การพัฒนาเครื่องมือเสริมบนแบบจำลองสารสนเทศอาคาร เพื่อหาค่าแสงที่ส่งผลต่อนาฬิกาชีวภาพ สำหรับการออกแบบอาคารสำนักงานขั้นต้น

Development of Building Information Modeling (BIM) to Calculate the Circadian Lighting for Office Spaces at Schematic Design Stage

รับบทความ	09/05/2565
แก้ไขบทความ	12/06/2565
ยอมรับบทความ	13/06/2565

เจนจิรา เรืองทรัพย์เอนก อรรจน์ เศรษฐบุตร สริน พินิจ
ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Janejira Ruangsupanek, Atch Sreshthaputra, Sarin Pinich
Department of Architecture, Faculty of Architecture, Chulalongkorn University
Janejanejirar@gmail.com, Atch.s@chula.ac.th, Sarin.pi@chula.ac.th

บทคัดย่อ

แสงธรรมชาติ (daylight) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อวงจรการหลับ-ตื่น (Circadian rhythm) หากมีการใช้ร่วมกับแสงประดิษฐ์ (artificial light) ในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยให้ผู้ใช้งานมีคุณภาพความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการคำนวณหาค่าปริมาณแสงที่ส่งผลต่อนาฬิกาชีวภาพ เพื่อพัฒนาเครื่องมือแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling: BIM) ช่วยคำนวณให้ผู้ออกแบบ โดยใช้โปรแกรม Autodesk Revit ร่วมกับการใช้เครื่องมือเสริม Autodesk Dynamo Studio

วิจัยเริ่มต้นโดยการหาค่า Melanopic Ratio: MR ของแสงธรรมชาติให้เหมาะสมกับบริบทประเทศไทย สำหรับการคำนวณหาค่า Equivalent Melanopic Lux: EML และศึกษาการทำงานของแบบจำลองสารสนเทศอาคาร เพื่อกำหนดข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นในการพัฒนาเครื่องมือเสริม และได้ทดลองใช้เครื่องมือที่พัฒนามาทำการเปรียบเทียบผลกับการคำนวณผ่านโปรแกรมอื่น โดยพบว่าเครื่องมือที่พัฒนาสามารถช่วยคำนวณหาค่าความส่องสว่างในแนวดิ่ง (Vertical illuminance: Ev) สำหรับให้ได้ค่า EML ที่ต้องการโดยพิจารณาทั้งแสงสว่างจากแสงธรรมชาติและแสงประดิษฐ์ได้ เพื่อให้สถาปนิกผู้ออกแบบเปลือกอาคารโปร่งใสร่วมกับการใช้แสงประดิษฐ์ในอาคารสำนักงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อส่งเสริมให้เกิดสุขภาวะที่ดีต่อวงจรการหลับ-ตื่นของร่างกายมนุษย์

***คำสำคัญ**: แบบจำลองสารสนเทศอาคาร นาฬิกาชีวภาพ การออกแบบแสง แสงธรรมชาติ อาคารสำนักงาน*

Abstract

Daylight is an important factor affecting the body's sleep-wake cycles (Circadian rhythm). When combined with artificial light in an appropriate ratio, it improves the quality of the indoor environment and the well-being of employees. The objective of the research was to study the method of calculating the amount of light that affects the biological clock, to develop a Building Information Modeling (BIM) tool to facilitate the calculation for designers by using Autodesk Revit (Revit) and an add-on tool: Dynamo Studio (Dynamo).

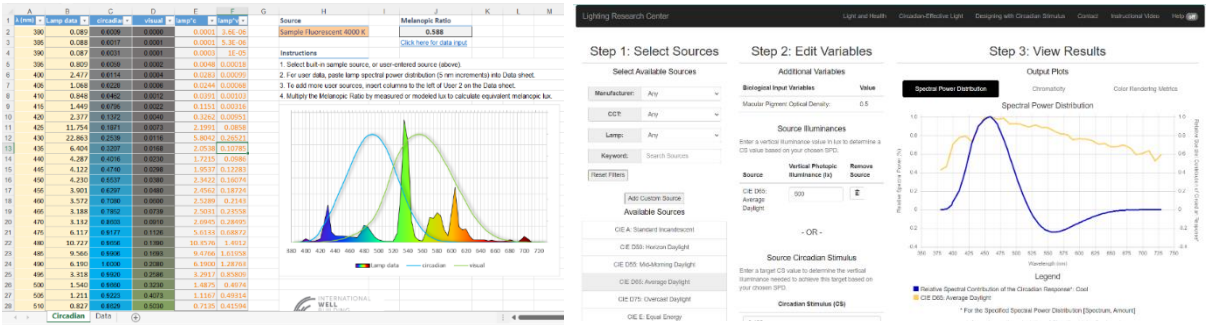
The tool development process consists of 3 steps: Determining the melanopic ratio (MR) of natural light in Thailand to get the equivalent melanopic lux: EML value, studying the working process of BIM, to set the important fundamental data for developing the tools, and comparing the results of the developed tools with those of other programs. The results show that the developed tools can help in calculating the vertical illuminance (Ev) to achieve the desired EML value under both natural and artificial lighting. Thus, architects can design transparent building envelopes with the efficient use of artificial lighting in office buildings to improve the quality of the circadian rhythm of the human body.

***Keywords**: Building Information Modeling, Biological clock, Circadian lighting, Daylight, Office building*

ที่มาและความสำคัญ

คุณภาพของสภาพแวดล้อมภายในอาคารเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยให้ผู้ใช้งานทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การออกแบบแสงธรรมชาติ (daylight) ร่วมกับแสงประดิษฐ์ (artificial lighting) ในปริมาณที่เหมาะสมเป็นหนึ่งแนวทางที่ส่งผลต่อความพึงพอใจในการทำงานรวมถึงคุณภาพความเป็นอยู่และสร้างสุขภาวะที่ดี (well-being) ให้แก่มนุษย์ได้ และยังสามารถทำให้นาฬิกาชีวภาพ (biological clock) เป็นไปตามกลไกวงจรการหลับ-ตื่น (Circadian rhythm) ตามปกติอีกด้วย (Borisuit, 2013)

การคำนวณหาค่าแสงที่เหมาะสมต่อนาฬิกาชีวภาพถือว่าเป็นเรื่องที่ซับซ้อน และจำเป็นต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับแสงรวมถึงมีความเข้าใจถึงปัจจัยต่าง ๆ ของแสงที่ส่งผลต่อนาฬิกาชีวภาพ ในปัจจุบันมีการพัฒนาเครื่องมือที่ช่วยสถาปนิกในการคำนวณได้สะดวกมากขึ้น เช่น Microsoft Excel และ Circadian Stimulus (CS) calculator ที่สามารถเข้าถึงได้ผ่านทางเว็บไซต์ที่พัฒนาโดย Lighting Research Center (LRC) ฯลฯ โดยแต่ละเครื่องมือมีข้อจำกัดในการใช้งานแตกต่างกันออกไป ทั้งสองเครื่องมือที่กล่าวไปข้างต้นต้องอาศัยการป้อนข้อมูลโดยผู้ใช้งาน และหากมีการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลจำเป็นต้องทำการใส่ข้อมูลใหม่อีกครั้งเพื่อผลลัพธ์ใหม่ที่ถูกต้อง



