



แนวทางการออกแบบอาคารโรงพยาบาลภาครัฐ
ผสานเซลล์แสงอาทิตย์

กองแบบแผน กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ 2559

บทที่ 1

การออกแบบอาคารผสานเซลล์แสงอาทิตย์ (Building Integrated Photovoltaic: BIPV)

1.1 พลังงานแสงอาทิตย์และเซลล์แสงอาทิตย์

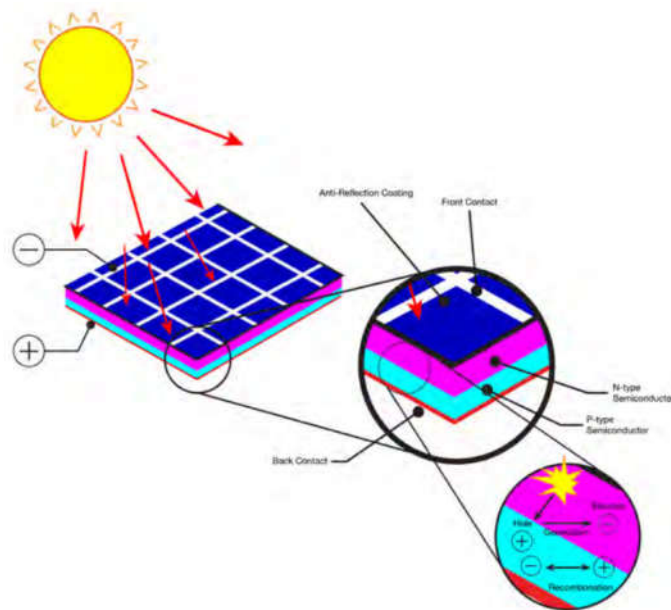
พลังงานแสงอาทิตย์นั้นนับเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ล้นเหลือที่สุด ไม่ลดน้อยลง และเป็นพลังงานสะอาด (Parida, Iniyar, และ Goic, 2011) พลังงานที่ส่งมาจากดวงอาทิตย์ตกกระทบผิวเปลือกโลกนั้นมีปริมาณเฉลี่ยสูงถึง 90,000 - 120,000 terawatts ซึ่งเป็นปริมาณที่มากกว่าความต้องการใช้พลังงานของทั้งโลกถึงมากกว่า 7,000 เท่า (Blankenship, และคนอื่นๆ, 2011; Botkin และ Keller, 2011) ประเทศไทยเป็นประเทศที่ตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรและมีศักยภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากรังสีดวงอาทิตย์สูง โดยพบว่าประเทศไทยมีระดับของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปีสูงถึง 18.2 MJ/ตารางเมตร-วัน หรือ 4-5 kW/ชั่วโมง/ตารางเมตร (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, n.d.; ชีวะเกตุ, 2000) และมีระดับของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดเฉลี่ยระหว่างเดือน เมษายน - พฤษภาคม สูงถึง 20 - 24 MJ/ตารางเมตร-วัน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, n.d.) พลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ดังกล่าวสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ รวมถึงการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic)

1.2 เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic)

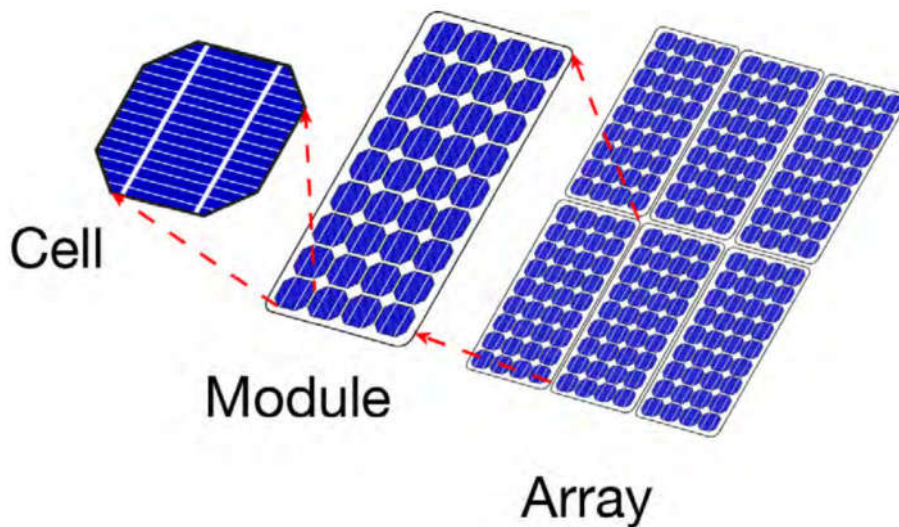
เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) คืออุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนรังสีดวงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current: DC) ได้โดยตรง อุปกรณ์ดังกล่าวผลิตขึ้นมาจาก สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น Silicon เป็นต้น โดยมีหลักการทำงานคือ เมื่อมีรังสีดวงอาทิตย์มากระทบกับเซลล์แสงอาทิตย์ จะส่งผลให้เกิดกระบวนการสองขั้นตอนที่ต่อเนื่องกัน ดังที่แสดงไว้ใน รูปที่ 1 คือ *กระบวนการดูดซับรังสี* โดยวัสดุที่เป็น Semiconductor จะดูดซับพลังงานจากรังสีอาทิตย์ ทั้งที่เป็นแสง และรังสีที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น Infrared ไว้ และ *กระบวนการกระจายพลังงาน* ที่ดูดซับไว้กระตุ้นให้ Electron ในสาร Semiconductor หลุดออกจากวงโคจรและเคลื่อนที่อย่างอิสระ การเคลื่อนที่หรือการไหลของ Electron นั้นก็คือการไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อนำหน้าสัมผัสที่เป็นโลหะติดตั้งที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ จะสามารถนำกระแสไฟฟ้ามาใช้งานได้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, n.d.; Lau, 2015) เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นแหล่งพลังงานที่มีการเติบโตสูงที่สุดในโลก โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังการผลิตพลังงานประมาณ 35% ต่อปี นอกจากนั้นเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วอีกด้วย จากประสิทธิภาพการสร้างพลังงานจากรังสีอาทิตย์ 1-2% ของเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีทั่วไปขายในท้องตลาดเมื่อสอง-สามทศวรรษที่ผ่านมา พัฒนาเป็นถึงเกือบ 20% ในปัจจุบัน (Botkin และ Keller, 2011)

การสร้างพลังงานไฟฟ้าจากรังสีดวงอาทิตย์ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมียังมีองค์ประกอบหลายอย่าง ได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ การเชื่อมต่อทางเครื่องกลและระบบไฟฟ้า อุปกรณ์/รางยึด รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมกระแสไฟฟ้าที่เป็นผลผลิตของระบบ (Parida, Iniyar, และ Goic, 2011) ขนาดของกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบ PV คือ kWp (Kilowatt Peak) ซึ่งหมายถึง กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak Power) ที่คาดว่าจะได้รับจากระบบ PV เมื่อดวงอาทิตย์อยู่ในตำแหน่งตั้งฉากตรงกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส กำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นสัมพันธ์ถึง ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้รับจริง/ค่ากำลังเฉลี่ย (Nominal Power) อันเป็นข้อมูลมาตรฐานที่ผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ระบุไว้บนผลิตภัณฑ์ (Nameplate Capacity) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เป็นค่าที่

ได้รับในการตรวจวัดที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เป็นอุดมคติ ยากที่จะเป็นจริง ในความเป็นจริง กำลังไฟฟ้าที่ได้รับจากระบบ PV นั้นจะมีค่าน้อยกว่าที่ถูกระบุไว้ประมาณ 15-20 % (Solar-is-Future.com, 2016)



รูปที่ 1 กระบวนการสร้างพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (Lau, 2015)



รูปที่ 2 หน่วยย่อยของเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบกันจนเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Lau, 2015)

1.3 วัสดุเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Materials)

เซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถเปลี่ยนรังสีดวงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ต่อเมื่อมีรังสีดวงอาทิตย์มากระทบกับ วัสดุดูดซับแสง (Light Absorbing Materials) (Parida, Iniyana, และ Goic, 2011) ที่ถูกติดตั้งอยู่ในเซลล์แสงอาทิตย์ อันได้แก่

- **ซิลิคอนรูปผลึก (Crystallized Silicon) ซึ่งมีทั้งชนิดผลึกเดี่ยว(Single Crystalline Silicon / Monocrystalline Silicon: mono-Si) ที่มีความบริสุทธิ์สูง และมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแสงอาทิตย์ ให้เป็นไฟฟ้าได้ประมาณ 15-20% และถือว่าเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่สูง (Space Efficient) โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้สามารถผลิตไฟฟ้ามากเป็นสี่เท่าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบแผ่นบาง (Thin Film Solar Panels) เซลล์แสงอาทิตย์ mono-Si นี้มีอายุการใช้งานและคงประสิทธิภาพยาวนาน นอกจากนั้นยังมีประสิทธิภาพในสถานที่ที่มีอากาศร้อนและสภาพแสงน้อยที่ดีอีกด้วย แต่ราคาเซลล์แสงอาทิตย์แบบนี้มีราคาแพง เนื่องจาก Crystalline Silicon เป็นส่วนประกอบสำคัญของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จึงมีคุณค่าเพิ่ม (Value Added) ที่สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนั้นกรรมวิธีในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จาก Crystalline Silicon ที่จะต้องนำมาเลื่อยให้เป็นแผ่น (Wafer) บางๆ จึงทำให้เกิดการสูญเสีย ในลักษณะขี้เลื่อยไปไม่น้อยกว่าครึ่ง ในการติดตั้งเพื่อใช้งานควรระมัดระวังไม่ให้ส่วนใดส่วนหนึ่งของแผ่น (Panel) โดนบังแสง (partially covered with shade) เพราะอาจทำให้ระบบเสียหายได้ (ชีวะเกตุ, 2000; Parida, Iniyana, & Goic, 2011; Maehlum, Which Solar Panel Type is Best? Mono- vs. Polycrystalline vs. Thin Film, 2015)**

ข้อดี ประสิทธิภาพสูง (15-20%) ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่สูง ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าต่อสภาพแสงน้อยสูงเหมาะในการใช้งานในภูมิอากาศร้อนอายุการใช้งานยาวนาน (25-30 ปี)

ข้อเสีย แพง สูญเสียวัสดุเป็นขยะมาก ต้องระมัดระวังในการติดตั้งและการดูแลรักษา
- **ซิลิคอนผลึกรวม (Polycrystalline Silicon: p-Si / Multi-crystalline Silicon: mc-Si) ซึ่งมีวิธีการผลิตด้วยการเทซิลิคอนหลอมเหลวลงสู่แม่พิมพ์ ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมที่สมบูรณ์ ไม่มีเศษซิลิคอนให้เหลือทิ้งเป็นขยะ ส่งผลให้มีราคาที่ถูกลงกว่าประเภท mono-Si แต่เซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/mc-Si นี้มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าที่น้อยกว่า คือ 13-17% เนื่องจากเซลล์มีความบริสุทธิ์ของซิลิคอนที่น้อยกว่า ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่นั้นต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si อีกด้วย (Khan, 2014; Maehlum, Which Solar Panel Type is Best? Mono- vs. Polycrystalline vs. Thin Film, 2015)**

ข้อดี ราคาถูกลงกว่า mono-Si ได้รับความนิยมสูง หาซื้อง่าย สูญเสียวัสดุเป็นขยะน้อย

ข้อเสีย ประสิทธิภาพต่ำกว่า mono-Si (13-17%) ประสิทธิภาพลดลงเมื่อติดตั้งในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง
- **ซิลิคอนที่ไม่เป็นผลึก(Amorphous silicon: a-Si) ซึ่งเป็นประเภทรอง (subcategory) ของเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์แบบแผ่นบาง (Thin-film) ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด โดยมีประสิทธิภาพ 5-7% และประสิทธิภาพเพิ่มเป็น 8-10% ในประเภท Double และ Triple Junction หรือเรียกว่า Stacking โดย Amorphous Silicon นี้สามารถเคลือบลงแผ่นกระจกหรือแผ่นโลหะ ทำให้ตัดโค้งงอในส่วนที่เป็นวัสดุอาคารได้ แต่วัสดุซับแสงชนิดนี้มีจุดด้อยที่สำคัญคือมีการเสื่อมสภาพที่เร็วกว่า Crystalline Silicon (ชีวะเกตุ, 2000; Parida, Iniyana, และ Goic, 2011) เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้ใช้ซิลิคอนปริมาณเพียง 1% ที่ใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบอื่น แต่การ Stacking นั้นมีต้นทุนการผลิตสูง (Maehlum, Which Solar Panel Type is Best? Mono- vs. Polycrystalline vs. Thin Film, 2015)**

ข้อดี และ ข้อเสีย ดูใน *เซลล์แสงอาทิตย์แผ่นบาง (Thin Film Photovoltaic Cells: TFPV)*

■ **Cadmium Telluride (CdTe) และ Cadmium Sulphide (CdS)**

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe/CdS นั้นเป็นประเภทรอง (Subcategory) ของเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์แบบแผ่นบาง (Thin-film) มีความสามารถสูงมากในการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์และปล่อยอิเล็กตรอน ด้วยความหนาของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้เพียง 3 ไมครอน นั้นมีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงถึง 15% หรือมากกว่า (Muller R' A', 2012; Clover, First Solar raises bas for CdTe with 21.5% efficiency record, 2015) และมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าปกติที่ 9-11% (Khan, 2014)

ข้อดี และ ข้อเสีย ดูใน *เซลล์แสงอาทิตย์แผ่นบาง (Thin Film Photovoltaic Cells: TFPV)*

■ **Copper Indium Gallium Selenide (CIGS/CIS)**

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIGS/CIS นั้นเป็นประเภทรอง (Subcategory) ของเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์แบบแผ่นบาง (Thin-film) อีกหนึ่งประเภทที่มีวัสดุชั้นแสงเป็นสารประกอบของ Copper, Indium, Gallium และ Selenide ฉาบลงบนวัสดุแผ่นเรียบเช่น พลาสติกหรือกระจก ที่ประกอบด้วย Anode และ Cathode (Electrodes) ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIGS/CIS นี้มีประสิทธิภาพเฉลี่ยที่ 11-14%

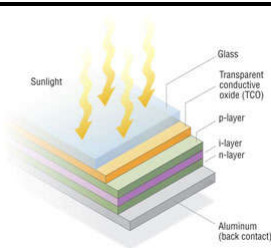
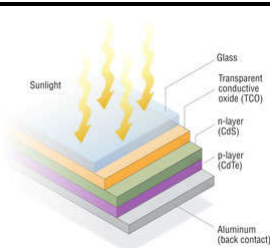
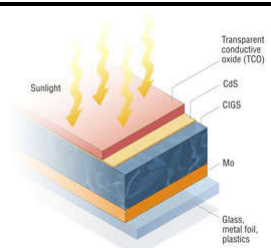
ข้อดี และ ข้อเสีย ดูใน *เซลล์แสงอาทิตย์แผ่นบาง (Thin Film Photovoltaic Cells: TFPV)*

■ **เซลล์แสงอาทิตย์แผ่นบาง (Thin Film Photovoltaic Cells: TFPV)**

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้เป็นการผสมผสานชั้นบางๆ ของวัสดุชั้นแสงจำนวนอย่างน้อยหนึ่งชั้นหรือมากกว่าบนพื้นผิว (Substrate) ต่างๆ โดยวัสดุชั้นแสงที่ใช้ผลิต TFPV นั้นได้แก่ Amorphous silicon (a-Si), Cadmium Telluride / Cadmium Sulphide (CdTe/CdS) และ Copper Indium Gallium Selenide (CIGS/CIS) โดยมีรายละเอียดด้านเทคนิค และการเปรียบเทียบข้อดี/ข้อเสีย ดังรายละเอียดใน **ตารางที่ 1**

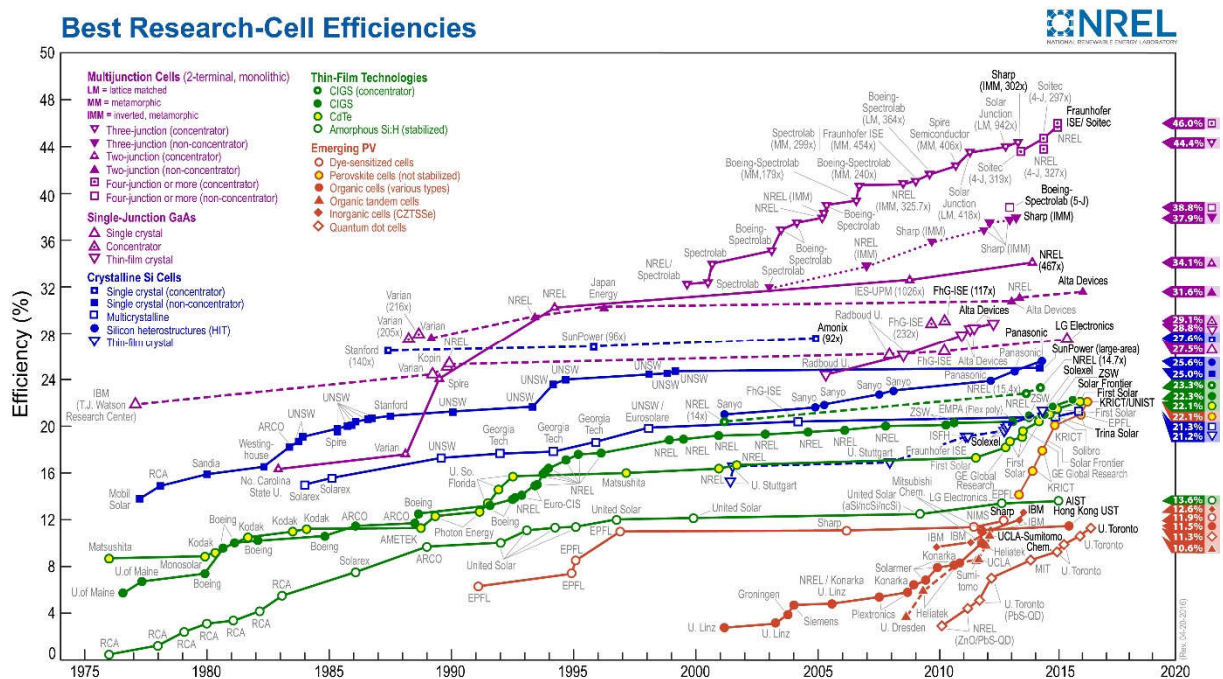
ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติวัสดุชั้นแสงในเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์แผ่นบาง

(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	8.1%	14.4%	14.5%

คุณสมบัติ	a-Si	CdTe/CdS	CIGS/CIS
(ในการใช้งานจริง)			
ส่วนแบ่งการตลาด	32%	43%	25%
ข้อดี	เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนามานาน เจริญเต็มที่ เหมาะสมในการใช้งานกับอุปกรณ์ขนาดเล็ก	ต้นทุนการผลิตต่ำ	ประสิทธิภาพสูง เหมาะสมในการใช้งานร่วมกับพื้นผิวกระจกและวัสดุอาคารที่ติดตั้ง
ข้อเสีย	ประสิทธิภาพต่ำ และมีต้นทุนอุปกรณ์อื่นๆแพง	ประสิทธิภาพปานกลาง และมีส่วนประกอบคือ Cadmium ที่เป็นพิษร้ายแรง	มีราคาแพง และมีส่วนประกอบที่มีแนวโน้มที่จะขาดแคลนในอนาคตคือ Indium (Muller R. A., 2012)

การนำเซลล์แสงอาทิตย์มาผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ในอาคารนั้นมีสองประเภท ได้แก่ ประเภทแผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งเข้ากับรางยึด (Rack-mounted PV systems) ซึ่งเป็นประเภทที่ได้รับความนิยมสูงที่สุด และ ประเภทการผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับวัสดุอาคาร (Building Integrated Photovoltaic: BIPV) ซึ่งยังมีจำนวนน้อยในปัจจุบันแต่มีการอัตราการเติบโตสูง โดยคาดการณ์ว่าจะมีการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบ BIPV เป็นปริมาณสูงถึง 1.15 GW ทั่วโลกในปี ค.ศ.2019 ซึ่งเติบโตจากปริมาณ การติดตั้ง 343.1 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)

