

เจนเนทีฟดีไซน์เพื่อสร้างทางเลือกการออกแบบเปลือกอาคารสำนักงาน
ตามเกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานประเทศไทย

GENERATIVE DESIGN FOR CREATING OFFICE BUILDING ENVELOPE DESIGN
OPTIONS ACCORDING TO THAILAND BUILDING ENERGY CODE



ภัทรานิษฐ์ ศุภวโรภาส

PHATTRANIS SUPHAVAROPHAS

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาการออกแบบสภาพแวดล้อม

คณะสถาปัตยกรรม ศิลปะและการออกแบบ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2567

KMITL-2024-AR-D-009-037

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GENERATIVE DESIGN FOR CREATING OFFICE BUILDING ENVELOPE DESIGN
OPTIONS ACCORDING TO THAILAND BUILDING ENERGY CODE



PHATTRANIS SUPHAVAROPHAS

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTORAL OF PHILOSOPHY PROGRAM IN ENVIRONMENTAL DESIGN
SCHOOL OF ARCHITECTURE, ART, AND DESIGN
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2024

KMITL-2024-AR-D-009-037

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF ARCHITECTURE, ART, AND DESIGN

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABAN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เจเนเรทีฟดีไซน์เพื่อสร้างทางเลือกการออกแบบเปลือกอาคาร สำนักงานตามเกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานประเทศไทย
นักศึกษา	นางสาวภัทรานิษฐ์ ศุภวโรภาส
รหัสประจำตัว	65026022
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	การออกแบบสภาพแวดล้อม
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศาสตราจารย์สุพัฒน์ บุญยฤทธิ์กิจ

บทคัดย่อ

การออกแบบสถาปัตยกรรมควรให้ความสำคัญกับการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคาร ซึ่งด้วยศักยภาพของเจเนเรทีฟดีไซน์ที่สามารถสร้างทางเลือกการออกแบบอาคารโดยอัตโนมัติ เป็นการประหยัดเวลาและเพิ่มโอกาสในการค้นพบทางเลือกการออกแบบมากขึ้น จึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคาร โดยพิจารณาเปลือกอาคารหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่สามารถส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานในอาคาร และเป็นขั้นตอนช่วงต้นของการออกแบบอาคาร มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับสถาปนิกตามเกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงาน ด้วยช่องว่างทางการศึกษาเจเนเรทีฟดีไซน์ปัจจุบันยังขาดการศึกษาที่เชื่อมโยงเจเนเรทีฟดีไซน์กับการออกแบบอาคารสำนักงานตามเกณฑ์มาตรฐานพลังงานในบริบทของประเทศไทย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์คือ 1) ตรวจสอบอิทธิพลของตัวแปรระบบเปลือกอาคาร ได้แก่ การเลือกวัสดุ, การหันทิศทางและการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง ที่ส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของเปลือกอาคารและหลังคา 2) ค้นหารูปแบบการประยุกต์ใช้กฎการคูณเพื่อเจเนเรทีฟดีไซน์ด้วยวิธีพารามेटริกดีไซน์ พบมีตัวแปรระบบเปลือกอาคาร 3 กลุ่มคือ การเลือกวัสดุ, การหันทิศทาง และการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง ได้เครื่องมือโปรแกรม Excel สามารถคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของเปลือกอาคารและหลังคา ได้ผลลัพธ์ 1 อาคาร กับเครื่องมือโปรแกรม Grasshopper และ Rhinoceros 3D สามารถสร้างแบบจำลองอาคาร 512 แบบจำลองที่มีอัตราส่วนกระจกต่อผนังที่แตกต่างกัน นักออกแบบสามารถประยุกต์ใช้กับการออกแบบเพื่อให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานและเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานในอาคารได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Generative Design for Creating Office Building Envelope Design Options According to Thailand Building Energy Code
Student	Miss Phattranis Suphavarophas
Student ID	65026022
Degree	Doctor of Philosophy
Program	Environmental Design
Year	2024
Thesis Advisor	Prof. Suphat Bunyarittikit

ABSTRACT

Architectural design should prioritize enhancing energy efficiency in buildings. With the potential of generative design to automate the creation of multiple design alternatives, this approach saves time and increases the chances of discovering innovative solutions. Generative design can significantly improve building energy performance by focusing on building envelopes, a critical factor influencing energy consumption. This aspect, considered during the early design phases, aligns closely with the responsibilities of architects under energy efficiency standards. However, there is currently a gap in academic studies exploring the integration of generative design with office building design by energy efficiency standards in Thailand. This research aims to: 1. Examine the influence of building envelope variables in material selection, orientation, and window-to-wall ratio (WWR) on the overall thermal transfer value (OTTV) and roof thermal transfer value (RTTV). 2. Explore the application of combinatorial rules in generative design through parametric design methods. The study identified three key variables in building envelope systems: material selection, orientation, and WWR. Excel-based tool to calculate OTTV and RTTV for a single building model. Grasshopper Rhinoceros 3D tool capable of generating 512 building models with varying WWRs. Designers can utilize these tools to achieve compliance with energy efficiency standards and enhance building energy performance effectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาการออกแบบสภาพแวดล้อม ซึ่งสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ศ.สุพัฒน์ บุญยฤทธิ์กิจ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าของท่านเพื่อให้คำแนะนำ ข้อปรึกษาในการทำวิจัย และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ด้วยความละเอียดและเอาใจใส่ตลอดช่วงเวลาของการศึกษา จนกระทั่งการวิจัยสัมฤทธิ์ผล ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.รุ่งโรจน์ วงศ์มหาศิริ รศ.ดร.ชุมพร มูรพันธุ์ ผศ.ดร.นุชนางค์ แก้วนิล และอาจารย์ทุกท่านในสาขาวิชาการออกแบบสภาพแวดล้อมที่ได้กรุณาประสิทธิ์ประสาทความรู้ และให้คำปรึกษาอันทรงคุณค่าในการดำเนินการวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณ ดร.ชนิภรณ์ ธรรมพนิชวัฒน์ ผู้แนะนำการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ และเพื่อนๆ ในสาขาวิชาการออกแบบสภาพแวดล้อม สำหรับการแลกเปลี่ยนความรู้และมิตรภาพอันดีงามตลอดช่วงเวลาการศึกษา

สำหรับคุณประโยชน์และคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้บิดา มารดา และครอบครัวอันเป็นที่รัก ตลอดจนครูอาจารย์ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าตลอดจนถึงทุกวันนี้

นางสาวภัทรานิษฐ์ ศุภวโรภาส

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง.....	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	7
1.3 คำถามการวิจัย	7
1.4 กรอบแนวคิดการวิจัย	8
1.5 ขอบเขตการวิจัย	9
1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับ	9
1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	10
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมและกรอบแนวคิด	11
2.1 เจเนเรทีฟดีไซน์อาคารในด้านการอนุรักษ์พลังงานกับการสร้างรูปทรง	11
2.1.1 เจเนเรทีฟดีไซน์กับอาคารในด้านการอนุรักษ์พลังงาน	11
2.1.2 เจเนเรทีฟดีไซน์ทั้ง 4 ประเภท และแนวโน้มการใช้งาน 2 ประเภทในปัจจุบัน	17
2.1.3 เจเนเรทีฟดีไซน์ด้วยวิธีพาราเมตริกดีไซน์เพื่อการสร้างรูปทรงอาคาร	20
2.2 สูตรมาตรฐานพลังงานกับกระบวนการออกแบบอาคาร	26
2.2.1 สูตรระบบเปลือกอาคารตามมาตรฐานพลังงาน BEC.....	26
2.2.2 การออกแบบอาคารกับตัวแปรระบบเปลือกอาคาร	31
2.3 เจเนเรทีฟดีไซน์วิธีพาราเมตริกอาคารในด้านการอนุรักษ์พลังงาน	41
2.4 กรอบแนวคิด	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย	45
3.1 กระบวนทัศน์การวิจัย	45
3.1.1 กระบวนทัศน์แบบหลังปฏิฐานนิยม (Postpositivism)	45
3.1.2 วิธีวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research Methodology)	45
3.2 วิธีการดำเนินการศึกษา การสร้างเครื่องมือजेनेरेठीฟठीไฉน Excel	46
3.2.1 ขั้นตอนการเลือกวัสดุ	46
3.2.2 ขั้นตอนการหั่นทศทง	48
3.2.3 ขั้นตอนการออกแบบอ้ตราส่วนกระจกต่อผนัง	50
3.3 วิธีการดำเนินการศึกษา การสร้างเครื่องมือजेनेरेठीฟठीไฉน Grasshopper และ Rhinoceros 3D	54
3.3.1 ขั้นตอนการเลือกวัสดุ	54
3.3.2 ขั้นตอนการหั่นทศทง	56
3.3.3 ขั้นตอนการออกแบบอ้ตราส่วนกระจกต่อผนัง	57
3.4 การวิเคราะห์และประเมินผลลัฟठी	60
บทที่ 4 ผลการดำเนินการวิจัย	62
4.1 เครื่องมือคำนวณเปิดใช้ด้วยโปรแกรม Excel	63
4.1.1 ขั้นตอนการเลือกวัสดุ	63
4.1.2 ขั้นตอนการหั่นทศทง	67
4.1.3 ขั้นตอนการออกแบบอ้ตราส่วนกระจกต่อผนัง	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 เครื่องมือคำนวณและแสดงผลสามมิติเปิดใช้ด้วยโปรแกรม Grasshopper และ Rhinoceros 3D	69
4.2.1 ขั้นตอนการเลือกวัสดุ	69
4.2.2 ขั้นตอนการหันทิศทาง	70
4.2.3 ขั้นตอนการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง	71
4.3 การวิเคราะห์และประเมินผลลัพธ์	75
4.3.1 การเจาะเรทีฟดีไซน์แสดงผลทุกความเป็นไปได้ของค่า OTTV	75
4.3.2 การเจาะเรทีฟดีไซน์แสดงผลตามการกำหนดค่า OTTV และ WWR ของสถาปนิก	80
4.3.3 การประเมินผลลัพธ์ของการคำนวณ	82
บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย	83
5.1 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย	83
5.1.1 ตรวจสอบอิทธิพลของตัวแปรระบบเปลือกอาคารที่ส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อน รวมของเปลือกอาคารและหลังคา	83
5.1.2 ค้นหารูปแบบการประยุกต์ใช้กฎการคูณเพื่อเจาะเรทีฟดีไซน์ด้วยวิธีพาราเมตริก ดีไซน์	84
5.2 ความสำคัญของการวิจัย	85
5.3 ข้อจำกัดของการวิจัย	85
5.4 ข้อเสนอแนะการวิจัย	86
บรรณานุกรม	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก.....	95
ภาคผนวก ข.....	105
ภาคผนวก ค.....	106
ภาคผนวก ง.....	110
ประวัติผู้เขียน.....	114



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 เจเนเรทีฟดีไซน์กับกระบวนการออกแบบอาคาร.....	1
1.2 เจเนเรทีฟดีไซน์ Life Cycle Carbon Footprint (LCCF) และ Life Cycle Costs (LCC)	2
1.3 Generative Design ในการออกแบบผังห้องพักอาศัย.....	3
1.4 การออกแบบอาคารตามเกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงาน	4
1.5 วิชาชีพที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการออกแบบอาคาร	5
1.6 วิชาชีพที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการออกแบบอาคารตามมาตรฐานพลังงาน	6
1.7 เจเนเรทีฟดีไซน์เพื่อการออกแบบอาคารสำนักงานตามมาตรฐานพลังงาน BEC	7
1.8 กรอบแนวคิดการวิจัย	8
2.1 เจเนเรทีฟดีไซน์กับกระบวนการออกแบบสถาปัตยกรรม	11
2.2 systematic review using the PRISMA methodology	13
2.3 งานวิจัย 34 ฉบับจากปี 2003 ถึง 2023	14
2.4 การประยุกต์ใช้วิธีเจเนเรทีฟดีไซน์สำหรับหัวข้อด้านประสิทธิภาพพลังงาน	14
2.5 หัวข้อ Energy performance.....	14
2.6 หัวข้อ Thermal performance.....	15
2.7 หัวข้ออื่นๆ	15
2.8 หัวข้อผสมหลายเรื่อง	16
2.9 แผนภูมิปริมาณและประเภทของวิธีการในหัวข้อประสิทธิภาพพลังงาน	16
2.10 วิธีการเจเนเรทีฟดีไซน์ตามหัวข้อด้านพลังงาน	19
2.11 generative design with parametric design	19
2.12 พาราเมตริกดีไซน์ (Parametric design)	20
2.13 พาราเมตริกในสถาปัตยกรรมอียิปต์โบราณ.....	20
2.14 แบบจำลองแรงกลับหัวของ Antoni Gaudí.....	21
2.15 การทดลองฟองสบู่ของ Frei Otto.....	21
2.16 พาราเมตริกดีไซน์ (Parametric design)	22
2.17 พาราเมตริกดีไซน์ยุคดิจิทัล.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 ความสัมพันธ์พารามेटริกดีไซน์	22
2.19 Parametric design VS Generative design	23
2.20 การออกแบบเจเนเรทีฟดีไซน์ด้วยวิธีการพารามेटริก	23
2.21 Multiplication principle.....	24
2.22 การออกแบบเจเนเรทีฟดีไซน์ด้วยวิธีการพารามेटริก	24
2.23 การออกแบบเจเนเรทีฟดีไซน์ด้วยวิธีการพารามेटริก	25
2.24 เจเนเรทีฟดีไซน์เพื่อการออกแบบอาคารสำนักงานตามมาตรฐานพลังงาน BEC	26
2.25 ระบบเปลือกอาคาร (Building Envelope).....	27
2.26 สูตรระบบเปลือกอาคาร	28
2.27 overall thermal transfer value, OTTV	29
2.28 roof thermal transfer value, RTTV.....	30
2.29 สูตรสูตรระบบเปลือกอาคาร.....	30
2.30 สูตรสูตรระบบเปลือกอาคาร.....	31
2.31 การออกแบบอาคารกับตัวแปรระบบเปลือกอาคาร.....	32
2.32 Heat transfer coefficient ; U value	33
2.33 ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคาร	33
2.34 solar heat gain coefficient, SHGC.....	34
2.35 Shading Coefficient, SC.....	34
2.36 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิ	35
2.37 ESR ค่าทางรังสีและทิศทางของกระจกมมเอียง 90 องศา.....	37
2.38 ค่าทางรังสีและทิศทาง	37
2.39 ค่าทางรังสีและทิศทาง	38
2.40 ค่าของพื้นที่วัสดุ	39
2.41 ค่าของพื้นที่วัสดุ	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.42 ชั้นการเลือกวัสดุ.....	41
2.43 ชั้นการหันทิศทาง	42
2.44 ชั้นการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง	43
2.45 กรอบแนวคิด	44
3.1 ชั้นการเลือกวัสดุ.....	47
3.2 ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (TDeq).....	48
3.3 ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (ESR)	48
3.4 ชั้นการหันทิศทาง	50
3.5 อัตราส่วนกระจกต่อผนัง.....	51
3.6 ชั้นการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง.....	52
3.7 กรอบเครื่องมือ	53
3.8 เปรียบเทียบ Programming กับ Visual Programming	54
3.9 สูตรคณิตศาสตร์ใน Grasshopper	55
3.10 ชั้นการเลือกวัสดุ.....	55
3.11 ชั้นการหันทิศทาง	56
3.12 ชั้นการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง	57
3.13 User Experience (UX).....	58
3.14 User Interface (UI).....	58
3.15 กรอบเครื่องมือเจเนเรทีฟดีไซน์.....	59
3.16 ความเป็นไปได้ในการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง	61
4.1 OTTV&RTTV Program version 0.2.....	63
4.2 โครงการอาคารสำนักงาน วี44.....	64
4.3 พังอาคาร	64
4.4 รูปตัดอาคาร	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ขั้นตอนการเลือกวัสดุ.....	66
4.6 ขั้นตอนการหันทิศทาง	67
4.7 อัตราส่วนกระจกต่อผนัง	68
4.8 ขั้นตอนการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง.....	68
4.9 ขั้นตอนการเลือกวัสดุ.....	70
4.10 ขั้นตอนการหันทิศทาง	71
4.11 ขั้นตอนการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง	72
4.12 ชุดที่ 1 แบบจำลองทิศ N, S, E, W 256 แบบอาคาร (ล่าง) และ ชุดที่ 2 แบบจำลองทิศ NW, NE, SW, SE 256 แบบอาคาร (บน).....	72
4.13 User experience (UX)	73
4.14 User Interface (UI).....	74
4.15 การเจนเรทีฟดีไซน์แสดงผลทุกความเป็นไปได้ของค่า OTTV.....	76
4.16 การเจนเรทีฟดีไซน์แสดงผลทุกความเป็นไปได้ แบ่งค่าตามช่วงค่า OTTV	77
4.17 ชุดที่ 1 OTTV N, S, E, W การเปรียบเทียบค่า OTTV ต่ำสุดและสูงสุด.....	78
4.18 การไล่ลำดับตามกฎการคูณ.....	80
4.19 สถาปนิกใช้คำสั่งเลือกช่วงค่า OTTV ต่ำกว่า 100	81
4.20 สถาปนิกใช้คำสั่งเลือกช่วงค่า WWR ทิศใต้ (S) 50%	81
ก.1 Publishing sources of the articles.....	98
ก.2 Number of citations for the articles.....	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานประเภทอาคารสำนักงานหรือที่ทำการ	5
2.1 generative design methods for energy efficient in building.....	17
2.2 ค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานระบบเปลือกอาคาร ประเภทอาคารสำนักงานหรือที่ทำการ	27
2.3 ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (TD_{eq}) ผนัง 90 องศา หลังคา 0 องศา.....	36
2.4 มุมเอียงกับพื้นโลก (Zenith Angle) กับค่า TD_{eq}	36
2.5 คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (ESR) สำหรับสำนักงาน	37
3.1 ค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานระบบเปลือกอาคาร ประเภทอาคารสำนักงานหรือที่ทำการ	60
4.1 ข้อมูลวัสดุและ OTTV RTTV	65
4.2 การกำหนดตัวแปรคงที่ในงานวิจัย	66
4.3 จำนวนแบบจำลอง ตามช่วงค่า OTTV	75
4.4 คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (ESR) สำหรับสำนักงาน	79
ก.1 เอกสารในการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ	95
ก.2 Energy efficient of buildings achieved through generative design in energy efficient topics.....	99
ข.1 รูปทรง, พิกัด และขนาด	105
ค.1 จำนวนแบบจำลอง ตามช่วงค่า OTTV.....	106
ง.1 จำนวนแบบจำลอง ตามช่วงค่า OTTV	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของการวิจัย

1) เจเนเรทีฟดีไซน์เพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานของอาคาร

การออกแบบสถาปัตยกรรมควรให้ความสำคัญกับการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคาร [1-5] แต่การประเมินพลังงานมักถูกดำเนินการหลังการออกแบบอาคาร [6] ซึ่งหากไม่ได้คิดถึงเกณฑ์ตั้งแต่ช่วงต้นของการออกแบบอาจทำให้ไม่สามารถผ่านมาตรฐานได้และต้องกลับไปปรับปรุงการออกแบบใหม่ ดังนั้นการออกแบบในช่วงแรกมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการบรรลุประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคาร [7-9]

เจเนเรทีฟดีไซน์ได้รับการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยการอำนวยความสะดวกในการประเมินตั้งแต่ช่วงแรกของกระบวนการออกแบบ [6], [10-11] โดยปรากฏในช่วงต้น 3 ช่วง คือ ช่วงก่อนการออกแบบ (Pre-Design) เป็นขั้นตอนวางแนวคิดและวิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้งานกับสภาพแวดล้อม, ช่วงการออกแบบร่าง (Schematic Design) เป็นขั้นตอนการทำแบบร่างเบื้องต้นของอาคาร จนถึงช่วงการพัฒนาแบบ (Design Development) พัฒนาแบบร่างอาคารให้ละเอียดขึ้น (รูปที่ 1.1)



รูปที่ 1.1 เจเนเรทีฟดีไซน์กับกระบวนการออกแบบอาคาร

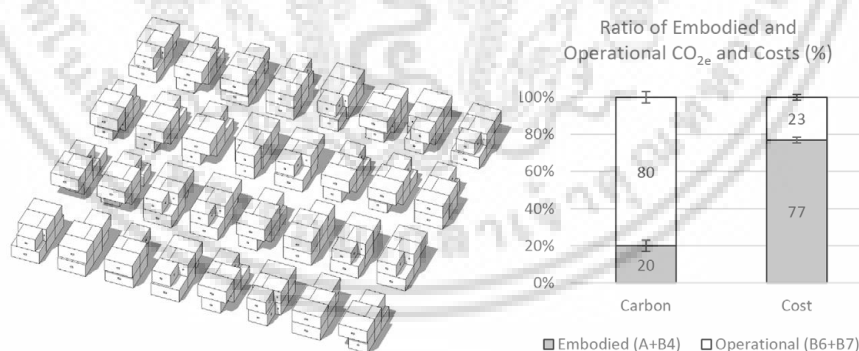
ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

เจเนเรทีฟดีไซน์เป็นเทคนิคในการแก้ปัญหาโดยใช้คอมพิวเตอร์ทำการสำรวจการออกแบบ [12] มีรากฐานมาจากการสร้างแบบจำลองชุดขั้นตอนหรือข้อกำหนดที่ใช้ในการแก้ปัญหา (อัลกอริธึม) และพารามิเตอร์ คือการออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวแปรและคุณสมบัติทางเรขาคณิต ซึ่งอำนวยความสะดวกในการสำรวจ การวนซ้ำ และการเพิ่มประสิทธิภาพความเป็นไปได้ในการออกแบบโดยอัตโนมัติ [13] แตกต่างจากแนวทางการออกแบบแบบดั้งเดิม ซึ่งสถาปนิกอาศัยประสบการณ์เป็นหลัก แต่อาจไม่ได้สำรวจแนวทางแก้ปัญหาแบบอาคารอื่นๆ การออกแบบที่เป็นไปได้อย่างเต็มที่ [14] ดังนั้นการพิจารณาการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเงื่อนไขเฉพาะอาจไม่ชัดเจนในทันที [5] เจเนอเรชันนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรทีฟดีไซน์จึงมีศักยภาพในการยกระดับประสิทธิภาพของอาคารโดยการสร้างทางเลือกการออกแบบ และช่วยเหลือกระบวนการตัดสินใจผ่านการสนับสนุนการตัดสินใจ

แม้ปัจจุบันจะเป็นเทรนด์ของเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) ที่กำลังพัฒนาอย่างรวดเร็วและเป็นที่ยอมรับ แต่ยังมีข้อจำกัดและความเสี่ยง [15] ใช้เวลานานในการพัฒนาและสอนแบบจำลองที่ซับซ้อน ต้องการข้อมูลจำนวนมากและมีคุณภาพสูง ต้องใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์และความเชี่ยวชาญเฉพาะทาง [38] ความซับซ้อนทางจริยธรรมและกฎหมาย [17] ดังนั้น AI ยังมีข้อจำกัดมาก ในขณะที่จากตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเจเนเรทีฟดีไซน์ (Generative Design) หลายชิ้นได้แสดงถึงความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบด้านพลังงานที่หลากหลาย จึงควรมีการศึกษาให้มากขึ้นและนำไปใช้จริง เช่น Facade Optimization [18-19], Building Shape [20], Photovoltaics Integration [21], Cooling and Heating Energy Consumption [22], Daylight Performance [23], Thermal Efficiency [24], and Life Cycle Carbon Analysis [25].

งานวิจัยของ Yair Schwartz, Rokia Raslan, Ivan Korolija และ Dejan Mumovic [26] ใช้เจเนเรทีฟดีไซน์กับเครื่องมือเชิงคำนวณที่ทำให้การสร้างแบบอาคารที่เหมาะสมที่สุดโดยอัตโนมัติในด้าน Life Cycle Carbon Footprint (LCCF) และ Life Cycle Costs (LCC) สร้างแบบ 32 อาคารสองชั้น พบว่า 80% Life Cycle Carbon Footprint (LCCF) มาจากการใช้พลังงานในช่วงการดำเนินการของอาคาร (building Operational Stage) และ 77% Life Cycle Costs (LCC) มาจากการลงทุนตั้งต้น (Initial Investment) (รูปที่ 1.2)



รูปที่ 1.2 เจเนเรทีฟดีไซน์ Life Cycle Carbon Footprint (LCCF) และ Life Cycle Costs (LCC) ที่มา: Yair Schwartz, Rokia Raslan, Ivan Korolija และ Dejan Mumovic [26]

การศึกษาของ Wang T.K. และ Duan W. [6] ที่ใช้ Generative Design ในการออกแบบผังห้องพักอาศัย ซึ่งผลการศึกษาพบว่าความพึงพอใจของผู้บริโภคเพิ่มขึ้นถึง 38.78% และประสิทธิภาพด้านพลังงานเพิ่มขึ้นถึง 11.18% (รูปที่ 1.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

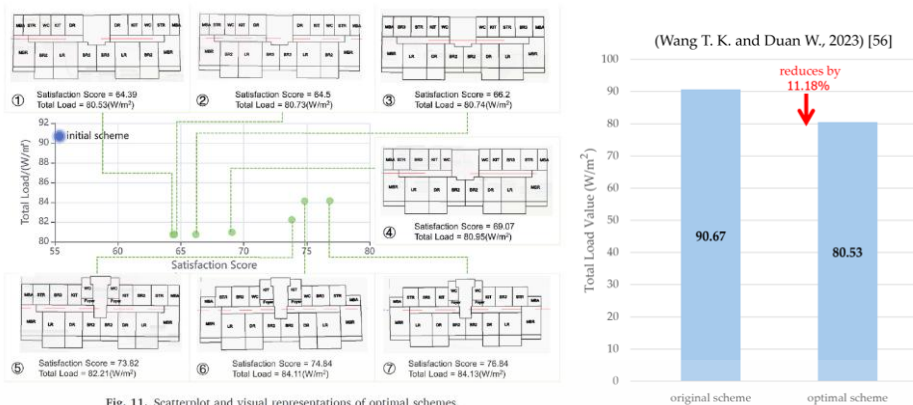


Fig. 11. Scatterplot and visual representations of optimal schemes.

รูปที่ 1.3 Generative Design ในการออกแบบผังห้องพักอาศัย

ที่มา: Wang T.K. และ Duan W. [6] (ซ้าย), ผู้วิจัย (2567) (ขวา)

2) อาคารสำนักงานกับมาตรฐานด้านพลังงานในระดับนานาชาติ

โปรแกรมจำลองสถานการณ์ถูกนำมาใช้ในการทำนายได้กับข้อกำหนดด้านความร้อนหรือความเย็นและการใช้พลังงานเกินกว่าที่กำหนด [27-30] หลายประเทศในโลกได้นำข้อกำหนดบังคับเกี่ยวกับการอนุรักษ์พลังงานสำหรับอาคารมาใช้แล้ว [31] เกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงาน (Building Energy Code : BEC) หรือกฎกระทรวงกำหนดประเภท หรือขนาดของอาคาร และมาตรฐานหลักเกณฑ์ และวิธีการในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2563 ถูกบังคับใช้กับอาคารปรับปรุงและสร้างใหม่ 9 ประเภท [32] หนึ่งในนั้นคืออาคารสำนักงานซึ่งการออกแบบอาคารสำนักงานให้ประหยัดพลังงานจึงมีความสำคัญทั้งในเชิงเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม [33-35] เมื่อต้องเลือกอาคารสำหรับใช้เป็นสำนักงาน บริษัทมักจะพิจารณาจากเงื่อนไขและมาตรฐานที่กำหนดไว้เพื่อให้แน่ใจว่าอาคารนั้นมีความยั่งยืนและมีประสิทธิภาพด้านพลังงาน [36] อย่างมาตรฐาน LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) หรือ BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) ซึ่งช่วยสร้างภาพลักษณ์ที่ดี แสดงถึงความรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อม และความใส่ใจต่อสุขภาพและความเป็นอยู่ของพนักงาน [37-39] นอกจากนี้ อาคารที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานสูงยังมีมูลค่าตลาดที่สูงกว่า เนื่องจากผู้เช่าและผู้ซื้อมักเลือกอาคารที่สามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในระยะยาว การประหยัดพลังงานจึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับบอสังหาริมทรัพย์ [40-41]

มาตรฐาน LEED และ BREEAM ใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินความยั่งยืนของอาคาร [42-43] ซึ่งเน้นไปที่การสร้างภาพลักษณ์ที่ดีของอาคารและองค์กรผู้เป็นเจ้าของ ในทางตรงกันข้าม BEC เป็นกฎหมายที่อาคารต้องปฏิบัติตาม [32] ซึ่งสามารถใช้เป็นฐานสำหรับการประเมินมาตรฐานเช่น LEED ได้ ช่วยให้อาคารสามารถได้รับคะแนนในหลายๆ หมวดหมู่ได้ง่ายขึ้น ส่งเสริมการออกแบบอาคารที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืน ซึ่งส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และสุขภาพของมนุษย์ [37-39]

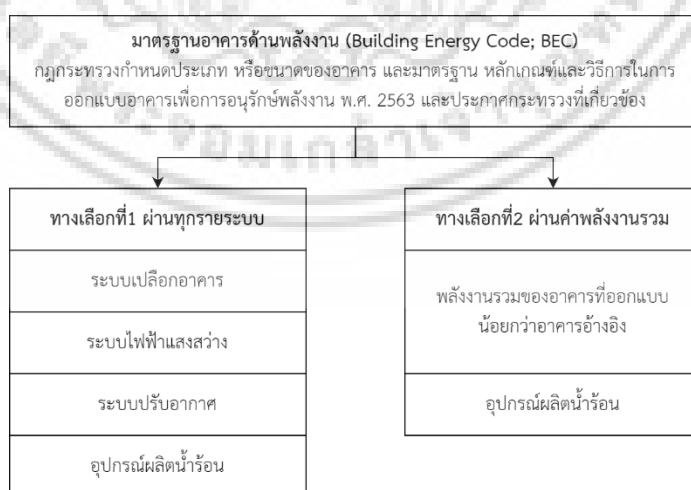
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การใช้งานโปรแกรมจำลองตามมาตรฐานพลังงานของประเทศไทย

การออกแบบอาคารให้สอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงานมีสองแนวทาง (รูปที่ 1.4) แนวทางที่ 1 การประเมินรายระบบ ครอบคลุมระบบต่าง ๆ ได้แก่ ระบบเปลือกอาคาร, ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง, ระบบปรับอากาศ และอุปกรณ์ผลิตน้ำร้อน ในการประเมินรายระบบนี้จะตรวจสอบแต่ละระบบของอาคารให้ตรงตามค่ามาตรฐานที่กำหนด (ตารางที่ 1.1) ถ้าไม่ผ่านเกณฑ์นี้สามารถใช้แนวทางที่ 2 การประเมินการใช้พลังงานโดยรวมทั้งอาคาร (Whole building energy) โดยลดจากการใช้พลังงานหมุนเวียน

ปัจจุบันโปรแกรมประเมินประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร BEC (Building Energy Code Software: BEC) เครื่องมือคำนวณค่าการอนุรักษ์พลังงานอาคารตามเกณฑ์มาตรฐานยังพบปัญหาและข้อจำกัดในการใช้โปรแกรม เนื่องจากโปรแกรมทำงานเป็นแบบทีละขั้น ทำให้ซับซ้อนและผู้ใช้ทำงานได้ช้า [44] นอกจากนี้ปัจจุบันการประเมินประสิทธิภาพดำเนินการหลังออกแบบอาคารเสร็จสิ้นแล้วจึงทำการประเมินว่าผ่านเกณฑ์หรือไม่ ทำให้ค้นพบข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ เช่น ออกแบบอาคารเสร็จสิ้นแล้วแต่ประเมินไม่ผ่าน ต้องแก้ไขโดยเปลี่ยนวัสดุหรือรูปแบบอาคาร ซึ่งเพิ่มเวลาและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (รศ. รุ่งโรจน์ วงศ์มหาศิริ, 2565) ด้วยช่องว่างนี้หากทำการออกแบบอย่างเหมาะสมตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพอาคารได้

การทำนายค่าพลังงานคือการใช้ข้อมูลอดีตถึงปัจจุบันและการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์ในการคาดการณ์การใช้พลังงานในอนาคต โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือเพื่อช่วยให้ผู้ที่เกี่ยวข้องสามารถตัดสินใจอย่างมีข้อมูลในการจัดการพลังงาน และปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระบบหรืออาคาร



รูปที่ 1.4 การออกแบบอาคารตามเกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงาน

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

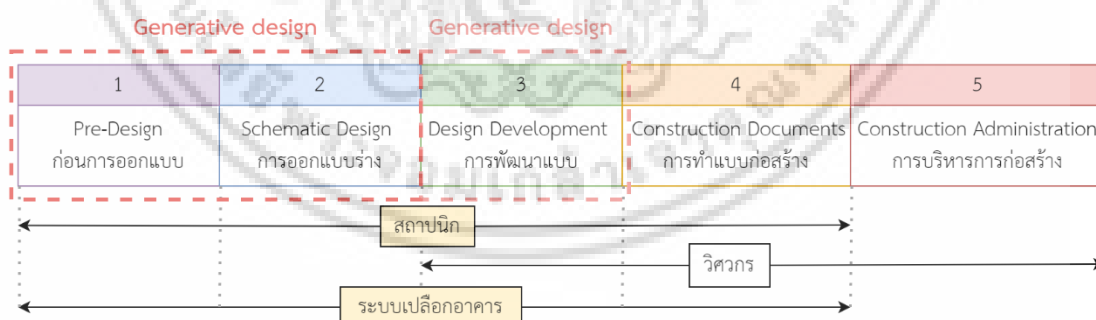
ตารางที่ 1.1 ค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานประเภทอาคารสำนักงานหรือที่ทำการ

ระบบ	ค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน
ระบบเปลือกอาคาร	ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคาร (overall thermal transfer value; OTTV) ไม่เกิน 50 วัตต์ต่อตารางเมตร ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (roof thermal transfer value; RTTV) ไม่เกิน 10 วัตต์ต่อตารางเมตร
ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง	ค่ากำลังไฟฟ้าส่องสว่างสูงสุด (lighting power density; LPD) 10 วัตต์ต่อตารางเมตร
ระบบปรับอากาศ	ระบบปรับอากาศ ตามประเภทและขนาด
อุปกรณ์ผลิตน้ำร้อน	อุปกรณ์ผลิตน้ำร้อน ตามค่าประสิทธิภาพขั้นต่ำและค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะขั้นต่ำ

ที่มา: กระทรวงพลังงาน. (2564) [83]

4) วิชาชีพที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการออกแบบอาคารตามมาตรฐานพลังงาน

ในการปฏิบัติงานด้านสถาปัตยกรรมสมัยใหม่ กระบวนการออกแบบอาคาร (Architectural Design Process) [46-48] สามารถแบ่งได้หลายแบบ ส่วนใหญ่จะใกล้เคียงกันหรือแบ่งย่อยได้มากกว่า ดังนี้ 1.Pre-Design (ก่อนการออกแบบ), 2.Schematic Design (การออกแบบร่าง), 3.Design Development (การพัฒนาแบบ), 4.Construction Documents (การทำแบบก่อสร้าง), 5.Construction Administration (การบริหารการก่อสร้าง) โดยวิชาชีพที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการออกแบบอาคารตามมาตรฐานพลังงานมีหลายวิชาชีพ แต่โดยหลักคือสถาปนิกและวิศวกร เมื่อเทียบกับกระบวนการออกแบบอาคารแล้ว (รูปที่ 1.5)



รูปที่ 1.5 วิชาชีพที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการออกแบบอาคาร

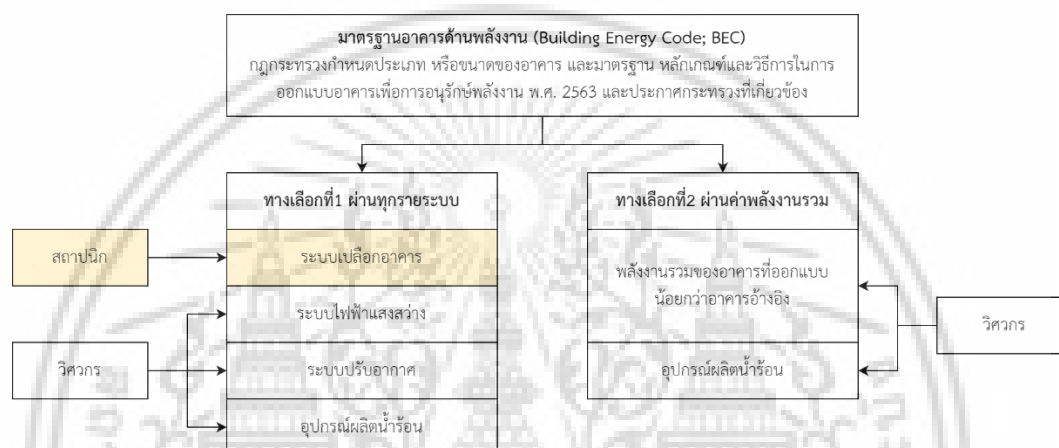
ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

ในกระบวนการออกแบบอาคารตามเกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงาน (Building Energy Code; BEC) ทางเลือกที่ 1 แบบรายระบบเป็นทางเลือกแรกที่ควรออกแบบให้ผ่านก่อน ประกอบด้วยระบบหลัก ได้แก่ ระบบเปลือกอาคาร ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ และอุปกรณ์ผลิตน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อน ในที่นี้ มีเพียงระบบเปลือกอาคารที่เป็นงานหลักของสถาปนิก ส่วนงานอื่นๆ จะเกี่ยวข้องกับวิศวกรเป็นหลัก (รูปที่ 1.6)

โดยเปลือกอาคารเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานในอาคาร [45] ดังนั้นการออกแบบเปลือกอาคารอย่างมีประสิทธิภาพจะช่วยลดการใช้พลังงานในอาคารลงอย่างมาก [46] และมีผลกระทบต่อการใช้วัสดุ โครงสร้าง และรูปแบบทางสถาปัตยกรรม ระบบเปลือกอาคารมีความเกี่ยวข้องกับการออกแบบอาคารของสถาปนิก ดังนั้นงานวิจัยในเรื่องระบบเปลือกอาคาร (Building Envelope) มีความสำคัญต่อการออกแบบเพื่อลดการใช้พลังงาน [46]



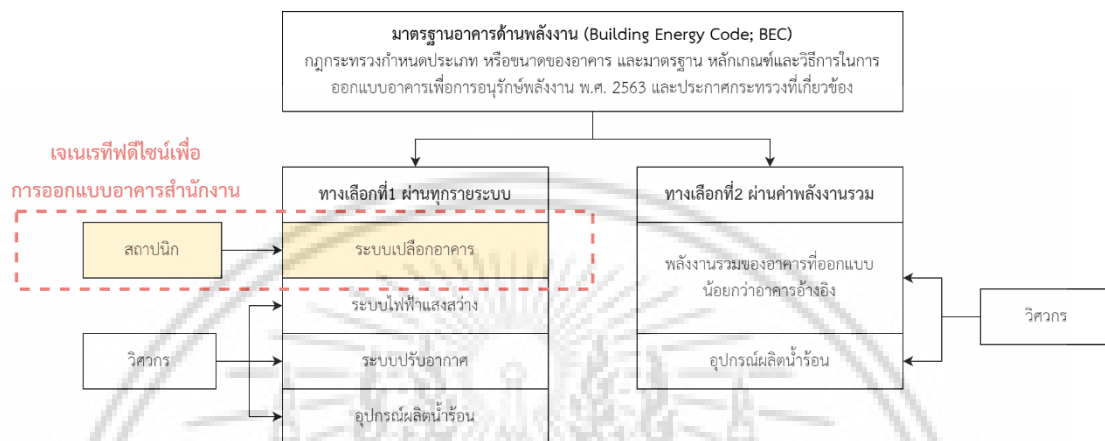
รูปที่ 1.6 วิชาชีพที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการออกแบบอาคารตามมาตรฐานพลังงาน
ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

5) เจเนเรทีฟดีไซน์เพื่อการออกแบบอาคารสำนักงานตามมาตรฐานพลังงาน BEC

งานวิจัยที่หลากหลายแสดงถึงประสิทธิภาพเจเนเรทีฟดีไซน์ซึ่งเป็นที่ยอมรับในหมู่สถาปนิกและนักวิจัยด้านการออกแบบ [49] การเข้าถึงความรู้ในสาขานี้ถูกจำกัดเนื่องจากสถานะเป็นเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ขั้นสูง [16] ซึ่งมีความซับซ้อนและท้าทายในการทำความเข้าใจโดยธรรมชาติ [50] เจเนเรทีฟดีไซน์เป็นความรู้ที่สอนโดยทั่วไปในระดับปริญญาโทหรือสูงกว่า [12] ซึ่งสอดคล้องกับความเป็นจริงในปัจจุบันที่มนุษย์ยังขาดความรู้เกี่ยวกับระบบอัตโนมัติที่ประหยัดพลังงาน [51] นอกจากนี้ มีงานวิจัยเพียงไม่กี่ชิ้นที่มุ่งประยุกต์การออกแบบเชิงสร้างสรรค์กับการออกแบบอาคารตามรูปแบบ [52, 53] นอกจากนี้ยังขาดการศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคหรือวิธีเจเนเรทีฟดีไซน์ [26, 53] ด้วยศักยภาพของเจเนเรทีฟดีไซน์ที่สามารถสร้างทางเลือกการออกแบบอาคารโดยอัตโนมัติ เป็นการประหยัดเวลาและเพิ่มโอกาสในการค้นพบทางเลือกการออกแบบมากขึ้น จึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคาร และด้วยช่องว่างทางการศึกษาเจเนเรทีฟดีไซน์ปัจจุบันยังขาดการศึกษาที่เชื่อมโยงเจเนเรทีฟดีไซน์กับการออกแบบอาคารสำนักงานตามเกณฑ์มาตรฐาน BEC โดยเฉพาะในบริบทของประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างนี้ชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการวิจัยเพื่อพัฒนากระบวนการ เจเนเรทีฟดีไซน์ที่สามารถสร้างแบบแผนการออกแบบอาคารสำนักงานที่สอดคล้องกับมาตรฐาน BEC จึงเป็นที่มาของหัวข้อการวิจัย เจเนเรทีฟดีไซน์เพื่อสร้างทางเลือกการออกแบบเปลือกอาคารสำนักงานตามเกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานประเทศไทย (รูปที่ 1.7)



รูปที่ 1.7 เจเนเรทีฟดีไซน์เพื่อการออกแบบอาคารสำนักงานตามมาตรฐานพลังงาน BEC
ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) ตรวจสอบอิทธิพลของตัวแปรระบบเปลือกอาคาร ได้แก่ การเลือกวัสดุ, การหันทิศทางและการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง ที่ส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของเปลือกอาคารและหลังคา
- 2) ค้นหาแบบการประยุกต์ใช้กฎการคูณเพื่อเจเนเรทีฟดีไซน์ด้วยวิธีพาราเมตริกดีไซน์

1.3 คำถามการวิจัย

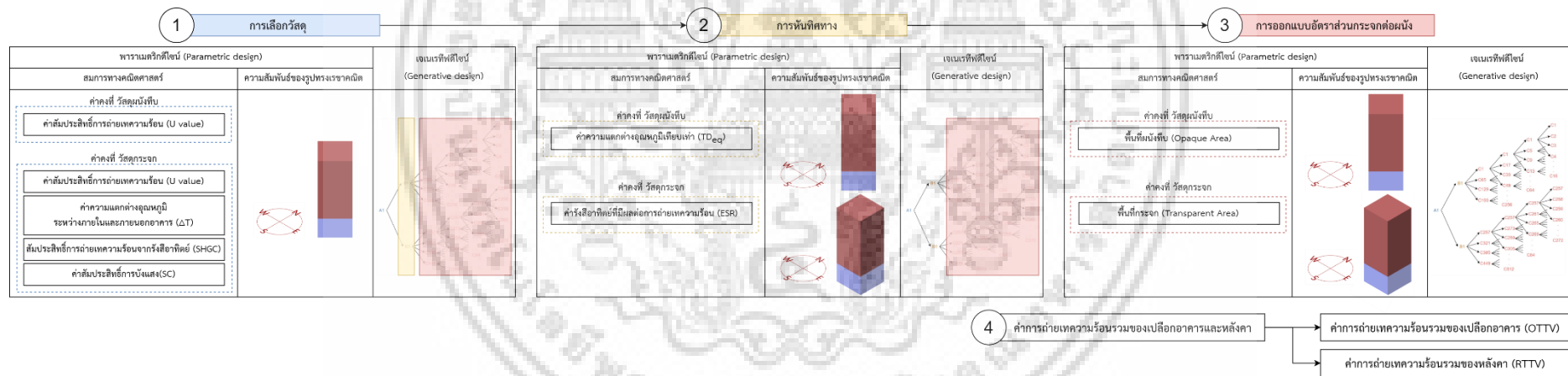
- 1) อิทธิพลของตัวแปรระบบเปลือกอาคาร ได้แก่ การเลือกวัสดุ, การหันทิศทางและการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง ส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของเปลือกอาคารและหลังคาอย่างไร?
- 2) รูปแบบการประยุกต์ใช้กฎการคูณเพื่อเจเนเรทีฟดีไซน์ด้วยวิธีพาราเมตริกดีไซน์เป็นอย่างไร?

