Obstacle's Distance 6.00 เมตร

- ที่ 6.00 เมตร (\bar{X}_{ACI}) กลุ่ม A₁ คือทิศทาง 0° CW = 893,937 kWh
- ที่ 6.00 เมตร (\bar{X}_{ACI}) กลุ่ม A₂ คือทิศทาง 45° CW, 315° CW และ 180° CW = 900,141 kWh
- ที่ 6.00 เมตร (\bar{X}_{ACI}) กลุ่ม B คือทิศทาง ทิศทาง 135° CW, 225° CW, 90° CW และ 270° CW = 887,529 kWh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าเมื่อพิจารณาแบบจัดกลุ่มโดยแบ่งออกเป็นกลุ่ม A₁ กลุ่ม A₂ และกลุ่ม B นั้น เห็นได้ว่า Obstacle's Orientation มีผลต่อ Solar Insolation อย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ Annual Cumulative Insolation แยกตาม Obstacle's Orientation เป็นกลุ่ม A₁ กลุ่ม A₂ และกลุ่ม B ที่ Obstacle's Distance 17.00 เมตร พบว่า

- ที่ 17.00 เมตร (\bar{X}_{ACI}) กลุ่ม A₁ คือทิศทาง 0° CW = 898,742 kWh
- ที่ 17.00 เมตร (\bar{X}_{ACI}) กลุ่ม A₂ คือทิศทาง 45° CW, 315° CW และ 180° CW = 898,779 kWh
- ที่ 17.00 เมตร (\bar{X}_{ACI}) กลุ่ม B คือทิศทาง ทิศทาง 135° CW, 225° CW, 90° CW และ 270° CW = 890,956 kWh

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ Annual Cumulative Insolation แยกตาม Obstacle's Orientation เป็นกลุ่ม A₁ กลุ่ม A₂ และกลุ่ม B ที่ Obstacle's Distance 27.00 เมตร พบว่า

- ที่ 27.00 เมตร (\bar{X}_{ACI}) กลุ่ม A₁ คือทิศทาง 0° CW = 900,627 kWh
- ที่ 27.00 เมตร (\bar{X}_{ACI}) กลุ่ม A₂ คือทิศทาง 45° CW, 315° CW และ 180° CW = 902,189 kWh
- ที่ 27.00 เมตร (\bar{X}_{ACI}) กลุ่ม B คือทิศทาง ทิศทาง 135° CW, 225° CW, 90° CW และ 270° CW = 901,039 kWh

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ Annual Cumulative Insolation แยกตาม Obstacle's Orientation เป็นกลุ่ม A₁ กลุ่ม A₂ และกลุ่ม B ที่ Obstacle's Distance 48.00 เมตร พบว่า

- ที่ 48.00 เมตร (\bar{X}_{ACI}) กลุ่ม A₁ คือทิศทาง 0° CW = 902,273 kWh
- ที่ 48.00 เมตร (\bar{X}_{ACI}) กลุ่ม A₂ คือทิศทาง 45° CW, 315° CW และ 180° CW = 904,607 kWh
- ที่ 48.00 เมตร (\bar{X}_{ACI}) กลุ่ม B คือทิศทาง ทิศทาง 135° CW, 225° CW, 90° CW และ 270° CW = 906,777 kWh

พบว่าเมื่อพิจารณาแบบจัดกลุ่มโดยแบ่งออกเป็นกลุ่ม A₁ กลุ่ม A₂ และกลุ่ม B นั้น เห็นได้ชัดเจนว่า Obstacle's Orientation มีผลต่อ Solar Insolation เป็นอย่างมากตั้งแต่ Obstacle's Distance 6.00 เมตร ถึง 17.00 เมตร และเริ่มไม่มีผลที่ตั้งแต่ Obstacle's Distance ตั้งแต่ 22.00 เมตร เป็นต้นไป

5.1.2 หัวข้อที่ 1.2 คำถามการวิจัยคือ ปัจจัยด้านสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Surrounding Obstacle Parameter) ส่งผลต่อศักยภาพการสร้างพลังงานของ BIPV อย่างไร? และหัวข้อที่ 1.4 สมมุติฐานข้อที่ 2 คือ ระยะห่างของสิ่งกีดขวางแวดล้อม (Obstacle's Distance) มีผลกระทบต่อ Solar Insolation ของอาคาร BIPV เมื่อพิจารณาผลลัพธ์จากการทดลองในบทที่ 4 นั้นพบว่า

- กลุ่ม A₁
 - Obstacle's Distance ไม่มีผลกระทบต่อกลุ่ม A₁ คือทิศทาง 0° CW เนื่องจากมีค่าความชันของเส้นกราฟแบบภาพรวม $\tan \theta = 198.48$ ซึ่งนับว่าน้อยมาก
 - มีค่า Annual Cumulative Insolation ที่ Obstacle's Distance 6.00 เมตร คือ 893,937 kWh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่า Annual Cumulative Insolation ที่ Obstacle's Distance 48.00 เมตร มีปริมาณ 899,853 kWh

ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า Obstacle's Distance เพิ่มขึ้นถึง 43.00 เมตร แต่ได้ Annual Cumulative Insolation มีค่าเพิ่มขึ้นเพียง 8,336 kWh

■ กลุ่ม A₂

Obstacle's Distance มีผลกระทบน้อยต่อกลุ่ม A₂ คือทิศทาง 45° CW, 315° CW และ 180° CW เนื่องจากมีค่าความชันของเส้นกราฟแบบภาพรวม $\tan \theta = 508$ ซึ่งมีความชันต่ำ

มีค่า Annual Cumulative Insolation เฉลี่ยที่ Obstacle's Distance 6.00 เมตรของทั้งกลุ่ม A₂ คือ 883,255 kWh

มีค่า Annual Cumulative Insolation ที่ Obstacle's Distance 48.00 เมตร มีปริมาณ 904,607 kWh

ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า Obstacle's Distance เพิ่มขึ้น 43.00 เมตร นั้นได้ Annual Cumulative Insolation มีค่าเพิ่มขึ้น 21,352 kWh

■ กลุ่ม B

Obstacle's Distance มีผลกระทบเป็นอย่างมากต่อกลุ่ม B คือทิศทาง 135° CW, 225° CW, 90° CW และ 270° CW เนื่องจากมีค่าความชันของเส้นกราฟแบบภาพรวม $\tan \theta = 1,248$ ซึ่งมีความชันสูง มีค่า Annual Cumulative Insolation เฉลี่ยที่ Obstacle's Distance 6.00 เมตรของทั้งกลุ่ม B คือ 854,357 kWh และค่าความชันของเส้นกราฟแบบภาพรวม $\tan \theta$ มีค่าลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าน้อยกว่า 500 (445) เมื่อ Obstacle's Distance เกิน 27.00 เมตร

มีค่า Annual Cumulative Insolation ที่ Obstacle's Distance 17.00 เมตร มีปริมาณ 890,956 kWh

มีค่า Annual Cumulative Insolation ที่ Obstacle's Distance 48.00 เมตร มีปริมาณ 906,777 kWh