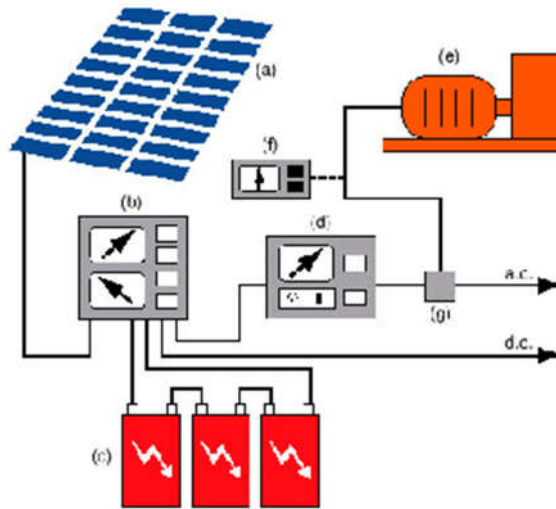


รูปที่ 3 ฟังเส้นเวลาแสดงถึง ประสิทธิภาพสูงสุดของเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ จากการทดลอง และมีการบันทึก (The National Center for Photovoltaics, 2016)

1.4 อาคารผสมเซลล์แสงอาทิตย์ (Building Integrated Photovoltaic: BIPV)

การนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ในอาคาร ประเภท **อาคารผสมเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับวัสดุอาคาร (Building Integrated Photovoltaic: BIPV)** นั้นหมายถึงการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV module) มาผลิต/ติดตั้ง เพื่อทดแทน/เป็นส่วนหนึ่ง/เป็นชิ้นงานเดียวกันกับวัสดุอาคาร เช่น กระเบื้องหลังคา อุปกรณ์บังแดด กระจกในช่องเปิดอาคารหรือ Skylight และส่วนหน้าอาคาร (Façade) เป็นต้น โดยยังคงรักษาคุณสมบัติในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างครบถ้วน (Strong, 2011; Hall, 2014; Yang, 2015) ข้อได้เปรียบของ BIPV ที่มีเหนือ Rack-mounted PV systems คือ BIPV นั้นถูกผสมเข้าไปอย่างกลมกลืนเป็นส่วนหนึ่งกับอาคาร สามารถที่จะก่อสร้างให้กลมกลืนไปกับการออกแบบอาคารโดยไม่เป็นส่วนเพิ่มหรือส่วนเกินด้านองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรม (Hall, 2014) นอกจากนี้ BIPV ซึ่งใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งทดแทนวัสดุก่อสร้างอาคารปกติ ทำให้ลดการใช้วัสดุก่อสร้างและมีต้นทุนในการติดตั้งน้อยกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งเข้ากับรางยึด (Rack-mounted PV systems) เป็นการลดต้นทุนทั้งทางด้านแรงงาน ทั้งทางวัสดุก่อสร้าง ได้พลังงานสะอาดที่ไม่มีวันหมดมาใช้ในอาคาร และเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าได้เต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากได้ใช้ไฟฟ้าใกล้กับระบบสร้างไฟฟ้า มีการสูญเสียพลังงานต่ำมากเมื่อเทียบในระบบสายส่งไฟฟ้าที่มีการสูญเสียพลังงานสูงถึง 6% (IEA Statistics, 2014) รวมถึงยังเป็นการลดความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด (Peak Load) ของอาคารได้อีกด้วย (Peng, Huang, และ Wu, 2011; Strong, 2011; Jelle, Breivik, และ Røkenes, 2012)

ระบบ BIPV ที่สมบูรณ์นั้นมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้ (Strong, 2011)



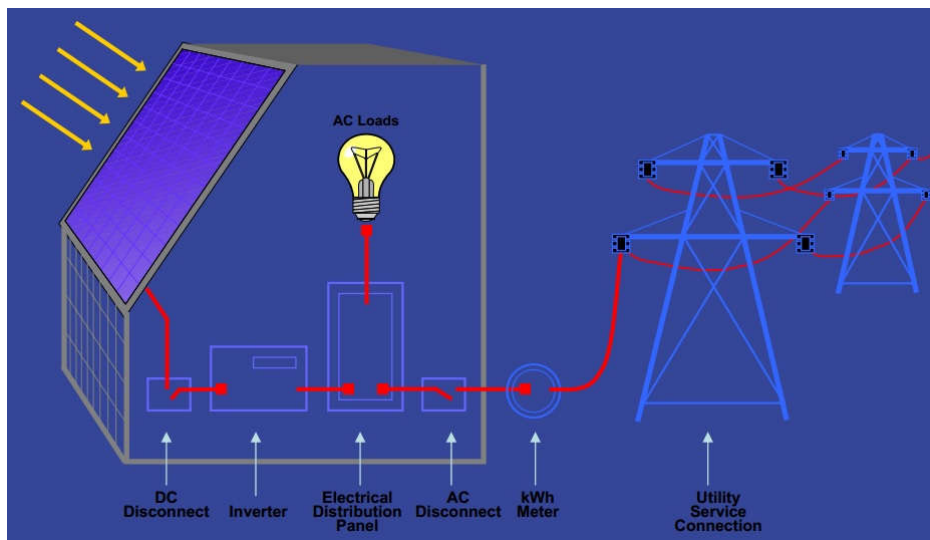
รูปที่ 4 แผนภาพระบบ BIPV (Strong, 2011)

- (a) ผลิตภัณฑ์ BIPV หรือ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Modules) ซึ่งมีหลากหลายรูปแบบและหลากหลายวัสดุซับแสง ดังรายละเอียดในหัวข้อที่ 1.3
- (b) ส่วนควบคุมกระแสไฟฟ้าเข้า-ออกระบบ (Charger Controller) ทำหน้าที่จัดการปริมาณและทิศทางการไหลของไฟฟ้า ถ้าเป็นระบบ BIPV แบบแยกส่วนอิสระจากระบบสายส่ง (Stand-alone) อุปกรณ์นี้จะทำหน้าที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าเข้าสู่และออกจากแบตเตอรี่
- (c) ระบบเก็บประจุไฟฟ้า (Power Storage Systems) หรือคือแบตเตอรี่ในระบบ Stand-alone

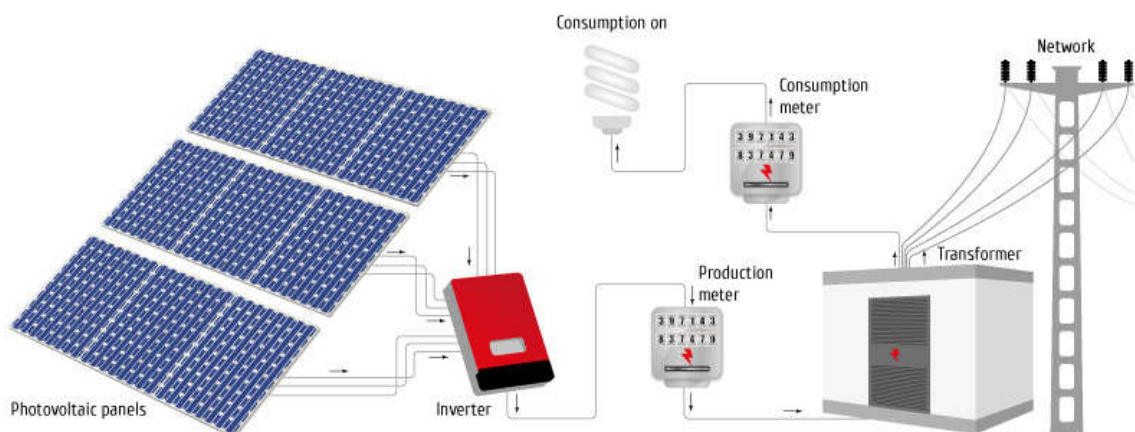
- (d) อุปกรณ์แปลงชนิดกระแสไฟฟ้า (Power Conversion Equipment) ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในระบบ BIPV โดยเป็นที่รู้จักกันทั่วไปในชื่ออุปกรณ์ Inverter
- (e) อุปกรณ์สร้างพลังงานสำรอง เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากน้ำมันดีเซล (Diesel Generators) เป็นต้น
- (f) อุปกรณ์รางยึดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สายไฟฟ้า และอุปกรณ์ประกอบเพื่อความปลอดภัยอื่นๆ

ปัจจุบันมีการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้งานภาคอาคารในหลายรูปแบบ (White, 2015) ได้แก่

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

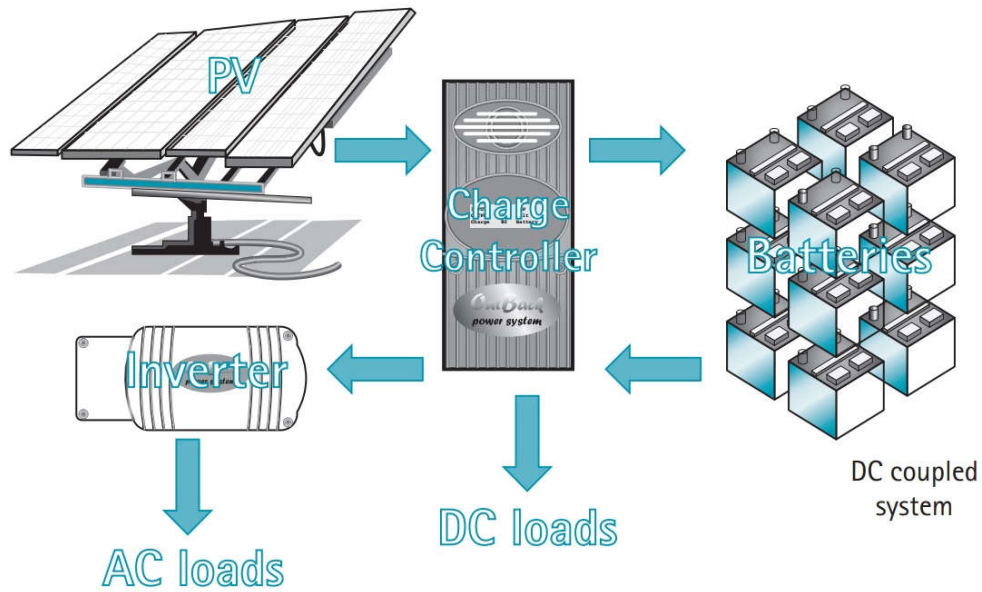


รูปที่ 5 ตัวอย่างแผนภาพ (Diagram) ระบบ Grid Connected BIPV Systems (Coonen, 2007)

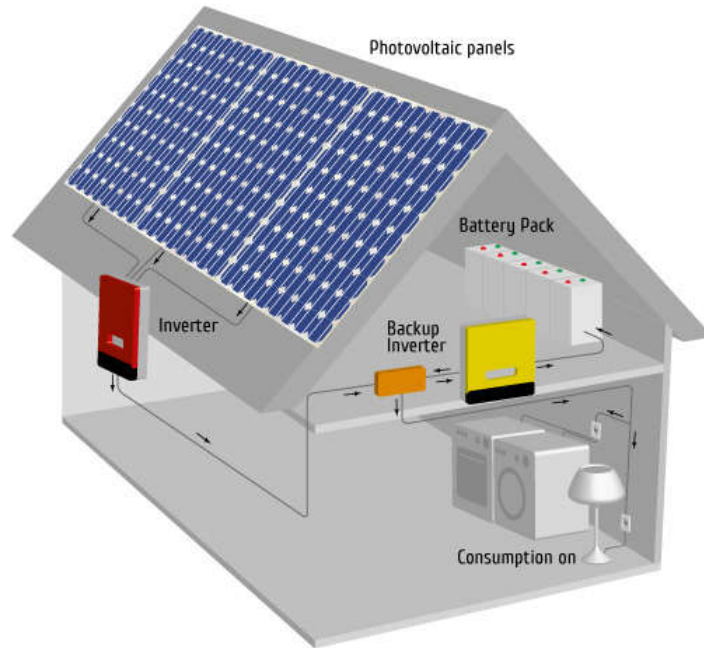


รูปที่ 6 ตัวอย่างแผนภาพ (Diagram) ระบบ Grid Connected BIPV Systems (STS Solar Photovoltaic Projects, 2016)

2) แบบแยกส่วนอิสระจากระบบสายส่ง (Off-grid หรือ Stand-alone หรือ Battery-based PV Systems) นิยมใช้ในอาคารที่ตั้งอยู่ห่างไกลจากระบบสายส่งไฟฟ้า ซึ่งอาจเป็นระบบที่ใช้การสร้างพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว หรือใช้การสร้างพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน (Hybrid System) จากแหล่งพลังงานทดแทนอื่นๆ เช่น พลังงานจากกังหันลม (Wind Turbine) พลังงานจากกังหันน้ำ (Small Hydroelectric Turbine) เป็นต้น กับการสร้างพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

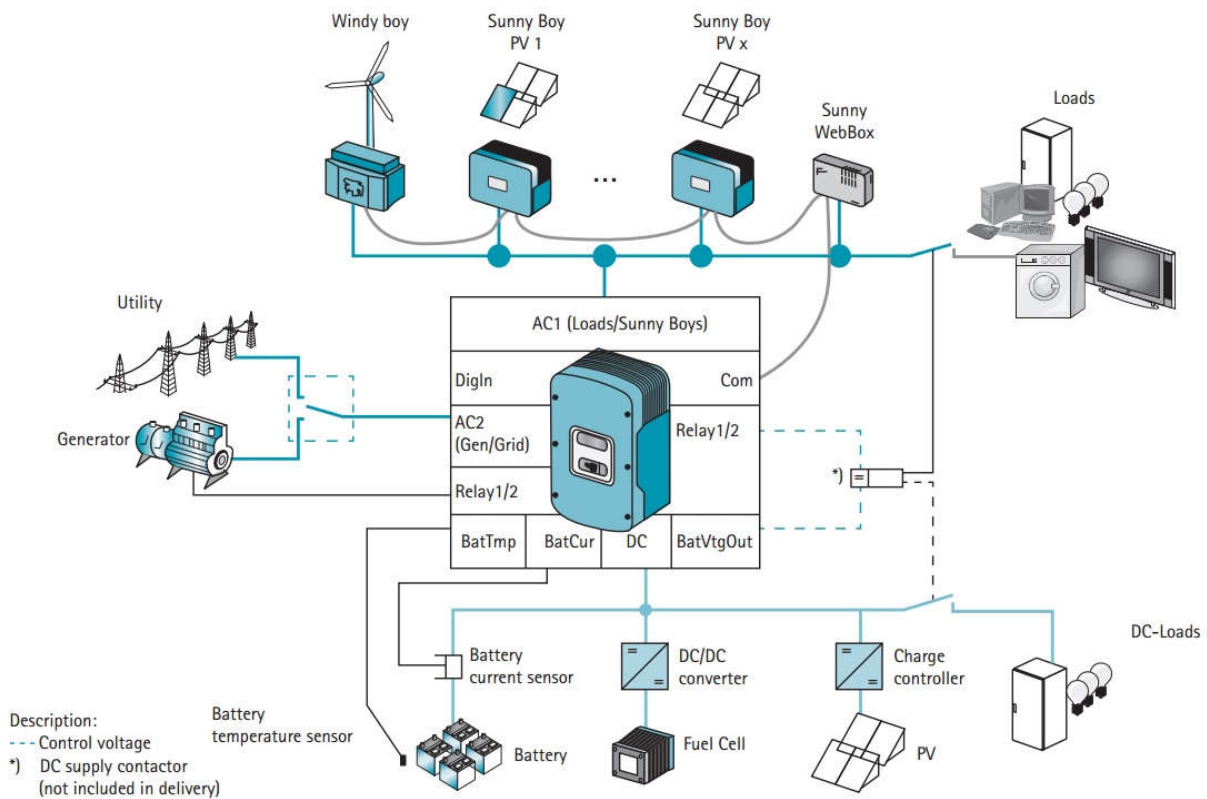


รูปที่ 7 ตัวอย่างแผนภาพ (Diagram) ระบบ Off-grid หรือ Stand-alone Systems (White, 2015)



รูปที่ 8 ตัวอย่างแผนภาพ (Diagram) ระบบ Off-grid หรือ Stand-alone Systems (STS Solar Photovoltaic Projects, 2016)

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



รูปที่ 9 ตัวอย่างแผนภาพ (Diagram) ระบบ Multimodal PV Systems ที่เป็นการสร้างพลังงานไฟฟ้าแบบผสมผสาน (Hybrid System) (White, 2015)

1.5 ประเภทของผลิตภัณฑ์ BIPV

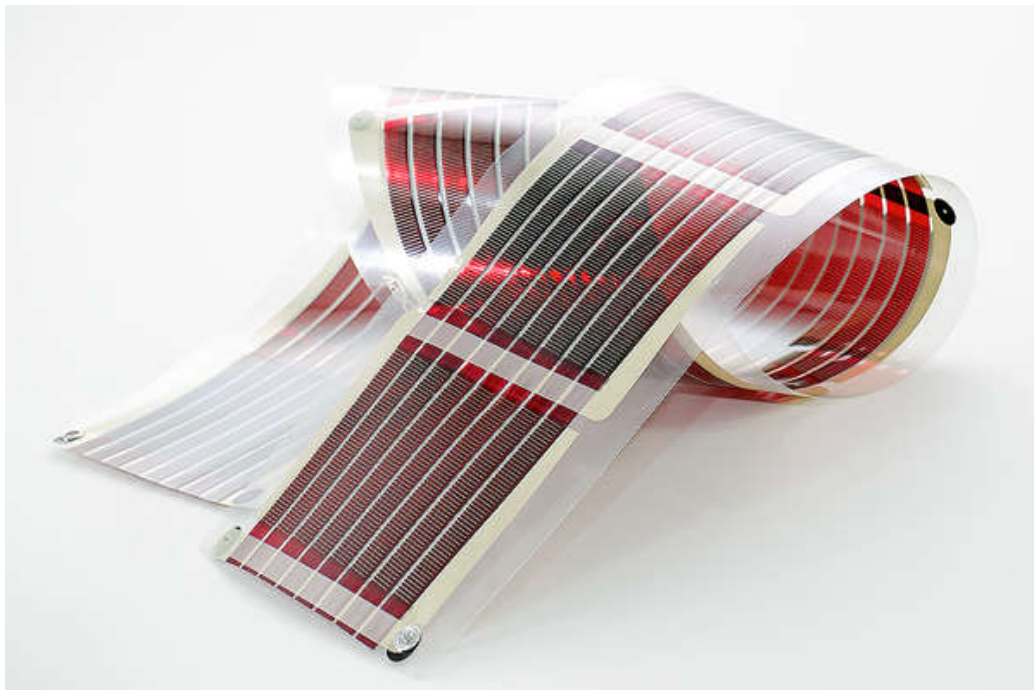
คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ BIPV ซึ่งเป็นข้อมูลทางเทคนิคที่ถูกระบุโดยผู้ผลิต ที่ผู้ออกแบบอาคารจำเป็นต้องทราบนั้นมันมีดังนี้ (Jelle, Breivik, และ Røkenes, 2012)

- ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell Efficiency) (η) โดย $\eta = P_{max}/(EA)$
 - P_{max} คือ กำลังสูงสุดในการผลิตพลังงาน มีหน่วยเป็น W หรือ Watt-peak
 - E คือ รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็น W/m^2
 - A คือ พื้นที่ผิวเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็น m^2
- Open circuit potential or voltage, U_{oc}
- Short circuit electrical current, I_{sc}
- Maximum power point, $P_{max} - (UI)_{max}$
- Fill factor (FF) = $P_{max}/(U_{oc}I_{sc}) = (UI)_{max}/U_{oc}I_{sc}$
- Band gap, E_g
- Quantum yield, = จำนวน photo-electrons/จำนวน photons

การนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV module) มาติดตั้งเพื่อทดแทนเป็นวัสดุ ผลิตเป็นอันหนึ่งอันเดียวกับอาคาร หรือที่เรียกว่า ผลิตภัณฑ์ BIPV (BIPV Products) นั้นมี 4 ประเภท (Jelle, Breivik, และ Røkenes, 2012) ได้แก่

1) เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแผ่นบาง (BIPV Foil Products)

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



รูปที่ 10 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ประเภท Foil (Infinity PV, 2016)

2) เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทกระเบื้องหลังคา (BIPV Tile Products)

ผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทกระเบื้องหลังคา (BIPV Tiles) เพื่อทดแทนกระเบื้องหลังคาปกติได้ทั้งผืนหลังคา หรือจะเลือกติดตั้ง BIPV Tiles เพียงบางส่วนของผืนหลังคา เพราะผลิตภัณฑ์ BIPV ประเภทนี้ถูกออกแบบและผลิตให้มีมิติและรูปลักษณะที่คล้ายคลึงสอดคล้องกับวัสดุหลังคาทั่วไป แต่ด้วยเหตุนี้ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของ BIPV Tiles มักไม่เป็นไปตามเอกสารจากผู้ผลิต แม้ว่าจะผลิตด้วยวัสดุซับแสงที่มีประสิทธิภาพสูงก็ตาม เนื่องจากข้อจำกัดที่จะต้องผลิต BIPV Tiles ให้มีลักษณะเป็นลอนกระเบื้องที่ทำให้วัสดุไม่สามารถรับรังสีอาทิตย์ได้เต็มที่ และผลิตภัณฑ์ BIPV Tiles นั้นมักมีราคาแพง ทั้งราคาวัสดุ และราคาค่าแรงในการติดตั้งระบบ



รูปที่ 11 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ประเภท BIPV Tiles (The Green Energy Society, n.d.)

3) เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแผง (BIPV Module Products)

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



รูปที่ 12 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ประเภท BIPV Modules (PV System Expo, 2015)

4) เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทกระจกใส (Solar Cell Glazing Products)

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

วิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทกระจกใสคือ ผู้ผลิตพ่นสารชั้นแสง ซึ่งมีหลากหลายชนิดเช่น Monocrystalline / Polycrystalline / Amorphous Silicon ลงบนวัสดุกระจก โดยผลิตภัณฑ์บางชนิดจะมีความทึบของวัสดุชั้นแสงมาก แต่จะมีการเว้นระยะระหว่างเซลล์ให้แสงส่องผ่านได้ บางชนิดจะมีความโปร่งแสงอยู่ในเนื้อของวัสดุชั้นแสงซึ่งทำให้ไม่จำเป็นต้องมีช่องว่างภายในแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ ผลิตภัณฑ์เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทกระจกใสจะมีความโปร่งใส ตั้งแต่ 16% - 41% และมีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ตั้งแต่ 5% - 22% (Jelle, Breivik, และ Røkenes, 2012)



รูปที่ 13 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทกระจกใส (Onyx Solar, 2016)

1.6 หลักแนวคิดสำคัญในการออกแบบอาคารผสมเซลล์แสงอาทิตย์

การออกแบบระบบ BIPV นั้นมีองค์ประกอบ อุปกรณ์ และองค์ความรู้หลายด้านเข้ามาเกี่ยวข้อง และที่สำคัญคือผู้ออกแบบจะต้องพิจารณาความคุ้มค่าของการลงทุนตลอดชั่วชีวิตอาคาร (Building Life-cycle Cost) มิใช่พิจารณาแต่เพียงงบประมาณการลงทุนเบื้องต้น เนื่องจากการตอบแทนจากระบบ BIPV นั้นต้องใช้เวลา ทั้งทางด้านการผลิตพลังงานให้กับอาคาร ทางด้านการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม รวมถึงทางด้านการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยหลักแนวคิดสำคัญในการออกแบบอาคารผสมเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีดังต่อไปนี้ (Strong, 2011)

- ต้องมีการพิจารณาอย่างรอบคอบในการประยุกต์ใช้การออกแบบที่ใส่ใจด้านพลังงาน และการใช้มาตรการด้านพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อลดความต้องการใช้พลังงานของอาคาร ซึ่งจะช่วยเพิ่มการสร้างภาว่น่าสบายให้แก่ผู้ใช้อาคาร และสร้างความประหยัดต้นทุนด้านพลังงาน ซึ่งการใช้งานระบบ BIPV จะเป็นส่วนเติมเต็ม ที่จะทำให้อาคารลดภาระการใช้พลังงานจากระบบสายส่งไฟฟ้า

- ต้องมีการเลือกใช้ระบบ BIPV ให้เหมาะสมกับอาคาร ได้แก่ แบบเชื่อมต่อระบบสายส่งไฟฟ้า (Grid-tied หรือ Utility-interactive PV Systems) หรือ แบบแยกส่วนอิสระจากระบบสายส่ง (Off-grid หรือ Stand-alone หรือ Battery-based PV Systems)
- ต้องมีการลดปริมาณการใช้พลังงานสูงสุดของอาคาร (Peak Load) ด้วยการใช้ประโยชน์จากวิธีการออกแบบอิงธรรมชาติ (Passive Design) และออกแบบระบบ BIPV ให้สามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าให้สอดคล้องกับรูปแบบ Peak Load ของอาคาร เนื่องจากราคาค่าไฟฟ้าในช่วงเวลานี้จะมีราคาแพง และระบบ BIPV ควรทำหน้าที่เสมือนเป็น UPS (Uninterruptible Power System) คือ เป็นเครื่องสำรองไฟฟ้าและปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติให้กับอาคาร
 - ต้องจัดให้มีการระบายอากาศสำหรับระบบ BIPV ให้เพียงพอ เนื่องจากประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิของเซลล์สูงขึ้น โดยเฉพาะเซลล์แสงอาทิตย์ประเภท Crystalline Silicon
 - ควรพิจารณาใช้ระบบ BIPV แบบโปร่งแสง เนื่องจากสามารถใช้ประโยชน์ในการสร้างพลังงานไฟฟ้า ร่วมกับการใช้แสงธรรมชาติได้ในเวลาเดียวกัน เช่นการเลือกใช้เซลล์แสงอาทิตย์ Thin-film แบบโปร่งแสง หรือเซลล์แสงอาทิตย์ Crystalline Silicon ที่มีช่องว่างกระจกโปร่งใสระหว่างเซลล์ เป็นต้น
 - ควรพิจารณาออกแบบให้มีการผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับอุปกรณ์บังแดด เป็นการใช้ประโยชน์จากอุปกรณ์ชิ้นเดียวกันให้เกิดประโยชน์ด้านการสร้างพลังงานไฟฟ้า และการส่งเสริมการสร้างภาวะน่าสบายให้กับอาคารโดยวิธีธรรมชาติ ได้ในเวลาเดียวกัน
 - ต้องคำนึงถึงสภาพภูมิอากาศ และสิ่งแวดล้อมในท้องถิ่น อันเป็นตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของระบบ BIPV โดยตรง โดยจำเป็นต้องคำนึงถึงองค์ประกอบเหล่านี้
 - พื้นผิวอื่นๆ เช่น พื้นคอนกรีต ที่สะท้อนแสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบ BIPV ซึ่งจะสามารถเพิ่มปริมาณการสร้างพลังงานของระบบได้
 - แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ต้องทนต่อแรงลมได้ ต้องไล่น้ำฝนบนผิวหน้าออกไปได้อย่างรวดเร็ว และต้องมีมาตรการทำความสะอาดระบบ BIPV ที่เหมาะสม
 - ต้องออกแบบระบบ BIPV ให้สอดคล้องกับทิศทางดวงอาทิตย์ เพื่อให้ระบบรับรังสีอาทิตย์อย่างเต็มที่ และต้องไม่ให้เกิดการบังเงาจากสิ่งต่างๆ ที่จะเป็นอุปสรรคขวางไม่ให้รังสีอาทิตย์ตกกระทบสู่ระบบ BIPV โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่แดดจัดที่สุด คือ ตั้งแต่ 9.00 น. ถึง 15.00 น. และระบบ BIPV ควรมีการเอียงเพื่อรับรังสีอาทิตย์อย่างเหมาะสม พบว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งในมุมเอียงจากแนวราบที่เหมาะสม สามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งทดแทนวัสดุผนังแนวตั้ง (Vertical Façade 90° จากแนวราบ) มากถึง 50% - 70% (Strong, 2011)
 - ควรมีที่ปรึกษาและเลือกใช้งานผู้ออกแบบระบบ BIPV ที่มีความชำนาญ

1.7 ข้อจำกัดและความเสี่ยงด้านเทคนิค ในการใช้งาน BIPV (Technical barriers and risks in the application of BIPV)

Yang (2014) ได้ศึกษาเพื่อชี้ถึง ข้อจำกัดและความเสี่ยงด้านเทคนิคในการใช้งาน BIPV ในวงจรชีวิตของอาคาร ตั้งแต่ในขั้นตอนการออกแบบ (Barriers related to **design** stage) ขั้นตอนการติดตั้งระบบ BIPV (Barriers related to **installation** stage) ขั้นตอนการส่งมอบอาคาร (Barriers related to **commissioning** stage) และขั้นตอนการใช้งานอาคาร (Barriers related to **operation** stage) นอกเหนือจากนั้น Yang ยังได้เสนอถึงวิธีการทาง hardware และ software (proposing possible

hardware and software solutions) เพื่อจัดซื้อจำกัดและความเสี่ยงด้านเทคนิคดังกล่าวอีกด้วย (Yang, 2015)

วิธีดำเนินการศึกษานี้ แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่

(1) การค้นหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องในฐานข้อมูลต่างๆ (A comprehensive database search) ซึ่งประกอบด้วย Science Direct, Scopus, Ebsco Host และ Google เพื่อ **สืบค้นรายนามเอกสารตีพิมพ์ทางวิชาการ ที่เกี่ยวข้องกับข้อจำกัดและความเสี่ยงด้านเทคนิคในการใช้งาน BIPV ในช่วงระยะเวลา 5 ปีที่ผ่านมา และพบว่าไม่มีเอกสารตีพิมพ์ทางวิชาการจำนวน 224 ฉบับ และเอกสารตีพิมพ์ทั่วไปอีก 38 ฉบับ ที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อการศึกษา**

(2) ผู้วิจัยได้ดำเนินการสืบค้นหาเอกสารตีพิมพ์ที่ได้รับการจัดอันดับให้เป็น **top-ranked construction journals** จากเอกสารตีพิมพ์ทั้งหมดในขั้นตอนที่ 1 และได้ **พบว่าไม่มีเอกสารตีพิมพ์ใดเลย ที่มีจุดมุ่งหมาย/มุ่งเน้น** เพื่อตรวจสอบหาความจริง ในประเด็นข้อจำกัดและความเสี่ยงด้านเทคนิคในการใช้งาน BIPV ผู้วิจัยจึงสรุปว่า **ประเด็นนี้เป็นช่องว่างของการวิจัย** ในสาขาการนำ BIPV มาใช้ในอาคารและงานก่อสร้าง

(3) ผู้วิจัยได้นำเอกสารตีพิมพ์ที่ค้นพบในขั้นตอนที่ 1 มาดำเนินการทบทวนวรรณกรรม และได้จัดหมวดหมู่แบ่งออกเป็น เอกสารตีพิมพ์ที่ไม่เกี่ยวข้อง และเอกสารตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้อง และสามารถจัดประเภทของเอกสารตีพิมพ์ทั้งหมดออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ **technical simulations** (เช่นประเด็นด้าน control systems หรือ alternative storage), **project simulations** (เช่นประเด็นด้าน economic modeling หรือ PV penetration) และ **operational experience** (เช่นประเด็นเรื่องกรณีศึกษา สมรรถนะ และการถอดบทเรียน (lesson learnt)) จากกระบวนการในขั้นตอนนี้พบว่า **ค้นพบประเด็นข้อจำกัดและความเสี่ยงด้านเทคนิคในการใช้งาน BIPV จำนวน 17 ประเด็น และสามารถจำแนกประเด็นดังกล่าวออกตามช่วงชีวิตของอาคาร** ได้แก่ ขั้นตอนออกแบบอาคาร (design) ขั้นตอนก่อสร้างอาคาร (construction) ขั้นตอนการติดตั้งระบบ PV (installation) ขั้นตอนการส่งมอบระบบ (commissioning) และขั้นตอนการบำรุงรักษาระบบ (maintenance)

(4) ผู้วิจัยได้ดำเนินการตรวจสอบความถูกต้อง (validate) ข้อค้นพบเรื่องข้อจำกัดและความเสี่ยงด้านเทคนิคในการใช้งาน BIPV **ทั้ง 17 ประเด็น** ด้วยการจัดประชุมเชิงปฏิบัติการ (workshop) ระดมความเห็นจากผู้ปฏิบัติวิชาชีพในอุตสาหกรรม BIPV ที่มีประสบการณ์สูง ประกอบด้วย วิศวกรโครงสร้าง วิศวกรไฟฟ้า สถาปนิก และผู้ผลิต PV รวมทั้งได้ดำเนินการสัมภาษณ์บุคคลดังกล่าวภายหลัง เมื่อมีความต้องการข้อมูลเพิ่มเติม

จากการศึกษา สามารถสรุปผลการศึกษาเรื่อง **ข้อจำกัดและความเสี่ยงด้านเทคนิคในการใช้งาน BIPV** ได้ดังต่อไปนี้

(1) ข้อจำกัดและความเสี่ยงด้านเทคนิคในการใช้งาน BIPV ในขั้นตอนการออกแบบอาคาร (Design Stage)

ในขั้นตอนนี้ของช่วงชีวิตอาคาร (Building life cycle) พบข้อจำกัดและความเสี่ยงด้านเทคนิคในการใช้งาน BIPV ได้แก่

(1-A) การขาดความค้ำประกันของผู้ออกแบบอาคาร ถึงวิธีการบำรุงรักษา/เปลี่ยนอุปกรณ์ BIPV ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบอาคาร

ข้อจำกัดนี้เกิดจากผู้ออกแบบอาคาร ไม่ได้จัดให้มีการเข้าถึงระบบ BIPV เพื่อให้สามารถบำรุงรักษา/เปลี่ยนอุปกรณ์ จากภายนอกได้อย่างสะดวก (easy access) เนื่องจากระบบ BIPV ซึ่งถูกผสมผสาน

เป็นส่วนหนึ่งของเปลือกอาคาร นั้นมีส่วนประกอบจำนวนมากที่สามารถเชื่อมสภาพได้ เช่น gasket, screws, pressure plates และ toggle fixings เป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่การบำรุงรักษา/เปลี่ยนอุปกรณ์เหล่านี้ นั้นจะกระทำจากภายนอกอาคาร

ผู้ออกแบบอาคารควรคำนึงถึงขนาดและน้ำหนักของแผงและอุปกรณ์ BIPV ให้สามารถขนส่งเคลื่อนย้ายได้สะดวก โดยเฉพาะ โดยการใส่กระเช้าไฟฟ้า (gondola) ที่มีการใช้งานในอาคารสูง เพื่อการเข้าถึงทำความสะอาดกระจกและบำรุงรักษาอาคาร

นอกจากนั้น ผู้ออกแบบอาคารควรคำนึงในภาพรวมถึง ความต้องการ (บำรุงรักษา/เปลี่ยนอุปกรณ์) ภายหลังจากติดตั้งระบบ BIPV (the post installation requirements) ข้อคำนึงนี้จะทำให้ผู้ออกแบบอาคารใส่ใจกับการเข้าถึงระบบ BIPV รวมถึงการผสมผสานการเข้าถึงนั้นๆ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการออกแบบ ตั้งแต่ขั้นตอนแรกๆ ของกระบวนการออกแบบ (the integration of the access way into the design at the early stages)

(1-B) การขาดแคลน แนวทาง ข้อกำหนดในการออกแบบ และกฎหมาย ด้านการออกแบบ BIPV ผู้วิจัยได้อธิบายถึง การขาดแนวทางการติดตั้งระบบ BIPV แบบต่างๆ ในประเทศแคนาดา และการขาดกฎหมายที่ควบคุมด้านการออกแบบระบบ BIPV ในประเทศออสเตรเลีย โดยผู้วิจัยได้ให้ความเห็นว่า ควรจัดให้มีกฎหมายควบคุมและมาตรฐานด้านการออกแบบระบบ BIPV โดยไม่ควรให้สถาปนิกออกแบบระบบ BIPV บนพื้นฐานขององค์ความรู้ที่ไม่ชัดเจน

(1-C) การเลือก BIPV ผิดประเภทของผู้ออกแบบ

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ด้านพลังงานที่ได้รับจากระบบ BIPV คือ ประสิทธิภาพของ inverter ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ผู้ออกแบบอาคารขาดองค์ความรู้และความเข้าใจเพื่อออกแบบระบบ BIPV ให้เกิดประสิทธิภาพของผลลัพธ์ด้านพลังงานสูงสุด ส่งผลให้เกิดความไม่เข้ากันของชุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (a mismatch within the strings of the individual PV modules) โดยทางออกของปัญหานี้คือการจัดให้มีผู้ให้คำปรึกษาด้านระบบ PV เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของทีมออกแบบ

(1-D) การออกแบบโครงสร้างอาคารที่ผิดพลาด ทำให้ไม่สามารถรับน้ำหนักระบบ PV ได้

ปัญหานี้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในกรณีอาคารปรับปรุง (renovations or refurbishments) ซึ่งโครงสร้างนั้นมิได้ถูกออกแบบมาเพื่อการติดตั้งระบบ BIPV หนึ่งในทางออกของปัญหานี้คือการเลือกใช้ เซลล์แสงอาทิตย์แบบแผ่นบาง (thin film BIPV cells) แทนที่จะใช้แบบ crystalline silicon ซึ่งจะต้องพิจารณาความเหมาะสมในคุณสมบัติ ราคา และประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานต่อหน่วยพื้นที่ ของเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าวอีกด้วย

ในกรณีของอาคารสร้างใหม่นั้น สถาปนิกและวิศวกร ต้องออกแบบอาคารให้สามารถรับน้ำหนักระบบ BIPV ได้ โดยแม้ว่าอาคารที่กำลังจะสร้างใหม่นั้นยังไม่ได้ติดตั้งระบบ BIPV ก็ควรที่จะออกแบบเพื่อสำหรับอนาคตให้สามารถติดตั้งระบบได้

(1-E) ปัญหาการเกิดน้ำหนักจร (live loads) บนระบบ BIPV ทำให้เกิดแรงกระทำที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบ และต่อผู้ใช้อาคารหรือสิ่งแวดล้อมรอบข้างได้

ปัญหานี้เกิดขึ้นจากการเกิดแรงกระทำหรือน้ำหนักกดทับแบบ (live loads) บนระบบ BIPV เช่น **ฝน ทิมะ ลม** เป็นต้น อันเป็นสิ่งที่ทำให้เกิด **mechanical stress** และอาจทำให้ระบบ BIPV เสียหายได้ (บิดงอ แตก) หรือไม่ก็ **อาจทำให้ระบบ BIPV นั้นหลุดออกจากตัวอาคาร** ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินอื่นๆ ได้

Mechanical stress นั้นนับเป็นข้อจำกัดด้านเทคนิคที่สำคัญต่ออาคาร และต่ออุตสาหกรรม PV อีกด้วย การคำนวณ mechanical stress ที่ผิดพลาดจะส่งผลให้ผู้ติดตั้งระบบ BIPV ดำเนินการผิดพลาด ทั้งด้านการติดตั้งและด้านการซ่อมแซมระบบ อาจเป็นสาเหตุให้ modules เปี้ยวคด แตก และอาจส่งผลกระทบต่อปริมาณการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบได้

(1-F) ความท้าทายด้านการออกแบบที่สัมพันธ์กับสุขภาวะและความปลอดภัยของผู้ใช้อาคาร อันประกอบด้วยประเด็นย่อยดังนี้

