



การศึกษาเชิงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานก่อนและหลังการปรับปรุงห้องคลีนรูมสำหรับการ
ผลิตยาแผนปัจจุบัน

นายศุภชัย วรเลิศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การศึกษาเชิงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานก่อนและหลังการปรับปรุงห้องคลีนรูมสำหรับการ
ผลิตยาแผนปัจจุบัน



นายศุภชัย วรเลิศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองโครงร่างวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การศึกษาเชิงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานก่อนและหลังการปรับปรุงห้องคลีนรูม
สำหรับการผลิตยาแผนปัจจุบัน

โดย นายศุภชัย วรเลิศ

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย / หัวหน้าภาควิชา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ติกะ บุนนาค)

อาจารย์ที่ปรึกษา

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา จันทวงษ์)

กรรมการ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิพร ไญ้ธนายศ)

ชื่อ : นายศุภชัย วรเลิศ
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การศึกษาเชิงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานก่อน
 และหลังการปรับปรุงห้องคลีนรูมสำหรับการผลิตยาแผน
 ปัจจุบัน
 สาขาวิชา : เทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา จันทวงษ์
 ปีการศึกษา : 2567

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของห้องคลีนรูมสำหรับการผลิตยาแผนปัจจุบัน โดยมุ่งเน้นการปรับปรุงและลดภาระทางความร้อนผ่านการติดตั้งฉนวนที่มีประสิทธิภาพ วิธีดำเนินการวิจัยประกอบด้วย การวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุฉนวนชนิดต่าง ๆ ทั้งสำหรับผนังและหลังคา โดยพิจารณาจากภาระการทำความเย็น ความต้องการไฟฟ้าสูงสุด และการใช้พลังงานไฟฟ้า รวมถึงการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์การลงทุน ผลการวิจัยพบว่า วัสดุฉนวนโพลีไอโซไซยานูเรต (PIR) สำหรับผนังและโพลียูรีเทน (PU) สำหรับหลังคาที่มีความหนา 50 mm มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดภาระพลังงาน โดย PIR สามารถลดภาระการทำความเย็นและการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ดีกว่าวัสดุฉนวนประเภทอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์การลงทุนแสดงให้เห็นว่า การติดตั้งฉนวนหลังคา PU ที่ความหนา 50 mm มีความคุ้มค่ามากกว่า โดยมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิติดลบน้อยกว่า อัตราผลตอบแทนภายในสูงกว่า และระยะเวลาคืนทุนที่เร็วกว่าเมื่อเทียบกับความหนา 25 mm ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการเลือกใช้วัสดุฉนวนที่เหมาะสม ซึ่งสามารถช่วยลดภาระพลังงาน ประหยัดค่าใช้จ่าย และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในห้องคลีนรูมสำหรับการผลิตยาแผนปัจจุบันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

(มีจำนวนทั้งสิ้น 124 หน้า)

คำสำคัญ : การผลิตยา, การใช้พลังงาน, ฉนวนกันความร้อน, ประสิทธิภาพพลังงาน, ห้องคลีนรูม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : Mr. Suphachai Worralers
Thesis Title : A Comparative Study of Energy Efficiency Before and After Cleanroom Upgrades for Modern Pharmaceutical Manufacturing
Major Field : Energy Engineering Technology
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Assistant Professor Dr. Dusit Ngamrungrroj
Co-Advisor : Associate Professor Dr. Preeda Chantawong
Academic Year : 2024

ABSTRACT

This research aimed to investigate the energy efficiency of Cleanroom in modern pharmaceutical production, focusing on improving and reducing thermal load through efficient insulation installation. The research methodology involved comparing the performance of various insulation materials for walls and roofs, considering cooling load, maximum electricity demand, and electricity consumption, along with evaluating the economic investment value. The research findings revealed that polyisocyanurate (PIR) insulation for walls and polyurethane (PU) insulation for roofs with a thickness of 50 mm demonstrated the highest energy load reduction efficiency. PIR was particularly effective in significantly reducing cooling load and electricity consumption compared to other insulation materials. The economic investment analysis showed that installing PU insulation with a 50 mm thickness was more cost-effective. It exhibited a lower negative net present value, higher internal rate of return, and a shorter payback period compared to the 25 mm thickness installation. The study highlights the critical importance of selecting appropriate insulation materials, which can effectively reduce energy load, save expenses, and enhance energy efficiency in Cleanroom for modern pharmaceutical production.

(Total 124 Pages)

Keywords: Cleanroom, Energy Consumption, Energy Efficiency, Pharmaceutical
Production, Thermal Insulation

Advisor



กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ให้การประสิทธิประสาทวิชาความรู้ในการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร.ติกะ บุนนาค ที่มีความกรุณาให้เกียรติและสละเวลามาเป็นประธานกรรมการสอบ พร้อมทั้งขอขอบพระคุณ รศ. ดร.สิทธิพร ไญ้ธนายศ ที่ได้สละเวลาและให้เกียรติเป็นคณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนคำแนะนำเพิ่มเติมสำหรับการแก้ไขเนื้อหาและรายงาน

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา และ รศ. ดร.ปรีดา จันทวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาชี้แนะแนวทางให้คำปรึกษาให้ความรู้ และติดตามงานอย่างต่อเนื่อง อาทิ การวิเคราะห์ข้อมูล และการแก้ปัญหาต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องและสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณเบญจรัตน์ พึ่งปาน ผู้จัดการทั่วไป บริษัท สุขสี ชัมเมชั่น เอ็นจิเนียริง จำกัด และ บริษัท สุขสี เอ็นจิเนียริง อิมพอร์ต แอนด์ เอ็กซ์พอร์ต จำกัด ที่ให้การสนับสนุนการศึกษาและอยู่เบื้องหลังการศึกษาในครั้งนี้

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสุข คุณแม่สี วรเลิศ เป็นผู้ให้กำเนิดพร้อมทั้งเป็นคุณครูและอาจารย์ท่านแรกให้กับผู้วิจัย

ศุภชัย วรเลิศ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พลังงานแสงอาทิตย์	4
2.2 การถ่ายเทความร้อนในอาคาร	8
2.3 แนวคิดเรื่องการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาและผนัง	13
2.4 ระบบเปลือกอาคาร (Building Envelope)	16
2.5 การใช้โปรแกรม OpenStudio ในการวิเคราะห์ตัวแปรทั้งหมดที่ เกี่ยวกับกับการถ่ายเทพลังงาน	21
2.6 ห้องคลีนรูม	25
2.7 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์	33
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	34

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีการวิจัย	41
3.1 การออกแบบและการจำลอง	41
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย	49
4.1 องค์ประกอบเปลือกอาคาร (Building Envelope)	49
4.2 ผลของการปรับปรุงสมรรถนะห้องคลีนรูม	50
4.3 การเลือกใช้ฉนวนติดหลังคา	65
4.4 เศรษฐศาสตร์การลงทุนของการก่อสร้างห้องคลีนรูม	87
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	89
5.1 ผลของการติดตั้งฉนวนในแต่ละประเภทวัสดุ	89
5.2 ผลของการติดตั้งฉนวนหลังคาในแต่ละประเภทวัสดุ	90
5.3 เศรษฐศาสตร์การลงทุนของการติดตั้งฉนวนหลังคา	91
5.4 ข้อเสนอแนะ	91
บรรณานุกรม	92
ภาคผนวก ก	
ตัวอย่างการจำลองและผลการจำลองของงานวิจัยนี้	95
ประวัติผู้วิจัย	124

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

2-1 การจำแนกประเภทของห้องคลีนรูมตามมาตรฐาน ISO 14644-1	30
2-2 การประยุกต์การใช้งานของประเภทของห้องคลีนรูม ตามมาตรฐาน ISO 14644-1	31
2-3 มาตรฐานห้องสะอาด U.S. Federal Standard 209 E (FS-209E)	32
2-4 การเปรียบเทียบ U.S. Federal Standard 209 E กับ ISO Standard 14644-1	32
2-5 มาตรฐานห้องสะอาดทางเภสัชกรรม EU GGMP (European Union Guide to Good Manufacturing Products)	32
3-1 ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุฉนวนผนังที่ใช้ในงานวิจัย	41
3-2 ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุหลังคาที่ใช้ในงานวิจัย	43
4-1 อัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างต่อผนัง (Window-Wall Ratio, WWR) ของการจำลองระบบเปลือกอาคารของห้องคลีนรูม	49
4-2 อัตราส่วนพื้นที่ช่องแสงบนหลังคา (Skylight-Roof Ratio, SSR) ของการจำลองระบบเปลือกอาคารของห้องคลีนรูม	50
4-3 ภาระการทำความเย็นของการติดตั้งผนังฉนวน	63
4-4 การใช้พลังงานที่ลดลงสำหรับการเลือกผนังฉนวนแต่ละประเภท	65
4-5 เปรียบเทียบภาระการทำความเย็นของการมีและไม่มีฉนวนหลังคา	82
4-6 การใช้พลังงานที่ลดลงสำหรับการติดตั้งฉนวนหลังคาแต่ละประเภท	86
4-7 ผลการลงทุนของการติดตั้งฉนวนหลังคา PU	88

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่

2-1	รังสีอาทิตย์ที่ประกอบด้วยรังสีตรงและรังสีกระจายที่ตกบนพื้นโลก	7
2-2	การส่งผ่าน การดูดกลืน การสะท้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนผิวโลก	8
2-3	ผนังที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชั้น	10
2-4	ระบบเปลือกอาคารในส่วนหลังคา	16
2-5	การออกแบบระบบเปลือกอาคาร	17
2-6	ห้องคลีนรูมแบบระบายอากาศแบบปั่นป่วน	27
2-7	ห้องคลีนรูมแบบการไหลทิศทางเดียว	27
3-1	ขนาดของห้องคลีนรูม 4.20 x 4.20 x 2.5 m	42
3-2	การออกแบบและจำลองการทำงานของผนังห้องคลีนรูม โดยใช้โปรแกรม Openstudio	42
3-3	ขนาดห้องและหลังคาของห้องคลีนรูม	44
3-4	การออกแบบและวิเคราะห์การทำงานของหลังคาห้องคลีนรูม โดยใช้โปรแกรม Openstudio	44
3-5	ห้องคลีนรูมเดิมก่อนดำเนินการปรับปรุง	45
3-6	ตำแหน่งที่ตั้งโรงงานผลิตยา	45
3-7	การออกแบบคลีนรูม 3 D	46
3-8	ตำแหน่งห้องที่ใช้ในการศึกษา มี ผนังด้านหน้า ผนังด้านข้างทั้งสองอยู่ภายในอาคาร และผนังด้านหลังเป็นผนังด้านนอกอาคาร	46
3-9	ด้านหน้าของห้องคลีนรูมจริงถ่ายภาพจากบริเวณทางเดินร่วม	47
3-10	ภายในของห้องคลีนรูมจริงถ่ายภาพจากภายในห้อง	47
3-11	ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม	48
4-1	ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมก่อนปรับปรุง	51
4-2	ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยใช้ PIR	52

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่

4-3	ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยใช้ PS	53
4-4	ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยใช้ PU	54
4-5	ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยใช้ Rockwool	55
4-6	การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมห้องคลีนรูมก่อนปรับปรุง	57
4-7	การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยใช้ PIR	58
4-8	การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยใช้ PS	59
4-9	การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยใช้ PU	60
4-10	การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยใช้ Rockwool	61
4-11	การเปรียบเทียบภาระการทำความเย็นของห้องคลีนรูมก่อนและหลังปรับปรุง	64
4-12	ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยไม่ติดฉนวนหลังคา	66
4-13	ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยติดฉนวนหลังคา PE 3 mm	67
4-14	ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยติดฉนวนหลังคา PE 4 mm	68
4-15	ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยติดฉนวนหลังคา PE 5 mm	69
4-16	ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยติดฉนวนหลังคา PE 10 mm	70
4-17	ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยติดฉนวนหลังคา PU 25 mm	71
4-18	ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยติดฉนวนหลังคา PU 50 mm	72
4-19	การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของห้องคลีนรูมโดยไม่ติดฉนวนหลังคา	74

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่

4-20	การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของห้องคลีนรูมโดยติดตั้งหลอด PE 3 mm	75
4-21	การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของห้องคลีนรูมโดยติดตั้งหลอด PE 4 mm	76
4-22	การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของห้องคลีนรูมโดยติดตั้งหลอด PE 5 mm	77
4-23	การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของห้องคลีนรูมโดยติดตั้งหลอด PE 10 mm	78
4-24	การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของห้องคลีนรูมโดยติดตั้งหลอด PU 25 mm	79
4-25	การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของห้องคลีนรูมโดยติดตั้งหลอด PU 50 mm	80
4-26	การประเมินความเย็นของการติดตั้งหลอดในวัสดุ PE, PU และส่วนที่ไม่มีฉนวน	83
ก-1	การกำหนดไฟล์สภาพภูมิอากาศ	96
ก-2	การกำหนดตารางเวลาการทำงานของห้องคลีนรูม	96
ก-3	การกำหนดชุดเวลาการทำงานของห้องคลีนรูม	97
ก-4	การกำหนดวัสดุประกอบห้องคลีนรูม	97
ก-5	การกำหนดส่วนประกอบโครงสร้างห้องคลีนรูม	98
ก-6	การกำหนดชุดประกอบโครงสร้างห้องคลีนรูม	98
ก-7	การกำหนดภาระโหลดของห้องคลีนรูม	99
ก-8	การแสดงผลภาระโหลดของห้องคลีนรูม	99
ก-9	การแสดงผลภาระโหลดของห้องคลีนรูม	100
ก-10	การแสดงผลภาพการจำลองห้องคลีนรูม	100
ก-11	การกำหนดชื่ออาคาร	101
ก-12	การกำหนด space name ของโครงการ	101
ก-13	การกำหนด surface name ของโครงการ	102
ก-14	การแสดงผลภาระโหลดของโครงการ	102
ก-15	การแสดงผลองค์ประกอบ space ของโครงการ	103
ก-16	การแสดงผล Thermal Zone ของโครงการ	103

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก-17 การแสดง Air Loop HVAC ของโครงการ	104
ก-18 การแสดงการเลือกค่า Output ของโครงการ	104
ก-19 การแสดงระยะเวลาของโครงการ	105
ก-20 การแสดงการเลือก Reporting ของโครงการ	105
ก-21 การแสดงการ Run โปรแกรม	106
ก-22 การแสดงค่า Results โปรแกรม 1	106
ก-23 การแสดงค่า Results โปรแกรม 2	107
ก-24 การแสดงค่า Results โปรแกรม 3	107
ก-25 การแสดงค่า Results โปรแกรม 4	108
ก-26 การแสดงค่า Results โปรแกรม 5	108
ก-27 การแสดงค่า Results โปรแกรม 6	109
ก-28 การแสดงค่า Results โปรแกรม 7	109
ก-29 การแสดงค่า Results โปรแกรม 8	110
ก-30 การแสดงค่า Results โปรแกรม 9	110
ก-31 การแสดงค่า Results โปรแกรม 10	111
ก-32 การแสดงค่า Results โปรแกรม 11	111
ก-33 การแสดงค่า Results โปรแกรม 12	112
ก-34 การแสดงค่า Results โปรแกรม 13	112
ก-35 การแสดงค่า Results โปรแกรม 14	113
ก-36 การแสดงค่า Results โปรแกรม 15	113
ก-37 การแสดงค่า Results โปรแกรม 16	114
ก-38 การแสดงค่า Results โปรแกรม 17	114
ก-39 การแสดงค่า Results โปรแกรม 18	115

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่

ก-40 การแสดงค่า Results โปรแกรม 19	115
ก-41 การแสดงค่า Results โปรแกรม 20	116
ก-42 การแสดงค่า Results โปรแกรม 21	116
ก-43 การแสดงค่า Results โปรแกรม 22	117
ก-44 การแสดงค่า Results โปรแกรม 23	117
ก-45 การแสดงค่า Results โปรแกรม 24	118
ก-46 การแสดงค่า Results โปรแกรม 25	118
ก-47 การแสดงค่า Results โปรแกรม 26	119
ก-48 การแสดงค่า Results โปรแกรม 27	119
ก-49 การแสดงค่า Results โปรแกรม 28	120
ก-50 การแสดงค่า Results โปรแกรม 29	120
ก-51 การแสดงค่า Results โปรแกรม 30	121
ก-52 การแสดงค่า Results โปรแกรม 31	121
ก-53 การแสดงค่า Results โปรแกรม 32	122
ก-54 การแสดงค่า Results โปรแกรม 33	122
ก-55 การแสดงค่า Results โปรแกรม 34	123
ก-56 การแสดงค่า Results โปรแกรม 35	123

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมยาในประเทศไทยกำลังเติบโตอย่างต่อเนื่องและมีความจำเป็นต้องขยายกำลังการผลิตเพื่อรองรับความต้องการยาที่เพิ่มสูงขึ้นทั้งเพื่อการบริโภคภายในประเทศและการส่งออก การพัฒนาสมรรถนะของห้องคลีนรูมจึงกลายเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดต้นทุน ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมยาไทยในตลาดโลก

การผลิตยาแผนปัจจุบันเป็นกระบวนการที่ต้องการสภาพแวดล้อมที่ควบคุมอย่างเข้มงวด โดยเฉพาะในห้องคลีนรูมซึ่งจำเป็นต้องควบคุมปริมาณอนุภาคในอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น และความดันอากาศให้ได้ตามมาตรฐานสากล เพื่อป้องกันการปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ยา อย่างไรก็ตาม ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตภูมิอากาศร้อนชื้นที่มีอุณหภูมิสูงตลอดทั้งปี โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 28-35 องศาเซลเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์สูงถึง 70-90% ในหลายพื้นที่ สภาพอากาศดังกล่าวก่อให้เกิดความท้าทายอย่างมากในการออกแบบและการดำเนินการห้องคลีนรูม สภาพอากาศร้อนชื้นของไทยส่งผลให้อาคารที่ก่อสร้างด้วยวัสดุทั่วไป เช่น อิฐและคอนกรีต เกิดการสะสมความร้อนอย่างมาก โดยเฉพาะในช่วงเวลากลางวัน ความร้อนจะถูกดูดซับและสะสมในโครงสร้างอาคาร และค่อย ๆ ถ่ายเทเข้าสู่ภายในอาคาร ทำให้ต้องใช้พลังงานในการปรับอากาศสูงขึ้นเพื่อรักษาสภาพควบคุมของห้องคลีนรูม ปัญหานี้ส่งผลให้ระบบปรับอากาศต้องทำงานหนักขึ้นเพื่อรักษาอุณหภูมิและความชื้นให้อยู่ในช่วงที่กำหนด นำไปสู่การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าอย่างมาก โดยระบบปรับอากาศในห้องคลีนรูมอาจใช้พลังงานถึง 50-70% ของพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในอาคาร

นอกจากประเด็นด้านพลังงานแล้ว ความชื้นสูงในอากาศยังเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดเชื้อรา เชื้อแบคทีเรีย และการเสื่อมสภาพของวัสดุ ซึ่งเป็นอันตรายต่อกระบวนการผลิตยา ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาสมรรถนะของห้องคลีนรูมสำหรับการผลิตยาแผนปัจจุบันในประเทศไทยจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะจะช่วยลดการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตยาลดลง และ

เพิ่มความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมยาไทย การพัฒนาดังกล่าวยังสนับสนุนการพัฒนาที่ยั่งยืน โดยการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้พลังงาน สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนของประเทศไทย อีกทั้งยังช่วยพัฒนาองค์ความรู้และเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทย ทั้งในด้านวัสดุทางเลือก เทคนิคการก่อสร้าง และระบบปรับอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น การพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรมในการออกแบบและก่อสร้างห้องคลีนรูมยังสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับอุตสาหกรรมก่อสร้างของไทย สามารถต่อยอดไปสู่การส่งออกเทคโนโลยีและความเชี่ยวชาญไปยังประเทศอื่น ๆ ในเขตร้อนชื้นที่กำลังเผชิญกับปัญหาในลักษณะเดียวกัน นอกจากนี้ ยังช่วยเสริมสร้างความมั่นคงทางด้านยาและเวชภัณฑ์ของประเทศ ด้วยการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการผลิตยาในประเทศ การวิจัยและพัฒนาสมรรถนะห้องคลีนรูมในบริบทของประเทศไทยจึงมุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนาแนวทางในการออกแบบ ก่อสร้าง และบริหารจัดการที่เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศของไทย เพื่อแก้ไขปัญหาความร้อนสะสมในวัสดุก่อสร้าง และลดการใช้พลังงานในการควบคุมสภาวะแวดล้อม อันจะนำไปสู่การยกระดับมาตรฐานการผลิตยาของประเทศไทยให้มีประสิทธิภาพและความยั่งยืนมากยิ่งขึ้น จึงทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจในการดำเนินการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติฉนวนที่จะนำมาประกอบเป็นห้องคลีนรูมผลิตยาเนื่องจากในท้องตลาดไม่ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบในด้านนี้ไว้ วัสดุที่ใช้ในการศึกษา ผง, ฝ้า และฉนวนหลังคามีดังนี้ Gypsum, Polyisocyanurate (PIR), Polystyrene (PS), Polyurethane (PU), Rockwool และ Polyethylene (PE) ตามลำดับ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาปรับปรุงและลดภาระทางความร้อนไปยังห้องคลีนรูม
- 1.2.2 ศึกษาเศรษฐศาสตร์การลงทุนก่อสร้างห้องคลีนรูม

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบและจำลองการทำงานของผนังและหลังคาห้องคลีนรูม โดยใช้โปรแกรม Openstudio
- 1.3.2 การเปรียบเทียบวัสดุก่อนและหลังปรับปรุงมี 5 ชนิดคือ Gypsum,

Polyisocyanurate, Polystyrene, Polyurethane และ Rockwool

1.3.3 ห้องคลีนรูม ขนาด $4.20 \times 4.20 \times 2.50$ m, เครื่องจักร 10 kW, แสงสว่าง 56 W,

จำนวนผู้ปฏิบัติงาน 4 ท่าน และควบคุมอุณหภูมิภายในห้องที่ 22°C

1.3.4 สำหรับการติดฉนวนหลังคาโดยเลือกวัสดุ 3 ชนิด คือ หลังคา Metal Sheet ที่ความ

หนา 0.47 mm, ฉนวน Polyethylene (PE) ที่ความหนา 3 mm, 4 mm, 5 mm,

10 mm และฉนวน Polyurethane (PU) ที่ความหนา 25 mm และ 50 mm

1.3.5 เปรียบเทียบผลการจำลองการใช้พลังงานของห้องคลีนรูมเดิมกับห้องคลีนรูมหลังการปรับปรุง

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1.4.1 ช่วยให้สามารถออกแบบระบบที่มีประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน ลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ และบำรุงรักษาห้องคลีนรูม

1.4.2 ที่ได้จากการศึกษาจะช่วยปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบและการควบคุมคุณภาพของห้องคลีนรูมในอุตสาหกรรมการผลิตยา

1.4.3 การสนับสนุนการพัฒนานวัตกรรม ผลการศึกษาอาจนำไปสู่การพัฒนานวัตกรรมใหม่ ๆ ในการออกแบบและควบคุมสภาพแวดล้อมการผลิตยาที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลังงานแสงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานทั้งทางตรงและทางอ้อมพลังงานที่ดวงอาทิตย์ให้กับโลกทางตรงคือ แสงสว่าง ซึ่งมีผลทำให้เกิดความร้อนและสร้างความอบอุ่นให้กับโลก พลังงานทางอ้อมคือ ดวงอาทิตย์ทำให้สิ่งมีชีวิตดำรงชีพอยู่ได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งพืชเจริญเติบโตโดยอาศัยการสังเคราะห์แสงจากแสงอาทิตย์ และมนุษย์ได้อาศัยพลังงานจากต้นไม้ เช่น ฟืน, ถ่าน และเมื่อพืชและสัตว์ตายทับถมกันเป็นเวลานาน จะกลายเป็นถ่านหิน ปิโตรเลียม รวมทั้งการนำหลักการย่อยสลายของพืชมาเป็นแก๊สชีวภาพ (เสริม จันทรฉาย, 2560)

2.1.1 แสงสว่างและความร้อน ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดแสงสว่างและความร้อนที่สำคัญของโลก โดยส่งพลังงานมายังโลกผ่านกระบวนการแผ่รังสี เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบวัตถุต่าง ๆ บนพื้นผิวโลก วัตถุเหล่านั้นจะได้รับความร้อนและมีอุณหภูมิสูงขึ้น จากนั้นจะกระจายความร้อนในรูปของรังสีอินฟราเรด ซึ่งทำให้มนุษย์รู้สึกถึงความร้อน เส้นทางของพลังงานความร้อนเริ่มจากแสงอาทิตย์ที่เดินทางผ่านบรรยากาศโลก ทั้งอากาศและน้ำทำหน้าที่เป็นกับดักพลังงานความร้อน โดยดินและน้ำจะคายความร้อนสู่อากาศ อากาศจึงเป็นตัวกลางสุดท้ายในการกักเก็บความร้อน คุณสมบัติการรับและคายความร้อนของวัตถุแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ระยะทางจากดวงอาทิตย์ ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ (เขตหนาว เขตร้อน เขตอบอุ่น) ช่วงเวลา (กลางวันหรือกลางคืน) ชนิดของวัตถุ (ดิน หิน น้ำ) สีของวัตถุ พลังงานแสงอาทิตย์ต้องเดินทางผ่านบริเวณสุญญากาศ การถ่ายเทความร้อนจึงเกิดขึ้นด้วยวิธีการแผ่รังสี โดยพลังงานที่โลกได้รับจะอยู่ในรูปรังสีที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน กระบวนการนี้ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ทางธรรมชาติต่าง ๆ อาทิ ลมบก ลมทะเล และการหมุนเวียนของอากาศ ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและสภาพภูมิอากาศของโลก รังสีดวงอาทิตย์แบ่งตามความยาวคลื่นออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

1) รังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นรังสีคลื่นที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่าช่วงคลื่นสีม่วง อยู่ในช่วงคลื่นตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.4 μm พลังงานแสงอาทิตย์จะตกในช่วงนี้ประมาณร้อยละ 9 ของพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมดที่บรรยากาศของโลก

2) แสง เป็นรังสีคลื่นสั้นที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าอยู่ในช่วงคลื่นตั้งแต่ 0.4 ถึง 0.7 μm พลังงานจากดวงอาทิตย์จะตกในช่วงนี้ประมาณร้อยละ 41 จากพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมดที่บรรยากาศของโลก แบ่งออกเป็นแถบสีซึ่งเป็นแถบของสีรุ้งได้แก่

ม่วง	0.40 - 0.42 μm
คราม	0.42 - 0.44 μm
น้ำเงิน	0.44 - 0.49 μm
เขียว	0.49 - 0.57 μm
เหลือง	0.57 - 0.59 μm
แสด	0.59 - 0.61 μm
แดง	0.61 - 0.70 μm

3) รังสีอินฟราเรด เป็นรังสีคลื่นสั้นที่อยู่ในช่วงคลื่นตั้งแต่ 0.7 ถึง 4 μm โดยร้อยละ 50 ของพลังงานจากดวงอาทิตย์ทั้งหมดที่บรรยากาศของโลกจะตกอยู่ในคลื่นช่วงนี้รังสีดวงอาทิตย์ดังที่กล่าวไว้ทั้งหมดล้วนเป็นรังสีคลื่นสั้น นอกจากแสงแล้ว รังสีช่วงอื่นไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า

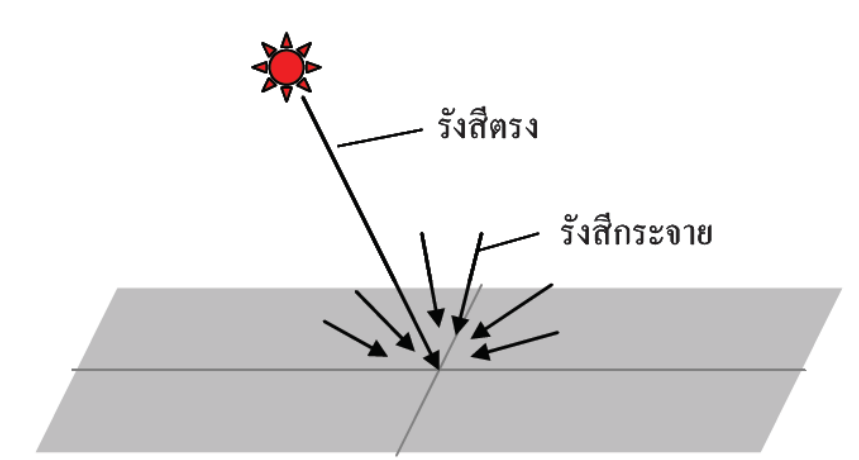
ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกนั้นมีน้อยกว่านอกชั้นบรรยากาศ เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกดูดกลืนโดยอะตอมและโมเลกุลของแก๊ส โดยช่วงอัลตราไวโอเล็ตถูกดูดกลืนด้วยอะตอมของออกซิเจน ไนโตรเจน และโมเลกุลของออกซิเจน (O_2), โอโซน (O_3) และโมเลกุลของไนโตรเจน (N_2) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของบรรยากาศ ทำให้แสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านบรรยากาศจนถึงพื้นโลกแทบจะไม่มีคลื่นช่วงอัลตราไวโอเล็ต ช่วงแสงอินฟราเรดถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของน้ำ (H_2O) และโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเกิดขึ้นในชั้นล่างของบรรยากาศ ภายในระยะทาง 50 km จากพื้นโลกเป็นช่วงชั้นบรรยากาศที่มี H_2O และ CO_2 อยู่มาก พลังงานแสงช่วงอินฟราเรดที่ถูกดูดกลืนเกือบทั้งหมดทำให้บรรยากาศร้อน หรือทำให้พลังงานจลน์ของโมเลกุลอากาศสูงขึ้น และทำให้อุณหภูมิของ

โลกสูงขึ้นด้วย เมื่อรังสีผ่านเข้าใกล้ชั้นบรรยากาศของโลก เมโซสเฟียร์ (Mesosphere) คือ ประมาณ 80 km จากพื้นโลก พวกรังสีคลื่นสั้นมาก ๆ ที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เช่นรังสีคอสมิก รังสีแกมมา และรังสีเอ็กซ์ จะถูกดูดซับไว้เกือบหมด รวมทั้งบางส่วนของรังสีอัลตราไวโอเล็ตด้วย เมื่อมาถึงชั้นล่างของเมโซสเฟียร์ และชั้นสตราโทสเฟียร์ (Stratosphere) ระดับประมาณ 15 - 55 km จากพื้นโลก ซึ่งเป็นชั้นของโอโซน รังสีอัลตราไวโอเล็ตก็จะถูกดูดซับไว้เกือบหมดก่อนที่จะผ่านเข้ามาสู่ บรรยากาศชั้นโทรโปสเฟียร์ (Troposphere) ระดับประมาณ 0 - 10 km ซึ่งเป็นชั้นที่อยู่ใกล้พื้นโลกมากที่สุดในชั้นโทรโปสเฟียร์นี้ ไอน้ำในอากาศและคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะดูดซับรังสีอินฟราเรดบางช่วงไว้ ทำให้คุณภาพของพลังงานจากดวงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงไป รังสีคลื่นสั้นช่วง 0.1 - 4.0 μm ที่แผ่มาถึงผิวบรรยากาศของโลกดังได้กล่าวไว้แล้วนั้นจะมีช่วงที่ตกมาถึงพื้นโลกจริง ๆ เพียงช่วงคลื่นระหว่าง 0.31 - 2.50 μm เท่านั้น โดยรังสีที่ต่ำกว่า 0.31 μm ที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตจะถูกแทนที่ด้วยโอโซนในบรรยากาศดูดซับไว้เกือบทั้งหมด ส่วนช่วงคลื่นที่ยาวกว่า 2.5 μm จะถูกไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ดูดซับไว้ ประมาณครึ่งหนึ่งของพลังงานจากดวงอาทิตย์ที่เข้ามาถึงพื้นผิวโลกจึงอยู่ในช่วงคลื่นอินฟราเรดที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้

2.1.2 รังสีอาทิตย์บนพื้นผิวโลก เกิดจากกระบวนการดูดกลืนและการแผ่รังสีอาทิตย์โดยแก๊สในบรรยากาศ ซึ่งส่งผลให้เกิดสเปกตรัมแสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน โดยสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

- 1) รังสีตรง (Beam or Direct Radiation) คือ รังสีที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรงและตกบนผิวรับแสงบนพื้นโลกด้วยทิศทางที่แน่นอน ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง มีลักษณะสำคัญคือ มีทิศทางแน่นอนและมีลำแสงขนาน สามารถรวมแสงหรือโฟกัสรังสีตรงได้
- 2) รังสีกระจาย (Diffuse Radiation) คือ รังสีอาทิตย์ส่วนที่ถูกสะท้อนและกระจายโดยแก๊สและฝุ่นละอองรวมถึงวัตถุต่าง ๆ ที่อยู่ในทางเดินของแสงก่อนตกกระทบผิวรับแสง มีคุณสมบัติสำคัญคือ มาจากทุกทิศทางในท้องฟ้าและไม่สามารถรวมแสงหรือโฟกัสรังสีกระจายได้
- 3) รังสีรวม (Total หรือ Global Radiation) คือ ผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจาย โดยมีคลื่นสั้นไม่เกิน 4 μm และไม่รวมพลังงานคลื่นยาวจากการแผ่รังสีของพื้นโลกและบรรยากาศ

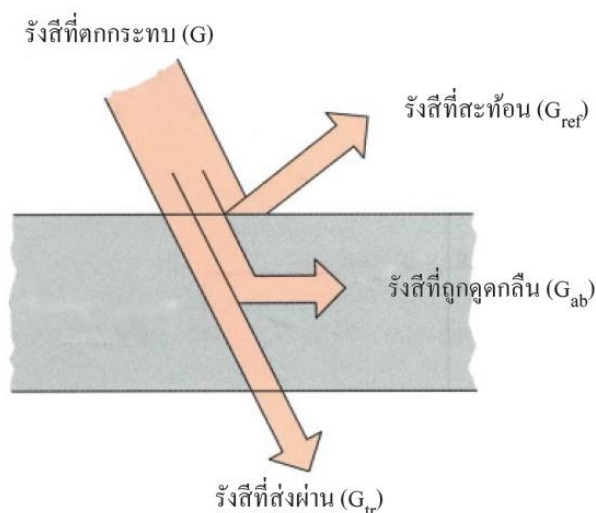
กรณีพื้นเอียง (Incline Plane) รังสีรวมประกอบด้วย รังสีตรงจากท้องฟ้า รังสีกระจายจากท้องฟ้า รังสีกระจายจากพื้นโลก (ส่วนที่สะท้อนกลับ) กรณีพื้นราบ (Horizontal Plane) รังสีรวมประกอบด้วย รังสีตรง รังสีกระจายจากครึ่งทรงกลมท้องฟ้า ไม่มีรังสีกระจายจากพื้นโลก การเข้าใจชนิดของรังสีแสงอาทิตย์มีความสำคัญยิ่งต่อการศึกษาพลังงานแสงอาทิตย์และการประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 รังสีอาทิตย์ที่ประกอบด้วยรังสีตรงและรังสีกระจาย
ที่ตกบนพื้นโลก (เสริม จันทรฉาย, 2560)

2.1.3 ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานมหาศาลของระบบสุริยะจักรวาล มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแก๊สไฮโดรเจนในใจกลางของดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิและแรงดันสูงมากทำให้แก๊สไฮโดรเจนหลอมรวมกันเป็นของเหลวและเกิดเป็นพลังงานอย่างมหาศาล ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันเกิดขึ้นในดวงอาทิตย์ พลังงานที่ส่งมายังโลกประกอบด้วยแสงสว่างและความร้อน มีผลต่อสิ่งมีชีวิตบนโลก และเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญ มนุษย์สามารถนำมาใช้ได้โดยไม่มีวันหมดลง พลังงานที่ดวงอาทิตย์ส่งออกมามีจำนวนมหาศาล ถ้าคิดหน่วยเป็น W แล้ว มีค่าเป็น 174×10^{15} W ซึ่งพลังงานเหล่านี้มาถึงโลก 89×10^{15} W หรือคิดเป็น 51% เนื่องจากการสูญเสียระหว่างทาง ทั้งที่เกิดจากการสะท้อนกลับโดยเฉพาะจากการสะท้อนของเมฆ (Reflected by cloud) ที่สามารถสะท้อนได้ถึง 20% นอกจากนี้บางส่วนถูกดูดกลืนโดยชั้น

บรรยากาศและเมฆ โดยเฉพาะชั้นบรรยากาศสามารถดูดกลืน (Absorbed by Atmosphere) ได้ถึง 16% จากพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมด ดังรูปที่ 2-2 แสดงภาพการส่งผ่าน การดูดกลืน การสะท้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนผิวโลก



รูปที่ 2-2 การส่งผ่าน การดูดกลืน การสะท้อนพลังงานแสงอาทิตย์
ที่ตกลงบนผิวโลก (เสริม จันทรฉาย, 2560)

2.2 การถ่ายเทความร้อนในอาคาร

ในงานระบบทำความร้อน การระบายอากาศ และปรับอากาศ (HVAC) มีการบัญญัติและนิยามคำว่า เปลือกอาคาร (Building Envelope) หมายความว่า ผนัง หลังคา พื้น และช่องเปิดต่าง ๆ ซึ่งเป็นส่วนที่ล้อมรอบอาคาร พลังงานสามารถเข้าสู่หรือออกจากอาคารผ่านส่วนประกอบเหล่านี้โดยกระบวนการถ่ายเทความร้อน (Heat Transmission) ดังนั้น การประมาณอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ถูกต้องจึงมีความสำคัญต่อการออกแบบระบบปรับอากาศที่มีประสิทธิภาพ โดยโครงสร้างทั่วไปของอาคารประกอบด้วยวัสดุหลายประเภทที่ซับซ้อน เช่น ผนังและหลังคาประกอบด้วยชั้นของวัสดุต่าง ๆ หนาต่าง พื้นและผนังของชั้นใต้ดินสัมผัสโดยตรงกับพื้นดิน เนื่องจากองค์ประกอบเหล่านี้ทำให้การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนที่แม่นยำเป็นเรื่องยาก แต่สามารถทำการประมาณค่าได้อย่างน่าเชื่อถือโดยอาศัยข้อมูลเชิงประสบการณ์และผลการทดลอง จึงมีแนวคิดเรื่องความต้านทานความร้อนซึ่งมีประโยชน์อย่างมากและถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนเป็น

อย่างมาก เนื่องจากการคำนวณส่วนใหญ่ต้องอาศัยการทำงานซ้ำ ๆ จึงมีการใช้ ตารางค่าสัมประสิทธิ์ และข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เพื่อช่วยให้การคำนวณเป็นไปอย่างสะดวกและแม่นยำ ภายในอาคารจะมี 3 รูปแบบของการถ่ายเทความร้อน ที่มีผลต่อการเพิ่มหรือลดความร้อน ได้แก่การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) (McQuiston et al., 2004; Incropera et al., 2006)

2.2.1 การนำความร้อน (Thermal Conduction) คือ กระบวนการถ่ายเทพลังงานภายในวัตถุ หรือของแข็งที่ต่อเนื่องกัน (Continuum) โดยเกิดจากการส่งผ่านพลังงานระหว่างอนุภาคหรือกลุ่มของอนุภาคในระดับการนำความร้อน (Heat Conduction) สมการอัตราการถ่ายเท เรียกว่า กฎของฟูเรียร์ (Fourier's Law) สำหรับกรณีหนึ่งระนาบในมิติเดียว ซึ่งมีการกระจาย ตัวของอุณหภูมิเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง $T(x)$ สมการอัตราการถ่ายเทความร้อน สามารถแสดง ได้สมการ (2-1)

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (2-1)$$

เมื่อ

- q_x คือ ฟลักซ์ความร้อน (heat flux) มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) หมายถึง อัตราการถ่ายเทความร้อนในทิศทาง x ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเท
- k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) มีหน่วยเป็น ($W/m \cdot K$) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุ $m \cdot K$
- A คือ พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน (m^2 หรือ ft^2)
- $\frac{dT}{dx}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามแนวแกน x

โดยเครื่องหมายลบในสมการเกิดจากการที่ความร้อนถ่ายเทไปในทิศทางที่อุณหภูมิลดลง

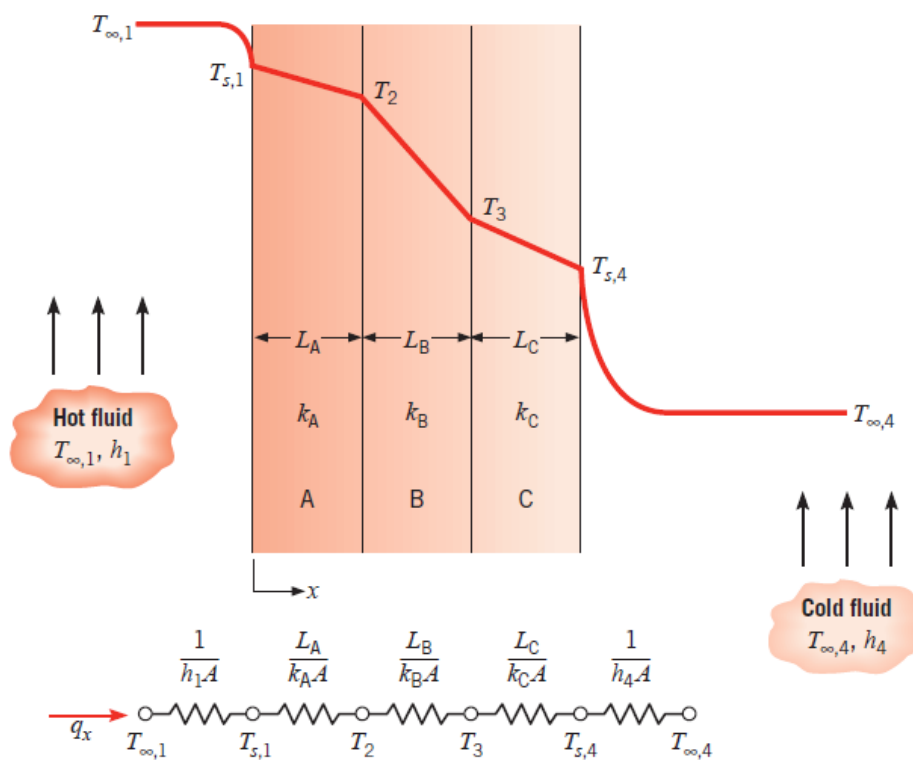
ภายใต้สภาวะคงตัว (steady-state) ซึ่งอุณหภูมิมีการกระจายตัวเป็นเส้นตรง ความชันของ อุณหภูมิสามารถแสดงได้ในสมการ (2-2)

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2-2)$$

ดังนั้น ฟลักซ์ความร้อนจึงสามารถคำนวณได้ในสมการ (2-3)

$$q_x = -k \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2-3)$$

การนำความร้อนสามารถเปรียบเทียบได้กับความต้านทานไฟฟ้าในกฎของโอห์ม โดยที่ q ทำหน้าที่เหมือนกระแสไฟฟ้า และ $T_1 - T_2$ ทำหน้าที่เหมือนความต่างศักย์ สำหรับผนังที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชั้น ค่าความต้านทานรวมสามารถคำนวณได้โดยการบวกค่าความต้านทานของแต่ละชั้นเข้าด้วยกัน โดยแสดงเป็นแผนภาพดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 ผนังที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชั้น (Incropera et al., 2006)

การแทนค่าระบบด้วยวงจรไฟฟ้าสมมูลเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ทั้งในด้านแนวคิดและการคำนวณสำหรับปัญหาการถ่ายเทความร้อน วงจรความร้อนสมมูลของผนังระนาบที่มีเงื่อนไขการพาความร้อนบนพื้นผิวแสดงไว้ในรูปที่ 2-3 อัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้โดยพิจารณาองค์ประกอบแต่ละส่วนในเครือข่าย เนื่องจากอัตราการถ่ายเทความร้อน q_x มีค่าคงที่ตลอดทั้งเครือข่ายสามารถคำนวณได้ในสมการ (2-4)

$$R_{\text{tot}} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L_1}{k_A A} + \frac{L_2}{k_B A} + \frac{L_3}{k_C A} + \frac{1}{h_4 A} \quad (2-4)$$

โดยความต้านทานความร้อนที่ได้สามารถรวมกับค่าความต้านทานความร้อนจากการนำความร้อนบริสุทธิ์ได้ตามสมการที่เกี่ยวข้อง โดยสัมประสิทธิ์ฟิล์ม h ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของของไหล ความเร็วของของไหล ลักษณะของช่องทางการไหล หรือรูปร่างและทิศทางของผนัง รวมถึงระยะทางจากขอบปากช่องหรือขอบผนัง และตำแหน่งที่เริ่มมีการให้ความร้อน ในกระบวนการพาความร้อน กลไกที่ทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่มีความสำคัญ โดยแบ่งออกเป็นสองประเภทหลัก ได้แก่

การพาความร้อนแบบถูกบังคับ (Forced Convection) เกิดขึ้นเมื่อของไหลมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับพื้นผิวที่ถ่ายเทความร้อน โดยปกติการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากอุปกรณ์ที่บังคับ เช่น พัดลม เครื่องเป่าลม หรือปั๊ม ซึ่งทำให้แรงลอยตัว (Buoyancy Forces) ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ

การพาความร้อนแบบอิสระหรือธรรมชาติ (Free or Natural Convection) เกิดขึ้นเมื่อการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากแรงลอยตัวของของไหลเอง ซึ่งมักจะจำกัดอยู่ในบริเวณใกล้ผิวที่ถูกให้ความร้อนหรือทำให้เย็น โดยของไหลโดยรอบส่วนใหญ่อยู่กับที่และส่งแรงเสียดทานหนืดไปยังชั้นของไหลที่เคลื่อนที่ ส่งผลให้แรงเฉื่อยของการพาความร้อนแบบอิสระมีค่าน้อยกว่าการพาความร้อนแบบถูกบังคับ ในการใช้งานด้าน HVAC การพาความร้อนแบบธรรมชาติถือเป็นปัจจัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มที่พยากรณ์ได้จากการพาความร้อนแบบธรรมชาติมักมีความไม่แน่นอนสูงกว่าการพาความร้อนแบบถูกบังคับ มีสมการหลายสมการที่สามารถใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มของการพาความร้อนแบบธรรมชาติได้ ซึ่งสามารถพบได้

ในคู่มือ ASHRAE และตำราทางด้านถ่ายเทความร้อนในโครงสร้างอาคารส่วนใหญ่ การพาความร้อนแบบถูกบังคับเกิดขึ้นจากกระแสลมที่พัดผ่านผนังด้านนอกหรือหลังคา ในขณะที่การพาความร้อนแบบธรรมชาติเกิดขึ้นภายในช่องอากาศแคบและบนผนังด้านใน สภาพผิวสัมผัสของอาคารมีความหลากหลายสูง และทิศทางรวมถึงขนาดของการเคลื่อนที่ของอากาศจากกระแสลมภายนอกมักไม่มีความแน่นอน

2.2.2 การแผ่รังสีความร้อน (Thermal Radiation) คือ กระบวนการถ่ายโอนพลังงานความร้อนผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งแตกต่างโดยสิ้นเชิงจากการนำความร้อน (Conduction) และการพาความร้อน (Convection) ทั้งนี้ การแผ่รังสีความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้แม้ในสภาวะสุญญากาศโดยสมบูรณ์ และในทางกลับกัน ตัวกลางที่อยู่ระหว่างแหล่งกำเนิดกับตัวรับอาจเป็นอุปสรรคต่อการถ่ายโอนพลังงานความร้อนด้วยวิธีนี้ การถ่ายโอนพลังงานสุทธิผ่านการแผ่รังสีโดยตรงระหว่างพื้นผิวสองแห่ง ซึ่งมองเห็นกันโดยไม่มีสิ่งอื่นมาขวางกั้น และถูกแยกออกจากกันด้วยตัวกลางที่ไม่ดูดกลืนพลังงาน สามารถคำนวณได้จากสมการ (2-5)

$$q = \sigma A F (T_1^4 - T_2^4) \quad (2-5)$$

เมื่อ

- σ คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann Constant) มีค่าเท่ากับ 0.1713×10^{-8} Btu/(hr·ft²·R⁴) หรือ 5.673×10^{-8} W/(m²·K⁴)
- T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ หน่วยเป็นโรเมอร์ (R) หรือเคลวิน (K)
- A คือ พื้นที่ผิว หน่วยเป็นตารางฟุต (ft²) หรือ ตารางเมตร (m²)
- F คือ ปัจจัยกำหนดค่าตามลักษณะทางเรขาคณิตของระบบ

ในสมการ (2-5) มีข้อสมมติว่าพื้นผิวทั้งสองเป็น "วัตถุสีเทา" (Gray Body) ซึ่งหมายความว่าค่าการแผ่รังสี เท่ากับค่าการดูดกลืนพลังงาน ซึ่งเป็นสมมติฐานที่สามารถใช้ได้หลายกรณี ผู้ที่สนใจสามารถศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการแผ่รังสีความร้อนจากตำราการถ่ายเทความร้อน

2.3 แนวคิดเรื่องการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาและผนัง

ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาและผนังของระบบที่ประกอบด้วยหลายองค์ประกอบ (composite systems) มักเป็นประโยชน์ที่จะใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวม U ซึ่งนิยามโดยใช้สมการที่คล้ายคลึงกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน สามารถคำนวณได้จากสมการ (2-6)

$$Q = UA\Delta T \quad (2-6)$$

เมื่อ

U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม หน่วยเป็น $\text{Btu}/(\text{hr}\cdot^{\circ}\text{F})$ หรือ $\text{W}/^{\circ}\text{C}$

A คือ พื้นที่ผิวที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน หน่วยเป็น ตารางฟุต (ft^2) หรือ ตารางเมตร (m^2)

ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิ

สำหรับผนังเรียบ พื้นที่ผิวจะมีค่าเท่ากันตลอดตำแหน่งของผนัง แต่ในกรณีของผนังที่ไม่เรียบหรือไม่ขนานกันอาจเลือกพื้นที่เฉพาะ เช่น พื้นที่ผิวด้านนอก เพื่อความสะดวกในการคำนวณ ตัวอย่างเช่น ในกรณีของการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบเพดาน ห้องใต้หลังคา หลังคา มักนิยมใช้พื้นที่ของเพดานเป็นตัวกำหนดค่าสำหรับการคำนวณค่า U หรือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ซึ่งได้จากการกลับค่าสมการของความต้านทานความร้อนทั้งหมด (Thermal Resistance) ของส่วนประกอบนั้น ๆ โดยรวมถึงความต้านทานของชั้นวัสดุแต่ละชั้นและฟิล์มอากาศภายในและภายนอกตามรูปที่ 2-3 คำนวณได้จากสมการ (2-7)

$$U = \frac{1}{R_{\text{tot}} A} = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{L_A}{k_A} + \frac{L_B}{k_B} + \frac{L_C}{k_C} + \frac{1}{h_4}} \quad (2-7)$$

2.3.1 การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (OTTV) จะมีตัวแปรที่เกี่ยวข้อง คือ ส่วนของผนังอาคารทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นผนังทึบหรือผนังโปร่งแสง เช่น ช่องประตู หรือ หน้าต่าง ตามประกาศกระทรวงพลังงาน (2552) มีข้อกำหนดให้อาคารที่สร้างใหม่จะต้องมีค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังไม่มากกว่า 45 W/m^2 ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังคำนวณได้จากสมการ (2-8)

$$\text{OTTV} = U_w(1 - \text{WWR})(T_{\text{deq}}) + U_f(\text{WWR})\Delta T + \text{SC}(\text{WWR})(\text{SF}) \quad (2-8)$$