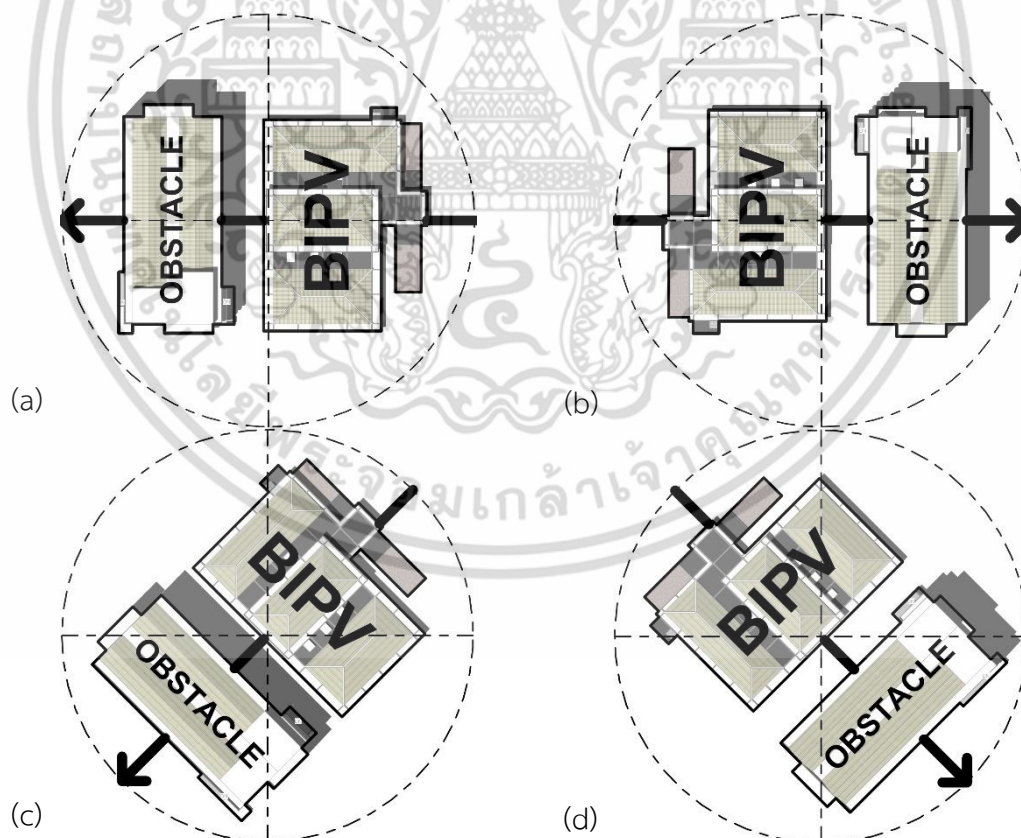
ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า Obstacle's Distance เพิ่มขึ้น 43.00 เมตร นั้นได้ Annual Cumulative Insolation มีค่าเพิ่มขึ้น 21,352 kWh

สามารถสรุปได้ว่า Obstacle's Distance มีผลต่อ Solar Insolation กับบาง Obstacle's Orientation โดยเฉพาะกลุ่ม B แต่ผลกระทบดังกล่าวนั้นมีการเสื่อมตั้งแต่ Obstacle's Distance เกิน 27.00 เมตรเป็นต้นไป

5.1.3 จากข้อสรุปดังกล่าวและข้อมูลค่าความชันของกราฟแบบภาพรวมของ Annual Cumulative Insolation ของทั้ง 8 Obstacle's Orientation ที่ได้กล่าวไปในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4-9 พบว่า Partial Shading Effects (PSE) นั้นส่งผลกระทบเป็นอย่างมากต่อ 270° CW, 90° CW, 225° CW และ 135° CW มากที่สุดตามลำดับ (รูปที่ 5.2) ซึ่งทิศทางดังกล่าวอยู่ในกลุ่ม B ทั้งหมด และส่งผลให้ค่าเฉลี่ย Annual Cumulative Insolation ของกลุ่ม B ทุก Obstacle's Orientation ตั้งแต่ Distance 6.00 เมตรถึง 48.00 เมตร ทั้งหมดน้อยกว่ากลุ่ม A₁ และกลุ่ม A₂ ทำให้สามารถ

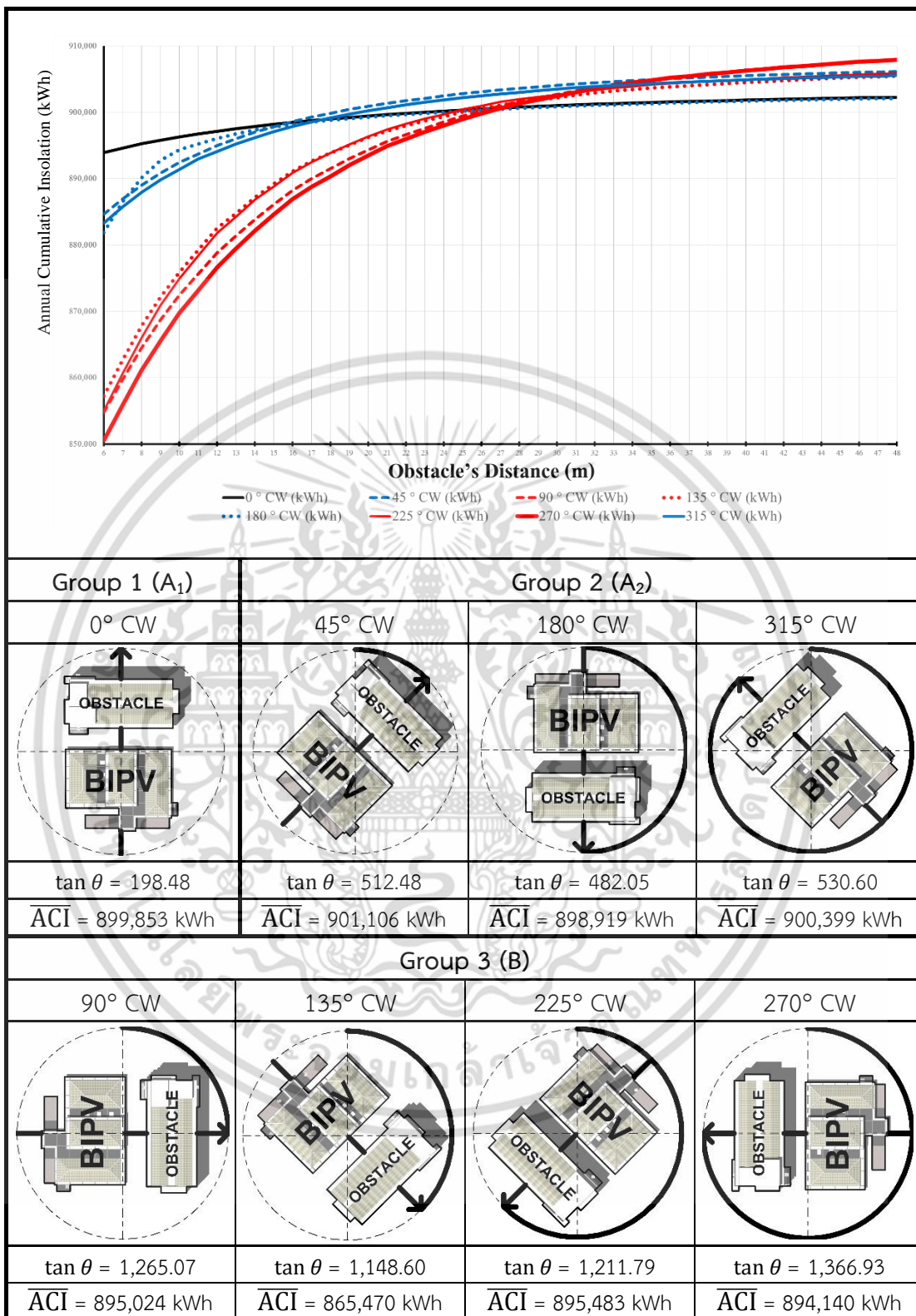
เอกสารนี้วิเคราะห์ได้ว่า... วิศวกรรมไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- PSE ส่งผลกระทบมากที่สุดต่อ 270° CW เป็นอันดับที่ 1 (PSE#1) (รูปที่ 5.1 (a)) ซึ่งเป็นทิศที่ Obstacle ตั้งอยู่ที่ทิศตะวันตกของอาคาร BIPV ทำให้ Obstacle ที่มีความสูงมากกว่าอาคาร BIPV นั้นบังเงา PV Surfaces ตลอดช่วงบ่ายของทั้งปี และ 90° CW เป็นอันดับที่ 2 (PSE#2) ซึ่ง Obstacle ตั้งอยู่ที่ทิศตะวันตกของอาคาร BIPV (รูปที่ 5.1 (b)) ซึ่งเป็นทิศที่ Obstacle ตั้งอยู่ที่ทิศตะวันออกของอาคาร BIPV ทำให้ Obstacle ที่มีความสูงมากกว่าอาคาร BIPV นั้นบังเงา PV Surfaces ตลอดช่วงเช้าของทั้งปี ทำให้สามารถสรุปได้ว่า รั้งสีอาทิตย์ของแสงแดดช่วงบ่ายนั้นมีความสำคัญต่อศักยภาพการผลิตพลังงานของอาคาร BIPV มากกว่าแสงแดดช่วงเช้า
- PSE ส่งผลกระทบมากที่สุดต่อ 225° CW เป็นอันดับที่ 3 (PSE#3) (รูปที่ 5.1 (c)) ซึ่งเป็นทิศที่ Obstacle ตั้งอยู่ที่ทิศตะวันตกเฉียงใต้ของอาคาร BIPV ทำให้ Obstacle ที่มีความสูงมากกว่าอาคาร BIPV นั้นบังเงา PV Surfaces ตลอดช่วงบ่ายของระยะเวลา 6 เดือนของทั้งปี และ 135° CW เป็นอันดับที่ 4 (PSE#4) ซึ่ง Obstacle ตั้งอยู่ที่ทิศตะวันตกของอาคาร BIPV (รูปที่ 5.1 (d)) ซึ่งเป็นทิศที่ Obstacle ตั้งอยู่ที่ทิศตะวันออกเฉียงใต้ของอาคาร BIPV ทำให้ Obstacle ที่มีความสูงมากกว่าอาคาร BIPV นั้นบังเงา PV Surfaces ตลอดช่วงเช้าของระยะเวลา 6 เดือนของทั้งปี ทำให้สามารถสรุปได้ว่า รั้งสีอาทิตย์ของแสงแดดที่เคลื่อนที่อ้อมทิศใต้นั้นมีความสำคัญต่อศักยภาพการผลิตพลังงานของอาคาร BIPV มากกว่าแสงแดดที่เคลื่อนที่ที่ตั้งฉากในแนวตั้งกับแสงแดดที่เคลื่อนที่อ้อมทิศเหนือ โดยเฉพาะแสงแดดที่เคลื่อนที่อ้อมใต้ในช่วงบ่ายซึ่งมาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้



