

ระบบส่องสว่างอัจฉริยะสำหรับการเลียนแบบแสงในรอบวันและแสงจ้า



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A SMART LIGHTING SYSTEM FOR CIRCADIAN MIMICKING LIGHTING AND BRIGHT LIGHT



A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ระบบส่องสว่างอัจฉริยะสำหรับการเลียนแบบแสงในรอบวัน
และแสงจ้า

โดย

นายสมยศ สันติมาลัย

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชัสอนันต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชวาลย์ เจริญบุตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชัสอนันต์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญดา เกตุเมฆ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศนีย์)

..... กรรมการ
(ดร.พิสิษฐ์พล จิรพวงศานานุรักษ์)

สมยศ สันติมาลัย : ระบบส่องสว่างอัจฉริยะสำหรับการเลียนแบบแสงในรอบวันและแสงจ้า . (A SMART LIGHTING SYSTEM FOR CIRCADIAN MIMICKING LIGHTING AND BRIGHT LIGHT) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์

ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านแสงประดิษฐ์ได้รับการพัฒนามากขึ้นให้เหมาะสมต่อการใช้ชีวิตของมนุษย์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะพัฒนาระบบส่องสว่างอัจฉริยะสำหรับการเลียนแบบแสงในรอบวันและแสงจ้า โดยผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้ การศึกษาลักษณะการกระจายพลังงานของสเปกตรัม (SPD) แสงในรอบวัน ณ อำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดมหาสารคาม แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิสัมพัทธ์ของสี (CCT) และค่าความเข้มของแสงแตกต่างกันในฤดูร้อนและฤดูหนาวเนื่องจากปัจจัยหลักเกี่ยวกับระยะห่างและองศาในการได้รับแสงจากดวงอาทิตย์ ระบบส่องสว่างถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม RGB-Input software สำหรับคัดเลือกหลอด RGB-LED 2 แบบ ได้แก่ LED-A และ LED-B ซึ่งให้ CCT ในช่วง 3,500 – 10,000 เคลวิน และกำหนดค่าพิกัด $x - y$ บนแผนภาพสี (Chromaticity diagram) ของทั้งสองฤดู โดยพิจารณาจากค่าทางเรติโอเมทรี โฟโตเมตรี และค่าความผิดพลาดของ CCT ผลการวิเคราะห์พบว่า LED-A มีประสิทธิภาพในการควบคุมการให้แสงตามกำหนดที่ดีกว่า LED-B การพัฒนาระบบส่องสว่างอัจฉริยะเพื่อเลียนแบบแสงในรอบวันโดยใช้หลอด LED-A และหลอด white-LED สามารถปรับปรุงการให้สีของแสงที่มีพิกัด $x - y$ ของแสงใกล้เคียงกับแสงในรอบวันมากขึ้น โดยมีความสว่างสูงสุดที่ 339 ลักซ์ ค่า CS สูงสุดที่ 0.40 ซึ่งจะเป็แสงที่เลียนแบบแสงในช่วงบ่ายของทั้งสองฤดู จากผลการทดลองยังพบว่าในระดับความสว่างที่เท่ากัน แสงที่มีองค์ประกอบของคลื่นแสงสีน้ำเงินสูงกว่าจะให้การกระตุ้นที่สูงกว่าอย่างชัดเจน จากการทดสอบโดยใช้ผู้เข้าร่วมการวิจัย จำนวน 32 คน พบว่า ค่าคะแนนเฉลี่ยด้านความพึงพอใจ การออกแบบรูปลักษณ์ที่ทันสมัย และความสะดวกในการใช้งานของระบบไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะมีค่าคะแนนมากกว่าโคมไฟทางการค้า

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6271021221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Smart lighting Circadian lighting Lighting technology LED lighting system

Somyod Santimalai : A SMART LIGHTING SYSTEM FOR CIRCADIAN MIMICKING LIGHTING AND BRIGHT LIGHT. Advisor: Assoc. Prof. Dr. THAVATCHAI TAYJASANANT