(1-F-1) ประเด็นการส่งผ่านความร้อนจากระบบ BIPV สู่อาคาร

อุณหภูมิภายในอาคารอาจสูงขึ้นได้จากการส่งผ่านความร้อนจากระบบ BIPV โดยเฉพาะประเภทระบบ BIPV slate and tile roof ที่แผ่นกระเบื้องมีการซ้อนทับกัน เนื่องจากรังสีความร้อนจากแสงอาทิตย์ตกกระทบบนพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์ (BIPV tiles) ของระบบ BIPV เกิดการสะสมความร้อนภายใน modules และจะส่งผ่านความร้อนจาก modules เข้าสู่อาคาร เนื่องจากความร้อนดังกล่าวไม่สามารถระบายออกสู่ภายนอกได้ (Frontini, Manfren, & Tagliabue, 2012)

ผู้วิจัยได้กล่าวถึงความพยายามต่างๆในการแก้ปัญหานี้ได้แก่ การออกแบบให้มีช่องระบายอากาศด้านหลังของ BIPV tiles เพื่อจัดให้มีอากาศไหลผ่านเพื่อระบายความร้อนออกจากระบบ (Frontini, Manfren, และ Tagliabue, 2012) การออกแบบระบบ BIPV ให้มีการระบายอากาศบริเวณด้านล่างของ BIPV tiles (Heinstein, Ballif, & Perret-Aebi, 2013) และการออกแบบให้มีช่องว่างเพื่อการระบายอากาศในระบบ BIPV (Quesada, Rousse, Dutil, Badache, & Hallé, 2012)

(1-F-2) ประเด็นความปลอดภัยด้านอัคคีภัย (ระบบ PV เป็นวัตถุไวไฟ)

การกำหนดคุณลักษณะด้านความทนไฟของ BIPV modules (**fire test and glass breakage test**) ที่ระบุในรายงานการศึกษานี้ เป็นข้อมูลที่ถูกทดสอบโดย the TÜV Rheinland group ประเทศเยอรมัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า มีความเสี่ยงสูงการเกิดอัคคีภัยใน BIPV Façade และหลังคา เนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดประกายไฟในชุดของ connectors และ junction box และที่สำคัญคือการขาดมาตรฐานและกฎหมายด้านการป้องกันอัคคีภัยของระบบ BIPV

(1-F-3) ประเด็นการป้องกันเสียงรบกวน

ยังไม่มีข้อกำหนดมาตรฐานและกฎหมายอย่างชัดเจน ด้านการป้องกันเสียงรบกวน (noise protection) ที่เกี่ยวข้องกับระบบ BIPV

(1-G) การออกแบบการวางตำแหน่งและปรับค่าระบบ PV ที่ไม่เหมาะสม

ผู้ออกแบบอาคารเป็นผู้รับชอบโดยตรงต่อการวางตำแหน่งระบบ BIPV เพื่อให้ระบบสามารถสร้างพลังงานได้สูงสุดเต็มศักยภาพ และจะต้องกระทำตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบอาคาร (Lam, Close, & E.W.C., 2006; Xuan & Zheng, 2007)

ปัจจัยสำคัญด้านการวางตำแหน่งระบบ BIPV ได้แก่ **weather profiles, orientations องศาของการเอียงระบบ BIPV (tilt angles)** และการโดนบังแสงจากสิ่งแวดล้อมรอบข้าง (shading from surroundings / **partial shading conditions**) ทั้งจากอาคารข้างเคียง ต้นไม้ และสภาพทางภูมิศาสตร์บริเวณนั้น (ภูเขา เนินเขา) โดยผู้ออกแบบอาคารจำเป็นต้องทราบถึงรูปแบบของการโดนบังเงา (shading pattern) จากสิ่งแวดล้อมรอบข้างเพื่อสามารถออกแบบให้ระบบ BIPV สามารถรับรังสีดวงอาทิตย์ได้มากที่สุด โดย partial shading conditions นั้นอาจทำให้ประสิทธิภาพการสร้างพลังงานของระบบ BIPV ลดลงไปได้ถึง 20% (Ikedi, Okoroh, Dean, & Omer, 2010) นอกจากนี้ตัวอาคารเองอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการ

บังเงาบนระบบ BIPV ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการสร้างพลังงานของระบบ BIPV ลดลงไป 5-10% (Yoon, Song, & Lee, 2011)

ผู้วิจัยได้เสนอแนะถึงการนำเครื่องมือสร้างแบบจำลอง photovoltaic modeling tools มาใช้ในการแก้ปัญหาการออกแบบอาคารให้ไม่เป็นสาเหตุของการบังเงาต่อระบบ BIPV เช่น Design Experiment (DOE) และ Response Surface Modeling (RSM) โดย Yoon et al ได้ใช้ ESP-r เป็นเครื่องมือในการแสดงให้เห็นถึงสถานะต่างๆที่มีอิทธิพลต่อระบบ BIPV (เช่น การบังเงา เป็นต้น)

(2) ข้อจำกัดและความเสี่ยงด้านเทคนิคในการใช้งาน BIPV ในขั้นตอนการติดตั้งระบบ BIPV (Installation Stage)

ในขั้นตอนนี้ของช่วงชีวิตอาคาร พบข้อจำกัดและความเสี่ยงด้านเทคนิคในการใช้งาน BIPV ได้แก่

(2-A) ความผิดพลาดของการยึดระบบ BIPV กับอาคาร (BIPV fixing) เช่นการใช้รางยึด หรือแบบยึดบน plate โดยใช้หมุดยึด เป็นต้น ซึ่งผู้วิจัยพบว่าประเด็นนี้เป็นปัญหาสำคัญที่จะสร้างความเสียหายในอนาคต

ความผิดพลาดของการยึดระบบ BIPV กับอาคาร (BIPV fixing) นั้นนับเป็นประเด็นปัญหาทางเทคนิคที่สำคัญ และถูกกล่าวถึงในการศึกษาในอดีตมาแล้วมากมาย โดยการยึดระบบ BIPV กับอาคาร (BIPV fixing) นั้นต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับประเภทแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เช่นการใช้รางยึด หรือแบบยึดบน plate โดยใช้หมุดยึด เป็นต้น

Peng et al (2011) ได้ระบุถึงทางเลือก BIPV fixing ที่มีอยู่จำกัดในปัจจุบัน และแทบไม่มีทางเลือกของระบบ mounting systems ใดเลยที่มีความยืดหยุ่นในการดัดแปลงการใช้งาน (Peng, Huang, และ Wu, 2011) mounting systems ที่ใช้กันโดยปกติในการยึดระบบ BIPV คือ การใช้ bolts ขนาดใหญ่ และ plates ในการยึดแผ่นแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับส่วนของอาคาร โดยข้อกังวลใน mounting systems นี้คือ ระบบนี้ไม่สามารถซ่อนโครงของแผง (module frame) ยากต่อการติดตั้ง และ not logical in its application to a building structure ซึ่งปัญหาดังกล่าวจะเป็นเหตุให้การติดตั้งระบบ BIPV ผิดพลาดขัดแย้งกับมาตรฐานด้านอาคาร (?) และอาจเป็นสาเหตุของปัญหาที่ใหญ่ขึ้นได้ ซึ่งขอเสนอแนะดังกล่าวนี้ได้สอดคล้องกับข้อค้นพบของ Muller et al (2009) (Muller, Rodriguez, & Marion, 2009) แต่การศึกษาทั้งสองเรื่องดังกล่าวนี้ มิได้เสนอถึงทางเลือกที่เหมาะสมของการยึดระบบ BIPV กับกรอบอาคารแต่อย่างใด

(2-B) ผลจากการรั่วซึมของน้ำฝนเนื่องจากกระแสลม (Wind-driven rain effects)

Wind-driven rain effects คือน้ำฝนที่ถูกเพิ่มความเร็วของการไหลเนื่องจากกระแสลมและรั่วซึมเข้าสู่ระบบ BIPV ผ่านช่องว่าง (joints, overlaps, etc.) ต่างๆ ปัญหาการกันน้ำ (water tightness) ของระบบ BIPV นี้ นับเป็นอุปสรรคสำคัญในขั้นตอนการติดตั้งระบบ BIPV นอกจากนั้นระบบ BIPV นั้นยังอาจประสบปัญหาน้ำรั่วซึมเข้าสู่ระบบเนื่องจากการจับตัวของหยดน้ำเนื่องจากความชื้นในอากาศ (condensation created by humidity) ปัญหานี้สามารถสร้างความเสียหายแก่การทำงานในภาพรวมของระบบ BIPV ได้ นอกจากนั้นยังอาจทำให้อาคารเสียหายได้ทั้งภายนอกและภายใน (Heinstein, Ballif, & Perret-Aebi, 2013) โดยทางแก้ไขปัญหานี้ที่จะเป็นไปได้คือ ติดตั้งวัสดุกันน้ำคลุมตลอดแนวใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์และบนยอดของหลังคา ตลอดช่วงเวลาการก่อสร้าง-ติดตั้งระบบ BIPV

ผู้วิจัยพบว่า ยังมีความต้องการในการศึกษาประเด็นเฉพาะ เช่น การแตกออกของของวัสดุกันซึม silicone และการเกิดรอยแยกระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์เนื่องจากการเกิดการเคลื่อนไหว เป็นต้น เพื่อเป็นการทราบถึงกลไกการป้องกันน้ำเข้าสู่ระบบ BIPV ในอนาคต

(2-C) ประเด็นด้านการเดินสายไฟฟ้าและการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า (Cabling and connection issues)

การเดินสายไฟฟ้าและการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าที่ไม่มีประสิทธิภาพนั้น ส่งผลให้การสูญเสียพลังงานไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นโดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (power loss) และทำให้ประสิทธิภาพของระบบ BIPV ลดลงในภาพรวม นอกจากนี้จะทำให้เกิดปัญหาด้านการบำรุงรักษาต่อไป ซึ่งประเด็นปัญหานี้สามารถป้องกันได้ตั้งแต่กระบวนการออกแบบ และความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในประเด็นนี้ ผู้ติดตั้งระบบ BIPV ควรเป็นผู้รับผิดชอบต่อความเสียหายที่เกิดขึ้น (Lam, Close, และ E.W.C., 2006; Muller, Rodriguez, และ Marion, 2009)

(2-D) ประเด็นพลังงานค้างในระบบ BIPV (Islanding)

ประเด็นพลังงานค้างในระบบ BIPV (Islanding) จะเกิดขึ้นเมื่อส่วนใดส่วนหนึ่งของระบบ BIPV ที่มีพลังงานค้างอยู่ในขณะนั้นๆ ถูกปลด หรือถอดออกทางกายภาพจากระบบแล้ว และไม่สามารถควบคุม (control) ส่วนนั้นๆ ได้อีกต่อไป ในประเด็นนี้ control นั้นมีความหมายสำคัญสองอย่าง คือ (1) ความสามารถของ utilities ที่จะปิดการทำงานจากระยะไกล (remotely shut down) แหล่งสร้างพลังงานที่อยู่อย่างกระจายตัว (distributed energy resources) ได้ และ (2) ความสามารถของ utilities ที่จะใช้งาน advanced power management functions ของ Grid-smart inverter ได้

Islanding นั้นจะก่อให้เกิดความเสี่ยงคือ เมื่อมีความจำเป็นต้องซ่อมบำรุงระบบ BIPV โดยเจ้าหน้าที่ แล้วไม่สามารถปิดระบบได้ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการผลิตของเซลล์แสงอาทิตย์ยังคงไหลอยู่ อาจทำให้มีกระแสไฟฟ้าค้างอยู่ในระบบ เมื่อเจ้าหน้าที่ดำเนินการซ่อมบำรุงอาจทำให้เกิดปัญหาไฟฟ้าลัดวงจร และจะก่อให้เกิดอันตรายต่อเจ้าหน้าที่และอุปกรณ์ระบบได้ เป็นต้น

(3) ข้อจำกัดและความเสี่ยงด้านเทคนิคในการใช้งาน BIPV ในขั้นตอนการทดสอบการใช้งานของระบบ BIPV (Commissioning Stage)

ซึ่งข้อจำกัดสำคัญของขั้นตอนนี้คือ การขาดแนวทาง/คู่มือ/มาตรฐานการทดสอบการใช้งานของระบบ BIPV ที่จะเป็นสิ่งช่วยให้เจ้าหน้าที่ได้สามารถตรวจสอบระบบ BIPV ก่อนตรวจรับงานได้อย่างเป็นระบบ และมีมาตรฐาน โดยในปี ค.ศ. 2005 The Center for a Sustainable Build Environment แห่ง University of New South Wale ได้เสนอถึงวิธีการปฏิบัติที่เป็นเลิศ (the best practices) สำหรับการทดสอบการใช้งานของระบบ BIPV ก่อนการส่งมอบ-ตรวจรับงาน ซึ่งประกอบด้วย **เกณฑ์สามข้อ** ที่จะต้องทดสอบ ได้แก่

- การปฏิบัติตามข้อกำหนดและมาตรฐาน ด้านวิศวกรรมโครงสร้าง และวิศวกรรมไฟฟ้า
- ความปลอดภัยด้านระบบไฟฟ้า โดยระบบ BIPV จะต้องไม่เพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดภัยพิบัติของอาคารมากกว่าที่เป็นอยู่
- การเปรียบเทียบมาตรฐานระบบ BIPV โดยผู้ติดตั้งระบบ เพื่อให้การผลิตพลังงานของระบบเป็นไปอย่างที่คาดหวัง

นอกจากนั้น การนำ check-list มาใช้ ก็จะเป็นการช่วยการทดสอบการใช้งานของระบบ BIPV อีกด้วย และจากที่กล่าวไปว่าจากการที่ยังไม่มีแนวทาง/คู่มือ/มาตรฐานการทดสอบการใช้งานของระบบ BIPV นั้น ทำให้ผู้ติดตั้งระบบ BIPV จะต้องสร้างแนวทาง ของตนเองมาเพื่อใช้งาน จนกว่าจะมีมาตรฐานกลางเกิดขึ้นในอนาคต

(4) ข้อจำกัดและความเสี่ยงด้านเทคนิคในการใช้งาน BIPV ในขั้นตอนการใช้งานระบบ BIPV (Operation Stage)

โดยขั้นตอนนี้จะมีภารกิจสำคัญสองอย่างที่มีส่วนเกี่ยวข้องไม่อาจละเลยได้ คือ การตรวจสอบ (monitoring) และการบำรุงรักษา (maintenance) ระบบ BIPV และในขั้นตอนนี้ของช่วงชีวิตอาคาร พบข้อจำกัดและความเสี่ยงด้านเทคนิคในการใช้งาน BIPV ได้แก่

(4-A) การขาดระบบตรวจสอบสมรรถนะระบบ BIPV (System performance monitoring system)

สมรรถนะระบบ BIPV นั้นจำเป็นต้องมีการตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอ เพื่อติดตามประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบและเพื่อการปรับค่าของระบบให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด และจำเป็นต้องมีระบบเตือนเมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบ (fault alert systems)

(4-B) การขาดการรับประกันระบบ BIPV จากผู้ผลิต/ผู้จัดจำหน่าย

มีบริษัทผู้ผลิตและติดตั้งระบบ BIPV จำนวนน้อยที่กล้ารับประกันประสิทธิภาพการสร้างพลังงานได้อย่างครอบคลุมระยะเวลา energy project financing ทั่วไป (เช่น รับประกันประสิทธิภาพเป็นเวลา 10 ปี เป็นต้น)

(4-C) ความไม่ชัดเจนของขั้นตอนการบำรุงรักษา

ผู้วิจัยได้ให้ความหมายของคำว่า การบำรุงรักษา (maintenance) คือ การ (ไป)

ตรวจสอบและซ่อมแซมองค์ประกอบทางกายภาพ รวมถึงการทำความสะอาด ระบบ BIPV อย่างไรก็ตามในความเป็นจริง โครงการต่างๆมักไม่จัดสรรงบประมาณสำหรับการบำรุงรักษาระบบ BIPV เนื่องจากความละเลยและการไม่ทราบข้อมูลเรื่องนี้ ของเจ้าของอาคารและผู้ใช้อาคาร

(4-D) ความยากลำบากในการเปลี่ยนแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การเปลี่ยนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบ BIPV นั้นเป็นเรื่องที่มีความซับซ้อนเนื่องจากมีการเดินสายไฟฟ้าในระบบเป็นจำนวนมาก ปัญหานี้มีจุดเริ่มต้นมาตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบอาคาร เนื่องจากการที่ผู้ออกแบบอาคาร ไม่ได้จัดให้มีการเข้าถึงระบบ BIPV เพื่อให้สามารถบำรุงรักษา/เปลี่ยนอุปกรณ์ จากภายนอกได้อย่างสะดวก (easy access)

(4-E) ปัญหาการกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ (Galvanic corrosion) ของระบบ BIPV

ปัญหาสำคัญประเด็นนี้คือการเกิด การกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ (Galvanic corrosion) เกิดจากวัสดุโลหะที่เป็นตัวนำไฟฟ้าได้ 2 ชนิดที่ต่างกันหรือวัสดุชนิดเดียวกันแต่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างกัน มาเชื่อมต่อกันจะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้น ทำให้เกิดการไหลของ อิเล็กตรอนระหว่างวัสดุทั้งสองหากทำให้การสูญเสียอิเล็กตรอนของวัสดุที่มีค่าความต่างศักย์ต่ำกว่าและจะถูกกัดกร่อนในที่สุด ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้โครงสร้างของระบบ BIPV วิบัติได้ เนื่องจากการเลือกใช้โครงโลหะสำหรับยึดระบบ BIPV ที่ไม่เหมาะสมมาใช้ร่วมกัน นอกจากนั้นยังมีปัญหาการเกิดสนิมซึ่งอาจมีสาเหตุจากการใช้โครงสร้างโลหะที่ไม่มีคุณภาพ และจากสภาพแวดล้อม (ความชื้น เกลือในอากาศ ฯลฯ) อีกด้วย

ตารางที่ 2 ตารางสรุปข้อจำกัดและความเสี่ยงด้านเทคนิค ในการใช้งาน BIPV

Stages	Barrier IDs	Barriers
Design stage	1-A	การขาดความค้ำประกันของผู้ออกแบบอาคาร ถึงวิธีการบำรุงรักษา/เปลี่ยนอุปกรณ์ BIPV

Stages	Barrier IDs	Barriers
	1-B	การขาดแคลน แนวทาง ข้อกำหนดในการออกแบบ และกฎหมาย ด้านการออกแบบ BIPV
	1-C	การเลือก BIPV ผิดประเภทของผู้ออกแบบ
	1-D	การออกแบบโครงสร้างอาคารที่ผิดพลาด ทำให้ไม่สามารถรับ น้ำหนักระบบ PV ได้
	1-E	ปัญหาการเกิดน้ำหนักจร (live loads) บนระบบ BIPV
	1-F	ความท้าทายด้านการออกแบบที่สัมพันธ์กับสุขภาวะและความปลอดภัยของผู้ใช้อาคาร (1-F-1) ประเด็นการส่งผ่านความร้อนจากระบบ BIPV สู่อาคาร (1-F-2) ประเด็นความปลอดภัยด้านอัคคีภัย (1-F-3) ประเด็นการป้องกันเสียงรบกวน
	1-G	การออกแบบการวางตำแหน่งและปรับค่าระบบ PV ที่ไม่เหมาะสม
	Construction and Installation Stages	2-A
2-B		ผลจากการรั่วซึมของน้ำฝนเนื่องจากกระแสลม
2-C		ประเด็นด้านการเดินสายไฟฟ้าและการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า
2-D		ประเด็นพลังงานค้างในระบบ BIPV (Islanding)
Commissioning Stage	3-A	การขาดแนวทาง/คู่มือ/มาตรฐานการทดสอบการใช้งานของระบบ BIPV
Operation Stage	4-A	การขาดระบบตรวจสอบสมรรถนะระบบ BIPV
	4-B	การขาดการรับประกันระบบ BIPV จากผู้ผลิต/ผู้จัดจำหน่าย
	4-C	ความไม่ชัดเจนของขั้นตอนการบำรุงรักษา
	4-D	ความยากลำบากในการเปลี่ยนแผงเซลล์แสงอาทิตย์
	4-E	ปัญหาการกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ (Galvanic corrosion) ของระบบ BIPV