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 กรอบแนวคิดการวิจัย

กรอบแนวคิดของการวิจัยฉบับนี้ถูกพัฒนาขึ้นจากการทบทวนวรรณกรรมในบทที่ 2 จากทฤษฎีเจเนเรทีฟดีไซน์อาคารในด้านการอนุรักษ์พลังงาน โดยเลือกการสร้างรูปทรงด้วยวิธีพารามตริกดีไซน์ กับทฤษฎีระบบเปลือกอาคารตามมาตรฐานพลังงานประเทศไทย ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน (รูปที่ 1.8)

- 1.การเลือกวัสดุ: ค่าคงที่วัสดุผนังที่บคือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U value) ค่าคงที่วัสดุกระจกประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U value), ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคาร (ΔT), สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (SHGC) และค่าสัมประสิทธิ์การบังแสง (SC)
- 2.การหันทิศทาง: ตัวแปรอิสระผนังที่บคือค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (TD_{eq}) ตัวแปรอิสระกระจกคือค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (ESR)
- 3.การออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง: ตัวแปรอิสระผนังที่บคือค่าพื้นที่ผนังที่บ (Opaque Area) ตัวแปรอิสระกระจกคือพื้นที่กระจก (Transparent Area)



รูปที่ 1.8 กรอบแนวคิดการวิจัย

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1) ขอบเขตด้านเนื้อหา คือ งานวิจัยเชิงเรททีฟดีไซน์เพื่อสร้างทางเลือกการออกแบบสำนักงานตามเกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานประเทศไทย จัดอยู่ในสาขาการคำนวณการออกแบบและการประเมินประสิทธิภาพการคำนวณ (Design Computation and Computational Performance Assessment)

2) ขอบเขตด้านกรณีศึกษา คือ อาคารสำนักงาน จัดอยู่ใน 9 ประเภทอาคารที่มีการบังคับใช้กับอาคารที่จะก่อสร้างใหม่หรือมีการดัดแปลงตามกฎหมายกระทรวง เนื่องจากอาคารมีความจำเป็นต้องผ่านมาตรฐานเพื่อได้รับอนุญาตก่อสร้างอาคาร นอกจากนี้อาคารที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานสูงมีมูลค่าตลาดและภาพลักษณ์องค์กร

3) ขอบเขตด้านตัวแปรในการประเมินระบบเปลือกอาคาร ตัวแปรตามในงานวิจัย ได้แก่ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบเปลือกอาคาร (overall thermal transfer value: OTTV) เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการออกแบบอาคาร เนื่องจากเป็นค่าที่แสดงถึงการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างภายในและภายนอกอาคาร ซึ่งมีผลต่อการใช้พลังงานในระบบไฟฟ้า เครื่องปรับอากาศ และระบบอื่นๆ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (Roof Thermal Transfer Value: RTTV) กำหนดเป็นตัวแปรคงที่ในงานวิจัย เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบจากการออกแบบเปลือกอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยตัวแปรระบบเปลือกอาคาร ได้แก่ การเลือกวัสดุกำหนดเป็นค่าคงที่การวิจัย การหันทิศทางและการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนังกำหนดเป็นตัวแปรอิสระในการวิจัย

4) ขอบเขตด้านโปรแกรม ประกอบด้วย เครื่องมือคำนวณเปิดใช้ด้วยโปรแกรม Excel และเครื่องมือคำนวณและแสดงผลสามมิติเปิดใช้ด้วยโปรแกรม Rhinoceros 3D และ Grasshopper เพื่อแสดงผลทางเลือกการออกแบบเปลือกอาคารสำนักงาน ตามเกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานประเทศไทย

1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1) พบอิทธิพลของตัวแปรระบบเปลือกอาคารส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของเปลือกอาคารและหลังคา

2) ได้ทางเลือกการออกแบบเปลือกอาคารสำนักงาน ตามเกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ

1) เจเนเรทีฟดีไซน์ (Generative Design) หมายถึง กระบวนการทางการออกแบบที่นักออกแบบป้อนเป้าหมายการออกแบบเข้าสู่ซอฟต์แวร์เจเนเรทีฟดีไซน์พร้อมกับพารามิเตอร์ เช่น ด้านประสิทธิภาพ, ด้านความต้องการทางพื้นที่, เวลาการผลิตวัสดุวิธีการผลิต และข้อจำกัดทางค่าใช้จ่าย ซอฟต์แวร์จะทำการประมวลผลทุกๆ ตัวเลือกที่เป็นไปได้ของผลลัพธ์โดยอัตโนมัติ

2) มาตรฐานอาคารด้านพลังงาน (Building Energy Code: BEC) หมายถึง มาตรการบังคับใช้เกณฑ์มาตรฐานอาคาร ด้านพลังงาน ซึ่งของเกณฑ์ไทยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ได้ออกกฎกระทรวงกำหนดประเภทหรือขนาดของอาคารและมาตรฐานหลักเกณฑ์และวิธีการในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2563 โดยมีกำหนดค่ามาตรฐานที่อาคารต้องปฏิบัติตามเพื่อให้ได้รับการอนุมัติในการก่อสร้าง ทางเลือกที่ 1 แบบรายระบบเป็นทางเลือกแรกที่ควรออกแบบให้ผ่านก่อน ประกอบด้วยสี่ระบบหลัก ได้แก่ ระบบเปลือกอาคาร ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ และอุปกรณ์ผลิตน้ำร้อน และทางเลือกที่ 2 การผ่านค่าพลังงานรวม

บทที่ 2

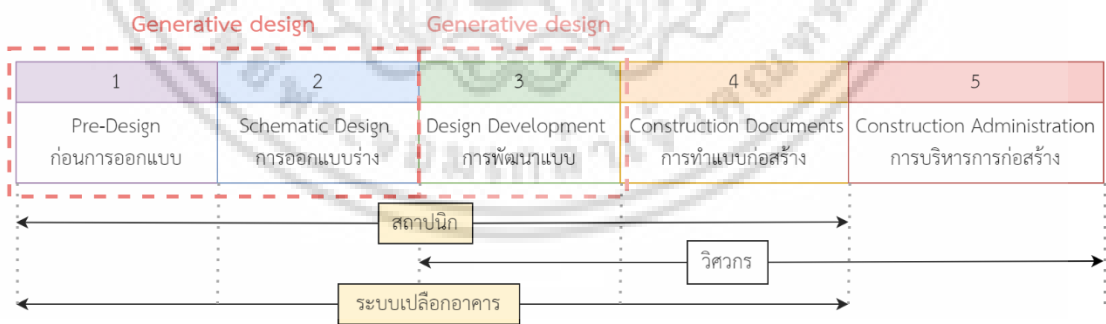
ทบทวนวรรณกรรมและกรอบแนวคิด

2.1 เจเนเรทีฟดีไซน์อาคารในด้านการอนุรักษ์พลังงานกับการสร้างรูปทรง

2.1.1 เจเนเรทีฟดีไซน์กับอาคารในด้านการอนุรักษ์พลังงาน

เจเนเรทีฟดีไซน์ (Generative Design) เป็นกระบวนการวนซ้ำที่สร้างตัวเลือกการออกแบบทั้งหมดโดยอัตโนมัติตามเงื่อนไขที่ระบุ [46, 48] การออกแบบเชิงสร้างสรรค์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพผ่านกระบวนการที่มีอยู่เดิมโดยการใช้วิธีการคำนวณ ซึ่งเป็นเทคนิคในการแก้ปัญหาโดยใช้คอมพิวเตอร์ที่ขับเคลื่อนการสำรวจการออกแบบ [1] ด้วยกระบวนการออกแบบซ้ำที่ขับเคลื่อนด้วยกฎ [2] วิธีการนี้มีรากฐานมาจากการสร้างแบบจำลองอัลกอริธึมและพารามетริก อำนวยความสะดวกในการสำรวจอัตโนมัติ การวนซ้ำ และการเพิ่มประสิทธิภาพความเป็นไปได้ในการออกแบบ [3] ด้วยตัวเลือกมากมาย นักออกแบบสามารถเลือกโซลูชันที่เหมาะสมที่สุดหรือทางเลือกอื่นที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนาต่อไปได้ [4]

เจเนเรทีฟดีไซน์ในกระบวนการออกแบบอาคารสามารถมีส่วนตั้งแต่ช่วงก่อนการออกแบบ (Pre-Design), ช่วงการออกแบบร่าง (Schematic Design) และช่วงการพัฒนาแบบ (Design Development) จึงเหมาะกับการเจเนเรทีฟดีไซน์อาคารสำนักงานตามเกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพพลังงาน และสอดคล้องกับระบบเปลือกอาคาร (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 เจเนเรทีฟดีไซน์กับกระบวนการออกแบบสถาปัตยกรรม

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

แม้ว่าเจเนเรทีฟดีไซน์จะได้รับความนิยมมากขึ้น แต่ก็ยังได้รับความสนใจหลากหลาย มีการศึกษาวิจัยเพียงไม่กี่เรื่องเท่านั้นที่ดำเนินการในบริบทของการออกแบบสถาปัตยกรรม [22] นอกจากนี้ยังขาดการศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคหรือวิธีการเจเนเรทีฟดีไซน์ [17, 21] ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างทางความรู้และศักยภาพของการออกแบบเชิงสร้างสรรค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ในอาคารนอกเหนือจากแนวทางแบบเดิมๆ จึงดำเนินการวิจัยใช้วิธีการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ (Systematic Literature Review) ซึ่งเป็นรูปแบบการวิจัยชนิดหนึ่งในระดับทุติยภูมิ (Secondary Study) เป็นกระบวนการศึกษาผลงานวิจัย ได้คัดกรองเนื้อหาเจเนเรทีฟดีไซน์ (Generative Design Methods) และหัวข้อด้านประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficient Topics) ซึ่งจะช่วยระบุข้อค้นพบที่เกิดขึ้นใหม่ในหัวข้อประสิทธิภาพพลังงาน และการใช้วิธีการสร้างพลังงานในการวิจัยเกี่ยวกับเจเนเรทีฟดีไซน์ ส่งผลให้สามารถเข้าถึงความรู้ด้านเจเนเรทีฟดีไซน์ได้มากขึ้น เพื่อการประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ

การศึกษานี้ดำเนินการทบทวนอย่างเป็นระบบ (systematic review) ในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2566 โดยค้นหาสิ่งพิมพ์จากฐานข้อมูล ได้แก่ Scopus, Google Scholar และ Thai Journals Online การวิเคราะห์ 34 บทความ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ Descriptive and comparative qualitative analysis เพื่อตอบคำถาม: การประยุกต์ใช้วิธีเจเนเรทีฟดีไซน์สำหรับหัวข้อด้านประสิทธิภาพพลังงานมีอะไรบ้าง (What are the various applications of generative methods for energy efficiency topics?) โดยกระบวนการวิจัยดำเนินการตามแนวทาง Systematic reviews and Meta-Analyses (PRISMA) 4 ขั้นตอน (รูปที่ 2.2)

(1) ขั้นตอนการระบุข้อมูล (Identification phase): ใช้ฐานข้อมูล Scopus ค้นหาเอกสาร โดยใช้หัวข้อ + บทคัดย่อ + คำสำคัญ (title + abstract + keywords) ด้วยคำค้นหา (generative design) AND (design AND building) AND (energy) รวมถึงการค้นหาคำค้นหาคือ (generative design) AND (architecture) AND (energy) ฐานข้อมูลนี้ให้เอกสารรวม 312 รายการตั้งแต่ปี 1985-2023

ฐานข้อมูลอันดับ 2 คือ Google Scholar เป็นแหล่งทุติยภูมิหรือวรรณกรรมสีเทา (gray literature) เพื่อรวมเอกสารที่ตีพิมพ์จำกัด เช่น รายงาน วิทยานิพนธ์ บทความจากการประชุมทางวิชาการ และอื่นๆ ที่อาจไม่ได้ตีพิมพ์อย่างเป็นทางการ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อความครอบคลุมในการค้นหา ใช้คำค้นหา “(generative design) AND (design AND building) AND (energy)” ในเขตข้อมูลหัวข้อและบทคัดย่อ ได้ผลลัพธ์ 231 รายการระหว่างปี 2021 ถึง 2023

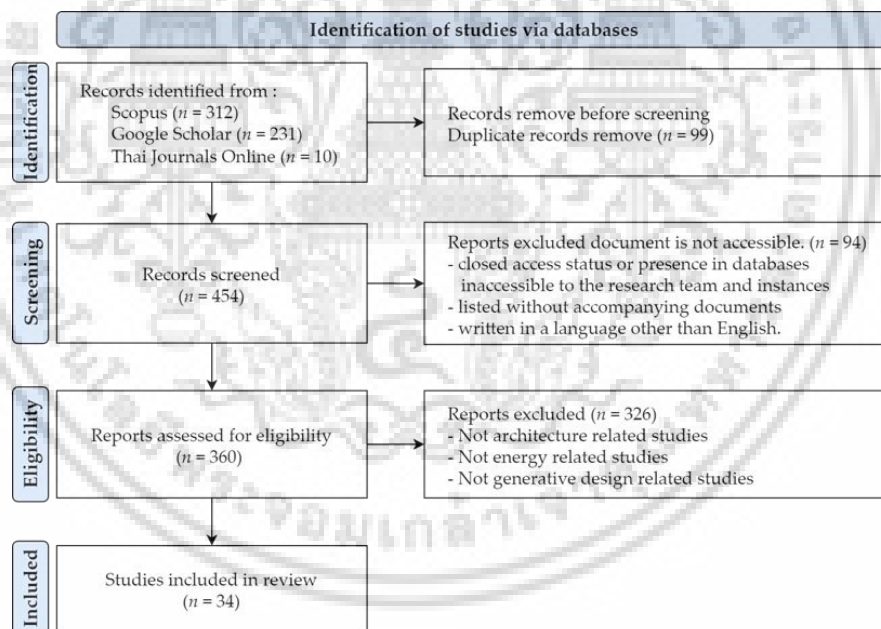
ฐานข้อมูลอันดับ 3 คือ Thai Journals Online (ThaiJO) เป็นฐานข้อมูลวิจัยระดับประเทศในประเทศไทย ประสิทธิภาพพลังงานในอาคารมีความสำคัญตั้งแต่การนำ Building Energy Code มาใช้ในปี 2020 เราจะยืนยันการใช้ generative design ในประเทศเพื่อการวิจัยในอนาคต การค้นหาใช้คำค้นหา “generative design” ในเขตข้อมูลหัวข้อและบทคัดย่อ และได้เอกสารจำนวน 10 รายการตั้งแต่ปี 2017 ถึง 2021

รวมแล้วได้เอกสาร 553 รายการระหว่างปี 1985 ถึง 2023 โดยเอกสารที่ซ้ำกัน 99 รายการ ในฐานข้อมูล Scopus และ Google Scholar ถูกตัดออกก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการคัดกรอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) **ขั้นตอนการคัดกรอง (Screening phase):** ผลการค้นหาเอกสารประกอบด้วยสิ่งตีพิมพ์ 454 รายการตั้งแต่ปี 1995 ถึง 2023 ที่ได้จากขั้นตอนการระบุข้อมูล ซึ่งนำมาพิจารณาในขั้นตอนการคัดกรอง มีการสแกนอย่างรวดเร็วเพื่อให้แน่ใจว่าเอกสารพร้อมใช้งาน จากการคัดกรองพบว่าเอกสาร 94 รายการถูกตัดออกเนื่องจากไม่สามารถเข้าถึงหรือไม่พร้อมใช้งาน โดยสาเหตุหลักมาจากการเป็นเอกสารแบบปิดการเข้าถึง (closed access) หรืออยู่ในฐานข้อมูลที่มีวิจัยไม่สามารถเข้าถึงได้ รวมถึงกรณีที่ไม่มีเอกสารแนบหรือเขียนในภาษาที่ไม่ใช่ภาษาอังกฤษ

(3) **ขั้นตอนการตรวจสอบคุณสมบัติ (Eligibility phase):** จากขั้นตอนการคัดกรองเหลือเอกสาร 360 รายการสำหรับการประเมินเพิ่มเติมเพื่อยืนยันความถูกต้องและความเป็นกลางของการทบทวน ทีมวิจัยได้ตรวจสอบเอกสารเพื่อความสอดคล้องกับคำถามวิจัย และได้ตัดเอกสารที่ไม่เกี่ยวข้องกับ generative design, สถาปัตยกรรม และพลังงานออกไป เหลือเพียง 34 รายการสำหรับการทบทวน

(4) **ขั้นตอนการรวมข้อมูล (Including phase):** หลังจากการพิจารณาอย่างรอบคอบและการอภิปรายอย่างละเอียดในกลุ่มผู้วิจัย สรุปเอกสารจำนวน 34 รายการ (ภาคผนวก ก)

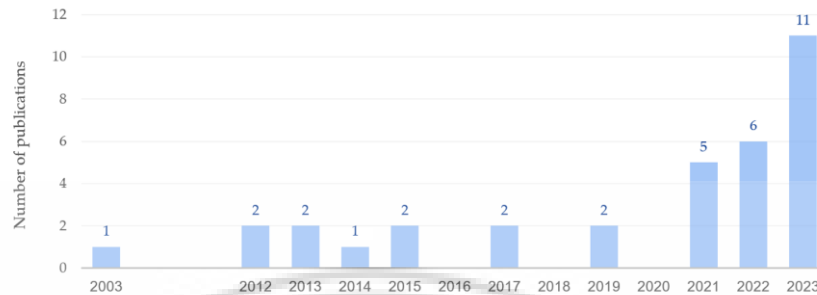


รูปที่ 2.2 systematic review using the PRISMA methodology

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

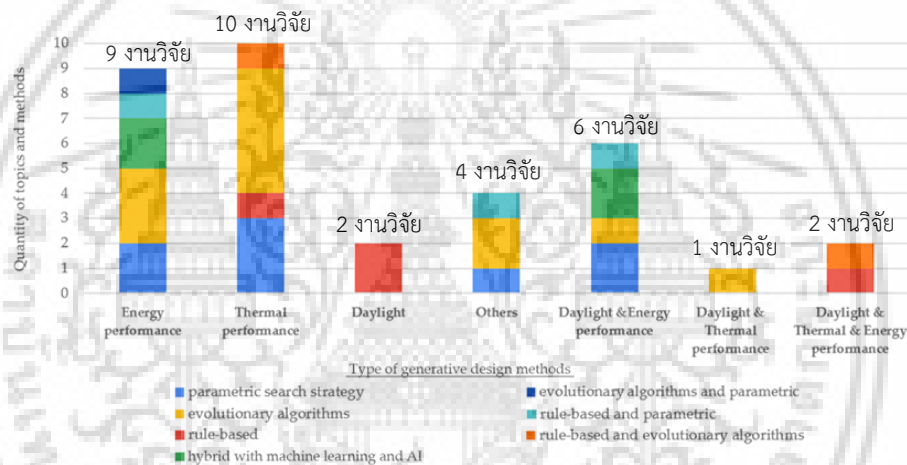
การประยุกต์ใช้วิธีเจเนเรทีฟดีไซน์สำหรับหัวข้อด้านประสิทธิภาพพลังงานถูกสำรวจในงานวิจัย 34 ฉบับจากปี 2003 ถึง 2023 (รูปที่ 2.3) โดยที่มีการศึกษาเพิ่มขึ้นอย่างยิ่งยวดในปี 2021-2023 ภาพรวมการวิจัยด้านพลังงานกับ generative design จัดเรียงหัวข้อจากสูงสุดไปต่ำสุดตามจำนวนการศึกษา หัวข้อที่มีการศึกษาอย่างกว้างขวางที่สุดคือ thermal performance, Energy เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

performance, หัวข้ออื่นๆ (life cycle assessment, embodied emissions, solar access, life cycle carbon footprint and life cycle costs) และน้อยที่สุดก็คือ Daylighting นอกเหนือจากการวิจัยหัวข้อเดียวแล้วยังมีการวิจัยพร้อมกันหลายเรื่อง (รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.3 งานวิจัย 34 ฉบับจากปี 2003 ถึง 2023

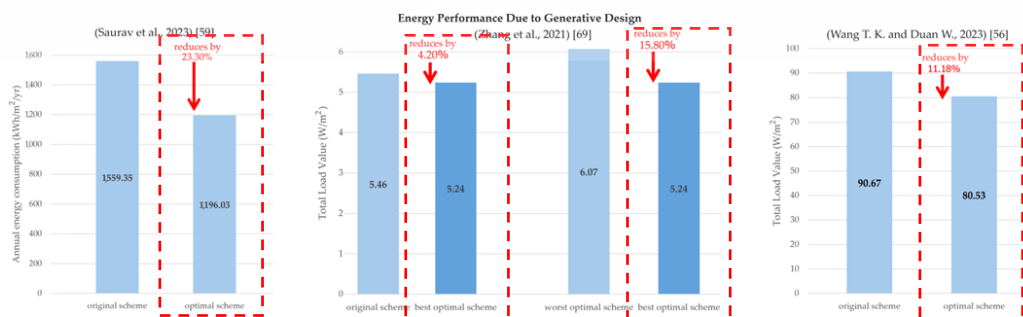
ที่มา: ผู้วิจัย (2567)



รูปที่ 2.4 การประยุกต์ใช้วิธีเจเนอเรทีฟดีไซน์สำหรับหัวข้อด้านประสิทธิภาพพลังงาน

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

หัวข้อ Energy performance ผลลัพธ์ที่ได้จากเจเนอเรทีฟดีไซน์เมื่อเทียบกับวิธีการออกแบบเดิม ประสิทธิภาพพลังงานที่ดีที่สุดประหยัดพลังงานได้ถึง 23.30% (Saurav et al., 2023) [54] และ ประสิทธิภาพที่น้อยที่สุดประหยัดพลังงานได้ 4.2% (Zhang et al., 2021) [9] (รูปที่ 2.5)

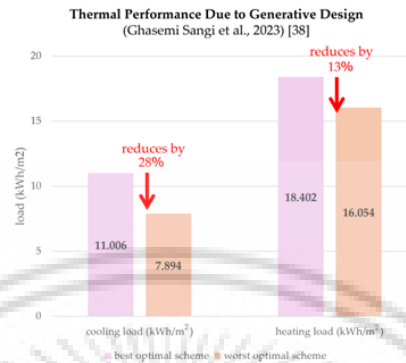


รูปที่ 2.5 หัวข้อ Energy performance

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

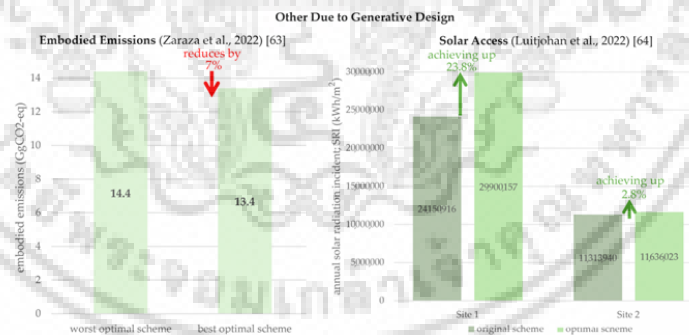
หัวข้อ Thermal performance ผลลัพธ์ที่ได้จากเจเนทีฟดีไซน์เมื่อเทียบกับวิธีการออกแบบเดิม โหลดการทำความเย็นและการทำความร้อนสามารถลดลงได้ถึง 28% และ 13% (Ghasemi Sangi et al., 2023) [22] (รูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 หัวข้อ Thermal performance

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

หัวข้ออื่นๆ (life cycle assessment, embodied emissions, solar access, life cycle carbon footprint and life cycle costs) ผลลัพธ์ที่ได้จากเจเนทีฟดีไซน์เมื่อเทียบกับวิธีการออกแบบเดิม การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ซ่อนอยู่ (embodied emissions) สามารถลดลงได้ 7% (Zaraza et al., 2022) [55] และการรับพลังงานแสงอาทิตย์สามารถเพิ่มขึ้นได้ถึง 24% (Luitjohan et al., 2022) [56] (รูปที่ 2.7)

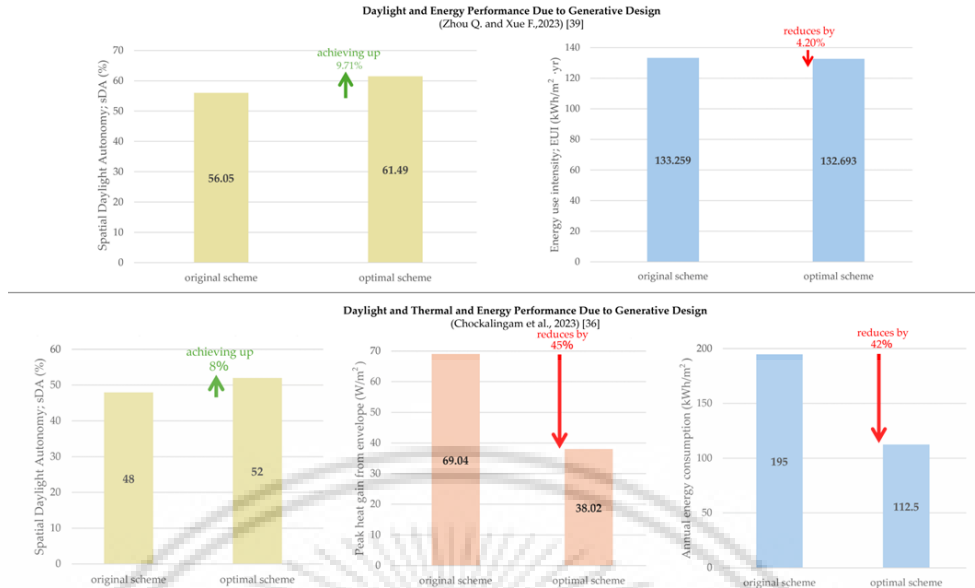


รูปที่ 2.7 หัวข้ออื่นๆ

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

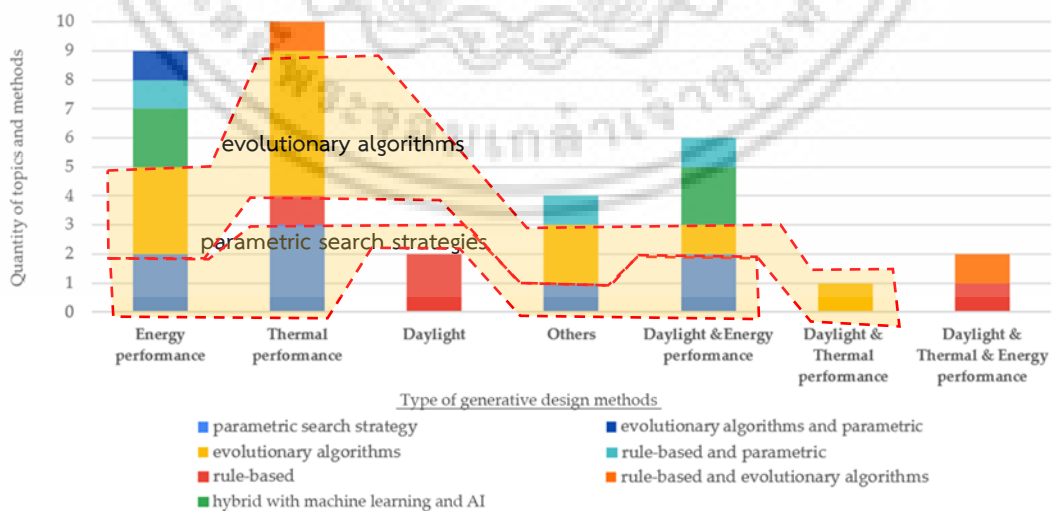
หัวข้อผสมหลายเรื่อง ผลลัพธ์ที่ได้จากเจเนทีฟดีไซน์เมื่อเทียบกับวิธีการออกแบบเดิม ประสิทธิภาพการใช้แสงธรรมชาติและพลังงานสามารถเพิ่มขึ้นได้ถึง 9.71% ของพื้นที่ที่ใช้แสงธรรมชาติและประหยัดพลังงานได้ 0.42% (Zhou Q. และ Xue F., 2023) [23] ประสิทธิภาพการใช้แสงธรรมชาติและพลังงานความร้อนสามารถเพิ่มขึ้นได้ถึง 8% และพื้นที่ที่ใช้แสงธรรมชาติสามารถลดความร้อนสูงสุดจากเปลือกอาคารได้ 45% และประหยัดพลังงานได้ 42% (Chockalingam et al., 2023) [20] (รูปที่ 2.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 หัวข้อผสมหลายเรื่อง
ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

หัวข้อเปลือกอาคารอยู่ในด้าน Thermal performance มีการศึกษามากสุด ภาพรวม Generative design methods for energy efficient in building มีการประยุกต์ใช้วิธีการกำเนิดสำหรับหัวข้อประสิทธิภาพพลังงานหลายวิธี Evolutionary algorithms เป็นมาตรฐานที่ใช้บ่อยที่สุดในวิธีการออกแบบทั่วไป ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา Parametric search strategies ได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีวิธีการ Parametric with evolutionary algorithms, Rule-based with evolutionary algorithms, Rule-based with parametric algorithms และปัจจุบัน Machine learning and AI กำลังได้รับความสนใจ (รูปที่ 2.9)



รูปที่ 2.9 แผนภูมิปริมาณและประเภทของวิธีการในหัวข้อประสิทธิภาพพลังงาน
ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 เจเนเรทีฟดีไซน์ทั้ง 4 ประเภท และแนวโน้มการใช้งาน 2 ประเภทในปัจจุบัน

จากการทบทวนอย่างเป็นระบบ (systematic review) การประยุกต์ใช้วิธีเจเนเรทีฟดีไซน์สำหรับหัวข้อด้านประสิทธิภาพพลังงาน แบ่งเป็น 4 วิธีหลัก และแบ่งย่อยออกเป็นวิธีย่อย ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 generative design methods for energy efficient in building.

Energy Efficient Topics	Generative Design Methods						
	1 Parametric Search Strategy	1 + 2 Parametric + Rule- Based	1+3 Evolutionary Algorithms + Parametric	2 Rule-Based	2 + 3 Rule-Based + Evolutionary Algorithms	3 Evolutionary Algorithms	4 Hybrid with Machine Learning and AI
Energy Performance	Parametric	Shape grammars and parametric	Evolutionary algorithms and parametric	-	-	NSGA-II, genetic algorithm	Machine learning and AI with parametric and rule-based, ANNs use BRBNN with parametric
Thermal Performance	Parametric	-	-	Rule-based	EPSAP algorithm and rule-based	EPSAP algorithm, Evolutionary algorithms	-
Daylight	-	-	-	Cellular automata	-	-	-
Others	Parametric	Cellular automata and parametric	-	-	-	NSGA-II	-
Daylight and Energy Performance	Parametric	Parametric and rule-based	-	-	-	NSGA-II	AI with rule-base & genetic algorithms and RBFOpt, Reinforcement learning and AI and parametric
Daylight and Thermal Performance	-	-	-	-	-	Evolutionary algorithms	-
Daylight and Thermal and Energy Performance	-	-	-	Shape grammar	Shape grammars and genetic algorithm	-	-

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

วิธีที่ 1 Rule-based

Rule-Based Generative Design มีพื้นฐานมาจากชุดของกฎหรือเงื่อนไขที่กำหนดไว้อย่างชัดเจน โดยอัลกอริทึมที่ใช้ในการสร้างมักมีความเรียบง่าย [57] เช่น การกำหนดรูปแบบหรือข้อจำกัดเฉพาะ เมื่อระบบปฏิบัติตามกฎ ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกออกแบบอัตโนมัติตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้

วิธีที่ 2 parametric search strategy

พารามेटริกดีไซน์ (Parametric Design) เป็นส่วนย่อยของระบบการออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์ Computer-Aided Design (CAD) ที่ช่วยในการสร้างสรรค์แนวทางการออกแบบใหม่ๆ [58] ทำแนวทางการออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์จัดการคุณสมบัติทางเรขาคณิตของการออกแบบเป็นตัวแปร ขนาด มุม และคุณสมบัติทางเรขาคณิต [59] พารามेटริกดีไซน์ช่วยให้นักออกแบบสามารถมุ่งเน้นไปที่ Formative and Generative Design โดยใช้แอปพลิเคชันเชิงพารามิเตอร์ขั้นสูง [60] เช่น Rhino และ Grasshopper หรือ Revit และ Dynamo

วิธีที่ 3 Evolutionary Algorithms

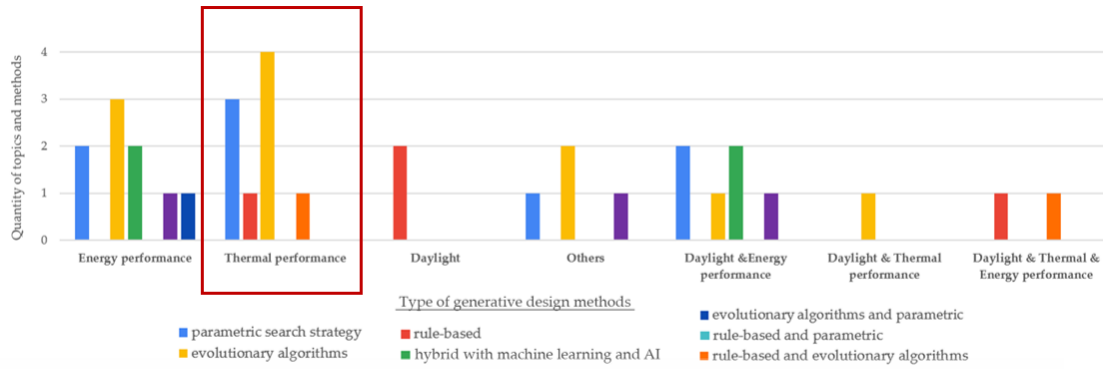
การออกแบบเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Design) เป็นแนวทางที่ใช้เทคนิคการคำนวณเชิงวิวัฒนาการในขั้นตอนต่าง ๆ อัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการสามารถจัดการกับความซับซ้อนของปัญหาการออกแบบที่มักมีตัวแปรจำนวนมากและมีทางเลือกที่เป็นไปได้หลากหลาย [61] สร้างตัวเลือก การคัดเลือกและพัฒนา ทำให้สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของการออกแบบและค้นพบวิธีการที่เหมาะสมที่สุด

วิธีที่ 4 Machine learning and artificial intelligence

การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) และปัญญาประดิษฐ์ (AI) ใช้เทคโนโลยีการเรียนรู้ของเครื่องและปัญญาประดิษฐ์เพื่อสกัดข้อมูลเชิงลึกจากข้อมูลการออกแบบที่มีอยู่ ซึ่งช่วยให้ระบบสามารถตัดสินใจและคาดการณ์ทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดได้ โดยการสอนอัลกอริทึมให้แยกแยะและปรับปรุงการออกแบบตามเป้าหมายที่กำหนด [62] วิธีการที่โดดเด่นได้แก่ เครื่องข่ายประพิกษ์เชิงกำเนิด (GAN), ตัวเข้ารหัสอัตโนมัติแบบแปรผัน (VAE) [63] และโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) [64]

มี 2 วิธีการเจเนเรทีฟดีไซน์ หัวข้อเปลือกอากาศอยู่ในด้าน Thermal Performance มีการศึกษามากที่สุด โดยมีวิธีการ Evolutionary Algorithms ได้รับความนิยมมากที่สุด จำนวน 4 บทความ เป็นมาตรฐานถูกใช้มาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และ Parametric Search Strategies เป็นอันดับสอง จำนวน 3 บทความ แต่การใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงไม่กี่ปีมานี้ (ส่วนใหญ่การใช้งานอยู่ในช่วงปี 2021-2023) (รูปที่ 2.10)

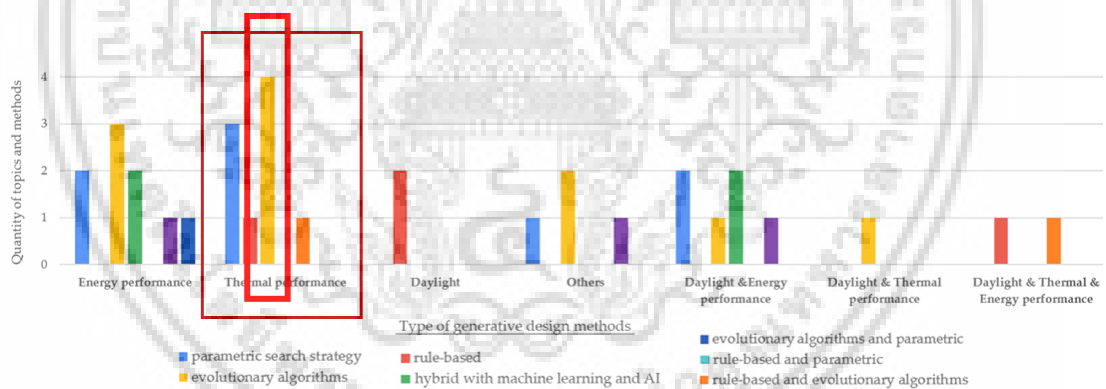
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 วิธีการเจเนเรทีฟดีไซน์ตามหัวข้อด้านพลังงาน

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

การประยุกต์ใช้พาราเมตริกดีไซน์ (Parametric design) เป็นที่น่าสนใจในปัจจุบัน (รูปที่ 2.11) จากการได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงไม่นานมานี้ เนื่องจากแพลตฟอร์มซอฟต์แวร์ที่ใช้งานง่าย เช่น Grasshopper (Rhinceros3D), Ladybug (Grasshopper) และ Julia (AutoCAD) [26] ปัจจัยที่ช่วยส่งเสริมการเติบโตของ Parametric Design นั้นยังมาจากการพัฒนาภาษาเฉพาะสำหรับซอฟต์แวร์การสร้างแบบจำลองสามมิติ เช่น Grasshopper สำหรับ Rhinceros และ Dynamo สำหรับ Revit สนับสนุนให้เกิดการเติบโตของพาราเมตริกดีไซน์ [65]



รูปที่ 2.11 generative design with parametric design

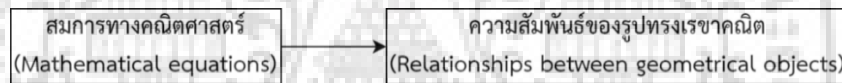
ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 เจเนเรทีฟดีไซน์ด้วยวิธีพารามेटริกดีไซน์เพื่อการสร้างรูปทรงอาคาร

1) พารามेटริกดีไซน์ เพื่อการสร้างรูปทรงอาคาร

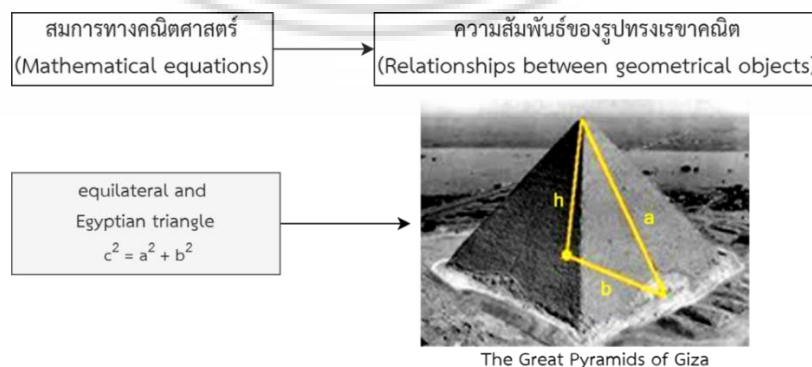
พารามेटริกดีไซน์ (Parametric design) เป็นแนวทางการออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ที่จัดการคุณสมบัติทางเรขาคณิตของการออกแบบเป็นตัวแปร ขนาด มุม และคุณสมบัติทางเรขาคณิต [59] ระบบการออกแบบเชิงพารามेटริก (Parametric design system) ประกอบด้วยแบบจำลองทางเรขาคณิตที่เข้ารหัสคุณลักษณะทางรูปทรงที่เป็นลักษณะร่วมของการออกแบบในพื้นที่ของคำตอบ แบบจำลองนี้ประกอบไปด้วยความสัมพันธ์ทางโทโพโลยี (Topological) ระหว่างส่วนต่าง ๆ ของการออกแบบและการเปลี่ยนแปลงขนาดของส่วนเหล่านั้น ความสัมพันธ์เหล่านี้ถูกกำหนดเป็นชุดของสมการที่มีตัวแปร (ซึ่งเรียกว่าพารามิเตอร์ ทำให้ที่มาคำว่า "พารามेटริก") แบบจำลองจะถูกรวบรวมด้วยสมการ และสามารถสร้างการออกแบบที่แตกต่างกันได้โดยปรับค่าพารามิเตอร์ในสมการ [66] เทคนิคพารามेटริกดีไซน์เป็นการผสมผสานระหว่างวิธีการ คณิตศาสตร์ ตรรกะ และเรขาคณิต [67] จากข้อมูลตั้งนั้นพารามेटริกดีไซน์ (Parametric design) มีความสัมพันธ์ของสมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical equations) และ ความสัมพันธ์ของรูปทรงเรขาคณิต (Relationships between geometrical objects) [68] (รูปที่ 2.12)



รูปที่ 2.12 พารามेटริกดีไซน์ (Parametric design)

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

พารามेटริกในประวัติศาสตร์สถาปัตยกรรม ได้แก่ พารามेटริกในสถาปัตยกรรมอียิปต์โบราณ การออกแบบพารามิเตอร์รูปสามเหลี่ยมพื้นฐานสามรูป ได้แก่ สามเหลี่ยม 3-4-5 และสามเหลี่ยมด้านเท่า ซึ่งรู้จักกันในชื่อสามเหลี่ยมอียิปต์ Egyptian triangle และพารามेटริกในสถาปัตยกรรมกรีกและโรมันโบราณคืออัตราส่วนทองคำ Golden Ratio [68] (รูปที่ 2.13)

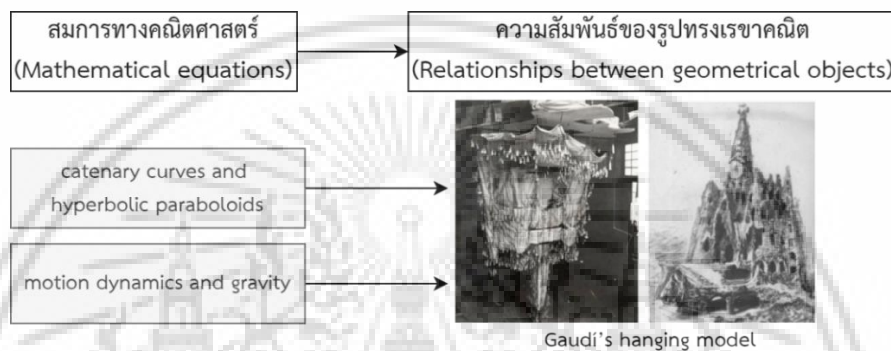


รูปที่ 2.13 พารามेटริกในสถาปัตยกรรมอียิปต์โบราณ

ที่มา: ผู้วิจัยปรับปรุงจาก Azmy, A., & Ali, M. (2023) [68]

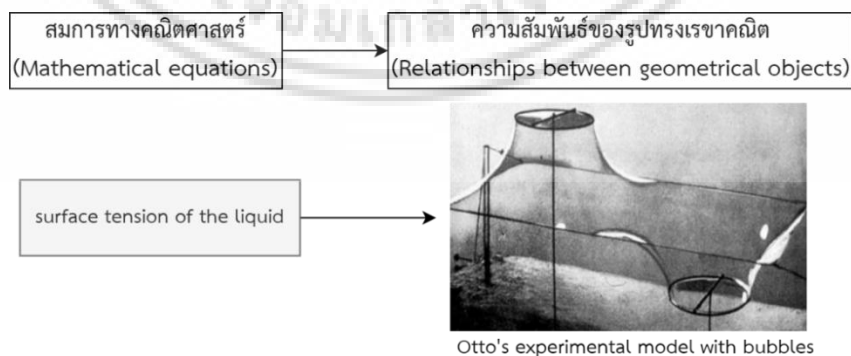
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ประสงค์การค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

"การค้นหารูปทรง" (Form-Finding) Antoni Gaudí ได้ใช้แบบจำลองแรงในลักษณะกลับหัวในการสำรวจรูปทรงเรขาคณิตของซุ้มโค้งแบบเส้นแควทนารี (catenary arches) ซึ่งรูปทรงเหล่านี้ถูกใช้ในโครงการของเขา เช่น มหาวิหารและโบสถ์ Expiatory Church of the Holy Family และโบสถ์ Colònia Güell โดยใช้วิธีการที่แปลกใหม่ซึ่งอิงตามพลศาสตร์การเคลื่อนไหวและแรงโน้มถ่วง (motion dynamics and gravity) [69] เส้นโค้งแควทนารีเชิงพาราเมตริก (parametric catenary curves) และพาราโบลอยด์ไฮเพอร์โบลิกเชิงพาราเมตริก (parametric hyperbolic paraboloids) [70] (รูปที่ 2.14)



รูปที่ 2.14 แบบจำลองแรงกลับหัวของ Antoni Gaudí
ที่มา: ผู้วิจัยปรับปรุงจาก Makert, R., & Alves, G. (2016) [70]

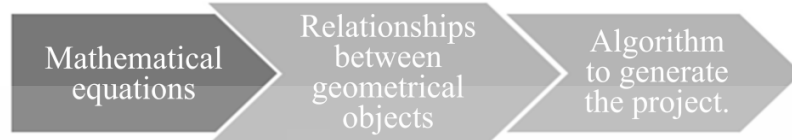
Frei Otto เชี่ยวชาญในโครงสร้างแบบเบา (lightweight tensile) และโครงสร้างแบบเมมเบรน (membrane structures) ซึ่งรูปทรงเหล่านั้นได้รับการพัฒนาจากการทดลองฟองสบู่ โดยใช้แรงตึงผิวของของเหลวเพื่อหาพื้นผิวที่น้อยที่สุดในการคลุมรูปร่างปิด [69] (รูปที่ 2.15) ดังนั้นการออกแบบเชิงพาราเมตริก ประกอบด้วย ความสัมพันธ์สมการทางคณิตศาสตร์ ที่กำหนดเป็นชุดของสมการที่มีตัวแปร เพื่อสร้างรูปทรงอาคาร



รูปที่ 2.15 การทดลองฟองสบู่ของ Frei Otto
ที่มา: ผู้วิจัยปรับปรุงจาก Zexin, S., & Mei, H. (2023) [69]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

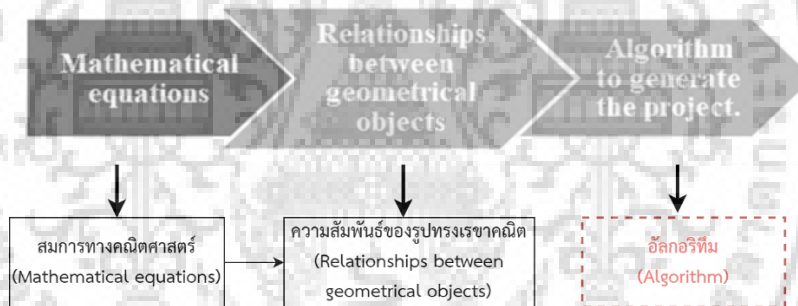
พารามेटริกดีไซน์ (Parametric design) มีความสัมพันธ์ของสมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical equations) และ ความสัมพันธ์ของรูปทรงเรขาคณิต (Relationships between geometrical objects) ปัจจุบันเป็นปัจจุบันยุคดิจิทัล Computer-Aided Design (CAD) technologies มีอัลกอริทึม (Algorithm) [68] (รูปที่ 2.16)