ภาพ 1 ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้คำนวณในปัจจุบัน

ปัจจุบันมีเครื่องมือเสริมในการคำนวณหาค่าแสงที่ส่งผลต่อนาฬิกาชีวภาพที่สามารถลดข้อกำจัดดังกล่าวได้ คือ โปรแกรม Adaptive Lighting for Alertness: ALFA ที่พัฒนาโดยบริษัท Solemma อาศัยการทำงานผ่านโปรแกรม Rhinoceros ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับการออกแบบ 3 มิติ สามารถใช้งานได้หลากหลาย แต่โปรแกรมเหล่านั้นยังไม่เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทยหากเทียบกับโปรแกรม Autodesk Revit ที่นิยมใช้ทั้งในงานวิศวกรรม และงานสถาปัตยกรรม ซึ่งโปรแกรม Revit เป็นเครื่องมืออเนกประสงค์ สามารถจำลองการออกแบบได้อย่างแม่นยำพร้อมสำหรับความต้องการที่หลากหลาย และยังสามารถนำเครื่องมือเสริม Autodesk Dynamo Studio มาใช้ร่วมกันเพื่อเพิ่มความสามารถของตัวโปรแกรม Revit เอง โดยความสามารถของ Dynamo คือการเขียนสคริปต์ซึ่งมีอินเตอร์เฟสการใช้งานที่สามารถเข้าใจได้ง่าย ทำให้ผู้ที่ไม่ได้เชี่ยวชาญด้านคอมพิวเตอร์ก็สามารถใช้งานได้ (ภัทรพล วัชรเมธากุล และอรรจน์ เศรษฐบุตร, 2563) ซึ่งการทำงานของโปรแกรม Revit เป็นการทำงานในรูปแบบของการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling: BIM) ซึ่งสามารถดึงข้อมูลอาคารจากโปรแกรมมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ต่อได้

แบบจำลองสารสนเทศอาคาร หรือ BIM เป็นแนวคิดที่ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อใช้ในกระบวนการออกแบบและก่อสร้างอาคาร โดยการสร้างแบบจำลองอาคารพร้อมข้อมูลหรือสารสนเทศในองค์ประกอบของแบบจำลองอาคารนั้น ๆ จำลองการก่อสร้างอาคารจริง แนวคิดของ BIM ได้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Charles M. Eastman ตีพิมพ์ในวารสารเอไอเอ (AIA Journal) เมื่อปี ค.ศ. 1975 ในครั้งนั้นใช้ชื่อว่า "Building Description System" จนเมื่อปี ค.ศ. 1986 จึงเปลี่ยนมาใช้คำว่า "Building Information Modeling" ที่นำเสนอโดย Robert Aish ปัจจุบัน BIM ถูกนำมาใช้กับงานออกแบบสถาปัตยกรรมมากขึ้น

เนื่องจากความสามารถในการผนวกการทำงานออกแบบสถาปัตยกรรม ทั้ง 2 มิติและ 3 มิติ เข้าด้วยกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถนำแบบจำลองอาคารและข้อมูลต่าง ๆ ในแบบจำลองอาคาร ไปใช้ในการทำงานขั้นต่อ ๆ ไป รวมถึงงานในสาขาวิชาชีพด้านอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น งานด้านวิศวกรรม งานก่อสร้างและบริหารงานโครงการก่อสร้าง งานบำรุงรักษาและบริหารจัดการอาคาร และงานวิเคราะห์การใช้พลังงานในอาคาร เป็นต้น (สมาคมสถาปนิกสยาม ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2558)

เนื่องจาก BIM ประกอบไปด้วยข้อมูลขององค์ประกอบต่าง ๆ ของอาคาร จึงสามารถนำข้อมูลเหล่านี้มาทำการจำลองเพื่อประเมินสมรรถนะของอาคารในด้านต่าง ๆ ได้ เช่น การวิเคราะห์การใช้พลังงานในอาคาร การประเมินความเป็นอาคารเขียว การประเมินด้านความแข็งแรงของโครงสร้างอาคารเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว หรือแรงลม ตลอดจนการจำลองพฤติกรรมของผู้ใช้อาคารในสถานการณ์ต่าง ๆ เช่น ระยะเวลาที่ใช้ในการอพยพคนออกจากอาคาร เป็นต้น (สมาคมสถาปนิกสยาม ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2558) ซึ่งเมื่อนำข้อมูลอาคารที่ถอดจาก BIM มาเข้าโปรแกรม Dynamo ที่เขียนขึ้นเพื่อช่วยในการคำนวณแสงสว่างเพื่อประเมินการออกแบบที่ส่งเสริม Circadian rhythm ก็จะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบอาคารมากขึ้น

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการคำนวณหาค่าแสงที่ส่งผลต่อนาฬิกาชีวภาพของหน่วยงานต่าง ๆ เช่น The International WELL Building Institute (IWBI), The Lighting Research Center (LRC) และ German Industrial Standard (DIN) เป็นต้น ให้สอดคล้องบริบทของประเทศไทย
2. เพื่อพัฒนาเครื่องมือเสริมบนแบบจำลองสารสนเทศอาคาร มาช่วยในการคำนวณหาค่าแสงที่ส่งผลต่อนาฬิกาชีวภาพ ให้สะดวกต่อการใช้งานมากยิ่งขึ้น

ขอบเขตในการวิจัย

1. ศึกษาวิธีการคำนวณหาค่าแสงที่ส่งผลต่อนาฬิกาชีวภาพตามเกณฑ์การประเมินอาคาร WELL Building Standard และ The Lighting Research Center (LRC) เพื่อหาแนวทางการประเมินแสงประดิษฐ์ร่วมกับแสงธรรมชาติ
2. ศึกษาและประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารผ่านโปรแกรม Autodesk Revit ควบคู่กับเครื่องมือเสริม Dynamo ในการคำนวณหาค่าแสงที่ส่งผลต่อนาฬิกาชีวภาพ

ทบทวนวรรณกรรม

แสงมีผลต่อมนุษย์ทั้งด้านสรีรวิทยา และด้านจิตวิทยา สิ่งเหล่านี้เกิดขึ้นโดยคุณสมบัติที่แตกต่างกันของแสงที่มนุษย์รับรู้ เช่น สีของแสง ความเข้มแสง ความยาวคลื่นของแสง และตำแหน่งทิศทางของแสง เป็นต้น (ศรุดา จิรัฐกุลธนา, 2563) ทั้งแสงธรรมชาติและแสงประดิษฐ์มีผลทางการมองเห็น (Image Forming function: IF) และสิ่งที่ไม่ใช่การมองเห็น (Non-image Forming function: NIF) ที่เกี่ยวข้องกับวงจรการหลับ-ตื่น (Circadian rhythm) หรือลักษณะทางชีววิทยาตลอด 24 ชั่วโมงของสิ่งมีชีวิต ที่ส่งผลต่อการทำงานของระบบต่าง ๆ ในร่างกาย เช่น การปล่อยฮอร์โมน อุณหภูมิของร่างกาย เป็นต้น (Zielinska-Dabkowska & Xavia, 2018) นาฬิกาชีวภาพถูกควบคุมด้วยนิวเคลียสซูพราไคแอสมาติก (Suprachiasmatic Nucleus: SCN) ซึ่งอยู่ในสมองส่วนไฮโปทาลามัส (Hypothalamus) คอยทำให้การทำงานของร่างกายสอดคล้องกับวงจรรอบ 24 ชั่วโมงตามธรรมชาติ เมื่อจอประสาทตา (Retina) ได้รับแสงผ่านเข้ามาจะส่งสัญญาณไปยัง SCN เพื่อกระตุ้นให้ร่างกายตื่นตัวในช่วงกลางวัน และช่วงกลางคืนเวลานอนถือเป็นช่วงที่สำคัญต่อการรักษาภาวะสมดุลของร่างกายซึ่งถูกกระตุ้นโดยฮอร์โมนเมลาโทนิน (Melatonin) (อรพินทร์ เชียงปิ๋ว, 2555)

ในปัจจุบันการคำนวณค่าแสงที่ส่งผลต่อนาฬิกาชีวภาพมีหน่วยงานที่นิยมนำมาใช้อ้างอิงในการทำงานอยู่ 2 หน่วยงาน ได้แก่ The Lighting Research Center (LRC) และ The International WELL Building Institute (IWBI) โดย

หน่วยงาน LRC มีการปริมาณค่าแสงที่ส่งผลต่อนาฬิกาชีวภาพเป็นค่า Circadian Stimulus (CS) โดยมีการแนะนำปริมาณ CS ตั้งแต่ 0.3 ขึ้นไปในช่วงเวลา 8:00 น. – 13:00 น. และช่วงเวลา 13:00 น. – 17:00 น. ควรมีปริมาณ CS ตั้งแต่ 0.2 ขึ้นไป ส่วนของ WELL Certification จากหน่วยงาน IWBI มีการประมาณค่าแสงที่ส่งผลต่อนาฬิกาชีวภาพเป็นค่า Equivalent Melanopic Lux (EML) อ้างอิงจากเกณฑ์การประเมินอาคาร WELL v2, Q1 2022 อย่างน้อย 150 EML หรือ 136 M-EDI(D65) สำหรับ 1 คะแนน และอย่างน้อย 275 EML หรือ 250 M-EDI(D65) สำหรับ 3 คะแนน โดยไม่นำปัจจัยของ Circadian light จากแสงธรรมชาติมาประเมินร่วมด้วย