ผู้วิจัยได้ดำเนินการตรวจสอบความถูกต้อง (validate) ข้อค้นพบเรื่องข้อจำกัดและความเสี่ยงด้านเทคนิคในการใช้งาน BIPV ทั้ง 17 ประเด็น ด้วยการจัดประชุมเชิงปฏิบัติการ (workshop) ระดมความเห็นจากผู้ปฏิบัติวิชาชีพในอุตสาหกรรม BIPV ที่มีประสบการณ์สูง โดยการหารือและประเมินข้อจำกัดและความเสี่ยงด้านเทคนิคในการใช้งาน BIPV ที่ละประเด็น โดยวิธีการที่เป็นไปได้ในการขจัดข้อจำกัดและความเสี่ยงด้านเทคนิคในการใช้งาน BIPV (possible solutions) ที่เป็นข้อสรุปจาก workshop ครั้งนี้ได้ถูกจัดหมวดหมู่ ออกเป็น 2 ด้าน/แง่มุม (aspects) คือ ด้าน hardware และ ด้าน software ดังที่สรุปใน ตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แนวทางการจัดซื้อจำกัดและความเสี่ยงด้านเทคนิคในการใช้งาน BIPV
(Yang, 2015)

Stages	Barriers	Hardware		Software		
		Simulation & mathematical software	Innovated manufacture	Professional technical experience	Client motivation & management experience	Government support and initiation
Design stage	Lack of design consideration on how to facilitate BIPV maintenance and replacement	✓		✓		
	Lack of BIPV specific design standards and codes			✓		✓
	Incorrect choice of BIPV systems	✓		✓		
	Insufficient capacity of the building structure to carry BIPV panel weights	✓		✓		
	Mechanical stress due to live loads	✓		✓		
	Design challenges in relation to end users health and safety		✓			✓
	a. Heat transfer issues due to inherent design of BIPV					
	b. Fire safety					
	c. Noise protection					
	Inappropriate positioning of BIPV	✓	✓	✓		
Construction and Installation Stages	Failure of BIPV fixings		✓	✓		
	Wind-driven rain effects	✓		✓		
	Cabling and Connection issues		✓	✓		
	Islanding		✓			
Commissioning Stage	Lack of commissioning guidelines helping building owners to systematically check the functionalities of BIPV			✓	✓	✓
Operation Stage	Lack of system performance monitoring systems				✓	✓
	Lack of warranties				✓	✓
	Unclearly defined maintenance procedures				✓	✓
	Difficulties to replace BIPV modules	✓		✓		
	Galvanic corrosion		✓	✓		

เอกสารอ้างอิง

- Blankenship, R. E., Tiede, D. M., Barber, J., Brudvig, G. W., Fleming, G., Ghirardi, M., . . . Sayre, R. T. (2011). Comparing Photosynthetic and Photovoltaic Efficiencies and Recognizing the Potential for Improvement. *Science*, 805-809.
- Botkin, D. B., & Keller, E. A. (2011). *Environmental Science: Earth as a Living Planet* (8th Edition ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Clover, I. (2014, April 28). *BIPV sector to reach 1.15 GW by 2019, says report*. Retrieved July 25, 2015, from PV Magazine: http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/bipv-sector-to-reach-115-gw-by-2019--says-report_100014922/#axzz3gtmbbZLm
- Clover, I. (2015, February 6). *First Solar raises bar for CdTe with 21.5% efficiency record*. Retrieved April 15, 2015, from PV Magazine: http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/first-solar-raises-bar-for-cdte-with-215-efficiency-record_100018069/#axzz3ierWpUZT
- Coonen, S. (2007, October 24). *Technical Report from the 1 st Southeast Solar Summit Oak Ridge National Laboratory October 24-25, 2007*. Retrieved from Oak Ridge National Laboratory: <http://doc.xueqiu.com/1457a3acfff1183feb42de44.pdf>
- Frontini, F., Manfren, M., & Tagliabue, L. C. (2012). A case study of solar technologies adoption: Criteria for BIPV integration in sensitive built environment. *1st International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry (SHC 2012)* (pp. 1006-1015). San Francisco: International Energy Agency's Solar Heating and Cooling Programme (IEA SHC).

- Hall, S. (2014, September 8). *Benefits of building integrated photovoltaics*. Retrieved July 26, 2015, from Design Quarterly: <https://www.remynet.com/articles/benefits-of-building-integrated-photovoltaics/>
- Heinstein, P., Ballif, C., & Perret-Aebi, L.-E. (2013). Building Integrated Photovoltaics (BIPV): Review, Potentials, Barriers and Myths. *Green*, 1-32.
- IEA Statistics. (2014). *Electric power transmission and distribution losses (% of output): Thailand*. Retrieved from The World Bank: <http://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS?locations=TH>
- Ikedi, C. U., Okoroh, M., Dean, A., & Omer, S. (2010). Impact assessment for building integrated photovoltaic (BIPV). *ARCOM 2010 - Proceedings of the 26th Annual Conference* (pp. 1407-1415). Leeds, United Kingdom: Association of Researchers in Construction Management.
- Infinity PV. (2016). *Infinity PV Foil*. Retrieved from Infinity PV: <https://infinitypv.com/infinitypro/opv/foil>
- James, T., Goodrich, A., Woodhouse, M., Margolis, R., & Ong, S. (2011). *Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) in the Residential Sector: An Analysis of Installed Rooftop System Prices*. Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- Jelle, B. P., Breivik, C., & Røkenes, H. D. (2012). Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 69-96.
- Khan, E. W. (2014, August 10). *PV: Types of Solar Panel and Which one is the best PV Panel*. Retrieved July 8, 2015, from Electrical Technology: <http://www.electricaltechnology.org/2014/10/pv-types-of-solar-panel-best-pv-panel.html>
- Lam, K.-h., Close, J., & E.W.C., L. (2006). Dynamic model of BIPV system for performance prediction. *Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference* (pp. 2434-2437). Waikoloa, Hawaii: IEEE.
- Lau, P. (2015). *Building Integrated Photovoltaics in Honolulu, Hawai'i: Assessing urban retrofit application for power utilization and energy savings*. Honolulu, Hawaii, United States: D.Arch dissertation, The University of Hawai'i at Mānoa.
- Maehlum, M. A. (2015, April 6). *Best Thin Film Solar Panels - Amorphous, Cadmium Telluride or CIGS?* Retrieved July 17, 2015, from Energy Informative: <http://energyinformative.org/best-thin-film-solar-panels-amorphous-cadmium-telluride-cigs/>
- Maehlum, M. A. (2015, May 18). *Which Solar Panel Type is Best? Mono- vs. Polycrystalline vs. Thin Film*. Retrieved May 29, 2015, from Energy Informative: <http://energyinformative.org/best-solar-panel-monocrystalline-polycrystalline-thin-film/>

- Muller, M., Rodriguez, J., & Marion, B. (2009). Performance comparison of a BIPV roofing tile system in two mounting configurations. *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* (pp. 817-822). Philadelphia, PA, USA: IEEE.
- Muller, R. A. (2012). *Energy for future presidents: the science behind the headlines*. New York: W. W. Norton & Company, Inc.
- Onyx Solar. (2016). *Photovoltaic Double Glazed Insulation Units*. Retrieved from Onyx Solar: <http://www.onyx-solar.com/photovoltaic-double-glazed-insulating-units.html>
- Parida, B., Iniyar, S., & Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable*, 1625-1636.
- Paul, D., Mandal, S. N., Mukherjee, D., & Bhadra Chaudhuri, S. R. (2010). Optimization of significant insolation distribution parameters - A new approach towards BIPV system design. *Renewable Energy*, 2182-2191.
- Peng, C., Huang, Y., & Wu, Z. (2011). Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China. *Energy and Buildings*, 3592-3598.
- PV System Expo. (2015). *Hanergy Holding Group Limited*. Retrieved from PV System Expo: http://www.r-expo.jp/wsew2015/exhiSearch/FC/en/search_detail.php?id=21470
- Quesada, G., Rouse, D., Dutil, Y., Badache, M., & Hallé, S. (2012). A comprehensive review of solar facades. Opaque solar facades. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2820-2832.
- Solar-is-Future.com. (2016). *What does kilowatt peak (kWp) actually mean?* Retrieved from Welcome to solar-is-future.com: <http://www.solar-is-future.com/faq-glossary/faq/photovoltaic-technology-and-how-it-works/what-does-kilowatt-peak-kwp-actually-mean/>
- Strong, S. (2011, December 27). *Building Integrated Photovoltaic (BIPV)*. Retrieved July 25, 2015, from Whole Building Design Guide: <http://www.wbdg.org/resources/bipv.php>
- STS Solar Photovoltaic Projects. (2016). *Offers*. Retrieved from STS Solar Photovoltaic Projects: <http://solar.sts.bg/en/offers/>
- The Green Energy Society. (n.d.). *Photovoltaic (PV) roofing tiles and modules with integrated solar cells*. Retrieved from The Green Energy Society: <http://www.dgem.nl/nl/andere-duurzame-energie-oplossingen/bipv-dakbedekkingen>
- The National Center for Photovoltaics. (2016, April 20). *Research Cell Efficiency Records*. Retrieved from The National Center for Photovoltaics (NCPV), National Renewable Energy Laboratory: http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg
- White, S. (2015). *Solar Photovoltaic Basics: A Study Guide for the NABCEP Entry Level Exam*. Abingdon, Oxon: Routledge.
- Xuan, X. D., & Zheng, X. Y. (2007). Facade design in building integrated photovoltaics. *ISES World Congress 2007* (pp. 384-387). Beijing, China: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Yang, R. J. (2015). Overcoming technical barriers and risks in the application of building integrated photovoltaic (BIPV): hardware and software strategies. *Automation in Construction*, 92-102.
- Yoon, J.-H., Song, J., & Lee, S.-J. (2011). Practical application of building integrated photovoltaic (BIPV) system using transparent amorphous silicon thin-film PV module. *Solar Energy*, 723-733.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (n.d.). *แผนที่พลังงานแสงอาทิตย์*. Retrieved มิถุนายน 25, พ.ศ.2558, from กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน:
<http://www2.dede.go.th/dede/renew/sola/mapmenu.html>
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (n.d.). *ชุดการจัดแสดงที่ 54 : การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Living Head/Photovoltaic Operation)*. Retrieved from 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)
- ชีวะเกตุ, ช. (2000, กรกฎาคม). *การผลิตไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์*. Retrieved มีนาคม 1, 2015, from สำนักนโยบายและแผนพลังงาน: <http://www.eppo.go.th/vrs/VRS49-09-Solar.html>

บทที่ 2

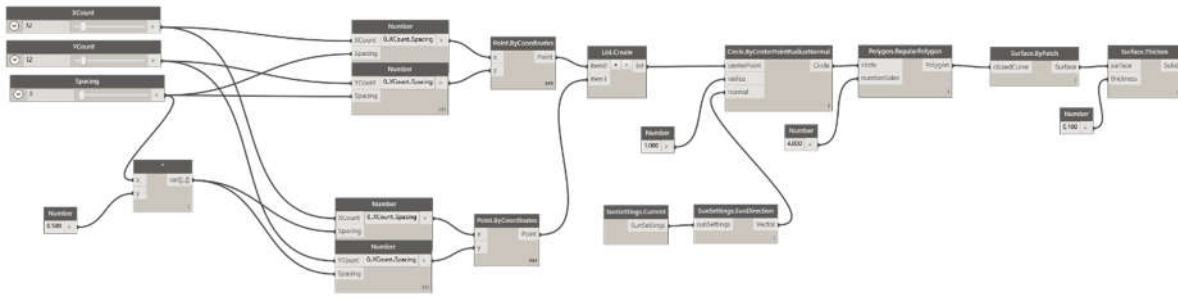
กรณีศึกษาแนวทางการใช้ Parametric Modeling ออกแบบองค์ประกอบอาคารผสมเซลล์แสงอาทิตย์

กรณีศึกษาที่ 1 การสร้างเรขาคณิตที่สามารถปรับมุมตามทิศทางดวงอาทิตย์ได้อย่างอัตโนมัติ ตามแนวทางของ Autodesk Building Solutions

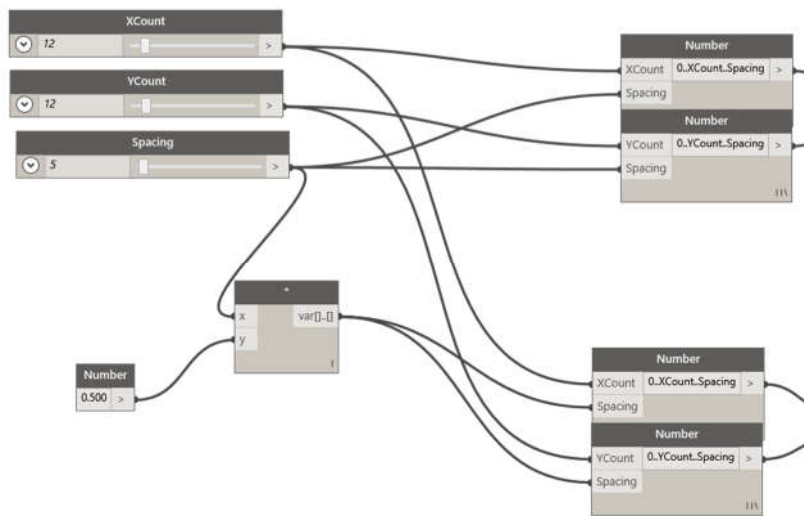
แม้ว่าในปัจจุบันแผงโซลาร์เซลล์ในระบบ BIPV นั้นจะมีราคาถูกลงเป็นอย่างมาก แต่การออกแบบให้สามารถใช้ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างสูงสุด ก็เป็นสิ่งสำคัญทำให้การลงทุนระบบ BIPV นั้นมีความคุ้มค่า พบว่าการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ในระบบ BIPV ส่วนใหญ่จะเป็นแบบติดตั้งเอียงจากแนวระนาบเท่ากับองศาของ Latitude ที่ระบบติดตั้งอยู่ (เช่น ถ้าระบบติดตั้งที่ กรุงเทพมหานคร แผงโซลาร์เซลล์จะเอียง ประมาณ 13-14 องศา จากแนวระนาบ หันสู่ทิศใต้ หรือโดยค่าเฉลี่ยประมาณ 15 องศา สำหรับการติดตั้งในประเทศไทย) ซึ่งทิศทางที่คงที่เช่นนี้ แผงโซลาร์เซลล์จะไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างเต็มประสิทธิภาพตลอดทั้งวัน การออกแบบให้ระบบ BIPV สามารถหันหรือเคลื่อนที่ติดตามทิศทางของดวงอาทิตย์จึงเป็นทางเลือกสำคัญ ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของแผงโซลาร์เซลล์ให้สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพได้ โดยพบว่าเทคโนโลยีปรับมุมแผงโซลาร์เซลล์ตามทิศทางดวงอาทิตย์ (Solar Tracker) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ถึง 20% สำหรับระบบปรับมุมแบบ 1 แกน (1 Axis: ปรับมุมตามแนวระนาบ) 30% สำหรับระบบปรับมุมแบบ Azimuth (ปรับมุมตามแนวระนาบแต่ติดตั้งบนแผงแนวตั้ง) และสูงถึง 35% สำหรับระบบปรับมุมแบบ 2 แกน (2 Axis: ปรับมุมได้ทั้งตามแนวระนาบและแนวตั้ง) (GTM: Green Tech Media, 2012)

ช่องการแพร่ภาพผ่านสื่อออนไลน์ Youtube (Youtube Channels) ช่อง Autodesk Building Solutions ได้เผยแพร่วิดีโอการสอนใช้งานโปรแกรม Dynamo ซึ่งเป็น Visual Programming และ Add-on ในโปรแกรม Autodesk Revit เรื่อง Computational Logic I ที่มีเนื้อหาการสอนเพื่อการเขียน Script เพื่อสร้างเรขาคณิตที่สามารถหันทิศทางระนาบตามทิศทางดวงอาทิตย์ได้อย่างอัตโนมัติ ซึ่งเนื้อหาในวิดีโอนี้เป็นประโยชน์อย่างมากต่อการประยุกต์ใช้ในการออกแบบ-สร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM: Building Information Modeling) ให้สามารถปรับมุมมององค์ประกอบอาคารให้หันเรขาคณิตส่วนที่ต้องการให้ปรับมุมตามทิศทางดวงอาทิตย์ได้ โดยวิดีโอมีการนำเสนออย่างเป็นลำดับขั้นตอน ผู้อ่านสามารถศึกษารายละเอียดได้ที่ URL: <https://www.youtube.com/watch?v=rjiijy-yQFds>

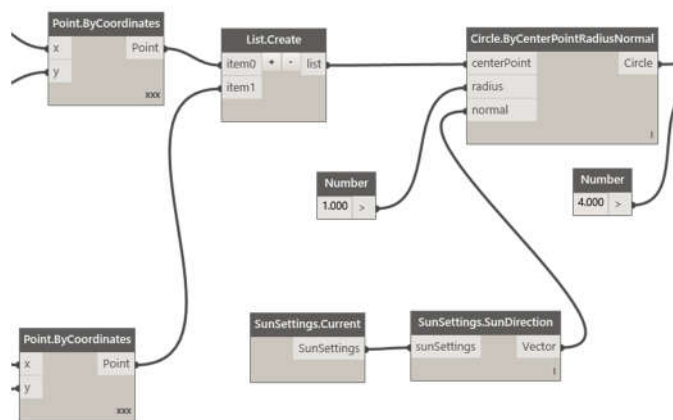
จากการศึกษาตามแหล่งข้อมูลดังกล่าว พบว่าการสร้างเรขาคณิตด้วยวิธีการนี้สามารถนำมาใช้ในการออกแบบอาคารได้เพียงขั้นพื้นฐานเท่านั้น เพราะเป็นการนำเสนอเนื้อหาสำหรับผู้เริ่มต้นใช้งานโปรแกรม Dynamo แต่ด้วยการนำเสนอ โดยเฉพาะเรื่องตรรกะที่นำมาใช้ และการเลือกใช้ Nodes นั้น ผู้ใช้งานสามารถนำเนื้อหาไปประยุกต์ใช้กับการสร้างแบบจำลองอาคารที่ซับซ้อนและมีขนาดใหญ่กว่านี้ได้ต่อไป



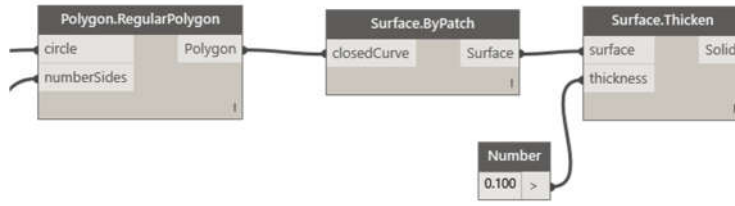
รูปที่ 14 ภาพรวมของ Dynamo Script เรขาคณิตที่สามารถปรับมุมตามทิศทางดวงอาทิตย์ได้อย่างอัตโนมัติ



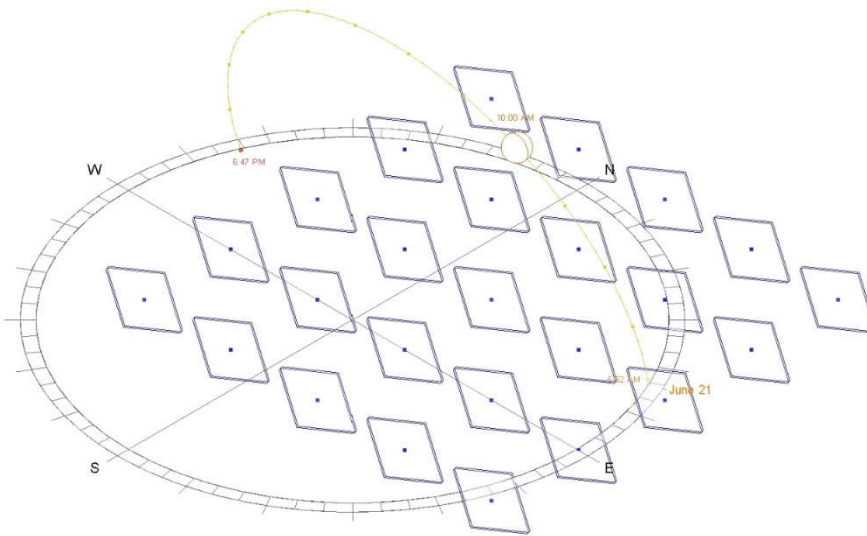
รูปที่ 15 ภาพขยายของ Dynamo Script ส่วนที่ 1



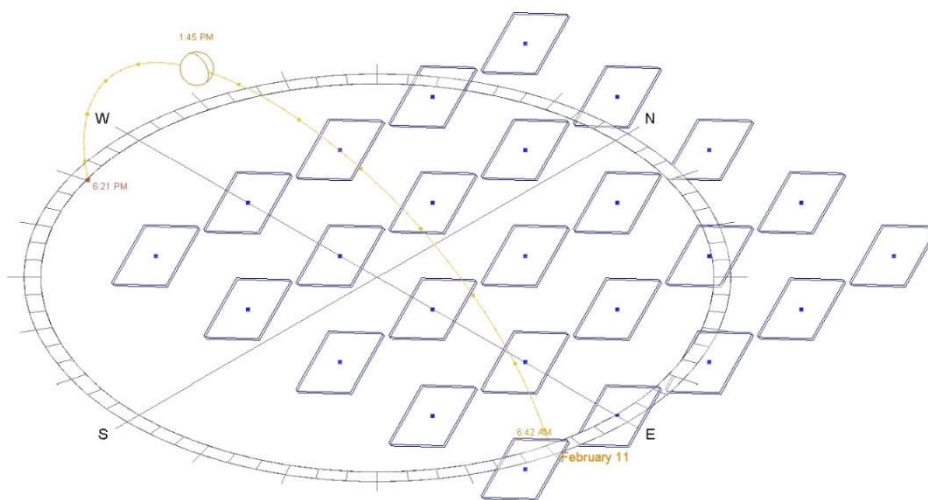
รูปที่ 16 ภาพขยายของ Dynamo Script ส่วนที่ 2



รูปที่ 17 ภาพขยายของ Dynamo Script ส่วนที่ 3



รูปที่ 18 เรขาคณิตที่เกิดจาก Dynamo Script ณ เวลา 10.00 น.