รูปที่ 2.16 พารามेटริกดีไซน์ (Parametric design)

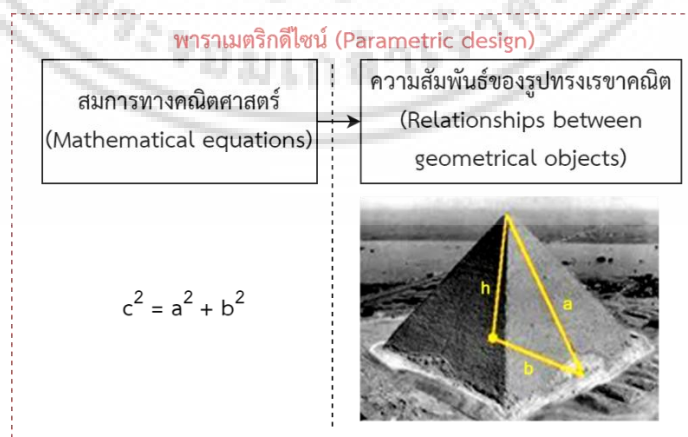
ที่มา: Azmy, A., & Ali, M. (2023) [68]

ดังนั้นพารามेटริกดีไซน์ (Parametric design) จากสมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical equations) และ ความสัมพันธ์ของรูปทรงเรขาคณิต (Relationships between geometrical objects) มีอัลกอริทึม (Algorithm) มีบทบาทสำคัญในการประมวลผลข้อมูลทางคณิตศาสตร์และเรขาคณิต (รูปที่ 2.17, 2.18)



รูปที่ 2.17 พารามेटริกดีไซน์ยุคดิจิทัล

ที่มา: ผู้วิจัยปรับปรุงจาก Azmy, A., & Ali, M. (2023) [68]



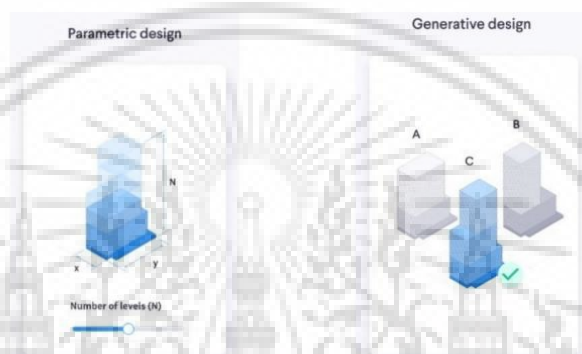
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์พารามेटริกดีไซน์

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เจเนเรทีฟดีไซน์ ด้วยวิธีพารามेटริกดีไซน์ เพื่อการสร้างรูปทรงอาคาร

การออกแบบเจเนเรทีฟดีไซน์ด้วยวิธีการพารามेटริก เป็นสร้างแบบจำลองเรขาคณิตควบคุมด้วยสมการที่มีพารามิเตอร์ (ตัวแปร) เพื่อสร้างตัวเลือกการออกแบบทั้งหมดโดยอัตโนมัติตามเงื่อนไขที่ระบุ ด้วยชุดของขั้นตอนอัลกอริธึม โดยพารามेटริกดีไซน์ (Parametric Design) สร้างโมเดลที่อัปเดตโดยอัตโนมัติเมื่อเปลี่ยนตัวแปร (พารามิเตอร์) แต่ยังคงวิเคราะห์ผลลัพธ์ด้วยตนเอง แต่เจเนเรทีฟดีไซน์ (Generative Design) มีอัลกอริทึมที่สร้างทางเลือกการออกแบบหลายพันแบบอัตโนมัติและช่วยเลือกแบบที่ดีที่สุด [71] (รูปที่ 2.19, 2.20)



รูปที่ 2.19 Parametric design VS Generative design

ที่มา: Bergman, A. (2022) [71]



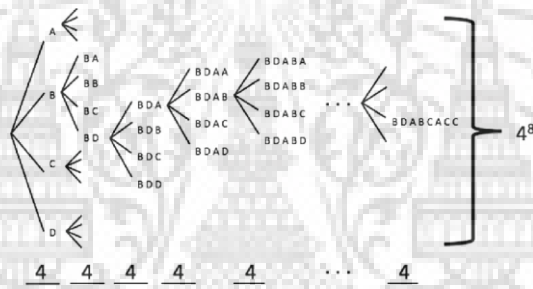
รูปที่ 2.20 การออกแบบเจเนเรทีฟดีไซน์ด้วยวิธีการพารามेटริก

ที่มา: ผู้วิจัยปรับปรุงจาก Bergman, A. (2022). [71]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัลกอริทึม (Algorithm) คือขั้นตอนที่ใช้ในการแก้ปัญหาหรือการคำนวณ อัลกอริทึมทำหน้าที่เป็นรายการคำสั่งที่ชัดเจนซึ่งดำเนินการตามขั้นตอนที่กำหนดไว้ทีละขั้นตอนในรูทีนที่ใช้ฮาร์ดแวร์หรือซอฟต์แวร์ อัลกอริทึมถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในทุกสาขาของไอที ในทางคณิตศาสตร์ การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และวิทยาการคอมพิวเตอร์ อัลกอริทึมมักจะหมายถึงขั้นตอนเล็กๆ น้อยๆ ที่ใช้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นซ้ำ อัลกอริทึมยังใช้เป็นข้อมูลจำเพาะในการดำเนินการประมวลผลข้อมูลและมีบทบาทสำคัญในระบบอัตโนมัติ [72]

เพื่อสร้างตัวเลือกการออกแบบทั้งหมดจากเงื่อนไข เจเนเรทีฟดีไซน์ (Generative design) ตัวอย่างคือ กฎการคูณ (Rule of multiplication) หาจำนวนความเป็นไปได้ทั้งหมด (รูปที่ 2.21, 2.22) 4^4 คือการคำนวณจำนวนความเป็นไปได้ทั้งหมดที่เกิดจากการมี 4 ตัวเลือกในแต่ละกรณี และมีทั้งหมด 8 กรณี (หรือ 8 ตัวเลือก) $4^4=4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 4$ ดังนั้นจำนวนความเป็นไปได้ทั้งหมดที่เกิดคือ 65,536 ความเป็นไปได้ [73]



รูปที่ 2.21 Multiplication principle

ที่มา: Lockwood, E., Swinyard, C. A., & Caughman, J. S. (2015) [73]



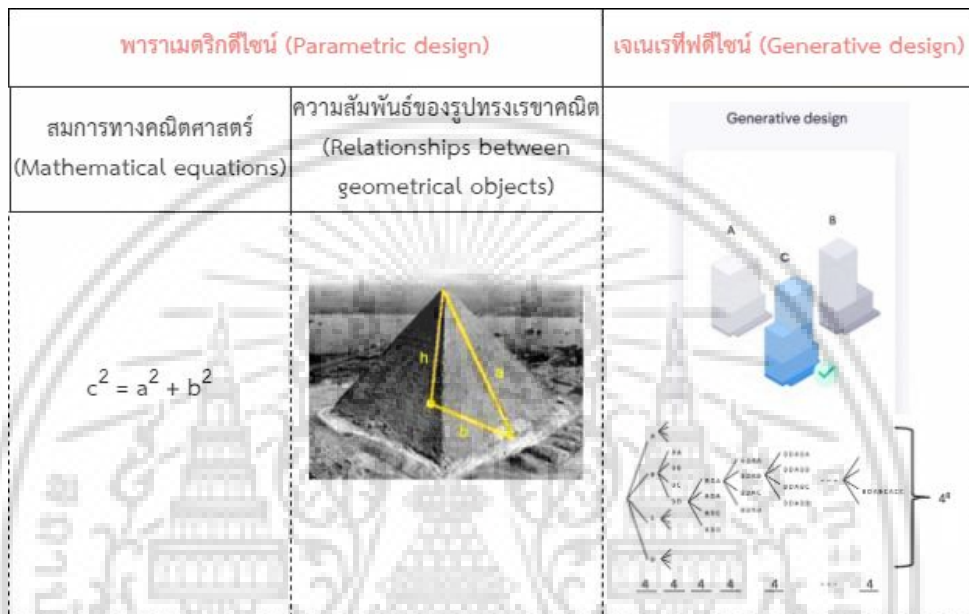
รูปที่ 2.22 การออกแบบเจเนเรทีฟดีไซน์ด้วยวิธีการพารามेटริก

ที่มา: ผู้วิจัยปรับปรุงจาก Bergman, A. (2022). [71] และ Lockwood, E., Swinyard, C. A., &

Caughman, J. S. (2015) [73]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจัดเรียงความเป็นไปได้ในการออกแบบ เจเนเรทีฟดีไซน์ (Generative design) โดยการนำกฎการคูณ (Rule of Multiplication) มาใช้ในกระบวนการออกแบบ ช่วยให้คำนวณจำนวนความเป็นไปได้ทั้งหมดในการออกแบบได้ จากพารามิเตอร์ดีไซน์ (Parametric design) จากสมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical equations) และ ความสัมพันธ์ของรูปทรงเรขาคณิต (Relationships between geometrical objects) ดังนั้นจึงได้กรอบเจเนเรทีฟดีไซน์ด้วยวิธีพารามิเตอร์ (รูปที่ 2.23)



รูปที่ 2.23 การออกแบบเจเนเรทีฟดีไซน์ด้วยวิธีการพารามิเตอร์

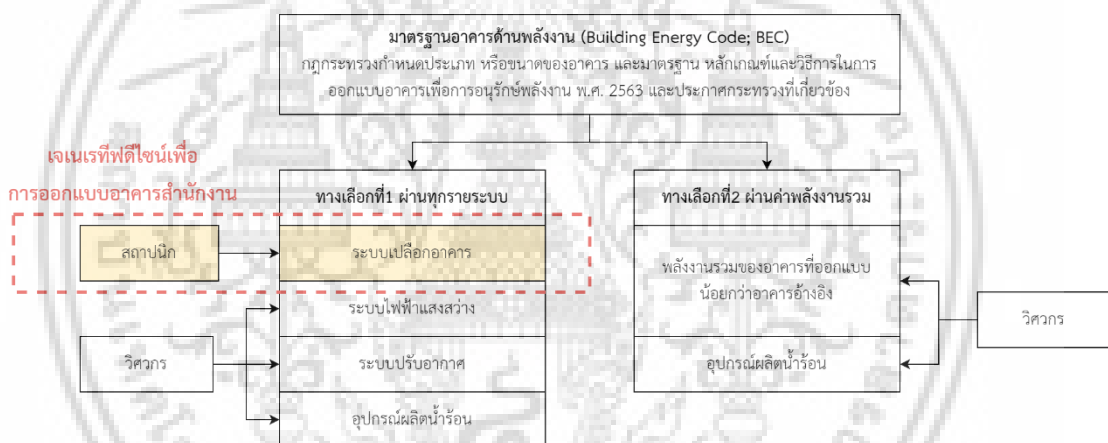
ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สูตรมาตรฐานพลังงานกับกระบวนการออกแบบอาคาร

2.2.1 สูตรระบบเปลือกอาคารตามมาตรฐานพลังงาน BEC

ระบบเปลือกอาคาร (Building Envelope) ตามกฎหมายอนุรักษ์พลังงานของไทย [54] หรือเกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงาน (Building Energy Code: BEC) การจากผ่านเกณฑ์ทางเลือกที่ 1 แบบรายระบบ ได้แก่ ระบบเปลือกอาคาร ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ และอุปกรณ์ผลิตน้ำร้อน ในที่นี้มีเพียงระบบเปลือกอาคารที่เป็นงานหลักของสถาปนิก ส่วนงานอื่นๆ เกี่ยวข้องกับวิศวกรเป็นหลัก ซึ่งเปลือกอาคารเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานในอาคาร มีบทบาทในการควบคุมการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างภายในและภายนอกอาคาร ดังนั้นจึงศึกษาระบบเปลือกอาคาร ตามช่องว่างการวิจัยเจเนเรทีฟดีไซน์เพื่อการออกแบบอาคารสำนักงานตามมาตรฐานพลังงาน BEC (รูปที่ 2.24)



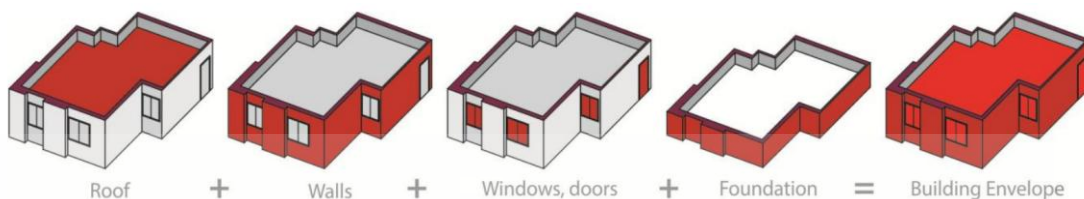
รูปที่ 2.24 เจเนเรทีฟดีไซน์เพื่อการออกแบบอาคารสำนักงานตามมาตรฐานพลังงาน BEC

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

สูตรการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบเปลือกอาคาร (Overall Thermal Transfer Value: OTTV) พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการวัดและประเมินประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคาร เพื่อควบคุมการใช้พลังงานในอาคารให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดย American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers หรือ ASHRAE ได้เสนอข้อกำหนด OTTV เป็นครั้งแรกในมาตรฐาน 90 เมื่อปี 1975 สมการ OTTV ทั่วไปถูกนำมาใช้ในสหรัฐอเมริกา สิงคโปร์ และภูมิภาคอื่นๆ ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ แนวคิดของ OTTV มีในระดับสากลใช้ในหลายประเทศเพื่อส่งเสริมประสิทธิภาพด้านพลังงานในอาคารและควบคุมการใช้พลังงานของอาคารโดยมาตรฐาน OTTV เป็นก้าวแรกสู่เป้าหมายนี้ [74-75]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบางนิยาม Overall Thermal Transfer Value (OTTV) คือเปลือกของอาคารถูกปิดล้อมไว้อย่างสมบูรณ์ ประกอบด้วยสองค่า Envelope Thermal Transfer Value (ETTV) ผ่านผนัง และ Roof Thermal Transfer Value (RTTV) ผ่านหลังคา [76] (รูปที่ 2.25)



รูปที่ 2.25 ระบบเปลือกอาคาร (Building Envelope)

ที่มา: Rawal, R., Kumar, D., Pandya, H., Airan, K. (2018). [76]

ค่า OTTV ที่ต่ำ แสดงถึงการถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคารน้อย ดังนั้นอาคารสามารถรักษาอุณหภูมิภายในให้คงที่ได้ง่าย ไม่ต้องใช้ระบบปรับอากาศมาก แต่ค่า OTTV ที่สูง จะมีการถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคารมาก อาคารนั้นจะสูญเสียความร้อนหรือรับความร้อนจากภายนอกได้ง่าย ส่งผลต่ออุณหภูมิภายในอาคารที่เปลี่ยนแปลงบ่อย ดังนั้นการออกแบบอาคารที่มีค่า OTTV ต่ำ จะช่วยลดภาระงานพลังงานและค่าใช้จ่ายของระบบปรับอากาศได้

จากประกาศกระทรวง เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการคำนวณในการออกแบบอาคารแต่ละระบบ การใช้พลังงานโดยรวมของอาคารและการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่าง ๆ ของอาคาร เรื่อง กำหนดค่ามาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2564 [32] ระบบเปลือกอาคาร (Building Envelope System) ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ประกอบด้วย

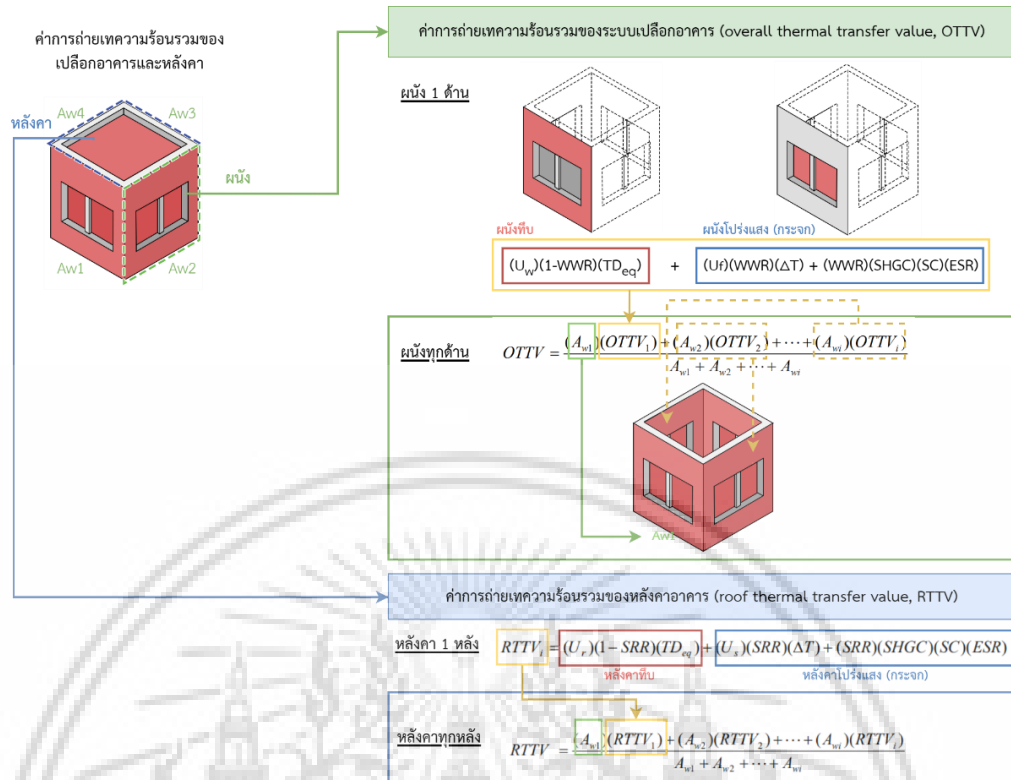
- 1) ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบเปลือกอาคาร (Overall Thermal Transfer Value: OTTV) ค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานอาคารสำนักงานไม่เกิน 50 วัตต์ต่อตารางเมตร
- 2) ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (Roof Thermal Transfer Value: RTTV) ค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานอาคารสำนักงานไม่เกิน 10 วัตต์ต่อตารางเมตร

ตารางที่ 2.2 ค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานระบบเปลือกอาคาร ประเภทอาคารสำนักงานหรือที่ทำการ

ระบบเปลือกอาคาร	ค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน
ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคาร (overall thermal transfer value; OTTV)	ไม่เกิน 50 วัตต์ต่อตารางเมตร
ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (roof thermal transfer value; RTTV)	ไม่เกิน 10 วัตต์ต่อตารางเมตร

ที่มา: กระทรวงพลังงาน (2564) [82]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 สูตรระบบเปลือกอาคาร¹

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

¹ การแปลงสูตรระบบเปลือกอาคารจากสูตรตามประกาศกระทรวง [83] ได้ลดรูปเพื่อการใช้งาน

$$\begin{aligned}
 OTTV &= \frac{(A_{w1})(OTTV_1) + (A_{w2})(OTTV_2) + \dots + (A_{wn})(OTTV_n)}{A_{w1} + A_{w2} + \dots + A_{wn}} \\
 OTTV_1 &= (U_w)(1 - WWR)(TDeq) + (U_f)(WWR)(\Delta T) + (WWR)(SHGC)(SC)(ESR) \\
 &= ((U_w) \left(1 - \frac{glass Ai}{Ai}\right) (TDeq) + (U_f) \left(\frac{glass Ai}{Ai}\right) (\Delta T) + \left(\frac{glass Ai}{Ai}\right) (SHGC)(SC)(ESR)) \\
 &= (U_w) \left(\frac{Ai - glass Ai}{Ai}\right) (TDeq) + \left(\frac{U_f \times glass Ai \times \Delta T}{Ai}\right) + \left(\frac{glass Ai \times SHGC \times SC \times ESR}{Ai}\right) \\
 &= \left(\frac{U_w \times (Ai - glass Ai) \times TDeq}{Ai}\right) + \left(\frac{U_f \times glass Ai \times \Delta T}{Ai}\right) + \left(\frac{glass Ai \times SHGC \times SC \times ESR}{Ai}\right) \\
 &\quad * Ai - glass Ai = opaque Ai \\
 &= \left(\frac{U_w \times opaque Ai \times TDeq}{Ai}\right) + \left(\frac{U_f \times glass Ai \times \Delta T}{Ai}\right) + \left(\frac{glass Ai \times SHGC \times SC \times ESR}{Ai}\right) \\
 \frac{HT}{\Delta T} &= OTTV_1 = \left(\frac{U_w \times opaque Ai \times TDeq}{Ai}\right) + \left(\frac{U_f \times glass Ai \times \Delta T}{Ai}\right) + \left(\frac{glass Ai \times SHGC \times SC \times ESR}{Ai}\right) \\
 HT &= \left(\frac{U_w \times opaque Ai \times TDeq}{Ai}\right) + \left(\frac{U_f \times glass Ai \times \Delta T}{Ai}\right) + \left(\frac{glass Ai \times SHGC \times SC \times ESR}{Ai}\right) \\
 OTTVs &= \frac{A_1 \left(\frac{HT_{A1}}{\Delta T}\right) + A_2 \left(\frac{HT_{A2}}{\Delta T}\right) + A_3 \left(\frac{HT_{A3}}{\Delta T}\right) + \dots + A_n \left(\frac{HT_{An}}{\Delta T}\right)}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} \\
 OTTVs &= \frac{HT_{A1} + HT_{A2} + HT_{A3} + \dots + HT_{An}}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} \\
 OTTVs &= \left(\frac{U_w \times opaque A_1 \times TDeq}{Ai}\right) + \left(\frac{U_f \times glass A_1 \times \Delta T}{Ai}\right) + \left(\frac{glass A_1 \times SHGC \times SC \times ESR}{Ai}\right) \\
 &\quad + \left(\frac{U_w \times opaque A_2 \times TDeq}{Ai}\right) + \left(\frac{U_f \times glass A_2 \times \Delta T}{Ai}\right) + \left(\frac{glass A_2 \times SHGC \times SC \times ESR}{Ai}\right) \\
 &\quad + \left(\frac{U_w \times opaque A_3 \times TDeq}{Ai}\right) + \left(\frac{U_f \times glass A_3 \times \Delta T}{Ai}\right) + \left(\frac{glass A_3 \times SHGC \times SC \times ESR}{Ai}\right) \\
 &\quad + \dots \\
 &\quad + \left(\frac{U_w \times opaque A_n \times TDeq}{Ai}\right) + \left(\frac{U_f \times glass A_n \times \Delta T}{Ai}\right) + \left(\frac{glass A_n \times SHGC \times SC \times ESR}{Ai}\right) \\
 &= \frac{(opaque A_1 + opaque A_2 + opaque A_3 + \dots + opaque A_n) + (glass A_1 + glass A_2 + glass A_3 + \dots + glass A_n)}{Ai}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบเปลือกอาคาร (Overall Thermal Transfer Value: OTTV)

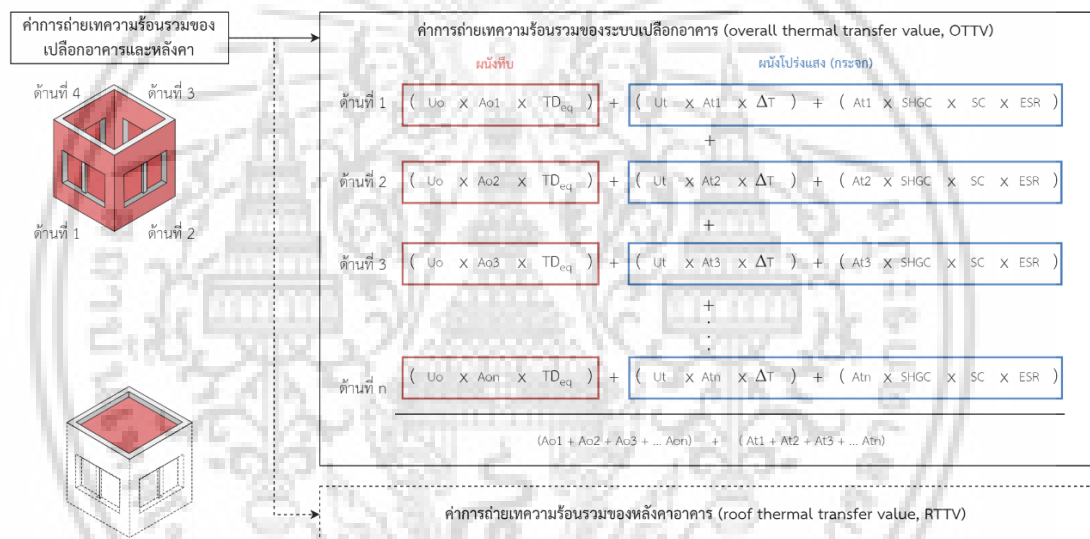
เป็นการคำนวณปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ภายในอาคารจากระบบเปลือกอาคาร ได้แปลงสูตรระบบเปลือกอาคารจากสูตรตามประกาศกระทรวงกลาโหมรูปเพื่อการใช้งาน (รูปที่ 2.27) ประกอบด้วย

ค่าการถ่ายเทความร้อนจากผนังทึบ (กรอบสีแดงในรูป) ขึ้นอยู่กับค่าวัสดุผนังทึบ (U-Value), พื้นที่ของผนังทึบ (Area Opaque) และค่าทางรังสี (TD_{eq})

ค่าการถ่ายเทความร้อนจากกระจก (กรอบสีฟ้าในรูป) ประกอบด้วย

1) ค่าการนำความร้อนของกระจก: ขึ้นอยู่กับค่าวัสดุกระจก (U-Value), พื้นที่ของกระจก (Area transparent) และความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอก (ΔT)

2) ค่ารังสีความร้อนของกระจก: ขึ้นอยู่กับค่าการรับแสงอาทิตย์วัสดุกระจก (SHGC), ค่าจากแผงกันแดด (SC) และค่าทางรังสี (ESR)



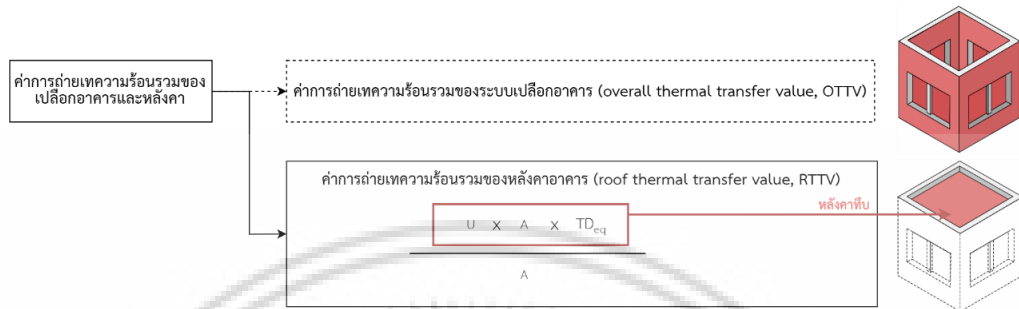
รูปที่ 2.27 overall thermal transfer value, OTTV

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (Roof Thermal Transfer Value: RTTV)

การแปลงสูตรระบบเปลือกอาคารจากสูตรตามประกาศกระทรวงกลาโหมรูปเพื่อการใช้งาน กระบวนการเช่นเดียวกับสูตร OTTV แต่เปลี่ยนตัวแปรเป็นหลังคา และพิจารณาเฉพาะหลังคามีแต่ วัสดุทึบ หลังคามีพื้นที่รวมแผ่นเดียวกัน (รูปที่ 2.28)

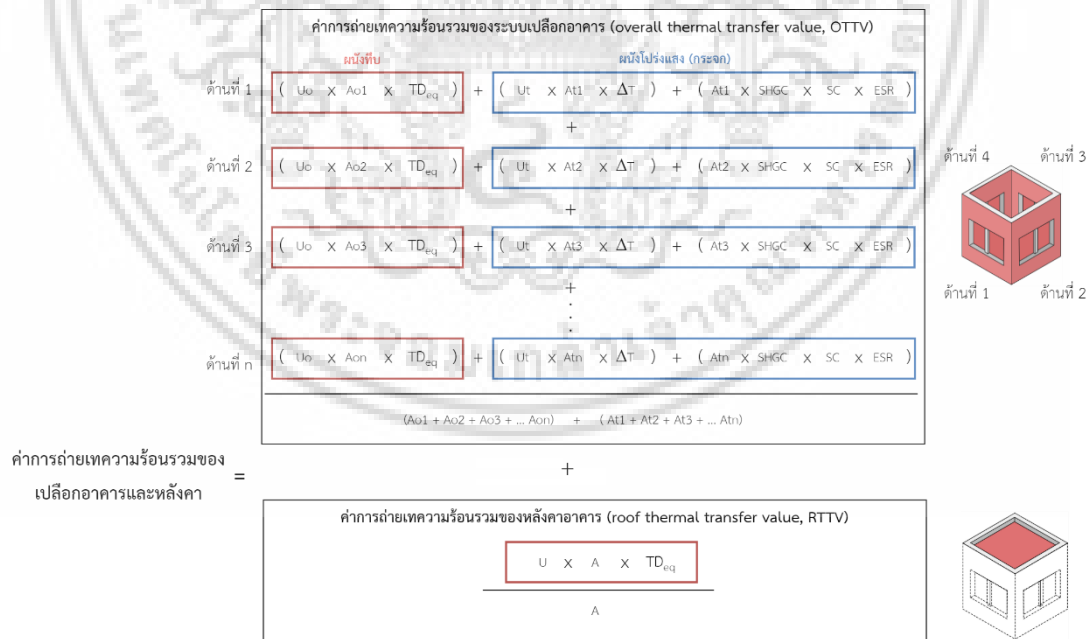


รูปที่ 2.28 roof thermal transfer value, RTTV

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

สูตรระบบเปลือกอาคาร ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของเปลือกอาคารและหลังคา

ประกอบด้วย ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบเปลือกอาคาร (Overall Thermal Transfer Value: OTTV) และ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (Roof Thermal Transfer Value: RTTV) (รูปที่ 2.29)



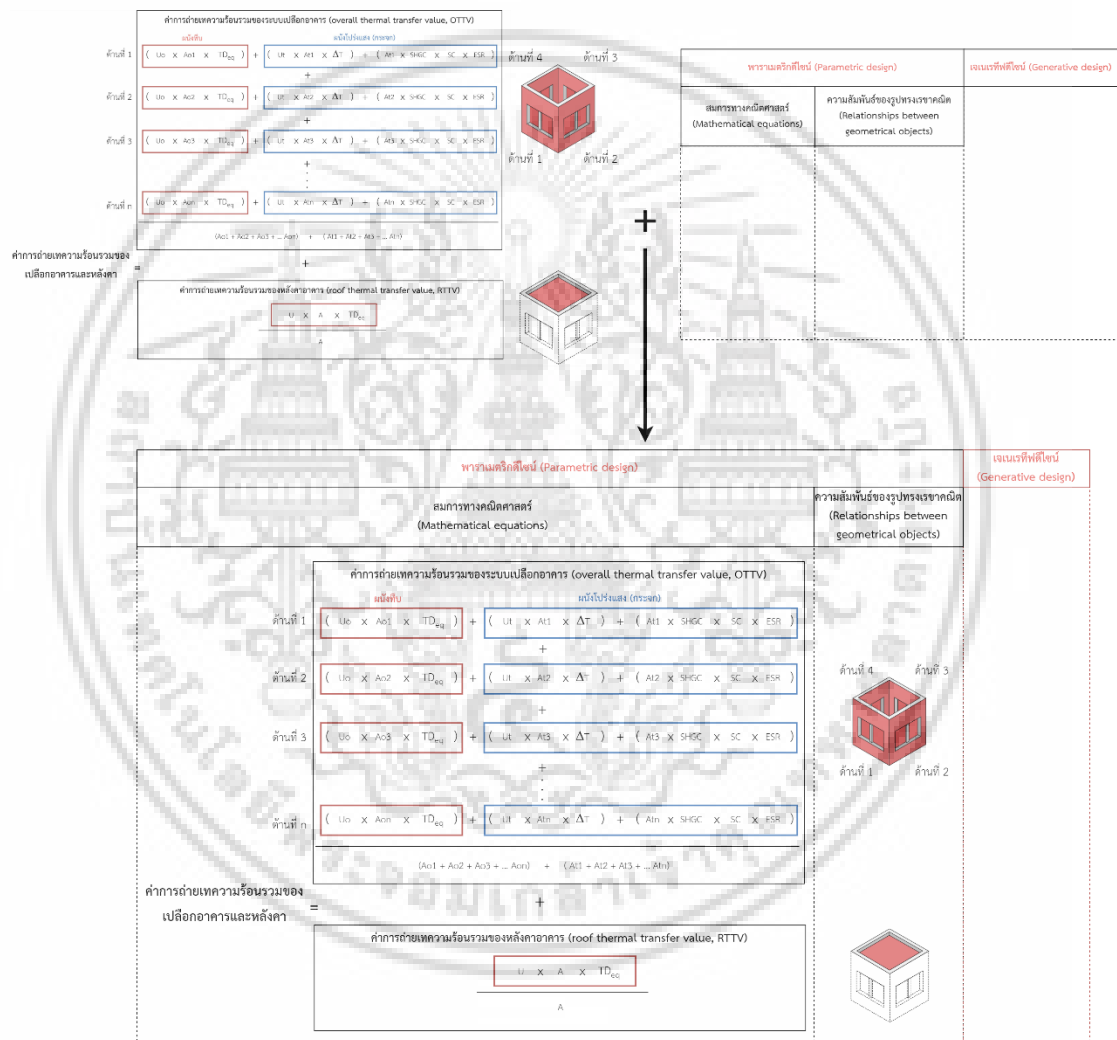
รูปที่ 2.29 สรุปสูตรระบบเปลือกอาคาร

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การออกแบบอาคารกับตัวแปรระบบเปลือกอาคาร

จากกรอบแนวคิดเจเนเรทีฟดีไซน์ ในหัวข้อ 2.1 เมื่อเปรียบเทียบกับ สูตรระบบเปลือกอาคาร ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของเปลือกอาคารและหลังคา พบสมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Equations) และ ความสัมพันธ์ของรูปทรงเรขาคณิต (Relationships Between Geometrical Objects) ดังนั้นเพื่อสร้างเครื่องมือเจเนเรทีฟดีไซน์ ต้องสร้างอัลกอริทึม (Algorithm) เพื่อทำให้เกิดทางเลือกการออกแบบ (รูปที่ 2.30)



รูปที่ 2.30 สูตรสูตรระบบเปลือกอาคาร

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบเปลือกอาคาร (Building Envelope) โดยสถาปนิก ให้สอดคล้องกับการประหยัดพลังงาน เพื่อลดค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของเปลือกอาคารและหลังคา ต้องคำนึงถึงหลายปัจจัยเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพ จากงานวิจัย Systematic review เปลือกอาคารของ V. Gupta และ C. Deb[77] ผลการวิจัยระบุว่าฉนวน (Insulation or U-Value) คุณสมบัติของกระจก (Glazing Type) และอัตราส่วนหน้าต่างต่อผนัง (WWR) เป็นวิธีแก้ปัญหาที่น่าสนใจที่สุดในการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคารเขตร้อน (Tropical Buildings) นอกจากนี้ในหลายงานอาคารในเขตร้อน ให้ความสำคัญกับการวางทิศทาง (Orientation) [78-79] เพื่อใช้ประโยชน์จากลมระบายความร้อนและลดการโดนแสงแดด

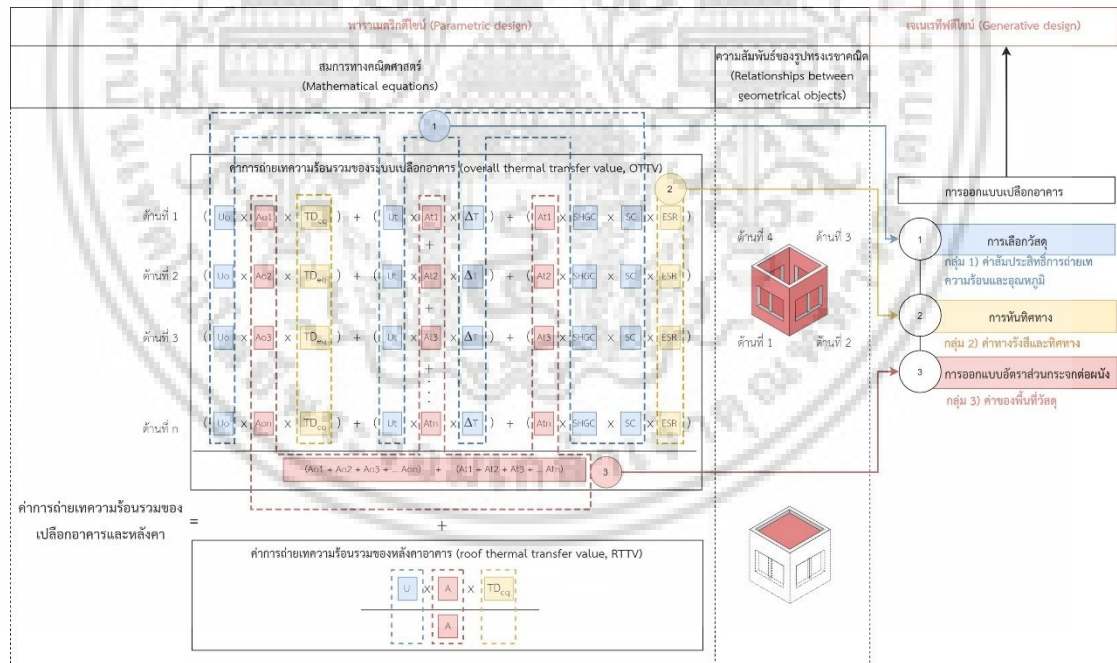
ดังนั้นจากภาพรวมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเปลือกอาคาร ต้องคำนึงถึง

กลุ่มที่ 1 การเลือกวัสดุ (Material Selection)

กลุ่มที่ 2 การหันทิศทาง (Orientation)

กลุ่มที่ 3 การออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง (Window To Wall Ratio: WWR)

จึงทำการพิจารณาการออกแบบอาคารร่วมกับตัวแปรระบบเปลือกอาคาร เพื่อพิจารณาอัลกอริทึม (Algorithm) ให้เกิดทางเลือกการออกแบบ (รูปที่ 2.31)



รูปที่ 2.31 การออกแบบอาคารกับตัวแปรระบบเปลือกอาคาร

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ด้านการเลือกวัสดุกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิ

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิ เกี่ยวข้องกับการเลือกวัสดุอาคาร ทั้งผนัง ฝ้า และผนังโปร่งแสง (กระจก) ในการออกแบบเปลือกอาคาร เนื่องจากคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของวัสดุ วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีจะช่วยลดการใช้พลังงาน โดยชะลอความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารและลดอุณหภูมิอากาศภายในอาคารสูงสุด [77]

ผนังฝ้าและกระจก: ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Coefficient ; U Value) คือ ปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านเข้ามาในส่วนหนึ่งของอาคาร โดยที่อุณหภูมิอากาศทั้งสองด้านแตกต่างกัน ขึ้นกับความหนา (Δx) และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (k) (รูปที่ 2.32)

$$U = \frac{1}{R} \quad , \quad R = \frac{\Delta x}{k}$$

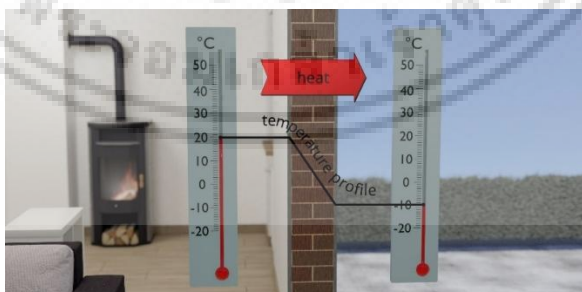


รูปที่ 2.32 Heat transfer coefficient ; U value

ที่มา: TEC Science. (n.d.). Thermal transmittance (U-value).

<https://www.tec-science.com/thermodynamics/>

กระจก: ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคาร (ΔT) ถ้าค่าความแตกต่างอุณหภูมิ (ΔT) สูง การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังก็จะมากขึ้น (รูปที่ 2.33)



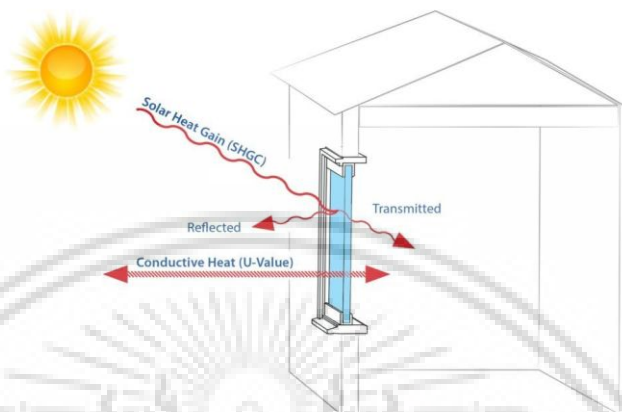
รูปที่ 2.33 ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคาร

ที่มา: TEC Science. (n.d.). Thermal conductivity & Fourier's law.

<https://www.tec-science.com/thermodynamics>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจก: ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (Solar Heat Gain Coefficient, SHGC) คือ อัตราส่วนของรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านส่วนที่โปร่งแสง และก่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเข้าภายในอาคาร การเลือกใช้กระจกที่มีค่า SHGC ต่ำจะช่วยลดความร้อนที่เข้าสู่อาคารได้ดี ค่า SHGC ได้จากชนิดวัสดุกระจกตามผู้ผลิต (รูปที่ 2.34)



รูปที่ 2.34 solar heat gain coefficient, SHGC

ที่มา: Palram Industries. (n.d.). The importance of understanding solar properties in architecture.
<https://www.palram.com/blog/construction-architecture/>

กระจก: ค่าสัมประสิทธิ์การบังแสง (Shading Coefficient, SC) เป็นค่าที่ใช้บอกสัดส่วนของความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ผ่านเข้ามาทางวัสดุโปร่งแสง (กระจก) (รูปที่ 2.35) ตามชนิดและความหนาของกระจก สามารถลดค่าการถ่ายเทความร้อนได้ด้วยแผงบังแดด อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 งานวิจัยนี้ไม่มีแผงบังแดด SC=1 เนื่องจากเน้นการพิจารณาในด้านฟอร์มอาคาร อัตราส่วนผนังและหน้าต่าง กกับการหันทิศทาง แต่ค่า SC สามารถเจเนเรทีฟดีไซน์เพื่อลดความร้อนเข้าสู่อาคารในอนาคตได้โดยการเพิ่มแผงบังแดด



รูปที่ 2.35 Shading Coefficient, SC

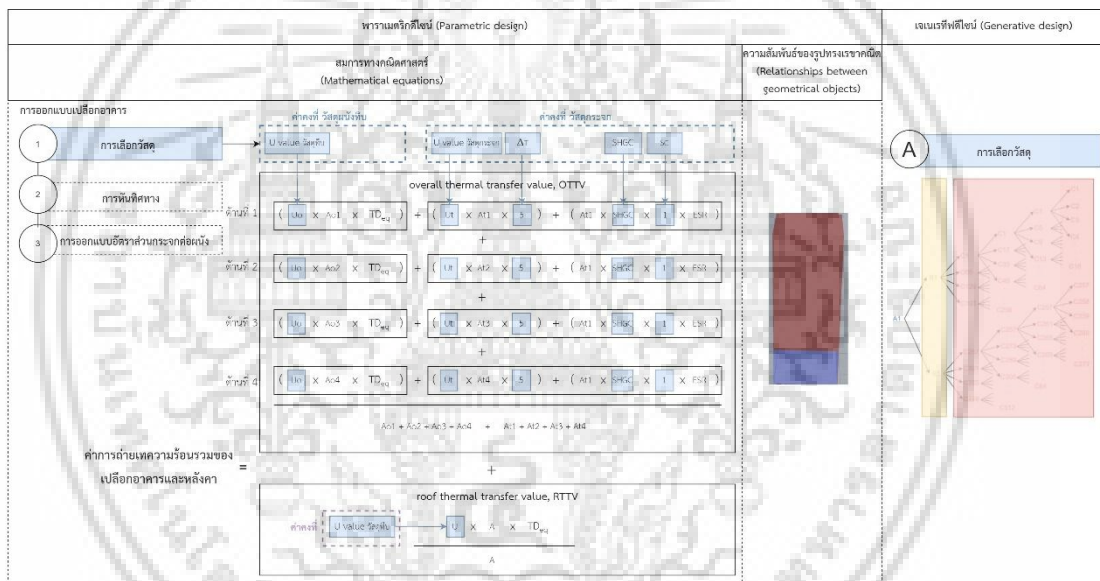
ที่มา: Shutter Studio. (n.d.). Shading coefficient.