ตาราง 1 เปรียบเทียบความแตกต่างของข้อกำหนดในแต่ละหน่วยงาน

หน่วยงาน	Lighting Research Center (LRC)	The International WELL Building Institute (IWBI)
หน่วยวัดผล	Circadian Stimulus (CS)	Equivalent Melanopic Lux (EML)
เกณฑ์คะแนน	8:00 น. - 13:00 น.: CS อย่างน้อย 0.3 13:00 น. - 17:00 น.: CS อย่างน้อย 0.2 17:00 น. - 18:00 น.: CS อย่างน้อย 0.15	9:00 น. - 13:00 น.: 1 คะแนน สำหรับ EML อย่างน้อย 150 EML หรือ 136 M-EDI(D65) 3 คะแนน สำหรับ EML อย่างน้อย 275 EML หรือ 250 M-EDI(D65)
จำนวนเวลาที่ประเมิน	10 ชั่วโมง ต่อวัน	4 ชั่วโมง ต่อวัน
สูตรการคำนวณ	$\mathrm{CL_A} = \left(\frac{1622\int \mathrm{C_\lambda E_\lambda}\,\mathrm{d\lambda}}{683\int \mathrm{V_\lambda E_\lambda}\,\mathrm{d\lambda}} - 0.67\right)\mathrm{E_v}$	$\mathrm{EML} = \text{Melanopic Ratio x } \mathrm{E_v}$
	$\mathrm{CS} = 0.7 - \frac{0.7}{1+\left(\frac{\mathrm{CL_A}}{355.7}\right)^{1.1026}}$	$\text{Melanopic Ratio} = 1.218\left(\frac{\int C_\lambda E_\lambda\,\mathrm{d\lambda}}{\int V_\lambda E_\lambda\,\mathrm{d\lambda}}\right)$
	$\mathrm{C_\lambda}$ คือ ค่าคงตัวของค่าความไวต่อแสงของเซลล์รับแสง ipRGCs ทุก ๆ นาโนเมตรของสเปกตรัม $\mathrm{V_\lambda}$ คือ ค่าคงตัวของค่าความไวต่อแสงของเซลล์รับแสง cones ทุก ๆ นาโนเมตรของสเปกตรัม $\mathrm{E_\lambda}$ คือ ค่าการแผ่รังสีของแสง (W/m²) ทุก ๆ นาโนเมตรของสเปกตรัม $\mathrm{E_v}$ คือ ค่าความส่องสว่างในแนวดิ่ง ที่เข้าสู่กระจกตา (lux) (Vertical Illuminance) $\mathrm{S_\lambda}$ คือ ค่าคงตัวของค่าความไวต่อแสงของเซลล์รับแสง s - cones ทุก ๆ นาโนเมตรของสเปกตรัม $\mathrm{d\lambda}$ คือ การอินทิเกรตกับทุกช่วงความยาวคลื่นของสเปกตรัม	
ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ	1. อุณหภูมิสีสัมพันธ์ (Correlated Color Temperature: CCT) 2. การกระจายพลังงานสเปกตรัม (Spectral Power Distribution: SPD) 3. ความส่องสว่างในแนวดิ่ง (Vertical Illuminance: Ev)	

ที่มา: แนวทางการใช้เกณฑ์การประเมินแสงธรรมชาติที่มีผลต่อนาฬิกาชีวิตในประเทศไทย โดย จิณห์วรา อรัณย์ชนายุธ และอวิรุทธ์ ศรีสุธา, 2564. Journal of Architectural/Planning Research and Studies JARS, 18(1), หน้า118.

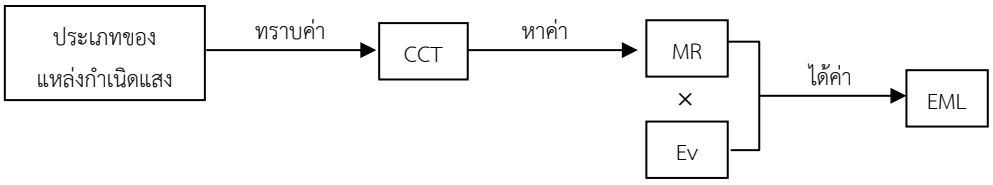
งานวิจัยนี้ได้เลือกพัฒนาเครื่องมือสำหรับการหาค่า EML เนื่องจากในปัจจุบันวงการอสังหาริมทรัพย์ไทยเริ่มให้ความสำคัญเกี่ยวกับการยกระดับสุขภาวะและความเป็นอยู่ที่ดีของผู้ใช้งานอาคารและให้ความสนใจใน WELL Building Standard เป็นอย่างมาก ซึ่งหากพิจารณาจากสูตรการคำนวณหาค่า EML นั้นจำเป็นที่จะต้องทราบค่า Melanopic Ratio: MR ของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในพื้นที่ ซึ่งคำนวณมาจากค่าการกระจายของแสงระหว่างช่วง 380-730 nm โดยตามเกณฑ์การประเมินอาคาร WELL ได้ระบุค่า MR ของแสงแต่ละประเภทไว้ ดังนี้

ตาราง 2 ค่า Melanopic Ratio: MR ของแหล่งกำเนิดแสงแต่ละประเภทตามเกณฑ์การประเมินอาคาร WELL

CCT (K)	Light Source	Melanopic Ratio
2700	LED	0.45
3000	Fluorescent	0.45
2800	Incandescent	0.54
4000	Fluorescent	0.58
4000	LED	0.76
5450	CIE E (Equal Energy)	1.00
6500	Fluorescent	1.02
6500	Daylight	1.10
7500	Fluorescent	1.11

ที่มา: The WELL building standard version 2 โดย International WELL Building Institute, 2022. (https://standard.wellcertified.com/v7/tables).

คุณภาพของแสงที่ส่งผลต่อนาฬิกาชีวภาพนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแสงในด้านต่าง ๆ ทั้งอุณหภูมิสีของแสง (color temperature) หรือค่าอุณหภูมิสีสัมพันธ์ (Correlated Color Temperature: CCT) เป็นระบบการวัดแสงโดยมีหน่วยเป็นองศาเคลวิน (Degree Kelvin: K) ใช้เพื่อระบุสีของแหล่งกำเนิดแสงที่เกิดจากการแผ่รังสี หรือการกระจายพลังงานสเปกตรัม (Spectral Power Distribution: SPD) ซึ่งค่า CCT นั้นมีความสัมพันธ์กับการตื่นตัวของมนุษย์ อีกปัจจัยคือ ความส่องสว่าง (Illuminance: E) การคำนวณค่าปริมาณแสงที่ส่งผลต่อนาฬิกาชีวภาพนั้นต้องวัดความส่องสว่างในแนวดิ่ง (Vertical illuminance: Ev) ในลักษณะที่กระทบเข้าสู่ดวงตา หรือในระดับประมาณ 1.20 เมตร จากพื้นหรือระดับขณะนั่งทำงาน



ภาพ 2 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติแสงสู่ขั้นตอนการหาค่า EML