รูปที่ 5.1 (a) 270° CW (PSE#1) (b) 90° CW (PSE#2) (c) 225° CW (PSE#3)
(d) 135° CW (PSE#4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 สรุปผลลัพธ์ทั้งหมดของแต่ละ Orientation ทั้ง 8 ทิศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4 ข้อสรุปทั้งหมดจากผลการศึกษาคือ (1) Obstacle's Orientation มีผลต่อ Solar Insolation เป็นอย่างมากตั้งแต่ Obstacle's Distance 6.00 เมตร ถึง 17.00 เมตร และเริ่มไม่มีผลที่ตั้งแต่ Obstacle's Distance ตั้งแต่ 22.00 เมตร เป็นต้นไป (2) Obstacle's Distance มีผลต่อ Solar Insolation กับบาง Obstacle's Orientation โดยเฉพาะกลุ่ม B แต่ผลกระทบดังกล่าวนี้มีการเสื่อมตั้งแต่ Obstacle's Distance 27.00 เมตร เป็นต้นไป (3) รังสีอาทิตย์จากแดดช่วงบ่ายสำคัญที่สุด และ (4) รังสีอาทิตย์จากแดดอ้อมใต้สำคัญกว่าแดดทิศอื่น

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากที่ได้กล่าวไปในบทที่ 1 และบทที่ 2 ว่า ประเทศไทยได้มีนโยบายสนับสนุนและกำหนดเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ใช้ในประเทศ ถึง 2,000 เมกะวัตต์ ภายในปี พ.ศ. 2564 ซึ่งประกอบด้วยพลังงานไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา เป็นจำนวนถึง 1,000 เมกะวัตต์ (ดิศรณ์ ชัยช่วงโชค, โสภิตสุตา ทองโสภิต, และ แนบบัญญ หุนเจริญ, 2013; DEDE, 2017) และด้วยนโยบายต่างๆของรัฐบาลประกาศและบังคับใช้ เพื่อกระตุ้นให้อาคารภาครัฐมุ่งสู่การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ไม่ว่าจะด้วยการสนับสนุนเงินงบประมาณ และด้วยการผลักดันให้อาคารภาครัฐต้องผ่านเกณฑ์ต่างๆด้านพลังงานทดแทน (กรมประชาสัมพันธ์, 2015; Energy News Center, 2016; สำนักงานอนามัยสิ่งแวดล้อม, 2016; คณะกรรมการการพลังงาน สภานิติบัญญัติแห่งชาติ, 2017) แนวทางหนึ่งของการดำเนินการให้แนวทางดังกล่าวประสบความสำเร็จได้ คือการติดตั้ง PV Modules เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา บนอาคารภาครัฐที่สร้างเสร็จไปแล้วหรือที่กำลังจะก่อสร้างในอนาคต เพื่อให้อาคารเหล่านั้นเป็นอาคาร BIPV โดยอาคารดังกล่าวส่วนหนึ่งนั้นคือ อาคารสถานบริการสุขภาพภาครัฐ ตัวอย่างเช่น โรงพยาบาลระดับทุติยภูมิที่มีอยู่ทุกรัฐภาคทั่วประเทศไทยเป็นจำนวนมาก ซึ่งในสภาพความเป็นจริงนั้นโรงพยาบาลของรัฐแต่ละแห่งนั้นประกอบด้วยอาคารและองค์ประกอบด้านสภาพแวดล้อมต่างๆมากมายดังที่ได้กล่าวไปในบทที่ 1 หัวข้อที่ 1.1 และในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.4 ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงที่อาคาร BIPV ที่ตั้งอยู่ในสถานบริการสุขภาพภาครัฐจะประสบกับ Partial Shading Effects ดังนั้นจากผลการศึกษา จึงมีข้อเสนอแนะและการนำผลการศึกษาไปใช้ดังต่อไปนี้