2.3.2 การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคา (RTTV) การคำนวณปริมาณความร้อนที่เข้าสู่อาคารทางหลังคามีลักษณะเช่นเดียวกับที่ผ่านผนัง โดยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุหลังคาและฝ้าเพดาน รวมถึงสีและความหนาแน่นของมวลหลังคา สำหรับวัสดุผนังหลังคาที่นิยมใช้ในการก่อสร้างในปัจจุบัน (Sang and CHAN, 2000) พบว่ามีค่าพลังงานความร้อนต่อตารางเมตรสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดตามประกาศกระทรวงพลังงาน (2552) ซึ่งอยู่ที่ 25 W/m^2 คำนวณได้จากสมการ (2-9)

$$\text{RTTV} = U_R(1 - \text{SSR})(T_{\text{deq}}) + U_m(\text{SSR})\Delta T + \text{SC}(\text{SSR})(\text{SF}) \quad (2-9)$$

จากสมการ (2-8) และ (2-9) เมื่อ

U_w คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผนังส่วนทึบ ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

T_{deq} คือ ค่าความต่างอุณหภูมิเทียบเท่าระหว่างภายนอกและภายในอาคารซึ่งรวมผลคูณของการดูดกลืนรังสีของผนังส่วนทึบ (K)

U_f คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคา ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

ΔT คือ ค่าความต่างอุณหภูมิเทียบเท่าระหว่างภายนอกและภายในอาคาร (K)

SC คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของกระจก

SF คือ ค่าปัจจัยแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับกระจก (W/m^2)

U_R คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหลังคาส่วนทึบ ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

SSR คือ อัตราส่วนของพื้นที่ที่รับรังสีจากดวงอาทิตย์โดยตรงเมื่อเทียบกับพื้นที่หลังคาทั้งหมด

WWR คือ อัตราส่วนพื้นที่กระจกต่อพื้นที่ผนังทั้งหมด

U_m คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหลังคาส่วนโปร่งแสง ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ โครงสร้างเปลือกอาคาร และเกณฑ์การดำเนินงานภายใน เมื่อกำหนดเกณฑ์การดำเนินงานภายในแล้ว การออกแบบอาคารให้มีประสิทธิภาพด้านพลังงานเพื่อลดการรับความร้อนจากภายนอกจะพึงพาโครงสร้างเปลือกอาคารเป็นหลัก แท้จริงแล้ว พฤติกรรมการถ่ายเทพลังงานของเปลือกอาคารควรได้รับการพิจารณาแบบบูรณาการ โดยรวมถึงสภาพอากาศ ทิศทางของอาคาร อัตราส่วนด้านอาคาร องค์ประกอบการบังแดด รูปร่างและลักษณะอาคาร อัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างต่อผนัง ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของกระจก มวลความร้อนของผนังทึบ เกณฑ์การดำเนินงานภายใน และประเภทของระบบบริการอาคาร

2.3.3 ระบบไฟฟ้าและแสงสว่างที่เกี่ยวข้องกับระบบเปลือกอาคาร สำหรับอาคารขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อนในยุคปัจจุบัน ความต้องการพลังงานไฟฟ้ามีปริมาณสูง ควรจัดตั้งแหล่งจ่ายไฟให้อยู่ใกล้กับศูนย์กลางของโหลดให้มากที่สุด เพื่อลดการสูญเสียพลังงานระหว่างการส่งจ่ายไฟฟ้า นอกจากนี้ ควรพิจารณาปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม เนื่องจากค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ต่ำส่งผลให้การส่งพลังงานไม่มีประสิทธิภาพ สำหรับระบบแสงสว่าง ควรเลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงที่ประหยัดพลังงาน เช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ประหยัดพลังงานแทนหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบเดิม และใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาดเล็กแทนหลอดไส้ นอกจากนี้ ควรออกแบบระบบสวิตช์ที่ยืดหยุ่นเพื่อให้สามารถใช้แสงสว่างจากธรรมชาติได้เมื่อพื้นที่ทำงานอยู่ใกล้หน้าต่าง ควรหลีกเลี่ยงการใช้แผ่นกรองแสงแบบฝ้า (Opal Diffuser) เนื่องจากอาจลดความเข้มของแสง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีฝุ่นเกาะสะสมข้อควรพิจารณาในการออกแบบระบบไฟฟ้าและแสงสว่าง ได้แก่ ปรับปรุงค่าตัวประกอบ

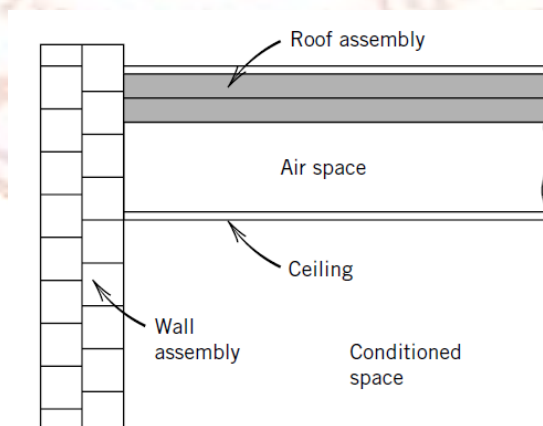
กำลังไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีประสิทธิภาพสูง ใช้แสงสว่างเฉพาะบริเวณที่จำเป็น เพื่อลดความเข้มของแสงในพื้นที่ทั่วไป ใช้อุปกรณ์ควบคุมแสงที่มีประสิทธิภาพสูง ออกแบบระบบสวิตช์ให้ยืดหยุ่นเพื่อสนับสนุนการใช้แสงธรรมชาติ ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมเวลาอัตโนมัติสำหรับปิดไฟในช่วงเวลาที่ไม่มีการใช้งาน ติดตั้งไฟแสดงสถานะเพื่อแจ้งเตือนเจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัยเมื่อมีไฟเปิดค้างไว้ในห้องที่ไม่มีผู้ใช้งาน

2.3.4 ระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคาร (Building Energy Management System, BEMS) มีความสำคัญเมื่อระบบกลไกและระบบไฟฟ้าของอาคารมีความซับซ้อน ระบบนี้ช่วยให้สามารถควบคุมและตรวจสอบระบบวิศวกรรมต่าง ๆ ภายในอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ BEMS ที่พัฒนาโดยใช้ซอฟต์แวร์อนุรักษ์พลังงาน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบและลดการใช้พลังงานในระหว่างการทำงานและบำรุงรักษาอาคาร โดยระบบสามารถปรับเวลาการเปิดและปิดเครื่องทำน้ำเย็น หม้อไอน้ำ ปั๊มน้ำ และเครื่องปรับอากาศให้สอดคล้องกับความต้องการจริงของอาคาร นอกจากนี้ ระบบยังสามารถปรับจุดตั้งค่าความสบายให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมภายนอก ควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า และลดการใช้แสงสว่างนอกเวลาทำการผ่านระบบควบคุมการ เปิด-ปิด ไฟ เป็นต้น

2.4 ระบบเปลือกอาคาร (Building Envelope)

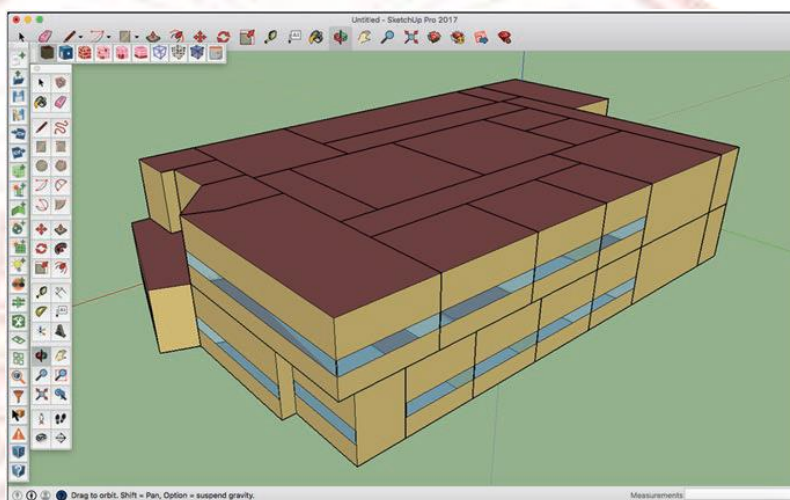
หมายถึงโครงสร้างที่มนุษย์สร้างขึ้นเพื่อแยกพื้นที่ภายในออกจากสภาพแวดล้อมภายนอกแสดงในรูปแบบที่

2-4



รูปที่ 2-4 ระบบเปลือกอาคารในส่วนหลังคา (McQuiston et al., 2004)

ส่วนประกอบของอาคารที่ทำหน้าที่แบ่งพื้นที่ภายในและภายนอก เช่น ผนัง หลังคา และพื้น มักเรียกรวมกันว่า เปลือกอาคาร เปลือกอาคารมีบทบาทสำคัญในการปกป้องพื้นที่ภายในจากฝน หิมะ ลม และอุณหภูมิที่สูงหรือต่ำเกินไป เพื่อสร้างสภาพแวดล้อมที่ปลอดภัย สะดวกสบาย ให้เหมาะสมต่อการอยู่อาศัยหรือการทำงานของผู้ใช้อาคาร (Brackney et al., 2018; Lim. and Leung, 2000) ระบบเปลือกอาคารมีการออกแบบโดยแสดงในรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 การออกแบบระบบเปลือกอาคาร (Brackney et al., 2018)

นอกจากนี้ พื้นที่ภายในอาคารมักถูกปรับสภาพอากาศด้วยระบบทำความร้อน การระบายอากาศ และเครื่องปรับอากาศ (Heating, Ventilation, and Air Conditioning, HVAC) เพื่อเพิ่มความสะดวกสบายแก่ผู้ใช้งาน การออกแบบเปลือกอาคารจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยสำคัญหลายประการ ได้แก่ ความแข็งแรงเพียงพอเพื่อรองรับโครงสร้างของตัวเอง ความสามารถในการป้องกันน้ำหรือวัสดุภายนอกที่ไม่พึงประสงค์ไม่ให้เข้ามาส่งผลกระทบต่ออาคารและทรัพย์สินภายใน ความมั่นคงปลอดภัยในการป้องกันสัตว์รบกวนหรือบุคคลที่ไม่ได้รับอนุญาต รวมถึงความสวยงามทางสถาปัตยกรรม แม้ว่าจะมีเอกสารมากมายที่กล่าวถึงแต่ละแง่มุมของเปลือกอาคาร แต่การศึกษานี้มุ่งเน้นที่การวิเคราะห์พลังงานของอาคาร โดยเฉพาะกระบวนการถ่ายเทพลังงานผ่านเปลือกอาคาร ในการออกแบบเปลือกอาคารเพื่อการระบายอากาศตามธรรมชาติ ควรวางตำแหน่งช่องระบายอากาศให้มีขนาดใหญ่ที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

โดยต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ เช่น การควบคุมแสงแดด ความปลอดภัย ความเป็นส่วนตัว การป้องกันสภาพอากาศ และการสูญเสียความร้อนในขบวนการลดความชื้น นอกจากนี้ ควรวางช่องระบายอากาศไว้ทั้งสองด้านของพื้นที่ใช้งาน เพื่อให้เกิดการถ่ายเทอากาศแบบไหลผ่าน (Cross-Ventilation)

เปลือกอาคารควรได้รับการออกแบบให้สามารถป้องกันความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ถ่ายเทผ่านองค์ประกอบของอาคาร โดยสามารถติดตั้งชั้นป้องกันความร้อนเพิ่มเติมบริเวณหลังคาหรือผนังภายนอก นอกจากนี้ การสร้างช่องอากาศระบายระหว่างชั้นป้องกันและโครงสร้างอาคาร จะช่วยลดการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน (Convective Heat Transfer) จากผิวภายนอกสู่ภายใน อีกทั้งการใช้ฉนวนสะท้อนรังสี เช่น แผ่นฟอยล์สะท้อนความร้อน บนพื้นผิวด้านในของเปลือกอาคารจะช่วยลดการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสี (Radiant Heat Transfer) รวมถึงการใช้วัสดุที่เป็นฉนวนสำหรับป้องกันความร้อนโดยมีวัสดุที่สามารถเป็นฉนวนได้เช่น

1. ยิปซัม (gypsum) ยิปซัมนับเป็นวัสดุที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในงานก่อสร้างปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของตกแต่งภายในอาคาร เมื่อพิจารณาถึงสมบัติทางกายภาพของยิปซัม พบว่ามีคุณลักษณะสำคัญหลายประการที่ทำให้วัสดุชนิดนี้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย

ในด้านความหนาแน่น ยิปซัมบริสุทธิ์มีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ประมาณ $2.3 - 2.4 \text{ g/cm}^3$ ขณะที่แผ่นยิปซัมบอร์ดทั่วไปที่ใช้ในงานก่อสร้างมีความหนาแน่นอยู่ที่ประมาณ $600 - 900 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งถือว่าน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับวัสดุก่อสร้างชนิดอื่น ๆ

สำหรับค่าการนำความร้อน ยิปซัมมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอยู่ที่ประมาณ $0.17 - 0.4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแผ่นยิปซัมบอร์ดที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไปมีค่าการนำความร้อนอยู่ที่ประมาณ $0.17 - 0.25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว ยิปซัมจึงจัดเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดีพอสมควร ส่งผลให้การใช้ยิปซัมในงานก่อสร้างช่วยในการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร ลดการถ่ายเทความร้อนระหว่างภายในและภายนอกอาคาร อันเป็นผลให้เกิดการประหยัดพลังงานในการปรับอากาศ นับว่าเป็นวัสดุที่มีส่วนช่วยในการอนุรักษ์พลังงานได้อีกทางหนึ่ง

2. โยหิน (rockwool) โยหินเป็นวัสดุฉนวนความร้อนที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างและอุตสาหกรรม วัสดุชนิดนี้ผลิตจากหินบะซอลต์ที่นำมาหลอมและปั่นให้เป็นเส้นใยแล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นหรือม้วน โยหินมีคุณสมบัติเด่นด้านการเป็นฉนวนกันความร้อนและการทนไฟที่ดีเยี่ยม ในด้านความหนาแน่น โยหินมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง $30 - 200 \text{ kg/m}^3$ โดยแปรผันตามประเภทและวัตถุประสงค์การใช้งาน โยหินที่มีความหนาแน่นต่ำมักใช้สำหรับงานฉนวนทั่วไป ขณะที่โยหินความหนาแน่นสูงจะใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงทางโครงสร้างหรือต้องรับน้ำหนักได้ สำหรับค่าการนำความร้อน โยหินมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอยู่ระหว่าง $0.033 - 0.045 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ที่อุณหภูมิห้อง ค่าการนำความร้อนที่ต่ำนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีในการเป็นฉนวนกันความร้อน โดยทั่วไปพบว่าโยหินที่มีความหนาแน่นสูงจะมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่า จึงมีประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนที่ดีกว่า โยหินจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการการควบคุมอุณหภูมิ การประหยัดพลังงาน และการป้องกันเสียง นอกจากนี้ ความสามารถในการทนความร้อนสูงและไม่ลุกลามไฟยังทำให้วัสดุนี้มีความปลอดภัยต่อการใช้งานในอาคารต่าง ๆ อีกด้วย

3. PIR (Polyisocyanurate) เป็นฉนวนกันความร้อนที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างและอุตสาหกรรม โดยมีสมบัติทางกายภาพที่สำคัญดังนี้ ความหนาแน่นของวัสดุ PIR โดยทั่วไปอยู่ในช่วง $30 - 40 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งถือว่าม่น้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับวัสดุฉนวนชนิดอื่น ความหนาแน่นที่ต่ำนี้ทำให้สะดวกในการติดตั้งและขนส่ง สำหรับค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของวัสดุ PIR อยู่ในช่วง $0.022 - 0.028 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพสูงในการป้องกันการถ่ายเทความร้อน ค่าการนำความร้อนที่ต่ำนี้ทำให้วัสดุ PIR มีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีเยี่ยม สามารถช่วยประหยัดพลังงานในการทำความร้อนและความเย็นภายในอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. PS (Polystyrene) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยมีสมบัติที่สำคัญ คือ ด้านความหนาแน่น พอลิสไตรีนชนิดทั่วไป (General Purpose Polystyrene) มีค่าความหนาแน่นประมาณ $1.04 - 1.06 \text{ g/cm}^3$ ส่วนพอลิสไตรีนชนิดโฟม (Expanded Polystyrene) มีความหนาแน่นที่ต่ำกว่ามาก โดยมีค่าประมาณ $0.01 - 0.05 \text{ g/cm}^3$ ขึ้นอยู่กับปริมาณการขยายตัว สำหรับสมบัติด้านการนำความร้อน พอลิสไตรีนชนิด

ทั่วไปมีค่าการนำความร้อนประมาณ $0.12 - 0.18 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ซึ่งจัดว่าเป็นฉนวนความร้อนที่ไม่ดีนัก แต่เมื่อพิจารณาพอลิไธรีนชนิดโฟม จะพบว่ามีการนำความร้อนต่ำมาก ประมาณ $0.03 - 0.04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ทำให้มีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดี จึงนิยมนำไปใช้เป็นวัสดุฉนวนในการก่อสร้างและบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการรักษาอุณหภูมิ

5. PE (Polyethylene) เป็นพลาสติกที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตหลากหลายประเภท เนื่องจากมีสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งานหลายด้าน วัสดุชนิดนี้มีความหนาแน่นที่แตกต่างกันไปตามประเภท โดยทั่วไปความหนาแน่นของโพลิเอทิลีนจะอยู่ในช่วง $0.91 - 0.97 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็นโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่มีค่าความหนาแน่น $0.91-0.94 \text{ g/cm}^3$ และโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่มีค่าความหนาแน่น $0.94 - 0.97 \text{ g/cm}^3$ ในส่วนของสมบัติการนำความร้อน โพลิเอทิลีนมีการนำความร้อนประมาณ $0.33 - 0.52 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ โดยค่าดังกล่าวจะแปรผันตามความหนาแน่นและโครงสร้างโมเลกุลของโพลิเอทิลีน กล่าวคือ โพลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูงจะมีแนวโน้มที่จะนำความร้อนได้ดีกว่าโพลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำ

6. PU (Polyurethane) เป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท วัสดุนี้มีสมบัติทางกายภาพที่สำคัญหลายประการ โดยเฉพาะด้านความหนาแน่นและค่าการนำความร้อน ความหนาแน่นมีค่าแตกต่างกันไปตามประเภทและการใช้งาน โดยทั่วไปมีค่าอยู่ในช่วง $30 - 1,200 \text{ kg/m}^3$ หากเป็นโฟมพอลิยูรีเทนชนิดอ่อนจะมีความหนาแน่นประมาณ $30 - 80 \text{ kg/m}^3$ ในขณะที่โฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งมีความหนาแน่นประมาณ $30 - 100 \text{ kg/m}^3$ ส่วนพอลิยูรีเทนแบบยืดหยุ่นมีความหนาแน่นสูงกว่า คือประมาณ $1,050 - 1,200 \text{ kg/m}^3$

ด้านค่าการนำความร้อน มีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดีเยี่ยม โดยมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ โฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งมีการนำความร้อนประมาณ $0.022 - 0.028 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ส่วนโฟมพอลิยูรีเทนชนิดอ่อนมีค่าประมาณ $0.035 - 0.050 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ และพอลิยูรีเทนแบบยืดหยุ่นมีการนำความร้อนประมาณ $0.1 - 0.3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ คุณสมบัตินี้ทำให้พอลิยูรีเทนเป็นวัสดุที่ได้รับการนิยมนำไปใช้เป็นฉนวนกันความร้อนในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ระบบทำความเย็น และอุปกรณ์เครื่องใช้ต่าง ๆ

2.5 การใช้โปรแกรม OpenStudio ในการวิเคราะห์ตัวแปรทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทพลังงาน

OpenStudio คือ ซอฟต์แวร์แบบจำลองและวิเคราะห์พลังงานในอาคาร ที่พัฒนาโดยห้องปฏิบัติการพลังงานทดแทนแห่งชาติ (National Renewable Energy Laboratory หรือ NREL) ของสหรัฐอเมริกา ร่วมกับกระทรวงพลังงานสหรัฐอเมริกา (U.S. Department of Energy) และหน่วยงานอื่น ๆ โปรแกรมนี้เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับวิศวกร สถาปนิก นักวิจัย และผู้เชี่ยวชาญด้านอาคาร ในการวิเคราะห์และปรับปรุงประสิทธิภาพด้านพลังงานของอาคาร OpenStudio เริ่มต้นพัฒนาขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 2008 โดยมีจุดประสงค์เพื่อสร้างเครื่องมือที่ทำให้การใช้งานโปรแกรมจำลองพลังงาน EnergyPlus ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีความซับซ้อนทางเทคนิคสูง ให้สามารถเข้าถึงได้ง่ายขึ้นผ่านส่วนต่อประสานกราฟิกที่ใช้งานสะดวก (Graphical User Interface) โดยสามารถมากรใช้ร่วมกับ OpenStudio และตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา OpenStudio ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องให้มีความสามารถหลากหลายและรองรับการทำงานในรูปแบบที่ซับซ้อนมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีการเปิดเผยรหัสต้นฉบับ (Open Source) ทำให้นักวิจัยทั่วโลกสามารถมีส่วนร่วมในการพัฒนาและปรับปรุงโปรแกรม (Brackney et al., 2018)

2.5.1 องค์ประกอบและการทำงานของ OpenStudio

OpenStudio ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักหลายส่วนที่ทำงานร่วมกัน ได้แก่

1. OpenStudio Application แอปพลิเคชันหลักที่ใช้สร้างและแก้ไขแบบจำลองอาคาร รวมทั้งกำหนดค่าต่าง ๆ เช่น วัสดุก่อสร้าง ระบบปรับอากาศ ระบบแสงสว่าง และตารางการใช้งานอาคาร
2. SketchUp Plugin ส่วนเสริมที่ทำงานร่วมกับโปรแกรม SketchUp ซึ่งเป็นโปรแกรมการออกแบบ 3 มิติ ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ช่วยให้ผู้ใช้สามารถสร้างรูปทรงเรขาคณิตของอาคารได้อย่างรวดเร็วและง่ายดาย
3. OpenStudio SDK (Software Development Kit) ชุดเครื่องมือที่ช่วยให้นักพัฒนาซอฟต์แวร์สามารถสร้างแอปพลิเคชันหรือส่วนขยายเพิ่มเติมที่ทำงานร่วมกับ OpenStudio ได้

4. Parametric Analysis Tool (PAT) เครื่องมือที่ช่วยในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่าง ๆ ต่อประสิทธิภาพทางพลังงานของอาคาร
5. ResultsViewer เครื่องมือสำหรับแสดงผลลัพธ์จากการจำลองในรูปแบบกราฟและตารางที่เข้าใจง่าย

2.5.2 ความสามารถในการประยุกต์ใช้งานโปรแกรม OpenStudio

โปรแกรม OpenStudio เป็นซอฟต์แวร์ที่มีความสามารถอันหลากหลายซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้ใช้งาน โดยหนึ่งในความสามารถที่โดดเด่นคือการจำลองพลังงานแบบครบวงจร ซึ่งครอบคลุมทั้งการทำความร้อน การทำความเย็น การระบายอากาศ การปรับอากาศ แสงสว่าง และการใช้พลังงานจากอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ โปรแกรมนี้สามารถคำนวณตามสภาพภูมิอากาศจริงในแต่ละพื้นที่ โดยอาศัยข้อมูลสภาพอากาศที่มีการบันทึกไว้ ส่งผลให้ได้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด นอกจากความสามารถในการวิเคราะห์ด้านพลังงานแล้ว OpenStudio ยังสามารถวิเคราะห์สมรรถนะอาคารในมิติอื่น ๆ อีกมากมาย อาทิ คุณภาพอากาศภายในอาคาร ความสบายเชิงอุณหภูมิของผู้ใช้อาคาร ปริมาณแสงธรรมชาติและคุณภาพแสงในอาคาร รวมถึงการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ผู้ใช้สามารถประเมินอาคารได้อย่างรอบด้าน OpenStudio ยังมีความสามารถในการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ โดยสามารถประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของมาตรการประหยัดพลังงานต่าง ๆ ด้วยการคำนวณระยะเวลาคืนทุน มูลค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนภายใน และต้นทุนตลอดวงจรชีวิต ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการตัดสินใจลงทุนในเทคโนโลยีประหยัดพลังงาน อีกหนึ่งความสามารถที่น่าสนใจคือการปรับปรุงประสิทธิภาพแบบอัตโนมัติ โดย OpenStudio มีเครื่องมือและอัลกอริทึมที่ช่วยในการหาแนวทางปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานที่เหมาะสมที่สุด ผู้ใช้สามารถกำหนดเป้าหมายและข้อจำกัดต่าง ๆ เช่น งบประมาณ พื้นที่ใช้สอย หรือเป้าหมายการลดคาร์บอน แล้วให้โปรแกรมคำนวณหาชุดของมาตรการที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ OpenStudio ยังสามารถช่วยในการประเมินอาคารตามมาตรฐานต่าง ๆ เช่น มาตรฐาน ASHRAE 90.1 การรับรอง LEED และมาตรฐานอาคารเขียวอื่น ๆ ทั้งในระดับนานาชาติและระดับประเทศ ในด้านการประยุกต์ใช้งาน สถาปนิกและวิศวกร

สามารถใช้ OpenStudio ในกระบวนการออกแบบอาคารใหม่ตั้งแต่ขั้นตอนแรก เพื่อประเมินทางเลือกในการออกแบบที่แตกต่างกัน เช่น ทิศทางการวางอาคาร สัดส่วนหน้าต่างต่อผนัง รูปแบบหลังคา และวัสดุก่อสร้าง ทำให้สามารถตัดสินใจเลือกแนวทางการออกแบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุดได้ตั้งแต่เริ่มต้น สำหรับอาคารที่มีอยู่แล้ว OpenStudio สามารถช่วยในการวิเคราะห์สภาพปัจจุบันและประเมินศักยภาพในการประหยัดพลังงานผ่านมาตรการต่าง ๆ เช่น การปรับปรุงเปลือกอาคาร การเปลี่ยนระบบปรับอากาศและระบายอากาศให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น การติดตั้งระบบควบคุมอาคารอัจฉริยะ และการติดตั้งระบบผลิตพลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ นักวิจัยและนักพัฒนาก็ใช้ประโยชน์จาก OpenStudio ในการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ ด้านการประหยัดพลังงานในอาคาร เช่น วัสดุก่อสร้างประสิทธิภาพสูง ระบบปรับอากาศแบบใหม่ หรือกลยุทธ์การควบคุมที่ล้ำสมัย โดยสามารถทดสอบแนวคิดผ่านการจำลองทางคอมพิวเตอร์ก่อนที่จะมีการสร้างต้นแบบจริง นอกจากนี้ OpenStudio ยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์การใช้พลังงานของกลุ่มอาคารหรือชุมชน เพื่อวางแผนด้านพลังงานในระดับเมือง ประเมินผลกระทบของนโยบายด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม หรือออกแบบระบบพลังงานชุมชน เมื่อเทียบกับซอฟต์แวร์อื่น OpenStudio มีข้อได้เปรียบหลายประการ เช่น การเป็นซอฟต์แวร์แบบเปิดเผยแพร่ ทำให้สามารถเข้าถึงได้โดยไม่มีค่าใช้จ่าย และสามารถปรับแต่งได้ตามความต้องการ มีชุมชนผู้ใช้และนักพัฒนาที่กว้างขวาง ทำให้มีการแลกเปลี่ยนความรู้ แบ่งปันแบบจำลอง และพัฒนาส่วนขยายต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังมีความยืดหยุ่นและสามารถปรับแต่งได้ ด้วยโครงสร้างแบบ SDK ทำให้สามารถพัฒนาส่วนขยายหรือเชื่อมต่อกับโปรแกรมอื่น ๆ ได้ และมีความแม่นยำในการจำลองสูง เนื่องจากการใช้ EnergyPlus คำนวณการใช้พลังงานซึ่งได้รับการยอมรับในระดับสากล อย่างไรก็ตาม แม้ว่า OpenStudio จะเป็นเครื่องมือที่ทรงพลัง แต่ก็มีความท้าทายและข้อจำกัดบางประการ เช่น ความซับซ้อนในการเรียนรู้ เนื่องจากยังคงต้องอาศัยความรู้พื้นฐานด้านวิศวกรรมอาคารและระบบอาคารที่ดีพอสมควร การจำลองที่ซับซ้อนอาจต้องใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์สูง และข้อจำกัดในการแสดงผล เนื่องจากเครื่องมือแสดงผลมาตรฐานอาจยังไม่สวยงามหรือมีความยืดหยุ่นเท่ากับซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์บางตัว

2.5.3 ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม OpenStudio มีขั้นตอนดังนี้

- 1) เริ่มต้นใช้งานโปรแกรม OpenStudio ในขั้นแรกของการใช้งานโปรแกรม ผู้ใช้ต้องทำการเปิด OpenStudio Application และสร้างโครงการใหม่ โดยในขั้นตอนนี้จำเป็นต้องตั้งค่าข้อมูลพื้นฐานของหลังคาที่ต้องการจำลอง ซึ่งได้แก่ ชื่อหลังคา สถานที่ตั้ง และเวลาที่ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง นอกจากนี้ เพื่อให้การจำลองการใช้พลังงานของหลังคามีความแม่นยำสูงสุด ผู้ใช้ต้องเลือกฐานข้อมูลสภาพภูมิอากาศที่เหมาะสมและสอดคล้องกับพื้นที่ตั้งของหลังคา เนื่องจากสภาพภูมิอากาศเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณพลังงานที่ใช้ภายในหลังคา การตั้งค่าข้อมูลที่ถูกต้องจะช่วยให้สามารถจำลองสถานการณ์ได้อย่างสมจริงและนำไปสู่การวิเคราะห์ที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น
- 2) สร้างแบบจำลองเปลือกอาคาร หลังจากที่ได้กำหนดค่าพื้นฐานของโครงการแล้ว ผู้ใช้สามารถสร้างแบบจำลองเปลือกอาคารโดยใช้เครื่องมือใน Geometry Tab ซึ่งช่วยให้สามารถสร้างแบบจำลองเปลือกอาคารในรูปแบบสามมิติได้ โดยต้องกำหนดรายละเอียดทางกายภาพของเปลือกอาคาร เช่น ขนาด ความสูง ความกว้าง ความลึก และรูปทรงของตัวเปลือกอาคาร รวมถึงการกำหนดโซนต่าง ๆ ภายในหลังคาเพื่อจำลองพื้นที่การใช้งานในส่วนต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้อง ในกรณีที่ผู้ใช้ต้องการสร้างแบบจำลองเปลือกอาคารที่ซับซ้อนมากขึ้น โปรแกรม EnergyPlus สามารถใช้ร่วมกับ OpenStudio Plugin เพื่อช่วยในการสร้างและนำเข้าแบบจำลองสามมิติเพื่อการวิเคราะห์ที่แม่นยำมากขึ้น
- 3) กำหนดภาระพลังงานของเปลือกอาคาร ขั้นตอนนี้เป็นการกำหนดปริมาณพลังงานที่เปลือกอาคารใช้ในแต่ละส่วน โดยดำเนินการผ่าน Loads Tab ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับกำหนดค่าภาระพลังงานพื้นฐาน เช่น ภาระจากการระบายอากาศ ภาระจากการใช้ไฟฟ้า และความร้อนที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้า นอกจากนี้ ยังต้องระบุประเภทและจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานภายในเปลือกอาคาร พร้อมกำหนดตารางการใช้งานของแต่ละอุปกรณ์ให้สอดคล้องกับการใช้งานจริง ข้อมูลเหล่านี้มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยรวมของเปลือกอาคาร
- 4) กำหนดตารางเวลาและเงื่อนไขการควบคุม ในการควบคุมและจัดการพลังงานในเปลือกอาคาร ผู้ใช้สามารถกำหนดช่วงเวลาการใช้งานของเปลือกอาคารได้โดยใช้ Schedules Tab ซึ่งช่วยให้สามารถกำหนดเวลาการ เปิด-ปิด ระบบไฟฟ้า ระบบปรับ

อากาศ และอุปกรณ์อื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ยังสามารถตั้งค่า Thermostat Setpoints เพื่อกำหนดระดับอุณหภูมิที่ต้องการสำหรับแต่ละโซนภายในหลังคา ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานและประสิทธิภาพของระบบทำความร้อนและความเย็น

5) เลือกอุปกรณ์และระบบเครื่องกล

ขั้นตอนถัดไปคือการกำหนดระบบเครื่องกลและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการควบคุมสภาพแวดล้อมภายในเปลือกอาคาร โดยดำเนินการผ่าน HVAC Systems Tab ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับการเลือกและกำหนดค่าการทำงานของ ระบบปรับอากาศ ระบบระบายอากาศ และระบบทำความร้อน การเลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับลักษณะของหลังคาจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดการสูญเสียพลังงานที่ไม่จำเป็น

6) จำลองและวิเคราะห์ผลลัพธ์ เมื่อดำเนินการตั้งค่าทั้งหมดเรียบร้อยแล้ว ผู้ใช้สามารถทำการจำลองการใช้พลังงานของเปลือกอาคาร Run Simulation Tab โปรแกรมจะทำการคำนวณและแสดงผลลัพธ์ผ่าน Results Summary ซึ่งเป็นรายงานสรุปผลเกี่ยวกับปริมาณพลังงานที่ใช้ในแต่ละส่วนของเปลือกอาคาร การแสดงผลสามารถอยู่ในรูปของกราฟ ตาราง หรือรายงานเชิงตัวเลข เพื่อให้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.6 ห้องคลีนรูม

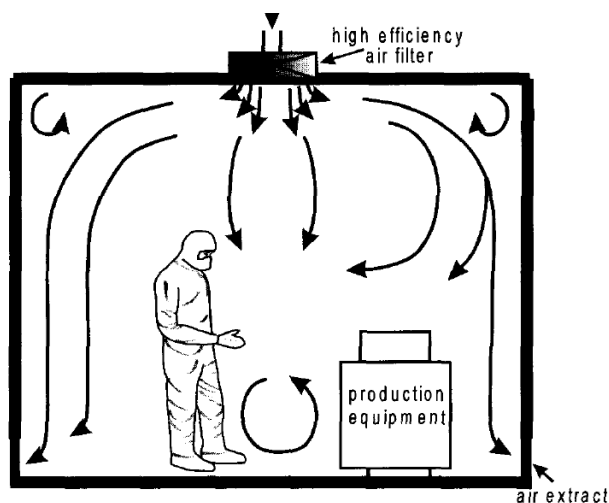
2.6.1 นิยามของห้องคลีนรูม ห้องคลีนรูมในปัจจุบันมีความหมายพิเศษและได้รับการนิยามในมาตรฐานขององค์การระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐาน ISO 14644-1 ว่า

"ห้องที่มีการควบคุมความเข้มข้นของอนุภาคในอากาศ ซึ่งได้รับการออกแบบและใช้งานในลักษณะที่ลดการนำเข้า การเกิดขึ้น และการคงอยู่ของอนุภาคภายในห้องให้น้อยที่สุด และมีการควบคุมพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และความดัน ตามความจำเป็น"

สองในสามส่วนแรกของคำนิยามคือสาระสำคัญของห้องคลีนรูม นั่นคือ ห้องที่ลดการนำเข้า การเกิดขึ้น และการคงอยู่ของอนุภาคให้น้อยที่สุด วิธีการดังกล่าวทำได้โดย ประการแรก จัดหา

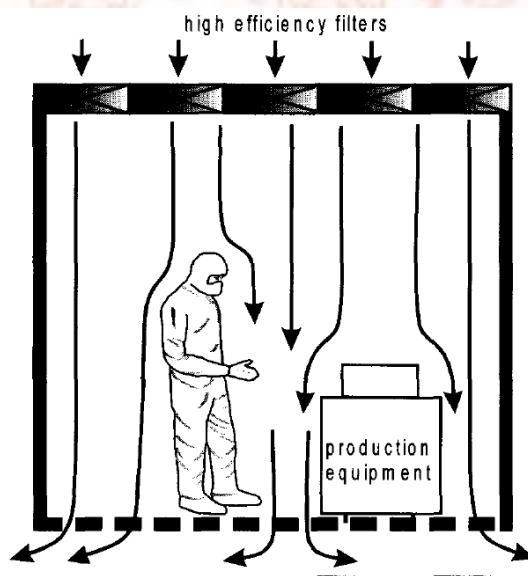
อากาศในปริมาณมากเป็นพิเศษที่ผ่านการกรองด้วยตัวกรองประสิทธิภาพสูง อากาศนี้ถูกใช้เพื่อเจือจางและกำจัดอนุภาคและแบคทีเรียที่แพร่กระจายจากบุคลากรและเครื่องจักรภายในห้องและสร้างความดันภายในห้องและทำให้มั่นใจว่าอากาศสกปรกไม่ไหลเข้าสู่ห้องคลีนรูม ประการที่สอง ห้องคลีนรูมถูกสร้างด้วยวัสดุที่ไม่ก่อให้เกิดอนุภาคและสามารถทำความสะอาดได้ง่าย สุดท้าย บุคลากรในห้องคลีนรูมใช้เสื้อผ้าที่ห่อหุ้มตัวเองและลดการแพร่กระจายของอนุภาคและจุลินทรีย์ มาตรการเหล่านี้และมาตรการอื่น ๆ ที่คล้ายกันซึ่งลดการนำเข้า การเกิดขึ้น และการคงอยู่ของการปนเปื้อนในห้องคลีนรูมจะถูกกล่าวถึงในการศึกษานี้ ห้องคลีนรูมยังสามารถควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น เสียง แสงสว่าง และการสั่นสะเทือน ห้องคลีนรูมเป็นวิทยาการสมัยใหม่แม้ว่ารากฐานของการออกแบบและการจัดการห้องคลีนรูมจะย้อนกลับไปมากกว่า 100 ปีและมีรากฐานจากการควบคุมการติดเชื้อในโรงพยาบาล แต่ความต้องการสภาพแวดล้อมที่สะอาดสำหรับการผลิตในอุตสาหกรรมเป็นความจำเป็นของสังคมสมัยใหม่ ห้องคลีนรูมจำเป็นเพราะผู้คน เครื่องจักรการผลิต และโครงสร้างอาคารก่อให้เกิดการปนเปื้อน ซึ่งจะได้กล่าวถึงในภายหลังในการศึกษานี้ ผู้คนและเครื่องจักรผลิตอนุภาคนับล้าน และวัสดุก่อสร้างทั่วไปสามารถแตกหักได้ง่าย ห้องคลีนรูมควบคุมการกระจายตัวของอนุภาคและช่วยให้การผลิตดำเนินไปในสภาพแวดล้อมที่สะอาด (Whyte, 2001)

2.6.2 ประเภทของห้องคลีนรูม ห้องคลีนรูมได้พัฒนาเป็นสองประเภทหลักซึ่งแตกต่างกันตามวิธีการระบายอากาศ ได้แก่ ห้องคลีนรูมแบบระบายอากาศแบบปั่นป่วนและห้องคลีนรูมแบบการไหลทิศทางเดียว ห้องคลีนรูมแบบระบายอากาศแบบปั่นป่วนยังเป็นที่รู้จักในชื่อ “แบบไม่มีทิศทางเดียว” ส่วนห้องคลีนรูมแบบการไหลทิศทางเดียวเดิมเป็นที่รู้จักในชื่อห้องคลีนรูม “แบบการไหลแบบราบเรียบ” ห้องคลีนรูมประเภทการไหลทิศทางเดียวใช้อากาศมากกว่าประเภทระบายอากาศแบบปั่นป่วนอย่างมาก และให้ความสะอาดที่เหนือกว่า ห้องคลีนรูมสองประเภทหลักแสดงเป็นแผนภาพในรูปที่ 2-6 และ 2-7



รูปที่ 2-6 ห้องคลีนรูมแบบระบายอากาศแบบปั่นป่วน (Whyte, 2001)

รูปที่ 2-6 แสดงห้องที่มีการระบายอากาศแบบปั่นป่วนซึ่งรับอากาศสะอาดที่ผ่านการกรองผ่านตัวกระจายอากาศในเพดาน อากาศนี้ผสมกับอากาศในห้องและกำจัดสิ่งปนเปื้อนในอากาศผ่านทางช่องสกัดอากาศที่ด้านล่างของผนัง การเปลี่ยนอากาศโดยปกติเท่ากับหรือมากกว่า 20 ครั้งต่อชั่วโมง ซึ่งมากกว่าที่ใช้ในห้องธรรมดา เช่น ในสำนักงาน ในห้องคลีนรูมรูปแบบนี้ สิ่งปนเปื้อนที่เกิดจากคนและเครื่องจักรจะถูกผสมและเจือจางด้วยอากาศที่จ่ายเข้ามาแล้วถูกกำจัดออกไป



รูปที่ 2-7 ห้องคลีนรูมแบบการไหลทิศทางเดียว (Whyte, 2001)

รูปที่ 2-7 แสดงหลักการพื้นฐานของห้องการไหลทิศทางเดียว ตัวกรองประสิทธิภาพสูงถูกติดตั้งครอบคลุมทั่วเพดานหรือผนังในบางระบบและเป็นแหล่งจ่ายอากาศ อากาศนี้พัดผ่านห้องในทิศทางเดียวด้วยความเร็วประมาณ 0.4 m/s และออกผ่านพื้น จึงกำจัดสิ่งปนเปื้อนในอากาศออกจากห้อง ระบบนี้ใช้อากาศมากกว่าห้องคลีนรูมแบบระบายอากาศแบบปั่นป่วน แต่เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอากาศมีทิศทาง จึงลดการแพร่กระจายของสิ่งปนเปื้อนในห้องและพัดอนุภาคเหล่านั้นออกผ่านทางพื้น

2.6.3 การจำแนกประเภทของห้องคลีนรูมตามมาตรฐาน ISO 14644-1 ห้องคลีนรูมเป็นพื้นที่ควบคุมสภาพแวดล้อมที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมที่ต้องการความสะอาดสูง เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ยา และเครื่องมือแพทย์ การจำแนกประเภทของห้องคลีนรูมอย่างถูกต้องจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้แน่ใจว่ากระบวนการผลิตหรือการวิจัยนั้นเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด มาตรฐาน ISO 14644-1 ซึ่งกำหนดโดยองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (International Organization for Standardization) เป็นมาตรฐานสากลที่ใช้ในการจำแนกความสะอาดของอากาศในห้องคลีนรูมและสภาพแวดล้อมควบคุม มาตรฐานดังกล่าวได้แบ่งระดับความสะอาดออกเป็น 9 ระดับ โดยเริ่มจาก ISO Class 1 ซึ่งเป็นระดับที่มีความสะอาดสูงสุด ไปจนถึง ISO Class 9 ซึ่งเป็นระดับที่มีความสะอาดน้อยที่สุด หลักการสำคัญในการจำแนกประเภทตามมาตรฐาน ISO 14644-1 คือการวัดความเข้มข้นของอนุภาคในอากาศ โดยพิจารณาจากขนาดและจำนวนของอนุภาคต่อหน่วยปริมาตรอากาศ ทั้งนี้ สมการหลักที่ใช้ในการจำแนกประเภทคือสมการ (2-10)

$$C_n = 10^N \times \left(\frac{0.1}{D} \right)^{2.08} \quad (2-10)$$

เมื่อ

C_n คือ จำนวนอนุภาคสูงสุดที่ยอมรับได้ต่อลูกบาศก์เมตรของอากาศ

N คือ หมายเลข ISO Class (1 ถึง 9)

D คือ ขนาดของอนุภาคที่พิจารณา (ไมครอน)

2.08 คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ

ในการปฏิบัติจริง การจำแนกประเภทห้องคลีนรูมจะต้องอาศัยการวัดที่เที่ยงตรงโดยใช้เครื่องนับอนุภาคที่ได้รับการสอบเทียบตามมาตรฐาน การวัดจะต้องดำเนินการในสถานะที่กำหนด ซึ่งอาจเป็นสถานะ "as-built" (ห้องที่สร้างเสร็จแต่ยังไม่มีอุปกรณ์หรือบุคลากร) สถานะ "at-rest" (ห้องที่มีอุปกรณ์แต่ไม่มีบุคลากร) หรือสถานะ "operational" (ห้องที่มีทั้งอุปกรณ์และบุคลากรกำลังปฏิบัติงาน) เพื่อให้ห้องคลีนรูมยังคงอยู่ในระดับที่จำแนกไว้ จำเป็นต้องมีการตรวจสอบและรับรองซ้ำเป็นระยะ โดยทั่วไปจะดำเนินการทุก 6 ถึง 12 เดือน ขึ้นอยู่กับระดับความสำคัญของการใช้งาน นอกจากนี้ การควบคุมสภาพแวดล้อมอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความดัน และอัตราการหมุนเวียนของอากาศ ก็มีความสำคัญเช่นกันในการรักษาความสะอาดของห้องคลีนรูมแต่ละระดับของ ISO Class ที่เหมาะกับการใช้งานที่แตกต่างกัน ISO Class 1 ถึง 3 เหมาะสำหรับการผลิตชิปเซมิคอนดักเตอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความละเอียดสูง ISO Class 5 ถึง 7 เหมาะสำหรับการผลิตยาปราศจากเชื้อและเครื่องมือแพทย์ ส่วน ISO Class 8 และ 9 เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมอาหารและพื้นที่ที่ต้องการความสะอาดมากกว่าสภาพแวดล้อมทั่วไป การเลือกระดับ ISO Class, FS-209E และ EU GMP ที่เหมาะสมจึงขึ้นอยู่กับความต้องการเฉพาะของกระบวนการผลิตหรือกิจกรรมที่จะดำเนินการภายในห้องคลีนรูม การลงทุนในระดับความสะอาดที่สูงเกินความจำเป็นอาจส่งผลให้ต้นทุนสูงขึ้นโดยไม่จำเป็น ในขณะที่การเลือกระดับความสะอาดที่ต่ำเกินไปอาจส่งผลเสียต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์หรือความน่าเชื่อถือของการวิจัย โดยมีการจำแนกดังแสดงในตารางที่ 2-1, ตารางที่ 2-2, ตารางที่ 2-3, ตารางที่ 2-4 และ ตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-1 การจำแนกประเภทของห้องคลีนรูมตามมาตรฐาน ISO 14644-1

Class	จำนวนอนุภาคต่อลูกบาศก์เมตร (Particle/ m ³)					
	≥0.1 µm	≥0.2 µm	≥0.3 µm	≥1.0 µm	≥0.5 µm	≥5.0 µm
ISO 1	1	2	n/a	n/a	n/a	n/a
ISO 2	10	24	10	4	n/a	n/a
ISO 3	100	237	102	35	8	n/a
ISO 4	1000	2370	1020	353	83	n/a
ISO 5	10000	23700	10200	3530	832	29
ISO 6	100000	237000	102000	35300	8320	293
ISO 7	n/a	n/a	n/a	353000	83200	2930
ISO 8	n/a	n/a	n/a	3530000	832000	29300
ISO 9	n/a	n/a	n/a	35300000	8320000	293000

การจำแนกประเภทห้องคลีนรูมตามมาตรฐาน ISO 14644-1 เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญและจำเป็นต้องดำเนินการอย่างเป็นระบบ โดยอาศัยทั้งการคำนวณทางทฤษฎีและการวัดในทางปฏิบัติ เพื่อให้มั่นใจว่าห้องคลีนรูมนั้นเหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งานและเป็นไปตามมาตรฐานสากล โดยการประยุกต์ใช้งานในแต่ละประเภทแสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 การประยุกต์การใช้งานของประเภทของห้องคลีนรูม ตามมาตรฐาน ISO 14644-1

ISO Class	การประยุกต์ใช้งาน
Class 1	การผลิตวงจรรวมขนาดเล็กมาก (VLSI) การผลิตชิปประมวลผลที่มีความละเอียดสูงสุด การสร้างชิปเซมิคอนดักเตอร์สำหรับเทคโนโลยี 5 nm หรือเล็กกว่า
Class 2	การผลิตฮาร์ดดิสก์ความจุสูง การผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการความแม่นยำสูง การผลิตวงจรรวมความหนาแน่นสูง
Class 3	การผลิตเซมิคอนดักเตอร์การผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ความละเอียดสูง การผลิตจอภาพ LCD/OLED ความละเอียดสูง ห้องปฏิบัติการนาโนเทคโนโลยี
Class 4	การผลิตเลนส์ออปติคอลความแม่นยำสูง การผลิตยาที่มีความไวสูง การผลิตอุปกรณ์การแพทย์ที่ต้องการความแม่นยำสูง การผลิตวัสดุทางการแพทย์ที่ต้องฝังในร่างกาย
Class 5	การเตรียมยาปราศจากเชื้อ ห้องผ่าตัด การผลิตยาฉีด การเก็บรักษาเนื้อเยื่อสำหรับการปลูกถ่าย ห้องปฏิบัติการด้านเทคโนโลยีชีวภาพ
Class 6	การผลิตเครื่องมือแพทย์ การผลิตเครื่องสำอางที่ปราศจากเชื้อ การบรรจุยาและอาหารเสริมที่ต้องการสภาพปลอดเชื้อ ห้องปฏิบัติการตรวจชิ้นเนื้อทางการแพทย์
Class 7	การผลิตยาทั่วไป การผลิตและบรรจุอาหารที่ต้องการความสะอาดสูง การผลิตเครื่องสำอางระดับสูง การผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป ห้องปฏิบัติการทดสอบทางการแพทย์
Class 8	พื้นที่บรรจุอาหาร พื้นที่เปลี่ยนชุดก่อนเข้าคลีนรูมระดับสูงกว่า การผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่มีความแม่นยำสูง ห้องปฏิบัติการทั่วไป การผลิตอุปกรณ์ทางการแพทย์สำหรับใช้ภายนอกในร่างกาย
Class 9	พื้นที่ประกอบทั่วไปที่ต้องการความสะอาดมากกว่าสภาพแวดล้อมปกติ พื้นที่ซ่อมบำรุงอุปกรณ์เครื่องมือแพทย์ พื้นที่ผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขั้นพื้นฐาน การผลิตเครื่องสำอางทั่วไป

ตารางที่ 2-3 มาตรฐานห้องสะอาด U.S. Federal Standard 209 E (FS-209E)

Class	จำนวนอนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุต (Particle/ ft ³)				
	≥0.1 μm	≥0.2 μm	≥0.3 μm	≥0.5 μm	≥5.0 μm
1	35	7.5	3	1	n/a
10	350	75	30	10	n/a
100	n/a	750	300	100	n/a
1000	n/a	n/a	n/a	1000	7
10000	n/a	n/a	n/a	10000	70
100000	n/a	n/a	n/a	100000	700

ตารางที่ 2-4 การเปรียบเทียบ U.S. Federal Standard 209 E กับ ISO Standard 14644-1

FS 209E	1	10	100	1000	10000	100000
ISO 14644-1	ISO 3	ISO 4	ISO 5	ISO 6	ISO 7	ISO 8

ตารางที่ 2-5 มาตรฐานห้องสะอาดทางเภสัชกรรม EU GMP (European Union Guide to Good Manufacturing Products)

จำนวนอนุภาคสูงสุดต่อลูกบาศก์เมตร ที่อนุญาต				
Grade	at rest		in operation	
	≥0.5 μm	≥5.0 μm	≥0.5 μm	≥5.0 μm
A	3500 (ISO 5)	0	3500 (ISO 5)	0
B	3500 (ISO 5)	0	350000 (ISO 7)	2000
C	350000 (ISO 7)	2000	3500000 (ISO 8)	20000
D	3500000 (ISO 8)	20000	ไม่ได้กำหนด	ไม่ได้กำหนด

2.7 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

ในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์นี้จะใช้หลักเกณฑ์การตัดสินใจ 3 หลักเกณฑ์ประกอบด้วย

2.7.1 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV)