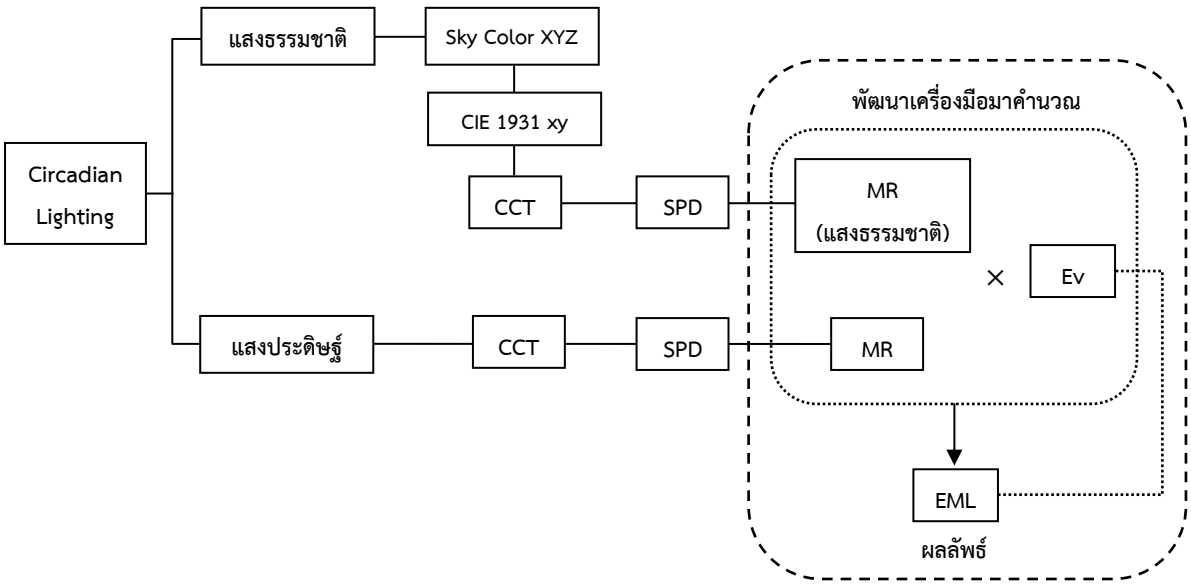
สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณค่าแสงที่ส่งผลต่อนาฬิกาชีวภาพ ส่วนใหญ่ใช้วิธีการเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อหาค่าความส่องสว่างของแสงโดยพิจารณาเพียงแค่แสงประดิษฐ์หรือแสงธรรมชาติอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น ด้วยการสร้างหุ่นจำลองโดยใช้โปรแกรม Rhino ร่วมกับการประเมินค่าแสงผ่านโปรแกรมเสริม Honeybee, Ladybug และ Design Iterate Validate Adapt (DIVA) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่คำนวณบนพื้นฐานของโปรแกรม Radiance ผ่านการทำงานบนเครื่องมือเสริม Grasshopper ที่มีความสามารถในการดึงข้อมูลผ่านโปรแกรม Rhino ได้ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยบางส่วนที่ใช้โปรแกรม DIALux เข้ามาช่วยในการประเมินค่าแสงประดิษฐ์อีกด้วย จากงานวิจัยเรื่อง Circadian Daylight in Practice, Determining a Simulation Method for the Design Process ของ Emilie Hagen และ Henry Richardson ในปี ค.ศ. 2016 มีการเปรียบเทียบผลลัพธ์การคำนวณของค่าแสงที่ส่งผลต่อนาฬิกาชีวภาพโดยใช้ค่าความส่องสว่างในแนวราบ (Eh) เปรียบเทียบกับค่าความส่องสว่างในแนวดิ่ง (Ev) พบว่าผลลัพธ์ออกมามีความใกล้เคียงกันแตกต่างกันที่ความละเอียดที่ผู้ใช้งานต้องการทราบ เนื่องจากการคำนวณโดยใช้ค่า Ev จะทราบถึงแสงในแต่ละทิศทาง ส่วนการใช้ค่า Eh ในการคำนวณนั้นมีความรวดเร็วกว่าซึ่งเหมาะสมกับการคำนวณเพื่อการออกแบบขั้นต้นหรือเป็นแนวทางในการเลือกใช้แสงประดิษฐ์ภายในอาคาร

แสงธรรมชาติในประเทศไทยเพียงพอที่จะสามารถทำให้มีนาฬิกาชีวภาพที่ดีได้ แต่ในทางกลับกันการใช้งานของอาคารสำนักงานนั้นไม่สามารถใช้เพียงแสงธรรมชาติอย่างเดียวได้ เพราะอาจทำให้เกิดความไม่สบายตาแก่ผู้ใช้งานภายในอาคาร การประเมินแสงที่ส่งผลต่อนาฬิกาชีวภาพจากแหล่งกำเนิดแสงธรรมชาติร่วมกับแสงประดิษฐ์ภายในสามารถทำให้ผู้ใช้งานในอาคารสำนักงานนั้นทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสะดวกสบายมากยิ่งขึ้น ซึ่งในปัจจุบันยังไม่ค้นพบเครื่องมือเสริมของโปรแกรม Revit ที่สามารถคำนวณค่า CS หรือ EML ได้โดยตรงและสะดวกสำหรับสถาปนิก มีเพียงเครื่องมือที่สามารถคำนวณหาค่าความส่องสว่างในแนวราบ (Eh) ได้ งานวิจัยนี้จึงต้องการต่อยอดข้อมูลที่สามารถคำนวณได้จากเครื่องมือในปัจจุบัน เพื่อประเมินค่าแสงที่ส่งผลต่อนาฬิกาชีวภาพหรือค่า EML ตาม WELL Building Standard เนื่องจากเป็นมาตรฐานที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน

ระเบียบวิธีวิจัย

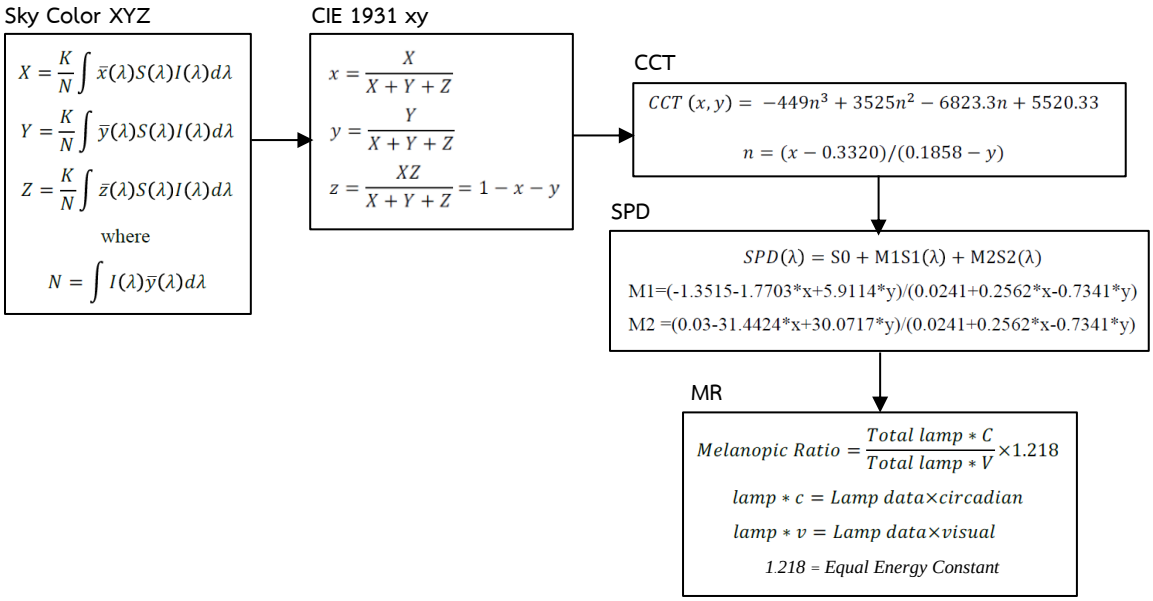
งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงการพัฒนาผลิตภัณฑ์ (product development) ที่มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาเครื่องมือเสริมบนแบบจำลองสารสนเทศอาคารเพื่อการคำนวณหาค่าแสงที่ส่งผลต่อนาฬิกาชีวภาพสำหรับการออกแบบอาคารสำนักงานขั้นต้น โดยมีระเบียบวิธีการวิจัย ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาการทำงานของแบบจำลองสารสนเทศอาคาร เพื่อวิเคราะห์และหาแนวทางในการกำหนดข้อมูลและตัวแปรสำหรับการคำนวณหาค่า EML รวมถึงการศึกษาข้อจำกัดและปัญหาในการทำงานของโปรแกรมปัจจุบัน ซึ่งพบว่าตามเกณฑ์การประเมินอาคาร WELL ได้ระบุการคำนวณหาค่า EML ไว้สำหรับแสงประดิษฐ์เท่านั้น ดังนั้นหากต้องการประยุกต์เพื่อการคำนวณสำหรับแสงธรรมชาติจำเป็นที่จะต้องทราบค่า MR ของแสงธรรมชาติก่อนจึงจะสามารถคำนวณหาค่า EML ได้ โดยพิจารณาการแบ่งพื้นที่สำหรับแสงธรรมชาติจากพื้นที่ที่ติดกรอบรอบอาคารที่มีช่องเปิดให้แสงเข้ามา โดยในการวิจัยนี้จะคิดระยะของแสงที่ส่องผ่านเข้ามาในพื้นที่ใช้งานในแนวระนาบเป็น 2 เท่าของระดับความสูงช่องเปิดหรือกระจกที่มีแสงส่องผ่านเข้ามา