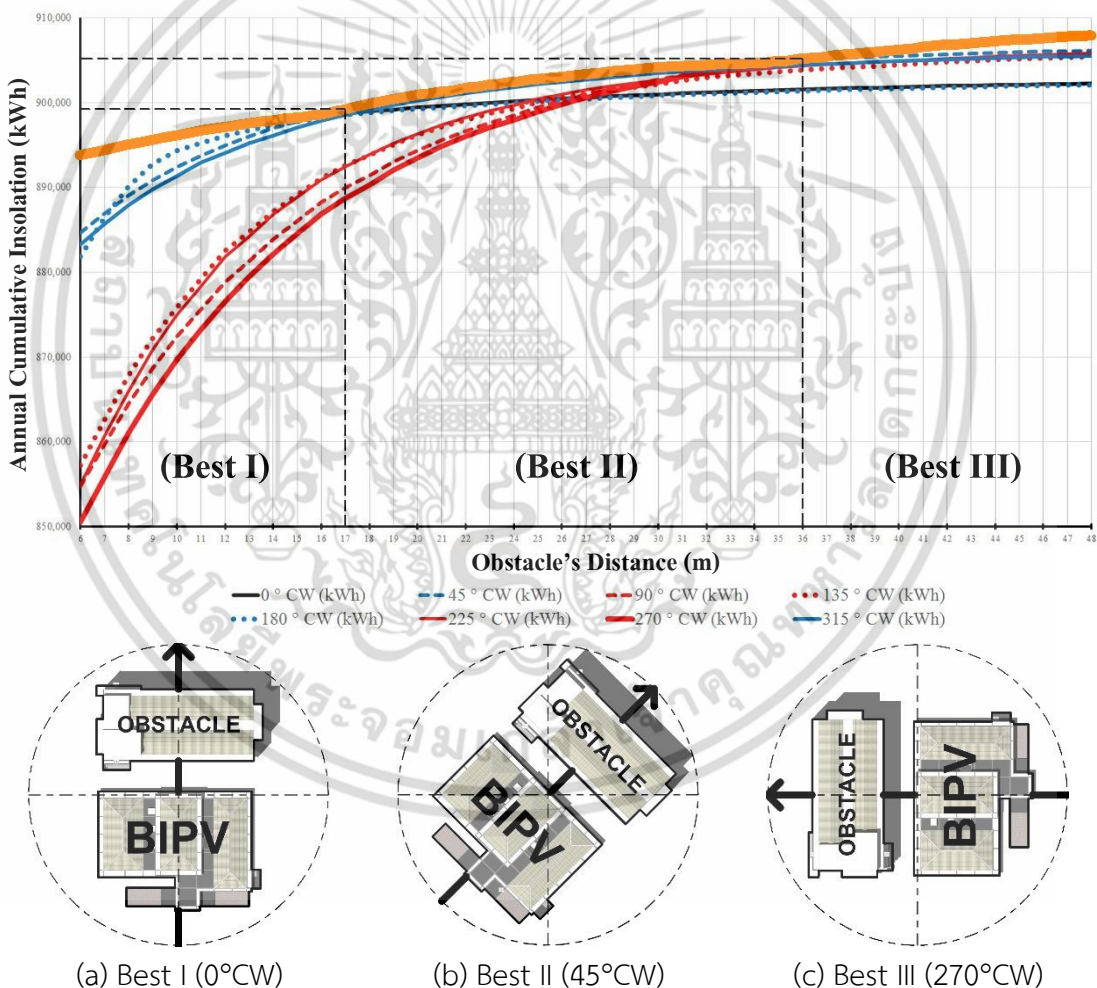
5.2.1 ข้อเสนอแนะด้านการวางผังอาคารใหม่

อาคาร BIPV ประเภทที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) อาคารนั้นควรมีอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยสูง (Roof to Functional Area Ratio) เนื่องจากหลังคาเป็นส่วนของอาคารที่สามารถรับรังสีได้สูงที่สุดและมีความสม่ำเสมอของการรับรังสีอาทิตย์มากที่สุด (Kanters, Planning for solar buildings in urban environments: An analysis of the design process, methods and tools, 2015) แต่อาคาร BIPV นี้มักมีอาคารข้างเคียงที่มีความสูงมากกว่าตั้งอยู่ จากผลการศึกษา ข้อเสนอแนะด้านการวางผังอาคารจึงมีดังนี้

- กลุ่ม A₁ (0°CW) นั้นเป็นทิศทางการวางอาคาร BIPV ที่มีความสัมพันธ์กับ Obstacle ที่ทำให้มีระดับ Solar Insolation บน PV Surfaces สูงที่สุด โดยที่ Distance มีผลน้อย เหมาะกับโรงพยาบาลทุติยภูมิที่มีพื้นที่ดินขนาดเล็ก และมีปริมาณอาคารหนาแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กลุ่ม A₂ (45°CW, 180°CW และ 315°CW) นั้นเป็นทิศทางการวางอาคาร BIPV ที่มีความสัมพันธ์กับ Obstacle ที่ทำให้มีระดับ Solar Insolation บน PV Surfaces มากลดลงมา เหมาะกับโรงพยาบาลทุติยภูมิที่มีพื้นที่ดินที่ไม่เล็กมากและมีปริมาณอาคารหนาแน่นปานกลาง อาคาร BIPV จะสามารถสร้างพลังงานได้เต็มศักยภาพเมื่อมีระยะห่างจาก Obstacle มากกว่า 15.00 เมตร เป็นต้นไป
- กลุ่ม B (90°CW, 135°CW, 225°CW และ 270°CW) เป็นทิศที่ได้รับผลกระทบจาก PSE และ Orientations มากที่สุด ไม่เหมาะสมกับโรงพยาบาลทุติยภูมิที่มีพื้นที่ดินขนาดเล็กและมีปริมาณอาคารหนาแน่น เนื่องจากอาคาร BIPV จะสามารถสร้างพลังงานได้เต็มศักยภาพเมื่อมีระยะห่างจาก Obstacle มากกว่าประมาณ 28.00 เมตร เป็นต้นไป



รูปที่ 5.3 Obstacle’s Orientations ที่มีศักยภาพสูงสุดของแต่ละช่วงระยะ Obstacle’s Distance

จากข้อสรุปดังกล่าวสามารถกำหนด Orientations ที่เอื้อให้อาคาร BIPV สามารถมีศักยภาพการสร้างพลังงานจากแสงอาทิตย์ได้สูงสุดในแต่ละ Distance ได้ดังที่แสดงเป็นเส้นโค้งสีส้ม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 5-3 โดย (Best I) 0°CW มีความเหมาะสมนำไปใช้ในการวางผังสำหรับ Distance ตั้งแต่ 6.00 เมตร ถึง 17.00 เมตร (Best II) 45°CW มีความเหมาะสมนำไปใช้ในการวางผังสำหรับ Distance ตั้งแต่ 18.00 เมตร ถึง 36.00 เมตร และ (Best III) 270°CW มีความเหมาะสมนำไปใช้ในการวางผังสำหรับ Distance ตั้งแต่ 37.00 เมตร ถึง 48.00 เมตร

5.2.2 ข้อเสนอแนะด้านการปรับปรุงอาคารที่มีอยู่แล้วให้เป็น BIPV

โรงพยาบาลระดับทุติยภูมิมีจำนวน 780 แห่งทั่วประเทศสามารถนำผังอาคาร (Layout Plan) มาสำรวจและตรวจสอบศักยภาพการสร้างพลังงานการก่อสร้างพลังงานจากแสงอาทิตย์ โดยการเปรียบเทียบผังกับผลการศึกษาทั้งทางด้าน Orientations และ Distances จะทำให้ทราบถึงรูปแบบของผังโรงพยาบาลแต่ละแห่งว่ามีลักษณะของการวางอาคารเป็นแบบกลุ่ม A_1 หรือกลุ่ม A_2 หรือกลุ่ม B และจะทำให้สามารถทราบถึงความเหมาะสมต่อการลงทุนติดตั้ง PV Systems ในโรงพยาบาลระดับทุติยภูมิแต่ละแห่งว่าแห่งใดเหมาะสมควรลงทุน และแห่งใดไม่คุ้มค่าที่จะลงทุนติดตั้ง PV Systems

5.2.3 ข้อเสนอแนะด้านกระบวนการออกแบบสถานบริการสุขภาพ

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองโดยใช้งาน Automated BPS ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันของระบบ BIM และระบบ BPS ที่ใช้เทคโนโลยีการประมวลผลแบบกลุ่มเมฆในการประมวลผลสมรรถนะอาคาร ซึ่งเป็นวิธีการที่ทำให้ผู้ออกแบบได้ทราบถึงสมรรถนะอาคารอย่างไร้รอยต่อ อย่างเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการออกแบบอาคาร แบบจำลองสารสนเทศที่ใช้จำลองสมรรถนะอาคารเป็น Model เดียวกับที่ใช้ในการออกแบบและจัดทำแบบก่อสร้าง ผู้ออกแบบไม่จำเป็นต้องสร้าง Model ใหม่เพื่อการทำ BPS เนื่องจากกระบวนการจำลองสมรรถนะอาคารบางชนิดบางวิธีการ ผู้ออกแบบอาคารจำเป็นต้องสร้าง Model อาคารขึ้นมาใหม่ให้เหมาะสมและถูกต้องตามวิธีการจำลองสมรรถนะอาคาร เช่น การทำ Model อาคารให้เรียบง่ายขึ้น (Simplification) เป็นต้น แต่วิธีการที่เสนอในการศึกษานี้สามารถเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการออกแบบได้อย่างสมบูรณ์

5.2.4 ข้อเสนอแนะด้านเทคโนโลยีอาคารผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์

ข้อเสนอแนะนี้ประกอบด้วยสองส่วน ดังต่อไปนี้

(1) ปัจจุบันเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีอยู่ในตลาดนั้นยังมีประสิทธิภาพต่ำ เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงก็มีราคาแพงและส่วนหนึ่งยังอยู่ในกระบวนการพัฒนา และระบบ BIPV นั้นมีความอ่อนไหวต่อ Partial Shading Effects เป็นอย่างมาก ถึงแม้ว่าผู้ผลิต PV Systems จะมีการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพระบบ BIPV ให้มีประสิทธิภาพแม้ต้องอยู่ใต้สภาวะ Partial Shading Effects เช่น Maximum Power Point Tracking (MPPT) อันเป็น Algorithm ที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดของการผลิตพลังงานไฟฟ้าระหว่าง PV Modules ที่อยู่ใต้ Partial Shading Effects กับระบบสายส่งหรือระบบแบตเตอรี่ เป็นต้น (Ramli, Ishaque, Jawaid, Al-Turki, & Salam, 2015; Ramli, Twaha, Ishaque, & Al-Turki, 2017) แต่เทคโนโลยีต่างๆ ที่มีคุณภาพและประสิทธิภาพสูงขึ้นก็มักจะมีต้นทุนที่สูงขึ้นเป็นเงาตามตัว ดังนั้นการลงทุนระบบ BIPV ที่มีต้นทุนสูง ถ้าผู้มีส่วนเกี่ยวข้องไม่สามารถหาคำตอบด้านความคุ้มค่าและประโยชน์ที่จะได้รับจากระบบ BIPV ได้อย่างชัดเจน ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องควรและสามารถเลือกใช้กลยุทธ์อื่นเป็นทางเลือก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกเหนือจากการเลือกใช้ระบบ BIPV เช่น การเลือกใช้กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของผู้ใช้อาคารให้ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เป็นต้น