<http://www.shutterstudio.com/shading-coefficient.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลุ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิ งานวิจัยนี้กำหนดเป็น ค่าคงที่ (Constant) คือ ตัวแปรที่มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงในสมการหรือในบริบทที่กำหนด การกำหนดเป็นตัวแปรคงที่ในการทดสอบเจเนเรทีฟดีไซน์ เนื่องจากการกำหนดวัสดุเป็นชุดข้อมูลพื้นฐาน และงานวิจัยเน้นไปที่การสร้างทางเลือกของสถาปนิกเรื่องรูปทรงอาคาร

ขั้นการเลือกวัสดุ ค่าคงที่วัสดุผนังทึบคือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U Value) ได้จากการกำหนดวัสดุ ส่วนค่าคงที่วัสดุกระจกประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U Value) ได้จากการกำหนดวัสดุ, ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคาร (ΔT) คือ $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ของประเภทอาคารสำนักงานตามประกาศกระทรวง, สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (SHGC) ได้จากการกำหนดวัสดุ และค่าสัมประสิทธิ์การบังแสง (SC) คือ 1 เนื่องจากงานวิจัยนี้กำหนดให้ไม่มีแผงบังแดด เพื่อเจเนเรทีฟดีไซน์รูปทรงอาคาร (รูปที่ 2.36)



รูปที่ 2.36 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิ

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ด้านการหันทิศทางกับค่าทางรังสีและทิศทาง

เกี่ยวข้องกับการออกแบบอาคาร โดยสถาปนิกต้องคำนึงถึงการป้องกันรังสีอาทิตย์ การจัดวางอาคารให้ลดการรับรังสีตรง จะช่วยลดความร้อนภายในอาคาร

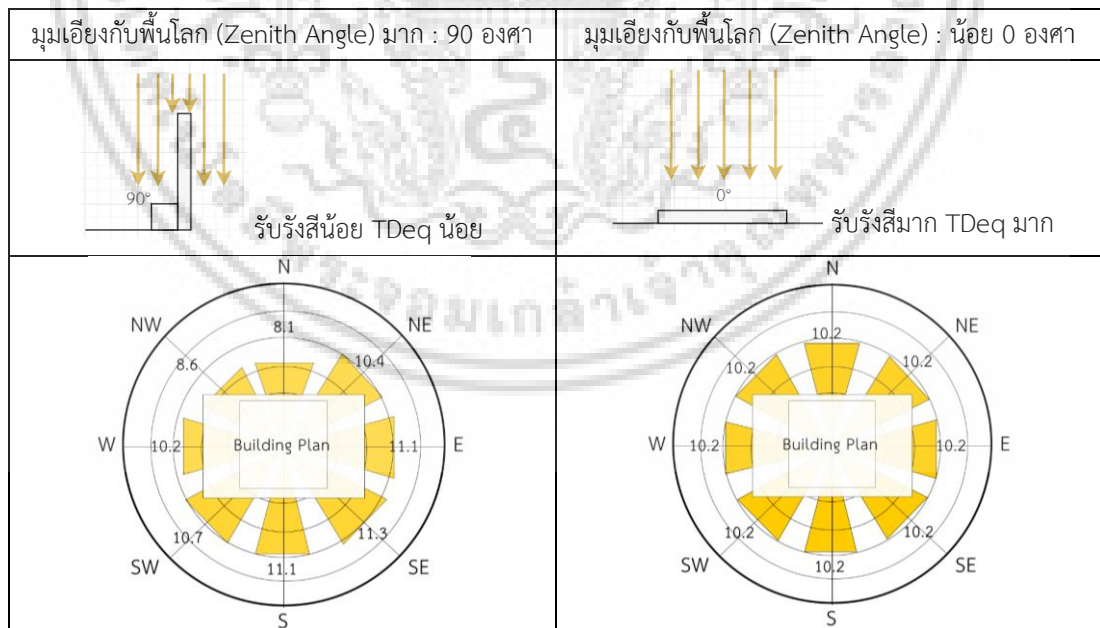
TD_{eq} ค่าทางรังสีและทิศทางของผนังทึบ: ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (Equivalent Temperature Difference; TD_{eq}) ของผนังทึบ ขึ้นอยู่กับ มุมเอียงของผนัง, ทิศทาง, สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์, ผลคูณของความหนาแน่นและความร้อนจำเพาะ (Density-Specific Heat Product: DSH) (ตารางที่ 2.3, 2.4)

ตารางที่ 2.3 ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (TD_{eq}) ผนัง 90 องศา หลังคา 0 องศา

ผนัง 90 องศา สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ สีทาภายนอกสีขาว = 0.3							
เหนือ	ตะวันออก	ตะวันออก	ตะวันออก	ใต้	ตะวันตก	ตะวันตก	ตะวันตก
	เฉียงเหนือ		เฉียงใต้		เฉียงใต้		เฉียงเหนือ
8.1	10.4	11.1	11.3	11.1	10.7	10.2	8.6
(DSH=100)	(DSH=100)	(DSH=100)	(DSH=100)	(DSH=100)	(DSH=100)	(DSH=100)	(DSH=100)
องศาหลังคา 0 องศา สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ สีทาภายนอกสีขาว = 0.3							
ทุกทิศทาง TDeq = 10.2 (DSH=400)							

ที่มา: กระทรวงพลังงาน (2564) [83]

ตารางที่ 2.4 มุมเอียงกับพื้นโลก (Zenith Angle) กับค่า TDeq



ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

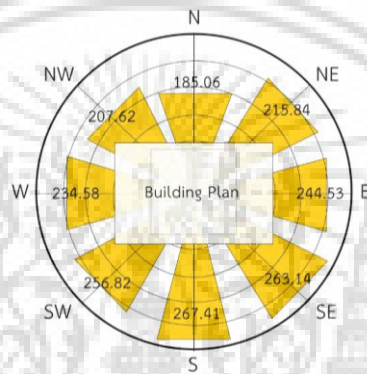
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ESR ค่าทางรังสีและทิศทางของกระจก: ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (Effective Solar Radiation: ESR) คือ รังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนผนังตามมุมเอียงที่แตกต่างกันในแต่ละทิศทาง ได้ค่าจากประกาศกระทรวงพลังงาน หน้า 30-31 (ตารางที่ 2.5, รูปที่ 2.37)

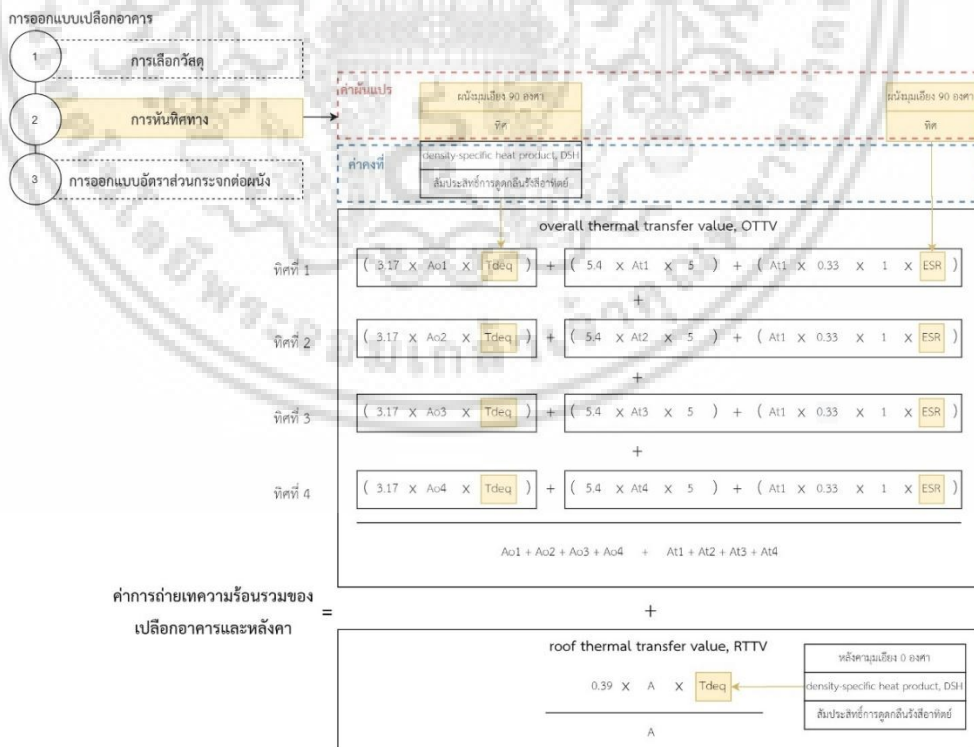
ตารางที่ 2.5 ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (ESR) สำหรับสำนักงาน

มุมเอียง (องศา)	เหนือ	ตะวันออกเฉียงเหนือ	ตะวันออก	ตะวันออกเฉียงใต้	ใต้	ตะวันตกเฉียงใต้	ตะวันตก	ตะวันตกเฉียงเหนือ
90	185.06	215.84	244.53	263.14	267.41	256.82	234.58	207.62

ที่มา: กระทรวงพลังงาน (2564) [83]



รูปที่ 2.37 ESR ค่าทางรังสีและทิศทางของกระจกมุมเอียง 90 องศา
ที่มา: ผู้วิจัย (2567)



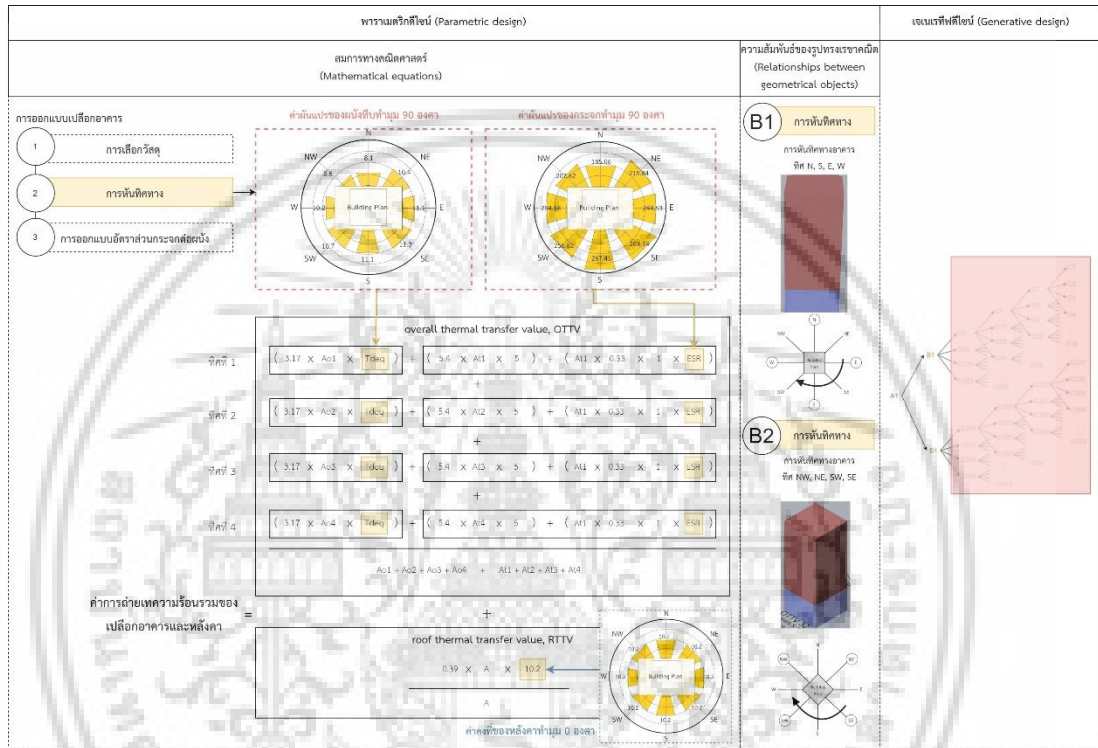
รูปที่ 2.38 ค่าทางรังสีและทิศทาง

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดวัสดุเป็นค่าคงที่ ESR และ TD_{eq} มีความผันแปรกับ มุมเอียงกับพื้นโลก (Zenith Angle) และ ทิศ (รูปที่ 2.38) ดังนั้นจึงกำหนดค่าพื้นที่เป็น ตัวแปรอิสระ (variable) คือตัวแปรที่ค่าสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด

ขั้นการหันทิศทาง ประกอบด้วย ตัวแปรอิสระผนังที่บคือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (TD_{eq}) และตัวแปรอิสระกระจกคือ ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (ESR) (รูปที่ 2.39)



รูปที่ 2.39 ค่าทางรังสีและทิศทาง
ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

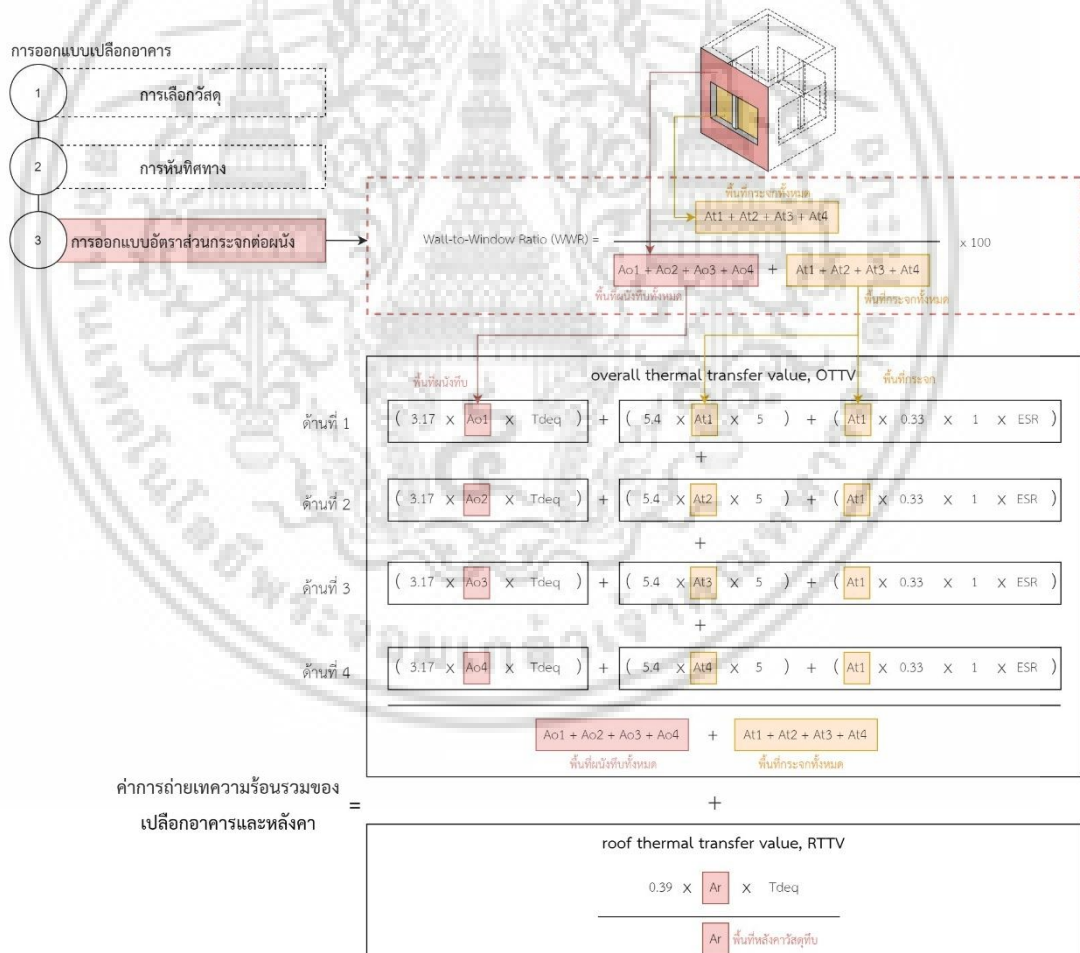
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ด้านการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง กับค่าของพื้นที่วัสดุ

สถาปนิกต้องออกแบบอัตราส่วนหน้าต่างต่อผนังให้เหมาะสมเพื่อลดการรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ ค่าของพื้นที่วัสดุด้านที่พิจารณา (A) มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m²) ผนัง 1 ด้าน ประกอบด้วย พื้นที่ผนังทึบ (Opaque Area: Ao) กับ พื้นที่หน้าต่างหรือผนังโปร่งแสง At (Transparent Area: At) เป็นอัตราส่วนกระจกต่อผนัง (Wall-to-Window Ratio: WWR) เป็นเปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 2.40)

$$\text{Wall - to - Window Ratio; WWR} = \frac{\text{พื้นที่หน้าต่างทั้งหมด}}{\text{พื้นที่รวม}} \times 100$$

$$\text{Wall - to - Window Ratio; WWR} = \frac{\text{พื้นที่หน้าต่างทั้งหมด}}{\text{พื้นที่ผนังทึบทั้งหมด} + \text{พื้นที่หน้าต่างทั้งหมด}} \times 100$$



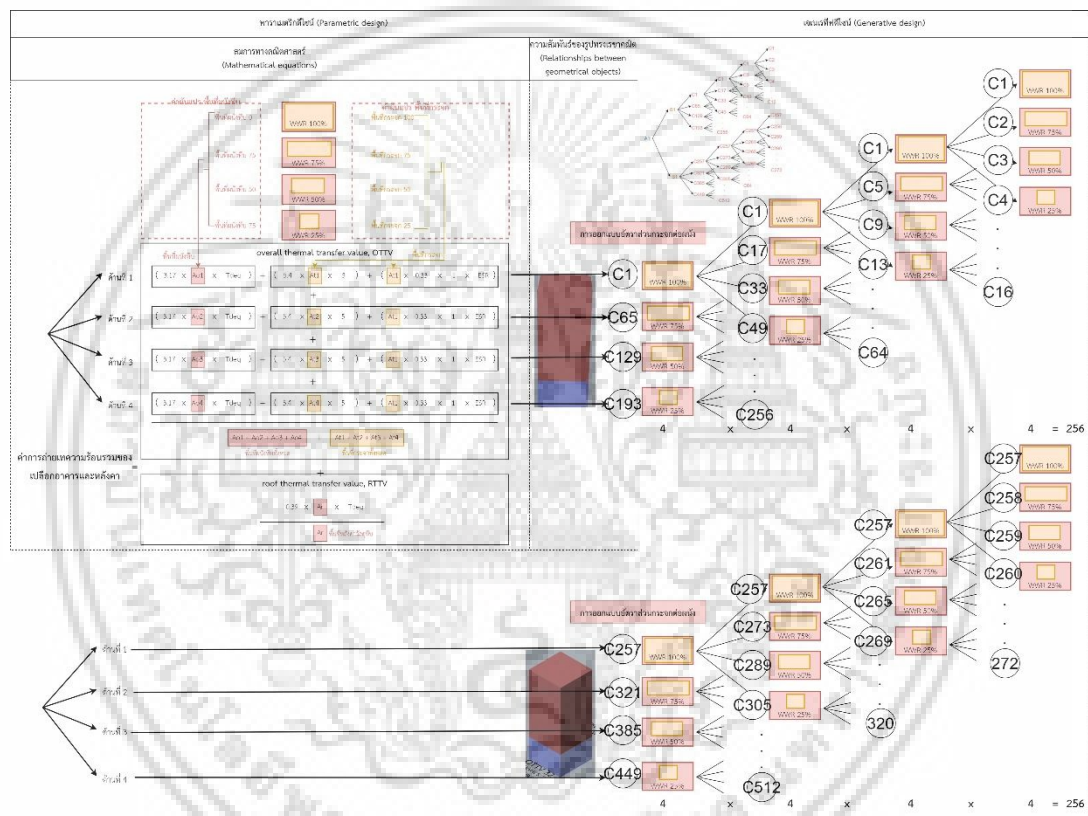
รูปที่ 2.40 ค่าของพื้นที่วัสดุ

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ OTTV การมีพื้นที่กระจกมากหรือน้อยจะส่งผลต่อค่า OTTV เนื่องจากการนำความร้อน (U-Value) กระจกสูงกว่าผนังทึบ และกระจกช่วยให้แสงแดดและความร้อนจากดวงอาทิตย์เข้ามาในอาคารได้มากขึ้นผ่านมีค่าการแผ่รังสีของกระจก (SHGC) และปัจจัยการบังแดด (SC) ดังนั้น พื้นที่กระจกมากจะส่งผลให้ OTTV สูง ในทางกลับกันพื้นที่กระจกน้อยจะส่งผลให้ OTTV ต่ำ สถาปนิกต้องออกแบบอัตราส่วนหน้าต่างต่อผนังให้เหมาะสมเพื่อลดการรับความร้อนจากแสงอาทิตย์

ขั้นการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง ตัวแปรอิสระผนังทึบคือ ค่าพื้นที่ผนังทึบ (Opaque Area) และตัวแปรอิสระกระจกคือ พื้นที่กระจก (Transparent Area) (รูปที่ 2.41)



รูปที่ 2.41 ค่าของพื้นที่วัสดุ
ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เจเนเรทีฟดีไซน์วิธีพารามตริกอาคารในด้านการอนุรักษ์พลังงาน

จาก 2.1 จากเจเนเรทีฟดีไซน์อาคารในด้านการอนุรักษ์พลังงานกับการสร้างรูปทรง เมื่อรวมกับ 2.2 สูตรมาตรฐานพลังงานกับกระบวนการออกแบบอาคาร จึงได้ 3 ขั้นตอนตาม กรอบเจเนเรทีฟดีไซน์ด้วยวิธีพารามตริก

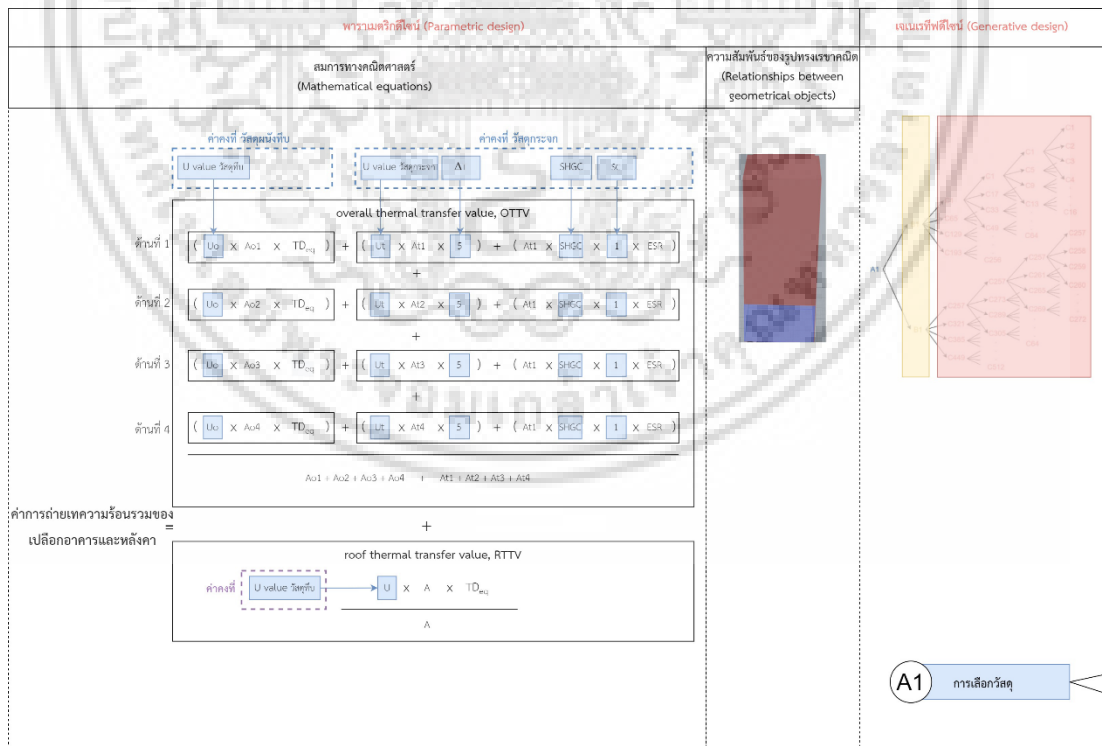
- 1) ขั้นตอนการเลือกวัสดุ
- 2) ขั้นตอนการหันทิศทาง
- 3) ขั้นตอนการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง

1) ขั้นตอนการเลือกวัสดุ

ข้อมูลกลุ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิ งานวิจัยนี้กำหนดเป็น ค่าคงที่ (Constant) ไม่เปลี่ยนแปลงในสมการการทดสอบ (รูปที่ 2.42)

ค่าคงที่วัสดุผนังที่บคือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U Value)

ค่าคงที่วัสดุกระจกประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U Value), ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคาร (ΔT), สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (SHGC) และค่าสัมประสิทธิ์การบังแสง (SC)



รูปที่ 2.42 ขั้นตอนการเลือกวัสดุ

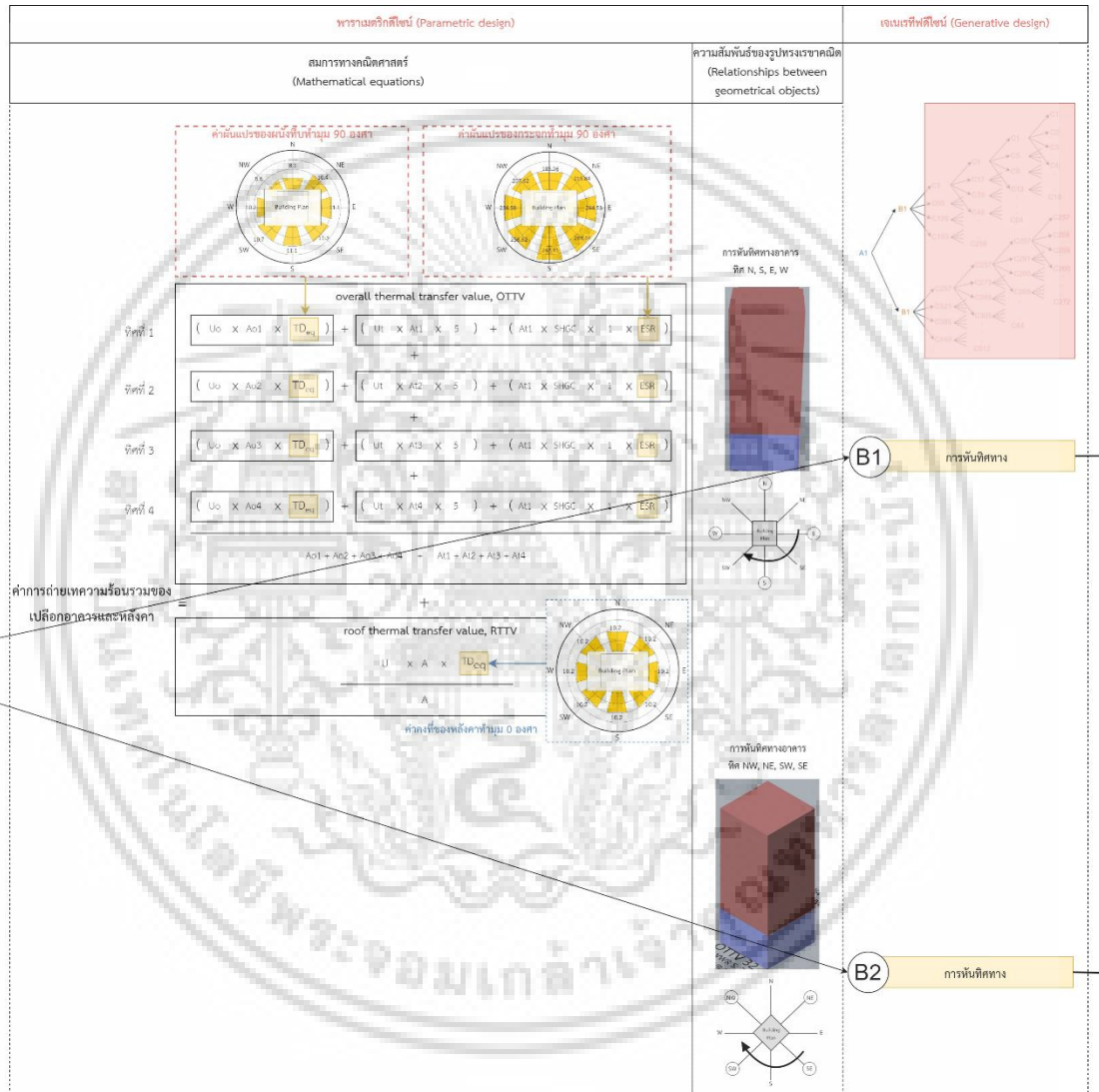
ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ขั้นตอนการหันทิศทาง

ตัวแปรอิสระผนังที่บคือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (TDeq) และตัวแปรอิสระกระจกคือ คาร์รังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (ESR) (รูปที่ 2.43)

ความเป็นไปได้ของการหันทิศทางอาคาร จากการที่อาคารฝั่งสี่เหลี่ยมจัตุรัสสามารถหันทิศทางได้ 2 แบบ คือ 1) การหันทิศทาง N, S, E, W และ 2) การหันทิศทาง NW, NE, SW, SE



รูปที่ 2.43 ขั้นตอนการหันทิศทาง

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

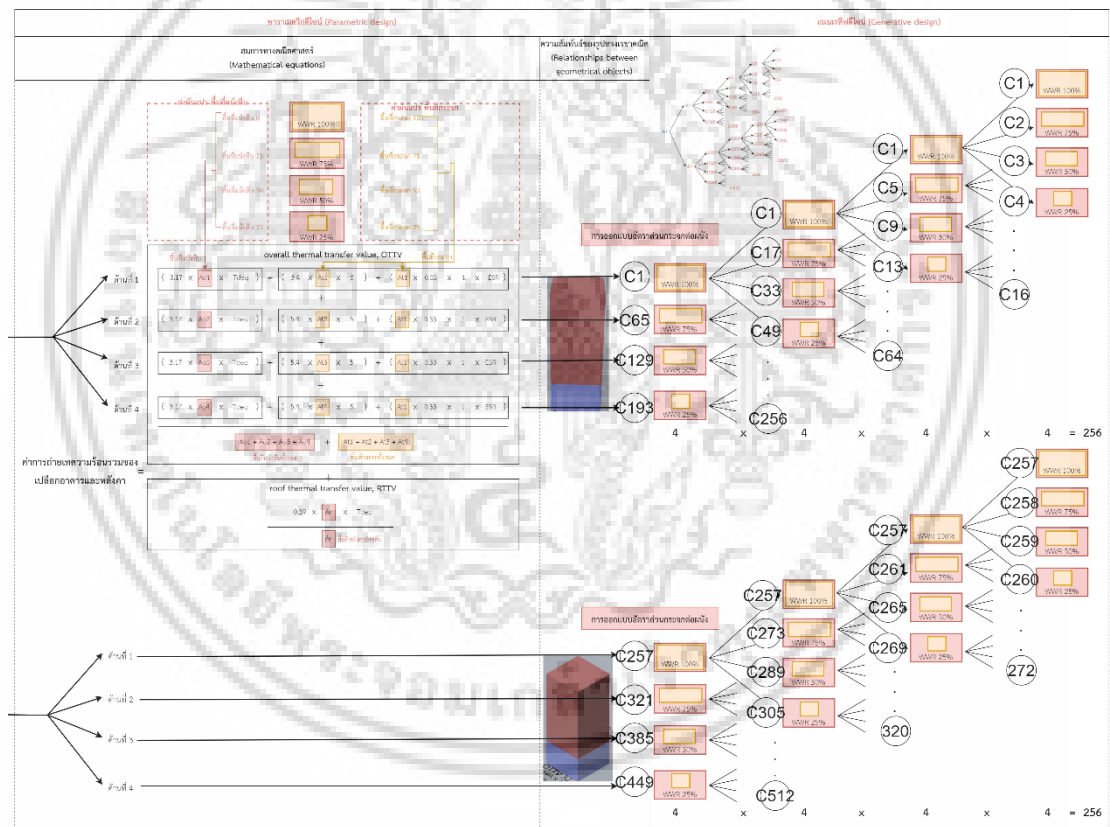
3) ขั้นตอนการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง

ตัวแปรอิสระผนังทึบคือ ค่าพื้นที่ผนังทึบ (Opaque Area) และตัวแปรอิสระกระจกคือ พื้นที่กระจก (Transparent Area) ได้จากอัตราส่วนหน้าต่างต่อผนัง (WWR) ในการวิจัยกำหนดจากควอร์ไทล์ (Quantile) โดย ควอร์ไทล์ที่ 1 (Q1) 25% ควอร์ไทล์ที่ 2 (Q2) 50% ควอร์ไทล์ที่ 3 (Q3) 75% ควอร์ไทล์ที่ 4 (Q4) 100% การหาทุกความเป็นไปได้ของการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนังตามกฎการคูณ โดยอาคารผนังสี่เหลี่ยมจัตุรัสสามารถหันทิศทางได้ 2 แบบ คือ

1) การหันทิศทาง N, S, E, W จะได้ $4 \times 4 \times 4 \times 4 = 256$ แบบอาคาร

2) การหันทิศทาง NW, NE, SW, SE จะได้ $4 \times 4 \times 4 \times 4 = 256$ แบบอาคาร

ดังนั้นกฎการคูณ (Rule Of Multiplication) อาคารผนังสี่เหลี่ยมจัตุรัสจากอัตราส่วนหน้าต่างต่อผนัง (WWR) หาจำนวนความเป็นไปได้ทั้งหมด 512 แบบอาคาร (รูปที่ 2.44)



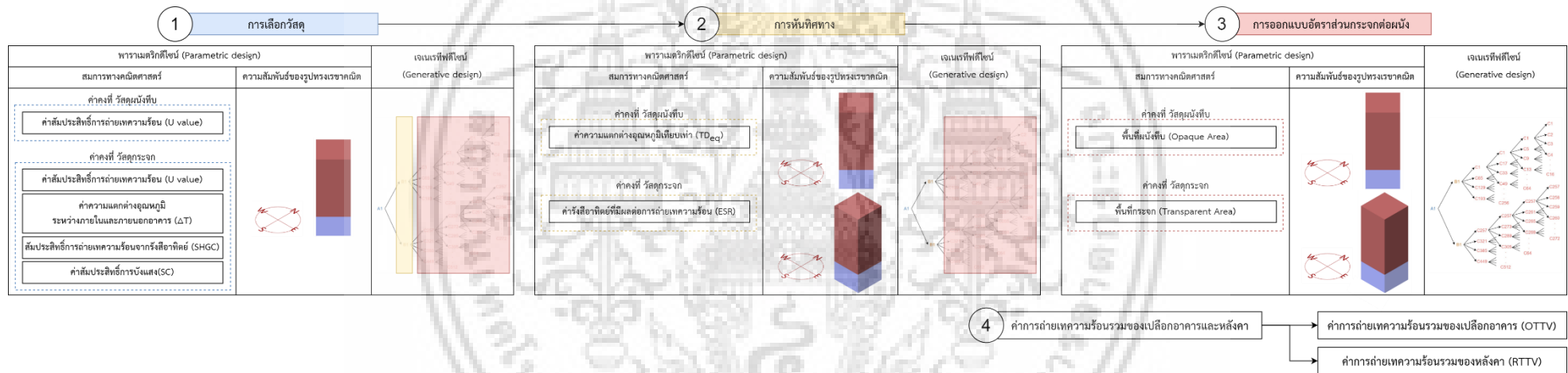
รูปที่ 2.44 ขั้นตอนการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 กรอบแนวคิด

จากการทบทวนวรรณกรรม เจเนเรทีฟดีไซน์เพื่อสร้างทางเลือกการออกแบบเปลือกอาคารสำนักงานตามเกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานประเทศไทย จึงได้กรอบแนวคิดตามรูป 2.45 ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบเปลือกอาคาร (Overall Thermal Transfer Value: OTTV) กำหนดเป็นตัวแปรตามในงานวิจัย และค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (Roof Thermal Transfer Value: RTTV) กำหนดเป็นตัวแปรคงที่ในงานวิจัย โดยมีตัวแปรระบบเปลือกอาคาร ได้แก่ การเลือกวัสดุกำหนดเป็นค่าคงที่ การหันทิศทางและการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนังกำหนดเป็นตัวแปรอิสระในการวิจัย



รูปที่ 2.45 กรอบแนวคิด

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 กระบวนทัศน์การวิจัย

3.1.1 กระบวนทัศน์แบบหลังปฏิฐานนิยม (Postpositivism)

งานวิจัยเจเนเรทีฟที่พีดีไอเพื่อสร้างทางเลือกการออกแบบเปลือกอาคารสำนักงานตามเกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานประเทศไทยอยู่ภายใต้กระบวนทัศน์แบบหลังปฏิฐานนิยม (Postpositivism) มีลักษณะสำคัญ [80] ดังนี้

Determination: งานวิจัยมีความเป็นเหตุเป็นผล สร้างเงื่อนไขและวิธีการตามกรอบแนวคิดการวิจัยเพื่อการเจเนเรทีฟที่พีดีไอรูปทรงอาคารให้ผ่านมาตรฐานพลังงานประเทศไทย ตั้งต้นจากทฤษฎีเพื่อสร้างเครื่องมือการวิจัย ลดข้อผิดพลาดและอคติในการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการเชิงปริมาณ ในงานวิจัยนี้คือการเลือกวัสดุกำหนด, การหันทิศทาง และการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง

Reductionism: งานวิจัยได้พิจารณาถึงปรากฏการณ์เจเนเรทีฟที่พีดีไอในด้านการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งมีหลายตัวแปร และเพื่อลดทอนความซับซ้อนของปรากฏการณ์ดังกล่าว งานวิจัยจึงกำหนดเงื่อนไขการศึกษาบางตัวแปรที่สำคัญในการวิจัย คือ ระบบเปลือกอาคาร ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานในอาคาร และมีความเกี่ยวข้องกับการออกแบบของสถาปนิก

Empirical Observation and Measurement: การใช้ข้อมูลเชิงประจักษ์ที่สามารถวัดผลได้จริง เช่น ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของเปลือกอาคารและหลังคา ซึ่งถูกวัดจากสูตรระบบเปลือกอาคาร ข้อมูลที่ได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีการเชิงปริมาณ เพื่อยืนยันความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์

Theory Verification: งานวิจัยมีจากทฤษฎีเจเนเรทีฟที่พีดีไออาคารในด้านการอนุรักษ์พลังงาน โดยเลือกการสร้างรูปทรงด้วยวิธีพาราเมตริกพีดีไอ กับทฤษฎีระบบเปลือกอาคารตามมาตรฐานพลังงานประเทศไทย จากทฤษฎีสู่การสร้างเครื่องมือวิจัยที่เป็นระบบและสามารถทดสอบได้

3.1.2 วิธีวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research Methodology)

งานวิจัยนี้ใช้วิธีวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research Methodology) มีลักษณะและองค์ประกอบที่สำคัญดังนี้ [80]

Predetermined: การวิจัยเชิงปริมาณมีการตั้งคำถามและกำหนดตัวแปรที่ชัดเจน ตัวแปรในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิ, ค่าทางรังสีและทิศทางเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่าของพื้นที่วัสดุจากอัตราส่วนกระจกต่อผนัง เพื่อวัดผลค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของเปลือกอาคารและหลังคา (OTTV, RTTV)

Instrument-Based Questions: ใช้เครื่องมือหรือตัววัดที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อทดสอบ ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 1) เครื่องมือคำนวณเปิดใช้ด้วยโปรแกรม Excel 2) เครื่องมือคำนวณและแสดงผลสามมิติเปิดใช้ด้วยโปรแกรม Rhinoceros 3D และ Grasshopper

Performance Data, Attitude Data, Observational Data, And Census Data: ในงานวิจัยนี้จากข้อมูลตัวแปรตามกรอบแนวคิดการวิจัย ทำการทดสอบวัดผลลัพธ์ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของเปลือกอาคารและหลังคา (OTTV, RTTV) โดยใช้ข้อมูลค่าคงที่จากกรณีศึกษา และค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวง

Statistical Analysis: การวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้สถิติในการเปรียบเทียบข้อมูล โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณระหว่างโปรแกรม Excel และโปรแกรม Grasshopper - Rhinoceros 3D เพื่อยืนยันความถูกต้องจำนวนของการคำนวณ โดยสุ่มตัวอย่างผลลัพธ์ ทำการคำนวณสัดส่วนความถูกต้องของโปรแกรมด้วยการใช้สถิติเชิงพรรณนา

3.2 วิธีการดำเนินการศึกษา การสร้างเครื่องมือเจเนเรทีฟดีไซน์ Excel

จากกรอบแนวคิดการวิจัยในบทที่ 2 สู่วิธีการดำเนินการศึกษา เจเนเรทีฟดีไซน์เพื่อสร้างทางเลือกการออกแบบอาคารสำนักงานตามเกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานประเทศไทย ตาม 1) ขั้นตอนการเลือกวัสดุ 2) ขั้นตอนการหันทิศทาง 3) ขั้นตอนการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง

Microsoft Excel เป็นโปรแกรมสเปรดชีต (Spreadsheet) ที่พัฒนาโดย Microsoft ซึ่งใช้สำหรับการจัดการข้อมูลในรูปแบบตาราง โดยมีการคำนวณ การวิเคราะห์ข้อมูล การสร้างกราฟ และการจัดการข้อมูลอื่นๆ ที่หลากหลาย จึงนำมาใช้ในการคำนวณตามกรอบแนวคิดการวิจัย

3.2.1 ขั้นตอนการเลือกวัสดุ

จากกรอบแนวคิดการวิจัย ในส่วนของสมการคณิตศาสตร์ สู่การสร้างเครื่องมือคำนวณเปิดใช้ด้วยโปรแกรม Excel ประกอบด้วย การคำนวณตามสูตรระบบเปลือกอาคาร ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของเปลือกอาคารและหลังคา ประกอบด้วย ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบเปลือกอาคาร (Overall Thermal Transfer Value: OTTV) และ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (Roof Thermal Transfer Value: RTTV)

ขั้นตอนการเลือกวัสดุกำหนดเป็นค่าคงที่ (Constant) จากกรอบแนวคิดการวิจัย ค่าที่กำหนด คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคาร (ΔT) 5°C ประเภทอาคารสำนักงาน ตามประกาศกระทรวง และค่าสัมประสิทธิ์การบังแสง (SC) 1 เนื่องจากไม่มีแผงบังแดด เพื่อเจเนเรทีฟเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ชั้นการหันทิศทาง

ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (Effective Solar Radiation; ESR) ของผนัง ทึบ และค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (equivalent temperature difference, TDeq) ของ กระจก ตามการหันทิศทางอาคาร ประกอบด้วย ชุดที่ 1 ทิศเหนือ ตะวันออก ได้ ตะวันตก และการ หันทิศทางอาคาร ชุดที่ 2 ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ตะวันออกเฉียงใต้ ตะวันตกเฉียงใต้ ตะวันตกเฉียง เหนือ โดยจากประกาศกระทรวงพลังงาน เรื่อง กำหนดค่ามาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการ อนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2564 กำหนดค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน หน้า 23-33 ตารางที่ 3 ค่าความแตกต่าง อุณหภูมิเทียบเท่า (TDeq) (รูปที่ 3.2) ของผนังทึบสำหรับอาคารประเภทสถานศึกษาและสำนักงาน หรือที่ทำการ และจากประกาศกระทรวงพลังงาน หน้า 30-31 ตารางที่ 1.11 ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อ การถ่ายเทความร้อน (ESR) สำหรับอาคารประเภทสถานศึกษาและสำนักงานหรือที่ทำการ (รูปที่ 3.3)

มุมเอียงของผนัง (องศา)	ทิศทาง	DSH (kJ/(m ² . °C))	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์			
			๐.๓	๐.๕	๐.๗	๐.๙
๙๐	ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ	๑๕	๑๑.๙	๑๖.๐	๒๐.๑	๒๔.๒
		๓๐	๑๑.๖	๑๕.๗	๑๙.๘	๒๓.๘
		๕๐	๑๑.๒	๑๕.๓	๑๙.๓	๒๓.๔
		๑๐๐	๑๐.๔	๑๔.๓	๑๘.๓	๒๒.๒
		๒๐๐	๙.๑	๑๒.๘	๑๖.๕	๒๐.๒
		๓๐๐	๘.๔	๑๑.๘	๑๕.๒	๑๘.๖
		๔๐๐	๘.๑	๑๑.๓	๑๔.๕	๑๗.๘
	ทิศตะวันออก	๑๕	๑๒.๖	๑๗.๒	๒๑.๙	๒๖.๕
		๓๐	๑๒.๓	๑๖.๙	๒๑.๕	๒๖.๑
		๕๐	๑๑.๙	๑๖.๕	๒๑.๑	๒๕.๖
		๑๐๐	๑๑.๑	๑๕.๕	๒๐.๐	๒๔.๔
		๒๐๐	๙.๘	๑๓.๙	๑๘.๐	๒๒.๒
		๓๐๐	๙.๐	๑๒.๘	๑๖.๖	๒๐.๔
		๔๐๐	๘.๖	๑๒.๒	๑๕.๘	๑๙.๔

รูปที่ 3.2 ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (TDeq)

ที่มา: ประกาศกระทรวงพลังงาน [32]

มุมเอียง (องศา)	ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนตามทิศทางของผนัง (W/m ²)							
	เหนือ	ตะวันออกเฉียงเหนือ	ตะวันออก	ตะวันออกเฉียงใต้	ใต้	ตะวันตกเฉียงใต้	ตะวันตก	ตะวันตกเฉียงเหนือ
๖๐	๒๕๕.๓๗	๓๐๑.๖๐	๓๓๗.๖๑	๓๕๘.๔๔	๓๖๓.๔๕	๓๕๓.๑๘	๓๒๘.๖๒	๒๙๓.๓๓
๗๕	๒๑๒.๓๙	๒๕๕.๖๐	๒๙๑.๒๑	๓๑๒.๖๕	๓๑๗.๗๐	๓๐๖.๕๒	๒๘๑.๑๑	๒๔๖.๗๐
๙๐	๑๘๕.๐๖	๒๑๕.๘๔	๒๔๔.๕๓	๒๖๓.๑๔	๒๖๗.๔๑	๒๕๖.๘๒	๒๓๔.๕๘	๒๐๗.๖๒

รูปที่ 3.3 ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (ESR)