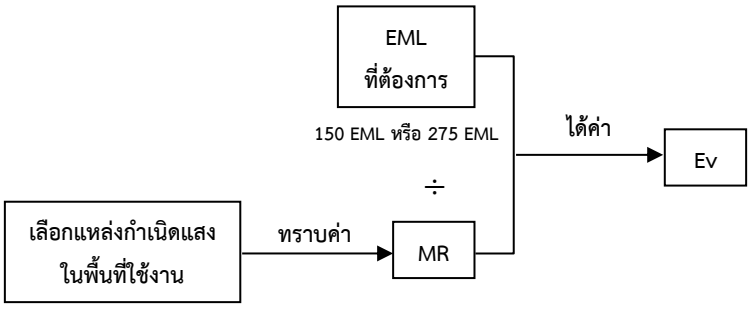
ภาพ 3 กรอบความคิดในการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ดึงข้อมูลจากไฟล์สภาพอากาศของกรุงเทพมหานคร เพื่อหาค่าพิกัด XYZ ของ Sky Color ผ่านโปรแกรมเสริม Honeybee และ Ladybug แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยแต่ละพิกัดในแต่ละช่วงเวลาตั้งแต่ 8:00 น.–18.00 น. จากนั้นจึงนำค่าพิกัดเฉลี่ย XYZ ไปหาค่า CCT ของสภาพอากาศในแต่ละช่วงวลาเพื่อนำค่าไปเข้าสมการหาค่า SPD ของแสงระหว่างช่วง 380-730 nm เพื่อนำไปหาค่า MR ผ่านไฟล์ Microsoft Excel ที่ทาง WELL ได้จัดเตรียมไว้ให้ใน appendix L1



ภาพ 4 ลำดับขั้นตอนการหาค่า MR สำหรับแสงธรรมชาติ

ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาเครื่องมือเสริมบนแบบจำลองสารสนเทศอาคาร ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม Autodesk Revit ควบคู่กับเครื่องมือเสริม Dynamo โดยพบข้อจำกัดในเรื่องการคำนวณความส่องสว่างในแนวดิ่ง (Vertical illuminance: Ev) ผ่านโปรแกรม Autodesk Revit เพื่อการหาค่า EML คือจำเป็นต้องใช้โปรแกรมเสริมอื่น ๆ เช่น โปรแกรม ElumTools ในงานวิจัยนี้จึงประยุกต์รูปแบบการคำนวณโดยให้ผู้ใช้งานเลือกค่า EML ที่ต้องการก่อนซึ่งตามเกณฑ์การประเมินอาคาร WELL ได้กำหนดคะแนนสำหรับหัวข้อเรื่อง แสง (light) ในคุณสมบัติ (feature) L03 ที่มีการคำนึงถึงการออกแบบแสงสว่างเพื่อสุขภาพ (Circadian lighting design) หากต้องการคะแนน 1 คะแนน จะได้ต้องค่า EML อย่างน้อย 150 EML หรือ 136 M-EDI(D65) และสูงสุด 3 คะแนน จะต้องได้ค่า EML อย่างน้อย 275 EML หรือ 250 M-EDI(D65) หลังจากนั้นเครื่องมือที่ได้พัฒนาขึ้นมานั้นจะช่วยคำนวณหาค่าความส่องสว่างในแนวดิ่ง (Vertical illuminance: Ev) ที่ต้องใช้ เพื่อให้ได้ค่า EML ตามที่ต้องการและทำการแสดงผลผ่าน Dynamo เป็นค่าสีในแต่ละช่วงความส่องสว่าง



ภาพ 5 แนวทางการพัฒนาเครื่องมือที่จะใช้ในการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือที่พัฒนา หลังจากพัฒนาเครื่องมือเรียบร้อยแล้วจึงนำไปทดลองคำนวณกับไฟล์แบบจำลองอาคารสำนักงาน เพื่อพัฒนาและปรับปรุงให้ครอบคลุมต่อรูปแบบของอาคารให้มีความหลากหลายมากที่สุด ซึ่งในการสร้างแบบจำลอง Revit จำเป็นต้องใส่ข้อมูล Parameter ที่ในการแบ่งพื้นที่ห้อง (room) ภายในแบบจำลองเพื่อให้สามารถดึงข้อมูลใช้ในการคำนวณภายในโปรแกรม Dynamo ได้ หลังจากทดลองเครื่องมือแล้วจึงนำค่าความส่องสว่างที่คำนวณได้ไปเป็นแนวทางในการเลือกดวงโคมเพื่อให้ค่าความส่องสว่างตามที่โปรแกรมคำนวณได้แนะนำ แล้วจึงนำค่าไปเปรียบเทียบกับการคำนวณผ่านโปรแกรม Microsoft Excel

ขั้นตอนที่ 4 สรุปผลการศึกษาและเสนอแนวทางเพื่อการพัฒนาเครื่องมือในอนาคต มีการจัดทำไฟล์ตัวอย่างเพื่อให้ผู้ที่ต้องการนำไปใช้งานสามารถเข้าใจถึงขั้นตอนลำดับการทำงานของเครื่องมือ

ผลการวิจัยและการศึกษา

1. การศึกษาวิธีการคำนวณหาค่า MR สำหรับแสงธรรมชาติ

จากการคำนวณหาค่า MR สำหรับแสงธรรมชาติที่เหมาะสมกับบริบทประเทศไทย โดยได้ทำการพิจารณาจากวันที่อาทิตย์ขึ้นทางทิศตะวันออกและตกทางทิศตะวันตกพอดี คือ วันวสันตวิษุวัต (Vernal Equinox) ประมาณวันที่ 20 หรือ 21 มีนาคม และวันศารทวิษุวัต (Autumnal Equinox) วันที่ 22 หรือ 23 กันยายน จากผลพบว่าค่า MR มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเล็กน้อย โดยตลอดทั้งวันในเวลาที่สอดคล้องกับเวลาทำงานในอาคารสำนักงานสามารถแบ่งออกเป็น 4 ช่วงดังตาราง 3 คือ ตั้งแต่เวลา 8:00 น. ค่า MR เฉลี่ยอยู่ที่ 1.33 ต่อมาที่เวลา 9.00 น.–16:00 น. ค่า CCT ของแสงอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่า MR เพิ่มขึ้นด้วย โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 1.42 และที่เวลา 17:00 น. ค่า MR เฉลี่ยลดลงเหลือ 1.28 และสุดท้ายในช่วงเวลา 18:00 น. เนื่องจากเป็นช่วงที่พระอาทิตย์เริ่มตกลงสู่พื้นดิน ค่า CCT มีการเปลี่ยนแปลงลดลงมาส่งผลต่อค่า MR ลดลงเหลือ 1.09