(2) ถึงแม้ว่าการใช้งานระบบ BIPV นั้นจะมีข้อได้เปรียบดังที่ได้กล่าวไปในบทที่ 1 หัวข้อที่ 1.1.3 และบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.1.3 แต่การใช้งานระบบ BIPV เองนั้นอาจเป็นข้อจำกัดที่ไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดเนื่องจาก BIPV นั้นมุ่งเน้นให้ผิวนิรนาบบ PV เข้าไปอย่างกลมกลืนเป็นส่วนหนึ่งกับอาคาร (Hall, 2014) ซึ่งอาจทำให้ PV Module ไม่สามารถที่จะหันมุมและหันความลาดเอียงให้อยู่ในตำแหน่งที่ดีที่สุดในการรับรังสีอาทิตย์สูงสุดได้ ดังนั้นการเลือกใช้การสร้างพลังงานทางเลือกจากแสงอาทิตย์ให้ได้มีประสิทธิภาพสูงสุดอาจจะต้องแลกเปลี่ยนกับความสวยงาม โดยผู้ออกแบบอาจเลือกใช้ระบบ BAPV แทน เนื่องจากระบบดังกล่าวนี้สามารถกำหนดตำแหน่งให้ได้รับรังสีอาทิตย์สูงสุดได้สะดวกกว่า และประสบกับ Partial Shading Effects เนื่องจาก PV Modules บังกันเองและถูกบังจากตัวอาคารเองน้อยกว่าระบบ BIPV (Yoo, 2011)

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

5.3.1 การวิจัยเพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลด้าน PSE ที่มีผลต่ออาคาร BIPV เปรียบเทียบกับอาคาร Building Attached Photovoltaic ที่เป็นการติดตั้ง PV Modules แบบไม่ต้องผิวนิรนาบบไปกับวัสดุอาคาร ซึ่งทำให้ปรับ PV Surface Geometries (หัวข้อที่ 1.1 และรูปที่ 1-1) ให้ PV Module สามารถมีรูปร่างและติดตั้งให้มีมุมเอียงที่เหมาะสมที่สุดกับรังสีอาทิตย์ได้ (Optimal Tilts)

5.3.2 การวิจัยเพื่อการศึกษาอิทธิพลด้าน PSE ร่วมกับการศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการติดตั้ง PV Modules บริเวณหลังคาของอาคาร BIPV ที่อาจทำให้การส่งผ่านความร้อนบริเวณเปลือกอาคาร (Building Envelope) มีการเปลี่ยนแปลง

5.3.3 การวิจัยเพื่อการศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลด้าน PSE ด้วยการเลือกกลุ่มประชากรและกลุ่มตัวอย่างจาก GBD อาคารสถานบริการสุขภาพแบบอื่น

5.3.4 การวิจัยเพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลด้าน PSE ที่มีผลต่ออาคาร BIPV ที่มีสถานที่ตั้งอื่นๆ ในประเทศไทย เช่น มีสถานที่ตั้งในภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก ภาคตะวันตก และภาคใต้ เป็นต้น