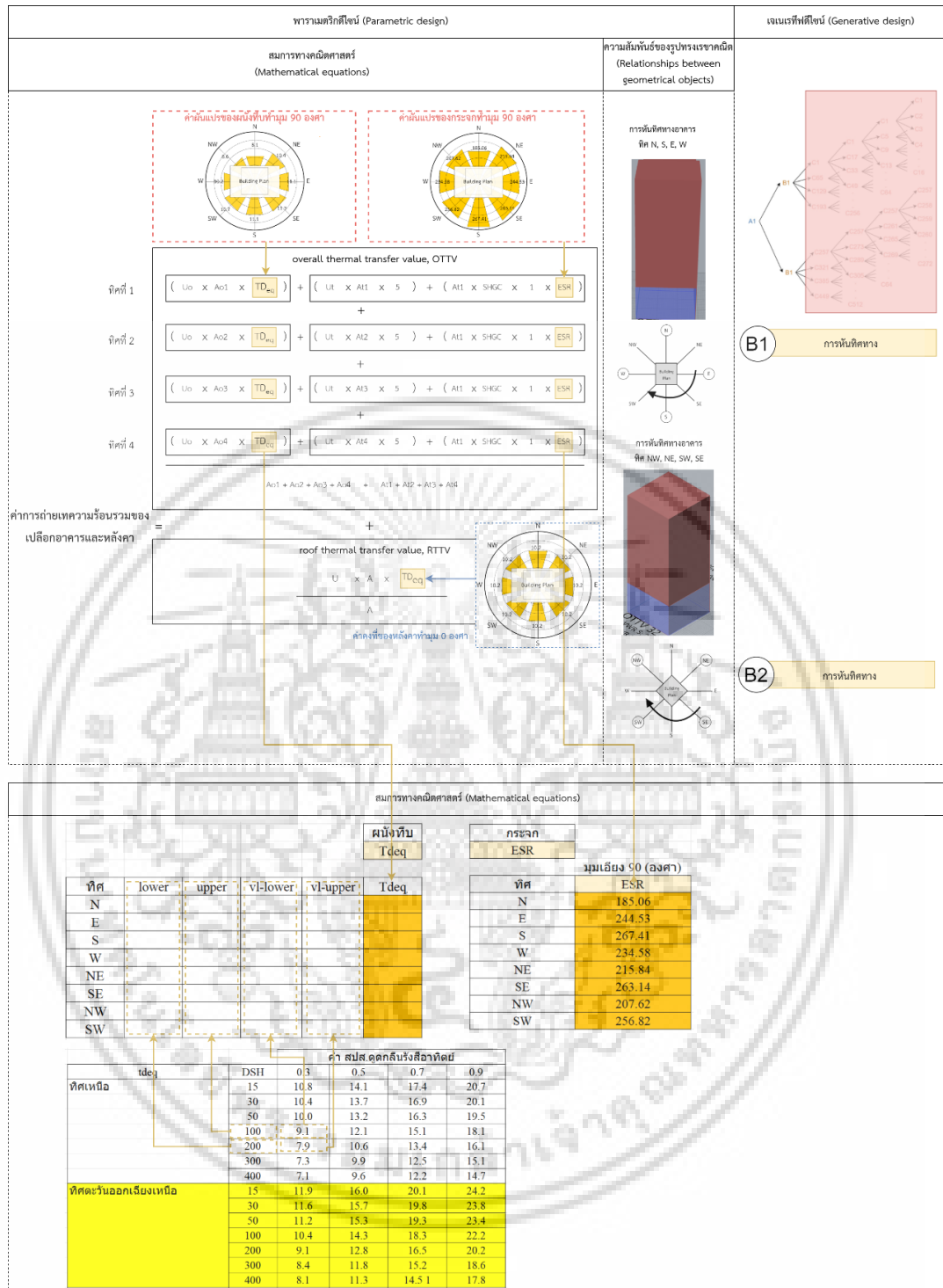
ที่มา: ประกาศกระทรวงพลังงาน [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกรอบแนวคิด ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (ESR) ของกระจก สามารถเปรียบเทียบค่าได้จากประกาศกระทรวงพลังงาน และค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (TD_{eq}) ของผนังทึบ จากประกาศกระทรวงพลังงานต้องมีการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ จากการมีช่วงค่า DSH ที่อยู่ในระหว่างตารางได้ ดังนั้นจึงใช้สูตร VLOOKUP ใน Excel เพื่อนำค่าจากตารางที่มีช่วงค่า DSH นั้น โดย VLOOKUP (Vertical Lookup) เป็นฟังก์ชันใน Excel ที่ใช้สำหรับค้นหาข้อมูลจากตารางที่จัดเรียงในแนวตั้ง โดยจะค้นหาค่าในคอลัมน์แรกของตารางแล้วคืนค่าจากคอลัมน์ ดังนั้นโปรแกรม Excel สามารถคำนวณค่า TD_{eq} และ ESR เพื่อนำไปคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของเปลือกอาคารและหลังคา (รูปที่ 3.4)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ชั้นการหันทิศทาง

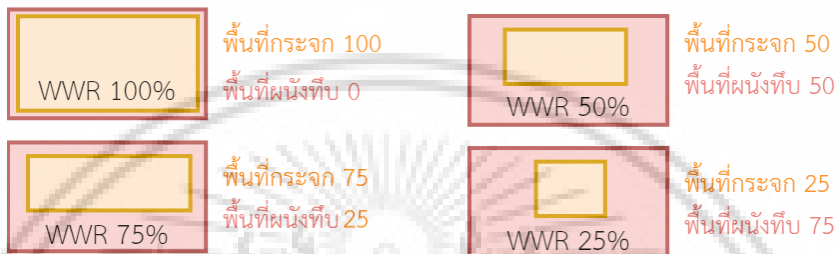
ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

3.2.3 ชั้นการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง

พื้นที่ผนังทึบและพื้นที่กระจก มีความสัมพันธ์กันตามอัตราส่วนกระจกต่อผนัง (Window-to-Wall Ratio: WWR) หมายถึงสัดส่วนพื้นที่ของหน้าต่างเทียบกับพื้นที่ของผนังทั้งหมด ในการวิจัยกำหนดจากควอร์ไทล์ (Quantile) โดย ควอร์ไทล์ที่ 1 (Q1) 25% ควอร์ไทล์ที่ 2 (Q2) 50% ควอร์ไทล์เอกสารถือเป็นเอกสารที่ส่งวันเร็วสี่สิบหกการเชิงในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้หน้าใบใช้ประโยชน์ในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 3 (Q3) 75% คิวอร์ไทล์ที่ 4 (Q4) 100% ดังนั้นเมื่อกำหนด พื้นที่ผนังรวม 1 ด้าน จึงสามารถทราบ พื้นที่กระจกและพื้นที่ผนังทึบ (รูปที่ 3.5)

- 25% WWR: หน้าต่างเป็น 25% ของพื้นที่ผนัง ผนังเป็น 75% ของพื้นที่ทั้งหมด
- 50% WWR: หน้าต่างเป็น 50% ของพื้นที่ผนัง ผนังและหน้าต่างมีพื้นที่เท่ากัน
- 75% WWR: หน้าต่างเป็น 75% ของพื้นที่ผนังผนังจะเหลือเพียง 25%
- 100% WWR: ผนังทั้งหมดจะเป็นหน้าต่าง หรือไม่มีพื้นที่ผนังที่เป็นทึบเลย



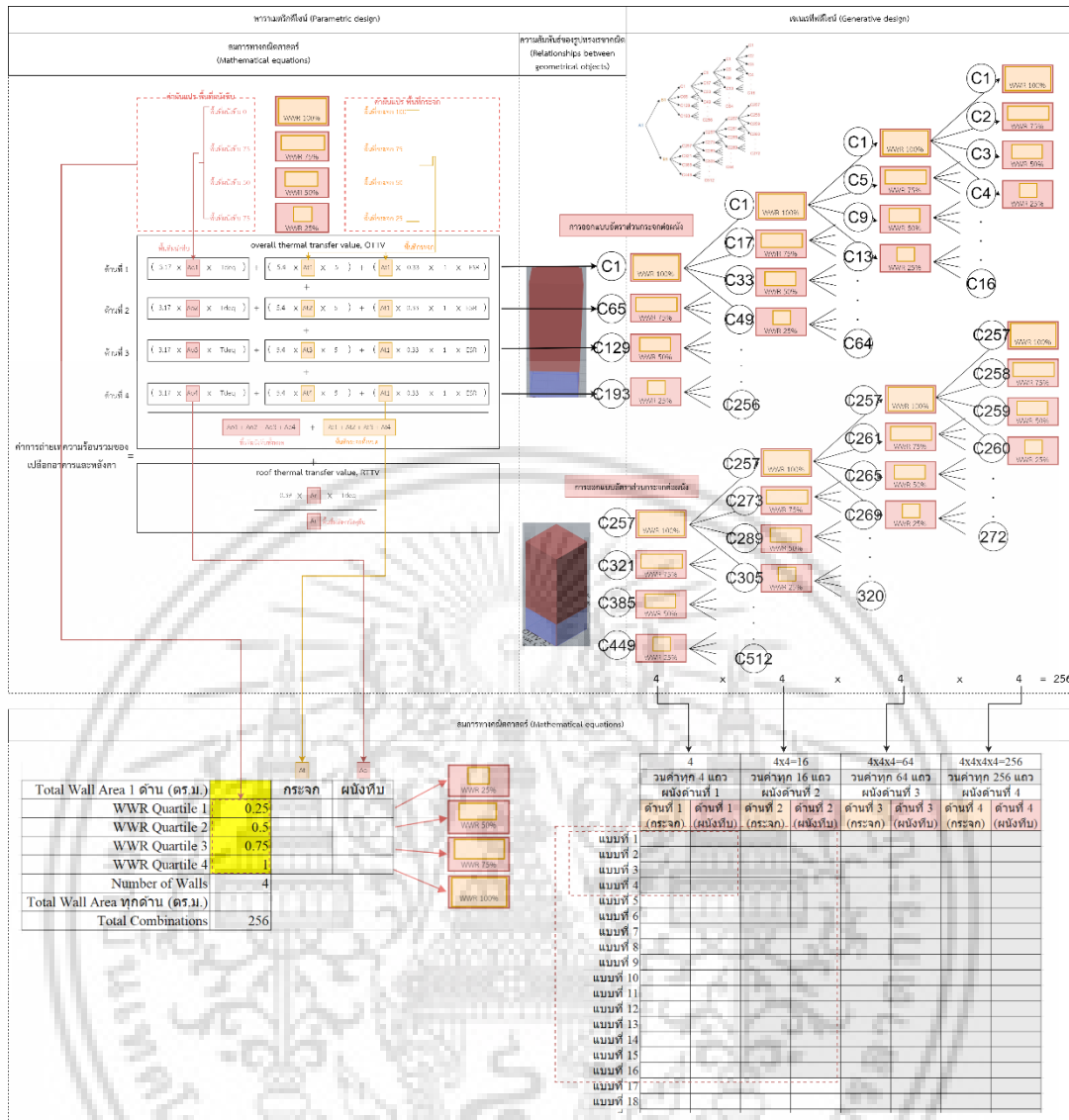
รูปที่ 3.5 อัตราส่วนกระจกต่อผนัง

ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

การใช้สูตร Excel สร้างจำนวนความเป็นไปได้ทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการคูณของกฎการคูณ (rule of multiplication) ประกอบด้วย ฟังก์ชัน INDEX จะดึงค่าจากช่วงเซลล์ที่กำหนดโดยอ้างอิงจากแถวและคอลัมน์ที่ระบุ ฟังก์ชัน COUNTA จะนับจำนวนเซลล์ที่ไม่ว่างเปล่าในช่วงที่กำหนด (รูปที่ 3.6)

ในการคำนวณความเป็นไปได้ทั้งหมดของอาคารที่มีผนัง 4 ด้าน

- ด้านที่ 1 (กระจก) และด้านที่ 1 (ผนังทึบ) จาก 4 สูตรรวมค่าจากทุกๆ 4 แถว
- ด้านที่ 2 (กระจก) และด้านที่ 2 (ผนังทึบ) จาก $4 \times 4 = 16$ สูตรรวมค่าจากทุกๆ 16 แถว
- ด้านที่ 3 (กระจก) และด้านที่ 3 (ผนังทึบ) จาก $4 \times 4 \times 4 = 64$ สูตรรวมค่าจากทุกๆ 64 แถว
- ด้านที่ 4 (กระจก) และด้านที่ 4 (ผนังทึบ) จาก $4 \times 4 \times 4 \times 4 = 256$ สูตรรวมค่าจากทุกๆ 256 แถว



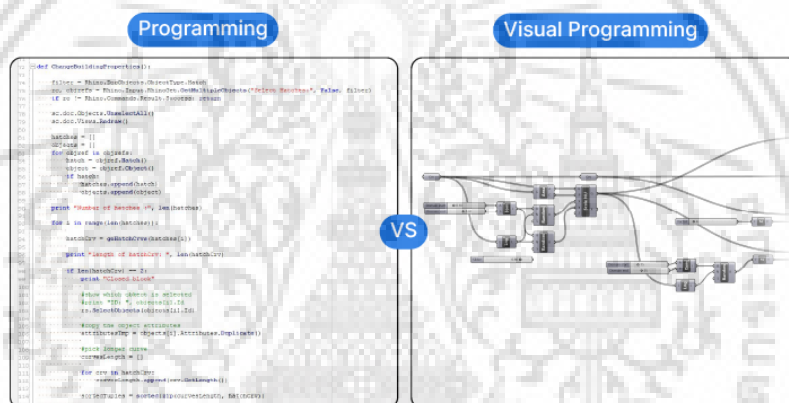
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง
ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

วิธีการดำเนินการศึกษา การสร้างเครื่องมือเจเนเรทีฟดีไซน์ Excel สามารถคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของเปลือกอาคารและหลังคา ได้ผลลัพธ์ค่า OTTV และ RTTV ของ 1 อาคาร ตามกรอบแนวคิดส่วนของการสมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical equations) ซึ่งประกอบด้วย ขั้นตอน 1) การเลือกวัสดุ 2) การหันทิศทาง 3) การออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง เพื่อนำค่าตัวเลขไปใช้ในเครื่องมือคำนวณและแสดงผลสามมิติ เปิดใช้ด้วยโปรแกรม Rhinoceros 3D (รูปที่ 3.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการดำเนินการศึกษา การสร้างเครื่องมือเจเนเรทีฟดีไซน์ Grasshopper และ Rhinoceros 3D

จากค่าที่คำนวณจากโปรแกรม Excel นำข้อมูลเข้าสู่ Grasshopper และ Rhinoceros 3D เพื่อทำการเจเนเรทีฟดีไซน์ตามกรอบแนวคิดการวิจัย Rhinoceros 3D (Rhino) เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลอง 3 มิติ โดยมี Grasshopper เป็นปลั๊กอินที่ทำงานบน Rhino และใช้สำหรับการออกแบบพารามेटริกดีไซน์ ช่วยให้นักออกแบบสามารถสร้างและควบคุมกระบวนการออกแบบได้โดยใช้ระบบการเขียนโปรแกรมแบบ Visual Programming Languages เป็นการเขียนโปรแกรมด้วยภาพ เป็นภาษาประเภทหนึ่งที่ใช้องค์ประกอบกราฟิก เช่น ไอคอน ปุ่ม และสัญลักษณ์ในรูปแบบของการเข้ารหัส (รูปที่ 3.8)



รูปที่ 3.8 เปรียบเทียบ Programming กับ Visual Programming

ที่มา: Tait, T. (2023, July 29). Grasshopper for Rhino: A beginner’s guide to visual programming. Hopific. <https://hopific.com/visual-programming-in-grasshopper-for-rhino/>

3.3.1 ขั้นตอนการเลือกวัสดุ

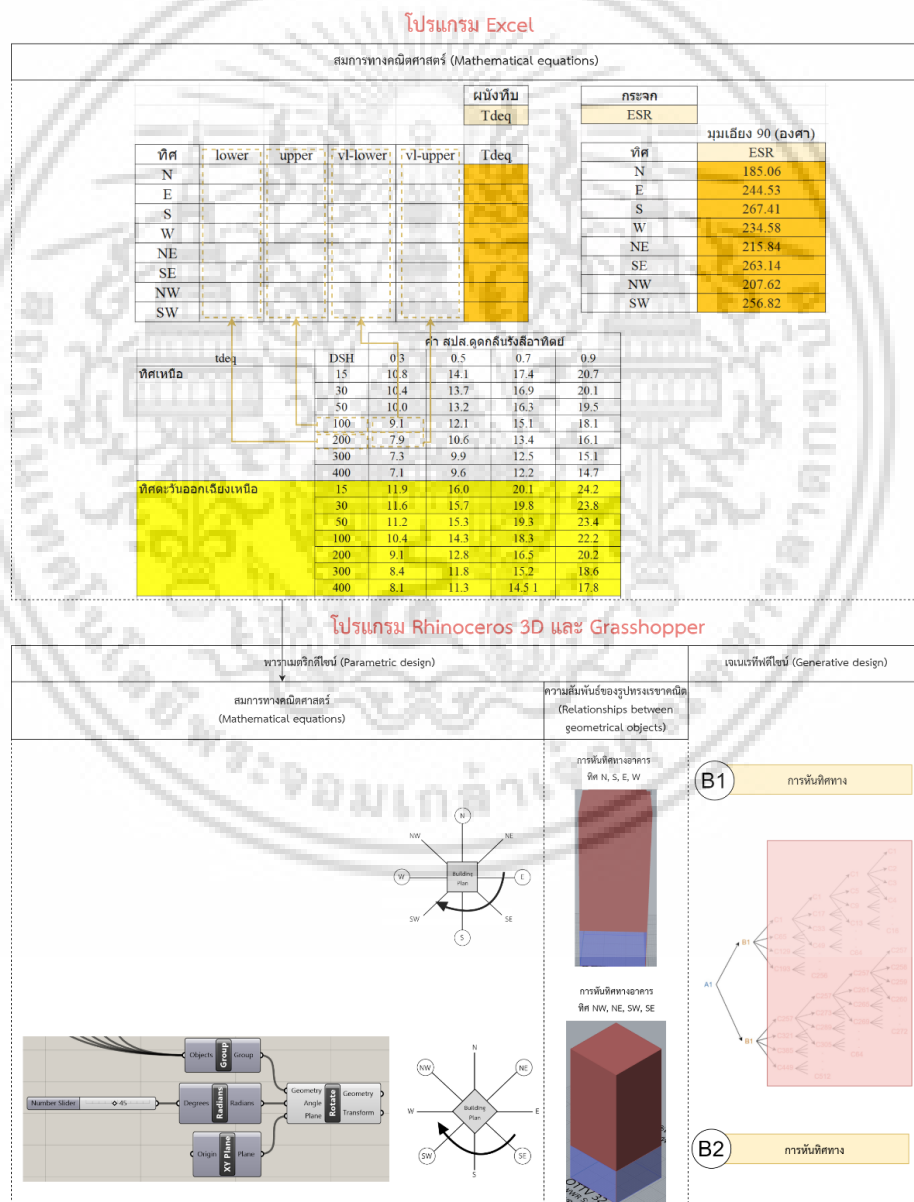
Grasshopper สามารถสร้างสมการคณิตศาสตร์ ได้หลายรูปแบบผ่านการใช้คอมโพเนนต์ (Components) ที่รองรับการคำนวณทางคณิตศาสตร์ทั้งพื้นฐานและขั้นสูง เช่น การบวก ลบ คูณหาร รวมถึงสมการที่ซับซ้อน ซึ่งสามารถเชื่อมต่อข้อมูลเข้ากับแบบจำลองสามมิติได้ (รูปที่ 3.10)

จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Excel ทำการป้อนข้อมูลค่าคงที่ด้านการเลือกวัสดุ พร้อมสร้างสูตรระบบเปลือกอาคาร ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบเปลือกอาคาร (Overall Thermal Transfer Value, OTTV) ในโปรแกรม Grasshopper เพื่อนำค่าเชื่อมต่อกับแบบจำลองสามมิติ แสดงผลด้วยโปรแกรม Rhinoceros 3D (รูปที่ 3.11)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ขั้นตอนการหันทิศทาง

ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (Effective Solar Radiation; ESR) ของผนัง ทึบ และค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (equivalent temperature difference, TDeq) ของ กระจก จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Excel ทำการป้อนข้อมูลในโปรแกรม Grasshopper แสดงผล ด้วยโปรแกรม Rhinoceros 3D เป็นการเจนเนอเรทีฟดีไซน์อาคาร 2 รูปทรง ตามกรอบแนวคิดการวิจัย การหันทิศทาง N, S, E, W และ การหันทิศทาง NW, NE, SW, SE ดังนั้นใน Grasshopper การหมุน อาคารหรือวัตถุเป็นมุม 45 องศา สามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Rotate ซึ่งเป็นการหมุน แบบพาราเมตริก เพื่อหมุนรูปทรง (geometry) ของอาคาร (รูปที่ 3.12)



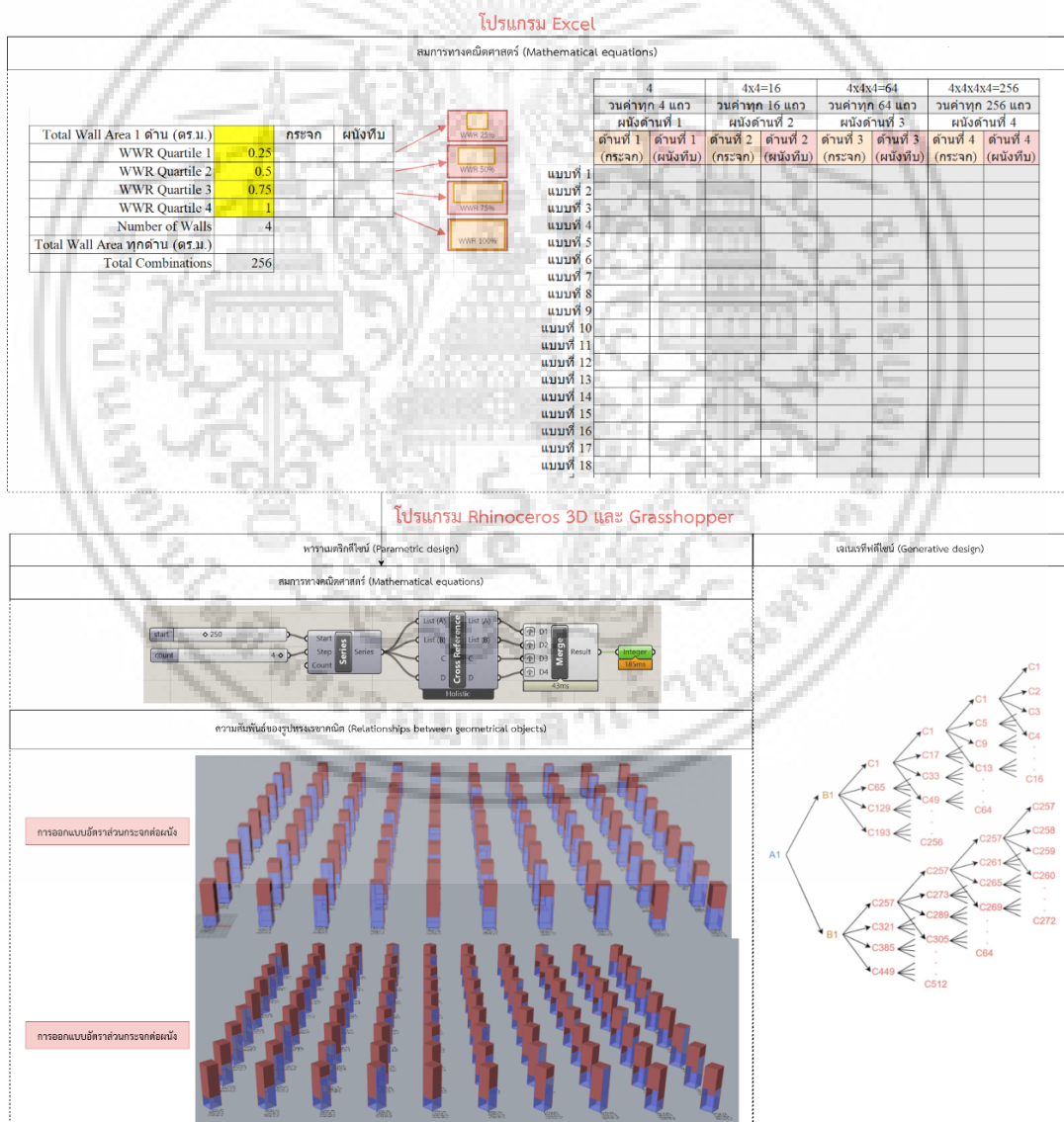
รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการหันทิศทาง

ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ขั้นตอนการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง

พื้นที่ผนังทับและพื้นที่กระจก มีความสัมพันธ์กันตามอัตราส่วนกระจกต่อผนัง (Window-to-Wall Ratio: WWR) ตามกรอบแนวคิด C1-C256) การออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง ทิศ N, S, E, W และ C257-C512) การออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง ทิศ NW, NE, SW, SE ใน Grasshopper คำนวณ Window-to-Wall Ratio (WWR) สามารถทำได้โดยใช้ Series (4 ชุดข้อมูลของ WWR 25% 50% 75% 100%) และ Cross Reference ใช้สร้างกฎการคูณ (rule of multiplication) ร่วมกับ Merge (รวมข้อมูล) การสร้างคำสั่งในโปรแกรม Grasshopper เพื่อสร้างแบบจำลองที่ครอบคลุมทุกความเป็นไปได้ ทิศ N, S, E, W 256 แบบจำลอง กับทิศ NW, NE, SW, SE 256 แบบจำลอง รวมเป็น 512 แบบจำลองอาคาร แสดงผลด้วยโปรแกรม Rhinoceros 3D (รูปที่ 3.13)

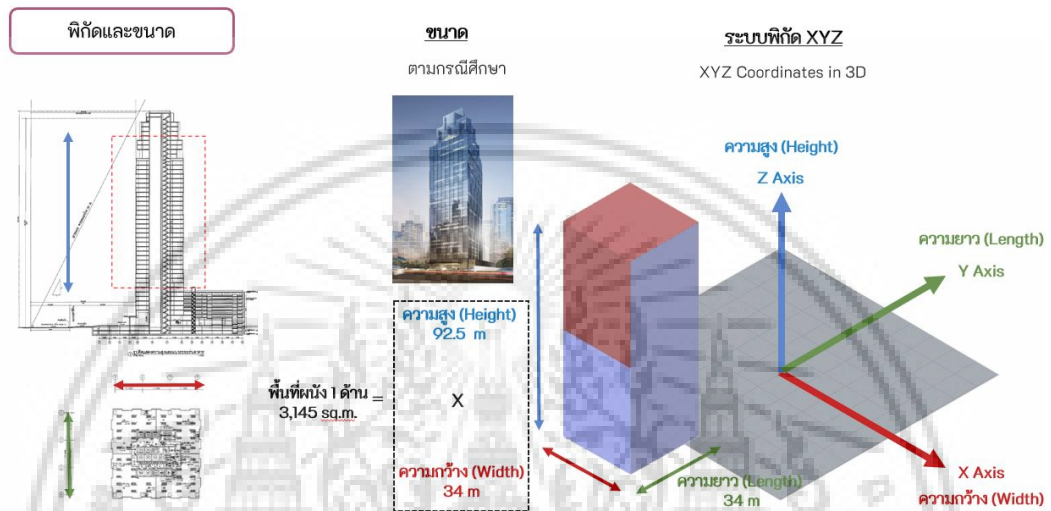


รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง

ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

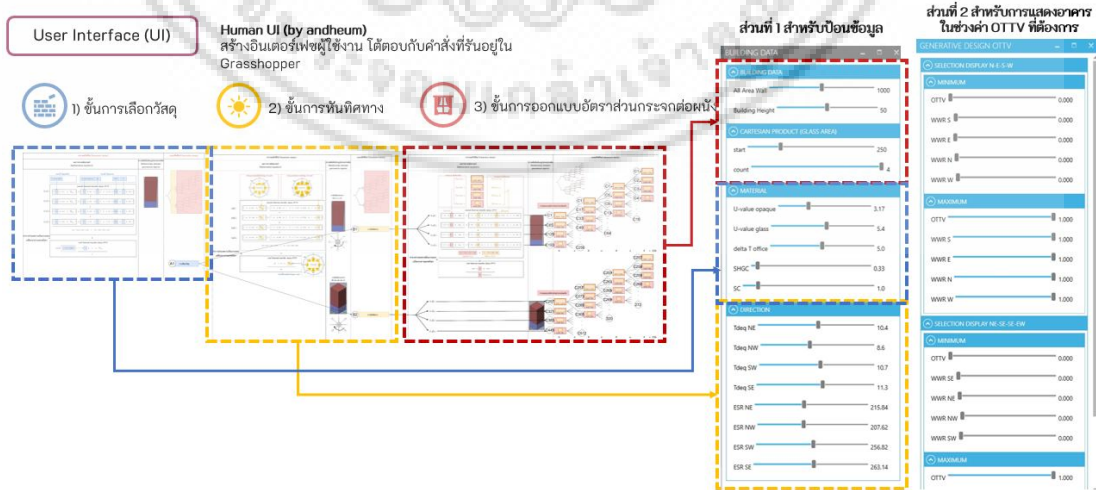
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากกระบวนการเจเนเรทีฟดีไซน์ การสร้างแบบจำลองสามมิติต้องพิจารณาถึงพิกัด (Coordinates) การทำงานใน Grasshopper จะอิงอยู่บนระบบพิกัดสามมิติ (XYZ) ซึ่งจะมีผลต่อการวางตำแหน่งของวัตถุ (Geometry) และขนาด (Dimensions) การกำหนดขนาดของวัตถุ เช่น ความกว้าง ความสูง และความลึก เพื่อสร้างรูปทรงตามกรณีศึกษาอาคารสำนักงาน โดยมี User Experience (UX) แสดงผลหน้าต่าง คำอธิบายและสี ควบคู่กับแบบจำลองสามมิติ (รูปที่ 3.14)



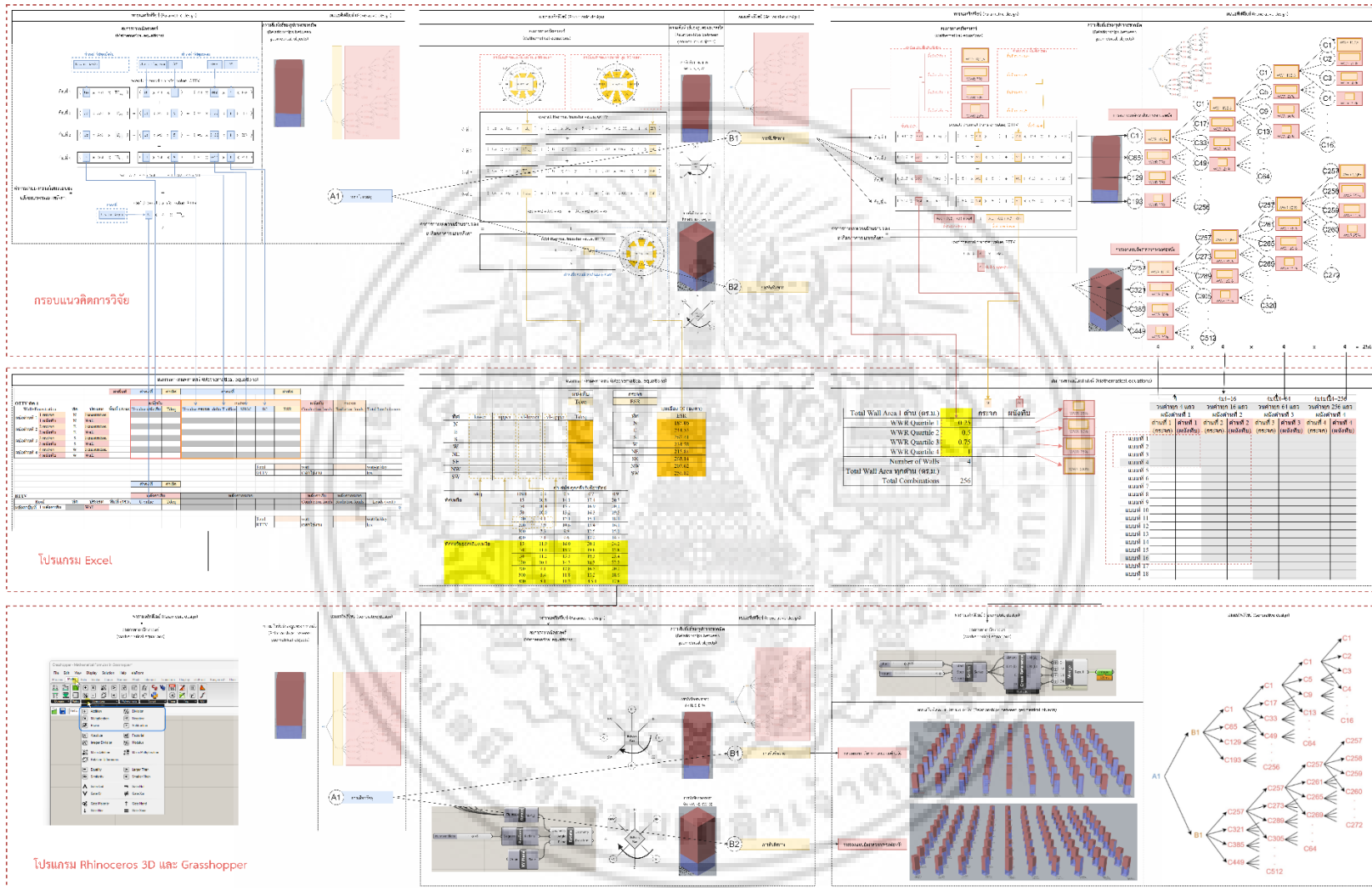
รูปที่ 3.13 User Experience (UX)
ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

User Interface (UI) การปรับค่าเป็นส่วนเสริมของการใช้งานเครื่องมือเจเนเรทีฟดีไซน์เพื่อไม่ต้องปรับค่าสิ่งผ่าน Grasshopper ที่มีคำสั่งซับซ้อน โดยนำค่าจากรอบแนวคิดเป็น ส่วนที่ 1 สำหรับการป้อนข้อมูล และ ส่วนที่ 2 สำหรับการแสดงอาคารในช่วงค่า OTTV ที่ต้องการ (รูปที่ 3.15)



รูปที่ 3.14 User Interface (UI)
ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 กรอบเครื่องมือเจนเนเรทีฟดีไซน์

ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

วิธีการดำเนินการศึกษา การสร้างเครื่องมือเจเนเรทีฟดีไซน์ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอน 1) การเลือกวัสดุ 2) การหันทิศทาง 3) การออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง เครื่องมือเจเนเรทีฟดีไซน์ Excel สามารถคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของเปลือกอาคารและหลังคา ได้ผลลัพธ์ค่า OTTV และ RTTV ของ 1 อาคาร แต่จากการสร้างคำสั่งในโปรแกรม Grasshopper แสดงผลแบบจำลองสามมิติด้วยโปรแกรม Rhinoceros 3D สามารถสร้างแบบจำลองอาคารที่ครอบคลุมทุกความเป็นไปได้ ทิศ N, S, E, W 256 แบบจำลอง กับทิศ NW, NE, SW, SE 256 แบบจำลอง รวมเป็น 512 แบบจำลองอาคาร (รูปที่ 3.16)

3.4 การวิเคราะห์และประเมินผลลัพธ์

การวิเคราะห์ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบเปลือกอาคาร (Overall thermal transfer value: OTTV) และ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (Roof thermal transfer value: RTTV) เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานประเทศไทย จากประกาศกระทรวงพลังงาน เรื่อง กำหนดค่ามาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ.2564 [82] กำหนดค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (ตารางที่ 3.1)

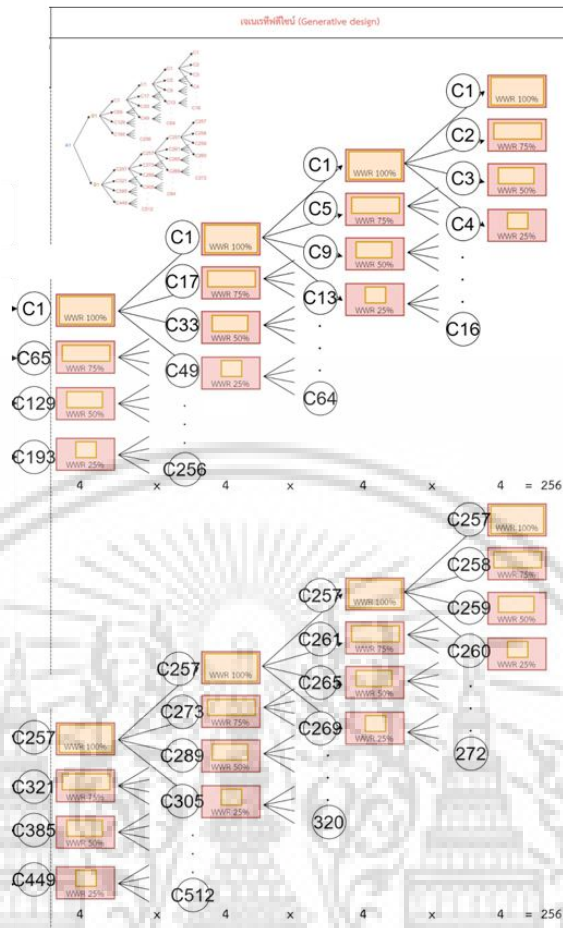
ตารางที่ 3.1 ค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานระบบเปลือกอาคาร ประเภทอาคารสำนักงานหรือที่ทำการ

ระบบเปลือกอาคาร	ค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน
ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคาร (overall thermal transfer value; OTTV)	ไม่เกิน 50 วัตต์ต่อตารางเมตร
ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (roof thermal transfer value; RTTV)	ไม่เกิน 10 วัตต์ต่อตารางเมตร

ที่มา : กระทรวงพลังงาน (2564) [82]

เจเนเรทีฟดีไซน์เพื่อสร้างทางเลือกการออกแบบเปลือกอาคารสำนักงาน ตามเกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานประเทศไทย ตามกรอบแนวคิดการวิจัย มีตัวแปรตามคือค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบเปลือกอาคาร (Overall thermal transfer value: OTTV) ซึ่งค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (Roof thermal transfer value: RTTV) เป็นค่าคงที่ในการวิจัย ดังนั้นการวิเคราะห์ผลลัพธ์เป็นการพิจารณา ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบเปลือกอาคาร (Overall thermal transfer value: OTTV) ร่วมกับ ความเป็นไปได้ในการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง (รูปที่ 3.16)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 ความเป็นไปได้ในการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง
ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

การประเมินผลลัพธ์ ทำการสุ่มเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณระหว่างโปรแกรม Excel และโปรแกรม Grasshopper - Rhinoceros 3D เพื่อยืนยันความถูกต้องจำนวนของการคำนวณ โดยสุ่มตัวอย่างผลลัพธ์มาทั้งหมด 26 ตัวอย่าง จาก 256+256 ตัวอย่าง ทำการคำนวณสัดส่วนความถูกต้องของโปรแกรมด้วยการใช้สถิติเชิงพรรณนา

$$\text{สัดส่วนความถูกต้อง} = \left(\frac{\text{จำนวนตัวอย่างที่ถูกต้องจากการสุ่ม}}{\text{จำนวนตัวอย่างทั้งหมดจากการสุ่ม}} \right) \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัย

จากวัตถุประสงค์การวิจัยข้อที่ 1) ตรวจสอบอิทธิพลของตัวแปรระบบเปลือกอาคาร ได้แก่ การเลือกวัสดุ, การหันทิศทางและการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง ที่ส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของเปลือกอาคารและหลังคา จากการทบทวนวรรณกรรมมีตัวแปรระบบเปลือกอาคารที่ส่งผลตามสูตร ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบเปลือกอาคาร (Overall Thermal Transfer Value: OTTV) และค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (Roof Thermal Transfer Value: RTTV) ได้แก่

กลุ่มที่ 1 การเลือกวัสดุ (Material Selection): ประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิ เกี่ยวข้องกับการเลือกวัสดุอาคารทั้งผนังทึบและผนังโปร่งแสง (กระจก) งานวิจัยนี้กำหนดเป็นตัวแปรคงที่ในการทดสอบเจเนเรทีฟดีไซน์ เนื่องจากการกำหนดวัสดุเป็นชุดข้อมูลพื้นฐาน และงานวิจัยเน้นไปที่การสร้างทางเลือกของสถาปนิกเรื่องรูปทรงอาคาร ของผนังทึบคือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U Value) และกระจกประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U Value), ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคาร (ΔT), สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (SHGC) และค่าสัมประสิทธิ์การบังแสง (SC)

กลุ่มที่ 2 การหันทิศทาง (Orientation): ประกอบด้วยค่าทางรังสีและทิศทาง เกี่ยวข้องกับการออกแบบอาคารโดยหารหันทิศทางอาคาร กำหนดเป็นตัวแปรอิสระในการวิจัย ของผนังทึบคือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (TDeq) และกระจกคือ ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (ESR) ซึ่งตัวแปรระบบเปลือกอาคารสามารถประยุกต์ใช้กับกฎการคูณเพื่อเจเนเรทีฟดีไซน์อาคาร

กลุ่มที่ 3 การออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง (Window To Wall Ratio: WWR): ตัวแปรอิสระผนังทึบคือ ค่าพื้นที่ผนังทึบ (Opaque Area) และตัวแปรอิสระกระจกคือ พื้นที่กระจก (Transparent Area) ถ้าหากพื้นที่กระจกมากจะส่งผลให้ OTTV สูง ในทางกลับกันพื้นที่กระจกน้อยจะส่งผลให้ OTTV ต่ำ

จากวัตถุประสงค์การวิจัยข้อที่ 2) ค้นหารูปแบบการประยุกต์ใช้กฎการคูณเพื่อเจเนเรทีฟดีไซน์ด้วยวิธีพารามตริกดีไซน์ ได้ดำเนินการศึกษาตามกรอบเครื่องมือเจเนเรทีฟดีไซน์จากบทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย เพื่อสร้างทางเลือกการออกแบบอาคารสำนักงานตามเกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานประเทศไทย พบผลการดำเนินการวิจัยประกอบด้วย

4.1 เครื่องมือคำนวณเปิดใช้ด้วยโปรแกรม Excel

4.2 เครื่องมือคำนวณและแสดงผลสามมิติเปิดใช้ด้วยโปรแกรม Rhinoceros 3D และ Grasshopper

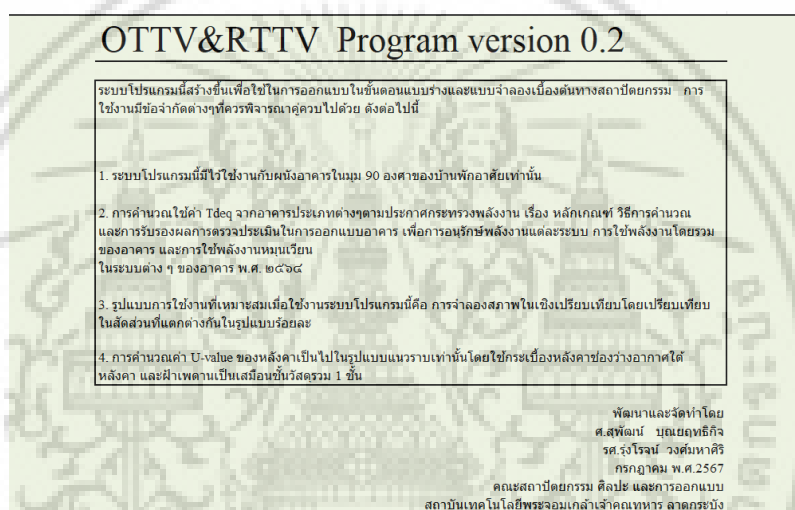
4.3 การวิเคราะห์และประเมินผลลัพธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 เครื่องมือคำนวณเปิดใช้ด้วยโปรแกรม Excel

เครื่องมือคำนวณ เปิดใช้ด้วยโปรแกรม Excel ทุกขั้นตอน A B C ประกอบด้วย สมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical equations) เพื่อนำค่าตัวเลขไปใช้ในเครื่องมือคำนวณและแสดงผลสามมิติ เปิดใช้ด้วยโปรแกรม Rhinoceros 3D

ปรับปรุงโดยใช้ต้นแบบข้อมูลจาก OTTV&RTTV Program Version 0.2 ระบบโปรแกรมในการออกแบบในขั้นตอนแบบร่างและแบบจำลองเบื้องต้นทางสถาปัตยกรรม พัฒนาและจัดทำโดย รศ. รุ่งโรจน์ วงศ์มหาศิริ และ ศ.สุพัฒน์ บุญยฤทธิกิจ กรกฎาคม พ.ศ.2567 คณะสถาปัตยกรรม ศิลปะ และการออกแบบ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (รูปที่ 4.1)



รูปที่ 4.1 OTTV&RTTV Program version 0.2

ที่มา: รศ.รุ่งโรจน์ วงศ์มหาศิริ และ ศ.สุพัฒน์ บุญยฤทธิกิจ (2567)

4.1.1 ขั้นตอนการเลือกวัสดุ

ประกอบด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Equations) การคำนวณค่าคงที่วัสดุของวัสดุผนังทึบและหลังคาทึบ ประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U Value) และวัสดุกระจก ประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U Value) กระจก, และข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (SHGC)

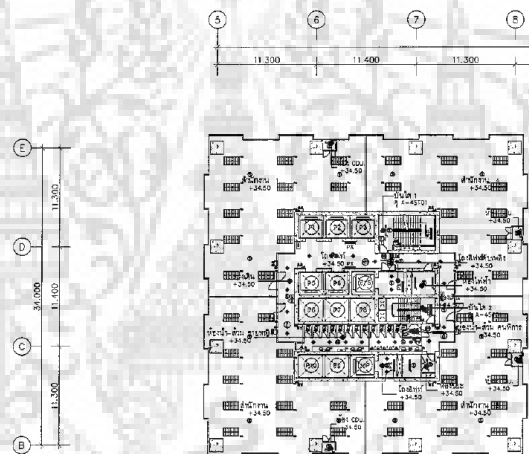
ค่าคงที่วัสดุจากกรณีศึกษาอาคารสำนักงาน ได้จากการสุ่มเลือกอาคารสำนักงานในประเทศไทยจากรายงาน EIA คือ โครงการอาคารสำนักงาน วิ44 (รูปที่ 4.2, 4.3, 4.4) ข้อมูลจากรายงาน EIA เลขที่รายงาน 12455 สถานภาพของโครงการได้รับอนุมัติ/อนุญาตก่อสร้างอยู่ระหว่างก่อสร้าง เพื่อกำหนดค่าคงที่วัสดุ (ตารางที่ 4.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 โครงการอาคารสำนักงาน วี44

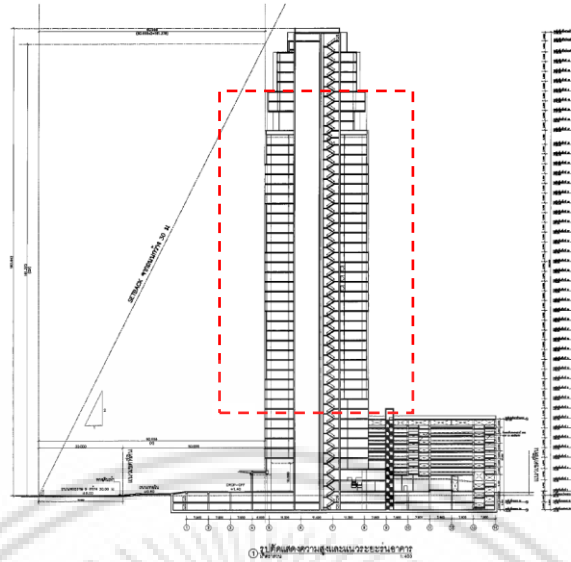
ที่มา : รายงาน EIA เลขที่รายงาน 12455 (<https://eia.onep.go.th/eia/detail?id=8383>)



รูปที่ 4.3 ผังอาคาร

ที่มา : รายงาน EIA เลขที่รายงาน 12455 (<https://eia.onep.go.th/eia/detail?id=8383>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 รูปตัดอาคาร

ที่มา : รายงาน EIA เลขที่รายงาน 12455 (<https://eia.onep.go.th/eia/detail?id=8383>)

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลวัสดุและ OTTV RTTV

ทิศ	ชนิดผนัง	พื้นที่ (sq.m.)	U (W/m ² .°C)	TD (°C)	SF	SC	Q (Watt)
NE	ผนังทึบ	55.00	3.10	13.00			2,216.50
	กระจก	5,853.00	5.30	5.00	138.70	0.08	219,246.82
	ผนังทึบ	1,497.00	6.10	14.00			127,843.80
รวม OTTV ผนังทึบ W/m ²	83.00	รวม OTTV กระจก W/m ²	37.46	รวม OTTV ด้าน W/m ²	47.17		
SE	ผนังทึบ	885.00	3.10	13.00			35,665.50
	กระจก	4,800.00	5.30	5.00	186.90	0.07	189,991.68
	ผนังทึบ	15.00	6.10	14.00			1,281.00
รวม OTTV ผนังทึบ W/m ²	41.05	รวม OTTV กระจก W/m ²	39.58	รวม OTTV ด้าน W/m ²	39.81		
SW	ผนังทึบ	34.00	3.10	13.00			1,370.20
	กระจก	6,261.00	5.30	5.00	180.60	0.07	246,216.85
	ผนังทึบ	1,114.00	6.10	14.00			95,135.60
รวม OTTV ผนังทึบ W/m ²	84.06	รวม OTTV กระจก W/m ²	39.33	รวม OTTV ด้าน W/m ²	46.26		
NW	ผนังทึบ	34.00	3.10	13.00			1,370.20
	กระจก	5,757.00	5.30	5.00	134.20	0.08	214,386.07
	ผนังทึบ	10.00	6.10	14.00			854.00
รวม OTTV ผนังทึบ W/m ²	50.55	รวม OTTV กระจก W/m ²	37.24	รวม OTTV ด้าน W/m ²	37.34		
หลังคา	หลังคาทึบ	1,156.00	0.50	12.00			6,936.00
รวม RTTV W/m ²	6						

ที่มา : รายงาน EIA เลขที่รายงาน 12455 (<https://eia.onep.go.th/eia/detail?id=8383>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าคงที่วัสดุจากกรณีศึกษาอาคารสำนักงาน ดังนั้นสามารถกำหนดตัวแปรคงที่ในงานวิจัย ดังแสดงใน ตารางที่ 4.2 การกำหนดตัวแปรคงที่ในงานวิจัย

ตารางที่ 4.2 การกำหนดตัวแปรคงที่ในงานวิจัย

วัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิ	ค่าคงที่
วัสดุผนังทึบ	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U Value) ผนังทึบ	ผนัง 3.10 W/m ² .°C หลังคา 0.5 W/m ² .°C
วัสดุกระจก	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U Value) กระจก	กระจก 5.3 W/m ² .°C
	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (SHGC)	กระจกเขียว* 0.54
	ค่าสัมประสิทธิ์การบังแสง (SC)	1 ไม่มีแผงบังแดด
	ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคาร (ΔT)	5 °C ตามประกาศ

ที่มา: ผู้วิจัย (2567)

เครื่องมือคำนวณเปิดใช้ด้วยโปรแกรม Excel มีสูตรระบบเปลือกอาคาร ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของเปลือกอาคารและหลังคา ประกอบด้วย ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบเปลือกอาคาร (Overall Thermal Transfer Value: OTTV) และ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (Roof Thermal Transfer Value: RTTV) สำหรับกรอกข้อมูลรวม (รูปที่ 4.5)

ผนังทึบ		U-value ผนังทึบ							
ชั้นวัสดุ	ประเภท	k (W/m .°C)	D (kg/m3)	c _p (J/kg .°C)	ความหนา มม.	R (m2 .C)/W	DSH		
1	ฟิล์มอากาศภายนอก					0.044			
2	อิฐมวลเบาปูนสองหน้า	1.102	1700	0.79	75	0.0681	100.725		
3	ปูนฉาบ (รับหนักสมทราวด)	0.72	1860	0.84	50	0.0694	78.12		
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10	ฟิล์มอากาศภายใน					0.12			
						U-value	3.3167		
						DSH	178.845		

OTTV ทิศ 1													
Wall+ Fenestration	ทิศ	ประเภท	พื้นที่ (Area)	U-value ผนังทึบ	Ideg	U-value กระจก	delta T office	SHGC	SC	ESR	Conduction loads	Radiation loads	Total Loads in row
ผนังด้านที่ 1	1 ผนังทึบ	N Wall	250	3.17	8.1	5.4	5	0.33	1	185.06	6,419.25	22,017.45	22,017.45
ผนังด้านที่ 2	2 กระจก	E Fenestration	250	3.17	11.1	5.4	5	0.33	1	244.53	8,796.75	26,923.73	26,923.73
ผนังด้านที่ 3	3 กระจก	S Fenestration	250	3.17	11.1	5.4	5	0.33	1	267.41	8,796.75	28,811.33	28,811.33
ผนังด้านที่ 4	4 กระจก	W Fenestration	250	3.17	11.1	5.4	5	0.33	1	234.58	8,796.75	26,102.85	26,102.85
ผนังด้านที่ 4	4 ผนังทึบ	W Wall	250	3.17	10.2						8,083.50	-	8,083.50
			2000										
										Total	135,951.60 watt	1,359,516.00 watt-hr/day	
										OTTV	67.98 เวลาใช้งาน	10 hrs.	