คือมูลค่าปัจจุบันของกระแสผลตอบแทนสุทธิหรือกระแสเงินสดของโครงการ คำนวณได้โดยการทำส่วนลดกระแสผลตอบแทนสุทธิตลอดอายุโครงการ เป็นมูลค่าปัจจุบัน หรือคำนวณหา NPV จากความแตกต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของกระแสผลตอบแทนรวมและค่าปัจจุบันของกระแสต้นทุนรวม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-11

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} \quad (2-11)$$

โดยที่

B_t คือ มูลค่ารายได้ในการผลิตไฟฟ้าในปีที่ 1

C_t คือ ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าในปีที่ 1

t คือ อายุของโครงการปีที่ 0, 1, 2, ..., n

n คือ อายุโครงการทั้งหมด

i คือ มูลค่ารายได้ในการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในปีที่ 1

โดยมีเกณฑ์การตัดสินใจคือ สมควรในการลงทุนเมื่อ NPV มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ หาก NPV ของโครงการติดลบหรือมีค่าน้อยกว่าศูนย์ก็ไม่ควรลงทุนในโครงการนี้เนื่องจากรายได้ที่ได้รับจะไม่คุ้มค่ากับการลงทุนข้อดีของ NPV คือมีการคำนึงถึงมูลค่าของเงินตามระยะเวลาและกระแสเงินสดตลอดโครงการแต่ก็มีข้อเสีย นั่นคือ หากเปรียบเทียบกับโครงการอื่นอาจตัดสินใจผิด หากขนาดโครงการต่างกันแต่ให้ NPV มีค่าเป็นบวกเหมือนกันจำเป็นต้องใช้หลักเกณฑ์อื่นพิจารณาควบคู่

2.7.2 อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (Internal Rate of Return, IRR) คืออัตราส่วนที่ทำให้ NPV มีค่าเท่ากับศูนย์ โดยสมมติว่า เงินลงทุนที่ได้จากการลงทุนเมื่อเริ่มโครงการหรือระหว่างการดำเนินโครงการนั้นจะนำมารวมเป็นเงินลงทุนในครั้งแรกโดยคิดต้นทุนค่าเสีย

โอกาสเท่ากับต้นทุนของเงินทุนส่วนผลตอบแทนสุทธิจากการดำเนินงานที่ได้รับมาระหว่างดำเนินโครงการนั้น จะนำไปลงทุนต่อจนปีสุดท้ายของโครงการโดยได้รับอัตราผลตอบแทนเท่ากับเงินต้นทุนของเงินลงทุนเช่นเดียวกัน ดังนั้น IRR คืออัตราส่วนลดที่ทำให้ NPV เป็นศูนย์ ดังสมการ (2-12)

$$\sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+IRR)^t} = 0 \quad (2-12)$$

โดยที่

IRR คือ อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ

B_t คือ มูลค่ารายได้จากการประหยัดพลังงานในปีที่ 1

C_t คือ ต้นทุนการก่อสร้างในปีที่ 1

T คือ อายุของโครงการปีที่ 0, 1, 2, ..., n

N คือ อายุโครงการทั้งหมด

ข้อดีของอัตราผลตอบแทนภายในโครงการคือมีการคำนึงถึงมูลค่าเงินตามระยะเวลาและกระแสเงินสดตลอดทั้งโครงการแต่ก็มีข้อเสียคือเนื่องจากมี IRR หลายค่าอาจมีการตัดสินใจที่ผิดและมีปัญหาในการจัดอันดับโครงการ

2.7.3 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) คือระยะเวลาที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นศูนย์ ค่าระยะเวลาคืนทุนที่สั้นที่สุดเป็นหลักการตัดสินใจว่าโครงการจะมีความเหมาะสมทางการเงินและการลงทุนหรือไม่ ผลของระยะเวลาคืนทุนมีความนิยมในวงการธุรกิจนั้นเพราะง่ายต่อการคำนวณและการทำความเข้าใจอีกประการหนึ่งคือสามารถใช้เป็นเครื่องมือวัดสภาพคล่องแต่หลักเกณฑ์นี้ก็ยังมีข้อเสียคือไม่ได้คำนึงถึงมูลค่าของเงินตามระยะเวลาและกระแสเงินสดภายหลังระยะคืนทุน

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chan (2024) ศึกษาและพัฒนาวิธีการคำนวณ OTTV (Overall Thermal Transfer Value) ของอาคารที่มีผลกระทบจากการบังรังสีอาทิตย์จากอาคารข้างเคียง เนื่องจากกฎระเบียบปัจจุบันในการคำนวณ OTTV ยังไม่คำนึงถึงการบังรังสีจากอาคารข้างเคียง ซึ่งอาจทำให้การคำนวณ OTTV ไม่แม่นยำ โดยการจำลองพลังงานในอาคาร 14 แห่งในฮ่องกง พบว่าความแตกต่างในการคำนวณ OTTV เมื่อพิจารณาผลการบังจากอาคารข้างเคียงนั้นสูงถึง 53.48% นอกจากนี้ยังได้ทำการจำลองและวิเคราะห์กับอาคารพาณิชย์ 491 แห่ง โดยการพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างการรับความร้อนประจำปีผ่านเปลือกอาคารกับค่า OTTV ที่สามารถประเมินได้และมีความเหมาะสมใกล้เคียงกับความเป็นจริง

Chan et al. (2014) วิจัยการพัฒนา ค่าชดเชย สำหรับการคำนวณ Overall Thermal Transfer Value (OTTV) ของอาคารพาณิชย์ที่มีการติดตั้ง facade แบบ double skin โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยลดความต้องการไฟฟ้าของระบบปรับอากาศและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การศึกษาได้ใช้โปรแกรม EnergyPlus จำลองพลังงานอาคาร เพื่อสร้างแบบจำลองของอาคารพาณิชย์ โดยทำการจำลองคอมพิวเตอร์หลายชุดเพื่อบ่งชี้ความสัมพันธ์ระหว่าง OTTV ของ facade แบบ single skin และการรวมการถ่ายเทความร้อนผ่านพื้นที่ facade ตลอดฤดูกาลทำความเย็น จากความสัมพันธ์นี้ทีมวิจัยได้สร้างชุดค่าชดเชยที่สามารถใช้ในการคำนวณ OTTV สำหรับอาคารพาณิชย์ที่มี facade แบบ double skin ได้ ซึ่งจะช่วยให้สถาปนิกและวิศวกรสามารถคำนวณค่า OTTV ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

Chen et al. (2024) ศึกษาผลกระทบของการนำเทคโนโลยีระบายความร้อนด้วยรังสีจากท้องฟ้า (Radiative Sky Cooling) มาประยุกต์ใช้กับหลังคาเย็นพิเศษในอาคาร โดยเป็นวิธีการระบายความร้อนโดยไม่ใช้พลังงาน ได้พัฒนาโมเดลใหม่สำหรับการทำนายการถ่ายเทความร้อนของหลังคาโดยอาศัยการระบายความร้อนด้วยรังสีและทำการทดลองขนาดย่อเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของโมเดล พบว่าการใช้กลยุทธ์หลังคาเย็นพิเศษสามารถลดการรับความร้อนผ่านหลังคาได้ถึง 73.9 - 90.7% ประหยัดพลังงานเฉลี่ย 3.5 - 45.0 kWh/m² ลดค่าใช้จ่ายและการปล่อยคาร์บอนอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นถึงการนำวัสดุระบายความร้อนด้วยรังสีมาใช้สามารถลดค่า OTTV (Overall Thermal

Transfer Value) ของหลังคาได้อย่างมากซึ่งมีความสำคัญต่อการพัฒนานวัตกรรมด้านพลังงานอาคารได้

Cheng et al. (2022) ศึกษาการรักษาแรงดันในห้องปลอดเชื้อทางเภสัชกรรม ซึ่งขึ้นอยู่กับความง่ายของอากาศที่คงที่ เมื่อปริมาณอากาศที่จ่ายในห้องปลอดเชื้อมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่ง แรงดันในห้องปลอดเชื้อจะเกิดความปั่นป่วน ทำให้ความเสถียรของวิธีการที่มีอยู่ลดลง อีกทั้งได้คิดค้นวิธีการติดตามปริมาณอากาศคงเหลือที่มีการเปลี่ยนแปลงเพื่อรักษาแรงดันในห้องปลอดเชื้อหลายห้องภายใต้สภาวะปริมาณอากาศที่เปลี่ยนแปลง โดยการสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ข้อมูลระหว่างปริมาณอากาศที่จ่ายไปในห้องปลอดเชื้อ และค่าสัมประสิทธิ์การชดเชยปริมาณอากาศคงเหลือ ซึ่งช่วยให้สามารถรักษาปริมาณอากาศรั่วคงที่ในห้องปลอดเชื้อภายใต้แรงดันที่กำหนดได้ ปริมาณอากาศภายในห้องปลอดเชื้อและปริมาณอากาศคงเหลือจะมีการปรับเปลี่ยนแบบเรียลไทม์ การปรับสมดุลของปริมาณอากาศขึ้นช่วยแก้ไขข้อผิดพลาดและการรบกวนต่าง ๆ ในระบบเพื่อให้ได้แรงดันที่เสถียรภายใต้ปริมาณอากาศที่เปลี่ยนแปลง พบว่าเมื่อปริมาณอากาศที่จ่ายมีการเปลี่ยนแปลงภายใน $\pm 10\%$ การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันในแต่ละห้องด้วยวิธีการนี้จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วิธีการรักษาปริมาณอากาศคงเหลือแบบคงที่ การศึกษานี้สามารถชี้แนะการดูแลรักษาแรงดันที่แตกต่างกันภายในห้องปลอดเชื้อได้อย่างครอบคลุม

Fang et al. (2019) วิจัยพัฒนาหลังคาเป็นรูปแบบใหม่ที่สามารถประหยัดพลังงานได้อย่างมีนัยสำคัญโดยใช้ฟิล์ม metamaterial ชื่อ RadiCold ที่มีคุณสมบัติด้านแสงและความร้อนที่โดดเด่น นอกจากนี้ยังปรับปรุงโมเดลการคำนวณ Roof Thermal Transfer Value (RTTV) ให้แม่นยำยิ่งขึ้นโดยรวมผลกระทบของมวลความร้อนของหลังคาที่มักถูกมองข้ามในการคำนวณ RTTV แบบดั้งเดิม และยืนยันความถูกต้องของโมเดลด้วยการทดลองในอาคารจำลองขนาดเล็ก โมเดลที่ปรับปรุงนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในสภาพอากาศจริงในสามเมืองของสหรัฐอเมริกา ได้แก่ Tucson, Los Angeles และ Orlando โดยเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของหลังคาที่ใช้วัสดุต่าง ๆ ได้แก่ Shingle, Thermoplastic Polyolefin (TPO) และ RadiCold พบว่าหลังคา RadiCold สามารถกระจายความร้อนได้มากที่สุด และลดโหลดการทำความเย็นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดการประหยัด

ไฟฟ้าได้ 113.0 - 143.9 kWh/(m²•yr) เมื่อเทียบกับหลังคา Shingle และ 88.0 - 92.4 kWh/(m²•yr) เมื่อเทียบกับหลังคา TPO

He et al. (2021) วิจัยพัฒนารูปแบบการคำนวณ Roof Thermal Transfer Value (RTTV) สำหรับหลังคาเขียวในเขตร้อนชื้น โดยเริ่มจากการตรวจสอบความแม่นยำของโมเดลการถ่ายโอนความร้อนและความร้อนของหลังคาเขียวด้วยข้อมูลภาคสนาม และทำการจำลองความร้อนที่ได้รับรายปีผ่านหลังคาเขียว 4 ประเภท จากนั้นคำนวณ RTTV โดยใช้อินเตอร์โพลเชิงเส้นระหว่าง RTTV ของหลังคาทั่วไปกับความร้อนที่ได้รับประจำปี ผลการคำนวณ RTTV อยู่ในช่วง 2.29 - 2.49 W/m² การคำนวณ RTTV โดยใช้โมเดลการถ่ายโอนความร้อนและความชื้นมีความซับซ้อน จึงพัฒนาโมเดลการถดถอย 3 แบบ พบว่า multilayer perceptron (MLP) มีความแม่นยำสูงกว่าโมเดลถดถอยเชิงเส้น multiple regression (MR) และ random forest (RF) สุดท้ายคำนวณค่าความต้านทานความร้อนเทียบเท่าของชั้นพืช โดยเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณแบบง่าย 5 แบบ และอภิปรายถึงความแตกต่างระหว่างวิธีการเหล่านี้ ข้อเสนอแนะที่ได้สามารถนำไปใช้ประเมินประสิทธิภาพความร้อนของหลังคาเขียวในขั้นต้นของการออกแบบได้

Sheng et al. (2020) ศึกษาและพัฒนาแบบจำลอง econometric energy epidemiology เพื่อประเมินผลกระทบของภาวะเปื้อน OTTV (Overall Thermal Transfer Value) ต่อการใช้ไฟฟ้าในระดับเมือง โดยใช้ฮ่องกงเป็นตัวอย่าง ซึ่งรัฐบาลฮ่องกงเป็นหนึ่งในผู้นำในการออกกฎหมาย OTTV ได้สร้างฐานข้อมูลพิเศษเกี่ยวกับการใช้พลังงานของอาคารที่อยู่อาศัยและอาคารพาณิชย์ในฮ่องกงจำนวน 39,092 อาคาร ตั้งแต่ปี 1982 ถึง 2016 พบว่าภาวะเปื้อน OTTV ที่มีอยู่ได้มีส่วนสำคัญในการลดการใช้พลังงานของอาคารอย่างเห็นได้ชัด คาดการณ์ว่าในปี 2030 การลดการใช้ไฟฟ้าประจำปีอาจถึงประมาณ 20,000 TJ แม้ไม่มีการปรับปรุงภาวะเปื้อนก็ตาม

Tummu et al. (2017) ศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคารที่มีเครื่องปรับอากาศ ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญในเมืองไทยที่เครื่องปรับอากาศถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย การศึกษานี้ทำขึ้นเพื่อประเมินประสิทธิภาพของโครงสร้างอาคารในห้องนอน โดยการมุ่งเน้นไปที่การวัดค่าการถ่ายเทความร้อนรวม หรือที่เรียกว่า Overall Thermal Transfer Value (OTTV) การศึกษานี้ได้ทำขึ้นใน

ประเทศไทย โดยใช้โปรแกรมจำลองการคำนวณสองโปรแกรมที่แตกต่างกันในการทดสอบกับแบบจำลองอาคารที่פקอาศัย ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ด้านความร้อนของโครงสร้างอย่างมีนัยสำคัญ วิธีการนี้มีการวิเคราะห์การรับความร้อนจากผนังทึบ การรับรังสีจากแสงอาทิตย์ และการนำความร้อนผ่านกระจก พบว่า การคำนวณ OTTV สามารถใช้ได้ดีในการประเมินประสิทธิภาพของโครงสร้างอาคาร ทำให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการพัฒนาอาคารที่มีประสิทธิภาพทางพลังงานและการปล่อยคาร์บอนในอนาคต และเป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยนานาชาติที่มุ่งพัฒนามาตรฐานในการประเมินประสิทธิภาพพลังงานในอาคารที่פקอาศัย

Zhang et al. (2024) ศึกษาการใช้ระบบระบายความร้อนด้วยรังสีจากท้องฟ้า (Radiative Sky, RSCs) ซึ่งสามารถช่วยลดความร้อนที่สะสมในหลังคาอาคารโดยการแผ่ความร้อนออกไปสู่อวกาศ แต่ประสิทธิภาพของ RSCs ในช่วงกลางวันถูกจำกัดเนื่องจากอุณหภูมิภายนอกที่สูงทำให้หลังคายังคงรับความร้อนอยู่ นอกจากนี้การระบายความร้อนที่เกิดขึ้นในช่วงเวลากลางคืนมักจะสูญเสียไป เพราะเครื่องปรับอากาศในอาคารที่ไม่ใช่ที่פקอาศัยมักไม่ได้ทำงาน เพื่อลดข้อจำกัดเหล่านี้ที่มิวิจัยได้เสนอระบบใหม่ที่รวมเอาการเก็บพลังงานความร้อนในระบบน้ำโดยใช้ท่อรับความร้อน และระบบระบายความร้อนจากท้องฟ้าเข้าด้วยกัน (Thermal Storage-Heat Pipe-Integrated Radiative Sky Cooler System, TS-HP-RSC) ระบบนี้ใช้การเก็บพลังงานความร้อนด้วยน้ำในช่วงเวลากลางคืน เพื่อเก็บความเย็นที่เกิดจากการระบายความร้อนจากท้องฟ้า นำไปใช้ในช่วงกลางวัน โดยใช้ท่อความร้อน (heat pipe) ที่อาศัยแรงโน้มถ่วงช่วยในการนำความเย็นที่เก็บไว้เข้าสู่พื้นที่ในอาคารแบบทิศทางเดียว ป้องกันการสูญเสียความเย็นออกสู่สิ่งแวดล้อม ในการทดลองที่มิวิจัยได้สร้างแพลตฟอร์มที่รวมระบบ TS-HP-RSC ระบบพื้นฐานสำหรับเปรียบเทียบและวัดผล พบว่า ระบบ TS-HP-RSC ไม่เพียงแต่ช่วยจัดการสะสมความร้อนในช่วงกลางวัน 0.55 - 1.27 kJ แต่ยังให้ความเย็นเพิ่มเติม 1.57 - 2.75 kJ ส่งผลให้การสะสมความร้อนในช่วงกลางวันลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับระบบพื้นฐาน โดยลดลงได้ถึง 223.62 - 600% การสะสมความร้อนสูงสุดก็ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน จากการเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนในช่วงเวลากลางวัน ระบบ TS-HP-RSC สามารถช่วยลดการสะสมความร้อนในหลังคาในภูมิอากาศกึ่งร้อนชื้น (subtropical climates) ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานได้อย่างมาก

Zhao et al. (2021) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพอากาศในพื้นที่ที่มีผู้ใช้งานในห้องคลีนรูม โดยได้ศึกษาห้องคลีนรูม class 10000 สำหรับอุตสาหกรรมยา ซึ่งมีระบบหมุนเวียนอากาศแบบปั่นปวน การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ที่ได้รับการยืนยันจากการวัดในสถานที่ถูกใช้เพื่อจำลองการไหลของอากาศและการเคลื่อนที่ของอนุภาคในห้องดังกล่าว นอกจากนี้ยังวิเคราะห์สมดุลพลังงานของระบบระบายอากาศ พร้อมทั้งมีการวิเคราะห์การไหลของอากาศและการกระจายของมลภาวะในบริเวณที่กำหนด เช่น บริเวณเหนือตัวอุปกรณ์และรอบร่างกายมนุษย์ เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราการจ่ายลมและปริมาณอากาศที่หมุนเวียน พบว่า การเพิ่มปริมาณอากาศที่หมุนเวียนในพื้นที่ที่มีผู้ใช้งานสามารถลดระดับความเข้มข้นของมลภาวะได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้การเพิ่มอัตราการเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (ACH) ไม่ได้ช่วยลดอนุภาคของอากาศในบริเวณใกล้อุปกรณ์เสมอไป เพราะการเพิ่ม ACH มากเกินไปอาจทำให้ฝุ่นรอบเครื่องจักรฟุ้งขึ้นมาอีกครั้ง และก่อให้เกิดกระแสลมที่ไม่สบายตัว เมื่อ ACH อยู่ที่ 20 per hour และ 25 per hour พบว่าอนุภาคในอากาศลดลง 32% และ 21.4% ที่สภาวะห้องทั้งหมด และลดลง 31.1% และ 23.5% ในพื้นที่ที่มีผู้ใช้งาน นอกจากนี้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนอากาศของห้อง อยู่ที่ 49.3% และ 50.4% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่ม ACH มีผลน้อยต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนอากาศ และเมื่อ ACH เพิ่มขึ้นจาก 15 per hour เป็น 20 per hour ประสิทธิภาพการกำจัดมลภาวะในพื้นที่ที่มีผู้ใช้งานไม่ได้ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

Zhuang et al. (2019) การศึกษาการออกแบบระบบปรับอากาศสำหรับอาคารที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นอย่างเข้มงวด เช่น ห้องคลีนรูมในอุตสาหกรรมยาและโรงงานผลิตเซมิคอนดักเตอร์ ซึ่งมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ปัญหาคือมีพลังงานสูญเสียไปเนื่องจากการขาดการประสานงานในการออกแบบและควบคุมระบบเมื่อเผชิญกับสภาวะที่เปลี่ยนแปลง การศึกษานี้เสนอวิธีการออกแบบเชิงความน่าจะเป็นสำหรับระบบปรับอากาศที่ช่วยควบคุมการระบายอากาศอย่างเหมาะสมภายใต้ความไม่แน่นอน โดยใช้ probabilistic diversity factor method เพื่อประเมินผลกระทบจากภาระงานที่ไม่พร้อมกันในแต่ละพื้นที่ จากนั้นได้ทำการทดสอบในการออกแบบระบบปรับอากาศ และประเมินผลด้านพลังงาน เศรษฐกิจ และความพึงพอใจ พบว่า วิธีการนี้สามารถลดต้นทุนการก่อสร้างงานระบบและเพิ่มความพึงพอใจในการให้บริการได้

Zhuang et al. (2021) ศึกษาการใช้พลังงานในห้องปลอดเชื้อ (Cleanrooms) มีการใช้พลังงานสูงกว่าอาคารสำนักงานทั่วไป 10 - 100 เท่า สาเหตุหลักมาจากอัตราการเปลี่ยนอากาศที่สูงและกระบวนการควบคุมอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการใช้พลังงานเกินความจำเป็น เช่น การทำให้เย็นเกินไปแล้วจึงทำการอุ่นใหม่ การศึกษานี้เสนอแนวทางการควบคุมการระบายอากาศแบบประสานงาน (Coordinated Demand Controlled Ventilation, CDCV) เพื่อให้ระบบปรับอากาศในห้องปลอดเชื้อที่มีหลายโซนทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยประสานการทำงานระหว่างระบบระบายอากาศภายนอกและระบบจ่ายอากาศภายใน โดยการวิเคราะห์ที่ได้ใช้เส้นโค้ง Lorenz และดัชนี Gini เพื่อประเมินความหลากหลายของความต้องการในหลายโซน รวมถึงการวัดระดับการทำความเย็นและการทำให้แห้งเกินความจำเป็น ห้องปลอดเชื้อในโรงงานยาในฮ่องกง ซึ่งเป็นเมืองเขตร้อนชื้น ถูกนำมาใช้วิเคราะห์ พบว่า การปรับปริมาณอากาศที่จ่ายสามารถลดความไม่สอดคล้องระหว่างความต้องการทำความเย็นและการจ่ายความเย็น รวมถึงส่งผลต่อโหมดการระบายอากาศภายนอกได้อย่างเหมาะสม การศึกษานี้สามารถประหยัดพลังงานจากการอุ่นใหม่ได้ถึง 89.6% ประหยัดพลังงานโดยรวมถึง 63.3%

จากการค้นคว้าบทความวรรณกรรมของนักวิจัยต่างประเทศและภายในประเทศ ไม่พบว่ามีนักวิจัยท่านใดได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของ ผนัง, ฝ้า และหลังคา หรือส่วนประกอบของเปลือกอาคารคลีนรูมสำหรับโรงงานผลิตยาแผนปัจจุบัน ผู้วิจัยจึงได้มีการศึกษาเปรียบเทียบการใช้พลังงานก่อนและหลังปรับปรุงห้องคลีนรูมโดยการเลือกใช้วัสดุต่าง ๆ ดังที่แสดงไว้ตามขั้นตอนและวิธีการศึกษาในบทที่ 3, ผลการศึกษาในบทที่ 4 และผลสรุปจากการศึกษาในบทที่ 5 เป็นต้น

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 การออกแบบและการจำลอง

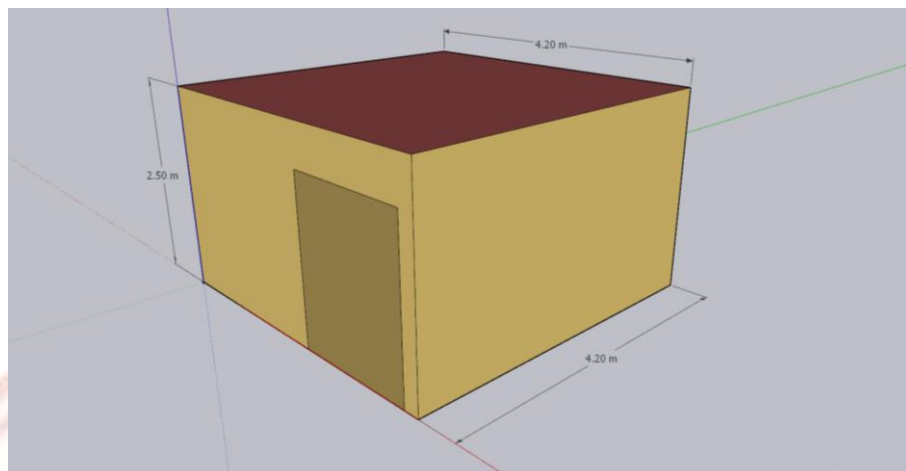
การออกแบบและการจำลองของเปลือกอาคารมีอยู่ 2 ส่วน มีดังนี้

3.1.1 ผนังห้องคลีนรูม โดยมีขอบเขต ขนาด $4.20 \times 4.20 \times 2.50$ m, Machine 10 kW, Lighting 56 W, ผู้ปฏิบัติงาน จำนวน 4 คน และควบคุมอุณหภูมิภายในห้องที่ $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 โดยใช้โปรแกรม OpenStudio กำหนดเวลาในการวิเคราะห์ จำนวน 365 วัน เลือกวัสดุ Gypsum, Polyisocyanurate, Polystyrene, Polyurethane และ Rockwool โดยมีสมบัติในด้านการนำความร้อน ความหนาแน่น และค่าความร้อนจำเพาะ ดังแสดงในตารางที่ 3-1

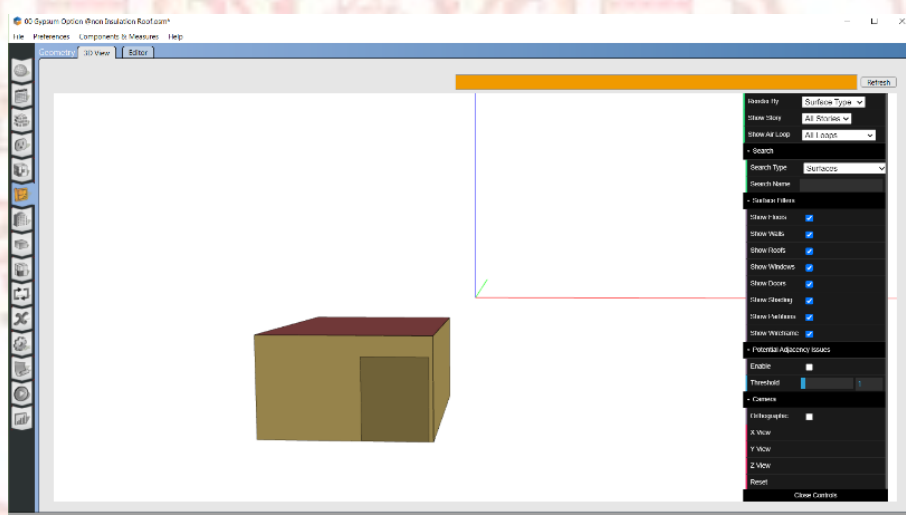
ตารางที่ 3-1 ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุฉนวนผนังที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k); (W/m·K)	ความหนาแน่น (ρ); (kg/m ³)	ค่าความร้อนจำเพาะ (c_p); (kJ/kg·K)
Gypsum	0.282	800	1.090
Polyisocyanurate	0.021 – 0.024	24	1.590
Polystyrene	0.035	32	1.210
Polyurethane	0.026	40	1.590
Rockwool	0.034	32	0.800

ที่มา : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2021)



รูปที่ 3-1 ขนาดของห้องคลีนรูม 4.20 x 4.20 x 2.5 m



รูปที่ 3-2 การออกแบบและจำลองการทำงานของผนังห้องคลีนรูมโดยใช้โปรแกรม OpenStudio

โดยกำหนดภาระการใช้พลังงานพื้นฐาน เช่น การระบายอากาศ ภาระทางไฟฟ้า และความร้อนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ รวมถึงการเพิ่มข้อมูลอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้งานในอาคาร พร้อมทั้งกำหนดจำนวนและตารางการใช้งานให้สอดคล้องกับการใช้งานจริง สำหรับการกำหนดตารางเวลาและเงื่อนไขการควบคุม ผู้ใช้สามารถเข้าไปตั้งค่าใน Schedules Tab เพื่อกำหนดช่วงเวลาการใช้งานอาคาร และตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการสำหรับแต่ละโซนผ่าน Thermostat Setpoints ใน

ส่วนของการเลือกอุปกรณ์และระบบเครื่องกล จะดำเนินการผ่าน HVAC Systems Tab โดยเลือกประเภทต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ระบบปรับอากาศ ระบบระบายอากาศ และระบบทำความร้อน พร้อมทั้งกำหนดค่าการทำงานให้เหมาะสมกับลักษณะของอาคาร

3.1.2 หลังคาห้องคลีนรูม โดยมีขอบเขต ขนาด $4.20 \times 4.20 \times 2.50$ m, Machine 10 kW, Lighting 56 W, จำนวนผู้ปฏิบัติงาน 4 คน และควบคุมอุณหภูมิภายในห้องที่ 22°C ดังแสดงในรูปที่ 3-3 และรูปที่ 3-4 โดยเลือกหลังคา Metal Sheet หนา 0.47 mm พร้อมกับติดฉนวน 2 ชนิด คือ Polyethylene (PE) ที่ระดับความหนา 3 mm, 4 mm, 5 mm และ 10 mm และ Polyurethane (PU) ที่ระดับความหนา 25 mm และ 50 mm เพื่อศึกษาหาสมรรถนะของหลังคาห้องคลีนรูม โดยวัสดุดังกล่าวมีสมบัติการนำความร้อน ความหนาแน่น และค่าความร้อนจำเพาะ ดังแสดงในตารางที่ 3-2

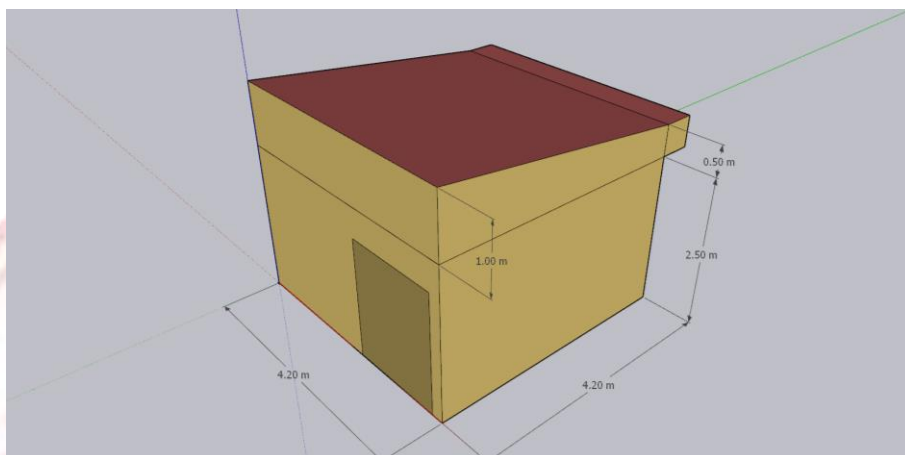
ตารางที่ 3-2 ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุหลังคาที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k , W/m·K)	ความหนาแน่น (ρ , kg/m ³)	ค่าความร้อนจำเพาะ (c_p , kJ/kg·K)
Metal Sheet	211	2,672	0.896
Polyethylene	0.029	45	1.210
Polyurethane	0.026	40	1.590

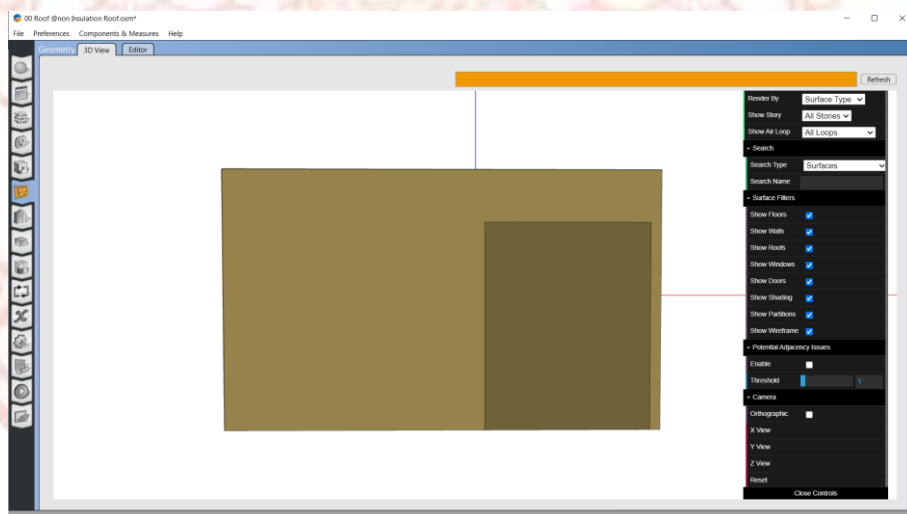
ที่มา : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2021)

จากข้อมูลในตารางที่ 3-2 มีวัสดุสามประเภท ได้แก่ แผ่นโลหะ (Metal Sheet) ซึ่งมีความหนา 0.47 mm และวัสดุฉนวนที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนา ประกอบด้วย Polyethylene (PE) ที่ระดับความหนา 3 mm, 4 mm, 5 mm, 10 mm และ Polyurethane (PU) ที่ระดับความหนา 25 mm และ 50 mm ทั้งนี้ การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของหลังคาดำเนินการผ่าน

โปรแกรม OpenStudio ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับการจำลองการใช้พลังงานในหลังคา และสามารถประเมินตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทพลังงานได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 3-3 ขนาดห้องและหลังคาของห้องคลินิก



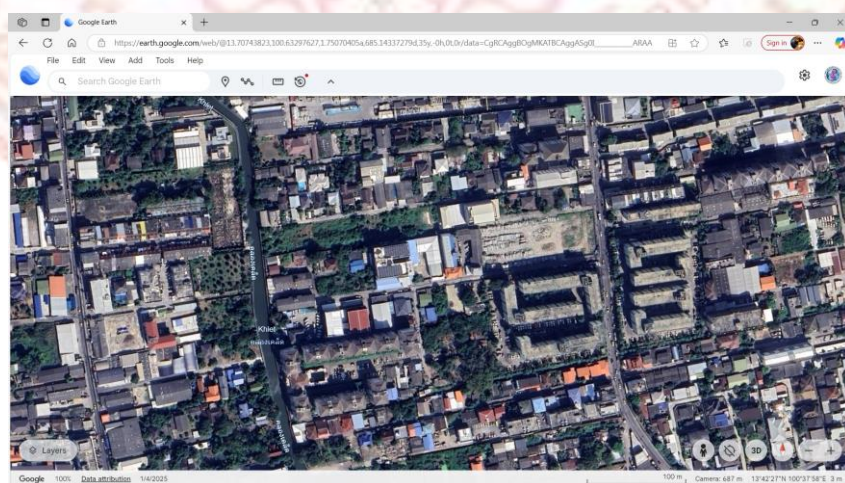
รูปที่ 3-4 การออกแบบและวิเคราะห์การทำงานของหลังคาห้องคลินิกโดยใช้โปรแกรม OpenStudio

จากรูปที่ 3-3 และรูปที่ 3-4 การวิเคราะห์ดำเนินการตามลำดับขั้นตอนที่กำหนดไว้ โดยเริ่มตั้งแต่การสร้างโครงการ การตั้งค่าพื้นฐาน การสร้างแบบจำลองหลังคา การกำหนดภาวะ

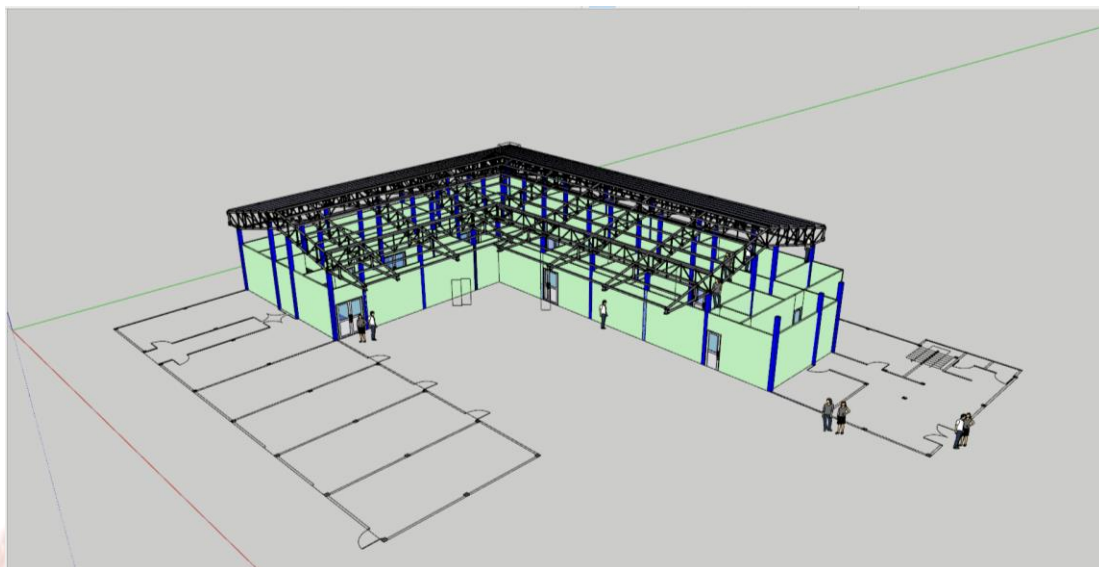
พลังงาน ไปจนถึงการรันโปรแกรมเพื่อจำลองพฤติกรรมของระบบ โดยขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมในส่วนของ OpenStudio และ Screenshot แสดงดังรูปที่ 3-11, ห้องคลีนรูมเดิมก่อนดำเนินการปรับปรุง แสดงดังรูปที่ 3-5, ตำแหน่งและพิกัดที่ตั้งโรงงานผลิตยาแผนปัจจุบันแห่งหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 3-6, การออกแบบคลีนรูม 3 D แสดงดังรูปที่ 3-7, ตำแหน่งห้องที่ใช้ในการศึกษา ผนังด้านหน้า ผนังด้านข้างทั้งสองอยู่ภายในอาคาร และผนังด้านหลังเป็นผนังด้านนอกอาคาร แสดงดังรูปที่ 3-8, ภาพถ่ายด้านหน้าของห้องคลีนรูมจริง แสดงดังรูปที่ 3-9 และภาพถ่ายภายในของห้องคลีนรูมจริง แสดงดังรูปที่ 3-10



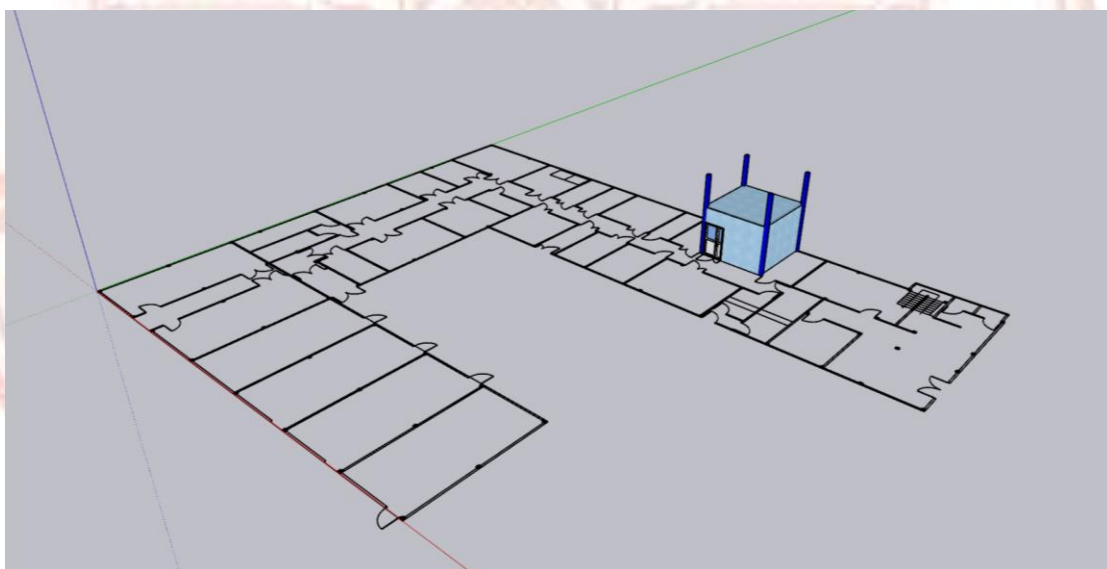
รูปที่ 3-5 ห้องคลีนรูมเดิมก่อนดำเนินการปรับปรุง



รูปที่ 3-6 ตำแหน่งและพิกัดที่ตั้งโรงงานผลิตยา



รูปที่ 3-7 การออกแบบคลินิก 3 D



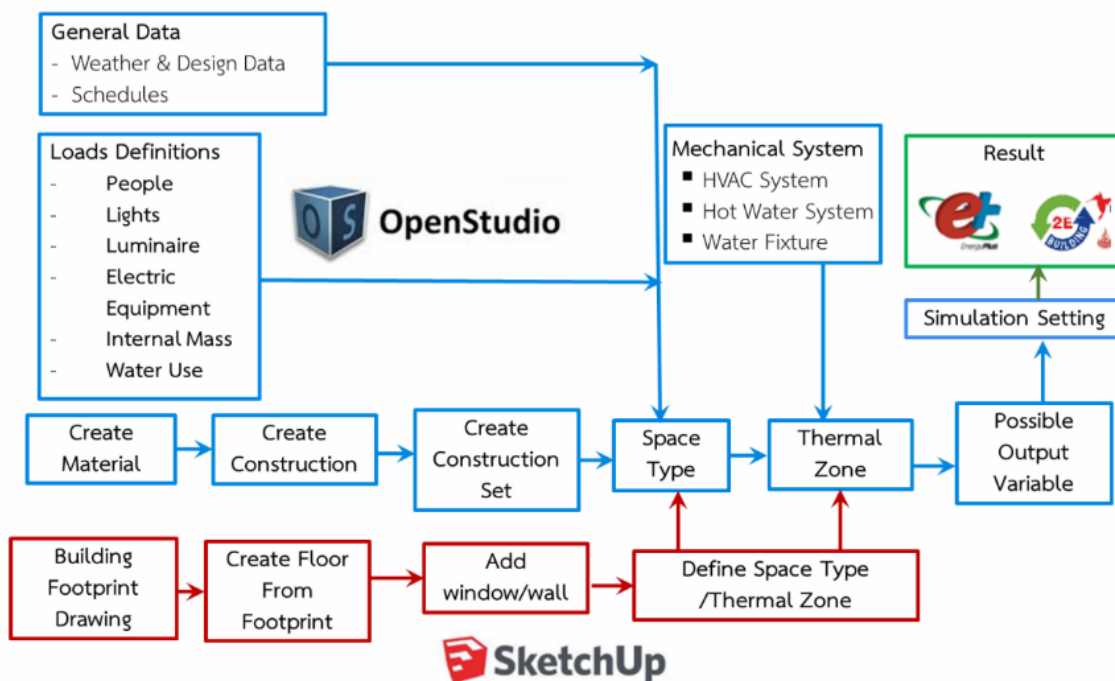
รูปที่ 3-8 ตำแหน่งห้องที่ใช้ในการศึกษา ผนังด้านหน้า ผนังด้านข้างทั้งสองอยู่ภายในอาคาร และผนังด้านหลังเป็นผนังด้านนอกอาคาร



รูปที่ 3-9 ภาพถ่ายด้านหน้าของห้องคลีนรูมจริง



รูปที่ 3-10 ภาพถ่ายภายในของห้องคลีนรูมจริง



รูปที่ 3-11 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม (บริษัท ไบรท์ แมเนจเม้นท์ คอนซัลติ้ง จำกัด, 2018)

จากขั้นตอนการทำงานในรูปที่ 3-11 โดยงานวิจัยนี้จะเน้นไปที่โปรแกรม OpenStudio ในการจำลองเป็นหลัก

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปราย

การศึกษาเรื่องการใช้พลังงานในห้องคลีนรูมสำหรับการผลิตยาแผนปัจจุบัน โดยใช้การจำลองด้วยโปรแกรม OpenStudio ที่มีการต่อ Plug-in กับโปรแกรม EnergyPlus นั้น สามารถอธิบายผลการจำลองได้ดังนี้

4.1 องค์ประกอบเปลือกอาคาร (Building Envelope)

สำหรับการจำลองระบบเปลือกอาคารของห้องคลีนรูม พื้นที่เปิดอย่างหน้าต่าง มีผลโดยตรงต่อสมรรถนะด้านพลังงาน ความร้อน และความจำเป็นในการใช้ฉนวนกันความร้อน หนึ่งในตัวชี้วัดสำคัญคือ อัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างต่อผนัง (Window-Wall Ratio, WWR) ซึ่งเป็นตัวกำหนดว่าหน้าต่างมีผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อนและพลังงานผ่านผนังมากน้อยเพียงใด โดยแสดงในตารางที่ 4-1 และ 4-2

ตารางที่ 4-1 อัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างต่อผนัง (Window-Wall Ratio, WWR)
ของการจำลองระบบเปลือกอาคารของห้องคลีนรูม

	Total	North (315° - 45°)	East (45° - 135°)	South (135° - 225°)	West (225° - 315°)
Gross Wall Area [m ²]	42	10.5	10.5	10.5	10.5
Above Ground Wall Area [m ²]	42	10.5	10.5	10.5	10.5
Window Opening Area [m ²]	3.2	0	0	3.2	0
Gross Window-Wall Ratio [%]	7.62	0	0	30.48	0
Above Ground Window-Wall Ratio [%]	7.62	0	0	30.48	0

ตารางที่ 4-2 อัตราส่วนพื้นที่ช่องแสงบนหลังคา (Skylight-Roof Ratio, SSR)

ของการจำลองระบบเปลือกอาคารของห้องคลีนรูม

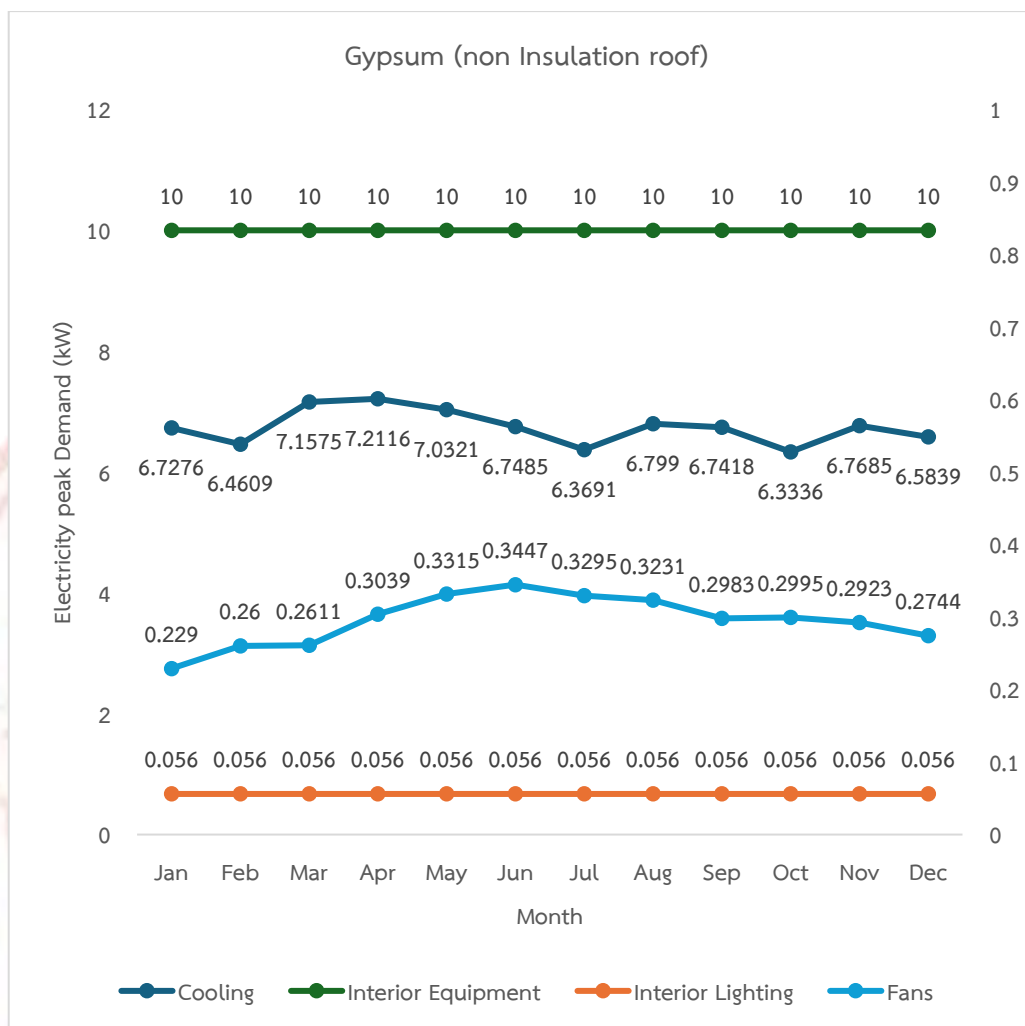
	Total
Gross Roof Area [m ²]	17.64
Skylight Area [m ²]	0
Skylight-Roof Ratio [%]	0

จากข้อมูลในตารางที่ 4-1 และ 4-2 พบว่าผนังของอาคารมีพื้นที่รวม 42.00 m² โดยมีการกระจายเท่ากันในแต่ละทิศ ขณะที่พื้นที่หน้าต่างปรากฏเฉพาะทางด้านทิศใต้เพียงด้านเดียว (3.20 m²) ทำให้ทิศใต้นั้นมีค่า WWR สูงถึง 30.48% ขณะที่ทิศอื่น ๆ มีค่าเท่ากับ 0.00% ซึ่งส่งผลให้ค่า WWR รวมของอาคารอยู่ที่ 7.62% สะท้อนให้เห็นถึงการออกแบบที่มีการควบคุมและเลือกตำแหน่งการเปิดช่องแสงอย่างเฉพาะเจาะจง