บรรณานุกรม

- Akash Kumar Shukla, K. Sudhakar, และ Prashant Baredar. (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
- Aksornchan Chaianong, และ Chanathip Pharino. (2015). Outlook and challenges for promoting solar photovoltaic rooftops in Thailand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 356-372.
doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.042
- Anthony Dominguez, Jan Kleissl, และ Jeffrey C Luvall. (September 2011). Effect of solar photovoltaic panels on roof heat transfer. *Solar Energy*, 85(9), 2244-2255. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.06.010
- Berk Celik, Engin Karatepe, Nuri Gokman, และ Santiago Silvestre. (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. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.05.040
- Berk Celik, Engin Karatepe, Santiago Silvestre, Nuri Gokman, และ Aissa Chouder. (March 2015). 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
- Betul Bektas Ekici. (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
- Bhubaneswari Parida, S. Iniyan, และ Ranko Goic. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable*, 1625-1636.
- Bjørn Petter Jelle, Christer Breivik, และ Hilde Drolsum Røkenes. (2012). Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 69-96.
- Brian Norton, Philip C. Eames, Tapas K. Mallick, Ming Jun Huang, Sarah J. McCormack, Jayanta D. Mondol, และ Yigsaw G. Yohanis. (2011). Enhancing the performance of building integrated photovoltaics. *Solar Energy*, 1629-1664.
doi:https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.004
- C. Peng, Y. Huang, และ Z. Wu. (2011). Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China. *Energy and Buildings*, 3592-3598.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- C. U. Ikedi, M.I. Okoroh, A. Dean, และ S.A. Omer. (2010). Impact assessment for building integrated photovoltaic (BIPV). *ARCOM 2010 - Proceedings of the 26th Annual Conference* (หน้า 1407-1415). Leeds, United Kingdom: Association of Researchers in Construction Management.
- Chuck Eastman, Paul Teicholz, Rafael Sacks, และ Kathleen Liston. (2011). *BIM Handbook - A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Clarissa Zomer, และ Ricardo Rüther. (2017). Simplified method for shading-loss analysis in BIPV systems - part 1: Theoretical study. *Energy and Buildings*, 141, 69-82. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.042>
- Daniel B. Botkin, และ Edward A. Keller. (2011). *Environmental Science: Earth as a Living Planet* (พิมพ์ครั้งที่ 8th Edition). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Daniel Ladenhauf, Kurt Battisti, René Berndt, Eva Eggeling, Dieter W. Fellner, Markus Gratzl-Michlmair, และ Torsten Ullrich. (2015). Computational geometry in the context of building information. *Energy and Buildings*, 115, 78-84. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.056>
- Daniel Masa-bote, และ Estefania Caamaño-Martín. (2014). Methodology for estimating building integrated photovoltaics. *Renewable and Sustainable Energy*, 492-500. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.019>
- DEDE. (2017). *Solar PV Rooftop, the roof top solar cell system*. เข้าถึงได้จาก Department of Alternative Energy Development and Efficiency: <http://weben.dede.go.th/webmax/content/solar-pv-rooftop-roof-top-solar-cell-system>
- Eddy Krygiel, และ Brad Nies. (2008). *Green BIM: Successful Sustainable Design with Building Information Modeling*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Electricity Generating Authority of Thailand. (2014). *ความต้องการไฟฟ้าสูงสุด*. เข้าถึงได้จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย: http://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=348&Itemid=116
- Emrah Biyik, Mustafa Araz, Arif Hepbasli, Mehdi Shahrestani, Runming Yao, Li Shao, . . . Yusuf Baver Atli. (2017). A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems. *Engineering Science and Technology*, 20, 833-858. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2017.01.009>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Energy News Center. (3 พฤศจิกายน 2016). *พลังงานเสนอตั้งบตรงให้หน่วยงานรัฐติดตั้งโซลาร์รูฟที่อปลดค่าไฟ*. เข้าถึงได้จาก Energy News Center: ศูนย์ข่าวพลังงาน:
<http://energynewscenter.com/index.php/news/detail/418>
- EPPO. (2015). *Energy Statistics*. เข้าถึงได้จาก Energy Policy and Planning Office (EPPO):
http://www.eppo.go.th/info/1summary_stat.htm
- Francesco Frontini, Salim M. Bouziri, Gianluca Corbellini, และ Vasco Medici. (June 2016). S.M.O Solution: An Innovative Design Approach to Optimize the Output of BIPV Systems Located in Dense Urban Environments. *Energy Procedia*, 91, 945-953. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.261>
- Giorgio Agugiaro. (2016). Energy planning tools and CityGML-based 3D virtual city models: experiences from Trento (italy). *Applied Geomatics*, Volume 8, Issue 1, 41-56. doi:DOI 10.1007/s12518-015-0163-2
- Gray Matthew, Gray Jason, Teo Melissa, Chi Seokho, และ Cheung Yan Ki Fiona. (2013). Building Information Modelling : an international survey. *Building Information Modelling : an international survey. In World Building Congress 2013, 5-9 May 2013*. Brisbane, QLD: Queensland University of Technology.
- Gui Ning, Li Junnan, Dong Yansong, Qiu Zhifeng, Jia Qingshan, Gui Weihua, และ Deconinck Geert. (2017). BIM-based PV system optimization and deployment. *Energy and Buildings*, 150, 13-22.
 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.082>
- Hang-Jung Kuo, Shang-Hsien Hsieh, Rong-Chin Guo, และ Chi-Chang Chan. (2016). A verification study for energy analysis of BIPV buildings with BIM. *Energy and Buildings*, 130, 676-691. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.048>
- Holly Zeil. (4 August 2017). *Sun*. เข้าถึงได้จาก NASA:
https://www.nasa.gov/mission_pages/sdo/science/solar-irradiance.html
- IPCC. (2007). Summary for Policymakers. ใน S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, . . . H. L. Miller, *Climate Change 2007: The Physical Science Base* (หน้า Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernment Panel on Climate Change). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- J. A. Clarke, และ J. L.M. Hensen. (2015). Integrated building performance simulation: Progress, prospects, and requirements. *Building and Environment*, 91, 294-306.
 doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.002>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- J. W. Hand, D. B. Crawley, M. Donn, และ L. K. Lawrie. (2005). Improving the data available to simulation programs. *Proceedings of Building Simulation 2005* (หน้า 373-380). Montreal, Canada: International Building Performance Simulation Association (IBPSA).
- James O'Donnell, Richard See, Cody Rose, Tobias Maile, Vladimir Bazjanac, และ Phil Haves. (2011). Simmodel: A domain data model for whole building energy simulation. *SimBuild 2011*. Sydney, Australia: International Building Performance Simulation Association (IBPSA).
- Jong-HO Yoon, Jonghwa Song, และ Sung-Jin Lee. (May 2011). Practical application of building integrated photovoltaic (BIPV) system using transparent amorphous silicon thin-film PV module. *Solar Energy*, 85(5), 723-733.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.026>
- Jouri Kanters. (2015). *Planning for solar buildings in urban environments: An analysis of the design process, methods and tools*. LUND, Sweden: Lund University.
เข้าถึงได้จาก http://www.ebd.lth.se/fileadmin/energi_byggnadsdesign/Dokt-avhandling_Jouri_webb.pdf
- Jouri Kanters, และ Maria Wall. (2014). The impact of urban design decisions on net zero energy solar buildings in Sweden. *Urban, Planning and Transport Research*, 2(1), 312-332. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/21650020.2014.939297>
- King-hang Lam, J. Close, และ Lo E.W.C. (2006). Dynamic model of BIPV system for performance prediction. *Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference* (หน้า 2434-2437). Waikoloa, Hawaii: IEEE. doi:10.1109/WCPEC.2006.279701
- Kristoffer Negendahl. (2015). Building performance simulation in the early design stage: An introduction to integrated dynamic models. *Automation in Construction*, 54, 39-53. doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.002>
- Luis Fernando Mulcué-Nieto, และ Llanos Mora-López. (2015). Methodology to establish the permitted maximum losses due to shading and orientation in photovoltaic applications in buildings. *Applied Energy*, 137, 37-45.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.088>
- M. Tripathy, S. Yadav, P.K. Sadhu, และ S.K. Panda. (April 2017). 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>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Mohamed A. Eltawil, และ Zhengming Zhao. (January 2010). Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 112-129.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.015>
- N. Alam, V. Coors, S. Zlatanova, และ P.J. Oosterom. (2012). Shadow effect on photovoltaic potentiality analysis using 3D city models. *XXII ISPRS Congress* (หน้า 209-214). Melbourne, Australia: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. เข้าถึงได้จาก <http://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:23fa329e-d6db-46ef-a08d-8a7ea06dde4a?collection=research>
- Nipon Ketjoy. (5 June 2012). The solar power market development in Thailand. Bangkok, Thailand. เข้าถึงได้จาก http://www.thai-german-cooperation.info/download/renewable_2012_06_05_01_pvdev.pdf
- Nuri Gökmen, Weihao Hu, Peng Hou, Zhe Chen, Dezso Sera, และ Sergiu Spataru. (May 2016). Investigation of wind speed cooling effect on PV panels in windy locations. *Renewable Energy*, 90, 283-290.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.017>
- Nuttasit Somboonwit. (2011). Modeling for building energy performance improvement in accordance with the local climatic settings: A case of a generalizable building design of intermediate health care facilities in Thailand. *Proceedings of Building Simulation 2011* (หน้า 1623-1630). Sydney, Australia: International Building Performance Simulation Association (IBPSA).