ตาราง 3 ค่า MR ของแสงธรรมชาติ

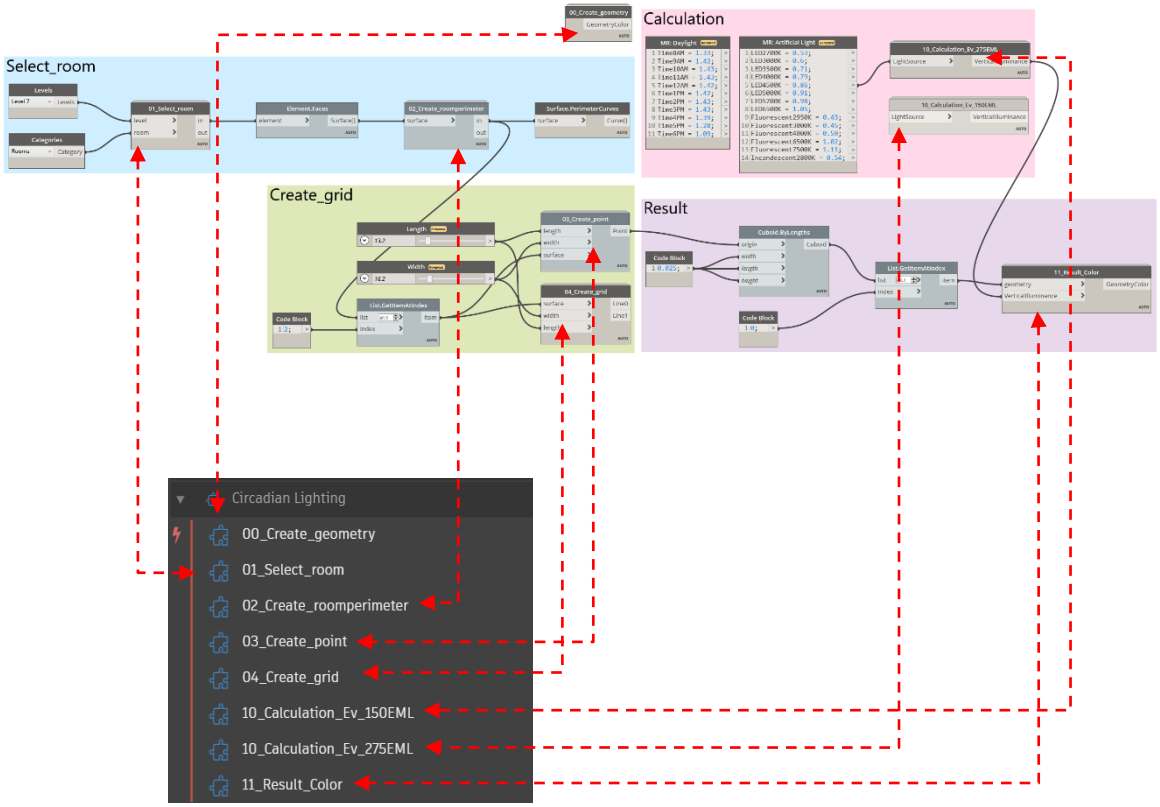
Daylight		Time										
		8:00	**9:00**	**10:00**	**11:00**	**12:00**	**13:00**	**14:00**	**15:00**	**16:00**	**17:00**	**18:00**
Mar	CCT (K)	10002	12616	13562	13314	13098	13105	13383	13518	12237	9432	6626
	MR	1.32	1.41	1.43	1.43	1.42	1.42	1.43	1.43	1.40	1.29	1.11
Sep	CCT (K)	10690	12996	13560	13231	13098	13129	13472	13390	11706	8744	6124
	MR	1.35	1.42	1.43	1.43	1.42	1.42	1.43	1.43	1.38	1.26	1.06
Avg. MR		**1.33**	**1.42**	**1.43**	**1.43**	**1.42**	**1.42**	**1.43**	**1.43**	**1.39**	**1.28**	**1.09**

2. การพัฒนาเครื่องมือเสริม

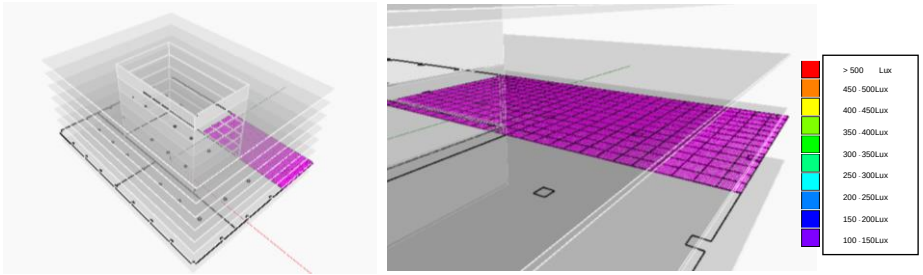
การพัฒนาเครื่องมือเสริมในงานวิจัยชิ้นนี้ ได้ผลลัพธ์เป็นไฟล์ต่าง ๆ ซึ่งทำงานบนโปรแกรม Revit เป็นหลัก โดยใช้ร่วมกับไฟล์ Dynamo ซึ่งประกอบไปด้วยไฟล์ทั้งหมด 2 สกุลด้วยกัน สกุลแรกคือ ไฟล์สกุล .dyn ซึ่งเป็นไฟล์ตัวอย่างที่ใช้ในการเริ่มต้นทำงานแสดงให้เห็นภาพรวมขั้นตอนการทำงานและข้อมูลที่ต้องใส่เข้าไปทั้งหมดเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ออกมา รวมถึงมีค่า MR ของแหล่งกำเนิดแสงต่าง ๆ ทั้งแสงธรรมชาติที่มีการแบ่งตามเวลาเพื่อให้สามารถเลือกคำนวณได้ตามเวลาที่ต้องการ และแสงประดิษฐ์ที่แบ่งตามประเภทของแหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้ในอาคารสำนักงาน โดยจะมีการดึงข้อมูลมาจากไฟล์สกุล .rvt หรือไฟล์แบบจำลองอาคารที่ต้องการคำนวณ สกุลที่สองคือ .dyf ซึ่งเป็นการสร้างขึ้นมาในรูปแบบของ Custom Node เพื่อให้หน้าตาในการใช้โปรแกรมสะอาดและไม่รกจนเกินไปโดยได้รวบรวมออกมาเป็น package ชื่อ Circadian Lighting โดยสามารถสรุปออกมาได้ดังตาราง 4