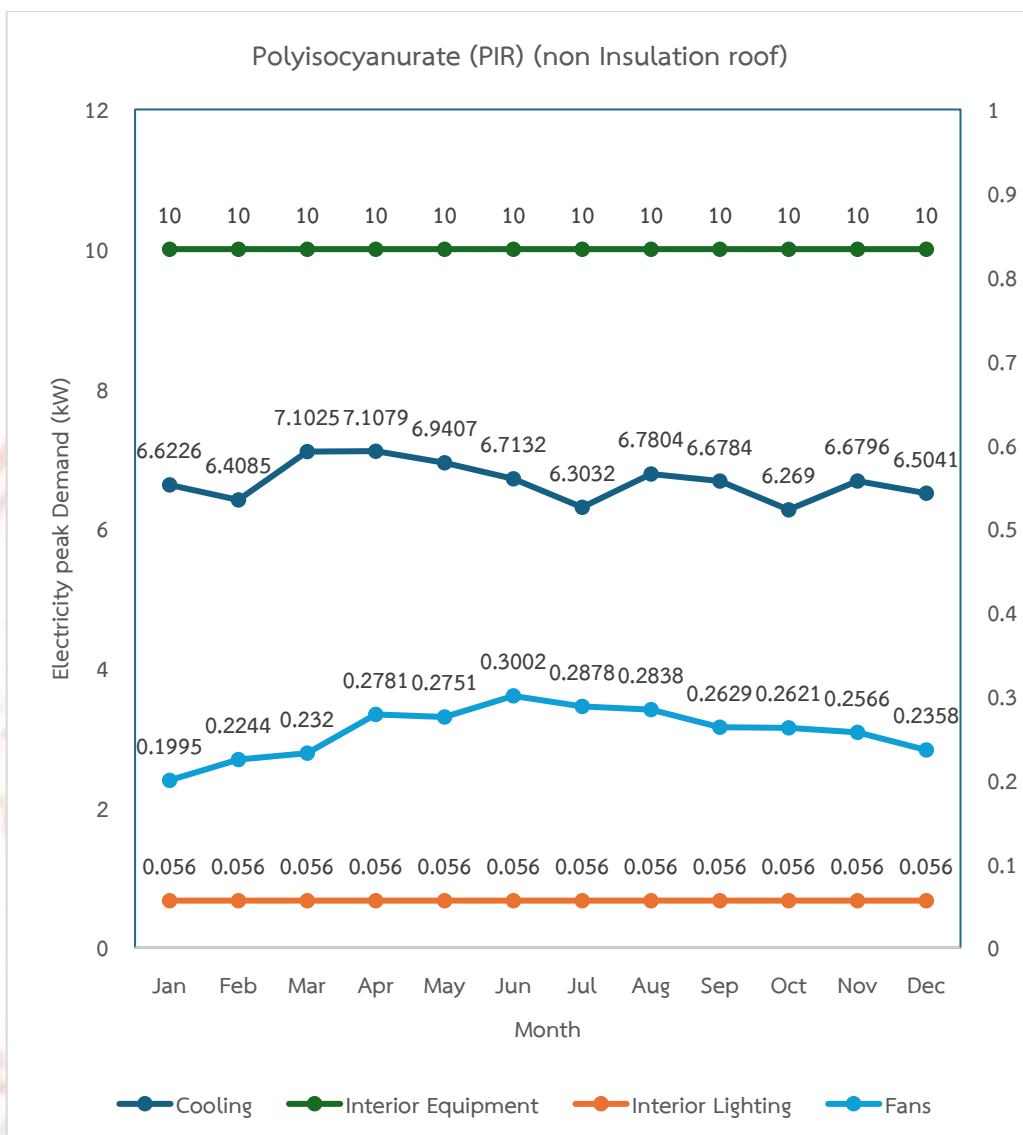
4.2 ผลของการปรับปรุงสมรรถนะห้องคลีนรูม

4.2.1 ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุด

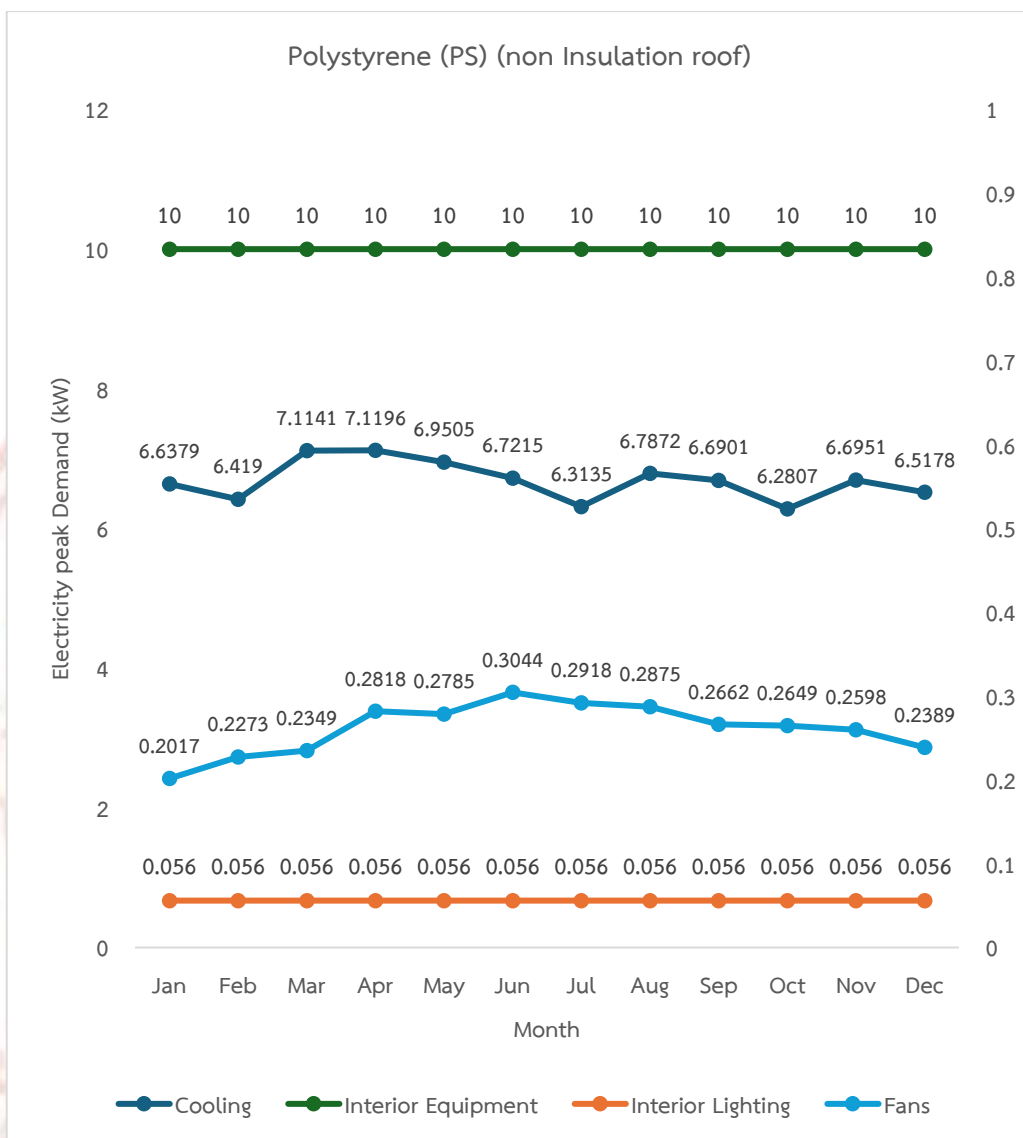
การติดตั้งฉนวนผนังเป็นวิธีการหนึ่งที่มีผลต่อการลดความต้องการไฟฟ้าสูงสุดในอาคาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านพลังงานที่ใช้ในการทำความเย็น (Cooling) ซึ่งเป็นส่วนใหญ่ของพลังงานที่ใช้ในอาคารต่าง ๆ การใช้ฉนวนผนังช่วยลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงทำให้ระบบปรับอากาศทำงานน้อยลงและลดการใช้พลังงานไฟฟ้า ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดจากการเลือกผนังคลีนรูมที่มีฉนวนต่างชนิดกัน แสดงดังรูปที่ 4-1 ถึงรูปที่ 4-5



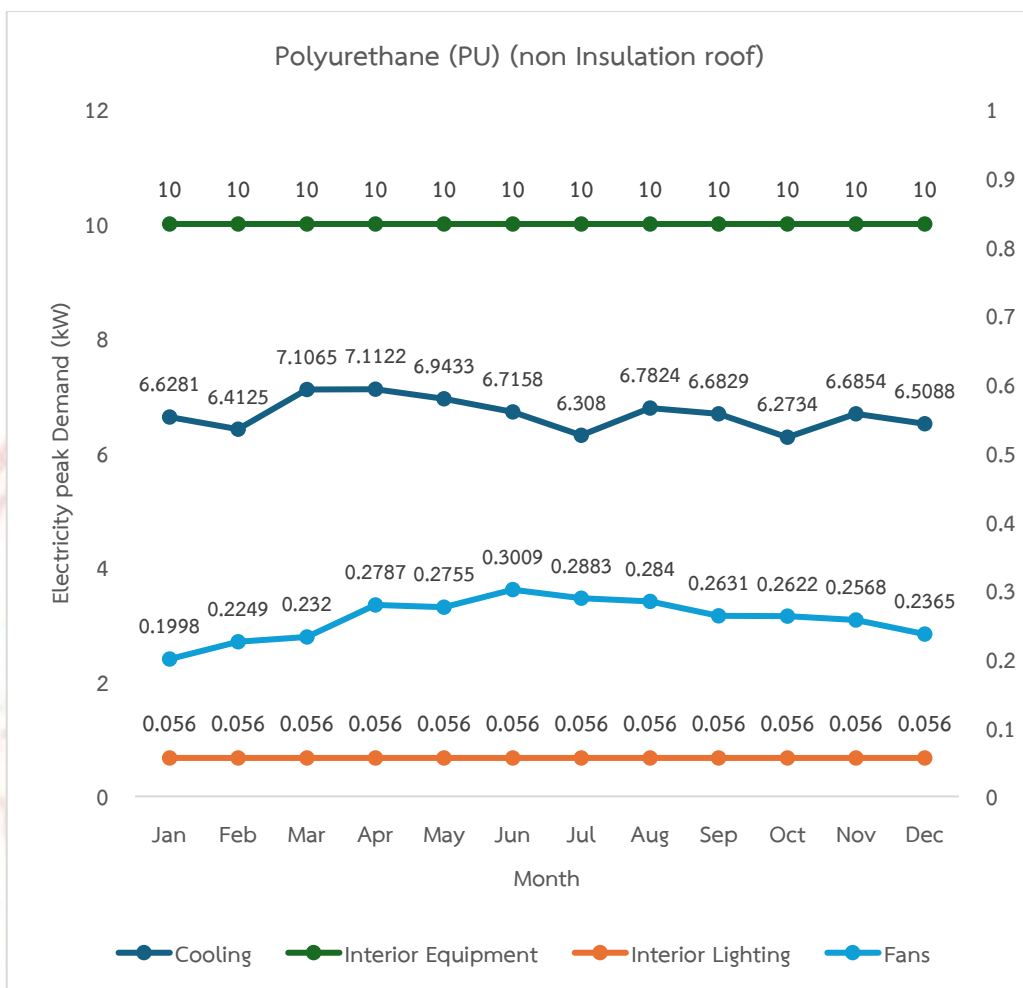
รูปที่ 4-1 ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมก่อนปรับปรุง



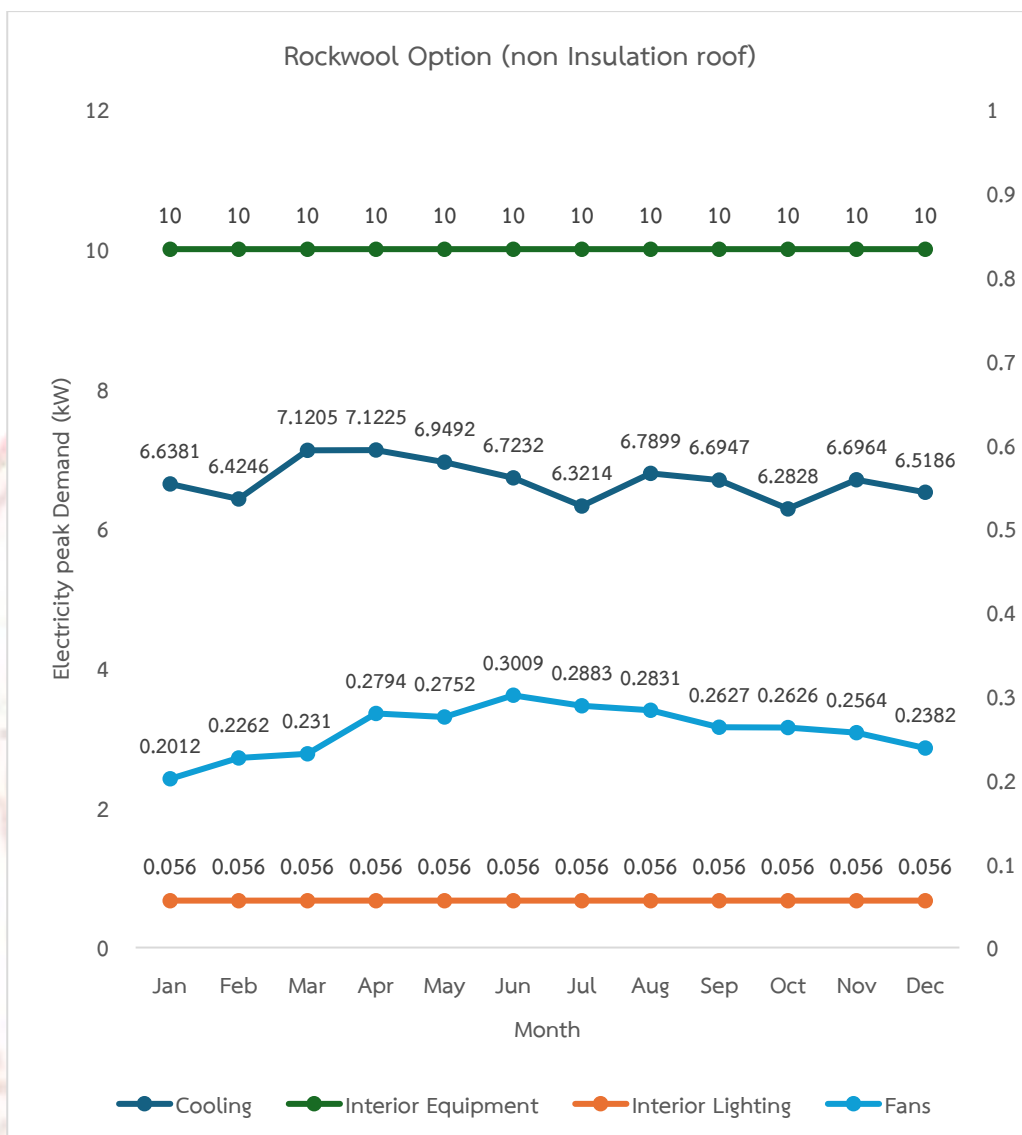
รูปที่ 4-2 ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยใช้ PIR



รูปที่ 4-3 ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยใช้ PS



รูปที่ 4-4 ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยใช้ PU



รูปที่ 4-5 ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยใช้ Rockwool

เมื่อพิจารณาความต้องการไฟฟ้าสูงสุดของอาคารที่ใช้ผนังคลีนรูมต่างชนิดกันโดยไม่มีฉนวนกันความร้อนที่หลังคาของอาคารคลีนรูม ในรูปที่ 4-1 ถึงรูปที่ 4-5 พบว่ามีค่าสูงสุดอยู่ที่ 17.57 kW ในเดือนเมษายน และค่าต่ำสุดอยู่ที่ 16.69 kW ในเดือนพฤศจิกายน โดยพลังงานที่ใช้ในระบบทำความเย็นเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความต้องการไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ 7.21 kW ในเดือนเมษายน

สำหรับอาคารที่เลือกผนังฉนวนกันความร้อนชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ฉนวนโพลีไอโซไซยานูเรต (PIR), ฉนวนโพลีสไตรีน (PS), ฉนวนโพลียูรีเทน (PU) และฉนวนใยหิน (Rockwool) พบว่า ค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุดลดลงเมื่อเทียบกับอาคารคลินิกแบบเดิมที่ใช้ผนังยิปซั่ม (Gypsum) โดยมีค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุดในช่วง 17.39 - 17.46 kW ซึ่งลดลงประมาณ 0.5 - 1.0% เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อน นอกจากนี้ ระบบทำความเย็นในอาคารที่เลือกผนังที่มีฉนวนกันความร้อนยังใช้พลังงานลดลง โดยฉนวน PIR มีประสิทธิภาพดีที่สุด เนื่องจากใช้พลังงานในระบบทำความเย็นสูงสุดเพียง 7.10 kW ในเดือนเมษายน ซึ่งต่ำกว่า ฉนวนชนิดอื่น ๆ เล็กน้อย

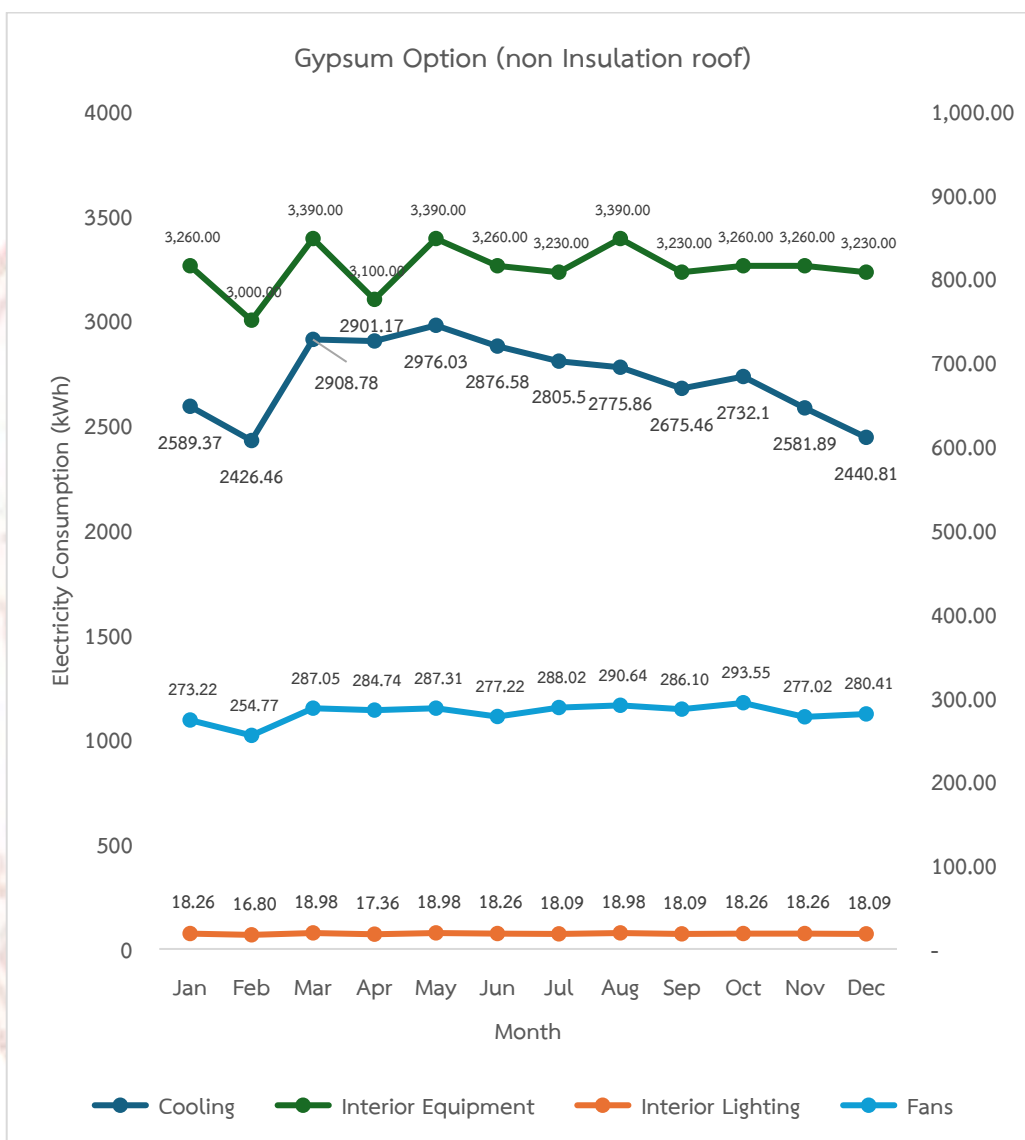
จากข้อมูลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ผนังคลินิกที่มีฉนวนกันความร้อนช่วยลดความต้องการไฟฟ้าสูงสุดได้ แม้ว่าจะลดลงไม่มากนัก แต่ก็มีผลต่อการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของอาคารในระยะยาว โดยฉนวน PIR เป็นตัวเลือกที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการลดพลังงานที่ใช้ในระบบทำความเย็น รองลงมาคือฉนวน PU และ PS ขณะที่ฉนวน Rockwool มีประสิทธิภาพในการลดความต้องการไฟฟ้าสูงสุคน้อยที่สุด โดยที่ผนังมีความหนาเท่ากัน 50 mm

ทั้งนี้ ความต้องการไฟฟ้าสูงสุดของอาคารมักเกิดขึ้นในเดือนเมษายน ซึ่งเป็นช่วงที่มีอุณหภูมิสูงสุดของปีในประเทศไทย การบริหารจัดการพลังงานในช่วงนี้จึงเป็นสิ่งสำคัญ การเลือกใช้ผนังที่มีฉนวนกันความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น ฉนวน PIR ควบคู่กับมาตรการอื่น ๆ เช่น การใช้เครื่องปรับอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง การออกแบบอาคารให้มีการระบายอากาศที่ดี และการใช้วัสดุที่สะท้อนความร้อน จะช่วยให้สามารถลดความต้องการไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

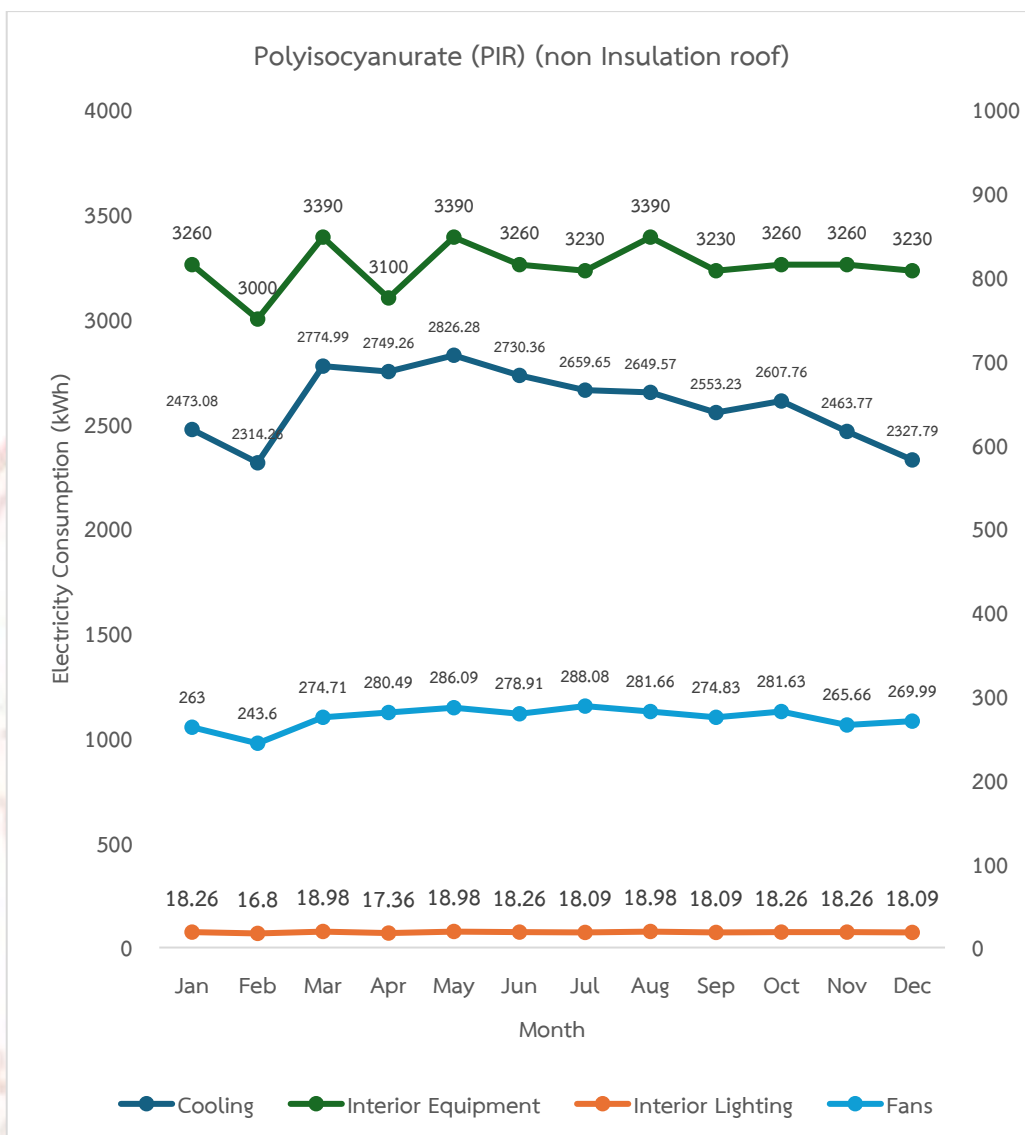
4.2.2 การใช้พลังงานไฟฟ้ารวม

การใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายและประสิทธิภาพของอาคาร โดยเฉพาะการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้พลังงานมากที่สุด ในกรณีที่อาคารไม่มีฉนวนกันความร้อน พลังงานที่ใช้ในการทำความเย็นจะสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนจากภายนอกสามารถถ่ายเทเข้าสู่ภายในอาคารได้โดยง่าย ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างกรณีที่ไม่มีฉนวนและกรณีที่ใช้ฉนวนประเภทต่าง ๆ ได้แก่ ยิปซั่ม (Gypsum), โพลีไอโซไซยานูเรต (Polyisocyanurate: PIR), โพลีสไตรีน (Polystyrene: PS),

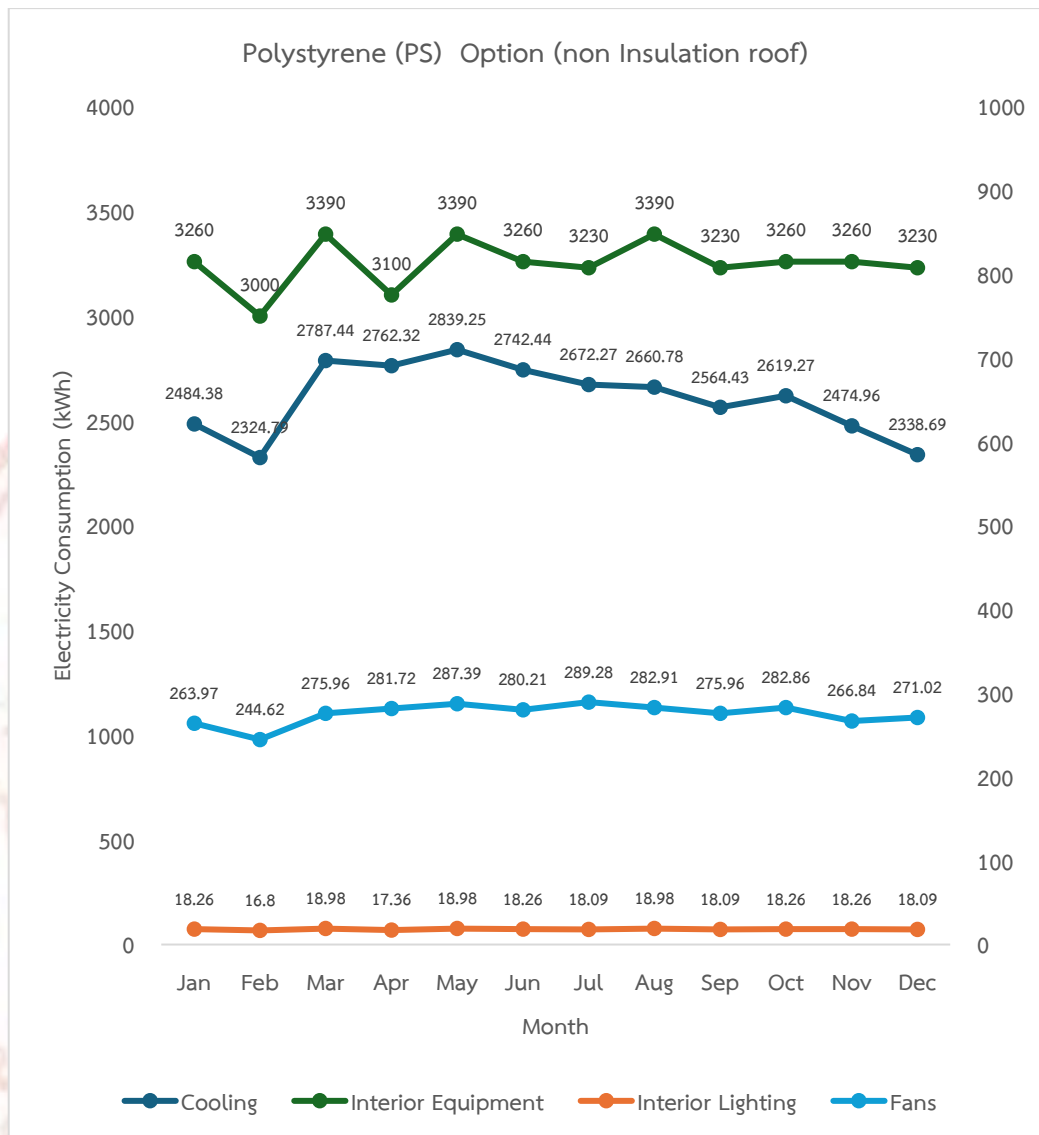
โพลียูรีเทน (Polyurethane: PU), และใยหิน (Rockwool) ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการติดฉนวนนั้น แสดงดังรูปที่ 4-6 ถึงรูปที่ 4-10



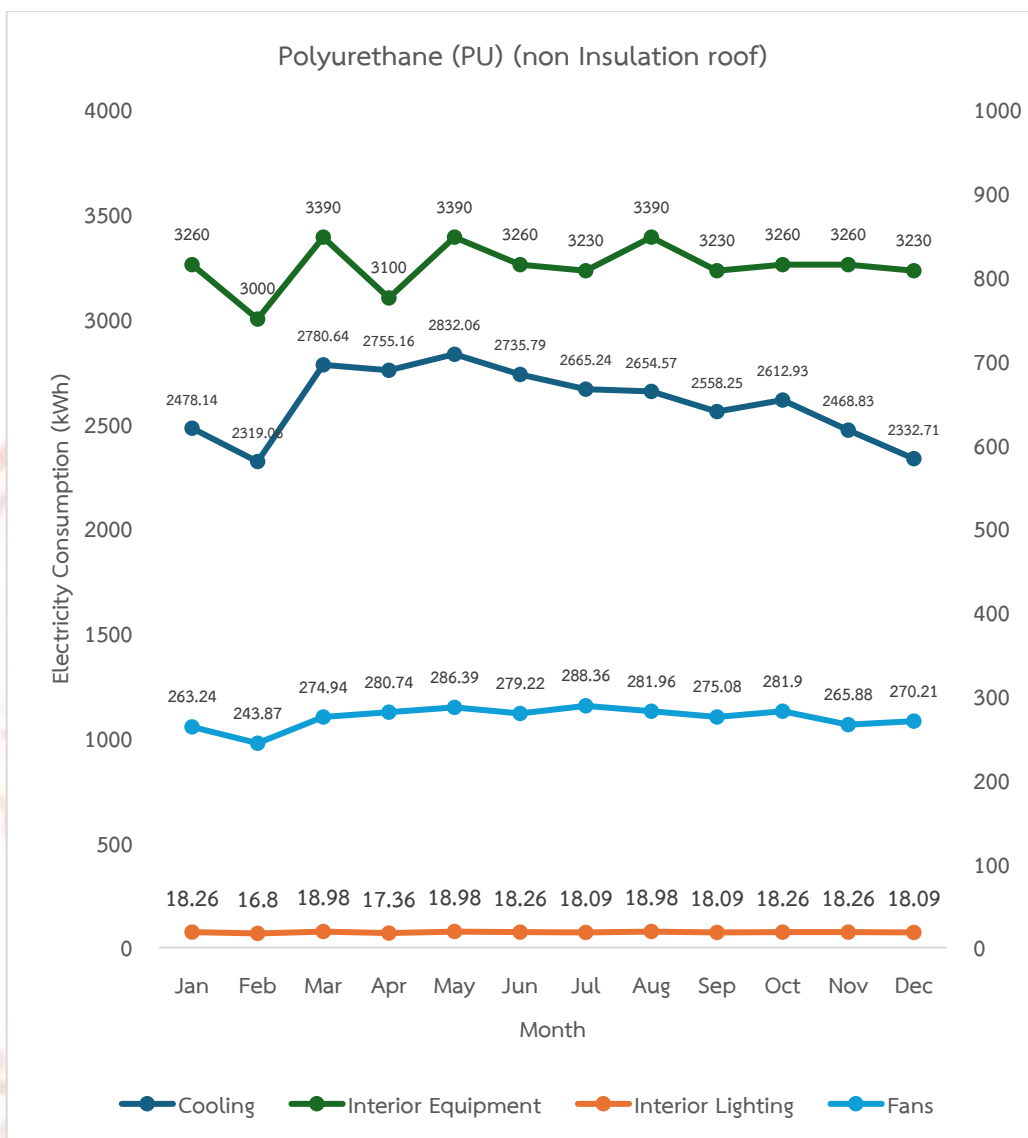
รูปที่ 4-6 การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมห้องคลีนรูมก่อนปรับปรุง



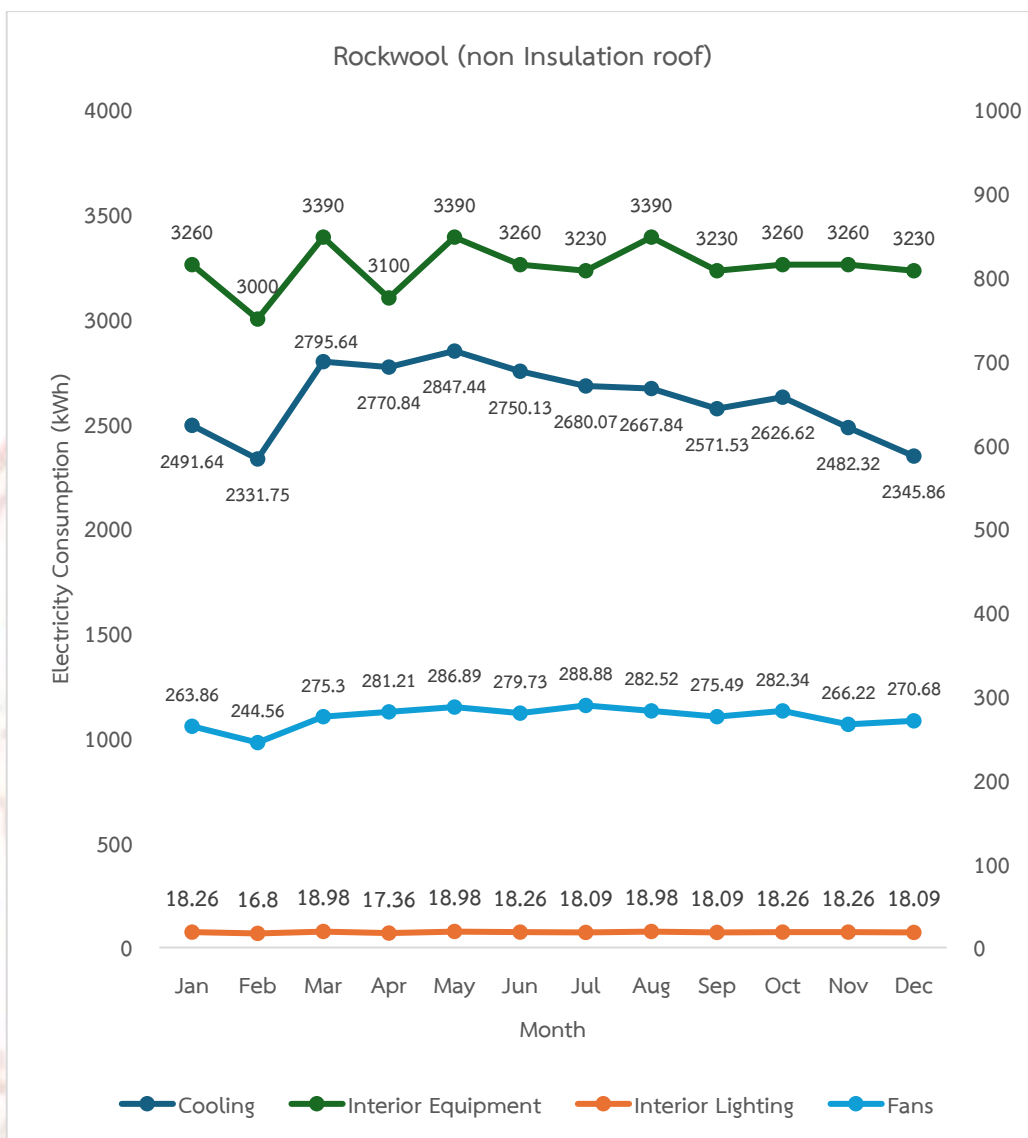
รูปที่ 4-7 การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยใช้ PIR



รูปที่ 4-8 การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยใช้ PS



รูปที่ 4-9 การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยใช้ PU



รูปที่ 4-10 การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยใช้ Rockwool

จากข้อมูลในรูปที่ 4-6 ถึงรูปที่ 4-10 พบว่าผนังที่ใช้แผ่นยิปซัมโดยไม่มีฉนวนกันความร้อนมีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมตลอดทั้งปี 75,288.47 kWh ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีที่มีการเลือกผนังที่มีฉนวนกันความร้อน สำหรับผนังฉนวนที่สามารถลดการใช้พลังงานได้มากที่สุดคือ โพลีไอโซไซยานูเรต (PIR) ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานลงเหลือ 73,637.05 kWh คิดเป็นการลดลงประมาณ 2.2% เมื่อเทียบกับอาคารที่ใช้ผนังไม่มีฉนวน ในขณะที่ โพลียูรีเทน (PU) และโพลีสไตรีน (PS) มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน โดยใช้พลังงาน 73,703.55 kWh และ

73,792.15 kWh ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นการลดลงประมาณ 2.0 - 2.1% ส่วน โยหิน (Rockwool) มีการใช้พลังงาน 73,877.73 kWh ซึ่งแม้ว่าจะลดลงจากกรณีไม่มีฉนวน แต่ยังคงใช้พลังงานมากกว่าฉนวนชนิดอื่น

การลดลงของการใช้พลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดจากการลดภาระของระบบทำความเย็น (Cooling) ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้พลังงานสูงที่สุดในอาคาร เมื่อมีฉนวนกันความร้อนติดตั้งบนหลังคา อุณหภูมิภายในอาคารจะได้รับผลกระทบน้อยลงจากอุณหภูมิภายนอก ส่งผลให้ระบบปรับอากาศทำงานน้อยลงและใช้พลังงานลดลง อย่างไรก็ตาม การใช้พลังงานในส่วนของผู้กรณ์ภายในอาคาร (Interior Equipment) และระบบแสงสว่าง (Interior Lighting) ยังคงมีค่าคงที่ตลอดทั้งปี ไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของฉนวนกันความร้อนมากนัก ในขณะที่การใช้พลังงานของ พัดลมระบายอากาศ (Fans) มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ขึ้นอยู่กับชนิดของฉนวนที่ใช้

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงาน จะเห็นได้ว่า โพลีไอโซไซยานูเรต (PIR) เป็นฉนวนที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุด รองลงมาคือ โพลียูรีเทน (PU) และโพลีสไตรีน (PS) ส่วน โยหิน (Rockwool) แม้ว่าจะช่วยลดพลังงานได้ แต่ยังคงใช้พลังงานสูงกว่าฉนวนประเภทอื่นเล็กน้อย ดังนั้น หากต้องการเลือกใช้ฉนวนที่มีประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงาน ควรพิจารณาเลือก PIR หรือ PU เนื่องจากสามารถช่วยลดภาระของระบบทำความเย็นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

โดยสรุป การติดตั้งฉนวนกันความร้อนช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารได้อย่างมีนัยสำคัญ แม้ว่าจะลดลงเพียง 1.9 - 2.2% แต่ในระยะยาวจะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ ยังช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้พลังงานที่ไม่จำเป็นอีกด้วย ดังนั้น การเลือกใช้ฉนวนกันความร้อนที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ควรพิจารณาในการออกแบบและก่อสร้างอาคารที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงาน

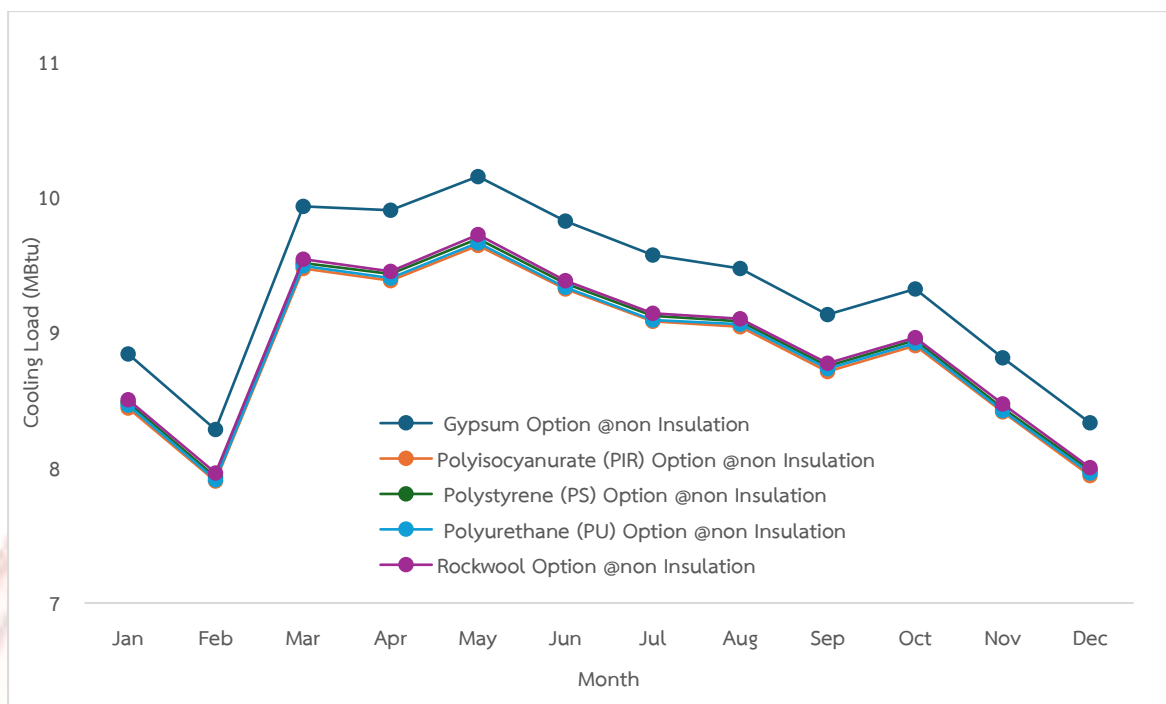
4.2.3 ภาระการทำความเย็น

ภาระการทำความเย็น (cooling load) เป็นการวัดปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในการรักษาอุณหภูมิภายในอาคารให้เย็นลง ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำความเย็นในช่วงฤดูร้อน การเลือกติดตั้งผนังฉนวนเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดภาระการทำความเย็นใน

อาคาร เนื่องจากฉนวนสามารถช่วยลดการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกสู่ภายในอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในที่นี้จะอภิปรายถึงผลของภาระการทำความเย็นของผนังที่ไม่มีฉนวน และผนังฉนวนในประเภทต่าง ๆ โดยที่หลังคาไม่ได้ติดฉนวนกันความร้อน ข้อมูลภาระการทำความเย็นของการศึกษา แสดงในรูปที่ 4-11 และตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ภาระการทำความเย็นของการติดตั้งผนังฉนวน

Cooling Load (MBTU)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Gypsum non-Insulation roof	8.84	8.28	9.93	9.9	10.15	9.82	9.57	9.47	9.13	9.32	8.81	8.33
Polyisocyanurate (PIR) non-Insulation roof	8.44	7.9	9.47	9.38	9.64	9.32	9.08	9.04	8.71	8.9	8.41	7.94
Polystyrene (PS) non-Insulation roof	8.48	7.93	9.51	9.43	9.69	9.36	9.12	9.08	8.75	8.94	8.44	7.98
Polyurethane (PU) non-Insulation roof	8.46	7.91	9.49	9.4	9.66	9.33	9.09	9.06	8.73	8.92	8.42	7.96
Rockwool non-Insulation roof	8.5	7.96	9.54	9.45	9.72	9.38	9.14	9.1	8.77	8.96	8.47	8



รูปที่ 4-11 การเปรียบเทียบภาระการทำความเย็นของห้องคลีนรูมก่อนและหลังปรับปรุง

จากข้อมูลในรูปที่ 4-11 และตารางที่ 4-3 ผนังที่ไม่มีฉนวนกันความร้อน มีภาระการทำความเย็นสูงสุด โดยในเดือนพฤษภาคมมีค่าสูงสุดที่ 10.15 MBTU และค่าต่ำสุดอยู่ที่ 8.28 MBTU ในเดือนกุมภาพันธ์ ขณะที่ห้องคลีนรูมที่มีการเลือกฉนวนกันความร้อนสามารถลดภาระการทำความเย็นลงได้อย่างมีนัยสำคัญ ฉนวนโพลีไอโซไซยานูเรต (PIR) มีประสิทธิภาพดีที่สุด ในการลดภาระการทำความเย็น โดยมีค่าสูงสุดที่ 9.64 MBTU ในเดือนพฤษภาคม ซึ่งลดลงจากกรณีไม่มีฉนวนกันความร้อนประมาณ 5% นอกจากนี้ ฉนวน PIR ยังมีค่าภาระการทำความเย็นต่ำที่สุดในทุกเดือน โดยเฉพาะในเดือนธันวาคมที่ลดลงเหลือ 7.94 MBTU ฉนวนชนิดอื่น ๆ ได้แก่ โพลีสไตรีน (PS), โพลียูรีเทน (PU) และใยหิน (Rockwool) มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วง 9.66 - 9.72 MBTU ในเดือนพฤษภาคม และค่าต่ำสุดอยู่ที่ 7.96 - 8.00 MBTU ในเดือนธันวาคม ซึ่งยังคงสามารถลดภาระการทำความเย็นได้เมื่อเทียบกับอาคารที่ไม่มีฉนวนกันความร้อน

4.2.4 การใช้พลังงานที่ลดลง

การเปรียบเทียบข้อมูลวัสดุฉนวน 4 ประเภท ได้แก่ PIR, PS, PU และ Rockwool พบว่าวัสดุฉนวนแต่ละชนิดให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวม ค่าการใช้ไฟฟ้าสูงสุด และภาระการทำความเย็น โดยวัสดุประเภท PIR มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.19% และลดภาระการทำความเย็นเฉลี่ยได้ถึง 4.76% ขณะที่ PU ให้ค่าการลดลงใกล้เคียงกันที่ 2.10% และ 4.58% ตามลำดับ ส่วนวัสดุประเภท PS และ Rockwool มีประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1.87 - 1.99% และลดภาระการทำความเย็นได้ 4.08 - 4.33% แสดงในตารางที่ 4-4

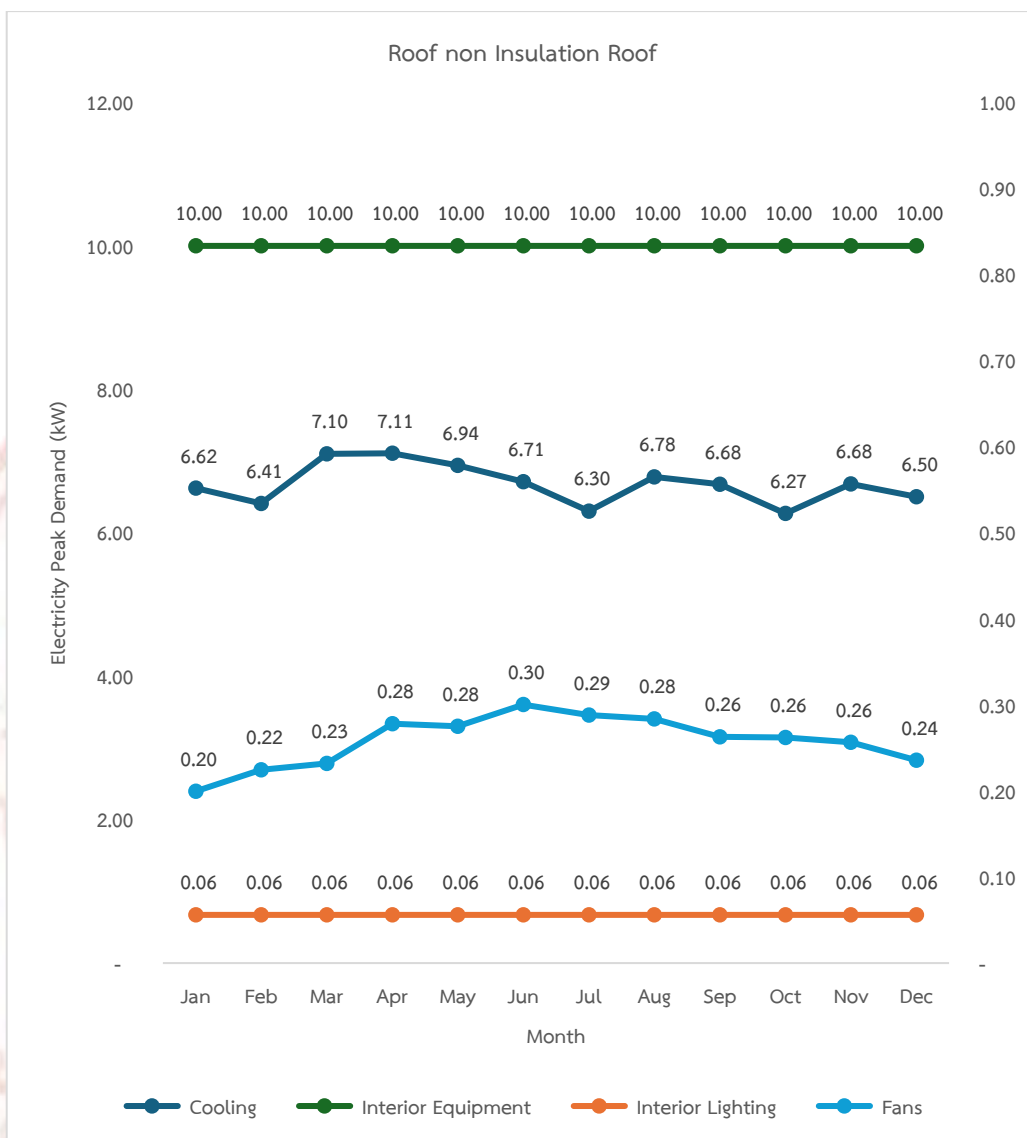
ตารางที่ 4-4 การใช้พลังงานที่ลดลงสำหรับการเลือกฉนวนแต่ละประเภท

วัสดุฉนวน	ร้อยละการลดลงของ การใช้พลังงานไฟฟ้า	ค่าเฉลี่ยการลดลง ของการใช้ไฟฟ้า สูงสุด	ค่าเฉลี่ยร้อยละการ ลดลงของภาระการ ทำความเย็น
PIR	2.19%	0.61%	4.76%
PS	1.99%	0.54%	4.33%
PU	2.10%	0.61%	4.58%
Rockwool	1.87%	0.54%	4.08%