- Nuttasit Somboonwit, Amon Boontore, และ Yanin Rugwongwan. (2017). Obstacles to the Automation of Building Performance Simulation: Adaptive Building Integrated Photovoltaic Design. *5th AicQoI2017*. 2, หน้า 343-354. Bangkok, Thailand: E-BPJ. doi: <http://dx.doi.org/10.21834/e-bpj.v2i5.619>
- Nuttasit Somboonwit, และ Nopadon Sahachaisaeree. (2012). Healthcare Building: Modelling the impacts of local factors for building energy performance improvement in Thailand. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 50, 549-562. doi:[10.1016/j.sbspro.2012.08.058](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.08.058)
- Paoyuan Lin, Kok Chin Chai, และ Herchang Ay. (2017). An economic solution to optimize performance of photovoltaic modules under partial shading. *2017 International Conference on Mechanical, Aeronautical and Automotive Engineering (ICMAA 2017)*. Malacca, Malaysia: MATEC Web of Conferences. doi:<https://doi.org/10.1051/matecconf/201710814007>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Rebecca Jing Yang. (2015). Overcoming technical barriers and risks in the application of building integrated photovoltaic (BIPV): hardware and software strategies. *Automation in Construction*, 92-102.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.12.005>
- Richard A. Muller. (2012). *Energy for future presidents: the science behind the headlines*. New York: W. W. Norton & Company, Inc.
- Robert E. Blankenship, David M. Tiede, James Barber, Gary W. Brudvig, Graham Fleming, Maria Ghirardi, . . . Richard T. Sayre. (2011). Comparing Photosynthetic and Photovoltaic Efficiencies and Recognizing the Potential for Improvement. *Science*, 805-809.
- Robert J. Hitchcock, และ Justin Wong. (2011). Transforming IFC architectural view BIMs for energy simulation: 2011. *Proceedings of Building Simulation 2011* (หน้า 1089-1095). Sydney, Australia: International Building Performance Simulation Association.
- Rustu Eke, และ Cihan Demircan. (2015). Shading effect on the energy rating of two identical PV systems on a building facade. *Solar Energy*, 122, 48-57.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.08.022>
- Sarah Hall. (8 September 2014). *Benefits of building integrated photovoltaics*. เรียกใช้เมื่อ 26 July 2015 จาก Design Quarterly:
<https://www.reminetwork.com/articles/benefits-of-building-integrated-photovoltaics/>
- Seung-Ho Yoo. (2011). Simulation for an optimal application of BIPV through parameter variation. *Solar Energy*, 85, 1291-1301.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.03.004>
- Sinovoltaics. (21 October 2014). *Difference Solar Radiation and Solar Insolation Explained*. เข้าถึงได้จาก Sinovoltaics: <http://sinovoltaics.com/learning-center/basics/solar-radiation-solar-insolation/>
- Steven Strong. (27 December 2011). *Building Integrated Photovoltaic (BIPV)*. เรียกใช้เมื่อ 25 July 2015 จาก Whole Building Design Guide:
<http://www.wbdg.org/resources/bipv.php>
- Taehoon Hong, Minhyun Lee, Choongwan Koo, Kwangbok Jeong, และ Jimin Kim. (15 May 2017). 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>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- U.S. Energy Information Administration. (2015). *How much carbon dioxide is produced per kilowatt-hour when generating electricity with fossil fuel?* เข้าถึงได้จาก Frequently Asked Questions:
<http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=74&t=11>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2015). *Greenhouse Gas Equivalencies Calculator*. เข้าถึงได้จาก Energy and the Environment:
<http://www2.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>
- Vladimir Bazjanac, Tobias Maile, Cody Rose, James T. O'Donnell, Natasa Mrazovic, Elmer Morrissey, และ Benjamin R. Welle. (2011). An assessment of the use of Building Energy Performance Simulation in early design. *Proceedings of Building Simulation 2011* (หน้า 1579-1585). Sydney: International Building Performance Simulation Association.
- Voranop Yungchareon, และ Bundit Limmeechokchai. (2004). Energy analysis of the commercial sector in Thailand: Potential saving of selected options in commercial buildings. *The Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment (SEE)"* (หน้า 496-501). Hau Hin: Sustainable Energy and Environment (SEE).
- Willem Kymmell. (2008). *Building Information Modeling: Planning and Managing Construction Projects with 4D CAD and Simulations*. New York: McGraw-Hill.
- Yang Ting Shen, และ Pei Wen Lu. (2016). The development of kinetic facade units with BIM-based active control system for the adaptive building energy performance service. *International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA 2016* (หน้า 517-526). Hong Kong: The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA).
- ไทยรัฐ. (13 พฤษภาคม 2017). *ธพส. จับมือ กฟน. เปิดตัวโซลาร์เซลล์กว่า 7 พันแผง ขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศไทย*. เข้าถึงได้จาก ไทยรัฐ: <https://www.thairath.co.th/content/939008>
- กรมบัญชีกลาง. (26 กันยายน 2559). *ข่าวกรมบัญชีกลาง ฉบับที่ 55/2559*. เข้าถึงได้จาก กรมบัญชีกลาง: http://www.mof.go.th/home/pr/cgd_25-09-59_2.pdf
- กรมประชาสัมพันธ์. (16 มิถุนายน 2015). *ประเด็นที่ 10 กระทรวงพลังงาน*. เข้าถึงได้จาก ข้อมูลประชาสัมพันธ์ เพื่อขยายผลประเด็นข่าวตามนโยบาย ศูนย์ IOC-PRD:
<http://region1.prd.go.th>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2015). *สัดส่วนการใช้พลังงานทดแทน*. เข้าถึงได้จาก กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน:
http://www4.dede.go.th/dede/images/stories/stat_dede/sit_58/energy5_58_1.xls
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2017). *ทำเนียบผู้ชนะการประกวด*. เข้าถึงได้จาก Thailand Energy Awards:
http://www.thailandenergyaward.com/Site/hall_of_fame.php?HOF=2010
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (n.d.). *แผนที่พลังงานแสงอาทิตย์*. เรียกใช้เมื่อ 25 มิถุนายน พ.ศ.2558 จาก กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน:
<http://www2.dede.go.th/dede/renew/sola/mapmenu.html>
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (n.d.). *ชุดการจัดแสดงที่ 54 : การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Living Head/Photovoltaic Operation)*. เข้าถึงได้จาก กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน:
[http://www2.dede.go.th/bhrd/old/web_display/websemple/Residential\(PDF\)/7_Bay%2054%20Solar%20cell_Rev1.pdf](http://www2.dede.go.th/bhrd/old/web_display/websemple/Residential(PDF)/7_Bay%2054%20Solar%20cell_Rev1.pdf)
- กองแบบแผน. (2547). การกำหนดมาตรฐานพื้นที่ใช้สอยของโรงพยาบาลชุมชนขนาด 30 เตียง. ใน โชคชัย ภาสุรวณิช, วิชรี วิวิสวัสดิ์, สรพงษ์ ทัทภวิมล, ณัฐสิทธิ์ สมบูรณ์วิทย์, วัลลียา ว่องวุฒิวงศ์, และ วัฒนา สุธีรนาถ, *การกำหนดมาตรฐานพื้นที่ใช้สอยของโรงพยาบาลชุมชนขนาด 30 เตียง* (หน้า 477). นนทบุรี: กองแบบแผน กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ กระทรวงสาธารณสุข.
- กองแบบแผน. (2558). *คู่มือการออกแบบสถานบริการสุขภาพและสภาพแวดล้อม ฉบับทั่วไป*. นนทบุรี: กองแบบแผน กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ กระทรวงสาธารณสุข.
- กองแบบแผน. (2560). *วิสัยทัศน์/พันธกิจ*. เข้าถึงได้จาก กองแบบแผน:
<http://dcd.hss.moph.go.th/web/index.php/about/vision>
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (21 July 2017). *โซลาร์รูฟท็อป กับการเปลี่ยนแปลงในธุรกิจไฟฟ้า*. เข้าถึงได้จาก การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย:
https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=2059&catid=49&Itemid=251
- คณะกรรมการการพลังงาน สถานิติบัญญัติแห่งชาติ. (25 พฤษภาคม 2017). *กมธ. การพลังงาน สนช. ประชุมพิจารณาการส่งเสริมและสนับสนุนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาที่ปกอาศัย (Solar Roof Top)*. เข้าถึงได้จาก สถานิติบัญญัติแห่งชาติ:
<http://click.senate.go.th/?p=40001>
- คณะกรรมการจัดทำแผนแม่บทด้านอาคารและสภาพแวดล้อม. (2559). *การจัดทำแผนแม่บทด้านอาคารและสภาพแวดล้อม โรงพยาบาลปาย*. นนทบุรี ประเทศไทย: กองแบบแผน กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ กระทรวงสาธารณสุข.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- จุฬารัตน์ จำปีรัตน์. (2558). การศึกษาความเป็นไปได้ทางการเงินของโครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา (Solar PV Rooftop) สำหรับบ้านพักอาศัยทั่วไป ในพื้นที่อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน. กรุงเทพมหานคร: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชาย ชีวะเกตุ. (กรกฎาคม 2543). การผลิตไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์. เรียกใช้เมื่อ 1 มีนาคม 2015 จาก สำนักนโยบายและแผนพลังงาน: <http://www.eppo.go.th/vrs/VRS49-09-Solar.html>
- ณัฐสิทธิ์ สมบูรณ์วิทย์. (2552). การศึกษาเพื่อตรวจวัดและปรับปรุงสมรรถนะด้านพลังงาน จากแบบจำลองสารสนเทศของสถานบริการสุขภาพระดับทุติยภูมิ (ระดับกลาง). นนทบุรี ประเทศไทย: กองแบบแผน กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ กระทรวงสาธารณสุข.
- มณฑาสินี หอมหวาน. (2555). พลังงานทดแทน พลังงานทางเลือกใหม่สำหรับอนาคต. เข้าถึงได้จาก Bangkok University: http://www.bu.ac.th/knowledgecenter/executive_journal/jan_mar_12/pdf/aw014.pdf
- วรรณโชค ไชยสะอาด. (17 พฤศจิกายน 2016). ยลโฉมหลังคา "โซลาร์รูฟ" ธรรมชาติ เพิ่มพลังงานสะอาด 40%. เข้าถึงได้จาก โพสต์ทูเดย์: <https://www.posttoday.com/analysis/report/465917>
- วิชัย เทียบประชา. (1993). การจัดการพลังงานในโรงพยาบาลของรัฐ. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ศูนย์วิจัยกสิกรไทย. (22 มีนาคม 2016). การเปิดเสรีโซลาร์รูฟท็อปนำร่อง. เข้าถึงได้จาก ทันฮูน: <https://www.thunhoon.com/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%80%E0%B8%9B%E0%B8%B4%E0%B8%94%E0%B9%80%E0%B8%AA%E0%B8%A3%E0%B8%B5%E0%B9%82%E0%B8%8B%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%8C%E0%B8%A3%E0%B8%B9%E0%B8%9F%E0%B8%97%E0%B9%87/>
- สำนักงานอนามัยสิ่งแวดล้อม. (2559). แนวทางการดำเนินงาน GREEN & CLEAN Hospital. นนทบุรี: สำนักงานอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข.
- สำนักบริหารการสาธารณสุข สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข. (23 กุมภาพันธ์ 2559). แผนพัฒนาระบบบริการสุขภาพ (Service Plan) พ.ศ. 2560 - 2564. เข้าถึงได้จาก เขตสุขภาพที่ 5: http://region5.moph.go.th/docs/ServicePlan2561-2565_19apr59.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