รูปที่ 19 เรขาคณิตที่เกิดจาก Dynamo Script ณ เวลา 13.45 น.

เอกสารอ้างอิง

GTM: Green Tech Media. (2012, November 28). *Solar Balance-of-System: To Track or Not to Track, Part I*. Retrieved from GTM: Green Tech Media:
<http://www.greentechmedia.com/articles/read/Solar-Balance-of-System-To-Track-or-Not-to-Track-Part-I>

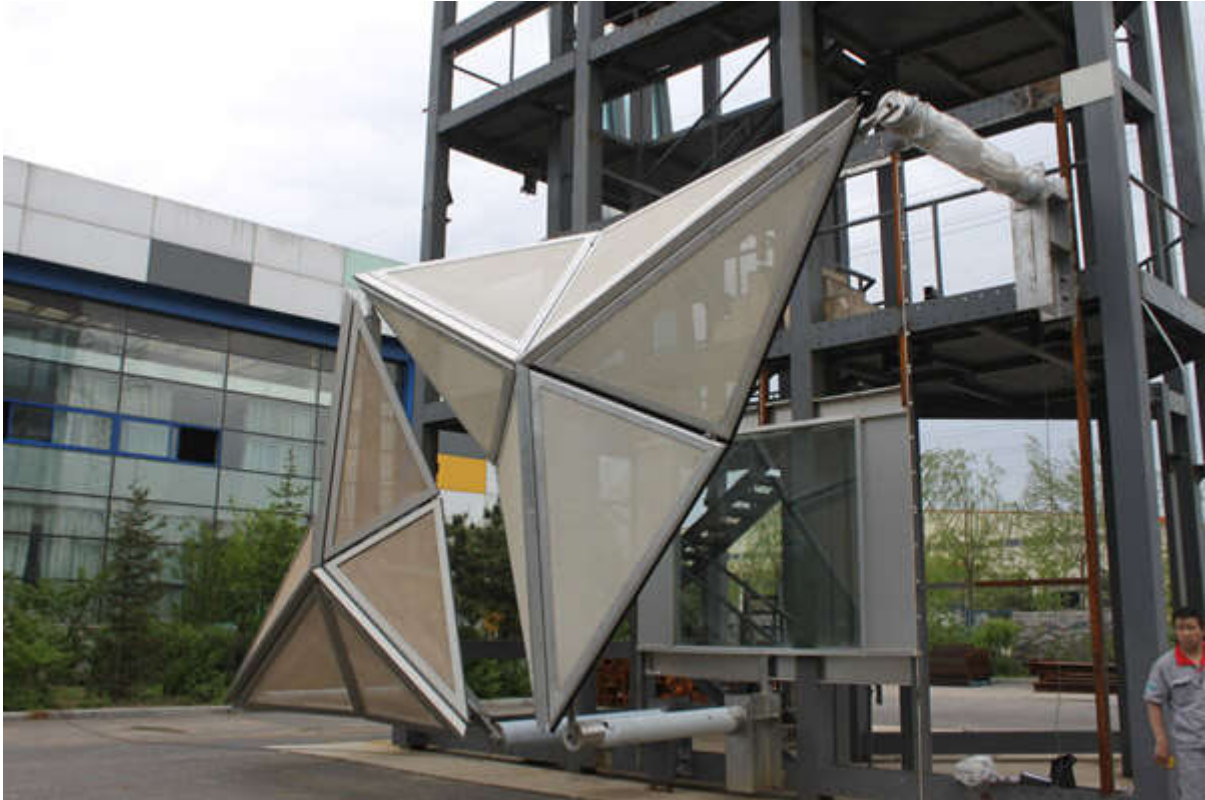
กรณีศึกษาการใช้ Parametric Modeling ออกแบบองค์ประกอบอาคารผสานเซลล์แสงอาทิตย์

กรณีศึกษาที่ 2 Kinetic Façade ตามแนวทางอาคาร Al Bahar (Abu Dhabi) โดยวิธีการของ Dr. Jeremy Roh

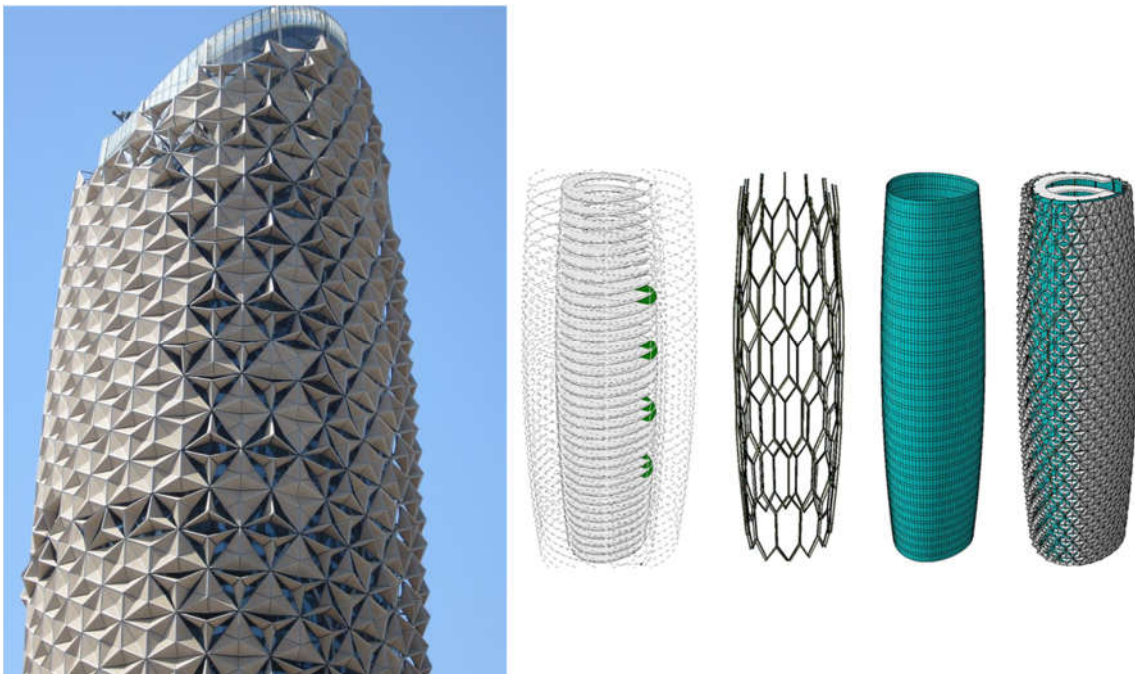
อาคาร Al Bahar ตั้งอยู่ ณ เมือง Abu Dhabi เมืองหลวงของประเทศ United Arab Emirates ซึ่งเป็นประเทศที่มีภูมิอากาศแบบทะเลทราย อากาศมีอุณหภูมิสูงในเวลากลางวัน และในบางช่วงเวลาในแต่ละปีจะมีพายุทราย ผู้ออกแบบอาคารหลังนี้คือ บริษัท Aedas ซึ่งได้นำผนังอาคารที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ (Kinetic Façade) มาใช้เพื่อการจัดการแสงและพลังงานรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบอาคาร จากการประยุกต์ใช้รูปแบบอุปกรณ์บังแดดดั้งเดิมที่มีอยู่ในท้องถิ่นคือ Mashrabiya มาเป็นรูปแบบของชั้นอุปกรณ์บังแดดที่ปรับเปลี่ยนได้ 1,000 ชั้นทั่วทั้งผนังอาคาร ซึ่ง Kinetic Façade ของอาคารนี้เป็นวัสดุ PTFE (Polytetrafluoroethylene หรือชื่อทางการค้าคือ Teflon) ถูกควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ให้สามารถเปิด-ปิดได้โดยทั้งอัตโนมัติและด้วยระบบมือ ซึ่งทำให้สามารถลดปริมาณรังสีอาทิตย์ตกกระทบผิวอาคารได้ถึง 50% ซึ่งมีผลให้ลดการใช้พลังงานในการปรับอากาศภายในอาคารอีกด้วย (Zvironaite, Knol, และ Kneepens, 2014)



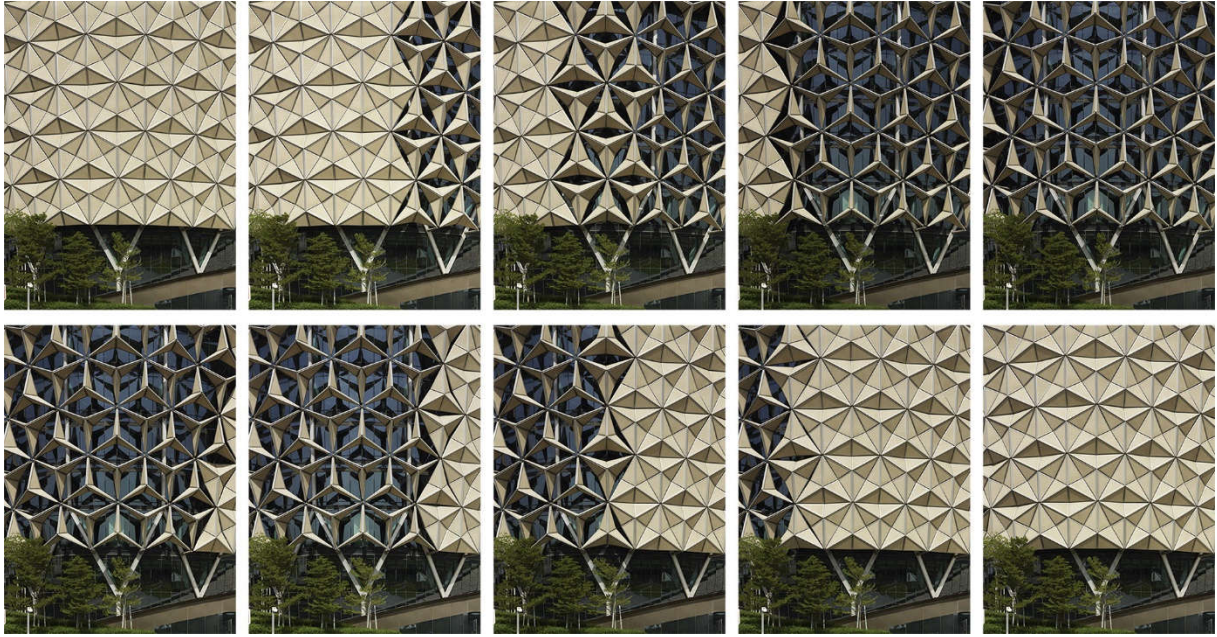
รูปที่ 20 รูปถ่ายอาคาร Al Bahar (Cilento, 2012)



รูปที่ 21 (ซ้าย) Kinetic Façade ของอาคาร Al Bahar ขณะติดตั้ง (Idea Channels, 2012)



รูปที่ 22 (ซ้าย) รูปถ่ายอาคาร Al Bahar (Al-Ahwal.blogspot.com, 2012) (ขวา) กราฟฟิกแสดงลำดับชั้นของโครงสร้างและเรขาคณิตของผิวอาคาร Al Bahar (Idea Channels, 2012)



รูปที่ 23 แสดงลักษณะการเปิด-ปิด Kinetic Façade ของอาคาร Al Bahar (Schielke, 2014)

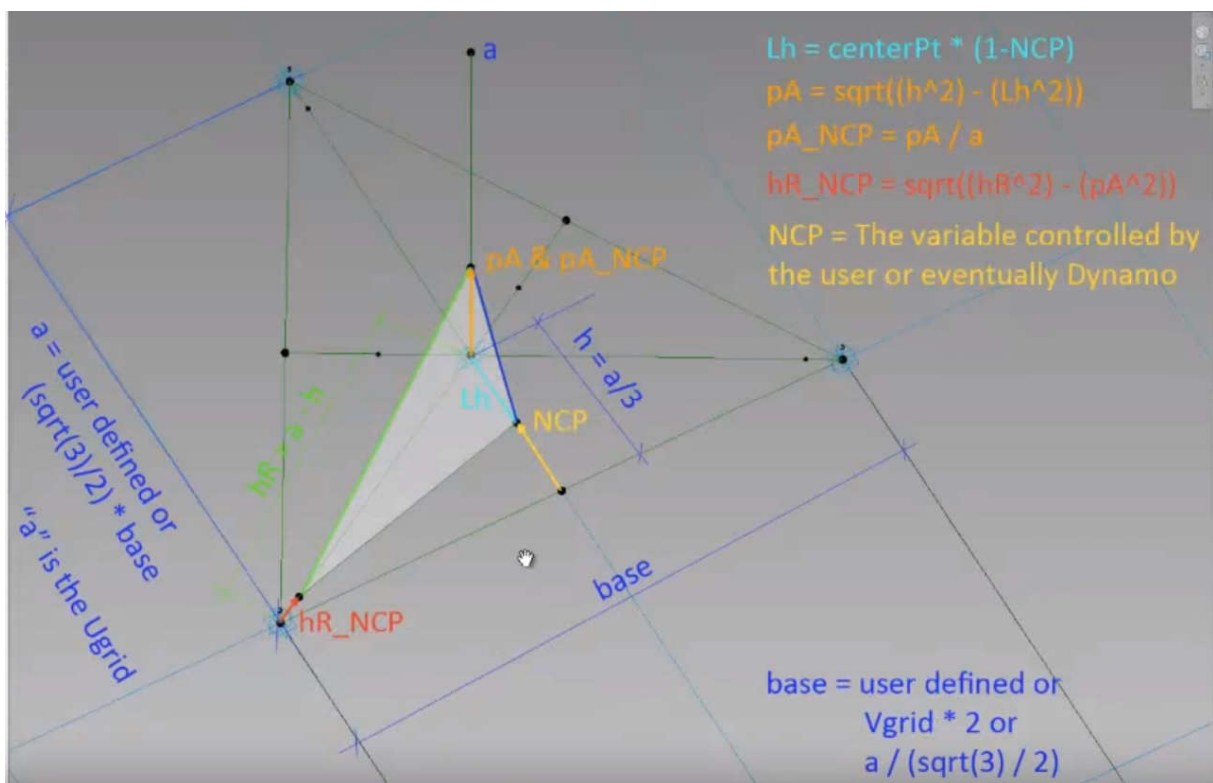
เปลือกอาคารที่มีลักษณะเป็น Kinetic Façade ของอาคาร Al Bahar นี้เป็นกรณีศึกษาสำคัญของการออกแบบอาคารประหยัดพลังงาน เนื่องจากไม่เพียงเพราะสามารถลดการใช้พลังงานในอาคารได้อย่างมาก แต่ยังมีความสวยงามจากการนำศิลปะในองค์ประกอบอาคารพื้นถิ่นมาใช้ และสร้างอัตลักษณ์ (Identity) ให้อาคารเป็นที่น่าจดจำแก่ผู้พบเห็นและใช้อาคารอีกด้วย โดยอาคาร Al Bahar นี้เป็นที่รู้จักกันในท้องถิ่นว่า อาคารสับปะรด (Pineapple Building) และในขณะที่เปิดใช้งาน อาคารนี้ยังมี Dynamic (Kinetic) Façade ขนาดใหญ่ที่สุดในโลกอีกด้วย (Welch, 2013)

การสร้างแบบจำลองสารสนเทศ Kinetic Façade ของอาคาร Al Bahar นั้นมีความซับซ้อน เนื่องจากนำลักษณะของ Mashrabiya คือ แผงไม้สลักที่ใช้ปิดกั้นองค์ประกอบของอาคารหรือช่องหน้าต่าง เพื่อความปลอดภัยและกันแสงแดด ที่นิยมใช้และเป็นลักษณะพื้นถิ่นของอาคารในทวีปตะวันออกกลาง มาผสมผสานกับเทคนิคการพับกระดาษของประเทศญี่ปุ่น ที่เรียกว่า Origami ออกแบบให้เป็น Kinetic Façade ที่มีการพับของวัสดุแข็งแต่เป็นสามมิติที่มีพื้นฐานจากรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า