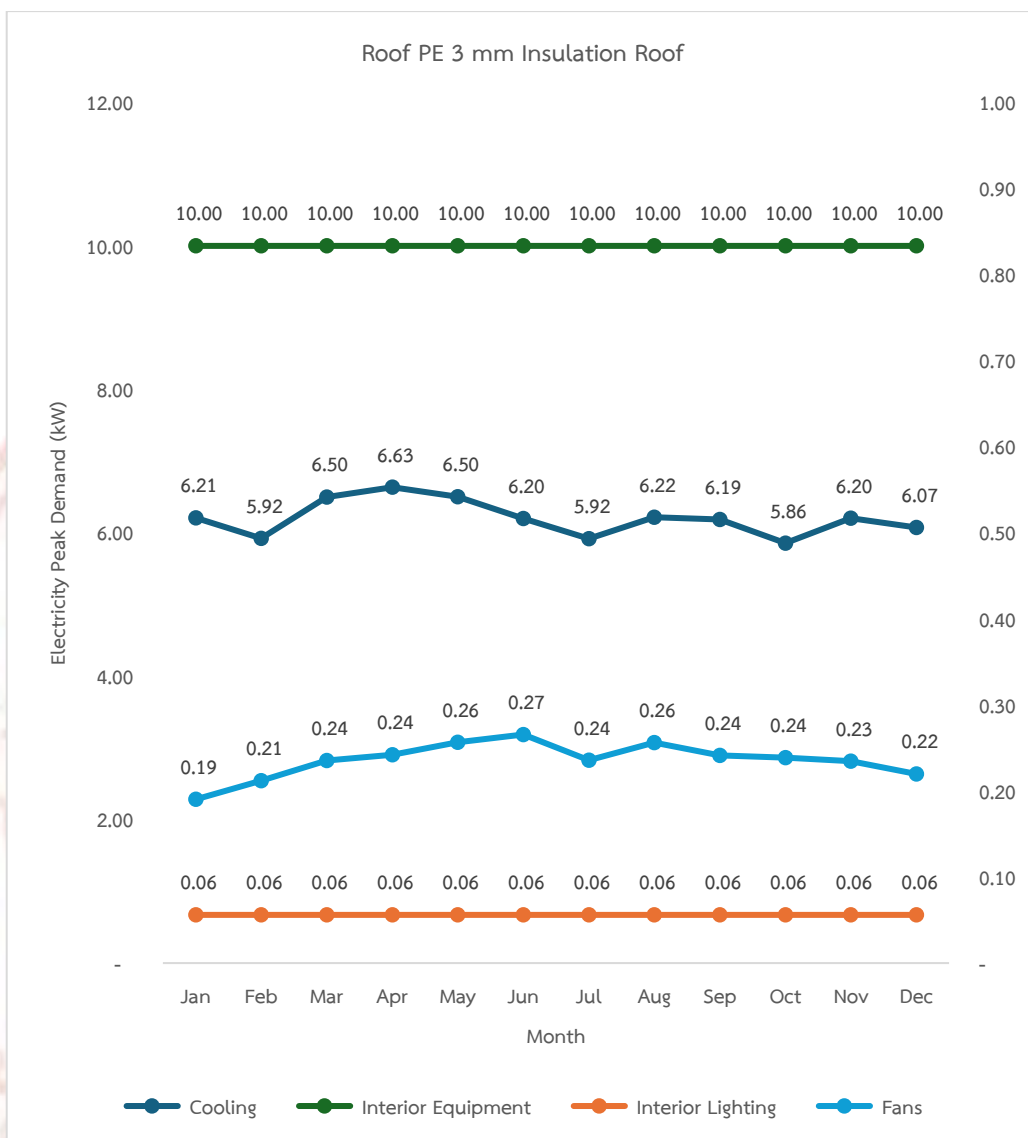
4.3 การเลือกใช้นวนติดหลังคา

4.3.1 ความต้องการไฟฟ้าสูงสุด

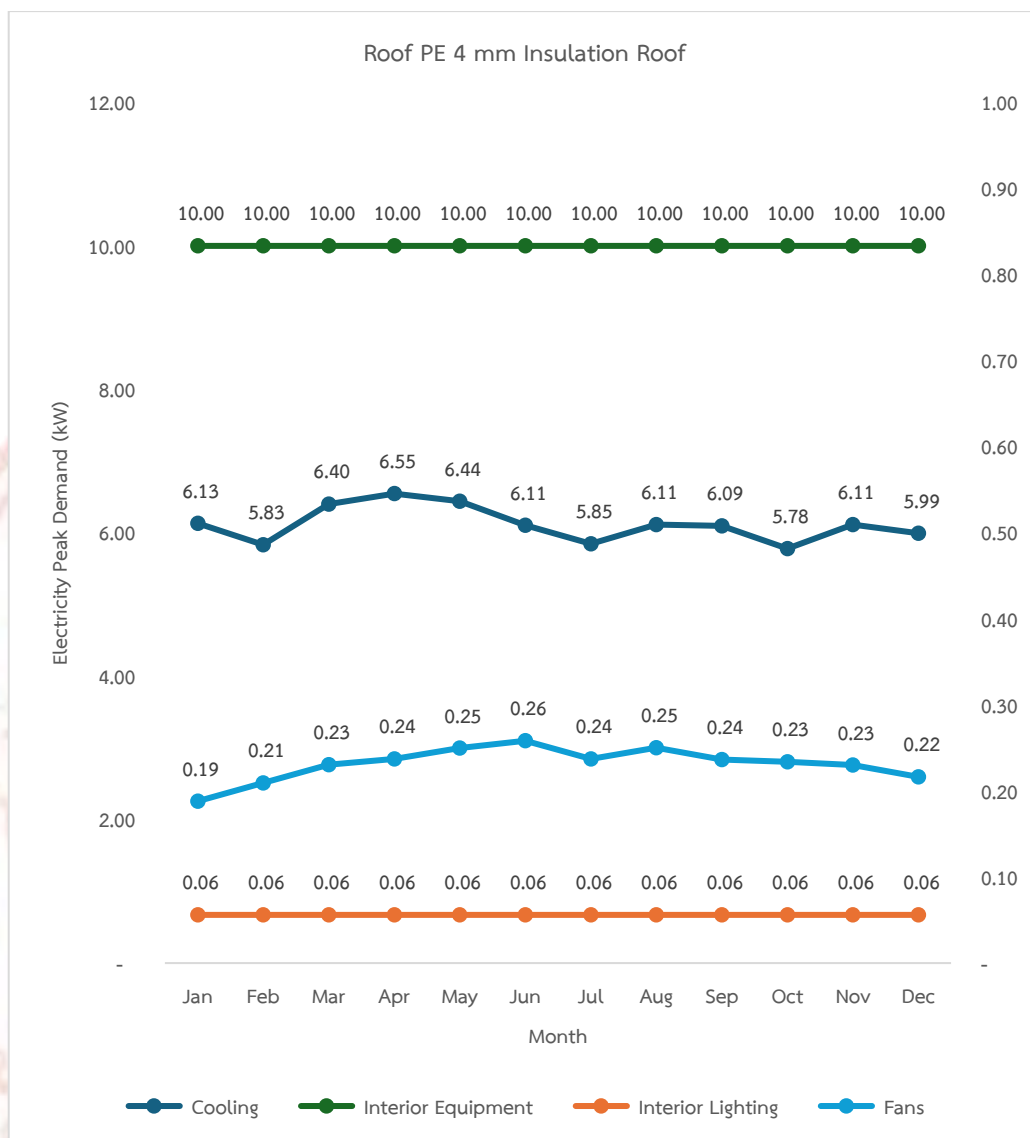
การติดตั้งฉนวนหลังคาเป็นวิธีการหนึ่งที่มีผลต่อการลดความต้องการไฟฟ้าสูงสุดในอาคาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านพลังงานที่ใช้ในการทำความเย็น (Cooling) ซึ่งเป็นส่วนใหญ่ของพลังงานที่ใช้ในอาคารต่าง ๆ การใช้ฉนวนหลังคาช่วยลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงทำให้ระบบปรับอากาศทำงานน้อยลงและลดการใช้พลังงานไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4-12 ถึงรูปที่ 4-18



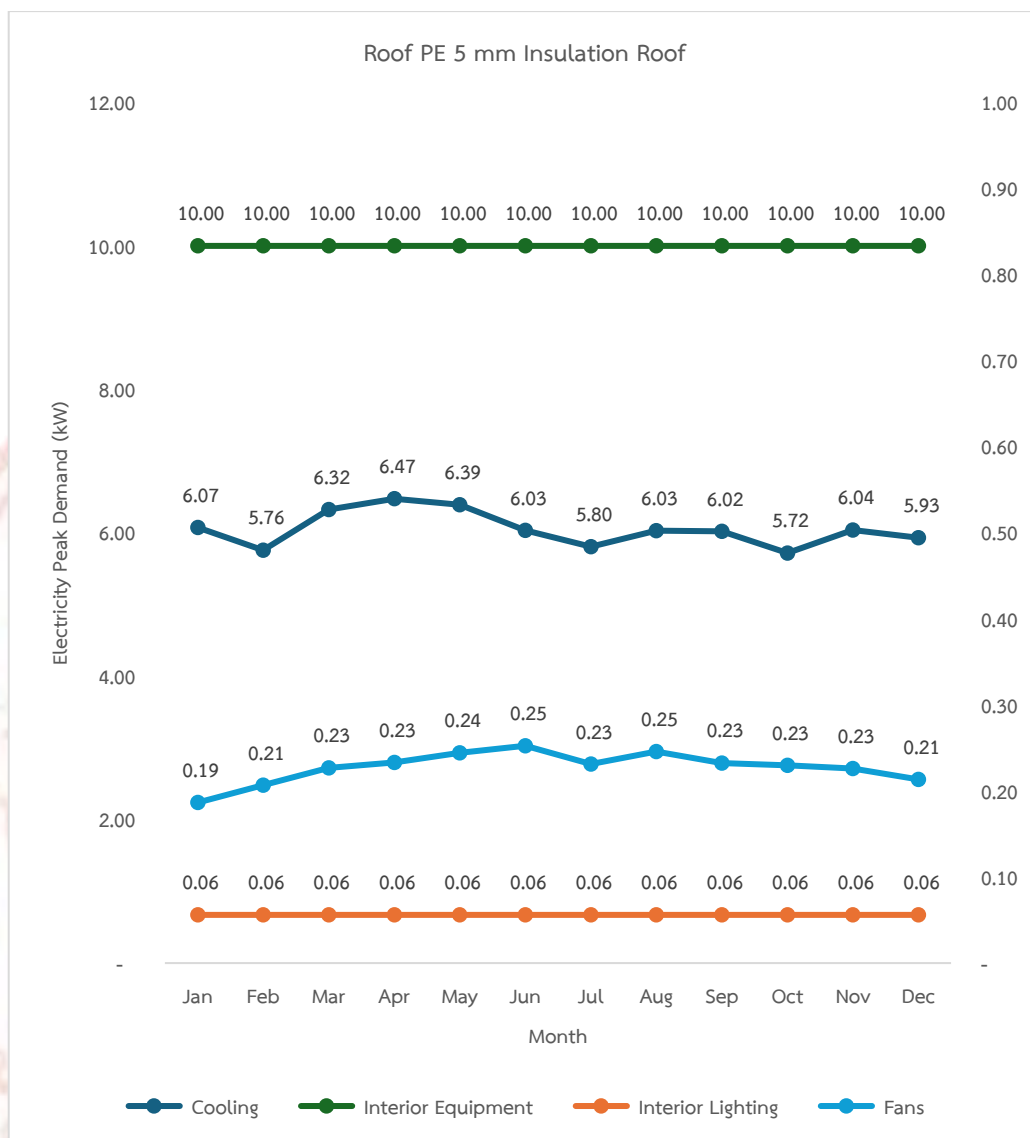
รูปที่ 4-12 ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยไมติดฉนวน
หลังคา



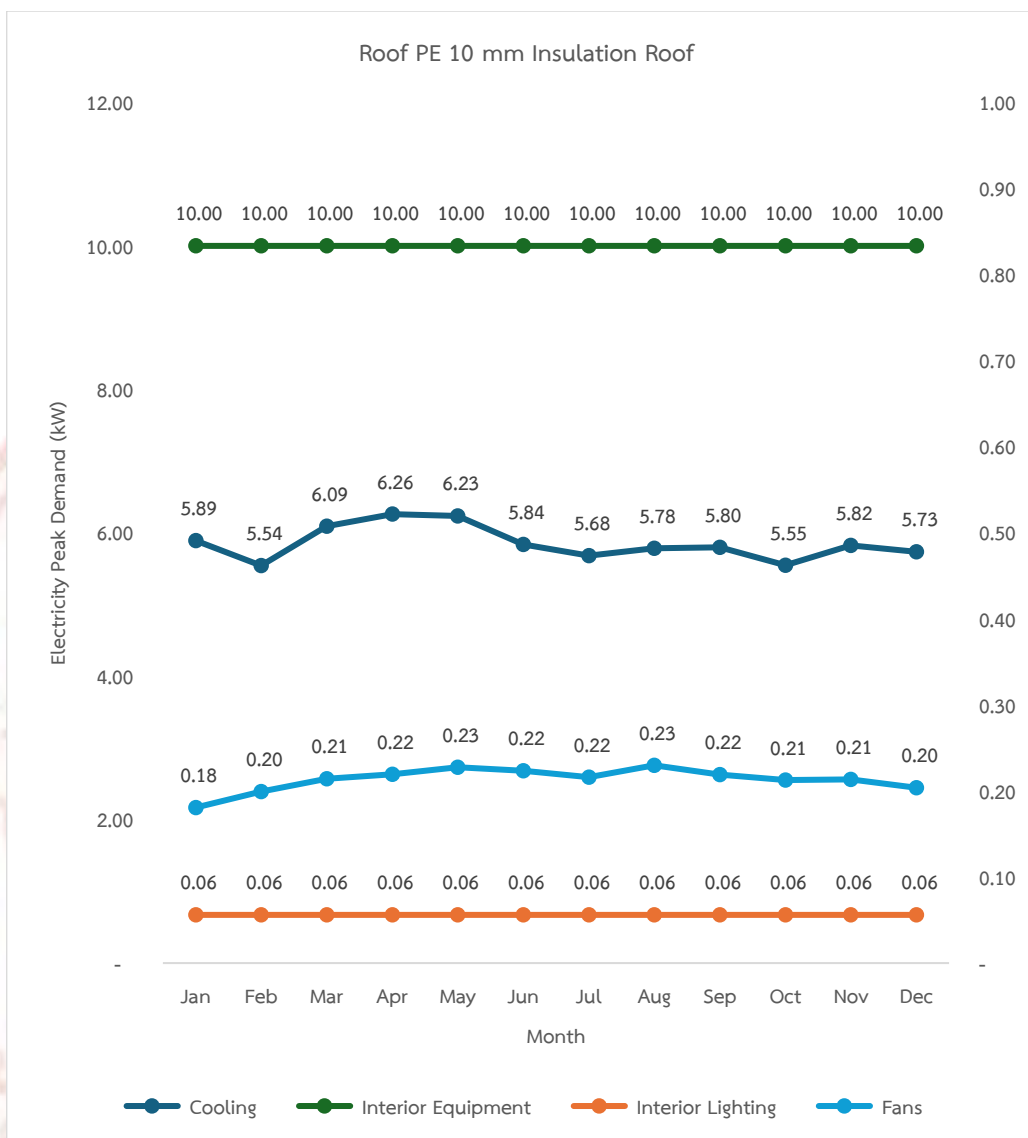
รูปที่ 4-13 ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยติดฉนวนหลังคา PE 3 mm



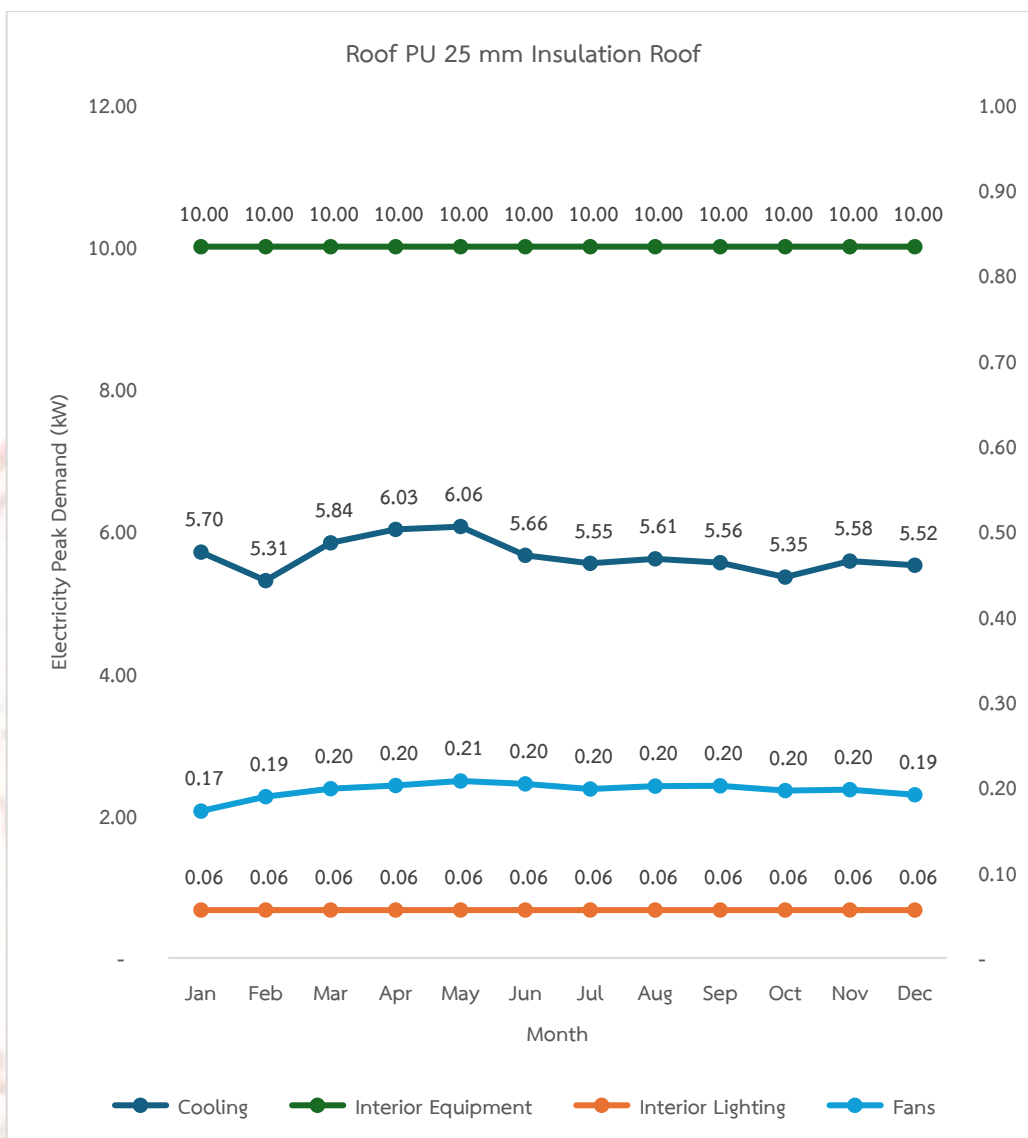
รูปที่ 4-14 ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยติดฉนวนหลังคา PE 4 mm



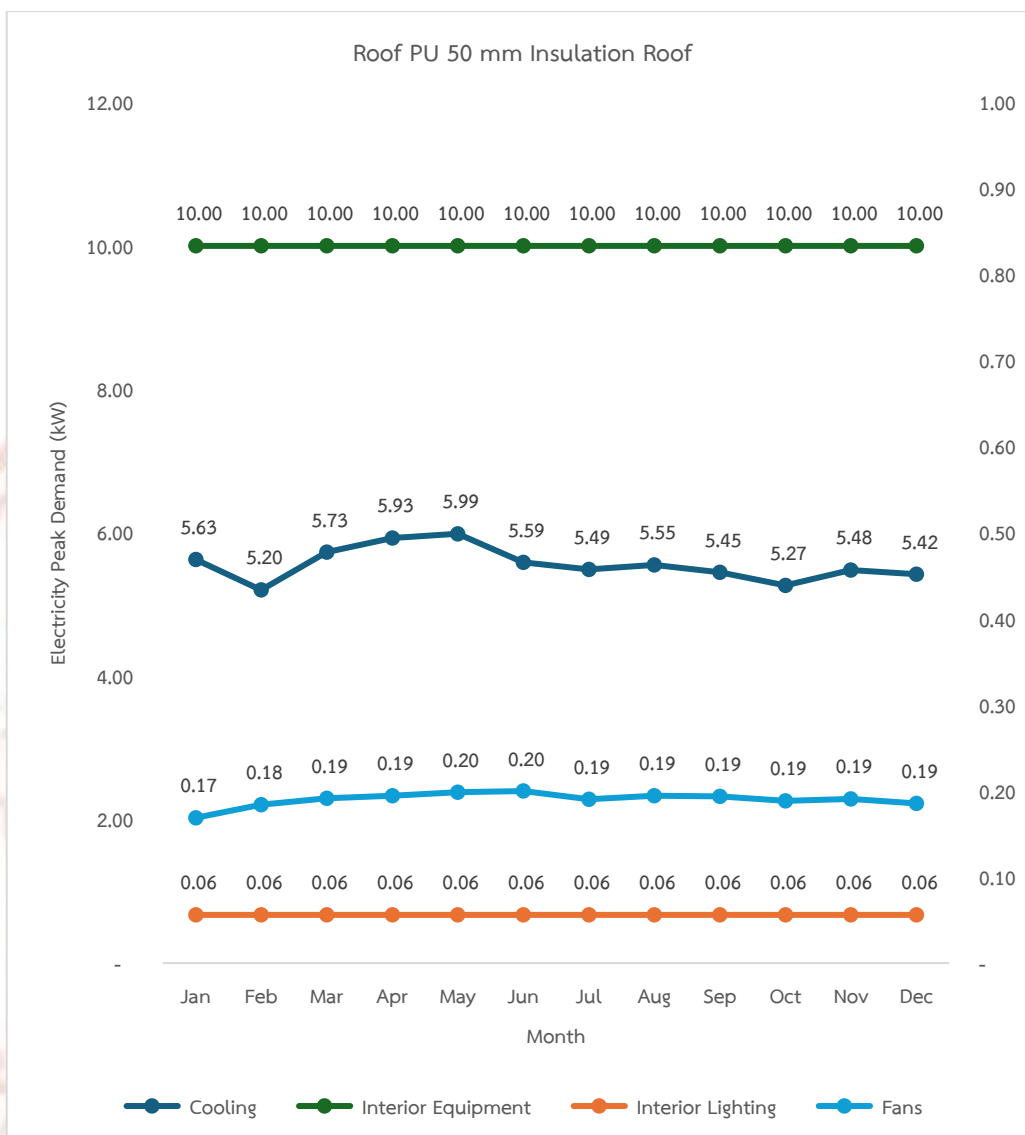
รูปที่ 4-15 ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยติดฉนวนหลังคา PE 5 mm



รูปที่ 4-16 ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยติดฉนวนหลังคา PE 10 mm



รูปที่ 4-17 ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยติดฉนวนหลังคา PU 25 mm



รูปที่ 4-18 ความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของห้องคลีนรูมหลังปรับปรุงโดยติดฉนวนหลังคา PU 50 mm

จากข้อมูลในรูปที่ 4-12 ถึงรูปที่ 4-18 พบว่าหลังคาที่ไม่มีฉนวนมีความต้องการไฟฟ้าสูงสุดรวมทั้งปีอยู่ที่ 203.88 kW โดยการใช้พลังงานส่วนใหญ่เกิดจากการทำความเย็นซึ่งคิดเป็น 80.11 kW ในขณะที่หลังคาที่ติดฉนวน PE 3mm จะลดความต้องการไฟฟ้าลงเหลือ 197.91 kW ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ฉนวนช่วยลดภาระของระบบทำความเย็นได้ในระดับหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนที่มีความหนาเพิ่มขึ้นอย่าง PE 4 mm, PE 5 mm, PE 10 mm และ PU

25 mm จะเห็นได้ว่าฉนวนที่มีความหนามากขึ้นนั้นช่วยลดความต้องการไฟฟ้าสูงสุดได้มากขึ้นเช่นกัน โดยการติดตั้งฉนวน PU 50 mm ทำให้ความต้องการไฟฟ้าลดลงต่ำสุดที่ 189.67 kW ซึ่งเป็นตัวเลขที่ต่ำที่สุดในกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด

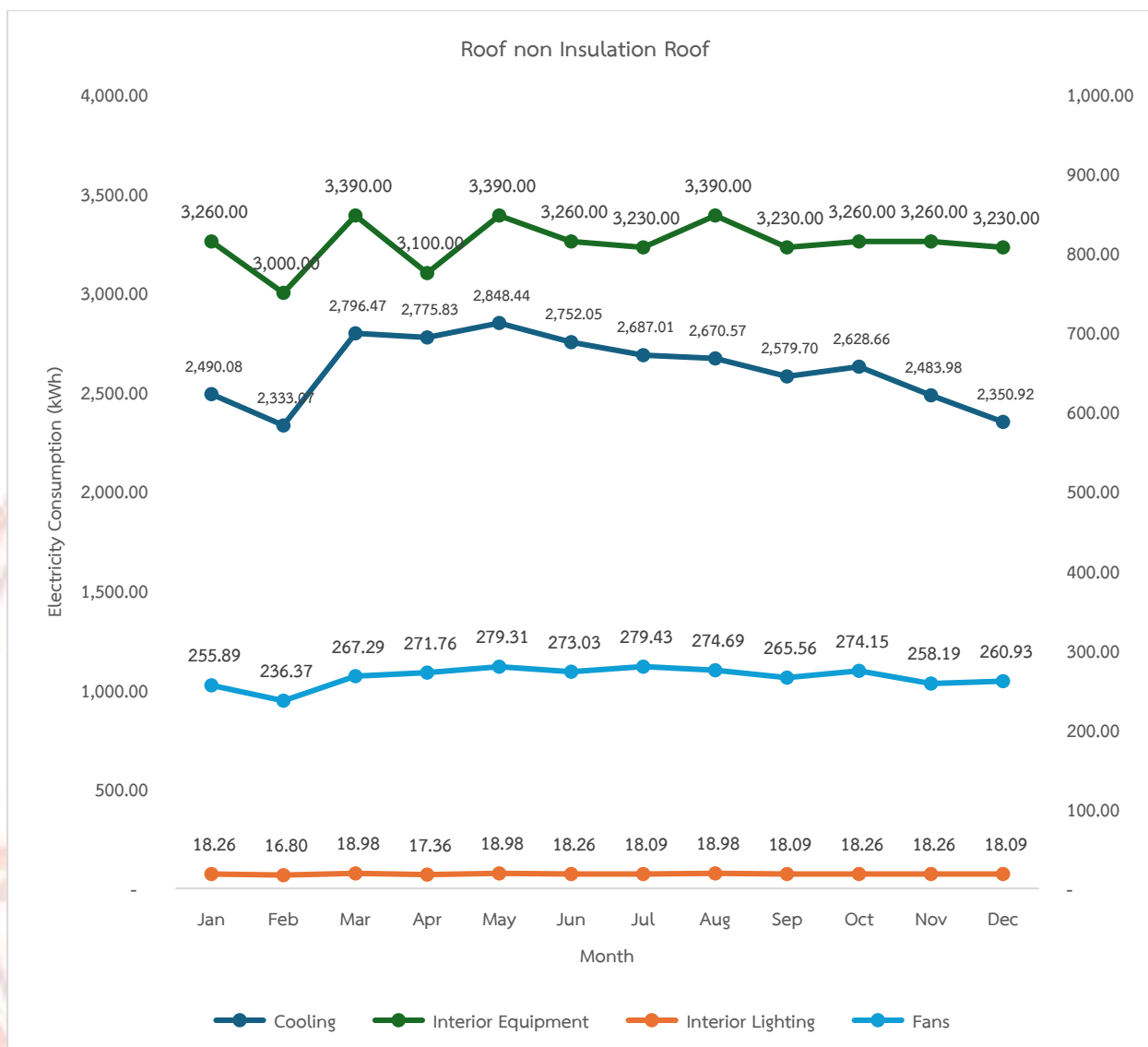
การลดลงของความต้องการไฟฟ้าโดยรวมมาจากการลดพลังงานที่ใช้ในการทำความเย็น โดยหลังคาที่ใช้ฉนวน PU 50 mm สามารถลดพลังงานทำความเย็นลงเหลือเพียง 66.72 kW ซึ่งเป็นผลจากการป้องกันความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงจากฉนวนประเภทนี้ การลดความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารทำให้ระบบปรับอากาศไม่ต้องทำงานหนัก และช่วยลดค่าใช้จ่ายพลังงานในระยะยาว

การเลือกใช้ฉนวนที่มีคุณสมบัติเหมาะสมควรคำนึงถึงหลายปัจจัย ได้แก่ ลักษณะของอาคาร สภาพอากาศ และความต้องการด้านพลังงานของผู้ใช้งาน การติดตั้งหลังคาอาจมีต้นทุนสูงในช่วงแรก แต่สามารถลดค่าใช้จ่ายไฟฟ้าได้ในระยะยาว ซึ่งเป็นการลงทุนที่คุ้มค่าในการประหยัดพลังงาน

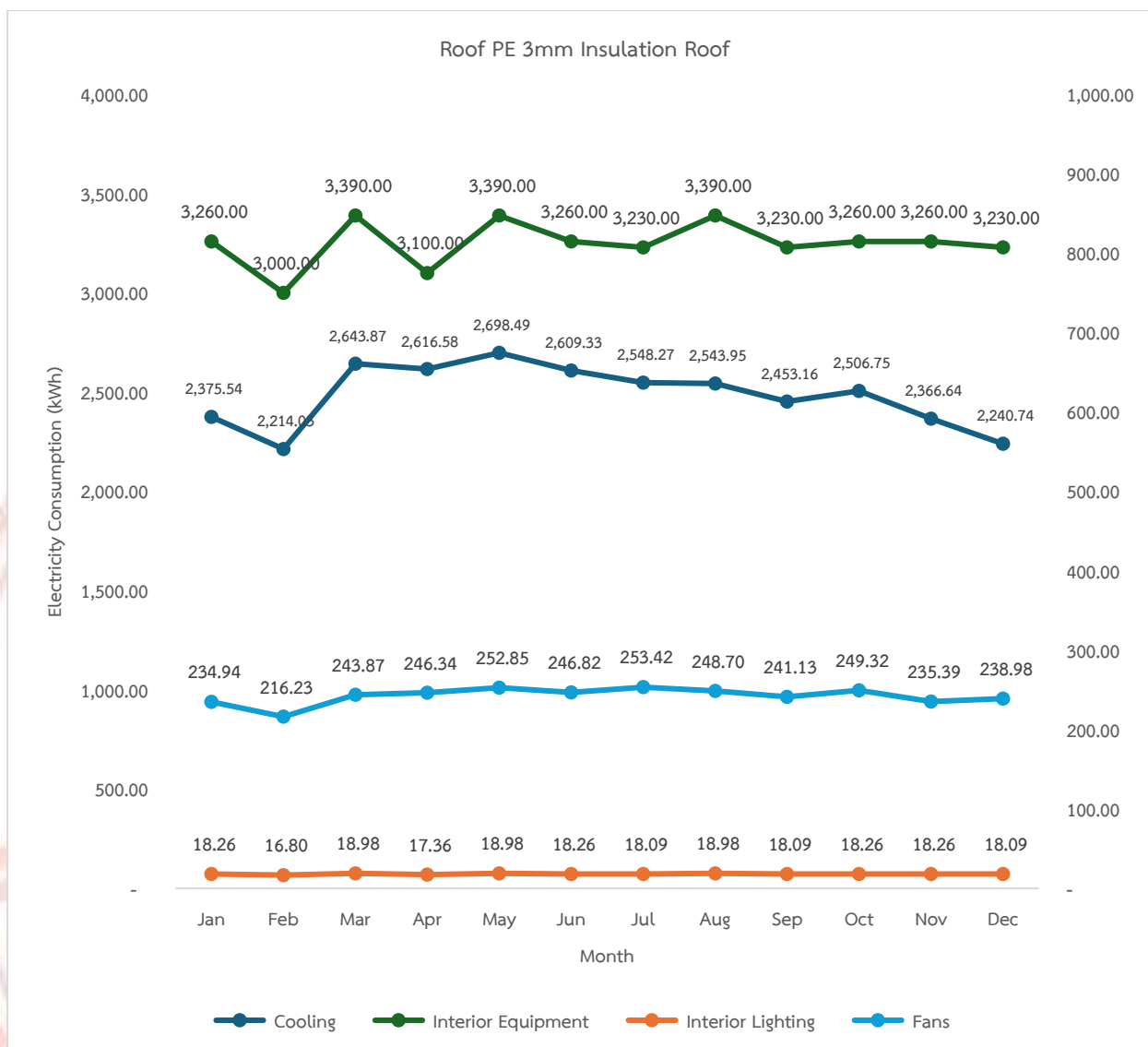
การติดตั้งหลังคามีบทบาทสำคัญในการลดความต้องการไฟฟ้าสูงสุด โดยเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการทำความเย็น ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน แต่ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานและยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ปรับอากาศได้อีกด้วย โดยการเลือกใช้ฉนวนที่มีความหนาและคุณสมบัติที่เหมาะสมจะช่วยให้บรรลุเป้าหมายด้านการประหยัดพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.3.2 การใช้พลังงานไฟฟ้ารวม

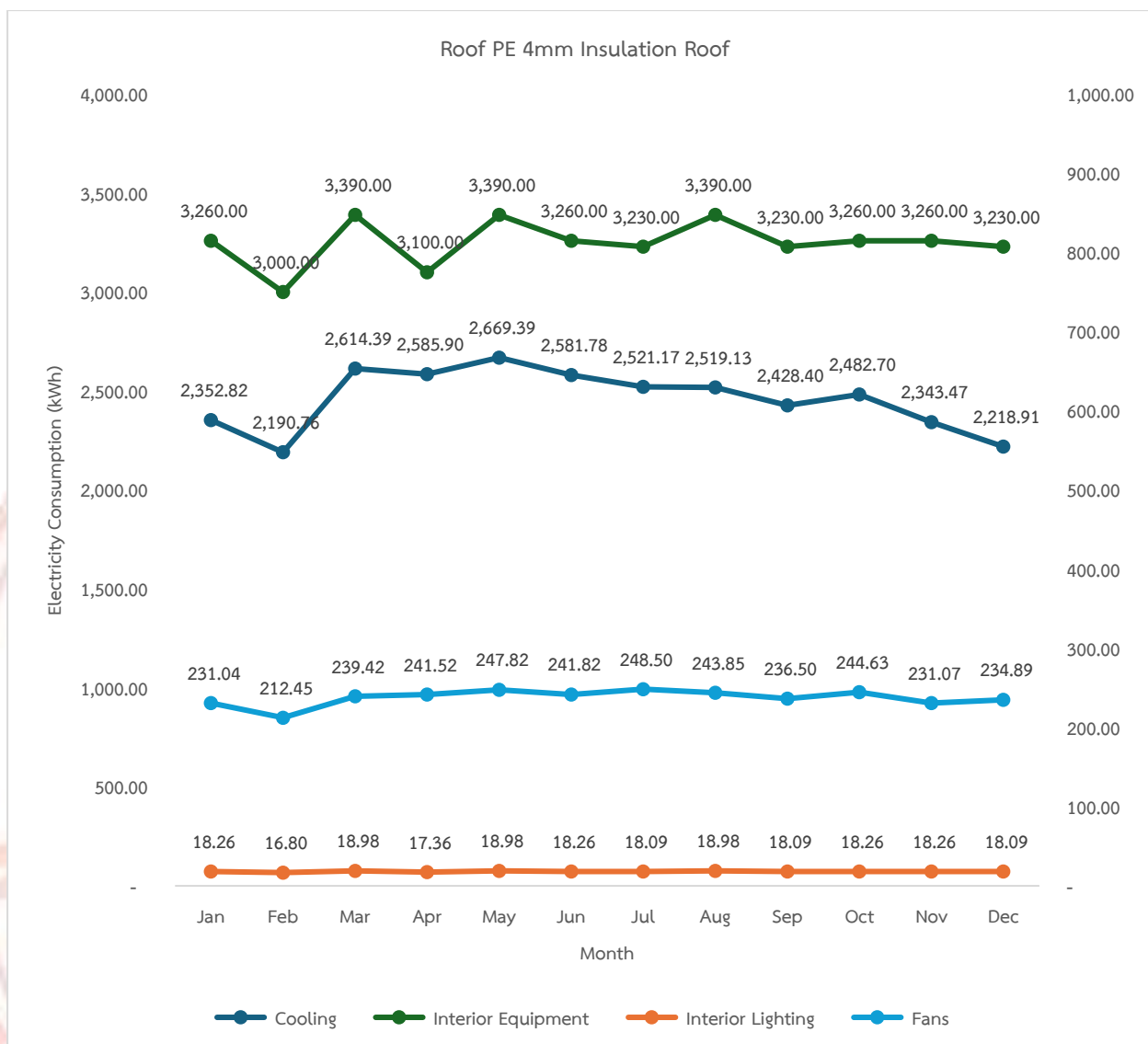
การใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารที่ติดตั้งฉนวนหลังคามีผลสำคัญในการลดการใช้พลังงาน โดยเฉพาะการลดการใช้พลังงานในส่วนของการทำความเย็น ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้พลังงานมากที่สุด ในอาคารทั่วไป จากข้อมูลที่ได้นำเสนอเกี่ยวกับการใช้พลังงานไฟฟ้าของหลังคาที่ไม่มีฉนวนและหลังคาที่ติดตั้งฉนวนหลายประเภท ได้แก่ PE 3 mm, PE 4 mm, PE 5 mm, PE 10 mm, PU 25 mm และ PU 50 mm พบว่าเมื่อมีการติดตั้งหลังคาจะช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในหลายๆ ด้านอย่างชัดเจน โดยแสดงดังรูปที่ 4-19 ถึงรูปที่ 4-25



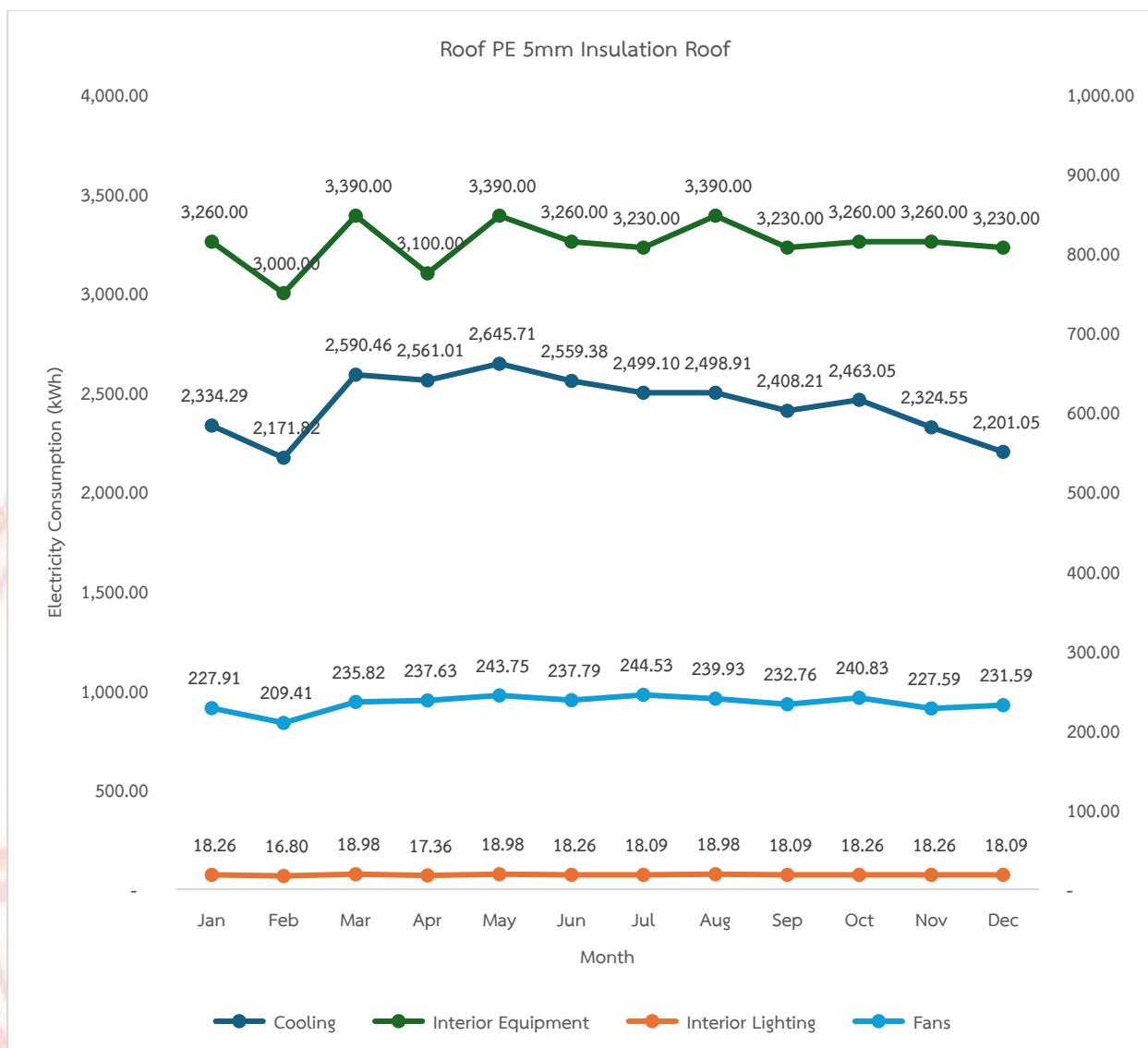
รูปที่ 4-19 การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของห้องคลินิกโดยไม่ติดฉนวนหลังคา



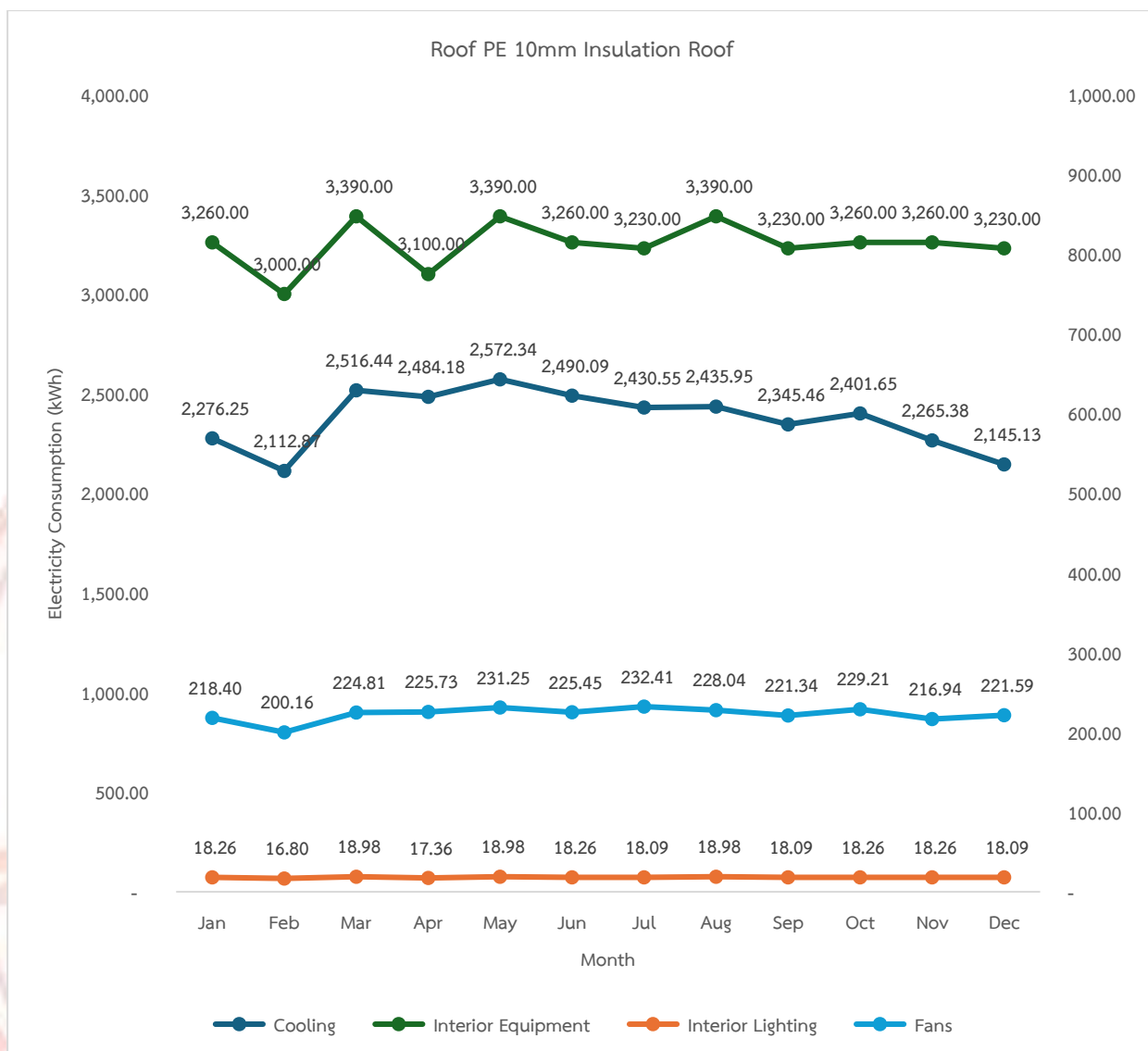
รูปที่ 4-20 การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของห้องคลีนรูมโดยติดฉนวนหลังคา PE 3 mm



รูปที่ 4-21 การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของห้องคลีนรูมโดยติดฉนวนหลังคา PE 4 mm



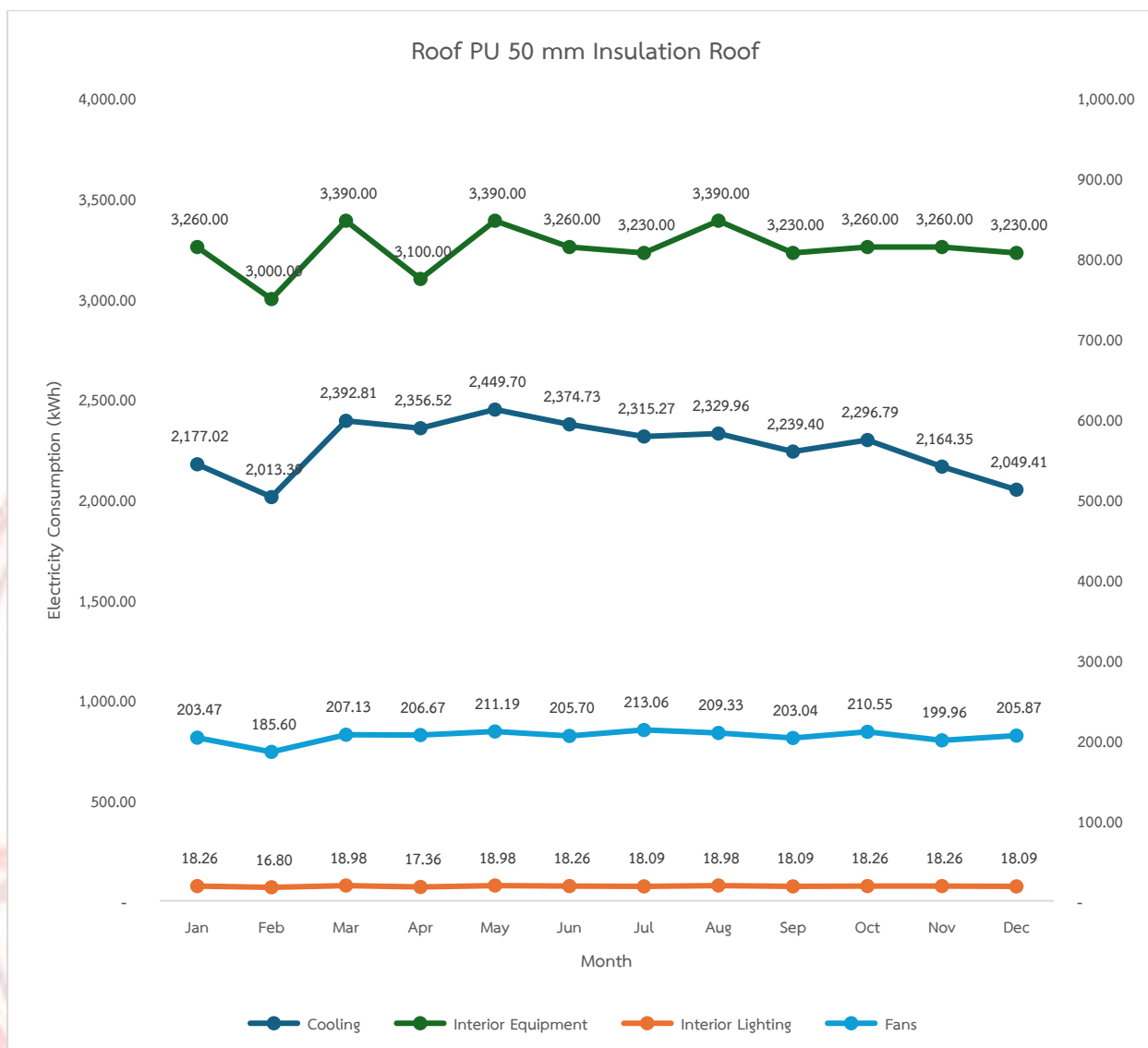
รูปที่ 4-22 การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของห้องคลีนรูมโดยติดฉนวนหลังคา PE 5 mm



รูปที่ 4-23 การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของห้องคลีนรูมโดยติดฉนวนหลังคา PE 10 mm



รูปที่ 4-24 การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของห้องคลีนรูมโดยติดฉนวนหลังคา PU 25 mm



รูปที่ 4-25 การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของห้องคลีนรูมโดยติดฉนวนหลังคา PU 50 mm

ผลของการติดฉนวนหลังคาต่อการใช้พลังงานทำความเย็นในรูปที่ 4-19 ถึงรูปที่ 4-25 พบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับการทำความเย็นในอาคารที่ไม่มีฉนวน รวมทั้งปีจะอยู่ที่ 31,396.78 kWh ในขณะที่หลังคาที่ติดฉนวน PE 3 mm จะใช้พลังงานลดลงเหลือ 29,817.36 kWh ซึ่งลดลงได้ประมาณ 1,579.42 kWh/year เมื่อเพิ่มความหนาของฉนวนเป็น PE 4 mm, PE 5 mm, PE 10 mm, PU 25 mm และ PU 50 mm จะพบว่าการเพิ่มความหนาของฉนวนยิ่งช่วยลดการใช้พลังงานในการทำความเย็นลงมากขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้ฉนวน PU 50

mm ซึ่งการใช้พลังงานทำความเย็นจะลดลงเหลือ 27,159.36 kWh นับว่าเป็นการลดการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

ผลของการติดฉนวนหลังคาต่อการใช้พลังงานในส่วนอื่น เช่น การติดฉนวนหลังคา นอกจากจะช่วยลดการใช้พลังงานในส่วนของการทำความเย็นแล้ว ยังมีผลในด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ เช่น การใช้พลังงานสำหรับแสงสว่างภายในอาคารและอุปกรณ์ต่าง ๆ ถึงแม้ว่าการเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงานในส่วนนี้จะไม่มากนัก แต่โดยรวมแล้ว เมื่อรวมการใช้พลังงานในส่วนต่าง ๆ เช่น การทำความเย็น แสงสว่างภายในอาคาร อุปกรณ์ภายใน และพัดลม พบว่า การติดฉนวนหลังคาช่วยลดการใช้พลังงานได้ในทุกกรณี