- ภาคผนวก ก ผลลัพธ์ Solar Insolation จากการสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคารแบบอัตโนมัติ
- ภาคผนวก ข รายละเอียดค่าความชันกราฟของทั้ง 8 Obstacle's Orientation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลลัพธ์ Solar Insolation จากการสร้างสถานการณ์จำลองสมรรถนะอาคารแบบอัตโนมัติ

Distance (m)	0 ° CW (kWh)	45 ° CW (kWh)	90 ° CW (kWh)	135 ° CW (kWh)	180 ° CW (kWh)	225 ° CW (kWh)	270 ° CW (kWh)	315 ° CW (kWh)
6	893,937	884,637	854,723	857,213	881,863	854,965	850,526	883,266
7	894,615	886,955	859,743	862,680	886,524	860,655	855,919	885,765
8	895,249	889,031	864,541	867,832	890,128	866,069	861,096	887,957
9	895,782	890,834	868,668	872,153	892,730	870,874	865,575	889,799
10	896,293	892,438	872,458	875,896	894,354	874,920	869,729	891,398
11	896,726	893,719	875,602	879,221	895,229	878,368	873,197	892,957
12	897,150	894,986	878,827	882,524	896,073	881,803	876,610	894,065
13	897,509	895,980	881,362	884,757	896,741	884,212	879,454	895,199
14	897,860	896,988	883,841	887,178	897,345	886,800	882,097	896,150
15	898,185	897,817	886,107	889,173	897,781	888,810	884,613	897,087
16	898,478	898,605	888,254	891,126	898,168	890,866	886,912	897,856
17	898,742	899,243	889,972	892,624	898,547	892,476	888,751	898,547
18	898,978	899,828	891,469	893,852	898,802	893,835	890,327	899,128
19	899,229	900,457	893,036	895,039	899,060	895,145	892,053	899,738
20	899,437	900,896	894,331	896,202	899,270	896,366	893,476	900,244
21	899,646	901,327	895,579	897,192	899,482	897,403	894,909	900,699
22	899,826	901,728	896,604	897,995	899,662	898,258	895,978	901,145
23	900,002	902,087	897,590	898,719	899,838	899,024	897,033	901,505
24	900,168	902,497	898,514	899,310	900,004	899,686	897,979	901,858
25	900,340	902,817	899,455	900,040	900,176	900,427	898,947	902,183
26	900,486	903,096	900,239	900,554	900,322	900,982	899,825	902,460
27	900,627	903,360	900,934	901,085	900,463	901,549	900,587	902,745
28	900,763	903,617	901,640	901,490	900,599	901,949	901,335	903,007
29	900,880	903,847	902,140	901,864	900,716	902,317	901,873	903,249
30	900,990	904,042	902,712	902,215	900,826	902,653	902,461	903,476
31	901,101	904,280	903,227	902,601	900,937	903,028	903,029	903,699
32	901,214	904,454	903,771	902,928	901,050	903,347	903,602	903,888
33	901,312	904,635	904,199	903,215	901,148	903,639	904,049	904,051
34	901,397	904,773	904,569	903,440	901,233	903,868	904,450	904,193
35	901,479	904,917	904,919	903,671	901,315	904,138	904,830	904,327
36	901,564	905,064	905,260	903,855	901,401	904,356	905,188	904,460
37	901,630	905,156	905,511	904,013	901,467	904,513	905,453	904,558
38	901,714	905,313	905,841	904,162	901,550	904,674	905,769	904,679
39	901,772	905,397	906,050	904,316	901,608	904,806	905,997	904,774
40	901,847	905,534	906,347	904,490	901,681	904,980	906,291	904,895
41	901,897	905,607	906,527	904,617	901,733	905,080	906,501	904,982
42	901,965	905,706	906,796	904,774	901,801	905,237	906,774	905,073
43	902,020	905,804	907,000	904,885	901,857	905,343	906,976	905,165

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Distance (m)	0 ° CW (kWh)	45 ° CW (kWh)	90 ° CW (kWh)	135 ° CW (kWh)	180 ° CW (kWh)	225 ° CW (kWh)	270 ° CW (kWh)	315 ° CW (kWh)
44	902,071	905,873	907,188	905,039	901,908	905,453	907,173	905,238
45	902,125	905,956	907,372	905,170	901,961	905,568	907,392	905,337
46	902,176	906,022	907,562	905,287	902,012	905,679	907,603	905,408
47	902,222	906,090	907,708	905,370	902,058	905,778	907,756	905,408
48	902,273	906,161	907,856	905,454	902,109	905,860	907,937	905,551



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

รายละเอียดค่าความชันกราฟของทั้ง 8 Obstacle's Orientation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียด Slope ของทั้ง 8 Orientations

Distance (m)	slope 0	slope 45	slope 90	slope 135	slope 180	slope 225	slope 270	slope 315
6								
7	678	2,318	5,020	5,467	4,661	5,690	5,393	2,499
8	634	2,076	4,798	5,152	3,604	5,414	5,177	2,192
9	533	1,803	4,127	4,321	2,602	4,805	4,479	1,842
10	511	1,604	3,790	3,743	1,624	4,046	4,154	1,599
11	433	1,281	3,144	3,325	875	3,448	3,468	1,559
12	424	1,267	3,225	3,303	844	3,435	3,413	1,108
13	359	994	2,535	2,233	668	2,409	2,844	1,134
14	351	1,008	2,479	2,421	604	2,588	2,643	951
15	325	829	2,266	1,995	436	2,010	2,516	937
16	293	788	2,147	1,953	387	2,056	2,299	769
17	264	638	1,718	1,498	379	1,610	1,839	691
18	236	585	1,497	1,228	255	1,359	1,576	581
19	251	629	1,567	1,187	258	1,310	1,726	610
20	208	439	1,295	1,163	210	1,221	1,423	506
21	209	431	1,248	990	212	1,037	1,433	455
22	180	401	1,025	803	180	855	1,069	446
23	176	359	986	724	176	766	1,055	360
24	166	410	924	591	166	662	946	353
25	172	320	941	730	172	741	968	325
26	146	279	784	514	146	555	878	277
27	141	264	695	531	141	567	762	285
28	136	257	706	405	136	400	748	262
29	117	230	500	374	117	368	538	242
30	110	195	572	351	110	336	588	227
31	111	238	515	386	111	375	568	223
32	113	174	544	327	113	319	573	189
33	98	181	428	287	98	292	447	163
34	85	138	370	225	85	229	401	142
35	82	144	350	231	82	270	380	134
36	85	147	341	184	86	218	358	133
37	66	92	251	158	66	157	265	98
38	84	157	330	149	83	161	316	121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Distance (m)	slope 0	slope 45	slope 90	slope 135	slope 180	slope 225	slope 270	slope 315
39	58	84	209	154	58	132	228	95
40	75	137	297	174	73	174	294	121
41	50	73	180	127	52	100	210	87
42	68	99	269	157	68	157	273	91
43	55	98	204	111	56	106	202	92
44	51	69	188	154	51	110	197	73
45	54	83	184	131	53	115	219	99
46	51	66	190	117	51	111	211	71
47	46	68	146	83	46	99	153	0
48	51	71	148	84	51	82	181	143



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นายณัฐสิทธิ์ สมบูรณ์วิทย์
 การติดต่อ อีเมลล์ nuttasit.somboonwit@gmail.com

ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญาโท วท.ม. (การจัดการสารสนเทศสิ่งแวดล้อม)
 มหาวิทยาลัยมหิดล พ.ศ. 2549
 ระดับปริญญาตรี สท.บ. (สถาปัตยกรรม)
 มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2539

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2540 – ปัจจุบัน สถาปนิก
 กองแบบแผน กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ
 กระทรวงสาธารณสุข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้