ตาราง 4 เครื่องมือที่ได้จากการพัฒนา

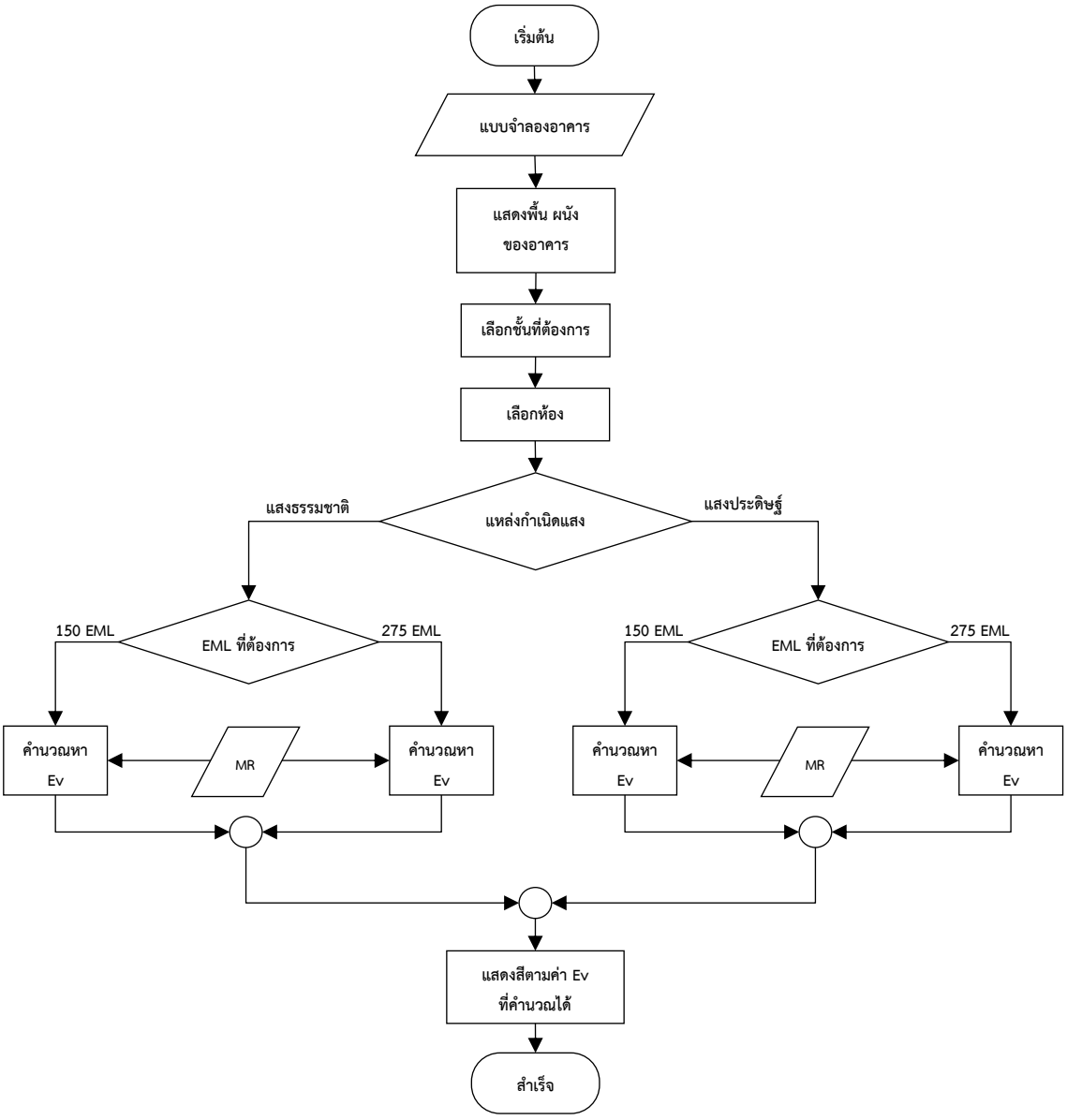
ชื่อไฟล์	คำอธิบาย
Dynamo Workspace	
Sample_CircadianLighting	ไฟล์ตัวอย่างสำหรับเริ่มต้นการทำงาน
Dynamo Custom Node	
00_Create_geometry	แสดงภาพรวม พื้น ผนัง ของอาคาร
01_Select_room	เลือกพื้นที่ที่ต้องการคำนวณ โดยการใส่ข้อมูลชั้นและห้องที่ต้องการ
02_Create_roomperimeter	สร้างเส้นกรอบรอบพื้นที่ห้องที่ต้องการคำนวณ
03_Create_point	สร้างจุดที่จะใช้ในการแสดงสี ซึ่งความละเอียดของจุดจะเป็นไปตามขนาดของพื้นที่ห้อง
04_Create_grid	สร้างเส้นกริดตารางขนาด 1 x 1 เมตร เพื่อให้มองเห็นตำแหน่งระยะในการคำนวณ
10_Calculation_Ev_150EML	คำนวณค่าความส่องสว่างสำหรับ 150 EML
10_Calculation_Ev_275EML	คำนวณค่าความส่องสว่างสำหรับ 275 EML
11_Result_Color	แสดงค่าสีความส่องสว่าง



ภาพ 6 Workspace ในการทำงาน



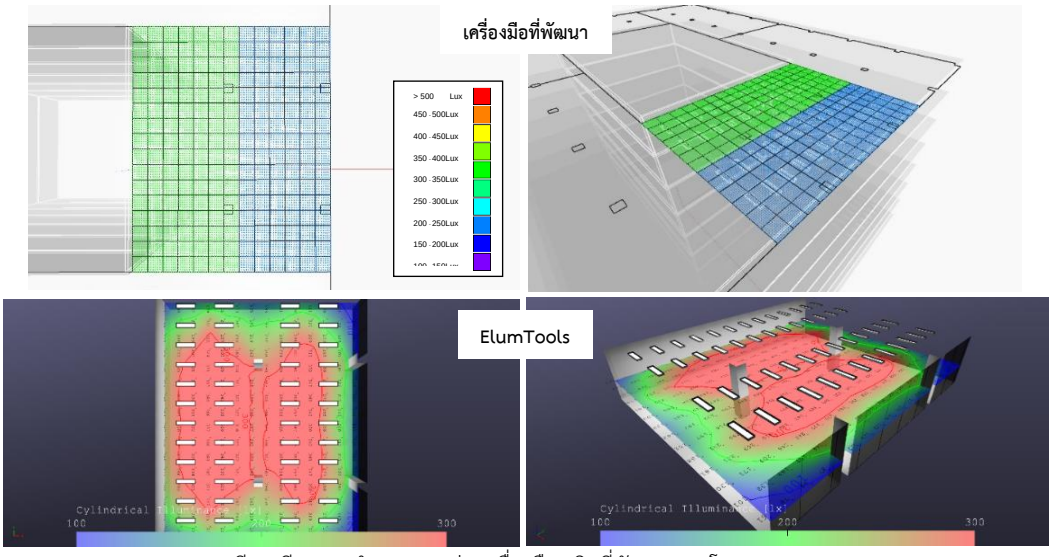
ภาพ 7 การแสดงผลของเครื่องมือที่พัฒนาผ่าน Dynamo



ภาพ 8 ผังลำดับขั้นตอนการทำงานของเครื่องมือ

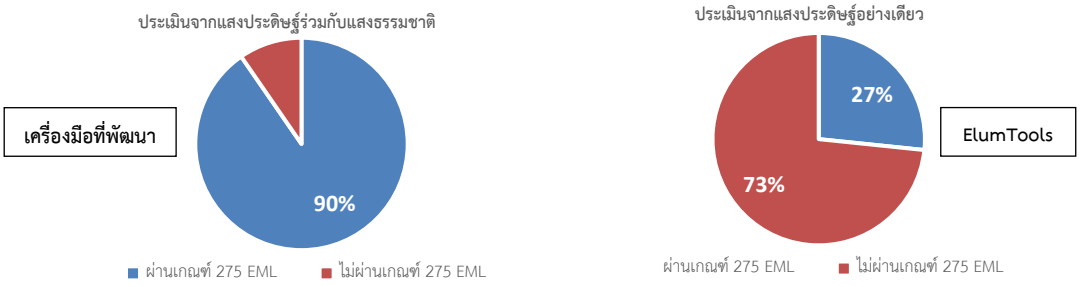
3. การตรวจสอบความถูกต้องและการนำเครื่องมือเสริมที่ได้พัฒนาขึ้นไปใช้

หลังจากได้นำแบบจำลองอาคารสำนักงานมาทดลองคำนวณหาค่าความส่องสว่างผ่านเครื่องมือที่ได้พัฒนาขึ้นแล้ว เมื่อทราบค่า Ev จึงทำการเลือกใช้แสงประดิษฐ์ที่มีค่า CCT ตรงกับที่ได้เลือกไว้ในเครื่องมือเสริมมาติดตั้งลงในแบบจำลองและใช้เครื่องมือเสริม ElumTools ผ่านโปรแกรม Revit ในการคำนวณหาค่าความส่องสว่างเฉลี่ยในแนวดิ่งให้มีค่าใกล้เคียงกับที่เครื่องมือเสริมคำนวณได้ เพื่อนำไปคำนวณหาค่า EML ต่อด้วยโปรแกรม Microsoft Excel จากนั้นจึงนำผลลัพธ์ที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกัน ซึ่งพบว่าเครื่องมือที่ได้พัฒนาขึ้นมานั้นสามารถประเมินค่า EML ได้ในระดับเบื้องต้น เพื่อให้ทราบถึงช่วงได้คะแนนที่จะได้ในหัวข้อนี้ว่าเป็น 1 คะแนน สำหรับ 150 EML–274 EML หรือ 3 คะแนน สำหรับ 275 EML ขึ้นไป เมื่อเทียบกับค่าที่คำนวณได้จาก Microsoft Excel พบว่ารูปแบบการกระจายของดวงโคมที่แตกต่างกัน ทำให้ค่าความส่องสว่างแนวดิ่งบางตำแหน่งสูงว่าค่าที่เครื่องมือเสริมที่ได้พัฒนาขึ้นแนะนำส่งผลให้ค่า EML ในจุดนั้น ๆ มีค่าสูงกว่าที่ต้องการทำให้สามารถได้คะแนนในหัวข้อ Circadian Lighting ตามเกณฑ์ WELL สูงขึ้นตามไปด้วยในบางจุด