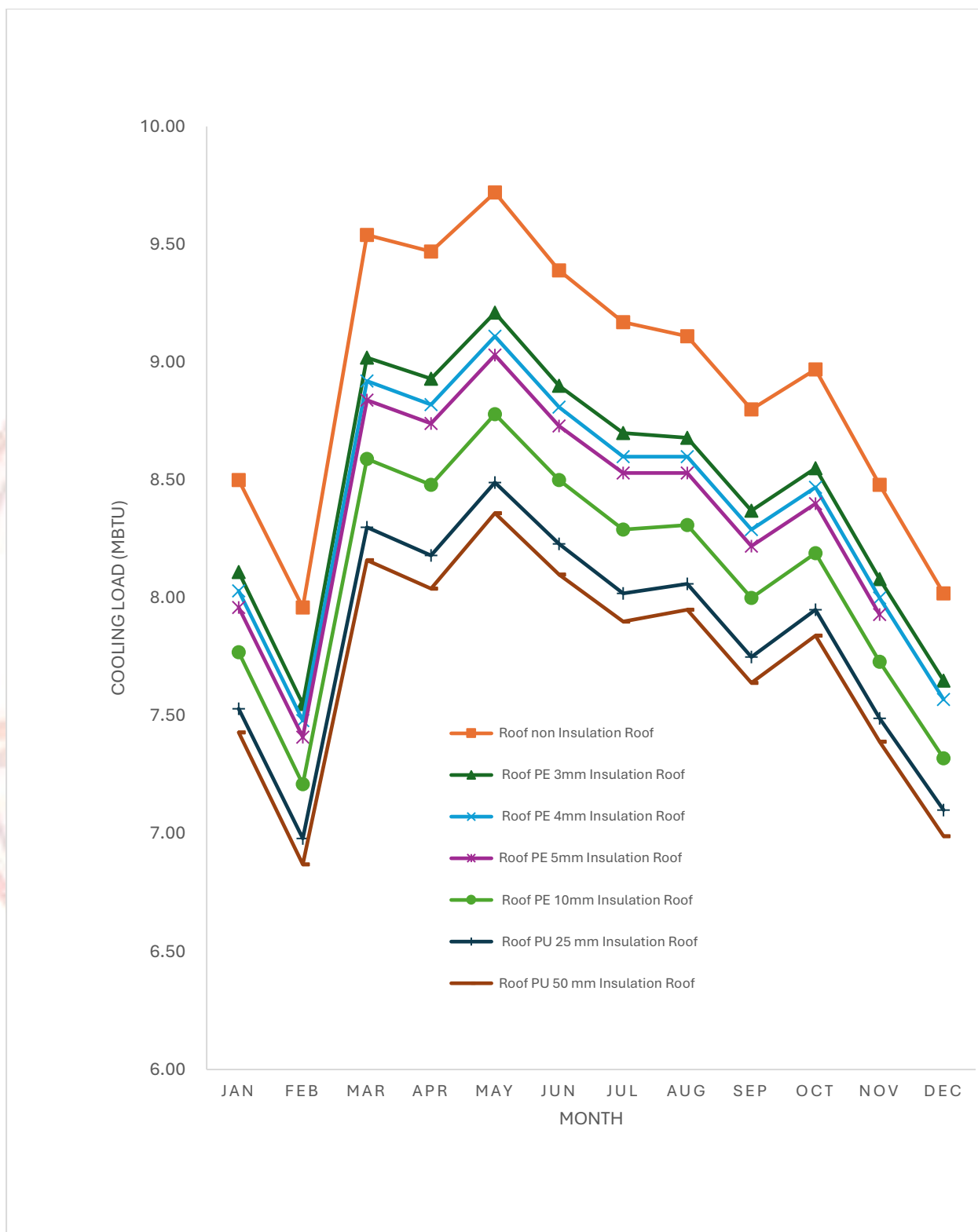
การประหยัดพลังงานและผลกระทบต่อค่าใช้จ่าย การติดตั้งฉนวนหลังคาช่วยลดค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานไฟฟ้าในระยะยาว โดยเมื่อเปรียบเทียบกับหลังคาที่ไม่มีฉนวน ซึ่งมีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม 73,811.77 kWh/year การติดฉนวนที่มีความหนามากขึ้นจะช่วยลดการใช้พลังงานในทุกกรณี โดยหลังคาที่ติดฉนวน PU 50 mm ใช้พลังงานไฟฟ้ารวมเพียง 68,839.33 kWh ลดลง 4,972.44 kWh/year

4.3.3 ภาระการทำความเย็น

ภาระการทำความเย็น (cooling load) เป็นปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในการรักษาอุณหภูมิภายในอาคารให้เย็นลง ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำความเย็นในช่วงฤดูร้อน การติดฉนวนหลังคาเป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยลดภาระการทำความเย็นในอาคาร เนื่องจากฉนวนสามารถช่วยลดการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกสู่ภายในอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในที่นี้จะอภิปรายถึงผลของภาระการทำความเย็นของหลังคาที่ไม่มีฉนวนและหลังคาที่ติดฉนวนในประเภทต่าง ๆ ข้อมูลภาระการทำความเย็นของการติดฉนวน แสดงในรูปที่ 4-26 และตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 เปรียบเทียบภาระการทำความเย็นของการมีและไม่มีฉนวนหลังคา

Cooling load (MBTU)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Roof non- Insulation Roof	8.50	7.96	9.54	9.47	9.72	9.39	9.17	9.11	8.80	8.97	8.48	8.02
Roof PE 3 mm Insulation Roof	8.11	7.55	9.02	8.93	9.21	8.90	8.70	8.68	8.37	8.55	8.08	7.65
Roof PE 4 mm Insulation Roof	8.03	7.48	8.92	8.82	9.11	8.81	8.60	8.60	8.29	8.47	8.00	7.57
Roof PE 5 mm Insulation Roof	7.96	7.41	8.84	8.74	9.03	8.73	8.53	8.53	8.22	8.40	7.93	7.51
Roof PE 10 mm Insulation Roof	7.77	7.21	8.59	8.48	8.78	8.50	8.29	8.31	8.00	8.19	7.73	7.32
Roof PU 25 mm Insulation Roof	7.53	6.98	8.30	8.18	8.49	8.23	8.02	8.06	7.75	7.95	7.49	7.10
Roof PU 50 mm Insulation Roof	7.43	6.87	8.16	8.04	8.36	8.10	7.90	7.95	7.64	7.84	7.39	6.99



รูปที่ 4-26 ภาระการทำความเย็นของการติดตั้งฉนวนหลังคาในวัสดุ PE, PU และส่วนที่ไม่มีฉนวน

จากการคำนวณภาระการทำความเย็น (cooling load) รูปที่ 4-26 และตารางที่ 4-5 พบว่า ในกรณีของหลังคาที่ไม่มีฉนวน ภาระการทำความเย็นจะมีค่าเฉลี่ยสูงสุดในช่วงเดือน เมษายน (9.47 MBTU) และพฤษภาคม (9.72 MBTU) ซึ่งเป็นช่วงที่อุณหภูมิกลางวันเฉลี่ยสูงสุด ในขณะที่การติดตั้งหลังคาจะช่วยลดภาระการทำความเย็นในทุกกรณี โดยเฉพาะหลังคาที่ ติดฉนวน PU 50 mm ซึ่งมีการลดภาระการทำความเย็นอย่างชัดเจนในทุกเดือน เมื่อ เปรียบเทียบกับหลังคาที่ไม่มีฉนวน พบว่าในเดือนเมษายนและพฤษภาคมที่มีอุณหภูมิสูงสุด ภาระการทำความเย็นจากหลังคาที่ติดตั้ง PU 50 mm ลดลงเหลือ 8.04 MBTU และ 8.36 MBTU ตามลำดับ ซึ่งลดลงจากภาระการทำความเย็นของหลังคาที่ไม่มีฉนวนอย่างมีนัยสำคัญ

การเพิ่มความหนาของฉนวนมีผลอย่างชัดเจนในการลดภาระการทำความเย็น โดยเฉพาะหลังคาที่ติดตั้ง PU 50 mm ซึ่งมีค่าเฉลี่ยภาระการทำความเย็นลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกเดือนเมื่อเปรียบเทียบกับหลังคาที่ติดตั้ง PE 3 mm หรือ PE 5 mm ตัวอย่างเช่น ในเดือนมิถุนายน ภาระการทำความเย็นของหลังคาที่ติดตั้ง PU 50 mm เท่ากับ 8.90 MBTU ส่วนหลังคาที่ติดตั้ง PU 50 mm ลดลงเหลือ 8.10 MBTU ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ฉนวน PU 50 mm มีประสิทธิภาพในการลดภาระการทำความเย็นได้มากที่สุด

ในช่วงฤดูร้อนที่อุณหภูมิกลางวันเฉลี่ยสูง การติดตั้งหลังคาช่วยลดการรับความร้อนจาก ภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลจากการติดตั้งจะช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำ ความเย็นในช่วงเดือนที่มีอุณหภูมิสูงสุด เช่น เดือนมิถุนายนและกรกฎาคม ซึ่งภาระการทำความเย็นจากหลังคาที่ไม่มีฉนวนจะอยู่ที่ 9.39 MBTU และ 9.17 MBTU แต่ภาระการทำความ เย็นจากหลังคาที่ติดตั้ง PU 50 mm ลดลงเหลือ 8.10 MBTU และ 7.90 MBTU ซึ่งการติด ฉนวนที่มีประสิทธิภาพสูงทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้อย่างมากในช่วงที่ใช้พลังงานในการ ทำความเย็นมากที่สุด เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างวัสดุฉนวนประเภทโพลีเอทิลีน (PE) กับโพลียูรีเทน (PU) จะพบว่า วัสดุ PU ให้ผลในการลดภาระความเย็นได้ดีกว่าอย่างชัดเจน แม้ จะใช้ความหนาที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกัน เช่น ในเดือนพฤษภาคม หลังคาที่ใช้ฉนวน PE หนา 10 mm มีค่าภาระความเย็น 8.78 MBTU ขณะที่ฉนวน PU หนา 25 mm มีค่าภาระความเย็น ต่ำกว่าที่ 8.49 MBTU และลดลงอีกเมื่อใช้ PU หนา 50 mm ซึ่งมีค่าเพียง 8.36 MBTU เท่านั้น ความแตกต่างดังกล่าวสะท้อนถึงความสามารถของวัสดุ PU ในการต้านทานความร้อนได้ดีกว่า

PE ซึ่งสอดคล้องกับ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ โดยวัสดุ PU มีค่า การนำความร้อนของวัสดุต่ำกว่า PE ซึ่งหมายความว่า ความร้อนจะถ่ายเทผ่านวัสดุได้น้อยลง ส่งผลให้ความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารน้อยลงตามลำดับ นอกจากนี้ ยังพบว่าความหนาของฉนวนก็มีผลต่อภาระความเย็นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในกรณีของฉนวน PE เมื่อเพิ่มความหนาจาก 3 mm ไปเป็น 10 mm ค่าภาระความเย็นลดลงอย่างต่อเนื่อง เช่น ในเดือนเมษายน ค่าในกรณีที่ใช้ฉนวน PE หนา 3 mm อยู่ที่ 8.93 MBTU ขณะที่ฉนวนหนา 10 mm มีค่าลดลงเหลือ 8.48 MBTU ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการของ ค่าความต้านทานความร้อน ที่เพิ่มขึ้นตามความหนาของวัสดุ และสัมพันธ์ผกผันกับ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวม (U-value) กล่าวคือ ยิ่งวัสดุมีความหนาและมีค่าความต้านทานความร้อนสูงเท่าใด การถ่ายเทความร้อนก็ยิ่งลดลง ส่งผลให้ภาระของระบบทำความเย็นลดลงตามลำดับ

4.3.4 การใช้พลังงานที่ลดลง

การใช้วัสดุฉนวนในระบบอาคารมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน โดยเฉพาะในด้านการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าและการลดภาระของระบบทำความเย็น ข้อมูลจากตารางแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการลดลงของการใช้พลังงานไฟฟ้าและภาระการทำความเย็นเมื่อใช้วัสดุฉนวนที่มีความหนาต่างกันทั้งชนิด PE (Polyethylene) และ PU (Polyurethane) เมื่อเพิ่มความหนาของวัสดุฉนวน ค่าการลดลงของการใช้พลังงานไฟฟ้าและภาระของระบบทำความเย็นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยวัสดุฉนวนชนิด PU ความหนา 50 mm ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าถึง 8.11% และสามารถลดภาระการทำความเย็นได้เฉลี่ย 6.17% ขณะที่วัสดุฉนวนชนิด PE ความหนา 3 mm ให้ค่าการลดลงต่ำสุดที่ 3.20% และลดภาระการทำความเย็นได้เฉลี่ยเพียง 0.57% แสดงในตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 การใช้พลังงานที่ลดลงสำหรับการติดตั้งฉนวนหลังคาแต่ละประเภท

วัสดุฉนวน	ร้อยละการลดลงของ การใช้พลังงานไฟฟ้า	ค่าเฉลี่ยการลดลง ของการใช้ไฟฟ้า สูงสุด	ค่าเฉลี่ยร้อยละการ ลดลงของภาระการ ทำความเย็น
PE 3 mm	3.20%	3.07%	0.57%
PE 4 mm	3.68%	3.61%	0.46%
PE 5 mm	3.92%	4.06%	0.68%
PE 10 mm	5.61%	5.54%	2.05%
PU 25 mm	7.31%	5.84%	4.67%
PU 50 mm	8.11%	6.49%	6.17%

ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า การเลือกใช้วัสดุฉนวนที่มีประสิทธิภาพและความหนาที่เหมาะสมสามารถช่วยลดการใช้พลังงานในอาคารได้อย่างชัดเจน ทั้งยังช่วยสนับสนุนแนวทางการอนุรักษ์พลังงานและลดต้นทุนการดำเนินงานในระยะยาว

4.3.5 การเลือกใช้ฉนวนหลังคา

การเลือกวัสดุที่เหมาะสมในการติดตั้งฉนวนนั้น มีความสำคัญต่อการลดภาระการทำความเย็น (cooling load), การใช้พลังงานสูงสุด (electricity peak demand) และการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม (electricity consumption) สำหรับการเลือกวัสดุฉนวนหลังคาที่มีประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยใช้ข้อมูลจากการคำนวณค่า cooling load และการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละเดือนนั้น พบว่า วัสดุประเภท PU (Polyurethane) ที่มีความหนา 50 mm เป็นวัสดุที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถลดภาระการทำความเย็นและการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเทียบกับวัสดุประเภทอื่น ๆ

การลดภาระการทำความเย็น (Cooling Load): จากข้อมูลการคำนวณค่า cooling load พบว่า วัสดุประเภท PU 50 mm สามารถลดภาระการทำความเย็นได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับวัสดุประเภทอื่น ๆ เช่น PE 3 mm หรือ PE 5 mm โดยเฉพาะในเดือนที่มีอุณหภูมิสูง เช่น เดือนมิถุนายนและกรกฎาคม ค่า cooling load ลดลงจาก 9.17 MBTU เป็น 7.90 MBTU และจาก 8.90 MBTU เป็น 8.10 MBTU ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพของวัสดุในการลดการทำความเย็นที่จำเป็น

การลดการใช้พลังงานไฟฟ้า (Electricity Consumption): เมื่อค่า cooling load ลดลง การใช้พลังงานไฟฟ้าก็จะลดลงตามไปด้วย การติดตั้งฉนวน PU 50 mm จึงช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในระยะยาว ซึ่งเป็นผลดีทั้งในด้านการประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายในระยะยาว

การลดการใช้พลังงานสูงสุด (Peak Demand): วัสดุ PU 50 mm ช่วยลดภาระการทำงานของเครื่องปรับอากาศในช่วงที่อุณหภูมิสูงสุด ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานสูงสุดในช่วงเวลาที่มีความต้องการพลังงานไฟฟ้ามากที่สุด ทำให้เกิดประสิทธิภาพในการจัดการพลังงานในระดับที่ดียิ่งขึ้น

4.4 เศรษฐศาสตร์การลงทุนของการก่อสร้างห้องคลีนรูม

การพิจารณาเศรษฐศาสตร์การลงทุนของการก่อสร้างห้องคลีนรูมนั้น จะพิจารณาการเลือกวัสดุที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการติดตั้งผนังและฝ้าเป็นฉนวน PIR หนา 50 mm โดยเปรียบเทียบการติดตั้งกับหลังคาที่มีฉนวน PU ที่ความหนา 25 mm และ 50 mm โดยมีข้อมูลการลงทุนดังนี้

- 1) ระยะเวลาโครงการ 25 ปี
- 2) เงินลงทุนการติดตั้งห้องคลีนรูม 573,300 บาท โดยให้เป็นเงินลงทุนเริ่มแรก
- 3) ให้ผลประโยชน์คือหน่วยไฟฟ้าที่ลดลงของการติดตั้งฉนวนก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงของการติดตั้งหลังคา PU
- 4) ค่าไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น 5% ต่อปี

โดยผลการลงทุนได้แสดงในตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 ผลการลงทุนของการติดตั้งหลังคา PU

Investment	PU 25 mm Insulation	PU 50 mm Insulation
NPV (THB)	- 1,820,909.64	- 1,489,502.86
IRR (%)	2.40%	3.58%
PB (year)	14.9	13.9



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษาเชิงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานก่อนและหลังการปรับปรุงห้องคลีนรูมสำหรับการผลิตยาแผนปัจจุบันโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปรับปรุงและลดภาระโหลดความร้อนไปยังห้องคลีนรูมและเศรษฐศาสตร์การลงทุนก่อสร้างห้องคลีนรูม มีข้อสรุปดังนี้

5.1 ผลของการติดตั้งฉนวนในแต่ละประเภทวัสดุ

การใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับระบบปรับอากาศ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อภาระการใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร การเลือกใช้ฉนวนกันความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถช่วยลดภาระการทำความเย็น (Cooling Load) ลดความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Electricity Peak Demand) และลดการใช้พลังงานไฟฟ้า (Electricity Consumption) ได้อย่างมีนัยสำคัญ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า วัสดุฉนวนโพลีไอโซไซยานูเรต (Polyisocyanurate หรือ PIR) เป็นวัสดุที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการลดการใช้พลังงานในอาคาร ทั้งนี้สามารถพิจารณาได้จากปัจจัยสำคัญดังต่อไปนี้

ภาระการทำความเย็น (Cooling Load) ฉนวน PIR มีค่าภาระการทำความเย็นต่ำกว่าวัสดุอื่น ๆ ตลอดทั้งปี โดยเฉพาะในช่วงเดือนที่มีอุณหภูมิสูง เช่น มีนาคมถึงพฤษภาคม ซึ่งเป็นช่วงที่ต้องใช้พลังงานในการทำความเย็นมากที่สุด การที่ PIR สามารถลดค่าภาระการทำความเย็นได้หมายความว่าระบบปรับอากาศไม่จำเป็นต้องทำงานหนักมาก ส่งผลให้สามารถลดต้นทุนค่าไฟฟ้าได้

ความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Electricity Peak Demand) ต่ำที่สุด ค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุดของอาคารเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการออกแบบระบบไฟฟ้าและระบบปรับอากาศ หากค่าสูงเกินไปอาจต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่ รวมถึงเครื่องปรับอากาศที่มีกำลังสูง ซึ่งส่งผลให้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเพิ่มขึ้น จากข้อมูลพบว่าฉนวน PIR สามารถช่วยลดค่าสูงสุดของการใช้พลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าวัสดุอื่น ๆ ทำให้สามารถออกแบบระบบปรับอากาศและระบบไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กลง ลดค่าใช้จ่ายทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

การใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำที่สุด ฉนวน PIR ไม่เพียงแต่ช่วยลดภาระการทำความเย็นและความต้องการไฟฟ้าสูงสุดเท่านั้น แต่ยังช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งระบบในแต่ละเดือน ทำให้เกิดการประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น ๆ เช่น โพลีสไตรีน (Polystyrene: PS) โพลียูรีเทน (Polyurethane: PU) และร็อกวูล (Rockwool) พบว่า PIR สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ดีกว่าในทุกช่วงเวลาของปี

การเปรียบเทียบกับวัสดุฉนวนประเภทอื่น ๆ แม้ว่าฉนวน PS, PU และ Rockwool จะมีคุณสมบัติในการลดภาระการทำความเย็นและการใช้พลังงานได้ดีเช่นกัน แต่ยังคงมีค่าการใช้พลังงานสูงกว่าฉนวน PIR เล็กน้อย โดยเฉพาะในช่วงฤดูร้อน ในขณะที่ วัสดุยิปซัม (Gypsum) ซึ่งไม่มีฉนวนกันความร้อน มีค่าภาระการทำความเย็นและการใช้พลังงานสูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าอาคารที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนจะสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามากขึ้น

5.2 ผลของการติดตั้งฉนวนหลังคาในแต่ละประเภทวัสดุ

การติดตั้งฉนวนหลังคามีผลสำคัญในการลดภาระการทำความเย็น (cooling load) และการใช้พลังงานไฟฟ้า (electricity consumption) โดยวัสดุฉนวนที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดการใช้พลังงานคือ วัสดุ PU (Polyurethane) ที่มีความหนา 50 mm เนื่องจากสามารถลดค่า cooling load และการใช้พลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพในทุกเดือน โดยเฉพาะในช่วงฤดูร้อนที่มีอุณหภูมิสูง

ผลที่เกิดจากการติดตั้งฉนวนหลังคามีดังนี้

ลดภาระการทำความเย็น (Cooling Load): การติดตั้งฉนวนหลังคาช่วยลดภาระการทำความเย็นลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยวัสดุ PU 50 mm สามารถลดค่า cooling load ได้มากที่สุด เมื่อเทียบกับวัสดุประเภทอื่น ๆ เช่น PE 3 mm หรือ PE 5 mm

ลดการใช้พลังงานไฟฟ้า (Electricity Consumption): การลดภาระการทำความเย็นส่งผลให้การใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงตามมา ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายและลดการใช้พลังงานในระยะยาว

ลดการใช้พลังงานสูงสุด (Peak Demand): การติดตั้งฉนวนหลังคาช่วยลดภาระการทำงานของเครื่องปรับอากาศ โดยเฉพาะในช่วงที่มีความต้องการพลังงานสูงสุด ทำให้ช่วยลดการใช้พลังงานในช่วงพีคของวัน

การติดตั้งฉนวนหลังคาช่วยลดภาระการทำความเย็นและการใช้พลังงานไฟฟ้าในระยะยาว โดยวัสดุ PU 50 mm เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดภาระการทำความเย็นและการใช้พลังงานในช่วงที่อุณหภูมิสูง ทำให้เป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งฉนวนหลังคาเพื่อประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย

5.3 เศรษฐศาสตร์การลงทุนของการติดตั้งฉนวนหลังคา

จากการวิเคราะห์ข้อมูลการลงทุนในการติดตั้งฉนวนหลังคาชนิด PU ที่ความหนาต่างกัน พบว่าการลงทุนในฉนวน PU ความหนา 50 mm ให้ผลตอบแทนทางการเงินที่ดีกว่าฉนวน PU ความหนา 25 mm ในทุกมิติ

กรณีการลงทุนในฉนวน PU ความหนา 25 mm มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ติดลบอยู่ที่ 1,820,909.64 บาท อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ร้อยละ 2.40 และมีระยะเวลาคืนทุน 14.9 ปี ในขณะที่การลงทุนในฉนวน PU ความหนา 50 mm มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิติดลบน้อยกว่า คือ 1,489,502.86 บาท อัตราผลตอบแทนภายในสูงกว่า คือ ร้อยละ 3.58 และมีระยะเวลาคืนทุนเร็วกว่า คือ 13.9 ปี

5.4 ข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยแรงเห็นถึงความสำคัญต่อการเลือกใช้วัสดุประกอบอาคารหรือเปลือกอาคารสำหรับโรงงานผลิตยาแผนปัจจุบันที่ส่งผลโดยตรงต่อการใช้พลังงานของอาคารอย่างมีนัยสำคัญ และเป็นแนวทางในการเริ่มต้นเพื่อใช้ในการพัฒนาและศึกษากับอาคารคลินิกประเภทอื่น ๆ เพื่อเป็นการสร้างนวัตกรรมเทคโนโลยีคลินิกใหม่ ๆ ในการประหยัดพลังงานพร้อมทั้งช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

บรรณานุกรม

กระทรวงพลังงาน. (2552, 28 สิงหาคม). *ประกาศกระทรวงพลังงาน (เล่ม 126 ตอนพิเศษ 122ง)*.

ราชกิจจานุเบกษา.

บริษัท ไบรท์ แมเนจเม้นท์ คอนซัลติ้ง จำกัด (2018). *คู่มือการใช้งานโปรแกรม BESM*. โครงการส่งเสริมการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในอาคารธุรกิจ (PEECB)

เสริม จันทรฉาย. (2560). *รังสีอาทิตย์*. (พิมพ์ครั้งที่ 2). ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2021).

ASHRAE Handbook—Fundamentals (I-P ed.). Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

Brackney, L., Parker, A., Macumber, D., & Benne, K. (2018). *Building energy modeling with OpenStudio: A practical guide for students and professionals*. Springer.

Chan, L. S. (2021). Investigating the thermal performance and overall thermal transfer value (OTTV) of air-conditioned buildings under the effect of adjacent shading against solar radiation. *Journal of Building Engineering*, 44, 103211.

Chan, A. L. S., & Chow, T. T. (2014). Calculation of overall thermal transfer value (OTTV) for commercial buildings constructed with naturally ventilated double skin facade in subtropical Hong Kong. *Energy and Buildings*, 69, 14–21.

Chen, J., Lin, K., Pan, A., Zhu, Y., Ho, T. C., Gong, L. J., Jia, L., Shi, W., Sun, Q., & Tso, C. Y. (2024). Innovating building energy regulations enabled by radiative sky cooling: Enhanced code of practice for overall thermal transfer value (OTTV) of super-cool roofs. *Energy Conversion and Management*, 306, 118309.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Cheng, X., Li, C., Ma, X., & Shao, X. (2022). Differential pressure control method for pharmaceutical cleanrooms under variable air supply conditions. *Building and Environment*, 213, 108849.
- Fang, H., Zhao, D., Yuan, J., Aili, X., Yin, X., Yang, R., & Tan, G. (2019). Performance evaluation of a metamaterial-based new cool roof using improved roof thermal transfer value model. *Applied Energy*, 248, 589–599.
- He, Y., Lin, E. S., Tan, C. L., Yu, Z., Tan, P. Y., & Wong, N. H. (2021). Model development of roof thermal transfer value (RTTV) for green roof in tropical area: A case study in Singapore. *Building and Environment*, 203, 108101.
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2006). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6th ed.). John Wiley & Sons.
- Lim, B. V., & Leung, M. (2000). Passive environmental strategies for architectural design. In W. W. Sang & E. H. Chan (Eds.), *Building Hong Kong Environmental Considerations*. Hong Kong University Press.
- Liu, H. Y., Yang, S. S., Qu, B. C., Wu, C. M., & Li, Y. R. (2025). Synergistic enhancement of heat conduction and natural convection in latent heat storage cavities with longitudinal fins. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 236, 126291.
- McQuiston, F. C., Parker, J. D., & Spitler, J. D. (2004). *Heating, ventilating, and air conditioning analysis and design* (6th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Shah, I., Soh, B., Lim, C., Lau, S. K., & Ghahramani, A. (2023). Thermal transfer and temperature reductions from shading systems on opaque facades: Quantifying the impacts of influential factors. *Energy & Buildings*, 278, 112604.

บรรณานุกรม (ต่อ)

Sheng, W., Zhang, L., & Ridley, I. (2020). The impact of minimum OTTV legislation on building energy consumption. *Energy Policy*, 136, 111075.

Tummu, P., Chirarattananon, S., Hien, V. D., Chaiwiwatworakul, P., & Rakkwamsuk, P. (2017). Formulation of an OTTV for walls of bedroom in Thailand. *Applied Thermal Engineering*, 113, 334–344.

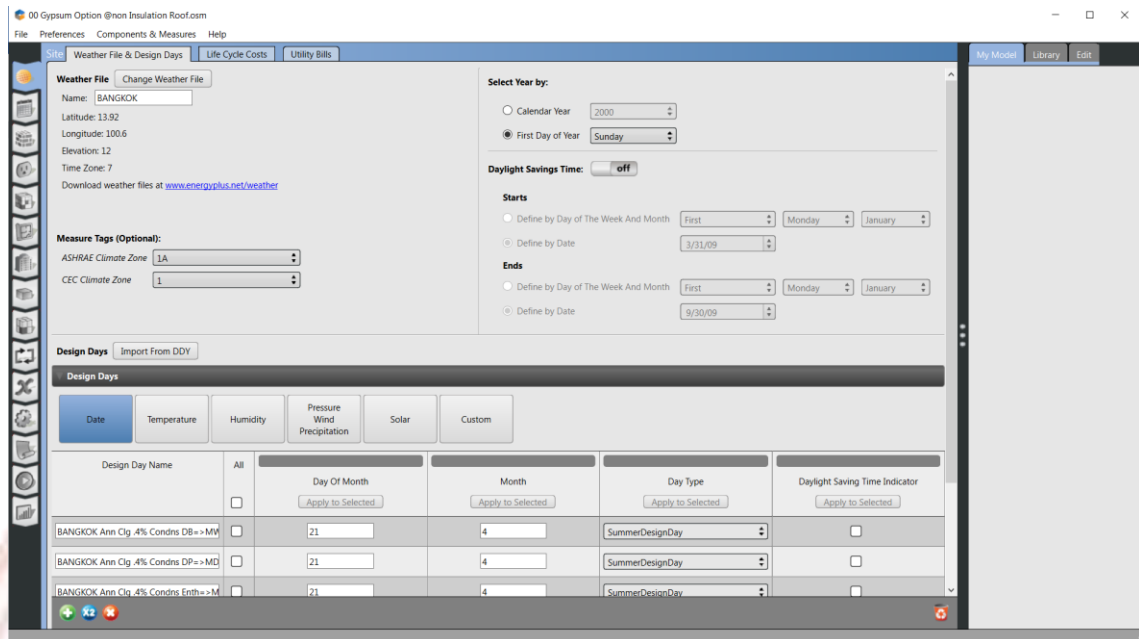
Whyte, W. (2001). *Cleanroom Technology Fundamentals of Design, Testing and Operation*. JOHN WILEY & SONS.

Zhuang, C., Wang, S., & Shan, K. (2019). Probabilistic optimal design of cleanroom air-conditioning systems facilitating optimal ventilation control under uncertainties. *Applied Energy*, 253, 113576.

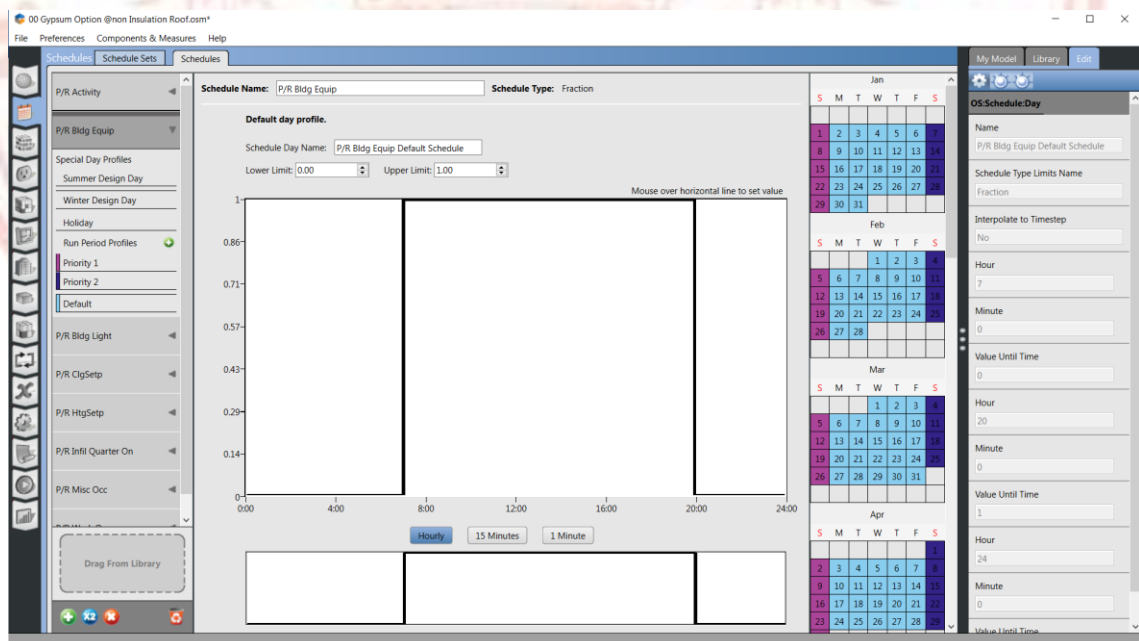


ภาคผนวก ก

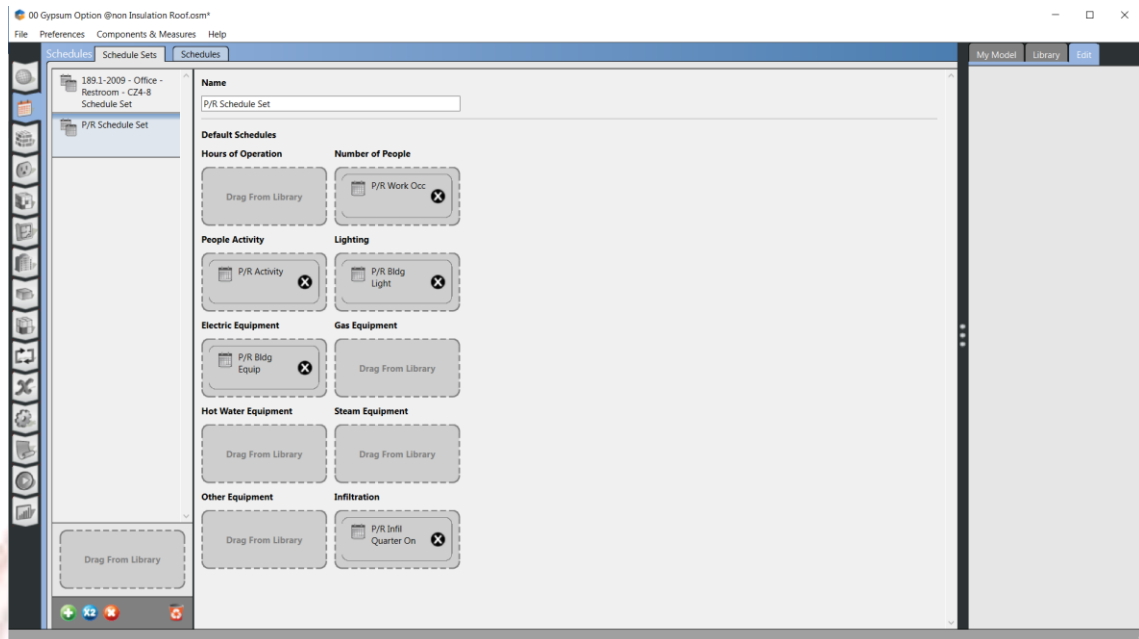
ตัวอย่างการจำลองและผลการจำลองของงานวิจัยนี้



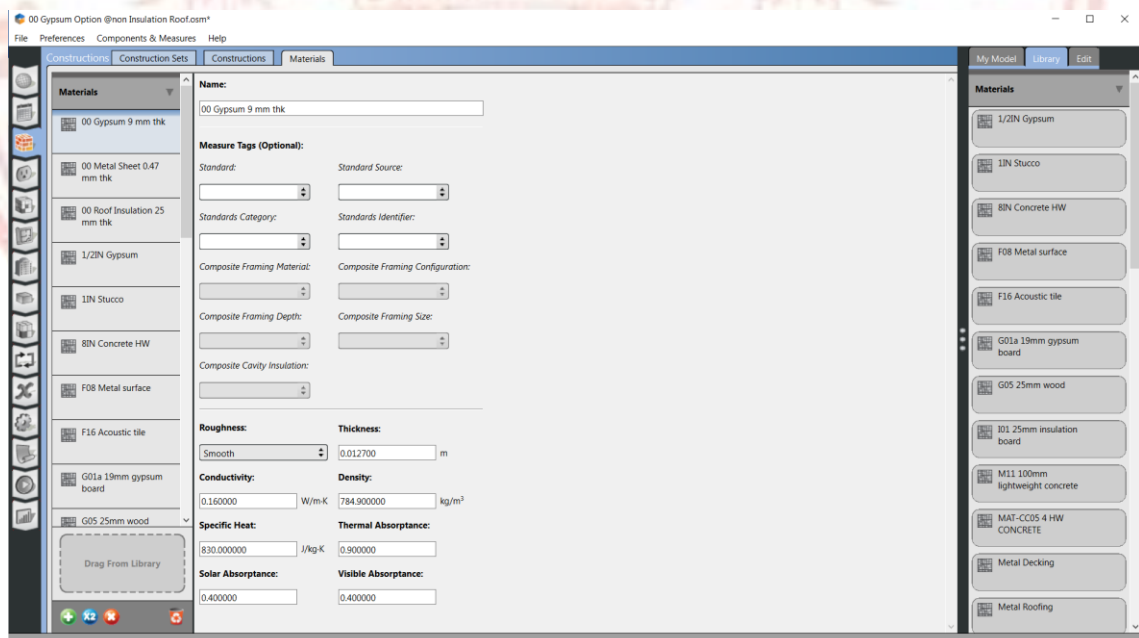
รูป ก-1 การกำหนดไฟล์สภาพภูมิอากาศ



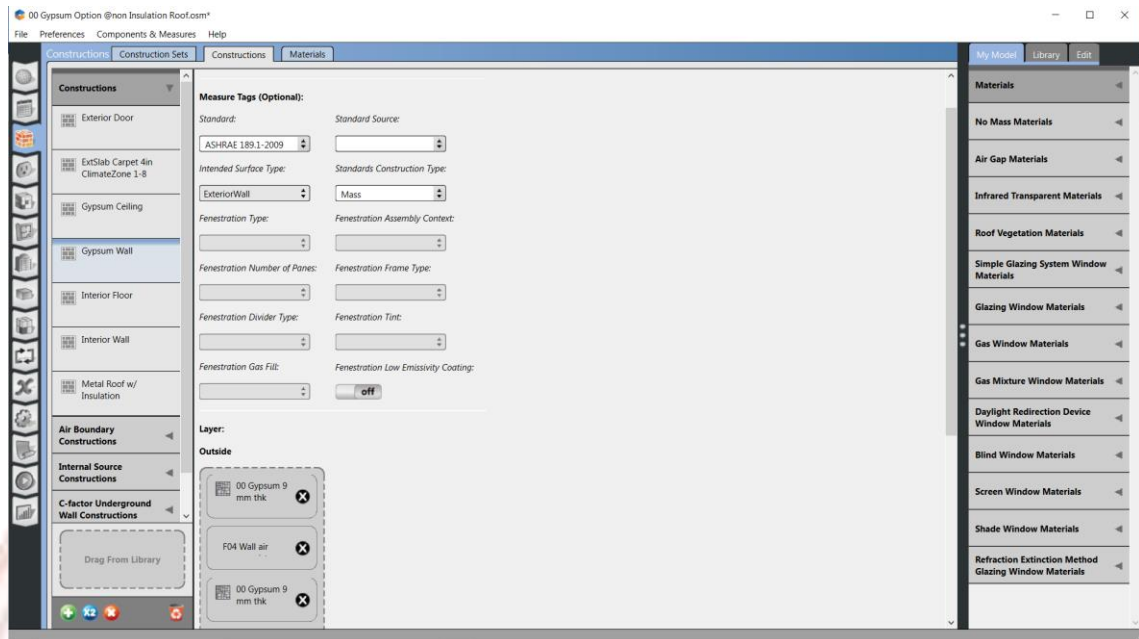
รูป ก-2 การกำหนดตารางเวลาการทำงานของห้องคลีนรูม



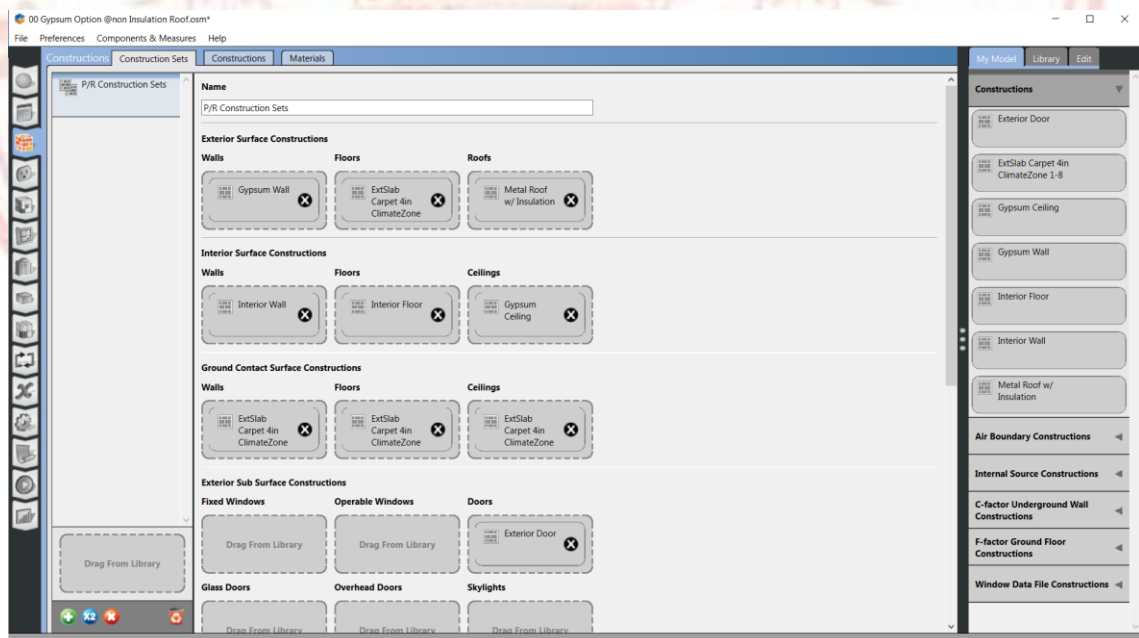
รูป ก-3 การกำหนดชุดเวลาการทำงานของห้องคลีนรูม



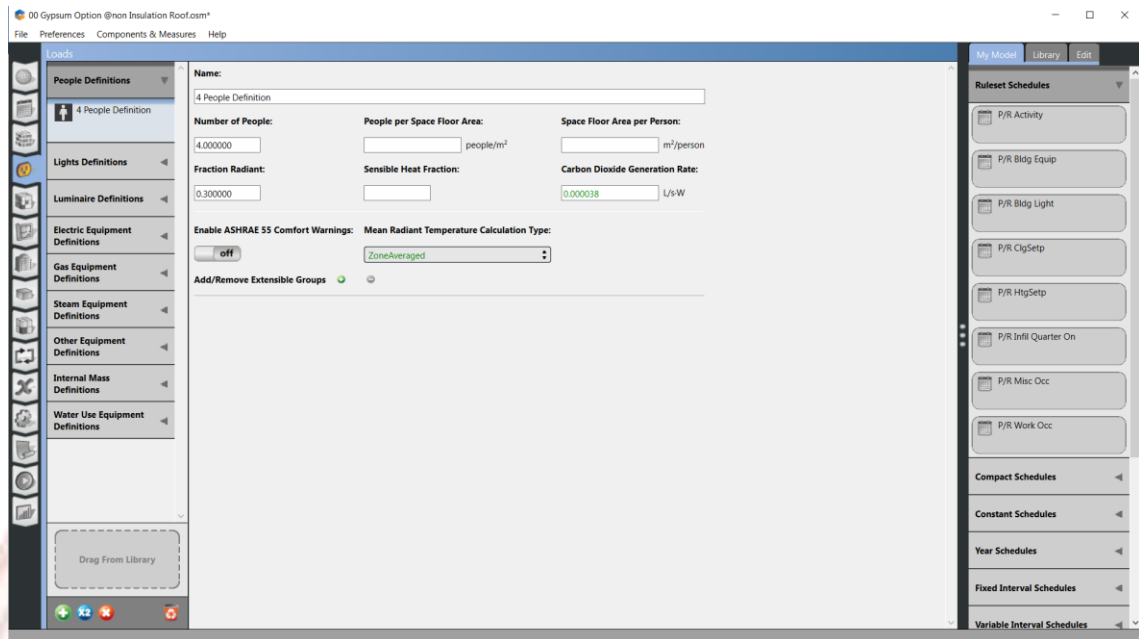
รูป ก-4 การกำหนดวัสดุประกอบห้องคลีนรูม



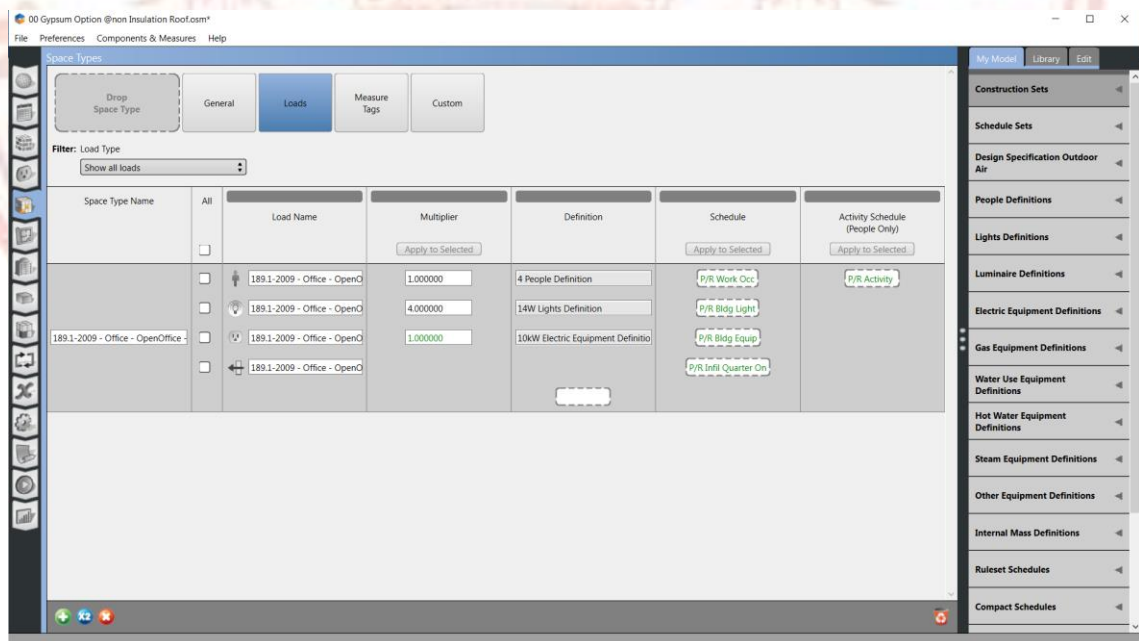
รูป ก-5 การกำหนดส่วนประกอบโครงสร้างห้องคลีนรูม



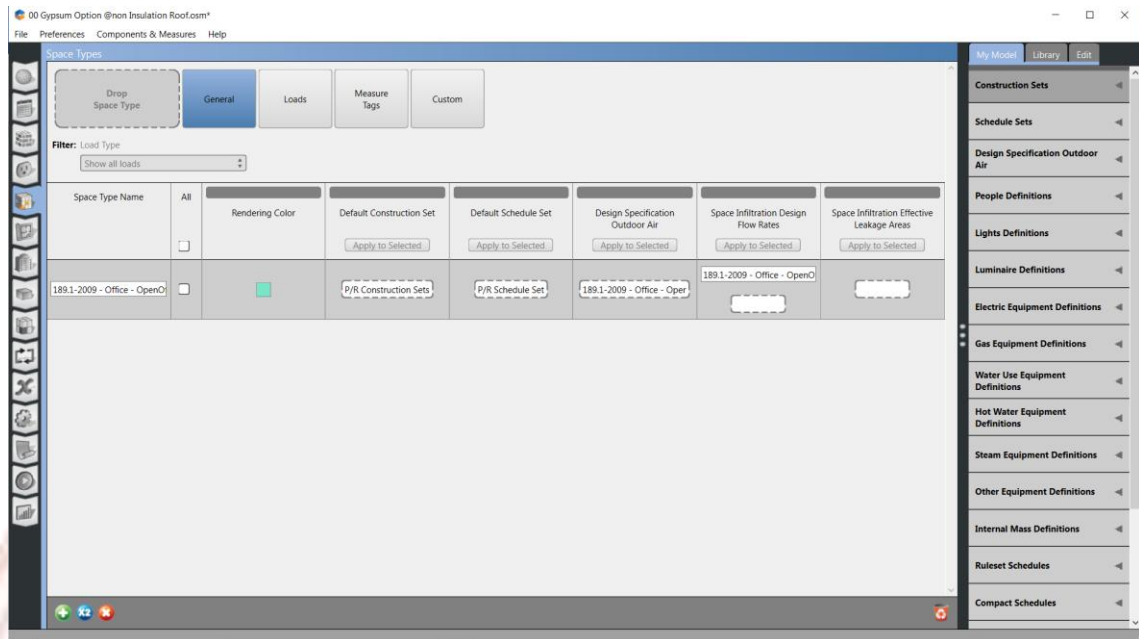
รูป ก-6 การกำหนดชุดประกอบโครงสร้างห้องคลีนรูม