RTTV													
Roof	ทิศ	ประเภท	พื้นที่ (m2)	U-value	Ideg	หลังคากระจก				หลังคาทึบ	หลังคากระจก	Loads (watt)	
หลังคาชั้นที่ 1	1 หลังคาทึบ	Wall	400	0.39	10.2						1,591.20	-	1,591.2
			400										
										Total	1591.2 watt	15,912.00 watt-hr/day	
										RTTV	3.978 เวลาใช้งาน	10 hrs.	

รูปที่ 4.5 ขั้นตอนการเลือกวัสดุ

ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ขั้นตอนการหันทิศทาง

ค่าทิศทางของผนังทึบ คือ ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (Effective Solar Radiation: ESR) ค่าทิศทางของกระจก คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (Equivalent Temperature Difference: T_{deq}) ทิศทาง ชุดที่ 1 ทิศเหนือ ตะวันออก ได้ ตะวันตก และทิศทาง ชุดที่ 2 ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ตะวันออกเฉียงใต้ ตะวันตกเฉียงใต้ ตะวันตกเฉียงเหนือ

การหันทิศทาง N, S, E, W และ การหันทิศทาง NW, NE, SW, SE ประกอบด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Equations) สำหรับการคำนวณ T_{deq} ของผนังทึบ และตาราง ESR ของกระจก โดยใช้ฟังก์ชัน VLOOKUP (Vertical Lookup) ใน Excel สำหรับค้นหาค่าที่อยู่ในแนวตั้งของตารางหรือช่วงข้อมูล แล้วส่งกลับค่าเพื่อใช้ในการคำนวณ (รูปที่ 4.6)

ผนังทึบ		ผนังทึบ					
T_{deq}		ทิศ	lower	upper	v-lower	v-upper	T_{deq}
DSH	178.845	N	100	200	9.100	7.900	10.30
ค่าป.ล.ดูดกลืนรังสีอาทิตย์	0.3	E	100	200	11.100	9.800	12.40
		S	100	200	11.100	9.700	12.30
		W	100	200	10.200	8.700	11.70
		NE	100	200	10.400	9.100	11.70
		SE	100	200	11.300	9.900	12.70
		NW	100	200	9.600	8.200	11.00
		SW	100	200	10.700	9.200	12.20

หลังคา		หลังคา					
T_{deq}		ทิศ	lower	upper	v-lower	v-upper	T_{deq}
DSH	13.6	ALL	15	15	33.600	33.600	33.60
ค่าป.ล.ดูดกลืนรังสีอาทิตย์	0.7						

ผนังทึบ		ค่าเฉลี่ยดูดกลืนรังสีอาทิตย์					
T_{deq}		id	DSH	0.3	0.5	0.7	0.9
ทิศเหนือ	15	10.8	14.1	17.4	20.7		
		30	10.4	13.7	16.9	20.1	
		50	10.0	13.2	16.3	19.5	
		100	9.1	12.1	15.1	18.1	
		200	7.9	10.6	13.4	16.1	
ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ	300	7.3	9.9	12.5	15.1		
		400	7.1	9.6	12.2	14.7	
		15	11.9	16.0	20.1	24.2	
		30	11.6	15.7	19.8	23.8	
ทิศตะวันออก	50	11.2	15.3	19.3	23.4		
		100	10.4	14.3	18.3	22.2	
		200	9.1	12.8	16.5	20.2	
		300	8.4	11.8	15.2	18.6	
ทิศตะวันออกเฉียงใต้	400	8.1	11.3	14.5	17.8		
		15	12.6	17.2	21.9	26.5	
		30	12.3	16.9	21.5	26.1	
		50	11.9	16.5	21.1	25.6	
ทิศใต้	100	11.1	15.5	20.0	24.4		
		200	9.8	13.9	18.0	22.2	
		300	9.0	12.8	16.6	20.4	
		400	8.6	12.2	15.8	19.4	
ทิศตะวันตก	15	13.0	17.9	22.7	27.6		
		30	12.6	17.5	22.3	27.2	
		50	12.2	17.0	21.8	26.5	
		100	11.3	15.9	20.5	25.1	
ทิศตะวันตกเฉียงใต้	200	9.9	14.1	18.4	22.6		
		300	9.1	13.0	16.9	20.8	

รูปที่ 4.6 ขั้นตอนการหันทิศทาง
ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

4.1.3 ขั้นตอนการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง

ค่าผันแปรพื้นที่จากกรอบแนวคิดการวิจัย Window-to-Wall Ratio (WWR) หรืออัตราส่วนหน้าต่างต่อผนัง หมายถึงสัดส่วนพื้นที่ของหน้าต่างเทียบกับพื้นที่ของผนังทั้งหมด โดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 Quartile ได้ดังนี้ 25% 50% 75% และ 100% ดังนั้นเมื่อกำหนด พื้นที่ผนังรวม 1 ด้าน จึงสามารถทราบพื้นที่กระจกและพื้นที่ผนังทึบ (รูปที่ 4.7)

- 25% WWR: หน้าต่างเป็น 25% ของพื้นที่ผนัง ผนังเป็น 75% ของพื้นที่ทั้งหมด
- 50% WWR: หน้าต่างเป็น 50% ของพื้นที่ผนัง ผนังและหน้าต่างมีพื้นที่เท่ากัน
- 75% WWR: หน้าต่างเป็น 75% ของพื้นที่ผนังผนังจะเหลือเพียง 25%
- 100% WWR: ผนังทั้งหมดจะเป็นหน้าต่าง หรือไม่มีพื้นที่ผนังที่เป็นทึบเลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Total Wall Area 1 ด้าน (ตร.ม.)	1000	กระจก	ผนังทึบ	
WWR Quartile 1	0.25	250	750	WWR 25%
WWR Quartile 2	0.5	500	500	WWR 50%
WWR Quartile 3	0.75	750	250	WWR 75%
WWR Quartile 4	1	1000	0	WWR 100%
Number of Walls	4			
Total Wall Area ทุกด้าน (ตร.ม.)	4000			
Total Combinations	256			

รูปที่ 4.7 อัตราส่วนกระจกต่อผนัง

ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

เจเนเรทีฟดีไซน์การออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนังประกอบด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical equations) โดยการนำกฎการคูณ (Rule of Multiplication) คำนวณจำนวนความเป็นไปได้ทั้งหมดในการออกแบบด้วยพื้นที่ผนังทึบและพื้นที่กระจก จาก Window-to-Wall Ratio (WWR) สูตร excel เพื่อสร้างความเป็นไปได้ทั้งหมด ในการคำนวณความเป็นไปได้ทั้งหมดของอาคาร 1 หลังที่มีผนัง 4 ด้าน ประกอบด้วย ฟังก์ชัน INDEX จะดึงค่าจากช่วงเซลล์ที่กำหนดโดยอ้างอิงจากแถวและคอลัมน์ที่ระบุ ฟังก์ชัน COUNTA จะนับจำนวนเซลล์ที่ไม่ว่างเปล่าในช่วงที่กำหนด (รูปที่ 4.8)

ด้านที่ 1 (กระจก) และด้านที่ 1 (ผนังทึบ) จาก 4 สูตรรวมค่าจากทุกๆ 4 แถว

ด้านที่ 2 (กระจก) และด้านที่ 2 (ผนังทึบ) จาก $4 \times 4 = 16$ สูตรรวมค่าจากทุกๆ 16 แถว

ด้านที่ 3 (กระจก) และด้านที่ 3 (ผนังทึบ) จาก $4 \times 4 \times 4 = 64$ สูตรรวมค่าจากทุกๆ 64 แถว

ด้านที่ 4 (กระจก) และด้านที่ 4 (ผนังทึบ) จาก $4 \times 4 \times 4 \times 4 = 256$ สูตรรวมค่าจากทุกๆ 256 แถว

	4		4x4=16		4x4x4=64		4x4x4x4=256	
	ผนังด้านที่ 1		ผนังด้านที่ 2		ผนังด้านที่ 3		ผนังด้านที่ 4	
	ด้านที่ 1 (กระจก)	ด้านที่ 1 (ผนังทึบ)	ด้านที่ 2 (กระจก)	ด้านที่ 2 (ผนังทึบ)	ด้านที่ 3 (กระจก)	ด้านที่ 3 (ผนังทึบ)	ด้านที่ 4 (กระจก)	ด้านที่ 4 (ผนังทึบ)
แบบที่ 1	250	750	250	750	250	750	250	750
แบบที่ 2	500	500	250	750	250	750	250	750
แบบที่ 3	750	250	250	750	250	750	250	750
แบบที่ 4	1000	0	250	750	250	750	250	750
แบบที่ 5	250	750	500	500	250	750	250	750
แบบที่ 6	500	500	500	500	250	750	250	750
แบบที่ 7	750	250	500	500	250	750	250	750
แบบที่ 8	1000	0	500	500	250	750	250	750
แบบที่ 9	250	750	750	250	250	750	250	750
แบบที่ 10	500	500	750	250	250	750	250	750
แบบที่ 11	750	250	750	250	250	750	250	750
แบบที่ 12	1000	0	750	250	250	750	250	750
แบบที่ 13	250	750	1000	0	250	750	250	750
แบบที่ 14	500	500	1000	0	250	750	250	750
แบบที่ 15	750	250	1000	0	250	750	250	750
แบบที่ 16	1000	0	1000	0	250	750	250	750
แบบที่ 17	250	750	250	750	500	500	250	750
แบบที่ 254	500	500	1000	0	1000	0	1000	0
แบบที่ 255	750	250	1000	0	1000	0	1000	0
แบบที่ 256	1000	0	1000	0	1000	0	1000	0

รูปที่ 4.8 ขั้นตอนการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง

ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 เครื่องมือคำนวณและแสดงผลสามมิติเปิดใช้ด้วยโปรแกรม Grasshopper และ Rhinoceros 3D

เครื่องมือเจเนเรทีฟดีไซน์ Excel สามารถคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของเปลือกอาคาร และหลังคา ได้ผลลัพธ์ค่า OTTV และ RTTV ของ 1 อาคาร แต่จากการสร้างคำสั่งในโปรแกรม Grasshopper แสดงผลแบบจำลองสามมิติด้วยโปรแกรม Rhinoceros 3D สามารถสร้างแบบจำลองอาคารที่ครอบคลุมทุกความเป็นไปได้ ทิศ N, S, E, W 256 แบบจำลอง กับทิศ NW, NE, SW, SE 256 แบบจำลอง รวมเป็น 512 แบบจำลองอาคาร

จากค่าที่คำนวณจากโปรแกรม excel นำข้อมูลเข้าสู่ Rhinoceros 3D (Rhino) เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลอง 3 มิติ โดยมี Grasshopper เป็นปลั๊กอินที่ทำงานบน Rhino ใช้ระบบการเขียนโปรแกรมแบบ Visual Programming Languages เป็นการเขียนโปรแกรมด้วยภาพเพื่อทำการเจเนเรทีฟดีไซน์ตามกรอบแนวคิดการวิจัย

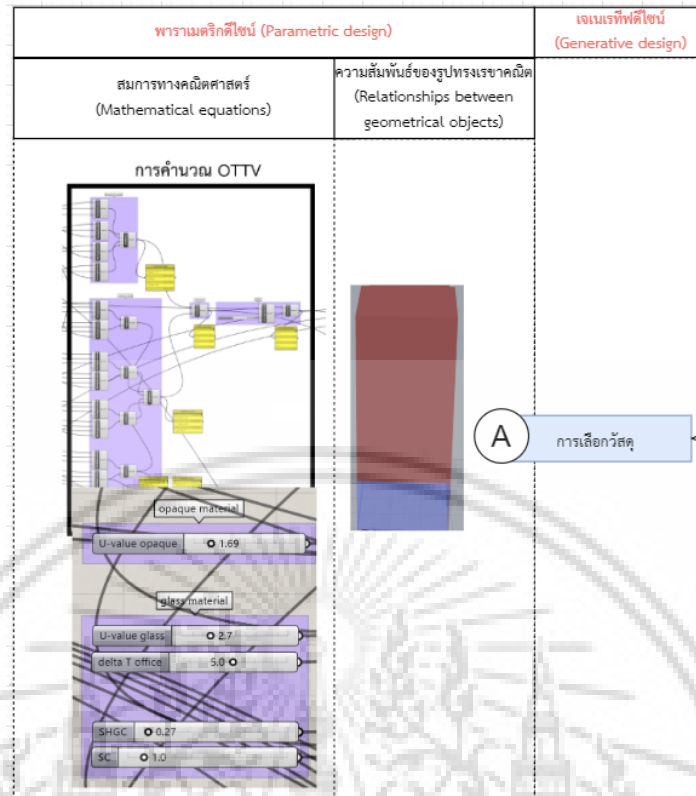
4.2.1 ขั้นตอนการเลือกวัสดุ

1. สมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical equations) จากค่าที่คำนวณจากโปรแกรม excel นำข้อมูลเข้าสู่ Grasshopper สำหรับการป้อนข้อมูลค่าคงที่ด้านการเลือกวัสดุ ของวัสดุผนัง ทึบและหลังคาทึบ ประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U Value) และวัสดุกระจก ประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U Value) กระจก, และข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (SHGC)

โดยมีสูตรระบบเปลือกอาคาร ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของเปลือกอาคารและหลังคา ประกอบด้วย ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบเปลือกอาคาร (Overall Thermal Transfer Value: OTTV) และ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (Roof Thermal Transfer Value: RTTV) สำหรับกรอกข้อมูลรวม โดยสร้างสมการคณิตศาสตร์ใน Grasshopper เชื่อมต่อข้อมูลเข้ากับโมเดลสามมิติ

2. ความสัมพันธ์ของรูปทรงเรขาคณิต (Relationships between geometrical objects) จากคำสั่งแสดงผลสามมิติด้วยโปรแกรม Rhinoceros 3D ได้รูปทรงอาคารสำนักงานฝั่งสี่เหลี่ยมจัตุรัส

3. เจเนเรทีฟดีไซน์ (Generative design) เป็นขั้นตอนแรกของการเจเนเรทีฟดีไซน์ จึงได้ 1 การออกแบบอาคาร (รูปที่ 4.9)



รูปที่ 4.9 ขั้นตอนการเลือกวัสดุ

ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

4.2.2 ขั้นตอนการหันทิศทาง

1. สมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical equations) สำหรับการป้อนข้อมูล Tdeq ของผนังทึบ และ ESR ของกระจก เพื่อเชื่อมต่อเข้ากับสมการ OTTV และแบบจำลองสามมิติ

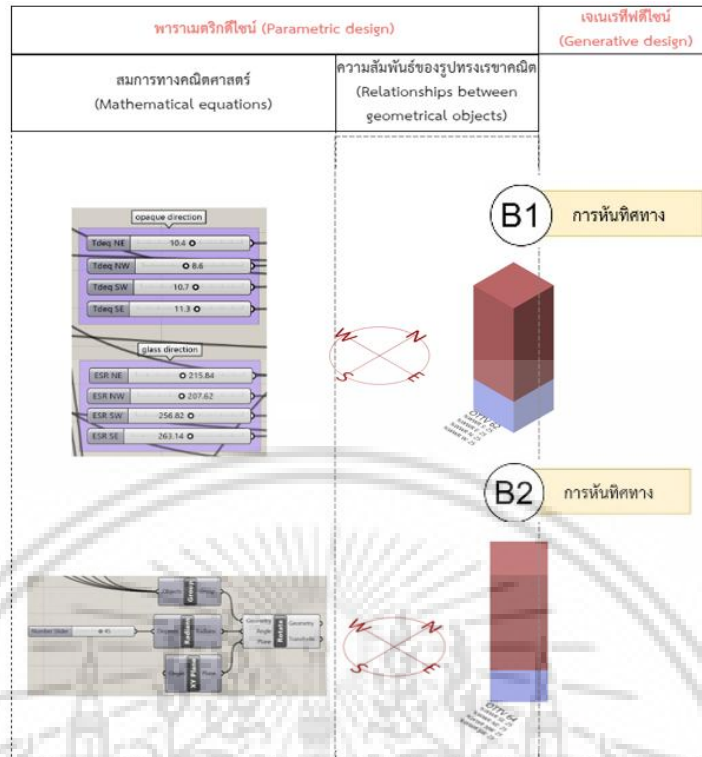
ใน Grasshopper 1) อาคารหันด้านตามทิศ N, S, E, W ไม่มีการหมุนอาคาร

ใน Grasshopper 2) อาคารหันด้านตามทิศ NW, NE, SW, SE หมุนอาคาร 45 องศา ใช้คำสั่ง Rotate เชื่อมต่อ input ของมุมการหมุน (Angle) โดยกำหนดค่า 45 องศา ร่วมกับคำสั่ง Radians (45 องศา = $\pi/4$ เรเดียน)

2. ความสัมพันธ์ของรูปทรงเรขาคณิต (Relationships between geometrical objects) จากคำสั่งแสดงผลสามมิติด้วยโปรแกรม Rhinoceros 3D ได้รูปทรงอาคารสำนักงานฝั่งสี่เหลี่ยมจัตุรัส 1) อาคารหันด้านตามทิศ N, S, E, W และ 2) อาคารหันด้านตามทิศ NW, NE, SW, SE

3. เจเนเรทีฟดีไซน์ (Generative design) ได้ 2 การออกแบบรูปทรงอาคาร 1) อาคารหันด้านตามทิศ N, S, E, W และ 2) อาคารหันด้านตามทิศ NW, NE, SW, SE หมุนอาคาร 45 องศา (รูปที่ 4.10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ขั้นตอนการหันทิศทาง

ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

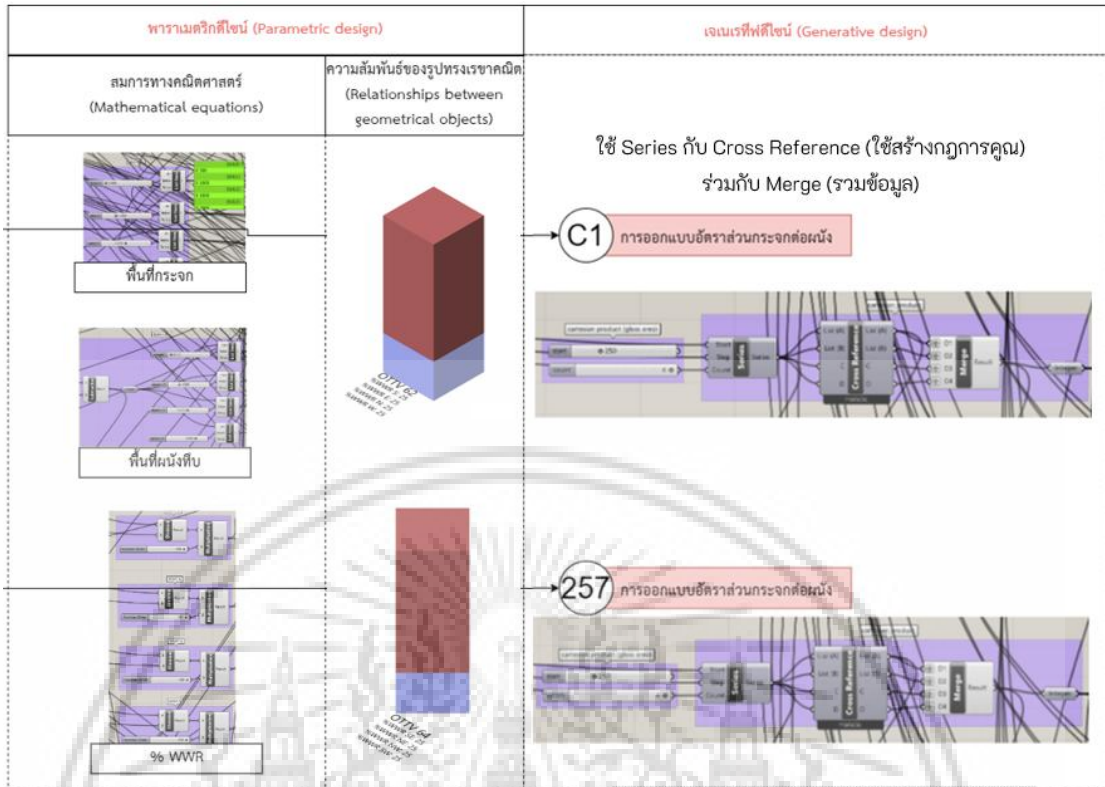
4.2.3 ขั้นตอนการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง

1. สมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical equations) สำหรับการบ่อนค่า พื้นที่กระจก, พื้นที่ผนังทึบ และอัตราส่วนกระจกต่อผนัง (Wall-to-Window Ratio; WWR) โดยการสร้างคำสั่งในโปรแกรม Grasshopper ใช้คำสั่ง Series กับ Cross Reference เพื่อใช้สร้างกฎการคูณร่วมกับคำสั่ง Merge รวมข้อมูล เชื่อมต่อเข้ากับแบบจำลองสามมิติ

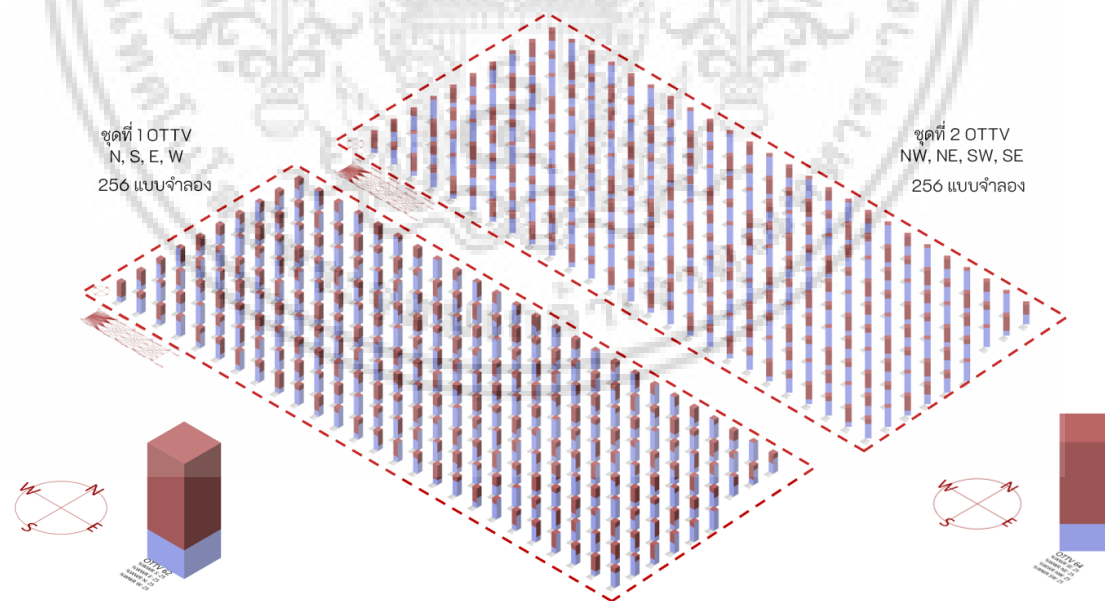
2. ความสัมพันธ์ของรูปทรงเรขาคณิต (Relationships between geometrical objects) จากคำสั่งแสดงผลสามมิติด้วยโปรแกรม Rhinoceros 3D ได้รูปทรงอาคารสำนักงานผังสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งประกอบด้วยกระจกทั้ง 4 ด้านอาคารตาม WWR Quartile ทั้ง 4 แบบที่กำหนดค่าไว้

3. เจเนเรทีฟดีไซน์ (Generative design) จากการนำกฎการคูณ (Rule of Multiplication) มาใช้ในกระบวนการออกแบบเจเนเรทีฟดีไซน์ คำนวณจำนวนความเป็นไปได้ทั้งหมดในการออกแบบด้วยพื้นที่ผนังทึบและพื้นที่กระจก ได้แบบจำลองสามมิติ ชุดที่ 1 OTTV N, S, E, W 256 แบบจำลอง และชุดที่ 2 OTTV NW, NE, SW, SE 256 แบบจำลอง รวมทั้งหมด 512 แบบจำลอง (รูปที่ 4.11, 4.12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ขั้นตอนการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง
ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

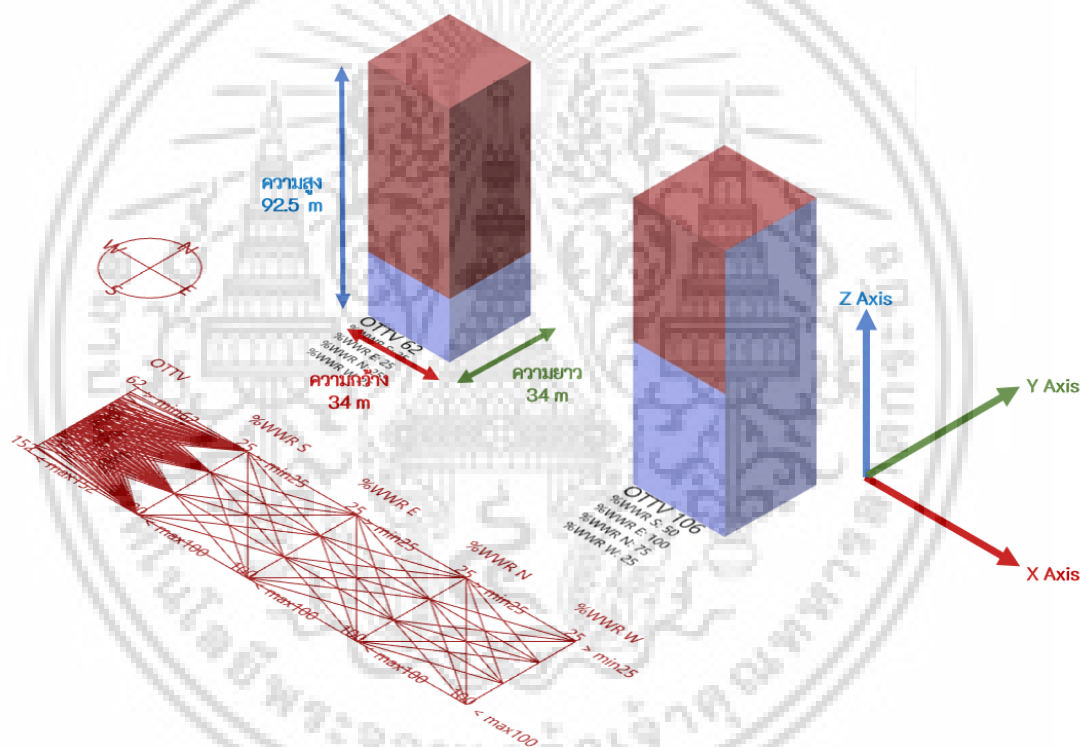


รูปที่ 4.12 ชุดที่ 1 แบบจำลองทิศ N, S, E, W 256 แบบอาคาร (ล่าง) และ ชุดที่ 2 แบบจำลองทิศ NW, NE, SW, SE 256 แบบอาคาร (บน)
ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิกัดและขนาด การกำหนดรูปทรงอาคารจาก พิกัด (Coordinates) ขนาด (Dimensions) และการกำหนดรูปทรงกระจกของอาคารจาก พิกัด (Coordinates) ขนาด (Dimensions) เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติอาคาร รายละเอียด ภาคผนวก ข

User experience (UX) ประกอบด้วย ส่วนการแสดงผลโมเดลสามมิติ สี และข้อความ กับ ส่วนการแสดงผลตัวเลือกโมเดลสามมิติในช่วงค่าที่ต้องการ (Displaying 3D Model Options in the Desired Range) แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าการถ่ายเทความร้อนเปลือกอาคารกับอัตราส่วนกระจกต่อผนังทุกทิศทาง ได้แก่ OTTV, %WWR S, %WWR E, %WWR N, %WWR W กราฟแบบ Parallel Coordinates เป็นกราฟที่ใช้ในการแสดงข้อมูลหลายมิติพร้อมกัน แสดงเป็นเส้นที่ผ่านแต่ละแกน (รูปที่ 4.13)

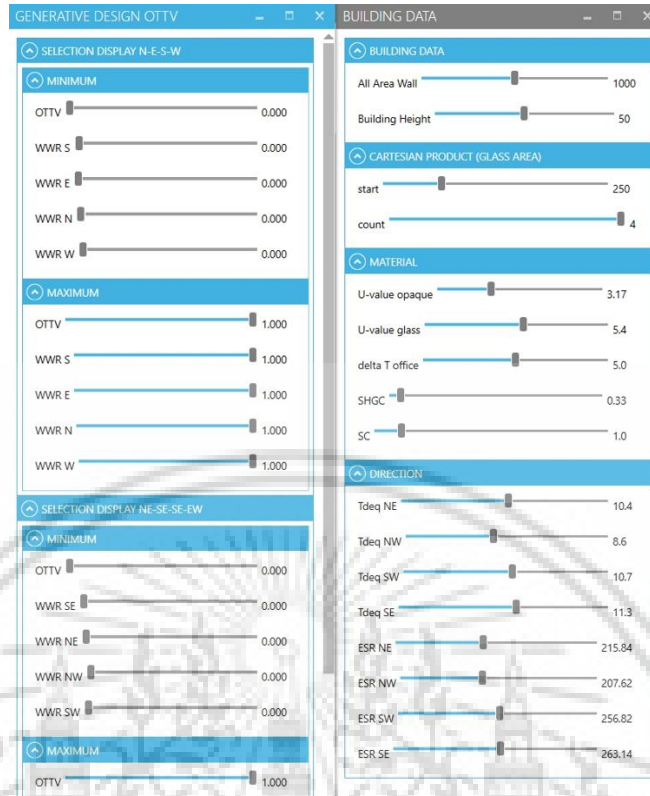


รูปที่ 4.13 User experience (UX)

ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

User Interface (UI) สร้างด้วยปลั๊กอิน Human UI สำหรับ Grasshopper สามารถสร้างอินเตอร์เฟซผู้ใช้แบบปรับแต่งเอง (custom user interface) ที่สามารถโต้ตอบกับกระบวนการที่รันอยู่ใน Grasshopper ได้ ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 สำหรับป้อนข้อมูล และส่วนที่ 2 สำหรับการแสดงผลแบบจำลองสามมิติในช่วงค่า OTTV ที่ต้องการ (รูปที่ 4.14)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 User Interface (UI)

ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การวิเคราะห์และประเมินผลลัพธ์

4.3.1 การเจเนเรทีฟดีไซน์แสดงผลทุกความเป็นไปได้ของค่า OTTV

ผลลัพธ์จากเครื่องมือเจเนเรทีฟดีไซน์ แสดงผลแบบจำลองสามมิติ รวมทั้งหมด 512 แบบจำลอง แบ่งเป็น ชุดที่ 1 N, S, E, W และ ชุดที่ 2 NW, NE, SW, SE (รูปที่ 4.15, 4.16)

แบบจำลองชุดที่ 1 N, S, E, W (รวม 256 แบบ) จำแนกตามช่วงค่า OTTV ระหว่าง ค่าต่ำสุด 62.30 W/m² ถึงค่ามากที่สุด 152.28 W/m² รายละเอียดตามภาคผนวก ค

แบบจำลองชุดที่ 2 NW, NE, SW, SE (รวม 256 แบบ) จำแนกตามช่วงค่า OTTV ระหว่าง ค่าต่ำสุด 63.51 W/m² ถึงค่ามากที่สุด 153.82 W/m² รายละเอียดตามภาคผนวก ง

โดยแบ่งช่วงค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบเปลือกอาคาร (OTTV) จาก 60-160 W/m² ออกเป็น 5 ช่วง ทุก 20 W/m² ดังแสดงในตารางที่ 4.3

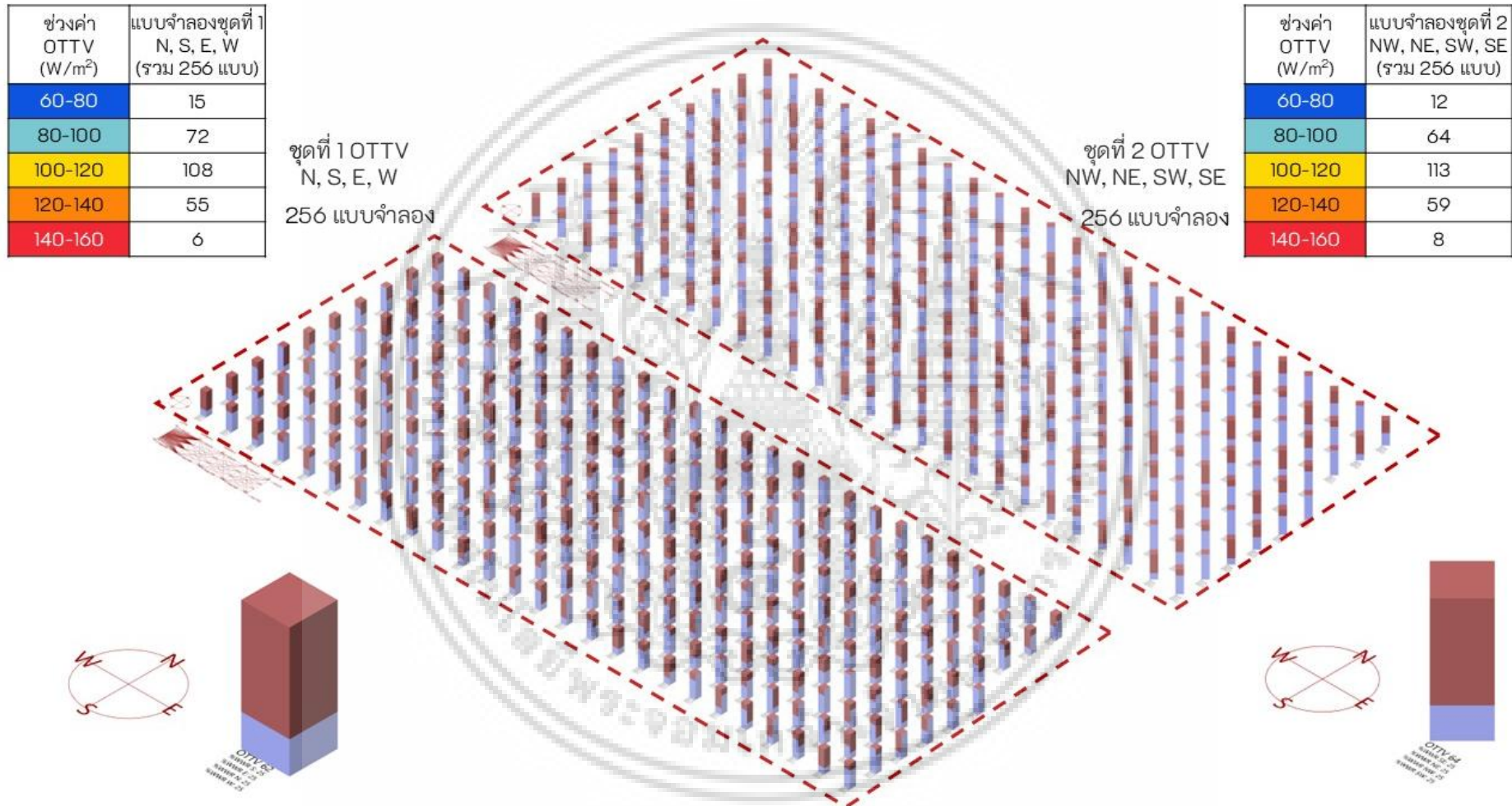
ตารางที่ 4.3 จำนวนแบบจำลอง ตามช่วงค่า OTTV

ช่วงค่า OTTV (W/m ²)	แบบจำลองชุดที่ 1 N, S, E, W (รวม 256 แบบ)	แบบจำลองชุดที่ 2 NW, NE, SW, SE (รวม 256 แบบ)
60-80	15	12
80-100	72	64
100-120	108	113
120-140	55	59
140-160	6	8

ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

การเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบเปลือกอาคาร (OTTV) ต่ำสุดและสูงสุด ของแบบจำลองสามมิติชุดที่ 1 OTTV N, S, E, W มีค่าต่ำสุด 62.30 W/m² มีอัตราส่วนกระจกต่อผนังทั้ง 4 ด้าน ทุกทิศ 25% อยู่ในกลุ่มสีน้ำเงิน และมีค่ามากที่สุด 152.28 W/m² มีอัตราส่วนกระจกต่อผนังทั้ง 4 ด้าน ทุกทิศ 100% อยู่ในกลุ่มสีแดง (รูปที่ 4.17) อัตราส่วนกระจกต่อผนังสัมพันธ์กับตัวแปรในสูตรระบบเปลือกอาคาร ถ้าหากพื้นที่กระจกมากมีผลกระทบต่อค่าการถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Thermal Transfer Value: OTTV) ของอาคารจะมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



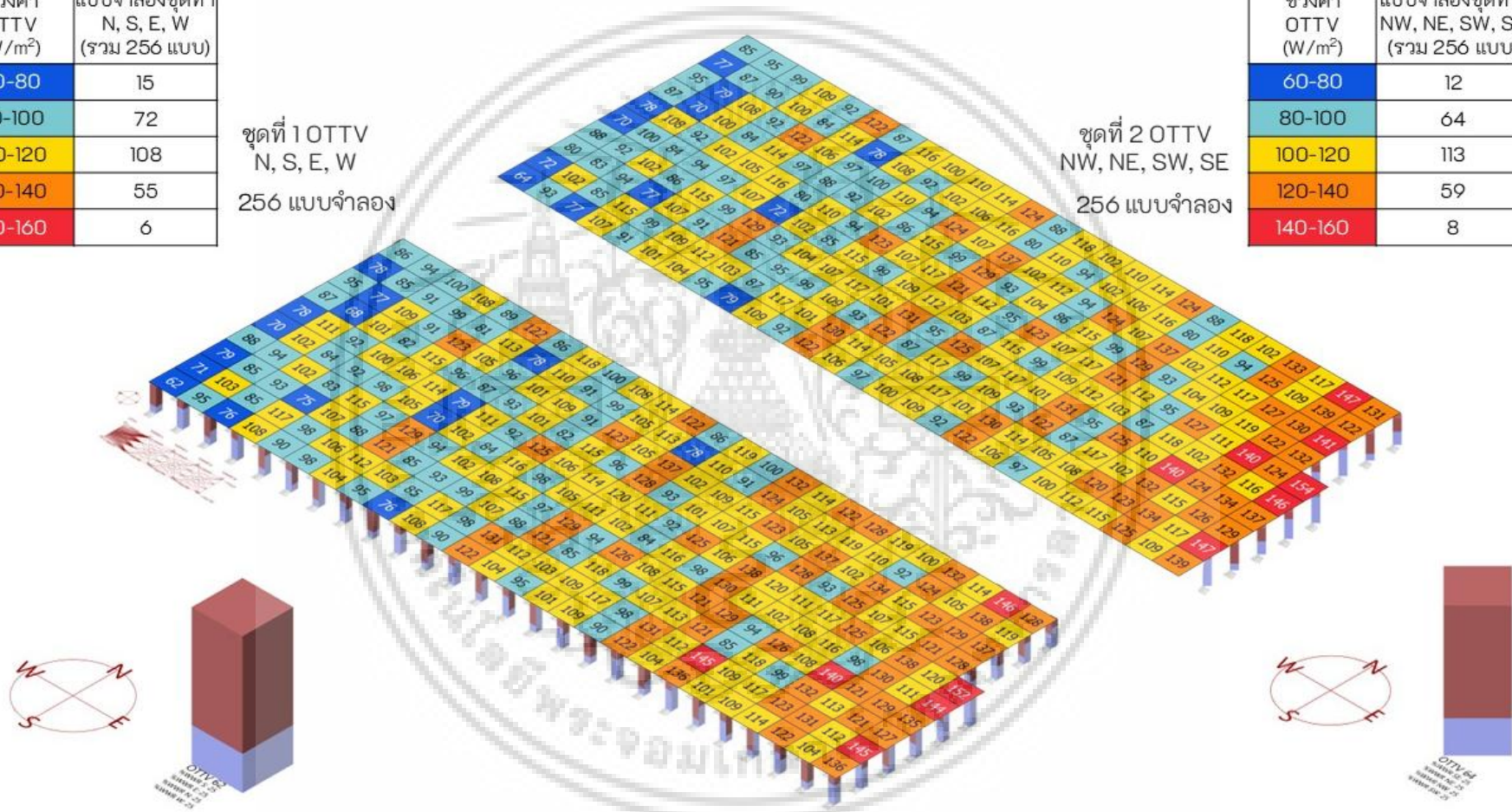
รูปที่ 4.15 การเจเนเรทีฟดีไซน์แสดงผลทุกความเป็นไปได้ของค่า OTTV
ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