ภาพ 9 เปรียบเทียบการคำนวณระหว่างเครื่องมือเสริมที่พัฒนา และโปรแกรม ElumTools

จากการเลือกใช้ดวงโคม LED ที่มีค่า CCT อยู่ที่ 4500K ซึ่งได้ตั้งค่า EML ที่ต้องการไว้ที่ 275 EML โดยทำการประเมินทั้งหมด 208 จุดในพื้นที่ใช้งาน พบว่าหากคำนวณเพียงแค่แสงประดิษฐ์ จะมีตำแหน่งที่ผ่านเกณฑ์เพียง 57 ตำแหน่งเท่านั้น แต่เมื่อเทียบกับเครื่องมือที่ได้พัฒนานั้นที่มีการคำนวณแสงธรรมชาติร่วมด้วยทำให้ผ่านเกณฑ์ถึง 188 ตำแหน่ง



ภาพ 10 แผนภูมิแสดงความแตกต่างในการคำนวณแสงธรรมชาติร่วมด้วย

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ตามเกณฑ์การประเมินอาคาร WELL ได้ระบุการคำนวณหาค่า EML จากแสงประดิษฐ์เท่านั้นเนื่องจากเป็นการลดทอนขั้นตอนให้ง่ายขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วอาคารสำนักงานนั้นมีใช้งานในเวลากลางวันเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ได้รับแสงธรรมชาติในปริมาณที่เพียงพอต่อนาฬิกาชีวภาพหากนำมาประเมินร่วมกับแสงประดิษฐ์ที่ใช้ในพื้นที่ใช้งานจะทำให้ได้ผลลัพธ์ตรงตามการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น ซึ่งในปัจจุบันการคำนวณหาค่า EML นั้นสามารถทำได้เพียงจากแสงประดิษฐ์เท่านั้น ซึ่งมีขั้นตอนที่จำเป็นต้องใช้หลายโปรแกรมในการคำนวณและไม่สามารถผูกข้อมูลกับแบบจำลองอาคารได้ การพัฒนาเครื่องมือเสริมบนแบบจำลองสารสนเทศอาคารโดยใช้โปรแกรม Revit ร่วมกับเครื่องมือเสริม Dynamo จึงเป็นทางเลือกสำหรับผู้ออกแบบในการคำนวณสำหรับการออกแบบร่างขั้นต้น เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้แสงประดิษฐ์ภายในอาคาร โดยยังคำนึงถึงพื้นที่ที่ได้รับแสงธรรมชาติอยู่ด้วย เพื่อไม่ให้เป็นการใช้แสงประดิษฐ์เกินความจำเป็น

ทั้งนี้ เครื่องมือที่ได้พัฒนาขึ้นมานั้นอาจมีความซับซ้อน ซึ่งเหมาะสมกับผู้ใช้งานที่มีความรู้พื้นฐานในการทำงานผ่านโปรแกรม Dynamo ในอนาคตหากสามารถพัฒนาและปรับปรุงเครื่องมือให้สามารถคำนวณผ่านการคลิกเพียงแค่ครั้งเดียวได้

จะช่วยประหยัดเวลาและลดความสับสนในการทำงานของเครื่องมือได้ รวมถึงการแสดงผลอาจทำให้มีความสอดคล้องกับโปรแกรมเสริมอื่น ๆ เช่น การใช้สีที่แสดงถึงค่าความส่องสว่างให้ตรงกัน และค่าหรือหน่วยที่ใช้ในการคำนวณ เป็นต้น

บรรณานุกรม

จิณห์วรา อรัณย์ชนายุธ และอวิรุทธ์ ศรีสุธาพรรณ. (2562). แนวทางการใช้แสงธรรมชาติให้เหมาะสมกับนาฬิกาชีวิต สำหรับอาคารสำนักงาน. *10th Built Environment Research Associates Conference, BERAC2019, 10*(25), 52-59.

จิณห์วรา อรัณย์ชนายุธ และอวิรุทธ์ ศรีสุธาพรรณ. (2564). แนวทางการใช้เกณฑ์การประเมินแสงธรรมชาติที่มีผลต่อนาฬิกาชีวิตในประเทศไทย. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies JARS, 18*(1), 115-130.

ปวริศร์ คำมุลตรี และวรภัทร์ อิงคโรจน์ฤทธิ์. (2563). การพัฒนาโปรแกรมเสริมบนแบบจำลองสารสนเทศอาคาร เพื่อช่วยในการประเมินประสิทธิภาพการใช้พื้นที่อาคารเรียนในมหาวิทยาลัย. *วารสารสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้างวินิจฉัย คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 10*(1), 99-118.

ภัทรพล วัชรเมธากุล และอรรจน์ เศรษฐบุตร. (2563). การพัฒนาเครื่องมือเสริมบนแบบจำลองสารสนเทศอาคารเพื่อการคำนวณปริมาณน้ำฝนไหลหลากในขั้นตอนการออกแบบขั้นต้น. *สาระศาสตร์, 3*(4), 881-894.

ศรุดา จิรัฐกุลธนา. (2563). แสงสว่างและพฤติกรรมของมนุษย์. *PSRU Journal of Science and Technology, 5*(1), 13-22.

สมาคมสถาปนิกสยาม ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2558). *คู่มือปฏิบัติวิชาชีพ แนวทางการใช้งานแบบจำลองสารสนเทศอาคารสำหรับประเทศไทย (Thailand BIM Guideline)*.

อรพินทร์ เชียงปิ๋ว. (2555). นาฬิกาชีวภาพกับการนอนหลับ. *วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี), 4*(7), 145-155.

อวิรุทธ์ ศรีสุธาพรรณ. (2563). แนวทางและการประยุกต์ใช้ตัวชี้วัดแสงธรรมชาติสำหรับอาคารในประเทศไทย. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies (JARS), 17*(1), 103-120.

อวิรุทธ์ ศรีสุธาพรรณ. (2565). การศึกษาการออกแบบร่วมกันระหว่างการวิเคราะห์แสงธรรมชาติแบบรายปีตามสภาพภูมิอากาศและการออกแบบแสงเพื่อนาฬิกาชีวภาพ. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies (JARS), 19*(1), 21-40.

Acosta, I., Campano, M. A., Molina, J., & Fernández-Aguera, J. (2019). Analysis of visual comfort and circadian stimulus provided by window design in educational space. *International Journal of Engineering and Technology, 11*(2), 105-110.

Borisuit, A. (2013). *The impact of light including non-image forming effects on visual comfort* [Unpublished doctoral dissertation]. École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).

Figueiro, M. G., Gonzales, K., & PedLer, D. (2016). Designing with circadian stimulus. *Ld+ a*, 8, 30-34.

Hagen, E., & Richardson, H. (2016). *Circadian daylight in practice, determining a simulation method for the design process.* In Douglas Noble, Karen Kensek, & Shreya Das (Eds.), Facade tectonics: Vol. 2. World Congress Los Angeles 2016 Conference Proceedings (pp. 51-57). Tectonic Press.

Hengrasmee, N. (2019). *Circadian lighting design criteria for health and well-being in Thai built environment* [Unpublished doctoral dissertation]. Naresuan University.

International WELL Building Institute. (2022). *The WELL building standard version 2. https://standard.wellcertified.com/v7/tables*

Littlefair, P., & Ticleanu, C. (2019). *Lighting for circadian rhythms.* BRE Trust.

Lucas, R. J., Peirson, S. N., Berson, D. M., Brown, T. M., Cooper, H. M., Czeisler, C. A., Figueiro, M. G., Gamlin, P. D., Lockley, S. W., & O'Hagan, J. B. (2014). Measuring and using light in the melanopsin age. *Trends in neurosciences, 37*(1), 1-9.

Sahebghalam, S. (2021). *Assessment of the circadian stimulus potential in a daylit classroom: A simulation-based evaluation of key factor to enhance daylight-driven circadian lighting* [Unpublished doctoral dissertation]. Kent State University.

Sánchez-Cano, A., & Aporta, J. (2020). Optimization of lighting projects including photopic and circadian criteria: A simplified action protocol. *Applied Sciences, 10*(22), 8068.

Zielinska-Dabkowska, K., & Xavia, K. (2018). An overview of the cognitive and biological effects of city nighttime illumination including a London case study. *Conscious Cities Anthology 2018: Human-Centred Design, Science, and Technology*, 1-9.