รูป ก-7 การกำหนดภาระโหลดของห้องคลีนรูม



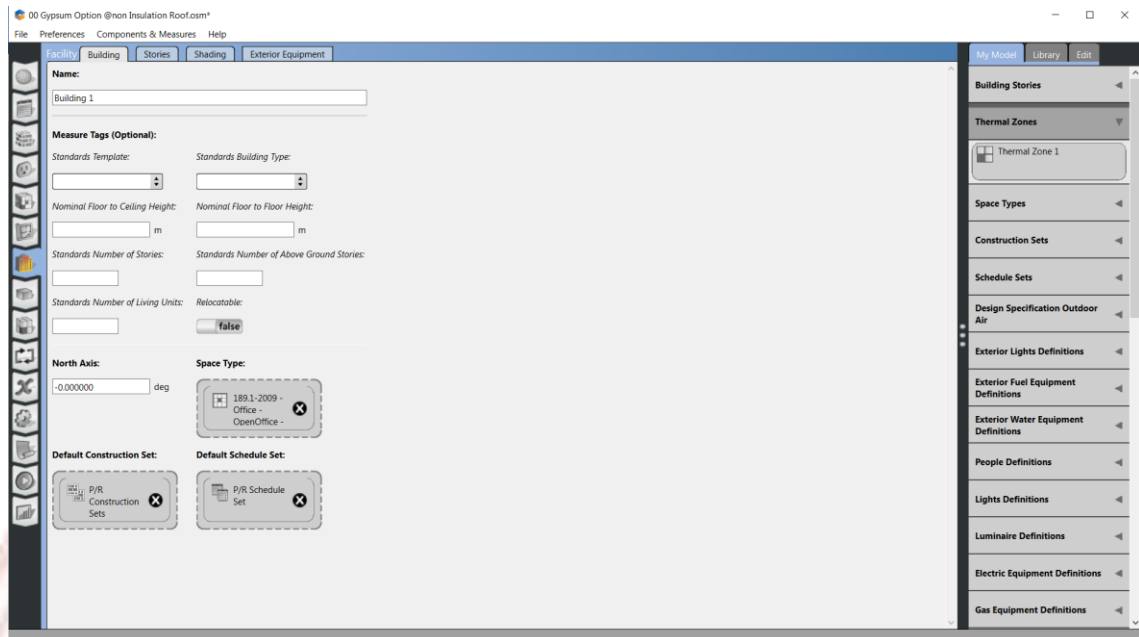
รูป ก-8 การแสดงภาระโหลดของห้องคลีนรูม



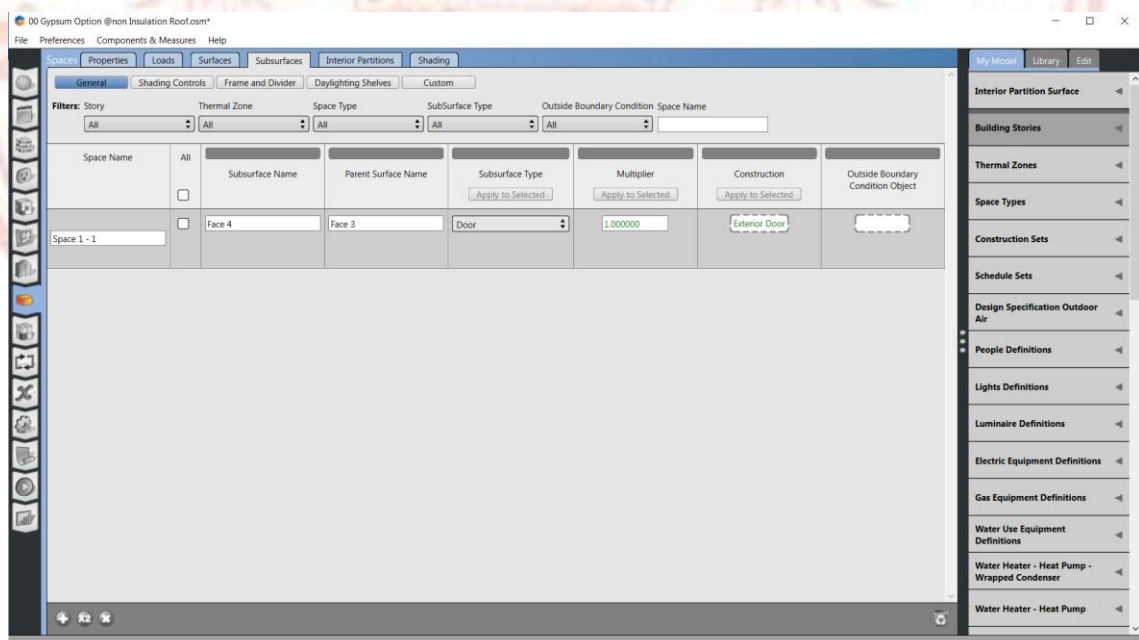
รูป ก-9 การแสดงภาระโหลดของห้องคลินิก



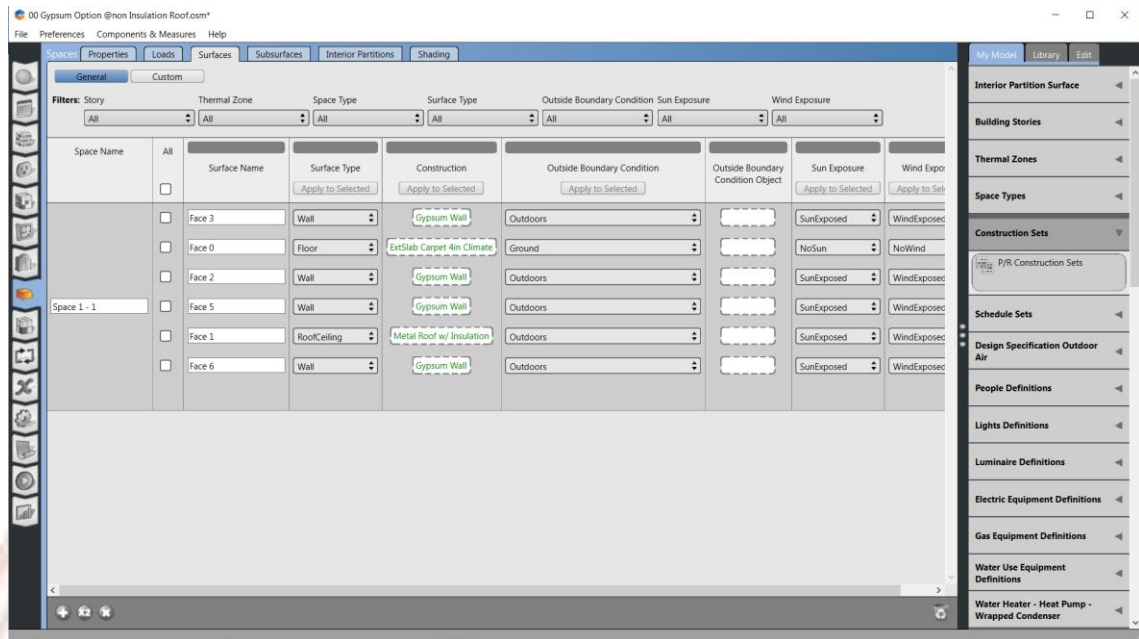
รูป ก-10 การแสดงภาพการจำลองห้องคลินิก



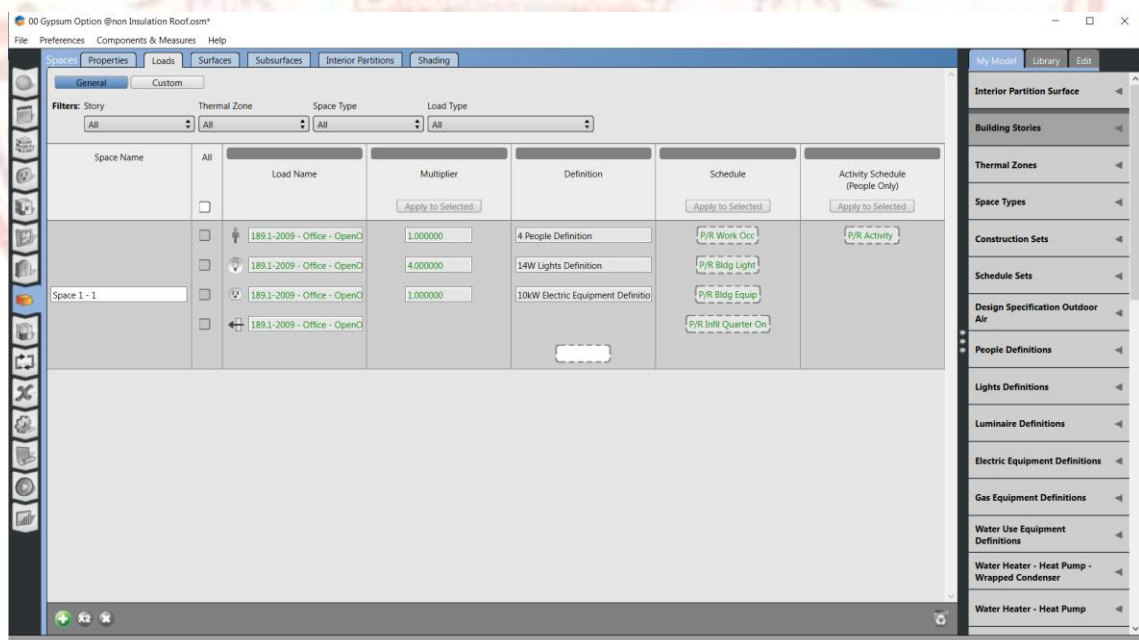
รูป ก-11 การกำหนดชื่ออาคาร



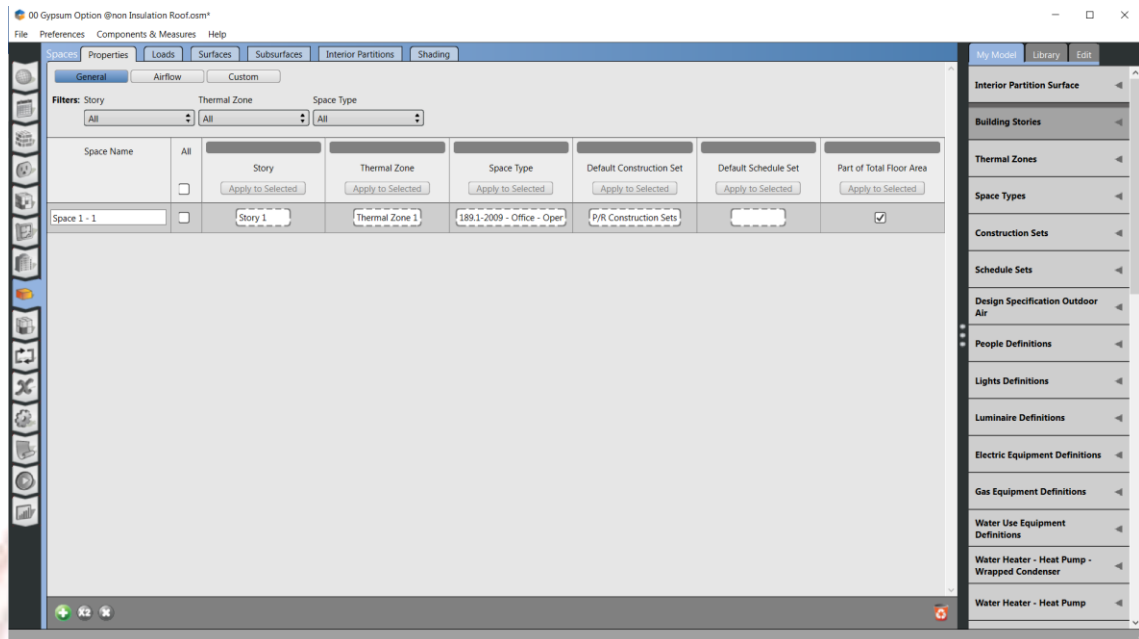
รูป ก-12 การกำหนด space name ของโครงการ



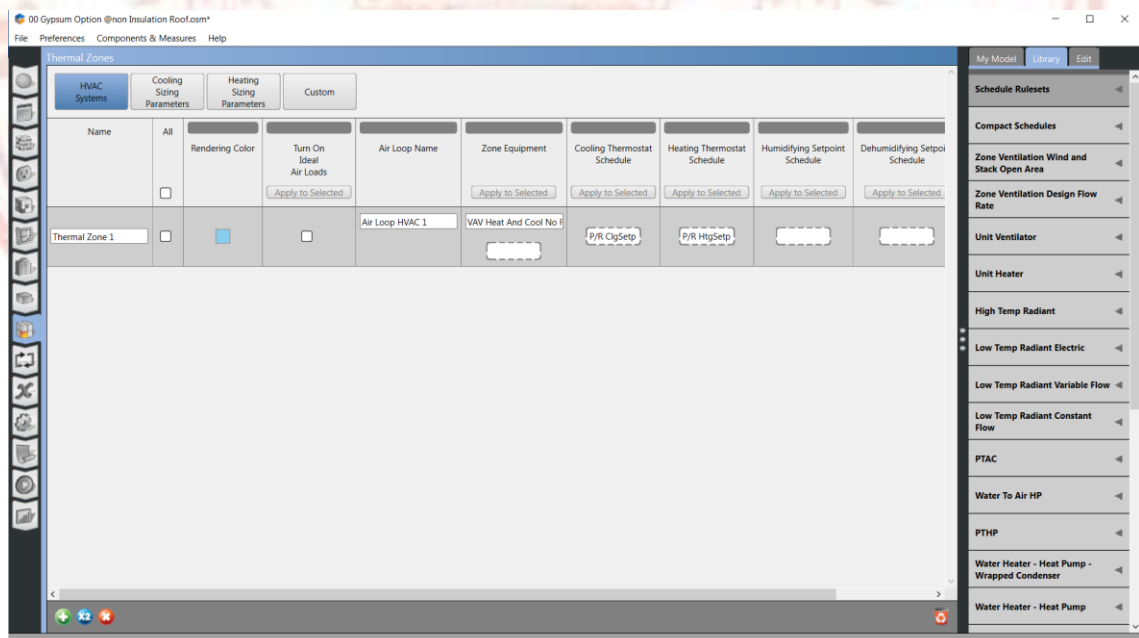
รูป ก-13 การกำหนด surface name ของโครงการ



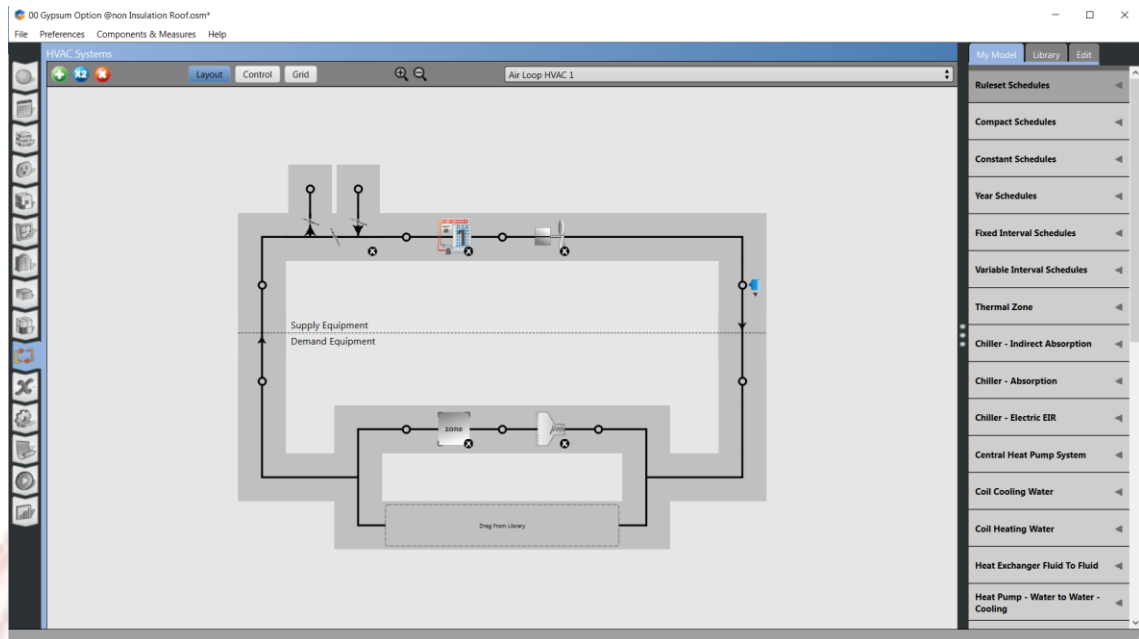
รูป ก-14 การแสดงพิกัดโหลดของโครงการ



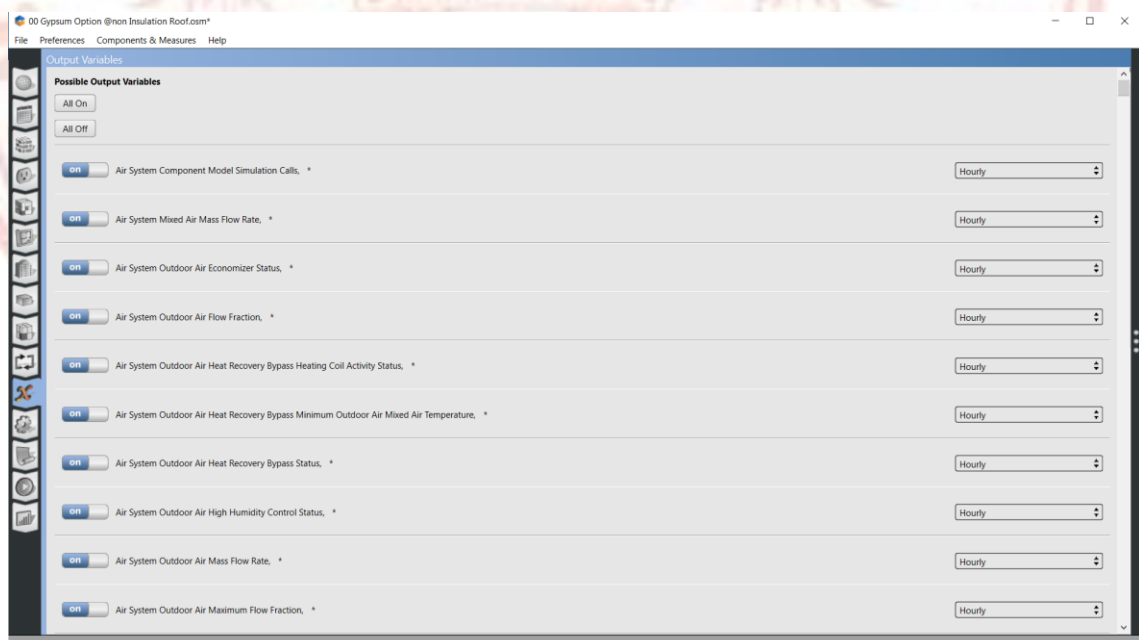
รูป ก-15 การแสดงองค์ประกอบ space ของโครงการ



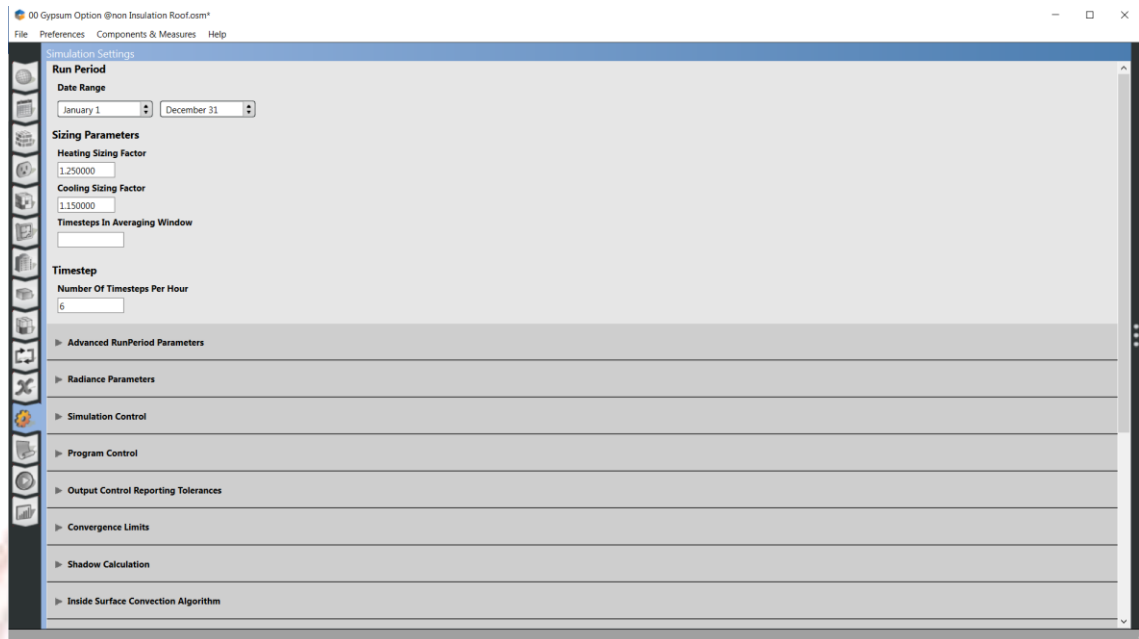
รูป ก-16 การแสดง Thermal Zone ของโครงการ



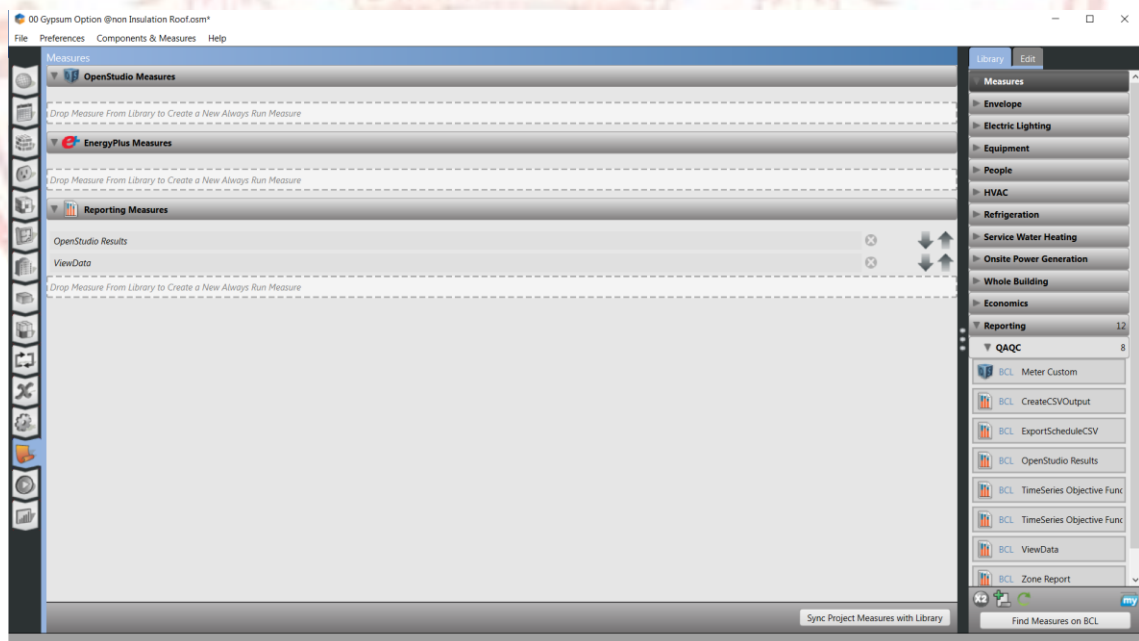
รูป ก-17 การแสดง Air Loop HVAC ของโครงการ



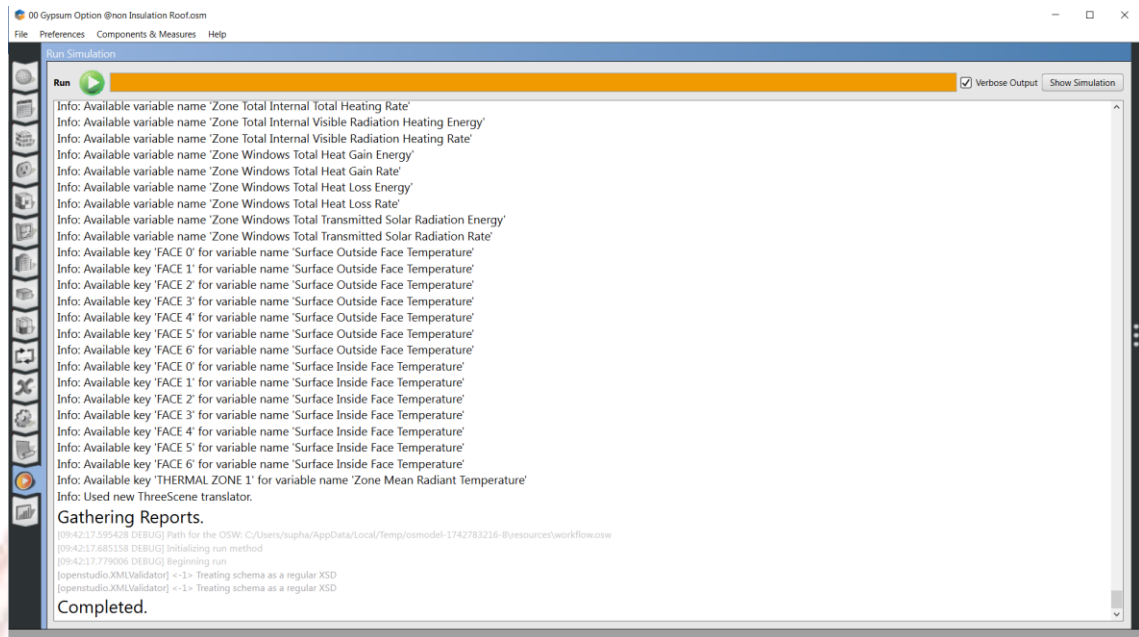
รูป ก-18 การแสดงการเลือกค่า Output ของโครงการ



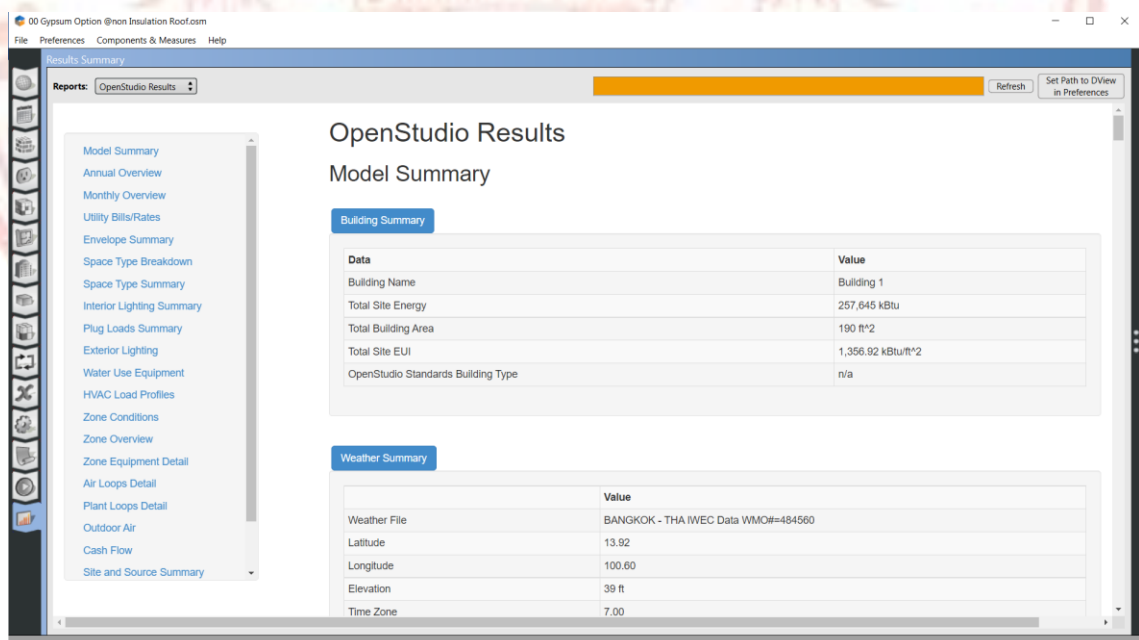
รูป ก-19 การแสดงระยะเวลาของโครงการ



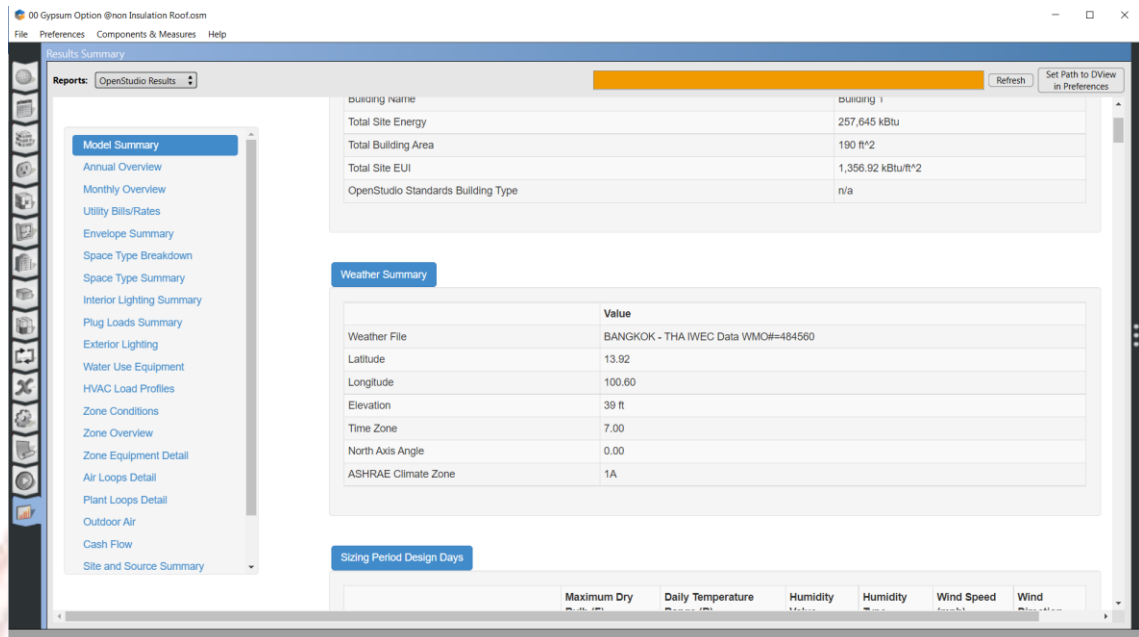
รูป ก-20 การแสดงการเลือก Reporting ของโครงการ