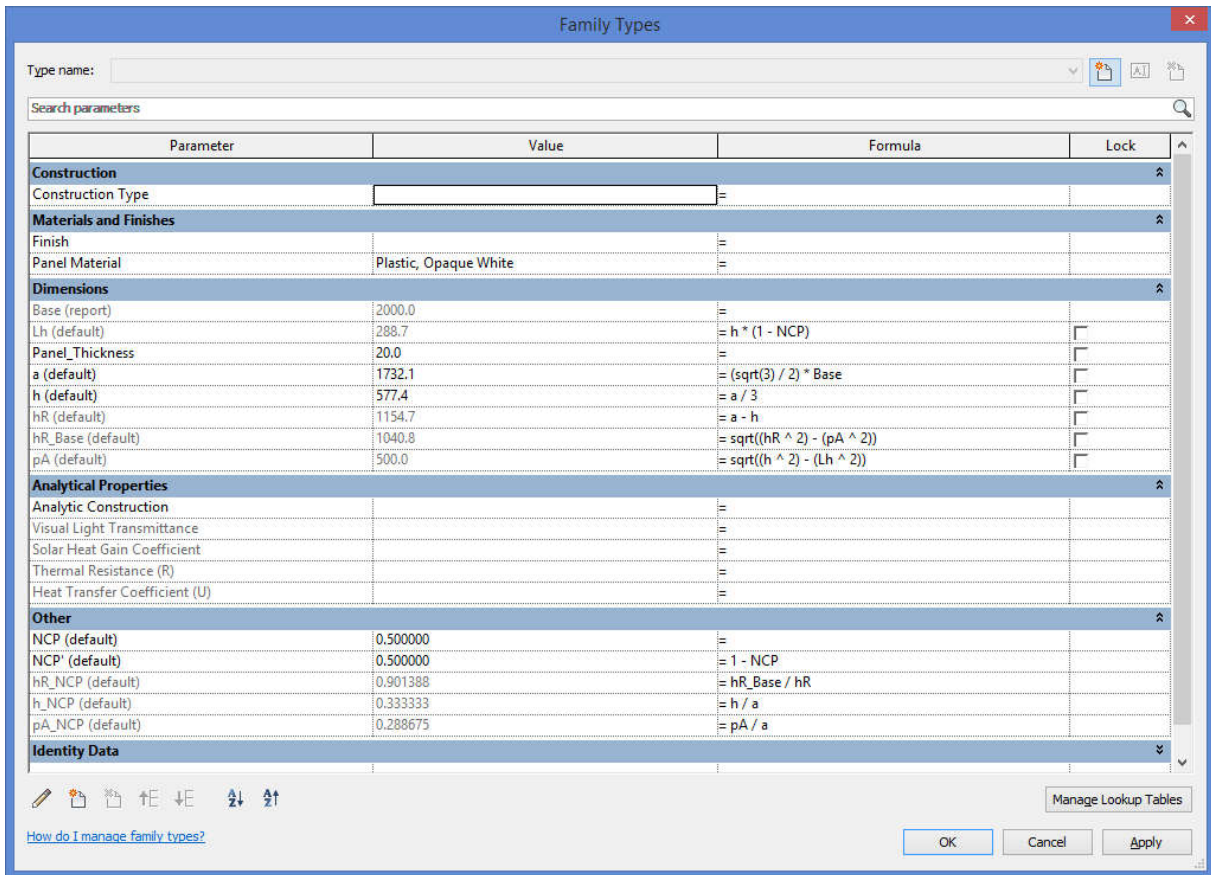
ในเดือนกุมภาพันธ์ ปีค.ศ. 2015 Dr. Jeremy Roh ซึ่งเป็นอาจารย์แห่งมหาวิทยาลัย North Carolina และได้เผยแพร่วิธีการ Parametric Modeling การสร้าง Kinetic Façade ของอาคาร Al Bahar อย่างละเอียด เนื่องจากการสร้างแบบจำลองสารสนเทศนี้มีความละเอียด ทั้งการสร้าง Adaptive Panels ในโปรแกรม Autodesk Revit รวมทั้งการสร้าง Script ให้ขึ้น Panels นั้นสามารถปรับมุมตามทิศทางดวงอาทิตย์ได้อย่างอัตโนมัติ ด้วยโปรแกรม Dynamo ทำให้ Dr. Jeremy Roh ต้องบันทึกวิดีโอของกระบวนการนี้แบ่งออกเป็น 4 ตอน ที่ URL: <https://www.youtube.com/user/zedjr01/featured>

เมื่อดำเนินการ Parametric Modeling การสร้าง Kinetic Façade ของอาคาร Al Bahar ตามวิธีการของ Dr. Jeremy Roh อย่างละเอียด พบว่าวิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัดเนื่องจาก เมื่อมุมระหว่างทิศทางดวงอาทิตย์กับทิศทางตั้งฉากกับ Kinetic Façade มีความแตกต่างกันมากกว่าหรือเท่ากับ 100° จะทำให้ค่า NCP มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1.00 ซึ่งจะทำให้โปรแกรม Autodesk Revit ไม่สามารถสร้าง Geometry ของ Façade ได้ ทำให้จำเป็นต้องแก้ไข Script ในโปรแกรมใน Dynamo ให้เมื่อค่า NCP มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ

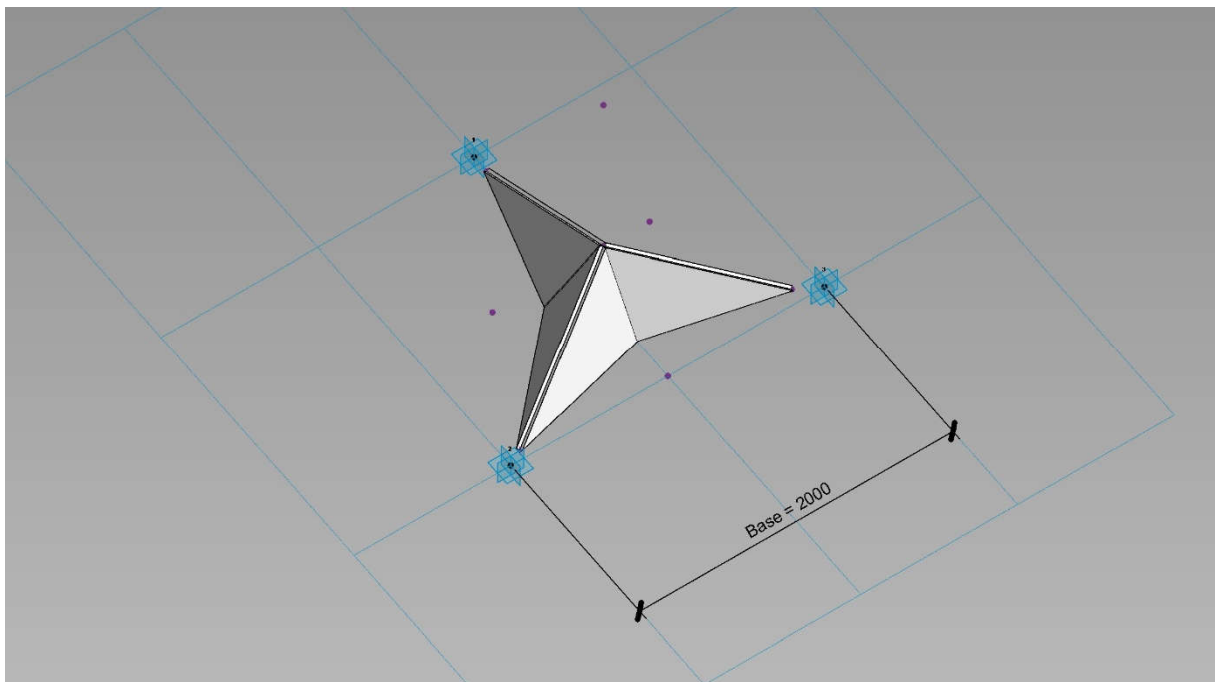
1.00 จะต้องปรับค่าให้เป็นค่าคงที่ที่ไม่มากกว่า 0.99 จึงจะทำให้โปรแกรม Autodesk Revit สามารถสร้าง Geometry ของ Façade ได้



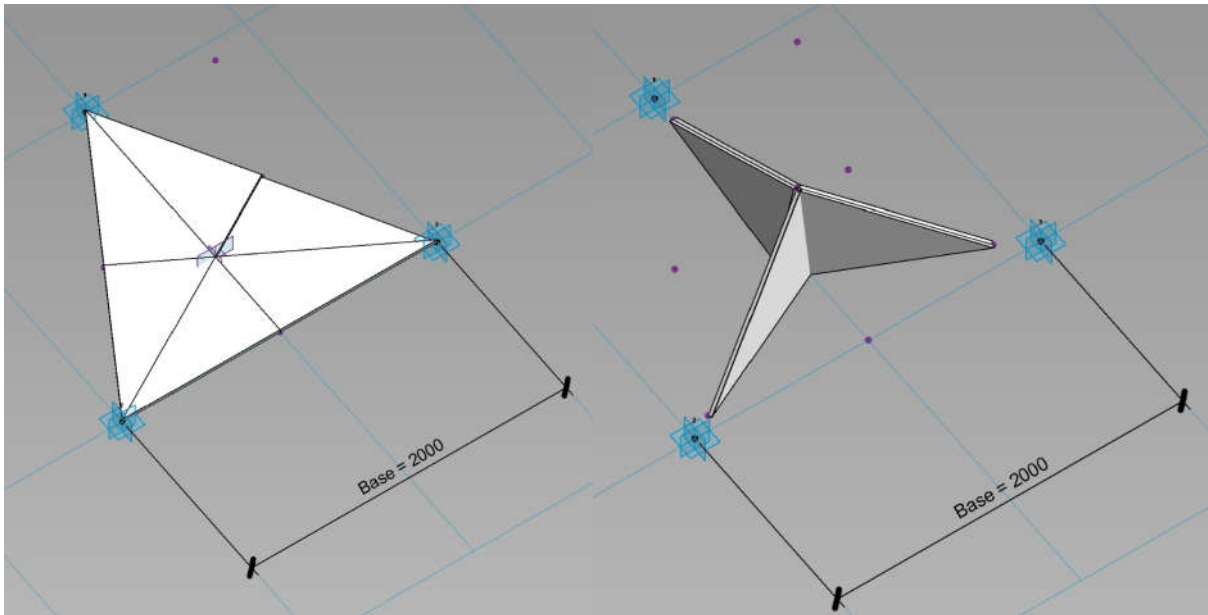
รูปที่ 24 แสดงความสัมพันธ์ของ parameters ต่างๆ ในการสร้าง parametric modeling สำหรับ Kinetic Façade ของอาคาร Al Bahar (Roh, 2015)



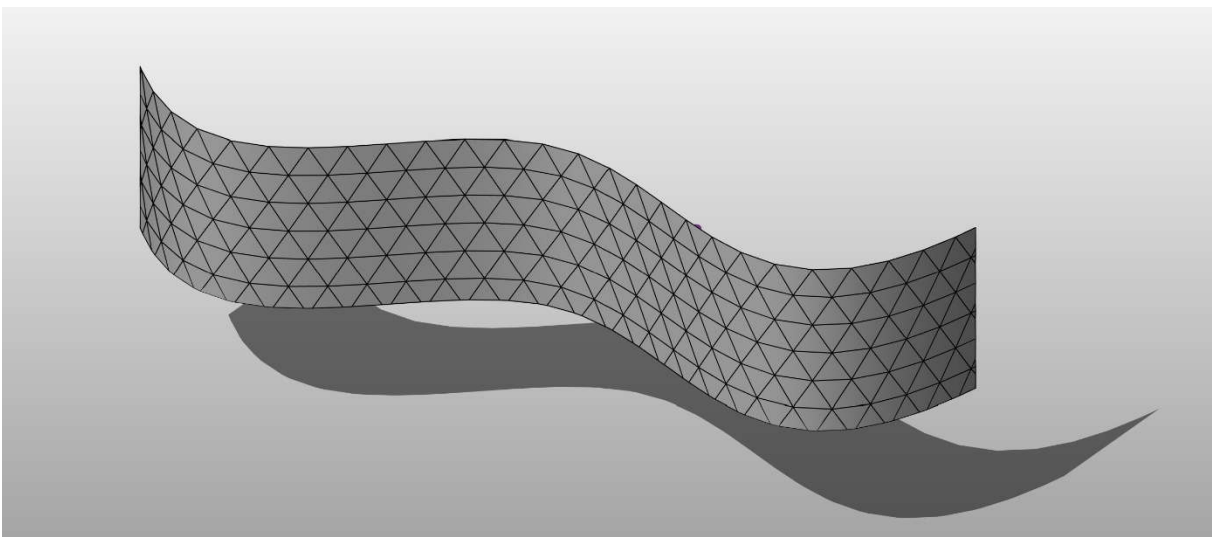
รูปที่ 25 Parameters ของ Kinetic Façade แต่ละชิ้น ในหน้าต่าง Family Types ในโปรแกรม Revit 2017



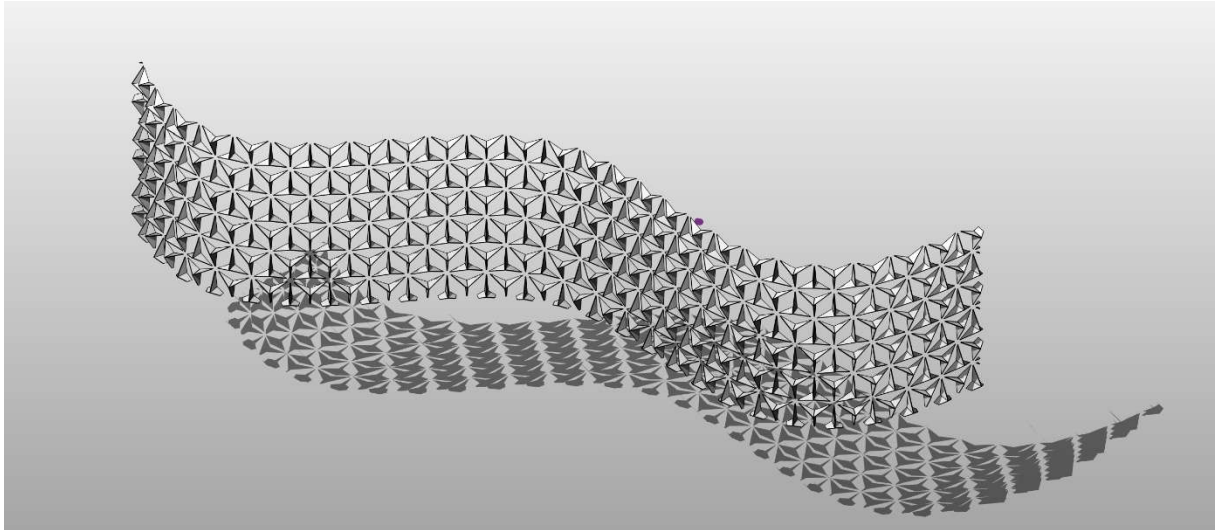
รูปที่ 26 ลักษณะของ Kinetic Façade แต่ละชิ้น ในหน้าต่าง Family Types ในโปรแกรม Revit 2017



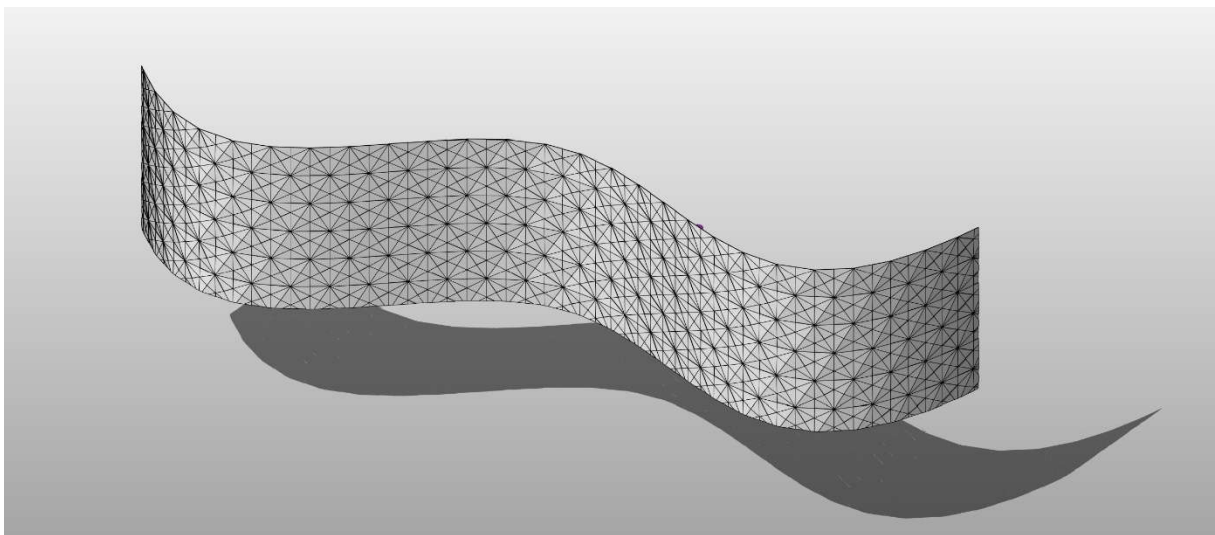
รูปที่ 27 ลักษณะของ Kinetic Façade แต่ละชิ้น ในหน้าต่าง Family Types ในโปรแกรม Revit 2017
(ขวา) NCP = 0 (ซ้าย) NCP = 0.95



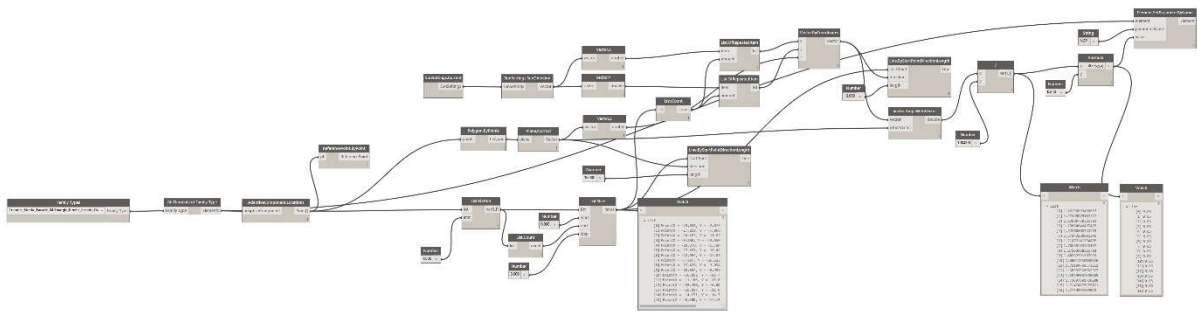
รูปที่ 28 ระนาบฐานสำหรับ Kinetic Façades ใน Conceptual Mass Environment โปรแกรม Revit 2017 ซึ่งมีโครงสร้างเป็น Triangle (Flat) มีความกว้างฐานของโครงสามเหลี่ยมด้านเท่า = $V \text{ Grid} * 2$ และมีความสูงในแนวตั้งฉากของสามเหลี่ยมด้านเท่า = $((\sqrt{3}) / 2) * (V \text{ Grid} * 2)$



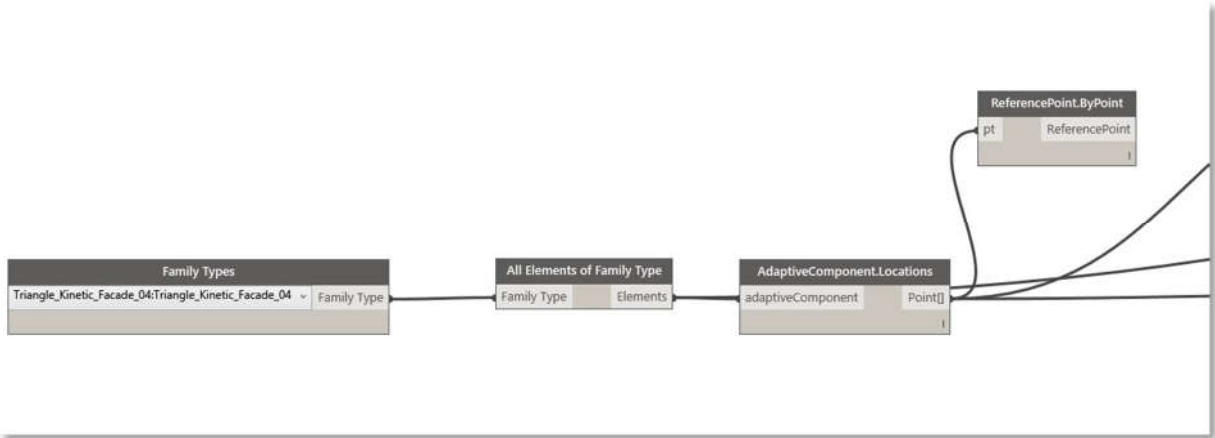
รูปที่ 29 ลักษณะเมื่อนำ Kinetic Façades มาประกอบกับระนาบฐานใน Conceptual Mass Environment ในโปรแกรม Revit 2017 โดยกำหนดค่า parameter NCP = 0.9 เหมือนกันทุกชิ้น