ช่วงค่า OTTV (W/m ²)	แบบจำลองชุดที่ 1 N, S, E, W (รวม 256 แบบ)
60-80	15
80-100	72
100-120	108
120-140	55
140-160	6

ชุดที่ 1 OTTV
N, S, E, W
256 แบบจำลอง

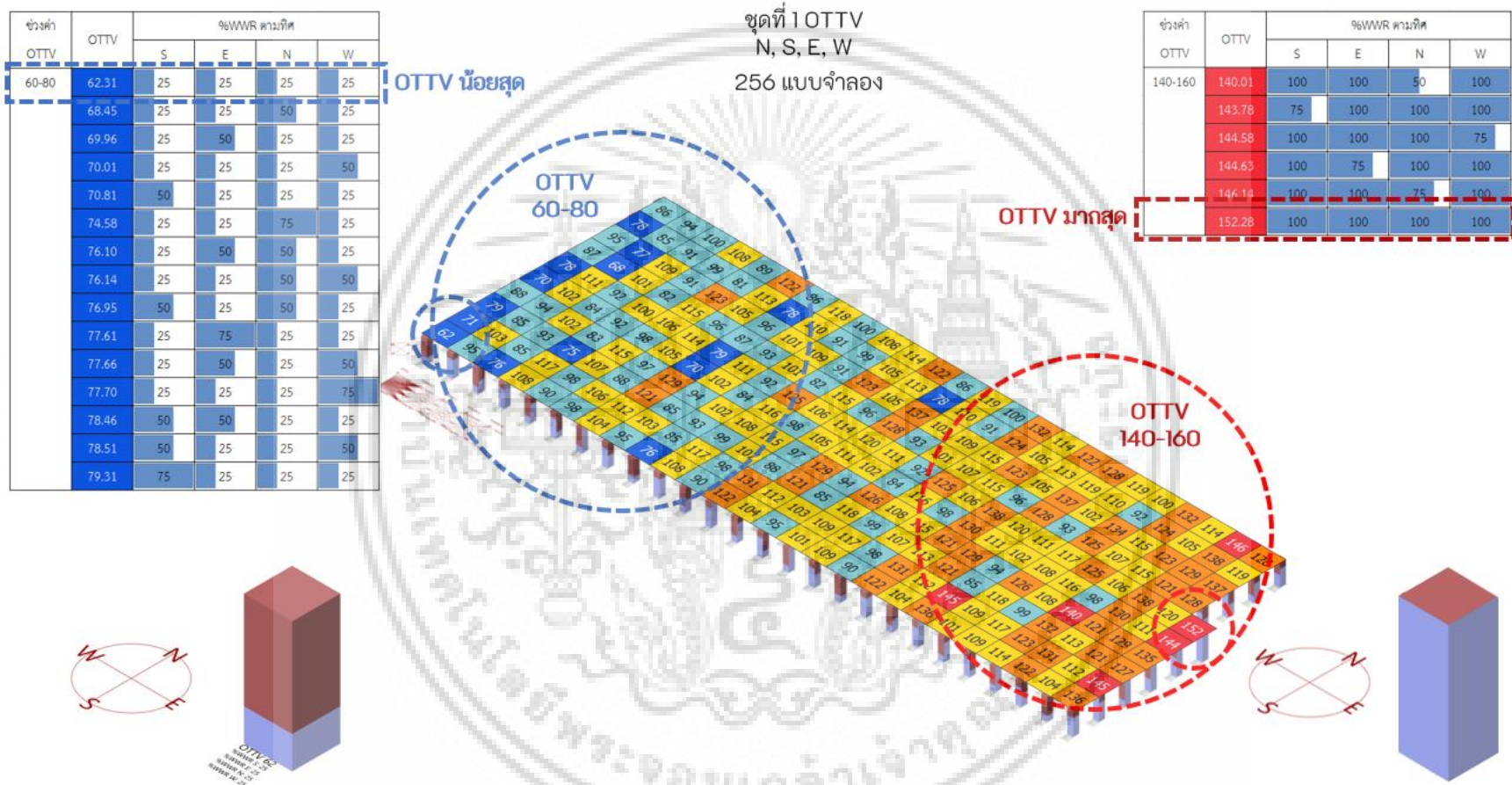
ช่วงค่า OTTV (W/m ²)	แบบจำลองชุดที่ 2 NW, NE, SW, SE (รวม 256 แบบ)
60-80	12
80-100	64
100-120	113
120-140	59
140-160	8

ชุดที่ 2 OTTV
NW, NE, SW, SE
256 แบบจำลอง



รูปที่ 4.16 การเจนเนอเรทีฟดีไซน์แสดงผลทุกความเป็นไปได้ แบ่งค่าตามช่วงค่า OTTV

ที่มา : ผู้วิจัย (2567)



รูปที่ 4.17 จุดที่ 1 OTTV N, S, E, W การเปรียบเทียบค่า OTTV ต่ำสุดและสูงสุด
ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

จากรูปที่ 4.17 ค่า OTTV ถ้าหากไม่ใช่ค่าสูงสุด ซึ่งมีอัตราส่วนกระจกต่อผนัง (WWR) 100% ทุกด้าน เมื่อพิจารณาค่า OTTV ที่สูงสุดรองลงมาทั้ง 4 ค่า มี WWR 100% ทั้ง 3 ด้าน และมี WWR 75% 1 ด้าน ดังนั้นความสัมพันธ์ของทิศ ซึ่งเป็นตัวแปรในสูตรระบบเปลือกอาคาร มีผลกระทบโดยตรงต่อของค่า OTTV สอดคล้องกับตารางทิศทางที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (ESR) สำหรับสำนักงาน เนื่องจากกระจกมากส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่เปลือกอาคารสูง (ตารางที่ 4.4) ดังนั้นสามารถลำดับทิศที่ส่งผลต่อค่า OTTV ได้ดังนี้

อาคารหันด้านตามทิศ N, S, E, W พบทิศที่ส่งผลต่อค่า OTTV เรียงตามลำดับมากที่สุดไปน้อยที่สุด คือ ทิศใต้ (S), ทิศตะวันตก (W), ทิศตะวันออก (E) และทิศเหนือ (N)

อาคารหันด้านตามทิศ NW, NE, SW, SE พบทิศที่ส่งผลต่อค่า OTTV เรียงตามลำดับมากที่สุดไปน้อยที่สุด คือ ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (SE), ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW), ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) และทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (NW)

ดังนั้นภาพรวมทั้ง 8 ทิศ ทิศที่ส่งผลต่อค่า OTTV เรียงตามลำดับมากที่สุดไปน้อยที่สุด คือ ทิศใต้ (S), ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (SE), ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW), ทิศตะวันตก (W), ทิศตะวันออก (E), ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE), ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (NW) และทิศเหนือ (N)

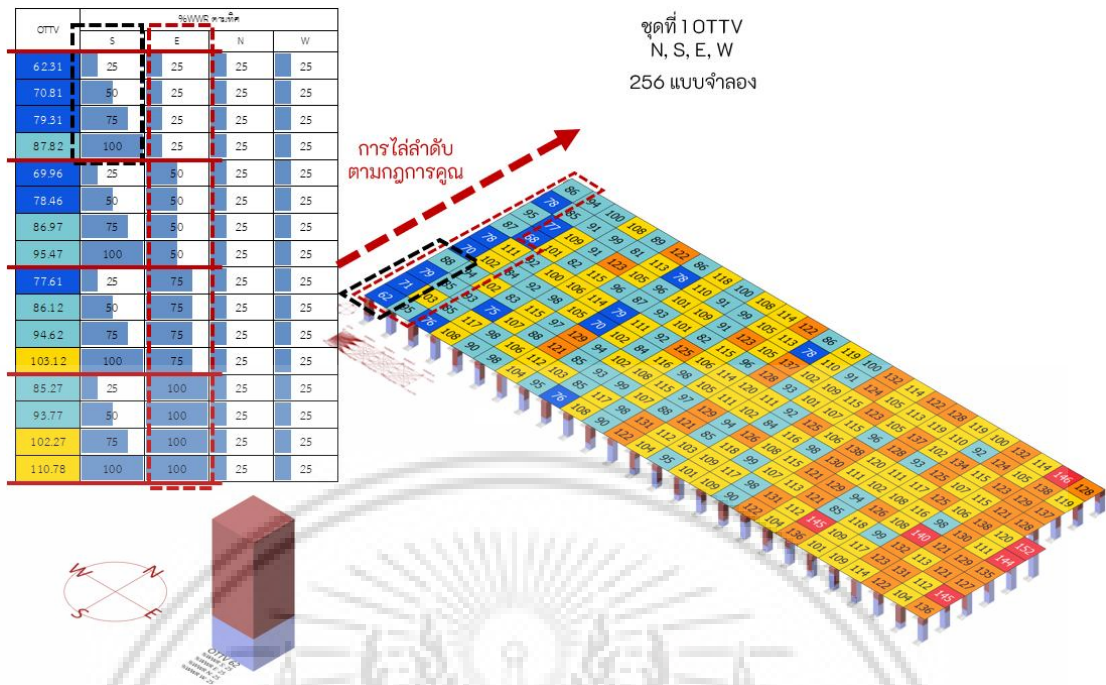
ตารางที่ 4.4 ตารางทิศทางที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (ESR) สำหรับสำนักงาน

มุมเอียง (องศา)	เหนือ	ตะวันออกเฉียงเหนือ	ตะวันออก	ตะวันออกเฉียงใต้	ใต้	ตะวันตกเฉียงใต้	ตะวันตก	ตะวันตกเฉียงเหนือ
90	185.06	215.84	244.53	263.14	267.41	256.82	234.58	207.62

การแสดงผลแบบจำลองสามมิติเรียงไล่ลำดับตามกฎการคูณ โดยมีการแสดงผลไล่จากซ้ายล่างของชุดแบบจำลองสามมิติ เริ่มจากล่างขึ้นบนในทุกแถว ดังนั้นสามารถอ่านค่าในแบบจำลองได้ตามลำดับ และสามารถเปรียบเทียบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง (Window To Wall Ratio: WWR) ไล่ลำดับตามกฎการคูณจากการวนสูตรตามลำดับด้านผนัง (รูปที่ 4.18)

- อัตราส่วนกระจกต่อผนัง ด้านที่ 1 จาก 4 สูตรรวมค่าจากทุกๆ 4 แถว ในทิศใต้ (S)
- อัตราส่วนกระจกต่อผนัง ด้านที่ 2 จาก $4 \times 4 = 16$ สูตรรวมค่าจากทุกๆ 16 แถว ในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (E)
- อัตราส่วนกระจกต่อผนัง ด้านที่ 3 จาก $4 \times 4 \times 4 = 64$ สูตรรวมค่าจากทุกๆ 64 แถว ในทิศเหนือ (N)
- อัตราส่วนกระจกต่อผนัง ด้านที่ 4 จาก $4 \times 4 \times 4 \times 4 = 256$ สูตรรวมค่าจากทุกๆ 256 แถว ในทิศตะวันตก (W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 การไล่ลำดับตามกฎการคูณ
ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

4.3.2 การเจนเรทีฟดีไซน์แสดงผลตามการกำหนดค่า OTTV และ WWR ของสถาปนิก

ในการแสดงผลแบบจำลองสามมิติ สถาปนิกสามารถปรับ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบเปลือกอาคาร (OTTV) และอัตราส่วนกระจกต่อผนัง (WWR) ทั้ง 4 ทิศได้ ตามความต้องการในการออกแบบอาคารของสถาปนิก

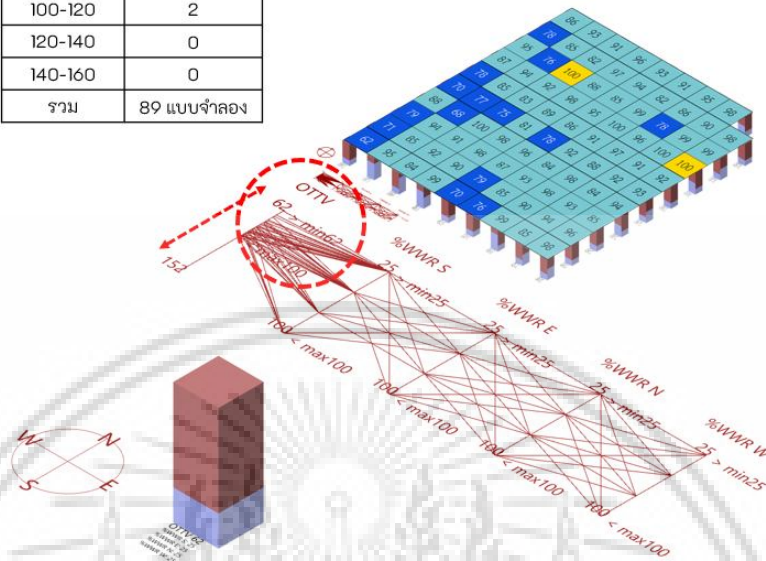
ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบเปลือกอาคาร (OTTV) เช่น ตัวอย่าง รูปที่ 4.19 สถาปนิกใช้คำสั่งเลือกช่วงค่า OTTV ต่ำกว่า 100 จาก 256 แบบจำลอง จะแสดงผลเหลือ 89 แบบจำลอง ดังนั้นสถาปนิกสามารถเลือกแสดงผลเฉพาะช่วง OTTV ที่กำหนด เพื่อพิจารณารูปทรงอาคาร จากความสัมพันธ์ของการหันทิศทางการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนังที่เหมาะสมกับการออกแบบได้

ตราส่วนกระจกต่อผนัง (WWR) ตัวอย่าง รูปที่ 4.20 สถาปนิกใช้คำสั่งเลือกช่วงค่า WWR ทิศใต้ (S) 50% จาก 256 แบบจำลอง จะแสดงผลเหลือ 64 แบบจำลอง เฉพาะอาคารที่อยู่ในขอบเขตค่าที่คัดเลือก ดังนั้นสถาปนิกสามารถเลือกแสดงผลเฉพาะช่วง WWR ที่กำหนด ตามความต้องการในการออกแบบอาคารของสถาปนิกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงค่า OTTV (W/m ²)	แบบจำลองชุดที่ 1 N, S, E, W
60-80	15
80-100	72
100-120	2
120-140	0
140-160	0
รวม	89 แบบจำลอง

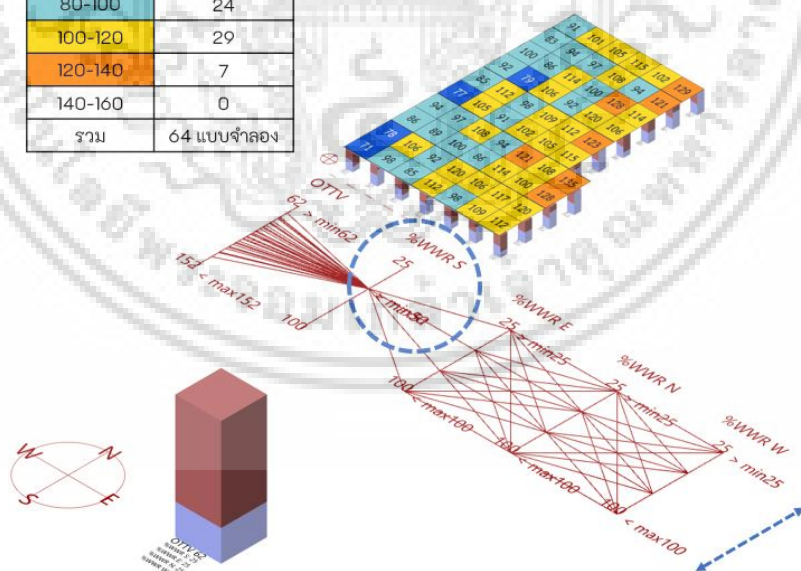
สถาปนิกใช้คำสั่ง เลือกช่วงค่า OTTV เลือก OTTV ต่ำกว่า 100



รูปที่ 4.19 สถาปนิกใช้คำสั่งเลือกช่วงค่า OTTV ต่ำกว่า 100
ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

ช่วงค่า OTTV (W/m ²)	แบบจำลองชุดที่ 1 N, S, E, W
60-80	4
80-100	24
100-120	29
120-140	7
140-160	0
รวม	64 แบบจำลอง

สถาปนิกใช้คำสั่ง เลือกช่วงค่า WWR เลือก ทิศใต้ (S) WWR 50%



รูปที่ 4.20 สถาปนิกใช้คำสั่งเลือกช่วงค่า WWR ทิศใต้ (S) 50%
ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 การประเมินผลลัพธ์ของการคำนวณ

การประเมินผลลัพธ์ของการคำนวณเพื่อยืนยันความถูกต้องของโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ ได้ทำการสุ่มเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างโปรแกรม Excel กับโปรแกรม Grasshopper - Rhinoceros 3D โดยสุ่มเลือกตัวอย่างจำนวน 26 ตัวอย่างจากแบบจำลองชุดที่ 1 ซึ่งมีจำนวนทั้งหมด 256 แบบจำลอง และอีก 26 ตัวอย่างจากแบบจำลองชุดที่ 2 ที่มีจำนวนแบบจำลองเท่ากัน รวมเป็นจำนวน 52 ตัวอย่างจากแบบจำลองทั้งหมด 512 แบบจำลอง คิดเป็นร้อยละ 10 ของจำนวนแบบจำลองทั้งหมด จากการคำนวณหาสัดส่วนความถูกต้องของผลลัพธ์ด้วยการใช้สถิติเชิงพรรณนา สูตรการคำนวณมีดังนี้

$$\text{สัดส่วนความถูกต้อง} = \left(\frac{\text{จำนวนตัวอย่างที่ถูกต้องจากการสุ่ม}}{\text{จำนวนตัวอย่างทั้งหมดจากการสุ่ม}} \right) \times 100$$

$$\text{สัดส่วนความถูกต้อง} = \left(\frac{52}{52} \right) \times 100$$

โดยในการสุ่มตัวอย่างทั้ง 52 ตัวอย่าง พบว่า ทุกตัวอย่างให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง ผลการประเมินนี้แสดงว่าการสุ่มตรวจสอบผลลัพธ์จำนวน 52 ตัวอย่าง หรือร้อยละ 10 ของจำนวนแบบจำลองทั้งหมด 512 แบบจำลอง ให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้อง 100% ดังนั้นจึงยืนยันว่าโปรแกรม Excel กับโปรแกรม Grasshopper - Rhinoceros 3D มีการทำงานที่ตรงกันและมีความถูกต้อง

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

5.1 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

5.1.1 ตรวจสอบอิทธิพลของตัวแปรระบบเปลือกอาคาร ได้แก่ การเลือกวัสดุ, การหันทิศทางและการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง ที่ส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของเปลือกอาคารและหลังคา

จากการทบทวนวรรณกรรมจากสูตรระบบเปลือกอาคาร ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบเปลือกอาคาร (Overall Thermal Transfer Value: OTTV) และค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (Roof Thermal Transfer Value: RTTV) โดยมีตัวแปรระบบเปลือกอาคารที่ส่งผลตามสูตรตามประกาศกระทรวง [83] ได้แก่ กลุ่มที่ 1 การเลือกวัสดุ: ผนังที่บคือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U Value) และกระจกประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U Value), ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคาร (ΔT), สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (SHGC) และค่าสัมประสิทธิ์การบังแสง (SC) สอดคล้องกับงานวิจัย Systematic review เปลือกอาคารของ V. Gupta และ C. Deb [77] ระบุว่าฉนวน (Insulation or U-Value) คุณสมบัติของกระจก (Glazing Type) และอัตราส่วนหน้าต่างต่อผนัง (WWR) ส่งผลต่อประสิทธิภาพพลังงานอาคารเขตร้อน กลุ่มที่ 2 การหันทิศทาง: ผนังที่บคือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (TDeq) และกระจกคือ คารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (ESR) สอดคล้องกับงานวิจัยอาคารในเขตร้อนให้ความสำคัญกับการวางทิศทาง (Orientation) [78-79] กลุ่มที่ 3 การออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง (Window To Wall Ratio: WWR) ส่งผลต่อค่าพื้นที่ผนังที่บ และค่าพื้นที่กระจก สอดคล้องกับงานวิจัยของ V. Gupta และ C. Deb [77] อัตราส่วนหน้าต่างต่อผนัง (WWR) ส่งผลต่อประสิทธิภาพพลังงานอาคารเขตร้อน

ซึ่งตัวแปรระบบเปลือกอาคารสามารถประยุกต์ใช้กับกฎการคูณเพื่อเจเนเรทีฟดีไซน์อาคารด้วยวิธีพาราเมตริกดีไซน์ (Parametric design) ที่มีความสัมพันธ์ของสมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical equations) และความสัมพันธ์ของรูปทรงเรขาคณิต (Relationships between geometrical objects) [68]

5.1.2 ค้นหาแบบการประยุกต์ใช้กฎการคูณเพื่อเจเนเรทีฟดีไซน์ด้วยวิธีพารามเมตริกดีไซน์

เจเนเรทีฟดีไซน์เพื่อสร้างทางเลือกการออกแบบเปลือกอาคารสำนักงานตามเกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานประเทศไทย เครื่องมือ 2 โปรแกรม ได้แก่ 1) เครื่องมือคำนวณเปิดใช้ด้วยโปรแกรม Excel สามารถคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของเปลือกอาคารและหลังคา ได้ผลลัพธ์ค่า OTTV และ RTTV ของ 1 อาคาร กับ 2) เครื่องมือคำนวณและแสดงผลสามมิติเปิดใช้ด้วยโปรแกรม Grasshopper และ Rhinoceros 3D สามารถสร้างแบบจำลองอาคารทิศ N, S, E, W ได้ 256 แบบจำลอง และทิศ NW, NE, SW, SE ได้ 256 แบบจำลอง รวมเป็น 512 แบบจำลองอาคาร โดยเครื่องมือดำเนินการตามกฎการคูณ (Rule of Multiplication) ขั้นการเลือกวัสดุ, ขั้นการหันทิศทาง และขั้นการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าการถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Thermal Transfer Value: OTTV) เนื่องจากเป็นตัวแปรจากสูตรระบบเปลือกอาคารตามการทบทวนวรรณกรรม

ขั้นการเลือกวัสดุในงานวิจัยกำหนดเป็นค่าคงที่จากกรณีศึกษา ขั้นการหันทิศทางมีผลกระทบโดยตรงต่อค่า OTTV สอดคล้องกับคาร์ริงส์อาทิติยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (ESR) สำหรับสำนักงาน เนื่องจากกระจกมากส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่เปลือกอาคารสูง ภาพรวมทั้ง 8 ทิศทิศที่ส่งผลต่อค่า OTTV เรียงตามลำดับมากที่สุดไปน้อยที่สุด คือ ทิศใต้ (S), ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (SE), ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW), ทิศตะวันตก (W), ทิศตะวันออก (E), ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE), ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (NW) และทิศเหนือ (N) สุดท้ายขั้นอัตราส่วนกระจกต่อผนัง ถ้าหากอัตราส่วนกระจกต่อผนังมากคือพื้นที่กระจกมาก ส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่า OTTV ของอาคารจะมากขึ้นตาม ถ้าหากพื้นที่กระจกน้อย ค่า OTTV จะน้อยลง

ทั้งเครื่องมือคำนวณเปิดใช้ด้วยโปรแกรม Excel กับเครื่องมือคำนวณและแสดงผลสามมิติเปิดใช้ด้วยโปรแกรม Grasshopper และ Rhinoceros 3D สามารถเจเนเรทีฟดีไซน์เพื่อสร้างทางเลือกการออกแบบเปลือกอาคารสำนักงาน ตามเกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานประเทศไทย การประเมินผลลัพธ์ของการคำนวณสุ่ม 52 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 10 ของ 512 แบบจำลอง ให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้อง 100% ดังนั้นจึงยืนยันว่าโปรแกรม Excel กับโปรแกรม Grasshopper - Rhinoceros 3D มีการทำงานที่ตรงกันและมีความถูกต้อง

ผลลัพธ์เครื่องมือได้ 512 แบบจำลองอาคารที่แตกต่างกัน สอดคล้องกับหลักการของเจเนเรทีฟดีไซน์แก้ปัญหาโดยใช้คอมพิวเตอร์ที่ขับเคลื่อนการสำรวจการออกแบบ [1] ด้วยกระบวนการวนซ้ำที่สร้างตัวเลือกการออกแบบทั้งหมดโดยอัตโนมัติตามเงื่อนไขและช่วยเลือกแบบที่ดีที่สุด [46, 48, 71] จากการที่เครื่องมือสามารถระบุค่า OTTV และ WWR ได้ควบคู่กับการแสดงผลแบบจำลอง ดังนั้นเจเนเรทีฟดีไซน์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพความเป็นไปได้ในการออกแบบ [3] นักออกแบบสามารถทางเลือกสำหรับการพัฒนาการออกแบบต่อไปได้ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การนำไปใช้ประโยชน์

การวิจัยในครั้งนี้ค้นพบการนำไปใช้ประโยชน์ทางทฤษฎี คือ เจเนเรทีฟดีไซน์ในด้านการอนุรักษ์พลังงานทั้ง 4 ประเภท แนวโน้มการใช้งานมี 2 วิธีการพบมากที่สุด คือ Evolutionary Algorithms แต่ Parametric ได้รับความนิยมมากสุดในปัจจุบัน และได้กรอบของพารามेटริกดีไซน์ (Parametric Design) จากสมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Equations) กับความสัมพันธ์ของรูปทรงเรขาคณิต (Relationships Between Geometrical Objects) และเจเนเรทีฟดีไซน์ (Generative Design)

การวิจัยในครั้งนี้ค้นพบการนำไปใช้ประโยชน์ทางเครื่องมือ คือ ได้เจเนเรทีฟดีไซน์เพื่อสร้างทางเลือกการออกแบบเปลือกอาคารสำนักงานตามเกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานประเทศไทย ประกอบด้วย เครื่องมือคำนวณเปิดใช้ด้วยโปรแกรม Excel กับเครื่องมือคำนวณและแสดงผลสามมิติเปิดใช้ด้วยโปรแกรม Rhinoceros 3D และ Grasshopper โดยสามารถประยุกต์ใช้กับการออกแบบจากการพิจารณาตัวแปรทั้ง 3 ขั้นตอนตามกฎการคูณ (Rule of Multiplication) คือ ขั้นตอนการเลือกวัสดุ, ขั้นตอนการหันทิศทาง และขั้นตอนการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง ในการแสดงผลแบบจำลองสามมิติ สถาปนิกสามารถปรับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบเปลือกอาคาร (OTTV) และอัตราส่วนกระจกต่อผนัง (WWR) ทั้ง 4 ทิศได้ เพื่อแสดงผลเฉพาะแบบจำลองที่ต้องการตามความต้องการของสถาปนิก เครื่องมือสามารถแสดงผลรูปทรงอาคารควบคู่กับค่า OTTV ซึ่งเป็นการประเมินพลังงานตั้งแต่ช่วงแรกของการออกแบบอาคาร สามารถประยุกต์ใช้กับการออกแบบเพื่อให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานและเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานในอาคารได้มากขึ้น

การวิจัยในครั้งนี้ค้นพบการนำไปใช้ประโยชน์ทางปฏิบัติ คือ ได้ตรวจสอบอิทธิพลของตัวแปรระบบเปลือกอาคารส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของเปลือกอาคารและหลังคา ขั้นตอนการเลือกวัสดุ การเลือกวัสดุที่เหมาะสมสามารถลดค่า OTTV ของอาคารได้ ในขั้นตอนการหันทิศทางอาคารจะมีค่า OTTV ที่ต่างจากการวางแนวอาคารหันผนังเข้าทิศที่แตกต่างกัน ขั้นตอนการออกแบบอัตราส่วนกระจกต่อผนัง พื้นที่กระจกมากส่งผลต่อค่า OTTV สูง เนื่องจากเกิดความร้อนเข้าสู่อาคารได้มากขึ้น ดังนั้นการพิจารณาเพื่อออกแบบอาคาร สถาปนิกสามารถประเมินการออกแบบรูปทรงอาคาร ร่วมกับตัวแปรระบบเปลือกอาคารที่มีผลต่อค่า OTTV ร่วมกับ ซึ่งตัวแปรระบบเปลือกอาคารทั้ง 3 กลุ่ม สามารถประยุกต์ใช้กับกฎการคูณ (Rule of Multiplication) เพื่อเจเนเรทีฟดีไซน์ด้วยวิธีพารามेटริกดีไซน์

5.3 ข้อจำกัดของการวิจัย

ส่วนที่ 1 การเจเนเรทีฟดีไซน์เฉพาะเปลือกอาคารเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่สามารถส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานในอาคาร และเป็นขั้นตอนช่วงต้นของการออกแบบอาคาร มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับสถาปนิก จากการผ่านเกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงาน โดยไม่ได้พิจารณาระบบอื่นๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ และอุปกรณ์ผลิตน้ำร้อน และในการเจเนเรทีฟดีไซน์ พิจารณาค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบเปลือกอาคาร (Overall Thermal Transfer Value: OTTV) เป็นหลัก ส่วนค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (Roof Thermal Transfer Value: RTTV) เป็นค่าคงที่ ไม่มีการทดสอบหลังคาประเภทกระจก เนื่องจากอาคารส่วนใหญ่มักเป็น หลังคาทึบแสง

ส่วนที่ 2 ในขั้นตอนของการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ แหล่งข้อมูลจำกัดอยู่เพียง Scopus, Google Scholar และ Thai Journals Online ซึ่งมีความเหมาะสมสูงสุด ภายในเดือน ธันวาคม พ.ศ.2566 พบว่ามีวรรณกรรมเพียง 34 ฉบับเท่านั้น ที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาในครั้งนี้

ส่วนที่ 3 ตามกรอบแนวคิดการวิจัย จากกฎการคูณ (Rule of Multiplication) ตัวแปรระบบ เปลือกอาคาร ประกอบด้วย ค่าคงที่วัสดุ ค่าผันแปรทิศ และ ค่าผันแปรพื้นที่ เพื่อเจเนเรทีฟดีไซน์ รูปทรง ค่าคงที่วัสดุได้จากกรณีศึกษาอาคารสำนักงาน ดังนั้นจึงไม่มีการเจเนเรทีฟดีไซน์ค่าคงที่วัสดุ

ส่วนที่ 4 เครื่องมือคำนวณและแสดงผลสามมิติเปิดใช้ด้วยโปรแกรม Rhinoceros 3D และ Grasshopper ได้ทำการแสดงผลอาคารในรูปแบบของผังสี่เหลี่ยมจัตุรัสและแสดงผลพื้นที่กระจกและ ผังที่บในแบบสัดส่วน ไม่มีรูปแบบที่หลากหลายของการจัดเรียงกระจก

5.4 ข้อเสนอแนะการวิจัย

ส่วนที่ 1 จากการผ่านเกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงานสามารถตรวจสอบผลกระทบจากการเจเนเรทีฟดีไซน์ระบบเปลือกอาคารกับการส่งผลกระทบต่อระบบอื่นๆ เช่น ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ และอุปกรณ์ผลิตน้ำร้อน หรือประยุกต์ใช้การเจเนเรทีฟดีไซน์เพื่อให้ครอบคลุมทุกระบบ และสามารถทดสอบการเจเนเรทีฟดีไซน์หลังคาประเภทกระจกเพื่อให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (Roof Thermal Transfer Value: RTTV) ที่แตกต่างกันได้

ส่วนที่ 2 จากข้อจำกัดด้านการทบทวนวรรณกรรม หากทำการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบโดยใช้แหล่งข้อมูลจากฐานข้อมูลอื่นๆ นอกเหนือจาก 3 แหล่งข้อมูลหรือดำเนินการหลังจาก เดือนธันวาคม พ.ศ.2566 อาจทำให้งานวิจัยหลังจากนี้สามารถค้นพบข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้น

ส่วนที่ 3 ค่าคงที่วัสดุมีโอกาสในการเจเนเรทีฟดีไซน์ อาจทำให้สถาปนิกหรือนักออกแบบ สามารถเลือกวัสดุในการออกแบบอาคารให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้มากขึ้น

ส่วนที่ 4 จากข้อจำกัดด้านเครื่องมือคำนวณและแสดงผลสามมิติสามารถเพิ่มรูปทรงอาคาร และเพิ่มรูปแบบที่หลากหลายของการจัดเรียงกระจก อาจทำให้สถาปนิกหรือนักออกแบบสามารถ พัฒนาการออกแบบได้มากขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] UNEP. (2022). Emissions Gap Report 2022: The closing window. Climate crisis calls for rapid transformation of societies. UN: New York, NY, USA.
- [2] Bouckaert, S., Pales, A. F., McGlade, C., Remme, U., Wanner, B., Varro, L., D'Ambrosio, D., & Spencer, T. (2021). Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector. International Energy Agency: Paris, France.
- [3] González-Torres, M., Pérez-Lombard, L., Coronel, J. F., Maestre, I. R., & Yan, D. (2022). A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. *Energy Reports*, 8, 626–637.
- [4] Ingrao, C., Messineo, A., Beltramo, R., Yigitcanlar, T., & Ioppolo, G. (2018). How can life cycle thinking support sustainability of buildings? Investigating life cycle assessment applications for energy efficiency and environmental performance. *Journal of Cleaner Production*, 201, 556–569.
- [5] Gradišar, L., Klinc, R., Turk, Ž., & Dolenc, M. (2022). Generative design methodology and framework exploiting designer-algorithm synergies. *Buildings*, 12, 2194.
- [6] Wang, T. K., & Duan, W. (2023). Generative design of floor plans of multi-unit residential buildings based on consumer satisfaction and energy performance. *Development and Built Environment*, 16, 100238.
- [7] Li, Z., Chen, H., Lin, B., & Zhu, Y. (2018). Fast bidirectional building performance optimization at the early design stage. In *Building Simulation* (Vol. 11, pp. 647–661). Tsinghua University Press: Beijing, China.
- [8] Konis, K., Gamas, A., & Kensek, K. (2016). Passive performance and building form: An optimization framework for early-stage design support. *Solar Energy*, 125, 161–179.
- [9] Zhang, J., Liu, N., & Wang, S. (2021). Generative design and performance optimization of residential buildings based on parametric algorithm. *Energy and Buildings*, 244, 111033.
- [10] Schade, J. (2013). A design process perspective on the energy performance of buildings (Doctoral dissertation, Luleå Tekniska Universitet, Luleå, Sweden).
- [11] Ma, W., Wang, X., Wang, J., Xiang, X., & Sun, J. (2021). Generative design in building information modelling (BIM): Approaches and requirements. *Sensors*, 21, 5439.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [12] Krish, S. (2011). A practical generative design method. *Computer-Aided Design*, 43, 88–100.
- [13] Harish, V. S. K. V., Kumar, A., Alam, T., & Blechich, P. (2021). Assessment of state-space building energy system models in terms of stability and controllability. *Sustainability*, 13, 11938.
- [14] Quan, S. J., Park, J., Economou, A., & Lee, S. (2019). Artificial intelligence-aided design: Smart design for sustainable city development. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 46, 1581–1599.
- [15] Brynjolfsson, E., & McAfee, A. N. D. R. E. W. (2017). Artificial intelligence, for real. *Harvard Business Review*, 1, 1-31.
- [16] Chen, M. (2023). 6 common AI model training challenges. Oracle Israel. <https://www.oracle.com/il-en/artificial-intelligence/ai-model-training-challenges/>
- [17] Hauer, T. (2022). Importance and limitations of AI ethics in contemporary society. *Humanities and Social Sciences Communications*, 9(1), 1-8.
- [18] Kim, J. (2015). Adaptive façade design for the daylighting performance in an office building: The investigation of an opening design strategy with cellular automata. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 10, 313–320.
- [19] Kim, J. (2012). A methodology for daylight optimisation of facades: An investigation of the opening design strategy with Cellular Automata for an office building. In *Proceedings of the 2012 9th International Conference & Expo on Emerging Technologies for a Smarter World (CEWIT)* (pp. 1–6). Incheon, Republic of Korea.
- [20] Chockalingam, C., Sasidhar, K., & Anbu, M. (2023). Performance-based generative shape grammar method: Energy efficient facade design for fully glazed multi-storied office building-hot and humid climate, Chennai, India. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 14, 168–188.
- [21] Vahdatikhaki, F., Salimzadeh, N., & Hammad, A. (2022). Optimization of PV modules layout on high-rise building skins using a BIM-based generative design approach. *Energy and Buildings*, 258, 111787.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [22] Ghasemi Sangi, Z., Tarkashvand, A., & Sanaeian, H. (2023). Investigation of the height distribution effect of residential complex blocks on optimization of cooling and heating loads (Tehran, District 9). *Journal of Renewable Energy and Environment*, 10, 1–12.
- [23] Zhou, Q., & Xue, F. (2023). Pushing the boundaries of modular-integrated construction: A symmetric skeleton grammar-based multi-objective optimization of passive design for energy savings and daylight autonomy. *Energy and Buildings*, 296, 113417.
- [24] Rodrigues, E., Fereidani, N. A., Fernandes, M. S., & Gaspar, A. R. (2023). Climate change and ideal thermal transmittance of residential buildings in Iran. *Journal of Building Engineering*, 74, 106919.
- [25] Hassan, S. R., Megahed, N. A., Eleinen, O. M. A., & Hassan, A. M. (2022). Toward a national life cycle assessment tool: Generative design for early decision support. *Energy Build*, 267, 112144.
- [26] Schwartz, Y., Raslan, R., Korolija, I., & Mumovic, D. (2021). A decision support tool for building design: An integrated generative design, optimisation and life cycle performance approach. *Int. J. Archit. Comput.*, 19, 401–430.
- [27] Kreider, J. F., & Rabl, A. (1994). *Heating and cooling of buildings: Design for efficiency: Annual energy consumption and special topics (Chapter 7)*. McGraw-Hill.
- [28] Diamond, S., & Hunn, B. (1981). Comparison of DOE-2 computer program simulations to metered data from seven commercial buildings. *ASHRAE Transactions*, 87(1).
- [29] Chirarattananon, S., & Limmechokechai, B. (1994). A new building energy efficiency law in Thailand: Impact on new buildings. *Energy*, 19, 269–278.
- [30] Parker, D. S., Fairey, P. W., & McIlvaine, J. E. R. (1997). Energy efficient office building design for Florida's hot and humid climate. *ASHRAE Journal*, 39(4), 49–58.
- [31] Janda, K. B., & Busch, J. F. (1994). Worldwide status of energy standards for buildings. *Energy*, 19(1), 27–44.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [32] กระทรวงพลังงาน. (2563). กฎกระทรวงกำหนดประเภทหรือขนาดของอาคารและมาตรฐานหลักเกณฑ์และวิธีการในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงพลังงาน.
- [33] Akhimien, A., Adamolekun, A. M., & Isiwele, A. A. (2017). Adaptability and sustainability of office buildings. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 4, 80-99.
- [34] Dooley, G. (2023). Designing sustainable offices. Retrieved from <https://k2space.co.uk/knowledge/designing-sustainable-offices>
- [35] Lokhorst, A. M., Staats, H., & Van Iterson, J. (2015). Energy saving in office buildings: Are feedback and commitment-making useful instruments to trigger change? *Human Ecology*, 43, 759-768.
- [36] Heraty, A. (2023). Demand for sustainable buildings and tightening regulations drive business case for investment. Jones Lang LaSalle IP, Inc. Retrieved from <https://www.us.jll.com/en/newsroom/demand-for-sustainable-buildings-and-tightening-regulations-drive-business-case-for-investment>
- [37] Potrč Obrecht, T., Kunič, R., Jordan, S., & Dovjak, M. (2019). Comparison of health and well-being aspects in building certification schemes. *Sustainability*, 11(9), 2616.
- [38] Filipeboni. (2023, August 9). Top 5 benefits of LEED Certification: A comprehensive guide. UGREEN. <https://ugreen.io/top-5-benefits-of-leed-certification-a-comprehensive-guide/>
- [39] Worden, K., Hazer, M., Pyke, C., & Trowbridge, M. (2020). Using LEED green rating systems to promote population health. *Building and Environment*, 172, 106550.
- [40] Kholodilin, K. A., Mense, A., & Michelsen, C. (2017). The market value of energy efficiency in buildings and the mode of tenure. *Urban Studies*, 54(14), 3218-3238.
- [41] Bonde, M., & Song, H. S. (2013). Does greater energy performance have an impact on real estate revenues? *Journal of Sustainable Real Estate*, 5(1), 171-182.
- [42] Seinre, E., Kurnitski, J., & Voll, H. (2014). Building sustainability objective assessment in Estonian context and a comparative evaluation with LEED and BREEAM. *Building and Environment*, 82, 110-120.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [43] Hamedani, A. Z., & Huber, F. (2012). A comparative study of DGNB, LEED and BREEAM certificate systems in urban sustainability. In *The sustainable city VII: Urban regeneration and sustainability* (pp. 1121, 121-132).
- [44] Phichetkunbodee, N., Buachart, C., Chanpichaigosol, N., & Rinchumphu, D. (2021). A study on green building efficiency assessment in Thailand. *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*, 12(6), 1-11.
- [45] Sadineni, S. B., Madala, S., & Boehm, R. F. (2011). Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3617-3631.
- [46] Hailu, G. (2021). Energy systems in buildings. In *Energy Services Fundamentals and Financing* (pp. 181-209). Academic Press.
- [47] BC Architects. (2020). The project design process, step by step. Retrieved from <https://bcarchitects.com/the-project-design-process-step-by-step/>
- [48] Architectural Design Process & Its 7 Phases Explained. Retrieved from <https://www.novatr.com/blog/architectural-design-process>
- [49] Lee, J., Cho, W., Kang, D., & Lee, J. (2023). Simplified methods for generative design that combine evaluation techniques for automated conceptual building design. *Appl. Sci.*, 13, 12856.
- [50] Dilmegani, C. (2023). Generative design. Available online: <https://research.aimultiple.com/generative-design/> (accessed on 20 December 2023).
- [51] IPEEC Building Energy Efficiency Taskgroup. (2019). Building energy performance gap issues: An international review. IPEEC Building Energy Efficiency Taskgroup: Paris, France.
- [52] Ji, Y., Wang, W., He, Y., Li, L., Zhang, H., & Zhang, T. (2023). Performance in generation: An automatic generalizable generative-design-based performance optimization framework for sustainable building design. *Energy Build*, 298, 113512.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [53] Mukkavaara, J., & Sandberg, M. (2020). Architectural design exploration using generative design: Framework development and case study of a residential block. *Buildings*, 10, 201.
- [54] Saurav, B., Diya, K., Salonee, R., & Qian, C. (2023). Using BIM to facilitate generative target value design for energy efficient buildings. In *Proceedings of the 40th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)* (Vol.40, pp. 667–674). Chennai, India.
- [55] Zaraza, J., McCabe, B., Duhamel, M., & Posen, D. (2022). Generative design to reduce embodied GHG emissions of high-rise buildings. *Automation in Construction*, 139, Article 104274.
- [56] Luitjohan, S., Ashayeri, M., & Abbasabadi, N. (2022). An optimization framework and tool for context-sensitive solar-driven design using cellular automata (SDCA). In *Proceedings of the 2022 Annual Modeling and Simulation Conference (ANNSIM)* (pp. 593–604). San Diego, CA, USA.
- [57] Quinsan, C. (2002). Generative design: Rule-based reasoning in design process. In *Proceedings of the International Conference on Generative Art*, Milan, Italy, 11–13 December 2002.
- [58] Lee, J., Gu, N., & Williams, A. P. (2014). Parametric design strategies for the generation of creative designs. *International Journal of Architectural Computing*, 12(3), 263–282.
- [59] Schumacher, P. (2015). Design parameters to parametric design. In P. Schumacher & H. Harriss (Eds.), *The Routledge companion for architecture design and practice* (pp. 3-20). Routledge.
- [60] Holzer, D., Hough, R., & Burry, M. (2007). Parametric design and structural optimisation for early design exploration. *International Journal of Architectural Computing*, 5(4), 625–643.
- [61] Gradišar, L., Klinc, R., Turk, Ž., & Dolenc, M. (2022). Generative design methodology and framework exploiting design-er-algorithm synergies. *Buildings*, 12(2194).
- [62] Zheng, H., & Yuan, P. F. (2021). A generative architectural and urban design method through artificial neural networks. *Building and Environment*, 205, 108178.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [63] Oh, S., Jung, Y., Kim, S., Lee, I., & Kang, N. (2019). Deep generative design: Integration of topology optimization and generative models. arXiv.
- [64] Elias, R., & Issa, R. R. (2024). Artificial neural network-based generative design optimization of the energy performance of Florida single-family houses. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 38(1), 04024001.
- [65] Santos, L., Schleicher, S., & Caldas, L. (2023). Automation of CAD models to BEM models for performance-based goal-oriented design methods. *Energy Reports*.
- [66] Granadeiro, V., Duarte, J. P., Correia, J. R., & Leal, V. M. S. (2023) - Building envelope shape design in early stages of the design process: Integrating architectural design systems and energy simulation. *Energy Reports*.
- [67] Pasetti Monizza, G., Bendetti, C., & Matt, D. T. (2023) - Parametric and generative design techniques in mass-production environments as effective enablers of Industry 4.0 approaches in the building industry. *Energy Reports*.
- [68] Azmy, A., & Ali, M. (2023) - Parametric hypercell mechanism for adaptive building skin: A case study in New Administrative Capital, Egypt. *Universal Journal of Engineering Science*, 11(4), 29-39.
- [69] Zexin, S., & Mei, H. (2023). Robotic form-finding and construction based on the architectural projection logic. *Journal of Architectural Research*.
- [70] Makert, R., & Alves, G. (2023). Between designer and design: Parametric design and prototyping considerations on Gaudi's Sagrada Familia. *Journal of Architectural Research*.
- [71] Bergman, A. (2022). Parametric design, generative design, digital transformation. [LinkedIn post]. LinkedIn. https://www.linkedin.com/posts/anande-bergman-a9488776_parametricdesign-generativedesign-digitaltransformation-activity-6868839737290043392-Fpxg
- [72] Gillis, A. S. (n.d.). Algorithm. TechTarget. <https://www.techtarget.com/whatis/definition/algorithm>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [73] Lockwood, E., A Swinyard, C., & S Caughman, J. (2015). Patterns, sets of outcomes, and combinatorial justification: Two students' reinvention of counting formulas. *International Journal of Research in Undergraduate Mathematics Education*, 1, 27-62.
- [74] Rawal, R., Kumar, D., Pandya, H., & Airan, K. (2018). Residential characterization. Ahmedabad: Centre for Advanced Research in Building Science and Energy.
- [75] Shakti Sustainable Energy Foundation. (n.d.). Optimizing building envelope for energy efficiency through overall thermal transfer value (OTTV).
- [76] Rawal, R., Kumar, D., Pandya, H., & Airan, K. (2018). Residential characterization. Ahmedabad: Centre for Advanced Research in Building Science and Energy.
- [77] Gupta, V., & Deb, C. (2023). Envelope design for low-energy buildings in the tropics: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 186, 113650.
- [78] Anumah, J. J., & Anumah, L. (2017). Building orientation: Enhancing nature with nature. *Journal of Architectural Engineering Technology*, 6(1).
- [79] Bulbaai, R., & Halman, J. I. (2021). Energy-efficient building design for a tropical climate: A field study on the Caribbean island Curaçao. *Sustainability*, 13(23), 13274.
- [80] Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2017). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). Sage Publications.
- [81] Groat, L. N., & Wang, D. (2013). *Architectural research methods* (2nd ed.). Wiley.
- [82] กระทรวงพลังงาน. (2564). ประกาศกระทรวงพลังงาน เรื่อง กำหนดค่ามาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ.2564. ราชกิจจานุเบกษา.
- [83] กระทรวงพลังงาน. (2564). ประกาศกระทรวงพลังงาน เรื่อง หลักเกณฑ์ วิธีการคำนวณ และการรับรองผลการตรวจประเมินในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงานแต่ละระบบ การใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร และการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่าง ๆ ของอาคาร พ.ศ. 2564. ราชกิจจานุเบกษา.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

เอกสารในการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ

ตารางที่ ก.1 เอกสารในการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ

Article Title	Authors	Year	Publishing Source	Citation
“Generative Design of Floor Plans of Multi-Unit Residential Buildings Based on Consumer Satisfaction and Energy Performance”	Wang T. K. and Duan W.	2023	Developments in the Built Environment	1
“Performative Driven Form Finding in the Early Design Stage”	Elgohary et al.	2023	Journal of Engineering and Applied Science	0
Pushing the Boundaries of Modular-Integrated Construction: A Symmetric Skeleton Grammar-Based Multi-Objective Optimization of Passive Design for Energy Savings and Daylight Autonomy”	Zhou Q. and Xue F.	2023	Energy and Buildings	3
“Climate Change and Ideal Thermal Transmittance of Residential Buildings in Iran”	Rodrigues et al.	2023	Journal of Building Engineering	9
“Investigation of the Height Distribution Effect of Residential Complex Blocks on Optimization of Cooling and Heating Loads (Tehran, District 9)”	Ghasemi Sangi et al.	2023	Journal of Renewable Energy and Environment	0
“Maximizing Energy Efficiency and Daylight Performance in Office Buildings in BIM through RBFOpt Model-Based Optimization: The GENIUS Project”	Ratajczak et al.	2023	Buildings	1
“Performance-Based Generative Shape Grammar Method: Energy Efficient Facade Design for Fully Glazed Multi-Storied Office Building—Hot and Humid Climate, Chennai, India”	Chockalingam et al.	2023	International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology	0
“Using BIM to Facilitate Generative Target Value Design for Energy-Efficient Buildings”	Saurav et al.	2023	ISARC Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction	0
“Building for Tomorrow: Analyzing Ideal Thermal Transmittances in the Face of Climate Change in Brazil”	Rodrigues et al.	2023	Energy and Buildings	1
Data-Driven Modelling of Building Retrofitting with Incomplete Physics: A Generative Design and Machine Learning Approach”	Yu et al.	2023	Automation in construction	0

ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) เอกสารในการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ

Article Title	Authors	Year	Publishing Source	Citation
“Generative Design for a Sustainable Urban Morphology”	Turki et al.	2023	Energy and Buildings	0
“Toward a National Life Cycle Assessment Tool Generative Design for Early Decision Support”	Hassan et al.	2022	Developments in the Built Environment	28
“Generative Design to Reduce Embodied GHG Emissions of High-Rise Buildings”	Zaraza et al.	2022	Journal of Engineering and Applied Science	9
“Optimization of PV Modules Layout on High-Rise Building Skins Using a BIM-Based Generative Design Approach”	Vahdatikhaki et al.	2022	Energy and Buildings	21
“An Optimization Framework and Tool for Context-Sensitive Solar-Driven Design Using Cellular Automata (SDCA)”	Luitjohan et al.	2022	Annual Modeling and Simulation Conference	1
“Reevaluation of the Egyptian Code of Housing and Energy Consumption with Emphasis on Shading Devices Rotation Angles”	Kamel T.	2022	Journal of Engineering Research	1
“Modelling Platform for Schools (MPS): The Development of an Automated One-by-One Framework for the Generation of Dynamic Thermal Simulation Models of Schools”	Schwartz et al.	2022	Energy and Buildings	6
“BIMPO: A Generative Parametric Technique for Building Envelope Design”	Fathy et al.	2021	WIT Transactions on The Built Environment	2
“A Benchmark Model for Predicting Building Energy and Daylight Performance in the Early Phase of Design Utilizing Parametric Design Exploration”	Khidmat et al.	2021	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	4
“A Decision Support Tool for Building Design: An Integrated Generative Design, Optimisation and Life Cycle Performance Approach”	Schwartz et al.	2021	International Journal of Architectural Computing	25
“Generative Design and Performance Optimization of Residential Buildings Based on Parametric Algorithm”	Zhang et al.	2021	Energy and Buildings	57
“Simplified Evaluation Metrics for Generative Energy-Driven Urban Design: A Morphological Study of Residential Blocks in Tel Aviv”	Natanian J. and Wortmann T.	2021	Energy and Buildings	29
“Thermal Transmittance Effect on Energy Consumption of Mediterranean Buildings with Different Thermal Mass”	Rodrigues et al.	2019	Applied Energy	68

ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

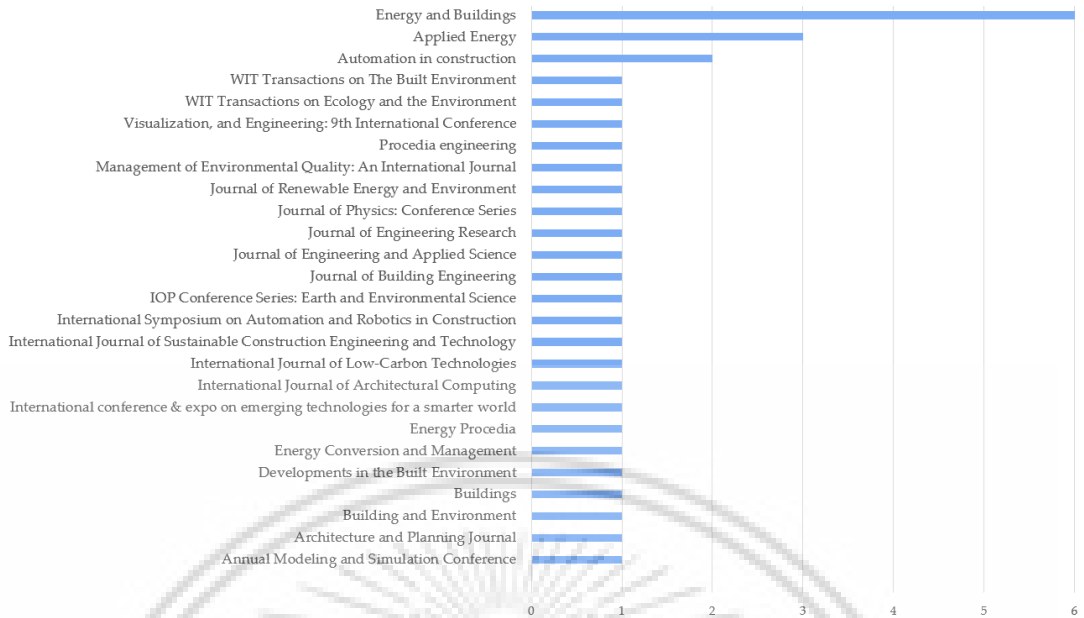
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) เอกสารในการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ

Article Title	Authors	Year	Publishing Source	Citation
“Multivariate Relationships Between Campus Design Parameters and Energy Performance Using Reinforcement Learning and Parametric Modeling”	Chang et al.	2019	Applied energy	51
“Automation of CAD Models to BEM Models for Performance Based Goal-Oriented Design Methods”	Santos et al.	2017	Building and Environment	45
Energy Performance Optimization as a Generative Design Tool for Nearly Zero Energy Buildings”	Touloupaki E. and Theodosiou T.	2017	Procedia engineering	60
“An Approach to Urban Quarter Design Using Building Generative Design and Thermal Performance Optimization”	Rodrigues et al.	2015	Energy Procedia	25
“How Reliable are Geometry-Based Building Indices as Thermal Performance Indicators?”	Rodrigues et al.	2015	Energy Conversion and Management	37
“Climate-Sensitive Urban Growth: Outdoor Thermal Comfort as an Indicator for the Design of Urban Spaces”	Tapias E. and Schmitt G.	2014	WIT Transactions on Ecology and the Environment	21
“Adaptive Façade Design for the Daylighting Performance in an Office Building: The Investigation of an Opening Design Strategy with Cellular Automata”	Kim J.	2013	International Journal of Low-Carbon Technologies	21
“Building Envelope Shape Design in Early Stages of the Design Process: Integrating Architectural Design Systems and Energy Simulation”	Granadeiro et al.	2013	Automation in construction	240
“A Visualization System for the Comfort Analysis of Modular Architecture: A case Study”	Kim et al.	2012	Visualization, and Engineering: 9th International Conference	3
“A Methodology for Daylight Optimisation of Facades: An Investigation of the Opening Design Strategy with Cellular Automata for an Office Building”	Kim J.	2012	9th international conference & expo on emerging technologies for a smarter world (CEWIT)	5
“An Evolutionary Model for Sustainable Design”	Caldas et al.	2003	Management of Environmental Quality: An International Journal	37

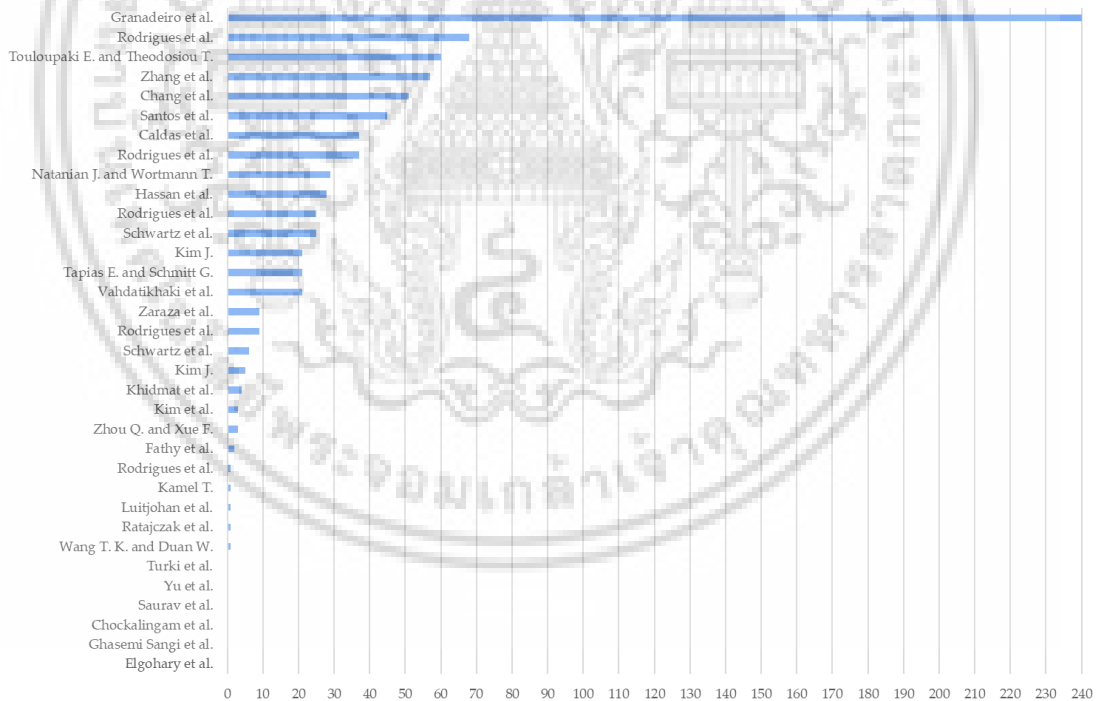
ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1 Publishing sources of the articles.

ที่มา : ผู้วิจัย (2567)



รูปที่ ก.2 Number of citations for the articles.

ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 Energy efficient of buildings achieved through generative design in energy efficient topics.

Energy Efficient Topics	Energy Efficiency of Buildings Achieved through Generative Design
Energy Performance	Compared with the initial scheme, the energy performance improved by 11.18% (Wang T. K. and Duan W., 2023)
	Energy consumption was reduced by 360 kWh/m ² /year compared to the traditional design (Saurav et al., 2023)
	The proposed approach can model the building's performance with more than 90% confidence and shows variation in results (Yu et al., 2023)
	PV module layout design framework can offer more favorable solutions than baseline scenarios (Vahdatikhaki et al., 2022)
	The optimal scheme's total load is 15.8% lower than the worst scheme and 4.2% lower than original scheme (Zhang et al., 2021)
	The urban energy optimization workflow method focuses on more harmonized energy supply and demand-driven approaches (Natanian J. and Wortmann T., 2021)
	Energy simulations revealed efficient passive building designs achieving up to 70% improvement (Santos et al., 2017)
	User-friendly generative design can transform how architects design (Touloupaki E. and Theodosiou T., 2017)
Thermal Performance	Research demonstrates an ability to create diverse shapes with varying energy demands (Granadeiro et al., 2013)
	The results can evaluate the energy efficiency of buildings affected by climate change (Rodrigues et al., 2023)
	Optimal case proper layout reduces the annual cooling and heating energy consumption by 28% and 13% (Ghasemi Sangi et al., 2023)
	Research found that maintaining the present-day ideal U-values also significantly impacts the thermal loads in the timeframes (Rodrigues et al., 2023)
	Research developed energy use prediction equations based on shading device angle and material (Kamel T., 2022)
	Research developed tools for building energy modeling, which achieve 70% geometric accuracy compared to real structures (Schwartz et al., 2022)
	Research explores the influence of thermal transmittance on building energy efficiency and finds that the ideal amount of thermal mass depends on the building's insulation (Rodrigues et al., 2019)
	Research optimizes buildings' thermal performance algorithms developed as prototype tools (Rodrigues et al., 2015)
Results show building shape metrics predict thermal performance when considering climate and building type (Rodrigues et al., 2015)	

ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) Energy efficient of buildings achieved through generative design in energy efficient topics.

Thermal Performance	Research presents methods for designing urban areas that prioritize human comfort and potentially contribute to energy efficiency (Tapias E. and Schmitt G., 2014)
	Research implements processes to allow for generative design, visualization of analysis, and optimization of alternative targeting factory manufacturing buildings with BIM-based design (Kim et al., 2012)
Daylight	Research achieved a balance between creating aesthetically pleasing facades and ensuring good daylight performance (Kim J., 2013)
	Research demonstrates that the design of building facades optimizes daylight quality while maintaining aesthetic appeal (Kim J., 2012)
Others	Research framework for life cycle assessment tool that analyzes the environmental impact of buildings during the design phase (Hassan et al., 2022)
	Research achieved a 7% reduction in embodied emissions compared to a sub-optimal solution (Zaraza et al., 2022)
	Optimal building's automatic design tools show significant reductions in life cycle carbon footprint and life cycle cost (Schwartz et al., 2021)
	Specially designed building shapes can increase solar energy capture by up to 24% for renewable energy generation (Luitjohan et al., 2022)
Daylight and Energy Performance	Achieves up to 0.42% energy savings and 9.71% spatial daylight autonomy improvement compared to baseline design (Zhou Q. and Xue F., 2023)
	Project results equip architects to find design solutions that match their goals (Ratajczak et al., 2023)
	The proposed research approach guarantees better use of solar resources in building envelopes (Turki et al., 2023)
	Tools prove the ability to efficiently achieve numerous origamic solar device alternatives for improved energy efficiency (Fathy et al., 2021)
	Study examines building factors (direction, windows) to design a model ideal for year-round energy efficiency (winter and summer) (Khidmat et al., 2021)
	The research analyzes building layout's impact on energy, sunlight, and openness to guide urban planning efficiently and visually (Chang et al., 2019)
Daylight and Thermal Performance	Generative design system that architects can use in the early to intermediate stages of design to help improve buildings' environmental performance (Caldas et al., 2003)
Daylight and Thermal and Energy Performance	The resultant generated form was 42% more energy-efficient than the existing design (Chockalingam et al., 2023)
	Research framework optimizing daylight and managing heating/cooling for architects to choose energy-saving building shapes (Elgohary et al., 2023)

ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายชื่อ 34 เอกสาร ในการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ

1. Wang, T. K., & Duan, W. (2023). Generative design of floor plans of multi-unit residential buildings based on consumer satisfaction and energy performance. *Development and Built Environment*, 16, Article 100238.
2. Elgohary, S. M., Abdin, A. R., & Mohamed, R. M. (2023). Performative driven form finding in the early design stage. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 70, 73.
3. Zhou, Q., & Xue, F. (2023). Pushing the boundaries of modular-integrated construction: A symmetric skeleton grammar-based multi-objective optimization of passive design for energy savings and daylight autonomy. *Energy and Buildings*, 296, Article 113417.
4. Rodrigues, E., Fereidani, N. A., Fernandes, M. S., & Gaspar, A. R. (2023). Climate change and ideal thermal transmittance of residential buildings in Iran. *Journal of Building Engineering*, 74, Article 106919.
5. Ghasemi Sangi, Z., Tarkashvand, A., & Sanaeian, H. (2023). Investigation of the height distribution effect of residential complex blocks on optimization of cooling and heating loads (Tehran, District 9). *Journal of Renewable Energy and Environment*, 10, 1–12.
6. Ratajczak, J., Siegele, D., & Niederwieser, E. (2023). Maximizing energy efficiency and daylight performance in office buildings in BIM through RBFOpt model-based optimization: The GENIUS project. *Buildings*, 13, 1790.
7. Chockalingam, C., Sasidhar, K., & Anbu, M. (2023). Performance-based generative shape grammar method: Energy efficient facade design for fully glazed multi-storied office building—hot and humid climate, Chennai, India. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 14, 168–188.
8. Saurav, B., Diya, K., Salonee, R., & Qian, C. (2023). Using BIM to facilitate generative target value design for energy efficient buildings. In *Proceedings of the 40th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)* (Vol. 40, pp. 667–674). Chennai, India.
9. Rodrigues, E., Parente, J., & Fernandes, M. S. (2024). Building for tomorrow: Analyzing ideal thermal transmittances in the face of climate change in Brazil. *Applied Energy*, 355, Article 122360.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. Yu, H., Feng, K., Penaka, S. R., Man, Q., Lu, W., & Olofsson, T. (2023). Data-driven modelling of building retrofitting with incomplete physics: A generative design and machine learning approach. *Journal of Physics: Conference Series*, 2654, Article 012053.
11. Turki, L. K., & Ben Saci, A. (2023). Generative design for a sustainable urban morphology. *Architectural Planning Journal*, 28, 15.
12. Hassan, S. R., Megahed, N. A., Eleinen, O. M. A., & Hassan, A. M. (2022). Toward a national life cycle assessment tool: Generative design for early decision support. *Energy and Buildings*, 267, Article 112144.
13. Zaraza, J., McCabe, B., Duhamel, M., & Posen, D. (2022). Generative design to reduce embodied GHG emissions of high-rise buildings. *Automation in Construction*, 139, Article 104274.
14. Vahdatikhaki, F., Salimzadeh, N., & Hammad, A. (2022). Optimization of PV modules layout on high-rise building skins using a BIM-based generative design approach. *Energy and Buildings*, 258, Article 111787.
15. Luitjohan, S., Ashayeri, M., & Abbasabadi, N. (2022). An optimization framework and tool for context-sensitive solar-driven design using cellular automata (SDCA). In *Proceedings of the 2022 Annual Modeling and Simulation Conference (ANNSIM)* (pp. 593–604). San Diego, CA, USA.
16. Kamel, T. (2022). Re-evaluation of the Egyptian code of housing and energy consumption with emphasis on shading devices rotation angles. *Journal of Engineering Research*, 10, 38–47.
17. Schwartz, Y., Korolija, I., Godoy-Shimizu, D., Hong, S. M., Dong, J., Grassie, D., Mavrogianni, A., & Mumovic, D. (2022). Modelling platform for schools (MPS): The development of an automated One-By-One framework for the generation of dynamic thermal simulation models of schools. *Energy and Buildings*, 254, Article 111566.
18. Fathy, A. G., El-Sayad, Z., Saadallah, D., & Bakr, A. F. (2021). BIMPO: A generative parametric technique for building envelope design. *WIT Transactions on the Built Environment*, 205, 127–138.
19. Khidmat, R. P., Fukuda, H., & Wibowo, A. P. (2021). A benchmark model for predicting building energy and daylight performance in the early phase of design

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- utilizing parametric design exploration. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 830, Article 012008.
20. Schwartz, Y., Raslan, R., Korolija, I., & Mumovic, D. (2021). A decision support tool for building design: An integrated generative design, optimization, and life cycle performance approach. *International Journal of Architectural Computing*, 19, 401–430.
 21. Zhang, J., Liu, N., & Wang, S. (2021). Generative design and performance optimization of residential buildings based on parametric algorithm. *Energy and Buildings*, 244, Article 111033.
 22. Natanian, J., & Wortmann, T. (2021). Simplified evaluation metrics for generative energy-driven urban design: A morphological study of residential blocks in Tel Aviv. *Energy and Buildings*, 240, Article 110916.
 23. Rodrigues, E., Fernandes, M. S., Gaspar, A. R., Gomes, A., & Costa, J. J. (2019). Thermal transmittance effect on energy consumption of Mediterranean buildings with different thermal mass. *Applied Energy*, 252, Article 113437.
 24. Chang, S., Saha, N., Castro-Lacouture, D., & Yang, P. P. J. (2019). Multivariate relationships between campus design parameters and energy performance using reinforcement learning and parametric modeling. *Applied Energy*, 249, 253–264.
 25. Santos, L., Schleicher, S., & Caldas, L. (2017). Automation of CAD models to BEM models for performance-based goal-oriented design methods. *Building and Environment*, 112, 144–158.
 26. Touloupaki, E., & Theodosiou, T. (2017). Energy performance optimization as a generative design tool for nearly zero energy buildings. *Procedia Engineering*, 180, 1178–1185.
 27. Rodrigues, E., Amaral, A. R., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2015). An approach to urban quarter design using building generative design and thermal performance optimization. *Energy Procedia*, 78, 2899–2904.
 28. Rodrigues, E., Amaral, A. R., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2015). How reliable are geometry-based building indices as thermal performance indicators? *Energy Conversion and Management*, 101, 561–578.

29. Tapias, E., & Schmitt, G. (2014). Climate-sensitive urban growth: Outdoor thermal comfort as an indicator for the design of urban spaces. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 191, 623–634.
30. Kim, J. (2015). Adaptive façade design for the daylighting performance in an office building: The investigation of an opening design strategy with cellular automata. *International Journal of Low-Carbon Technology*, 10, 313–320.
31. Granadeiro, V., Duarte, J. P., Correia, J. R., & Leal, V. M. (2013). Building envelope shape design in early stages of the design process: Integrating architectural design systems and energy simulation. *Automation in Construction*, 32, 196–209.
32. Kim, D., Lee, S., & Kim, S. A. (2012). A visualization system for the comfort analysis of modular architecture: A case study. In *Cooperative Design, Visualization, and Engineering: Proceedings of the 9th International Conference, CDVE 2012* (pp. 247–254). Osaka, Japan: Springer.
33. Kim, J. (2015). Adaptive façade design for the daylighting performance in an office building: The investigation of an opening design strategy with cellular automata. *International Journal of Low-Carbon Technology*, 10, 313–320.
34. Caldas, L., Norford, L., & Rocha, J. (2003). An evolutionary model for sustainable design. *Management of Environmental Quality*, 14, 383–397.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

รูปทรง, พิกัด และขนาด ในโปรแกรม Rhinoceros 3D และ Grasshopper

รูปทรง, พิกัด และขนาด สำหรับเป็นข้อมูลพื้นฐานการสร้างรูปทรงแบบจำลองสามมิติในโปรแกรม Rhinoceros 3D และ Grasshopper พิกัด (Coordinates) เป็นการระบุตำแหน่งในพื้นที่สามมิติ ใช้ระบบพิกัด XYZ ขนาด (Dimensions) เช่น ความกว้าง (Width), ความยาว (Length), ความสูง (Height)

ตารางที่ ข.1 รูปทรง, พิกัด และขนาด

รูปทรง (Form)	พิกัด (Coordinates)	ขนาด (Dimensions)
Building	-	พื้นที่ผนังรวม (All Area Wall) 3,145 เมตร ความสูงอาคาร (Building Height) 92.5 เมตร ความกว้างและยาวอาคาร (Building WxL) 34 เมตร
building Wall 1 (S)	(x,y) = (0,0) แกน XZ	ความกว้าง = Building WxL ความยาว = Building Height
building Wall 2 (E)	(x,y) = (Building WxL,0) แกน YZ	ความกว้าง = Building WxL ความยาว = Building Height
building Wall 3 (N)	(x,y) = (0, Building WxL) แกน XZ	ความกว้าง = Building WxL ความยาว = Building Height
building Wall 4 (W)	(x,y) = (0,0) แกน YZ	ความกว้าง = Building WxL ความยาว = Building Height
Window 1 (S)	(x,y,z) = (0,0,0) แกน XZ	ความกว้าง = Building WxL ความยาว = Generative Design ($\frac{\text{Window areas}}{\text{Building WxL}}$)
Window 2 (E)	(x,y,z) = (Building WxL,0,0) แกน YZ	ความกว้าง = Building WxL ความยาว = Generative Design ($\frac{\text{Window areas}}{\text{Building WxL}}$)
Window 3 (N)	(x,y,z) = (0, Building WxL,0) แกน XZ	ความกว้าง = Building WxL ความยาว = Generative Design ($\frac{\text{Window areas}}{\text{Building WxL}}$)
Window 4 (W)	(x,y,z) = (0,0,0) แกน YZ	ความกว้าง = Building WxL ความยาว = Generative Design ($\frac{\text{Window areas}}{\text{Building WxL}}$)
Opaque Wall 1 (S)	= building Wall 1 (S) - Window 1 (S)	
Opaque wall 2 (E)	= building Wall 2 (E) - Window 2 (E)	
Opaque Wall 3 (N)	= building Wall 3 (N) - Window 3 (N)	
Opaque Wall 4 (W)	= building Wall 4 (W) - Window 4 (W)	

ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

แบบจำลองตามช่วงค่า OTTV ชุดที่ 1 N, S, E, W

แบบจำลองชุดที่ 1 N, S, E, W (รวม 256 แบบ) จำแนกตามช่วงค่า OTTV ระหว่าง ค่าต่ำสุด 62.31 W/m² ถึงค่ามากที่สุด 152.28 W/m²

ตารางที่ ค.1 จำนวนแบบจำลอง ตามช่วงค่า OTTV

ช่วงค่า OTTV (W/m ²)	แบบจำลองชุดที่ 1 N, S, E, W (รวม 256 แบบ)	แบบจำลองชุดที่ 2 NW, NE, SW, SE (รวม 256 แบบ)
60-80	15	12
80-100	72	64
100-120	108	113
120-140	55	59
140-160	6	8

ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

ช่วงค่า OTTV	OTTV	%WWR ตามทิศ			
		S	E	N	W
60-80	62.31	25	25	25	25
	68.45	25	25	50	25
	69.96	25	50	25	25
	70.01	25	25	25	50
	70.81	50	25	25	25
	74.58	25	25	75	25
	76.10	25	50	50	25
	76.14	25	25	50	50
	76.95	50	25	50	25
	77.61	25	75	25	25
	77.66	25	50	25	50
	77.70	25	25	25	75
	78.46	50	50	25	25
	78.51	50	25	25	50
	79.31	75	25	25	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงค่า OTTV	OTTV	%WWR ตามทิศ				OTTV	%WWR ตามทิศ			
		S	E	N	W		S	E	N	W
80-100	80.72	25	25	100	25	92.96	25	100	25	50
	82.23	25	50	75	25	93.01	25	75	25	75
	82.28	25	25	75	50	93.05	25	50	25	100
	83.09	50	25	75	25	93.10	75	50	50	25
	83.75	25	75	50	25	93.15	75	25	50	50
	83.80	25	50	50	50	93.77	50	100	25	25
	83.84	25	25	50	75	93.81	50	75	25	50
	84.60	50	50	50	25	93.86	50	50	25	75
	84.65	50	25	50	50	93.91	50	25	25	100
	85.27	25	100	25	25	93.95	100	25	50	25
	85.31	25	75	25	50	94.62	75	75	25	25
	85.36	25	50	25	75	94.67	75	50	25	50
	85.40	25	25	25	100	94.71	75	25	25	75
	85.45	75	25	50	25	95.47	100	50	25	25
	86.12	50	75	25	25	95.52	100	25	25	50
	86.16	50	50	25	50	96.02	25	75	100	25
	86.21	50	25	25	75	96.07	25	50	100	50
	86.97	75	50	25	25	96.11	25	25	100	75
	87.01	75	25	25	50	96.87	50	50	100	25
	87.82	100	25	25	25	96.92	50	25	100	50
	88.37	25	50	100	25	97.54	25	100	75	25
	88.42	25	25	100	50	97.59	25	75	75	50
	89.22	50	25	100	25	97.63	25	50	75	75
	89.89	25	75	75	25	97.68	25	25	75	100
	89.93	25	50	75	50	97.73	75	25	100	25
	89.98	25	25	75	75	98.39	50	75	75	25
	90.74	50	50	75	25	98.44	50	50	75	50
	90.78	50	25	75	50	98.48	50	25	75	75
	91.40	25	100	50	25	99.10	25	100	50	50
	91.45	25	75	50	50	99.15	25	75	50	75
	91.49	25	50	50	75	99.19	25	50	50	100
	91.54	25	25	50	100	99.24	75	50	75	25
	91.59	75	25	75	25	99.29	75	25	75	50
	92.25	50	75	50	25	99.91	50	100	50	25
	92.30	50	50	50	50	99.95	50	75	50	50
	92.34	50	25	50	75	100.00	50	50	50	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงค่า OTTV	OTTV	%WWR ตามทิศ				OTTV	%WWR ตามทิศ			
		S	E	N	W		S	E	N	W
100-120	100.04	50	25	50	100	109.31	100	50	50	50
	100.09	100	25	75	25	109.35	100	25	50	75
	100.66	25	100	25	75	109.97	75	100	25	50
	100.71	25	75	25	100	110.02	75	75	25	75
	100.76	75	75	50	25	110.06	75	50	25	100
	100.80	75	50	50	50	110.78	100	100	25	25
	100.85	75	25	50	75	110.82	100	75	25	50
	101.47	50	100	25	50	110.87	100	50	25	75
	101.51	50	75	25	75	110.91	100	25	25	100
	101.56	50	50	25	100	111.38	25	100	100	50
	101.61	100	50	50	25	111.42	25	75	100	75
	101.65	100	25	50	50	111.47	25	50	100	100
	102.27	75	100	25	25	112.18	50	100	100	25
	102.32	75	75	25	50	112.23	50	75	100	50
	102.36	75	50	25	75	112.27	50	50	100	75
	102.41	75	25	25	100	112.32	50	25	100	100
	103.12	100	75	25	25	112.94	25	100	75	75
	103.17	100	50	25	50	112.98	25	75	75	100
	103.21	100	25	25	75	113.03	75	75	100	25
	103.68	25	100	100	25	113.08	75	50	100	50
	103.72	25	75	100	50	113.12	75	25	100	75
	103.77	25	50	100	75	113.74	50	100	75	50
	103.81	25	25	100	100	113.79	50	75	75	75
	104.53	50	75	100	25	113.83	50	50	75	100
	104.57	50	50	100	50	113.88	100	50	100	25
	104.62	50	25	100	75	113.93	100	25	100	50
	105.24	25	100	75	50	114.50	25	100	50	100
	105.28	25	75	75	75	114.55	75	100	75	25
	105.33	25	50	75	100	114.59	75	75	75	50
	105.38	75	50	100	25	114.64	75	50	75	75
	105.42	75	25	100	50	114.68	75	25	75	100
	106.04	50	100	75	25	115.30	50	100	50	75
	106.09	50	75	75	50	115.35	50	75	50	100
	106.13	50	50	75	75	115.40	100	75	75	25
	106.18	50	25	75	100	115.44	100	50	75	50
	106.23	100	25	100	25	115.49	100	25	75	75
	106.80	25	100	50	75	116.11	75	100	50	50
	106.84	25	75	50	100	116.15	75	75	50	75
	106.89	75	75	75	25	116.20	75	50	50	100
	106.94	75	50	75	50	116.86	50	100	25	100
	106.98	75	25	75	75	116.91	100	100	50	25
	107.60	50	100	50	50	116.96	100	75	50	50
	107.65	50	75	50	75	117.00	100	50	50	75
	107.69	50	50	50	100	117.05	100	25	50	100
	107.74	100	50	75	25	117.67	75	100	25	75
	107.79	100	25	75	50	117.71	75	75	25	100
	108.36	25	100	25	100	118.47	100	100	25	50
	108.41	75	100	50	25	118.52	100	75	25	75
	108.45	75	75	50	50	118.56	100	50	25	100
	108.50	75	50	50	75	119.07	25	100	100	75
	108.55	75	25	50	100	119.12	25	75	100	100
	109.17	50	100	25	75	119.88	50	100	100	50
	109.21	50	75	25	100	119.92	50	75	100	75
	109.26	100	75	50	25	119.97	50	50	100	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการดำเนินงานของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงค่า OTTV	OTTV	%WWR ตามทิศ				OTTV	%WWR ตามทิศ			
		S	E	N	W		S	E	N	W
120-140	120.63	25	100	75	100	127.62	50	75	100	100
	120.68	75	100	100	25	128.38	75	100	100	50
	120.73	75	75	100	50	128.43	75	75	100	75
	120.77	75	50	100	75	128.47	75	50	100	100
	120.82	75	25	100	100	129.14	50	100	75	100
	121.44	50	100	75	75	129.19	100	100	100	25
	121.48	50	75	75	100	129.23	100	75	100	50
	121.53	100	75	100	25	129.28	100	50	100	75
	121.58	100	50	100	50	129.32	100	25	100	100
	121.62	100	25	100	75	129.94	75	100	75	75
	122.24	75	100	75	50	129.99	75	75	75	100
	122.29	75	75	75	75	130.75	100	100	75	50
	122.33	75	50	75	100	130.79	100	75	75	75
	123.00	50	100	50	100	130.84	100	50	75	100
	123.05	100	100	75	25	131.50	75	100	50	100
	123.09	100	75	75	50	132.31	100	100	50	75
	123.14	100	50	75	75	132.35	100	75	50	100
	123.19	100	25	75	100	133.87	100	100	25	100
	123.81	75	100	50	75	135.27	50	100	100	100
	123.85	75	75	50	100	136.08	75	100	100	75
	124.61	100	100	50	50	136.12	75	75	100	100
	124.66	100	75	50	75	136.88	100	100	100	50
	124.70	100	50	50	100	136.93	100	75	100	75
	125.37	75	100	25	100	136.97	100	50	100	100
	126.17	100	100	25	75	137.64	75	100	75	100
	126.22	100	75	25	100	138.45	100	100	75	75
	126.77	25	100	100	100	138.49	100	75	75	100
	127.58	50	100	100	75					

ช่วงค่า OTTV	OTTV	%WWR ตามทิศ			
		S	E	N	W
140-160	140.01	100	100	50	100
	143.78	75	100	100	100
	144.58	100	100	100	75
	144.63	100	75	100	100
	146.14	100	100	75	100
	152.28	100	100	100	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

แบบจำลองตามช่วงค่า OTTV ชุดที่ 2 NW, NE, SW, SE

แบบจำลองชุดที่ 2 NW, NE, SW, SE (รวม 256 แบบ) จำแนกตามช่วงค่า OTTV ระหว่างค่าต่ำสุด 63.51 W/m² ถึงค่ามากที่สุด 153.82 W/m²

ตารางที่ ง.1 จำนวนแบบจำลอง ตามช่วงค่า OTTV

ช่วงค่า OTTV (W/m ²)	แบบจำลองชุดที่ 1 N, S, E, W (รวม 256 แบบ)	แบบจำลองชุดที่ 2 NW, NE, SW, SE (รวม 256 แบบ)
60-80	15	12
80-100	72	64
100-120	108	113
120-140	55	59
140-160	6	8

ที่มา : ผู้วิจัย (2567)

ช่วงค่า OTTV	OTTV	%WWR ตามทิศ			
		SE	NE	NW	SW
60-80	63.51	25	25	25	25
	70.41	25	25	50	25
	70.13	25	50	25	25
	71.81	25	25	25	50
	71.78	50	25	25	25
	77.32	25	25	75	25
	77.04	25	50	50	25
	78.72	25	25	50	50
	78.68	50	25	50	25
	76.76	25	75	25	25
	78.44	25	50	25	50
	78.40	50	50	25	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงค่า OTTV	OTTV	%WWR ตามทิศ				OTTV	%WWR ตามทิศ			
		SE	NE	NW	SW		SE	NE	NW	SW
80-100	80.12	25	25	25	75	91.97	50	25	100	25
	80.08	50	25	25	50	93.65	25	25	100	50
	80.04	75	25	25	25	95.33	75	75	25	25
	84.22	25	25	100	25	93.85	50	75	25	50
	83.94	25	50	75	25	91.93	25	75	25	75
	85.62	25	25	75	50	93.61	75	50	50	25
	85.58	50	25	75	25	95.29	50	50	50	50
	83.67	25	75	50	25	91.70	25	50	50	75
	85.35	25	50	50	50	93.37	75	25	75	25
	87.02	25	25	50	75	95.05	50	25	75	50
	85.31	50	50	50	25	93.57	25	25	75	75
	86.99	50	25	50	50	95.25	100	50	25	25
	83.39	25	100	25	25	91.66	75	50	25	50
	85.07	25	75	25	50	93.34	50	50	25	75
	86.75	25	50	25	75	95.02	25	50	25	100
	88.43	25	25	25	100	96.69	100	25	50	25
	86.95	75	25	50	25	95.21	75	25	50	50
	85.03	50	75	25	25	93.30	50	25	50	75
	86.71	50	50	25	50	94.98	25	25	50	100
	88.39	50	25	25	75	96.66	100	25	25	50
	86.67	75	50	25	25	94.94	75	25	25	75
	88.35	75	25	25	50	96.62	50	25	25	100
	88.31	100	25	25	25	97.47	25	100	75	25
	90.85	25	100	50	25	99.15	25	75	100	25
	92.53	25	75	75	25	99.12	50	100	50	25
	92.49	25	50	100	25	97.20	25	100	50	50
	90.57	50	100	25	25	98.88	50	75	75	25
	92.25	25	100	25	50	98.84	25	75	75	50
	93.93	50	75	50	25	98.60	50	50	100	25
	92.21	25	75	50	50	98.56	25	50	100	50
93.89	50	50	75	25	99.96	75	100	25	25	
90.29	25	50	75	50	99.92	50	100	25	50	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงค่า OTTV	OTTV	%WWR ตามทิศ				OTTV	%WWR ตามทิศ			
		SE	NE	NW	SW		SE	NE	NW	SW
100-120	100.00	25	100	25	75	109.06	75	25	100	50
	100.20	75	75	50	25	109.10	50	25	100	75
	100.24	50	75	50	50	109.14	25	25	100	100
	100.28	25	75	50	75	109.87	100	75	25	50
	100.48	75	50	75	25	109.91	75	75	25	75
	100.52	50	50	75	50	109.95	50	75	25	100
	100.56	25	50	75	75	110.15	100	50	50	50
	100.76	75	25	100	25	110.19	75	50	50	75
	100.79	50	25	100	50	110.23	50	50	50	100
	100.83	25	25	100	75	110.43	100	25	75	50
	101.56	100	75	25	25	110.46	75	25	75	75
	101.60	75	75	25	50	110.50	50	25	75	100
	101.64	50	75	25	75	111.55	100	50	25	75
	101.68	25	75	25	100	111.59	75	50	25	100
	101.84	100	50	50	25	111.83	100	25	50	75
	101.88	75	50	50	50	111.87	75	25	50	100
	101.92	50	50	50	75	112.37	50	100	100	25
	101.96	25	50	50	100	112.41	25	100	100	50
	102.12	100	25	75	25	113.23	100	25	25	100
	102.16	75	25	75	50	113.73	75	100	75	25
	102.20	50	25	75	75	113.77	50	100	75	50
	102.24	25	25	75	100	113.81	25	100	75	75
	103.24	100	50	25	50	114.01	75	75	100	25
	103.28	75	50	25	75	114.05	50	75	100	50
	103.32	50	50	25	100	114.09	25	75	100	75
	103.52	100	25	50	50	115.10	100	100	50	25
	103.56	75	25	50	75	115.13	75	100	50	50
	103.60	50	25	50	100	115.17	50	100	50	75
	104.10	25	100	100	25	115.21	25	100	50	100
	104.92	100	25	25	75	115.37	100	75	75	25
	104.96	75	25	25	100	115.41	75	75	75	50
	105.46	50	100	75	25	115.45	50	75	75	75
	105.50	25	100	75	50	115.49	25	75	75	100
	105.74	50	75	100	25	115.65	100	50	100	25
	105.78	25	75	100	50	115.69	75	50	100	50
	106.83	75	100	50	25	115.73	50	50	100	75
	106.87	50	100	50	50	115.77	25	50	100	100
	106.91	25	100	50	75	116.50	100	100	25	50
	107.11	75	75	75	25	116.54	75	100	25	75
	107.14	50	75	75	50	116.58	50	100	25	100
	107.18	25	75	75	75	116.77	100	75	50	50
	107.38	75	50	100	25	116.81	75	75	50	75
	107.42	50	50	100	50	116.85	50	75	50	100
	107.46	25	50	100	75	117.05	100	50	75	50
	108.19	100	100	25	25	117.09	75	50	75	75
	108.23	75	100	25	50	117.13	50	50	75	100
	108.27	50	100	25	75	117.33	100	25	100	50
	108.31	25	100	25	100	117.37	75	25	100	75
	108.47	100	75	50	25	117.41	50	25	100	100
	108.51	75	75	50	50	118.18	100	75	25	75
	108.55	50	75	50	75	118.22	75	75	25	100
	108.59	25	75	50	100	118.45	100	50	50	75
	108.75	100	50	75	25	118.49	75	50	50	100
	108.78	75	50	75	50	118.73	100	25	75	75
	108.82	50	50	75	75	118.77	75	25	75	100
	108.86	25	50	75	100	119.86	100	50	25	100
	109.02	100	25	100	25					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงค่า OTTV	OTTV	%WWR ตามทิศ				OTTV	%WWR ตามทิศ			
		SE	NE	NW	SW		SE	NE	NW	SW
120-140	120.13	100	25	50	100	126.76	100	50	50	100
	120.64	75	100	100	25	127.04	100	25	75	100
	120.68	50	100	100	50	128.90	100	100	100	25
	120.71	25	100	100	75	128.94	75	100	100	50
	122.00	100	100	75	25	128.98	50	100	100	75
	122.04	75	100	75	50	129.02	25	100	100	100
	122.08	50	100	75	75	130.31	100	100	75	50
	122.12	25	100	75	100	130.35	75	100	75	75
	122.28	100	75	100	25	130.38	50	100	75	100
	122.32	75	75	100	50	130.58	100	75	100	50
	122.35	50	75	100	75	130.62	75	75	100	75
	122.39	25	75	100	100	130.66	50	75	100	100
	123.40	100	100	50	50	131.71	100	100	50	75
	123.44	75	100	50	75	131.75	75	100	50	100
	123.48	50	100	50	100	131.99	100	75	75	75
	123.68	100	75	75	50	132.02	75	75	75	100
	123.72	75	75	75	75	132.26	100	50	100	75
	123.76	50	75	75	100	132.30	75	50	100	100
	123.96	100	50	100	50	133.11	100	100	25	100
	124.00	75	50	100	75	133.39	100	75	50	100
	124.03	50	50	100	100	133.67	100	50	75	100
	124.80	100	100	25	75	133.94	100	25	100	100
	124.84	75	100	25	100	137.21	100	100	100	50
	125.08	100	75	50	75	137.25	75	100	100	75
	125.12	75	75	50	100	137.29	50	100	100	100
	125.36	100	50	75	75	138.61	100	100	75	75
	125.40	75	50	75	100	138.65	75	100	75	100
	125.64	100	25	100	75	138.89	100	75	100	75
	125.68	75	25	100	100	138.93	75	75	100	100
	126.48	100	75	25	100					

ช่วงค่า OTTV	OTTV	%WWR ตามทิศ			
		SE	NE	NW	SW
140-160	140.01	100	100	50	100
	140.29	100	75	75	100
	140.57	100	50	100	100
	145.52	100	100	100	75
	145.56	75	100	100	100
	146.92	100	100	75	100
	147.20	100	75	100	100
	153.82	100	100	100	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