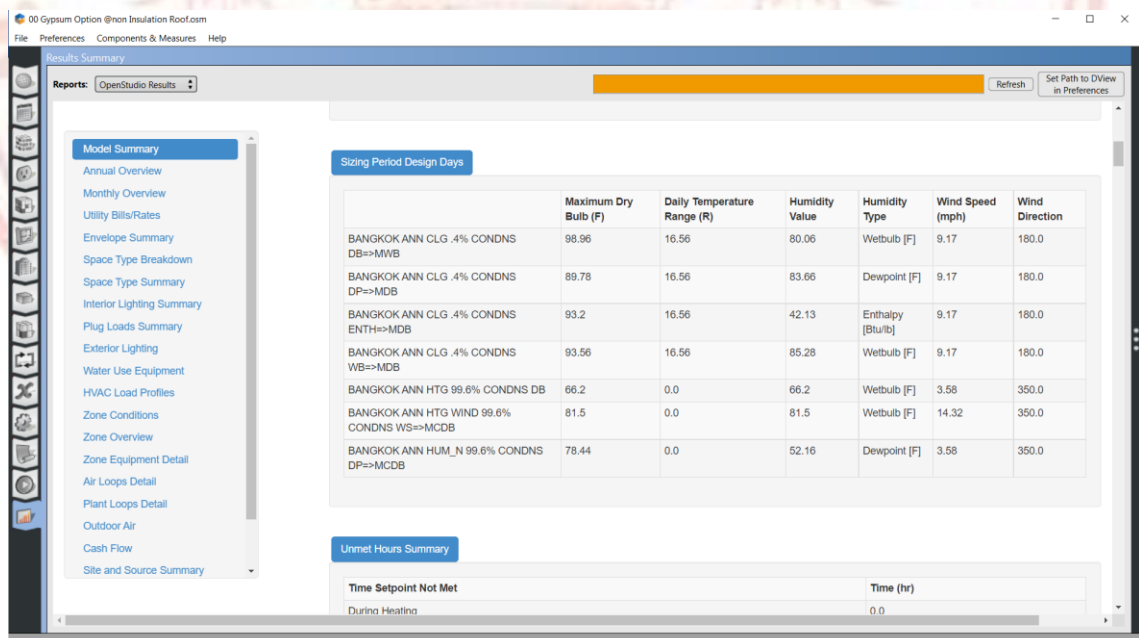
รูป ก-21 การแสดงการ Run โปรแกรม



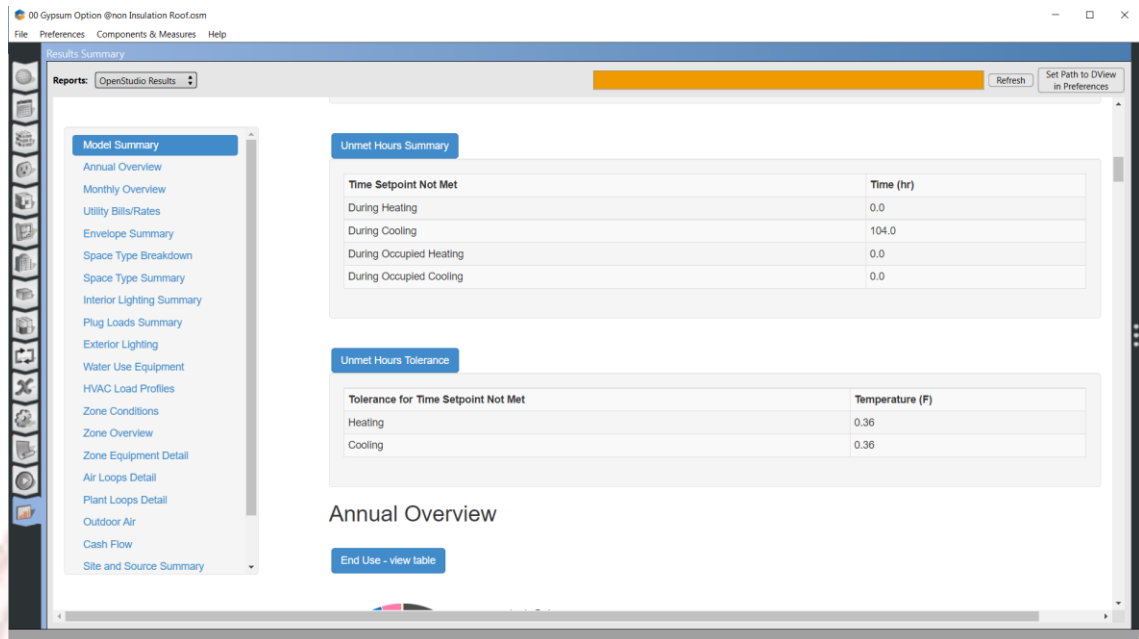
รูป ก-22 การแสดงค่า Results โปรแกรม 1



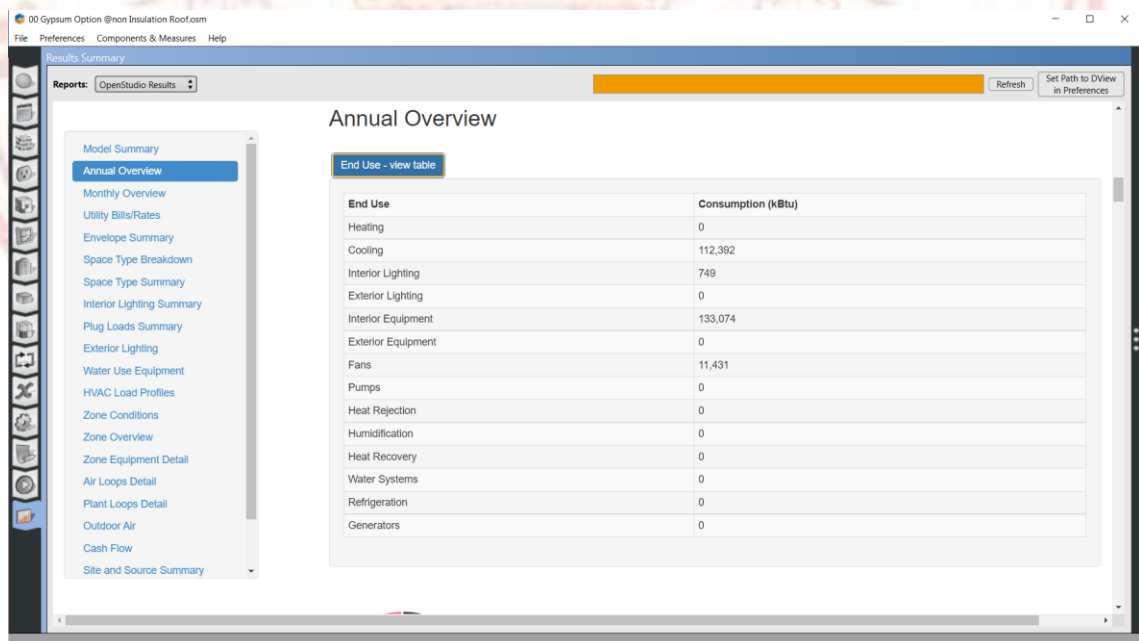
รูป ก-23 การแสดงค่า Results โปรแกรม 2



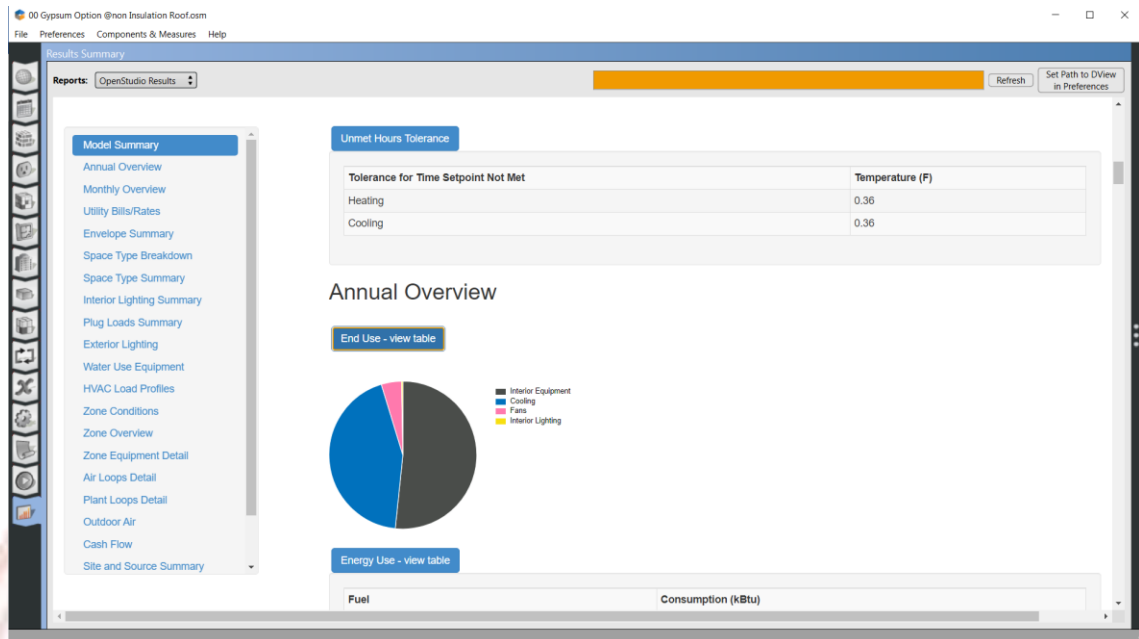
รูป ก-24 การแสดงค่า Results โปรแกรม 3



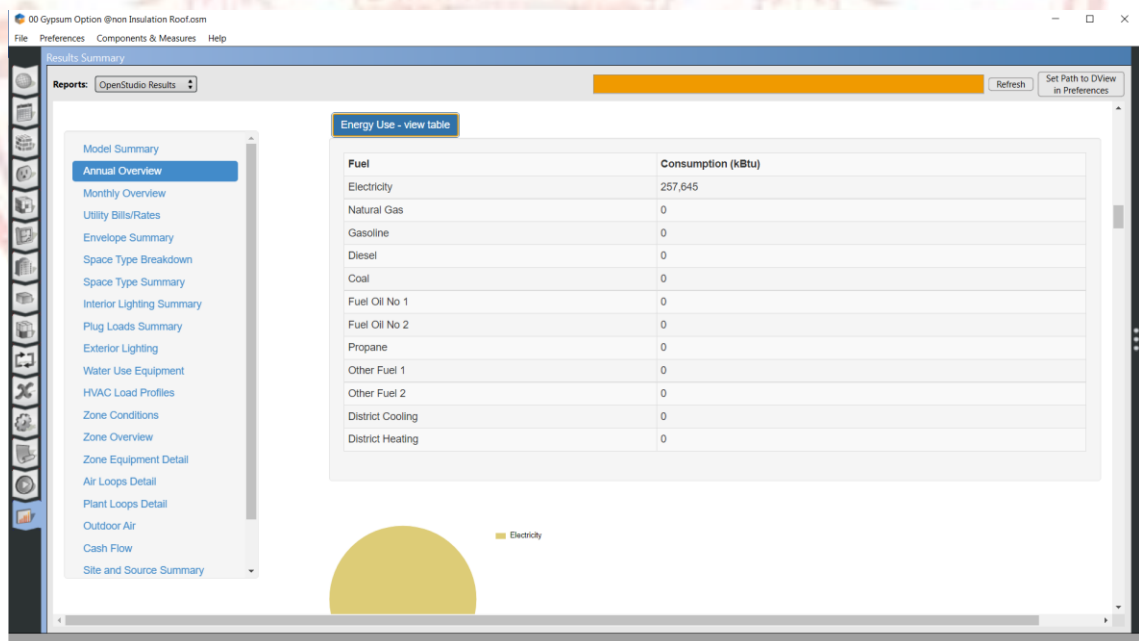
รูป ก-25 การแสดงค่า Results โปรแกรม 4



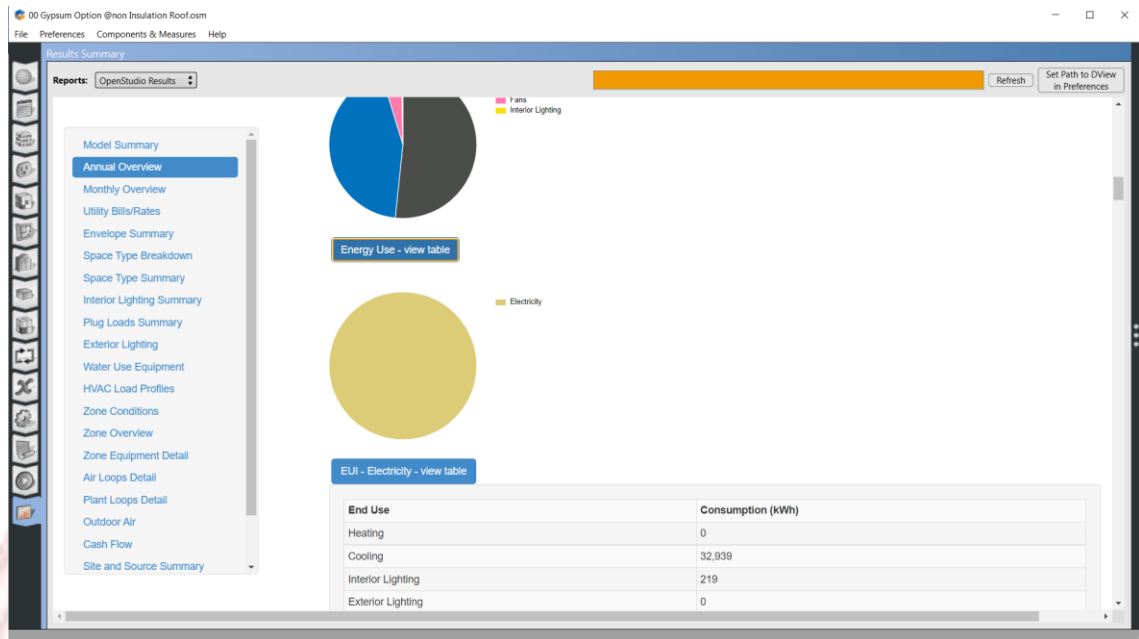
รูป ก-26 การแสดงค่า Results โปรแกรม 5



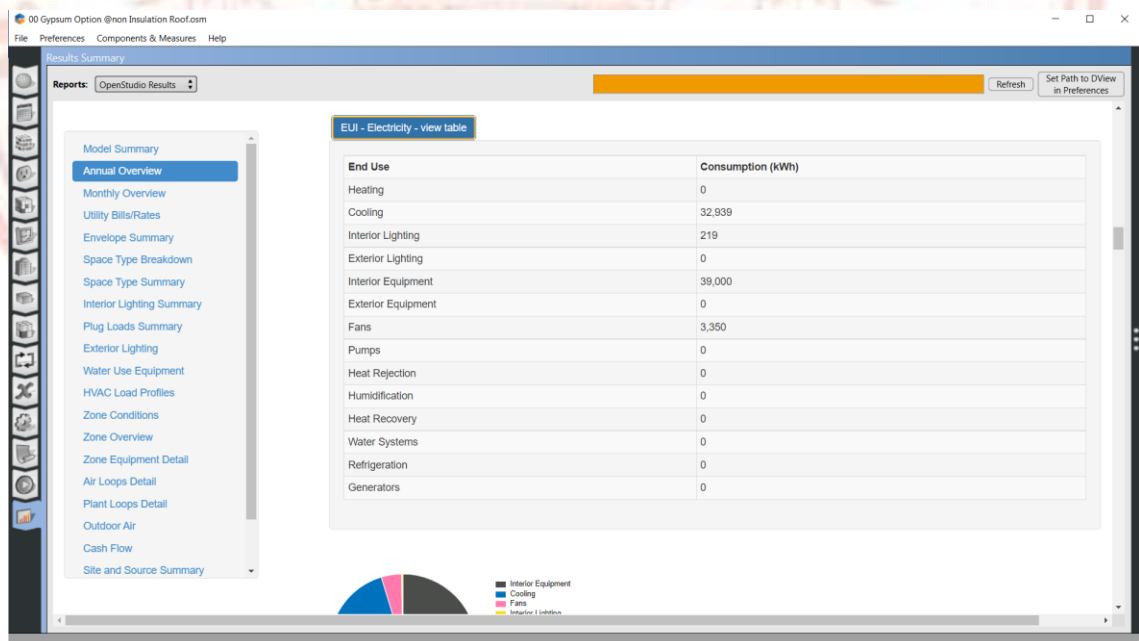
รูป ก-27 การแสดงค่า Results โปรแกรม 6



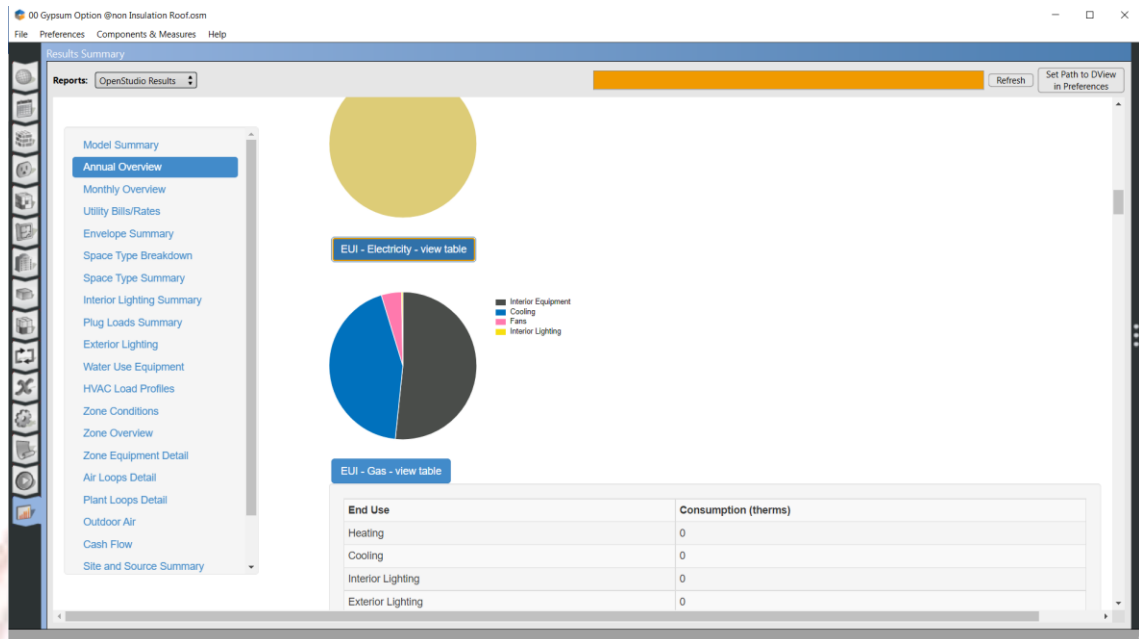
รูป ก-28 การแสดงค่า Results โปรแกรม 7



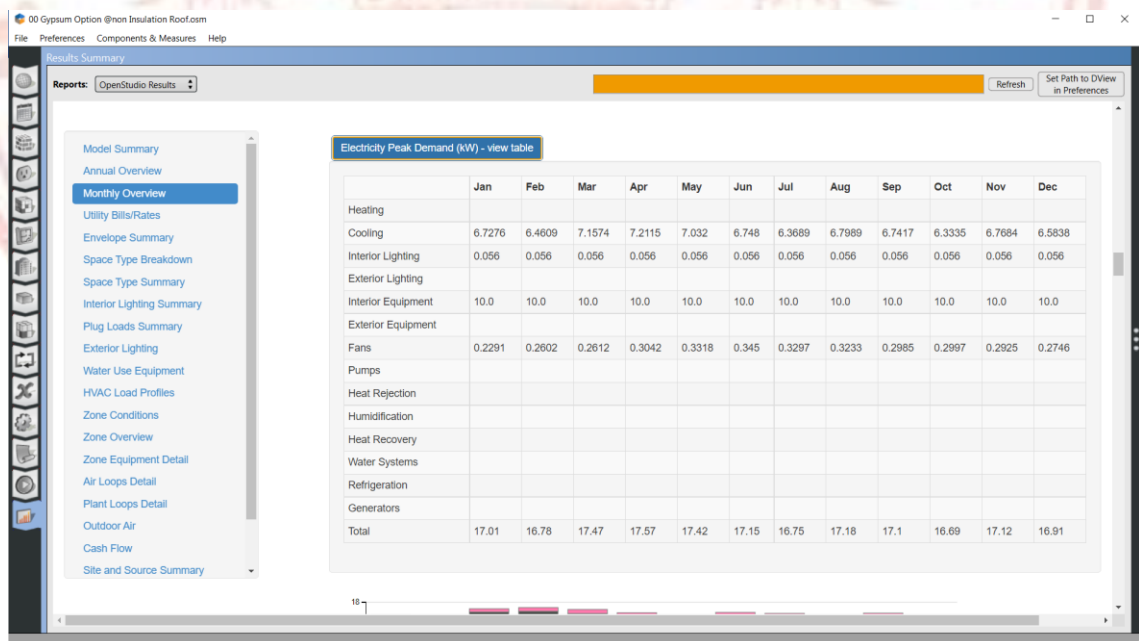
รูป ก-29 การแสดงค่า Results โปรแกรม 8



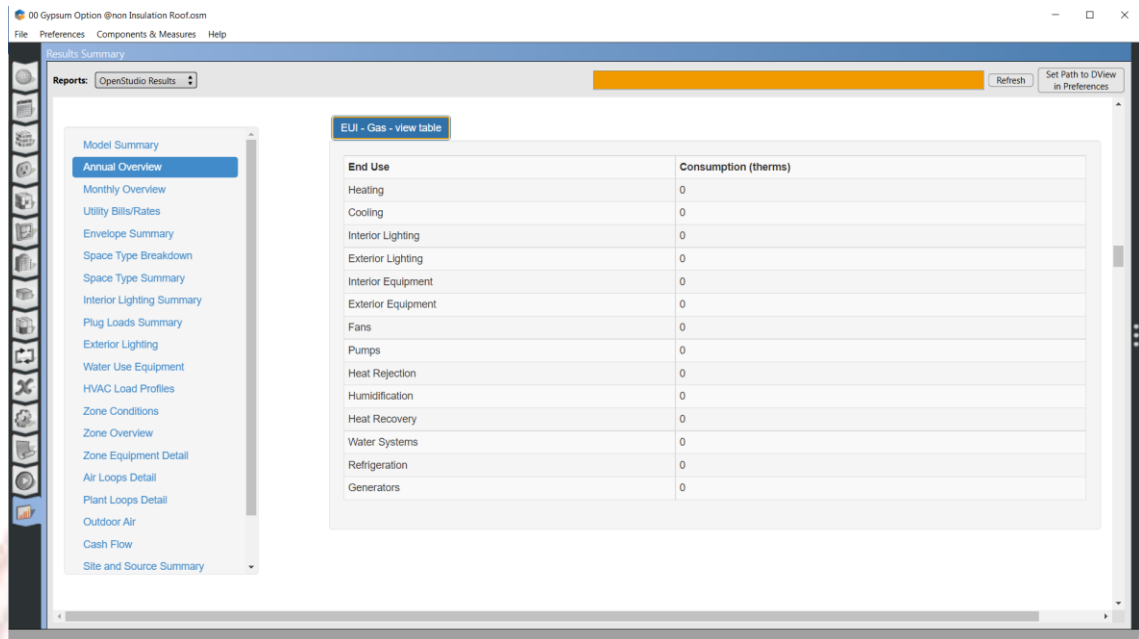
รูป ก-30 การแสดงค่า Results โปรแกรม 9



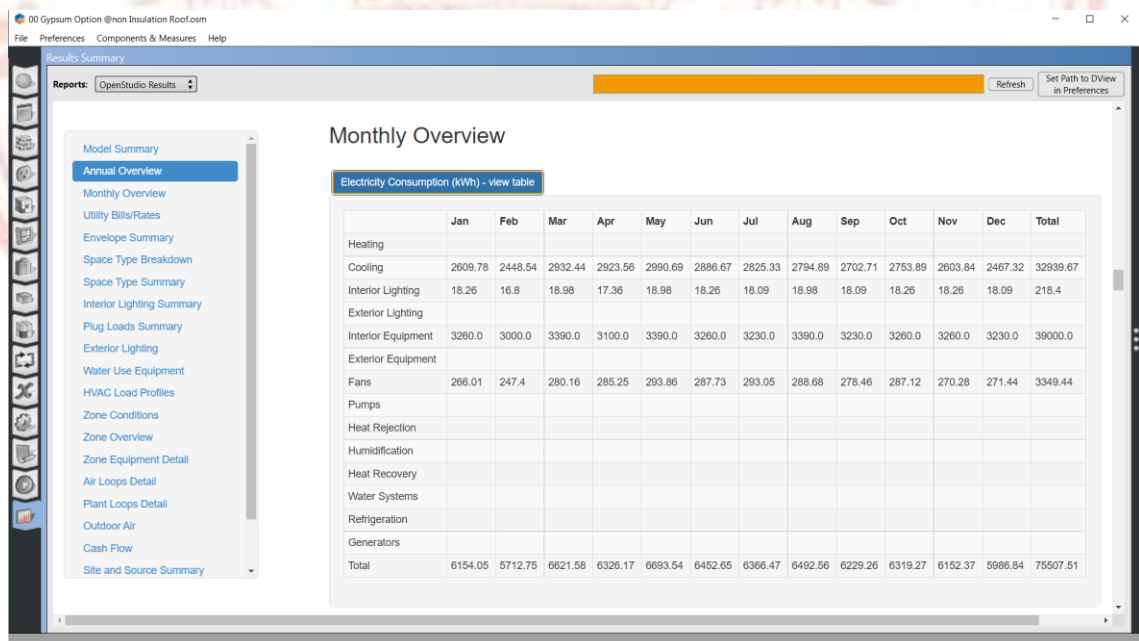
รูป ก-31 การแสดงค่า Results โปรแกรม 10



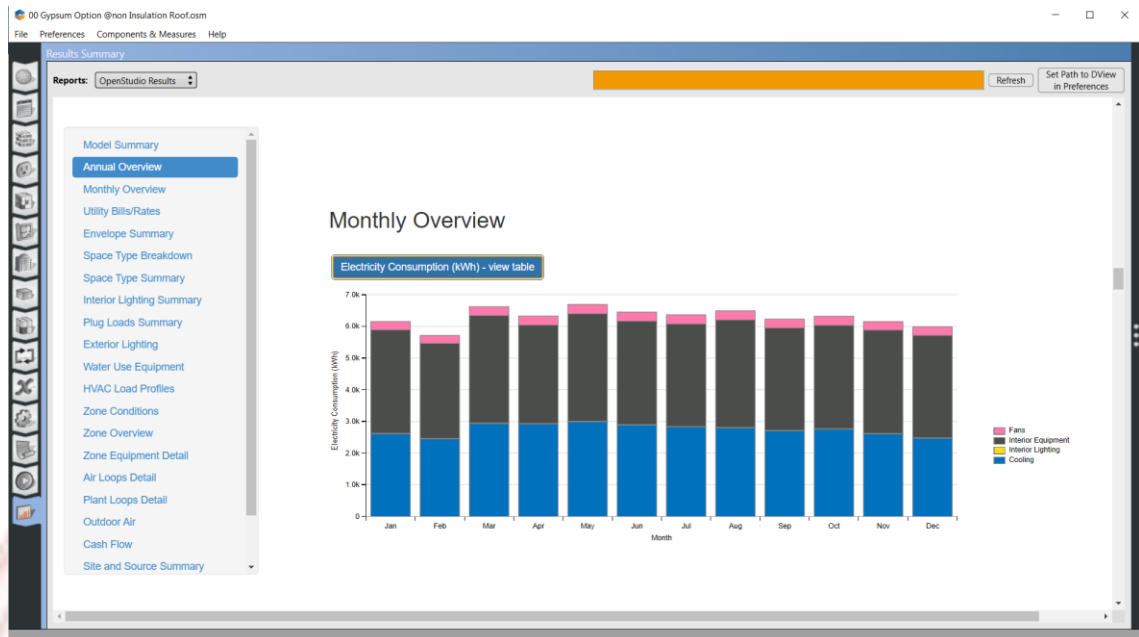
รูป ก-32 การแสดงค่า Results โปรแกรม 11



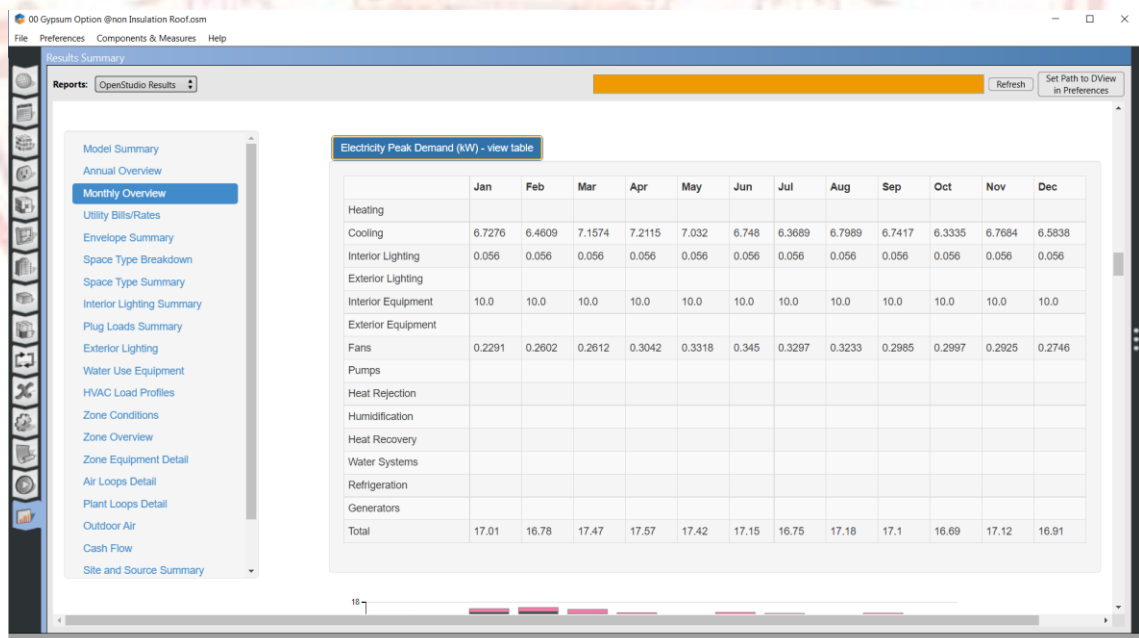
รูป ก-33 การแสดงค่า Results โปรแกรม 12



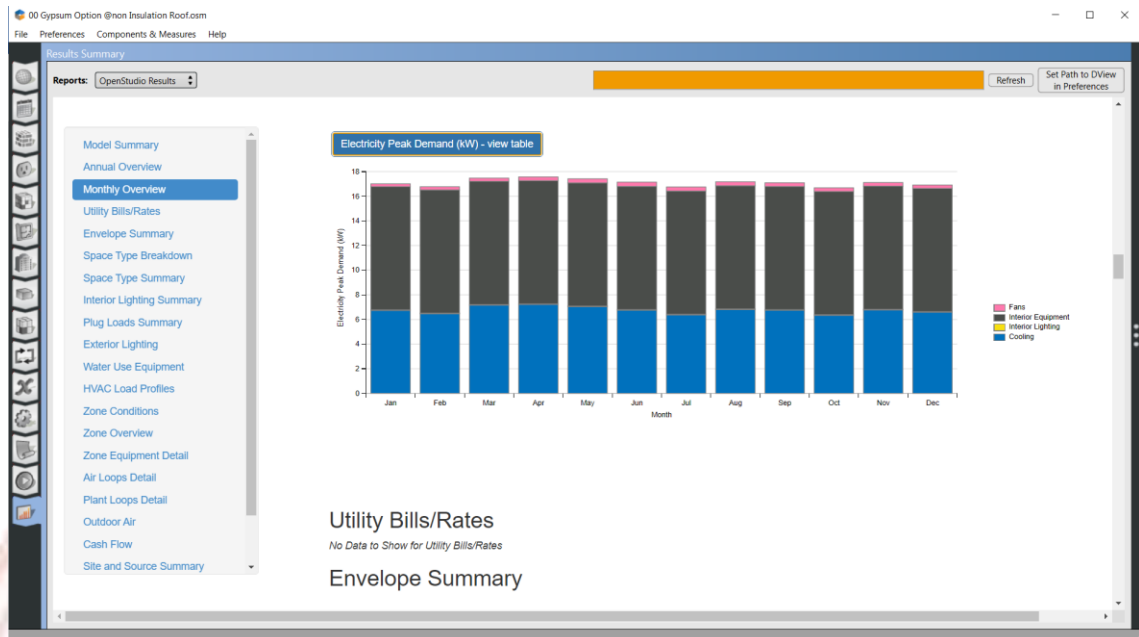
รูป ก-34 การแสดงค่า Results โปรแกรม 13



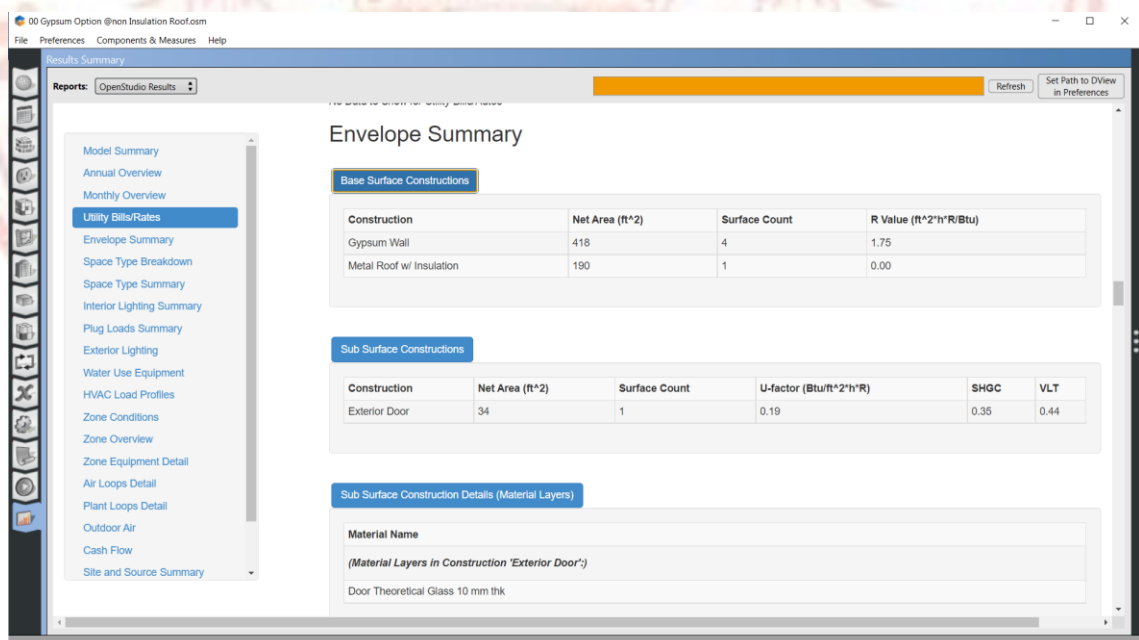
รูป ก-35 การแสดงค่า Results โปรแกรม 14



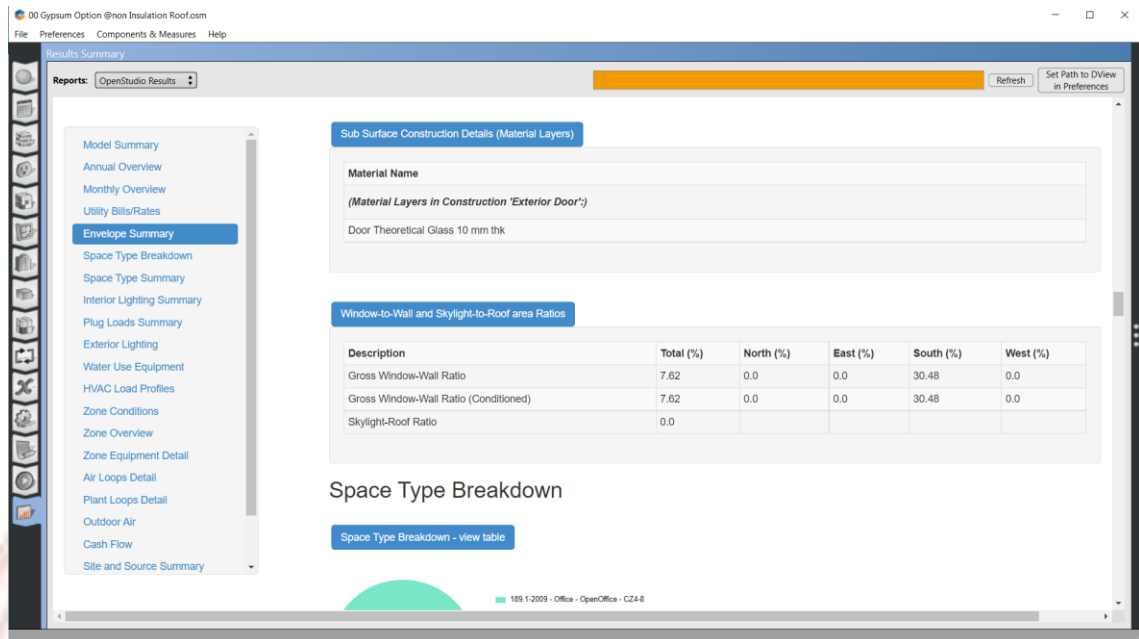
รูป ก-36 การแสดงค่า Results โปรแกรม 15



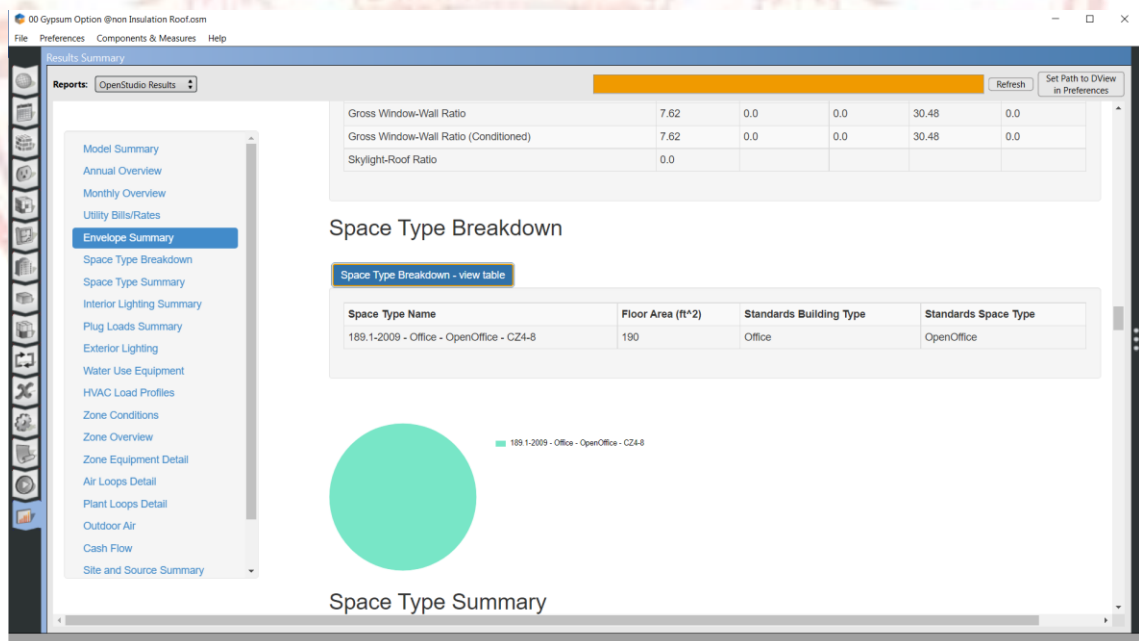
รูป ก-37 การแสดงค่า Results โปรแกรม 16



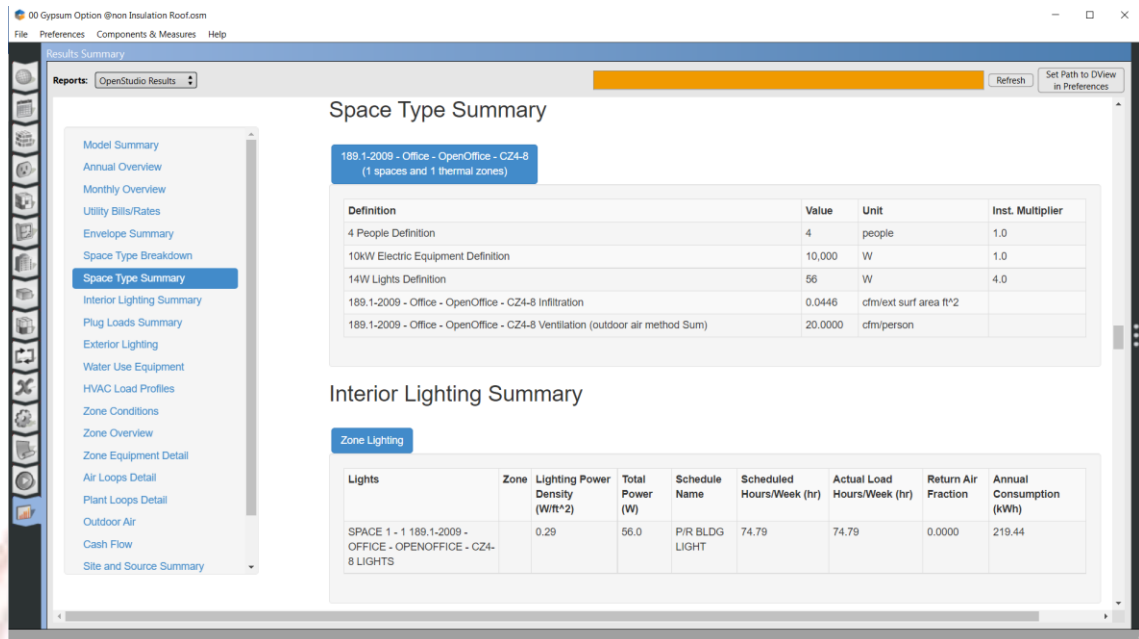
รูป ก-38 การแสดงค่า Results โปรแกรม 17



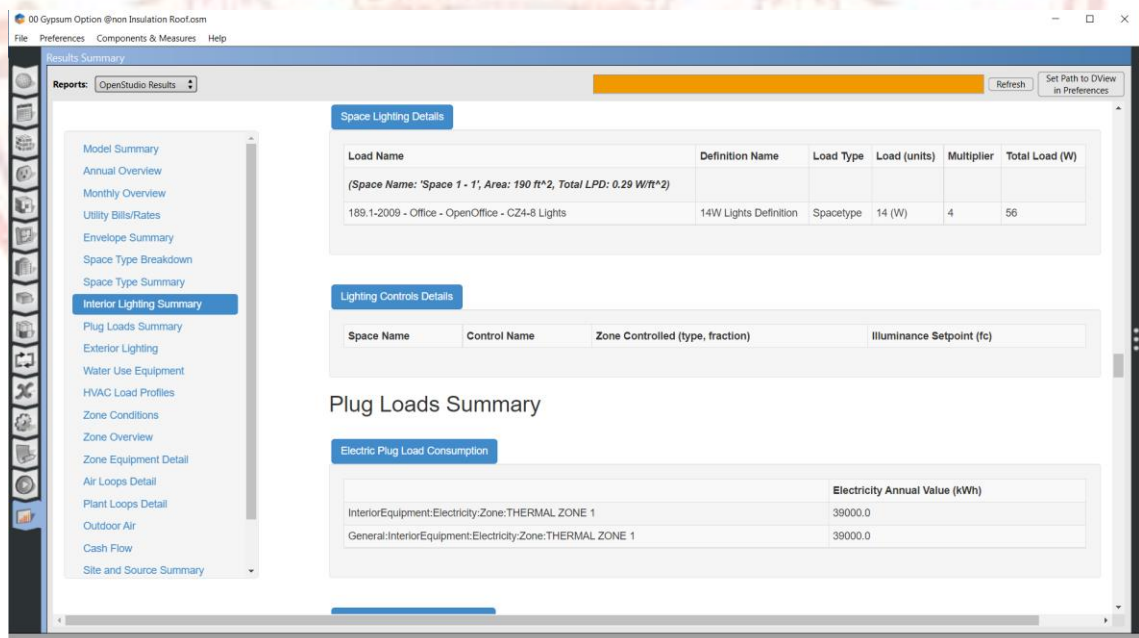
รูป ก-39 การแสดงค่า Results โปรแกรม 18



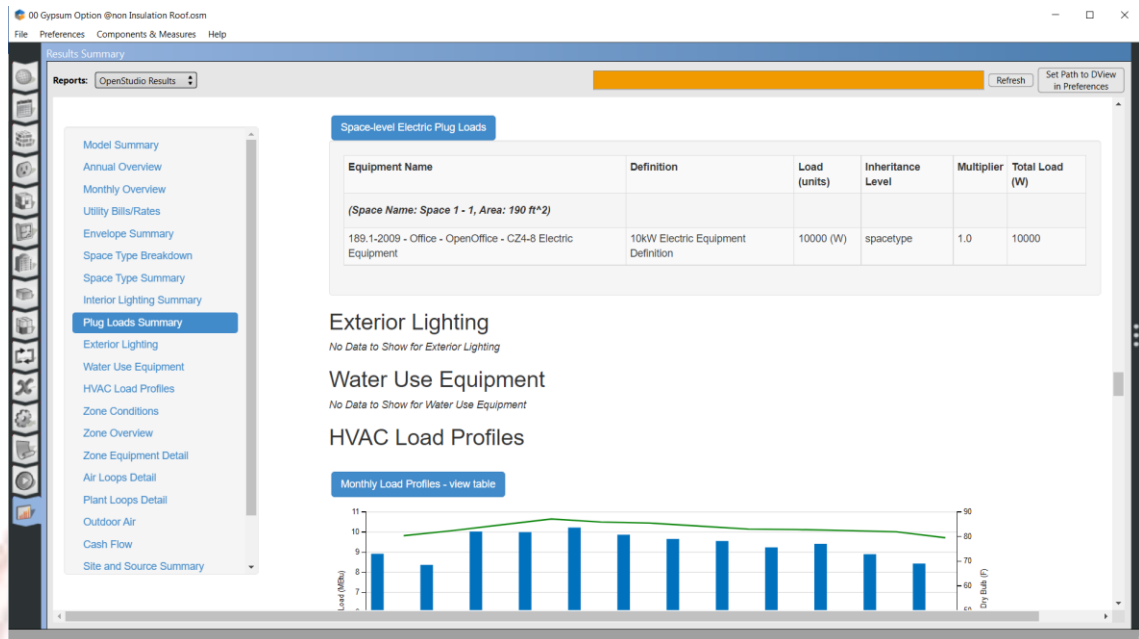
รูป ก-40 การแสดงค่า Results โปรแกรม 19



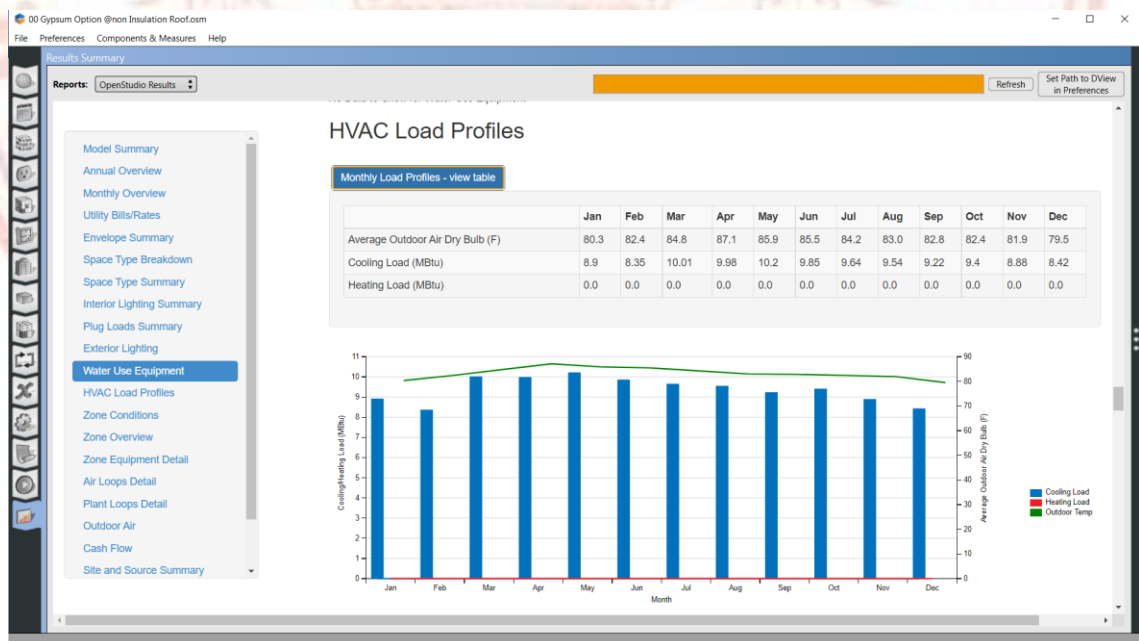
รูป ก-41 การแสดงค่า Results โปรแกรม 20



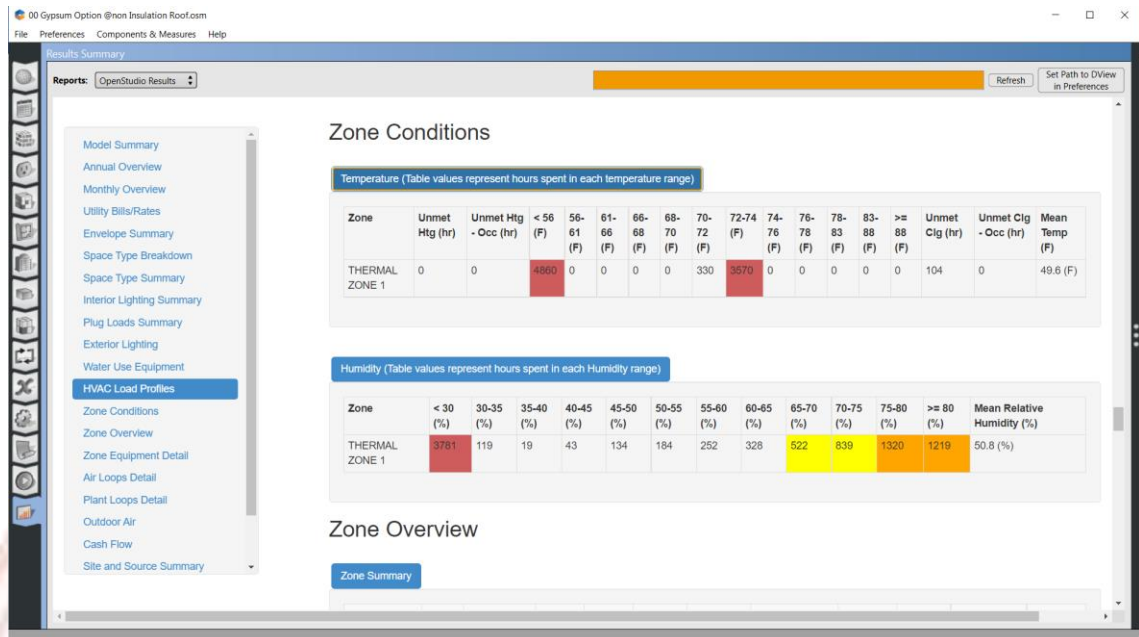
รูป ก-42 การแสดงค่า Results โปรแกรม 21



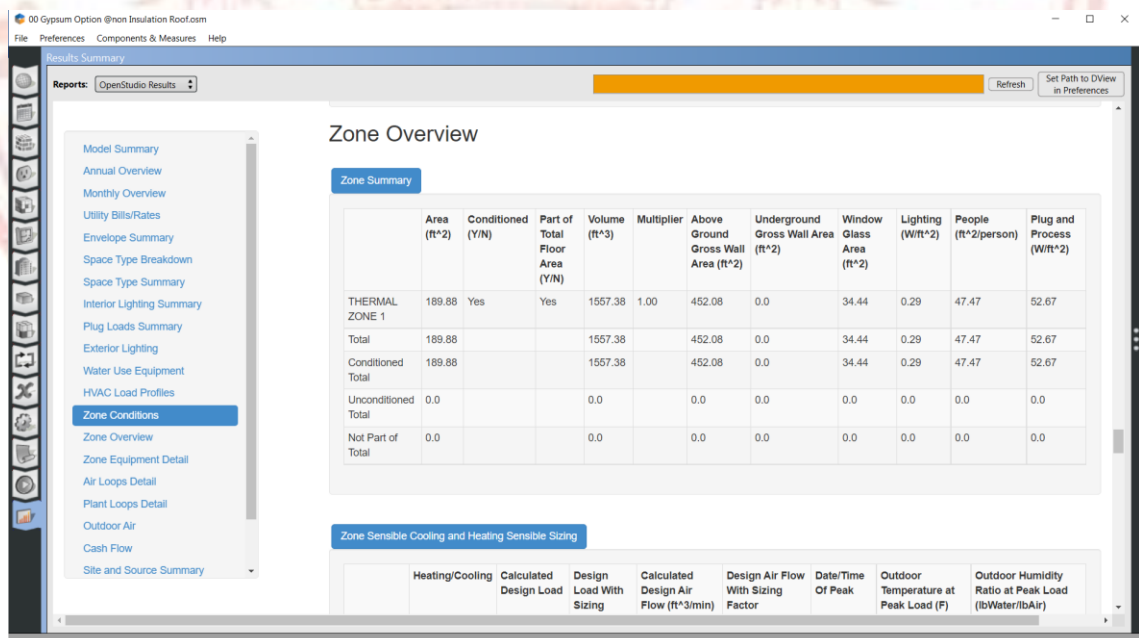
รูป ก-43 การแสดงค่า Results โปรแกรม 22



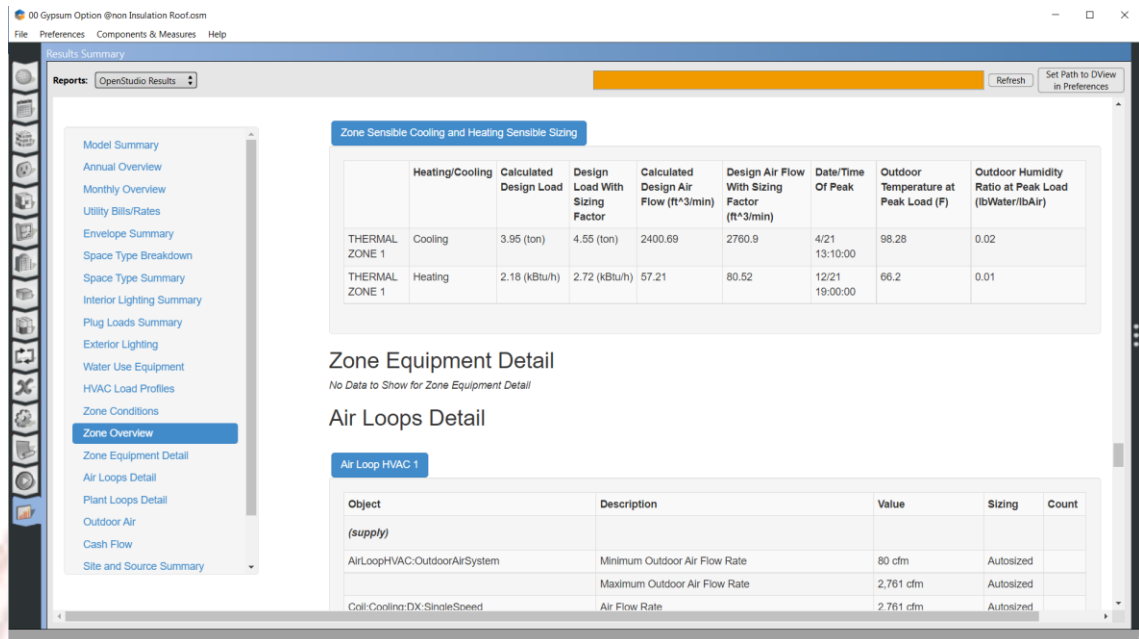
รูป ก-44 การแสดงค่า Results โปรแกรม 23



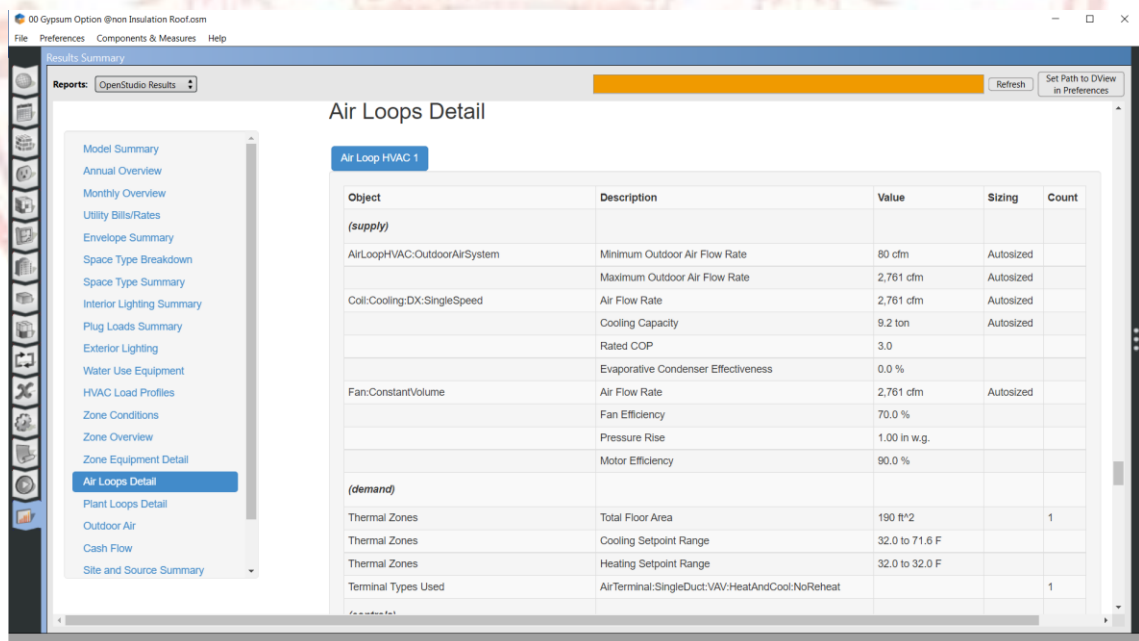
รูป ก-45 การแสดงค่า Results โปรแกรม 24



รูป ก-46 การแสดงค่า Results โปรแกรม 25



รูป ก-47 การแสดงค่า Results โปรแกรม 26



รูป ก-48 การแสดงค่า Results โปรแกรม 27

00 Gypsum Option @non Insulation Roof.com

File Preferences Components & Measures Help

Results Summary

Reports: OpenStudio Results

Model Summary
Annual Overview
Monthly Overview
Utility Bills/Rates
Envelope Summary
Space Type Breakdown
Space Type Summary
Interior Lighting Summary
Plug Loads Summary
Exterior Lighting
Water Use Equipment
HVAC Load Profiles
Zone Conditions
Zone Overview
Zone Equipment Detail
Air Loops Detail
Plant Loops Detail
Outdoor Air
Cash Flow
Site and Source Summary

Fan: Constant Volume		Utility Capacity	0.4 kW	Refresh	Set Path to DView in Preferences
	Rated COP		3.0		
	Evaporative Condenser Effectiveness		0.0 %		
	Air Flow Rate	2,761 cfm	Autosized		
	Fan Efficiency	70.0 %			
	Pressure Rise	1.00 in w.g.			
	Motor Efficiency	90.0 %			
(demand)					
Thermal Zones	Total Floor Area	190 ft²	1		
Thermal Zones	Cooling Setpoint Range	32.0 to 71.6 F			
Thermal Zones	Heating Setpoint Range	32.0 to 32.0 F			
Terminal Types Used	AirTerminal:SingleDuct:VAV:HeatAndCool:NoReheat		1		
(controls)					
HVAC Operation Schedule		Always On Discrete			
Night Cycle Setting		StayOff			
Economizer Setting		NoEconomizer			
Demand Controlled Ventilation Status		Off			
Central Heating Design Supply Air Temperature		62.1 F			
Central Cooling Design Supply Air Temperature		55.0 F			
Load to Size On		Sensible			

รูป ก-49 การแสดงค่า Results โปรแกรม 28

00 Gypsum Option @non Insulation Roof.com

File Preferences Components & Measures Help

Results Summary

Reports: OpenStudio Results

Model Summary
Annual Overview
Monthly Overview
Utility Bills/Rates
Envelope Summary
Space Type Breakdown
Space Type Summary
Interior Lighting Summary
Plug Loads Summary
Exterior Lighting
Water Use Equipment
HVAC Load Profiles
Zone Conditions
Zone Overview
Zone Equipment Detail
Air Loops Detail
Plant Loops Detail
Outdoor Air
Cash Flow
Site and Source Summary

Plant Loops Detail

No Data to Show for Plant Loops Detail

Outdoor Air

Average and Minimum Outdoor Air During Occupied Hours

	Average Number of Occupants	Nominal Number of Occupants	Zone Volume (ft³)	Avg. Mechanical Ventilation (ach)	Min. Mechanical Ventilation (ach)	Avg. Infiltration (ach)	Min. Infiltration (ach)	Avg. Simple Ventilation (ach)	Min. Simple Ventilation (ach)
THERMAL ZONE 1	3.96	4.0	1557	3.125	0.0	1.038	0.015	0.0	0.0

Cash Flow

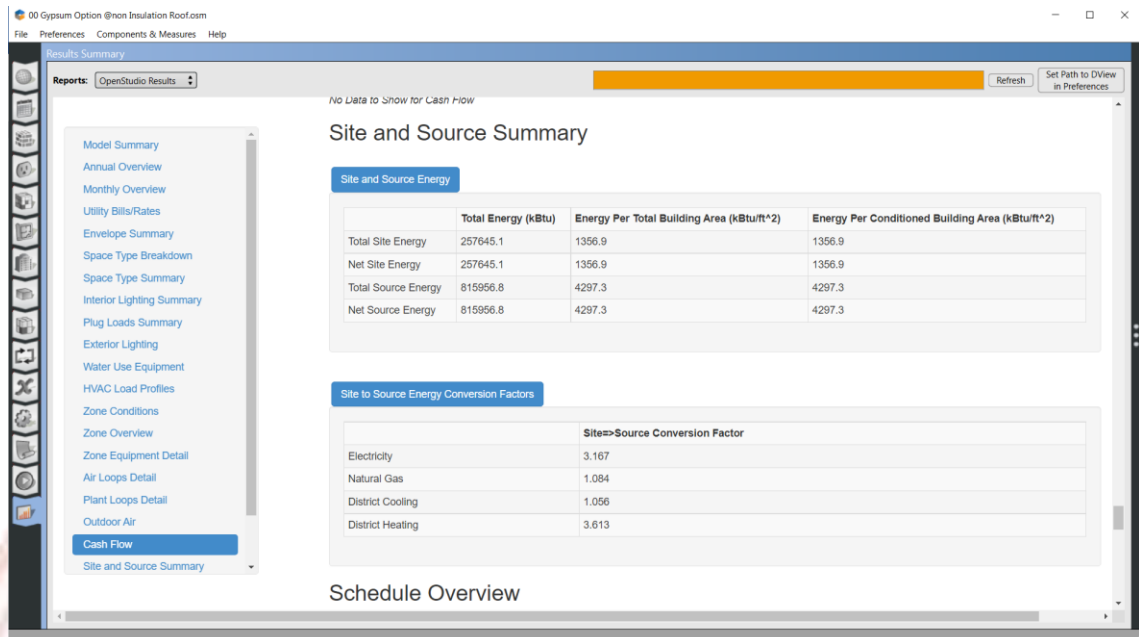
No Data to Show for Cash Flow

Site and Source Summary

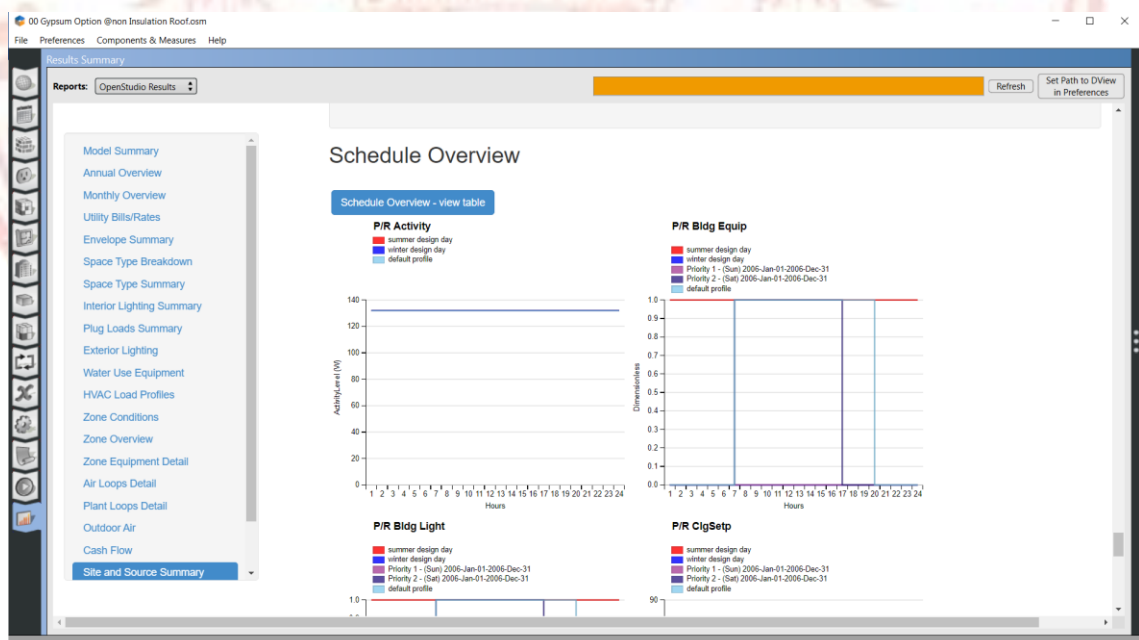
Site and Source Energy

	Total Energy (kBtu)	Energy Per Total Building Area (kBtu/ft²)	Energy Per Conditioned Building Area (kBtu/ft²)
Total Site Energy	257645.1	1356.9	1356.9

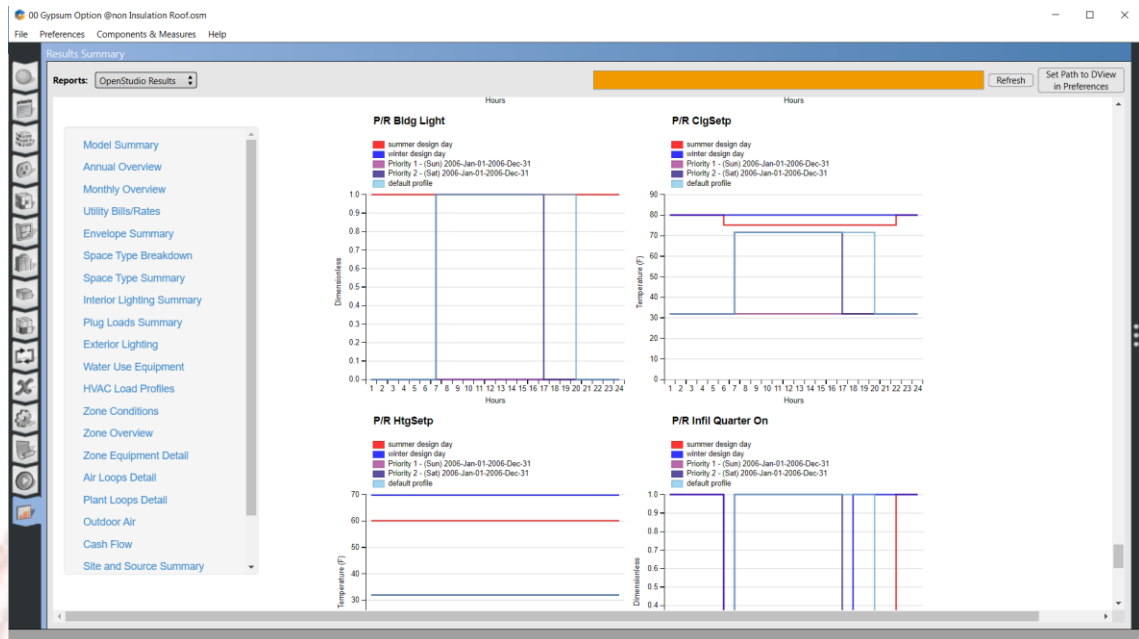
รูป ก-50 การแสดงค่า Results โปรแกรม 29



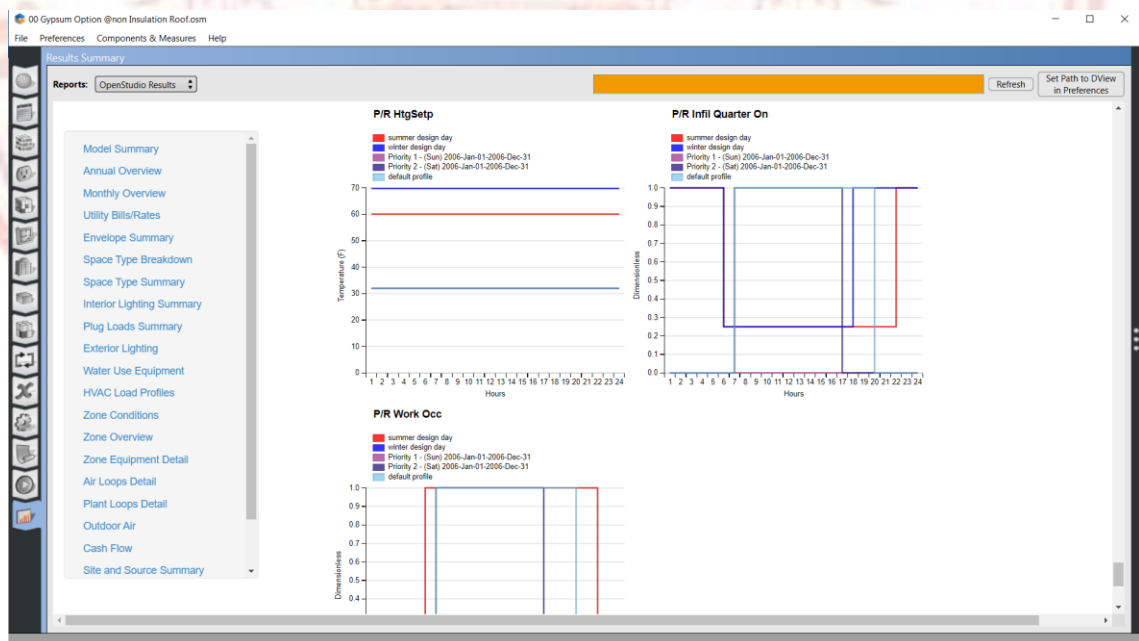
รูป ก-51 การแสดงค่า Results โปรแกรม 30



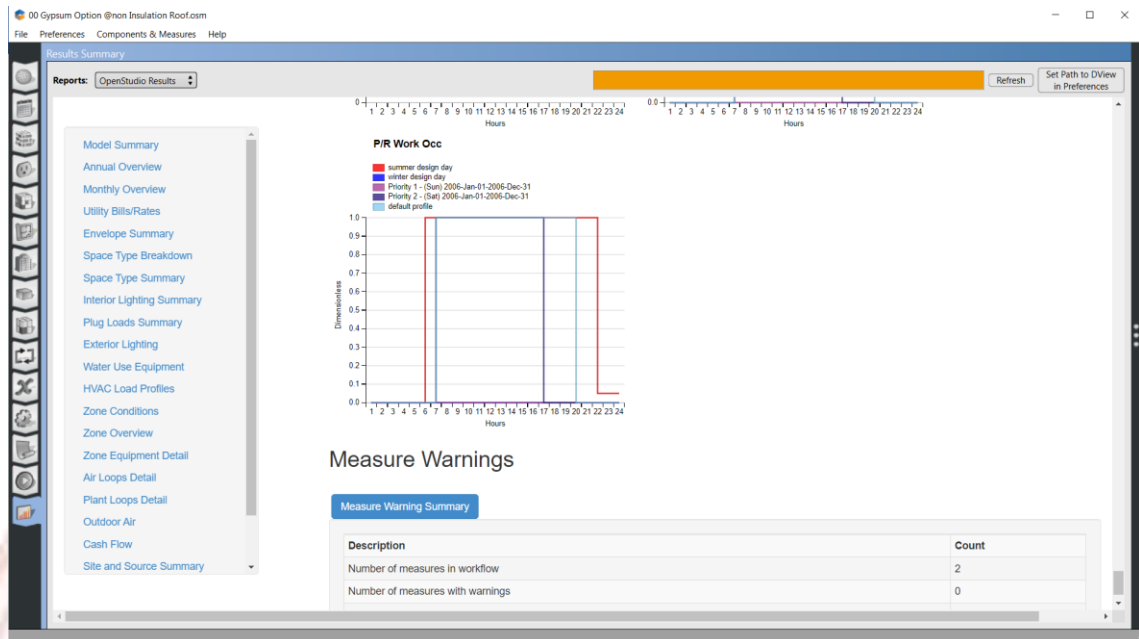
รูป ก-52 การแสดงค่า Results โปรแกรม 31



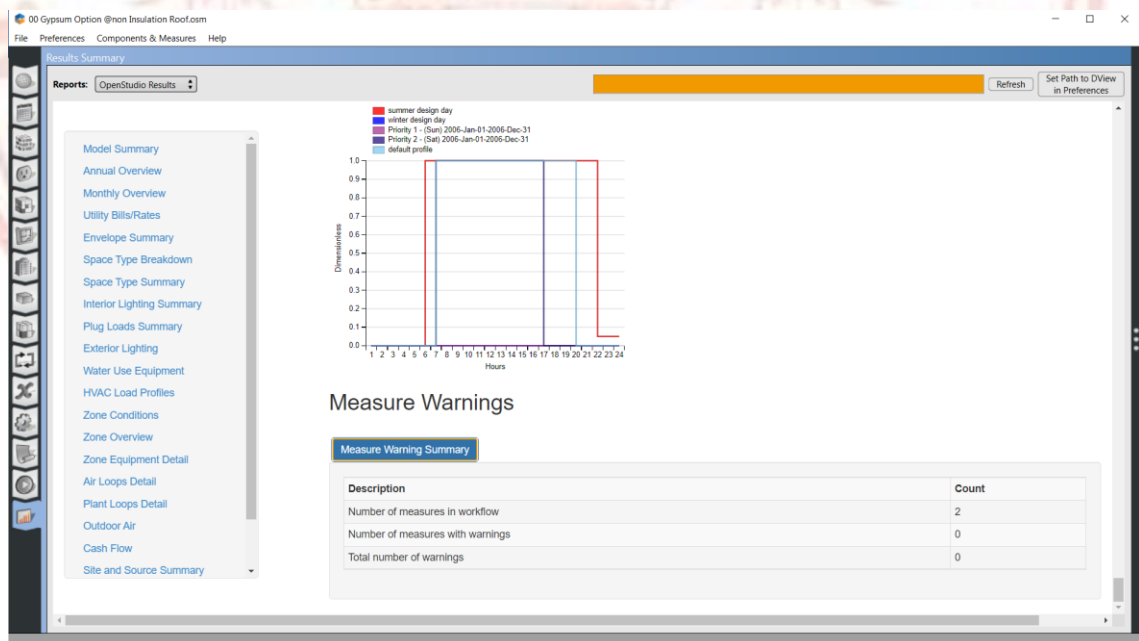
รูป ก-53 การแสดงค่า Results โปรแกรม 32



รูป ก-54 การแสดงค่า Results โปรแกรม 33



รูป ก-55 การแสดงค่า Results โปรแกรม 34



รูป ก-56 การแสดงค่า Results โปรแกรม 35

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายศุภชัย วรเลิศ
ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเชิงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานก่อนและหลังการปรับปรุงห้องคลีนรูมสำหรับการผลิตยาแผนปัจจุบัน
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน
ประวัติ	ข้าพเจ้า นายศุภชัย วรเลิศ เกิดเมื่อ วันที่ 26 มกราคม พ.ศ. 2521 ประวัติการศึกษา ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาช่างไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคนครสวรรค์ ปีการศึกษา 2539, ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคนครสวรรค์ ปีการศึกษา 2541, ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปีการศึกษา 2549 และ ระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2568 ประวัติการทำงาน ตำแหน่ง กรรมการผู้จัดการ บริษัท สุขสี ชัมเมชั่น เอ็นจิเนียริง จำกัด ปี 2553 ถึง ปัจจุบัน และ ตำแหน่ง กรรมการผู้จัดการ บริษัท สุขสี เอ็นจิเนียริง อิมพอร์ต แอนด์ เอ็กซ์พอร์ต จำกัด ปี 2564 ถึง ปัจจุบัน