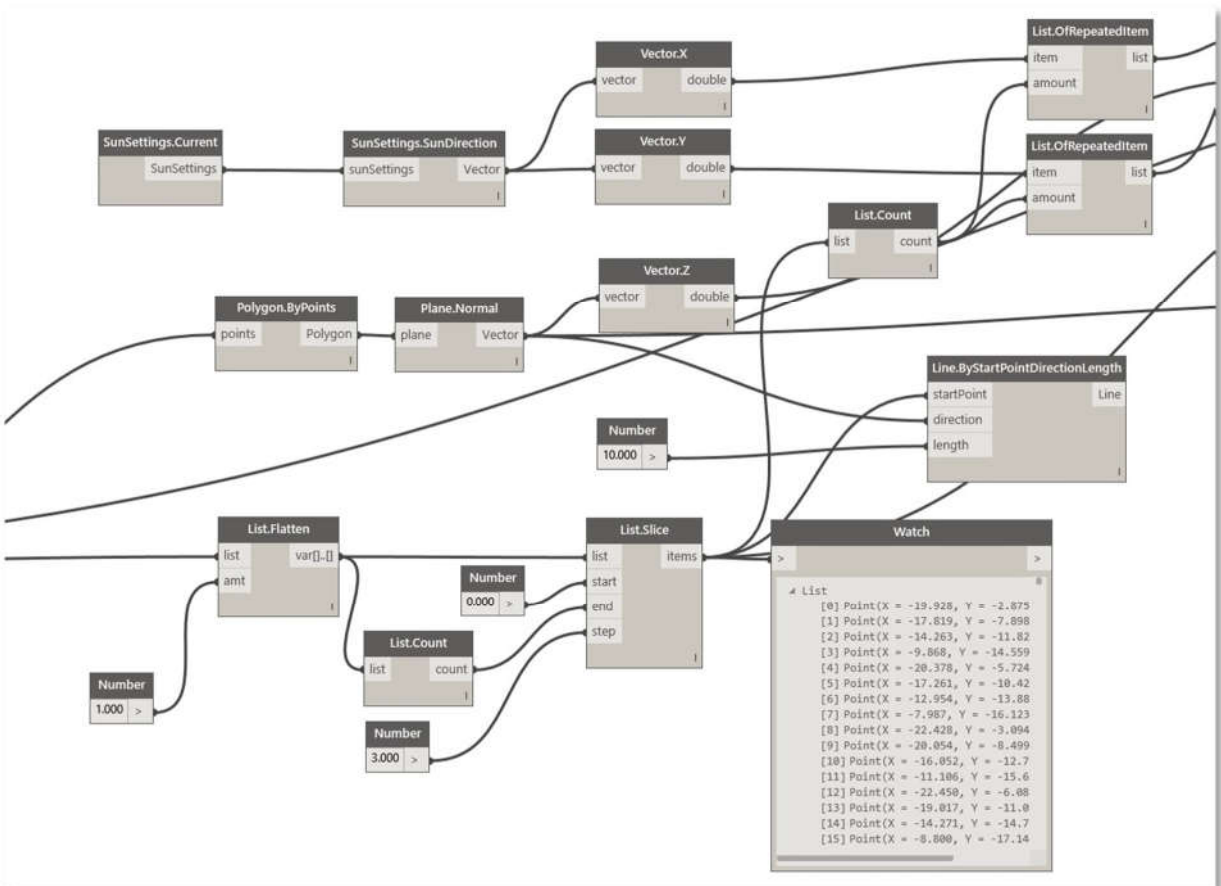
รูปที่ 30 ลักษณะเมื่อนำ Kinetic Façades มาประกอบกับระนาบฐานใน Conceptual Mass Environment ในโปรแกรม Revit 2017 โดยกำหนดค่า parameter NCP = 0 เหมือนกันทุกชิ้น



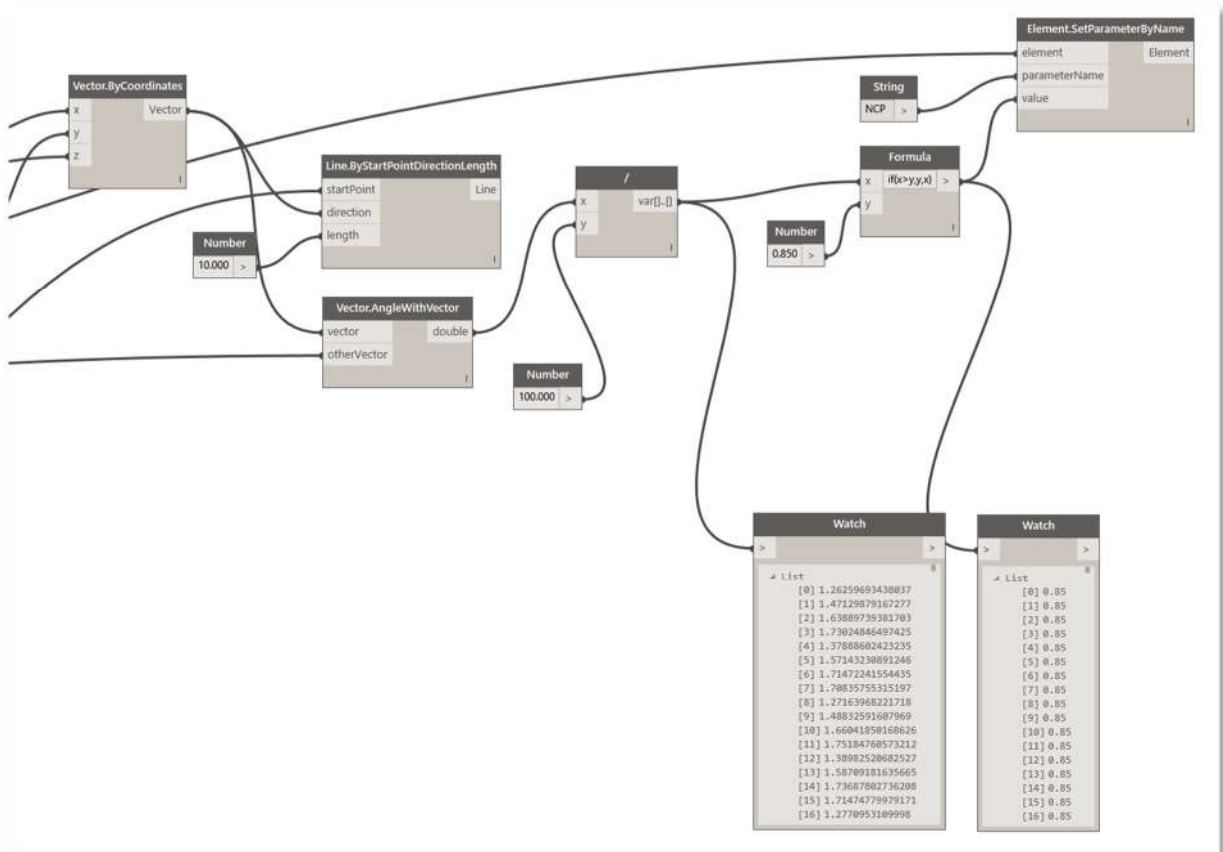
รูปที่ 31 ภาพรวมของ Script ที่สร้างขึ้นในโปรแกรม Dynamo ซึ่งเป็นโปรแกรม Visual Programming และเป็น add-in สำหรับโปรแกรม Revit 2017



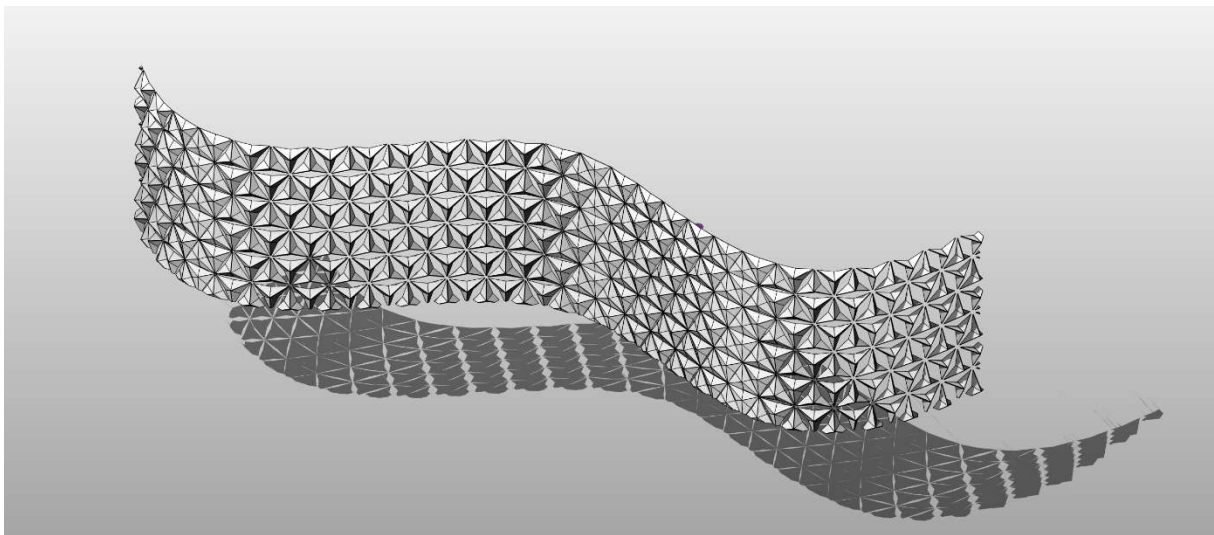
รูปที่ 32 ภาพขยาย Script ในโปรแกรม Dynamo ส่วนที่ 1



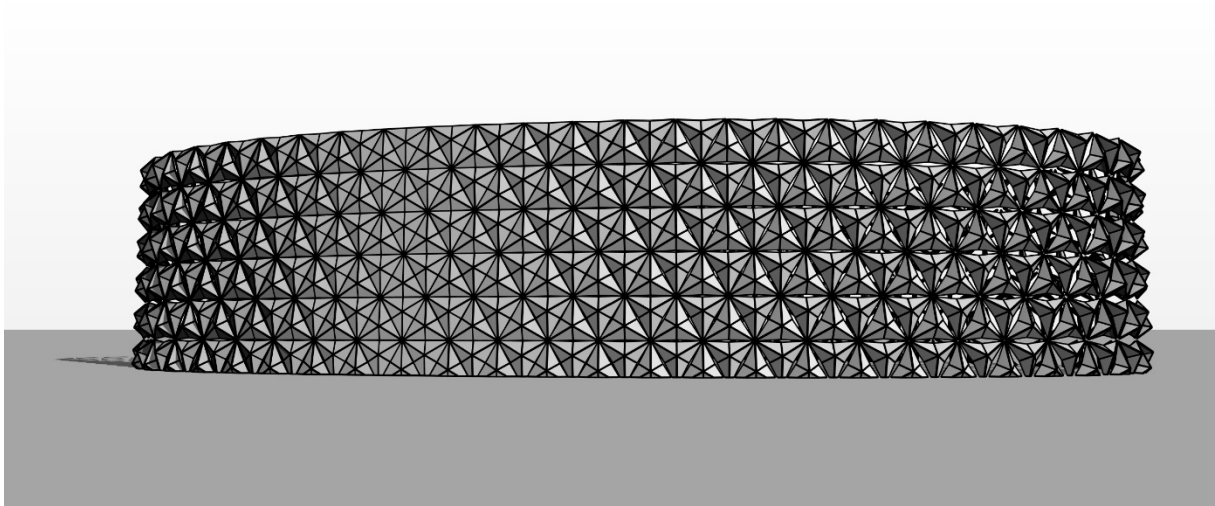
รูปที่ 33 ภาพขยาย Script ในโปรแกรม Dynamo ส่วนที่ 2



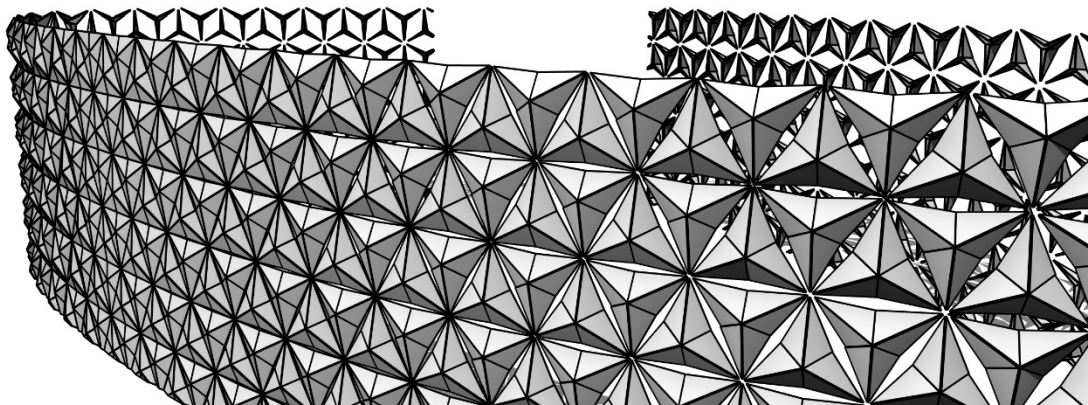
รูปที่ 34 ภาพขยาย Script ในโปรแกรม Dynamo ส่วนที่ 3



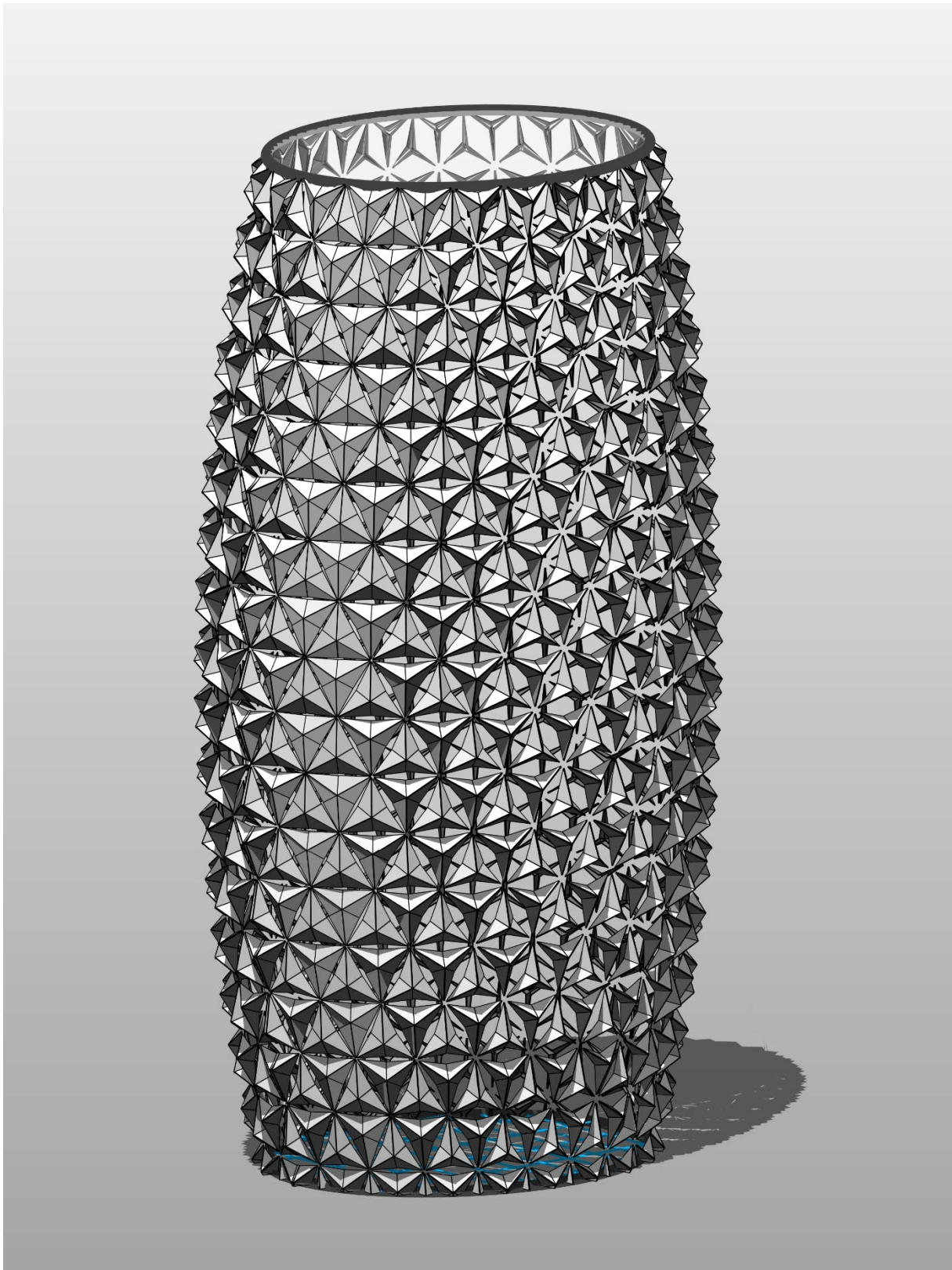
รูปที่ 35 ภาพ Kinetic Façades ต้นแบบที่ 1 เมื่อคำนวณให้การเปิด-ปิดสอดคล้องกับทิศทางของดวงอาทิตย์แล้ว โดยมีสถานที่ตั้งอยู่ที่ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย (Latitude 13.7333° , Longitude 100.5°) วัน เหมายัน (Winter Solstice) 21 ธันวาคม ค.ศ. 2016 เวลา 11.00 น.



รูปที่ 36 ภาพ Kinetic Façades ต้นแบบที่ 2 เมื่อคำนวณให้การเปิด-ปิดสอดคล้องกับทิศทางของดวงอาทิตย์แล้ว โดยมีสถานที่ตั้งอยู่ที่ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย วัน Winter Solstice เวลา 13.00 น.



รูปที่ 37 ภาพ Kinetic Façades ต้นแบบที่ 2 เมื่อคำนวณให้การเปิด-ปิดสอดคล้องกับทิศทางของดวงอาทิตย์แล้ว พบว่าบาง Geometry ที่มีมุมตั้งฉากต่างจากมุมตกกระทบของดวงอาทิตย์มากกว่า 100° ก็ไม่มีความผิดพลาดในการสร้างขึ้น Kinetic Façades ดังกล่าว



รูปที่ 38 ภาพ Kinetic Façades ต้นแบบที่ 3 เมื่อคำนวณให้การเปิด-ปิดสอดคล้องกับทิศทางของดวงอาทิตย์แล้ว โดยมีสถานที่ตั้งอยู่ที่ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย วันครีษมายัน (Summer Solstice) เวลา 12.00 น.



รูปที่ 39 ภาพ Kinetic Façades ต้นแบบที่ 3 เมื่อคำนวณให้การเปิด-ปิดสอดคล้องกับทิศทางของดวงอาทิตย์แล้ว โดยมีสถานที่ตั้งอยู่ที่ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย วันครีษมายัน (Summer Solstice) เวลา 13.00 น.

เอกสารอ้างอิง

- Adrian Welch. (21 November 2013). *Al Bahar Towers, Abu Dhabi*. เข้าถึงได้จาก e-architect: <http://www.e-architect.co.uk/dubai/al-bahar-towers-abu-dhabi>
- Al-Ahwal.blogspot.com. (2012). *Al Bahr Towers / Abu Dhabi / by: Aedas*. เข้าถึงได้จาก Al-Ahwal.blogspot.com: <http://al-ahwal.blogspot.com/2012/10/al-bahr-towers-abu-dhabi-by-aedas.html>
- Idea Channels. (2012). *Intelligent Shading System Unfurled On Abu Dhabi's Al Bahar Towers*. เข้าถึงได้จาก Idea Channels: <http://ideachannels.com/architecture/2237/intelligent-shading-system-unfurled-on-abu-dhabi-s-al-bahar-towers.htm>
- Jeremy Roh. (12 February 2015). *20150212 Computational Practice Lab 06 092*. เข้าถึงได้จาก Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=mqpWpcDvt7A>
- Karen Cilento. (2 September 2012). *Al Bahar Towers Responsive Facade / Aedas*. เข้าถึงได้จาก ArchDaily: <http://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas>
- Kotryna Zvironaitė, Alois Knol, และ Steven Kneepens. (2014). *Kinetica: A playful way through the world of moving facades*. เข้าถึงได้จาก Delft University of Technology: <http://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:cabfd871-7ea9-465a-9f78-2a24fdcb9430?collection=research>
- Thomas Schielke. (29 May 2014). *Light Matters: Mashrabiya - Translating Tradition into Dynamic Facades*. เข้าถึงได้จาก Arch Daily: <http://www.archdaily.com/510226/light-matters-mashrabiya-translating-tradition-into-dynamic-facades>