Nowadays, lighting technology has been drastically developed to be optimized for human lifestyles. Therefore, this study aimed to develop a smart circadian-mimicking lighting system (SLS) and bright light. The research was summarized as follows. Studies from daily spectral distribution at Kosum Phisai, Maha Sarakham, Thailand showed that correlated color temperature (CCT) spectra and irradiance during daylight hours in summer and winter were different due to solar spatial and angle effects. A lighting system was developed using RGB-input software for selecting 2 types of LED lamps, LED-A and LED-B with CCT between 3,500 – 10,000 K and setting x-y coordinates on chromaticity diagram of two seasons by considering values in radiometry, photometry and CCT errors. Results showed that LED-A had higher efficiency in specified lighting control than LED-B. Developing of a smart circadian-mimicking lighting system using LED-A and white-LED can improve light color with x-y coordinates closer to circadian light with maximum illuminance at 339 lux and maximum CS at 0.40, which is circadian light in the afternoon of two seasons. At the same illuminance, the light with higher blue content could clearly give human activation. From test of 32 participants, it was found that average satisfaction scores, modern design and easiness to use of SLS are higher than those of commercial lighting system.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นและสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์อย่างสูง จากรองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ตลอดจนให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย และให้กำลังใจด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ตลอดระยะเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชวาลย์ เจริญบุตร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญดา เกตุเมฆ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศนีย์ และ ดร.พิสิษฐ์พล จีรพงศานานุรักษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำในการพัฒนางานวิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว รวมถึงบุคคลอันเป็นที่รักทุกท่านที่ให้การสนับสนุน ให้คำปรึกษา ให้กำลังใจที่เปี่ยมล้นตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สมยศ สันติมาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
นำ.....	17
บทที่ 1 บทนำ.....	17
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	17
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	24
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	25
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัยนี้.....	25
1.5 คำนิยามและศัพท์เทคนิค.....	25
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	27
2.1 โฟโตเมตรีและแสงในรอบวัน.....	27
2.1.1 ผลของแสงในรอบวันต่อมนุษย์.....	28
2.1.2 โฟโตเมตรีกับการรับรู้แสงของมนุษย์.....	31
2.1.2.1 ฟังก์ชันประสิทธิภาพส่องสว่างแบบโฟโตปิก.....	35
2.1.2.2 ฟังก์ชันประสิทธิภาพส่องสว่างของแสงในรอบวัน.....	36
2.1.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสมบัติแสงแบบโฟโตเมตริก.....	38
2.1.3.1 พิกัดบนแผนภาพสี.....	39

2.1.3.2	ประสิทธิภาพส่องสว่างของการแผ่รังสี.....	40
2.1.3.3	ประสิทธิภาพความสว่าง.....	41
2.1.3.4	อัตราส่วนของ S/P	41
2.1.4	ปัจจัยของแสงที่ส่งผลต่อการตอบสนองที่ไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็น	41
2.1.4.1	การแผ่รังสีของประสิทธิภาพแสงในรอบวัน	44
2.1.4.2	ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของแสงในรอบวัน	45
2.1.4.3	ดัชนีบ่งชี้การกตเมลาโทนิน.....	46
2.1.4.4	ค่ากระตุ้นของแสงในรอบวันทางชีวภาพ.....	47
2.1.4.5	ค่าการกระตุ้นแสงในรอบวัน.....	48
2.2	ค่าดัชนีบ่งชี้ความถูกต้องของสี	49
2.3	ดัชนีบ่งชี้คุณภาพสี	52
2.4	ระบบควบคุมแสงสว่างอัจฉริยะ	54
2.4.1	ระบบควบคุมแสงสว่าง	54
2.4.2	ระบบควบคุมแสงอัจฉริยะ	55
2.4.2.1	ซอฟต์แวร์สำหรับการจำลองแสงกลางวัน	56
2.4.3	การสร้างแบบจำลองสำหรับแสงในรอบวัน	59
2.4.3.1	การประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ	60
2.4.3.2	ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino	61
2.4.3.3	อุปกรณ์ควบคุมการทำงานผ่าน App สมาร์ทโฟน.....	63
2.4.3.4	แอปพลิเคชัน App inventor.....	64
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	65
2.6	สรุปช่องว่างงานวิจัย	68
บทที่ 3	ระเบียบวิธีวิจัย.....	69
3.1	การออกแบบและการดำเนินงานวิจัย	69

ตอนที่ 1 การศึกษาสมบัติทางสเปกโตรเมตริก (Spectrometric) ของแสงในรอบวัน	69
ตอนที่ 2 การสร้างและการติดตั้งระบบส่องสว่าง	70
(2.1) การสร้างและการติดตั้งระบบส่องสว่าง.....	70
(2.2) หลักการติดตั้งระบบควบคุม RGB-LED	70
(2.3) การทดสอบประสิทธิภาพในการให้แสงของหลอด RGB-LEDs	71
ตอนที่ 3 การออกแบบระบบควบคุม RGB-LED เพื่อผลิตแสงเลียนแบบแสงในรอบวัน	73
(3.1) การสร้างและการติดตั้งระบบการส่องสว่าง	73
(3.2) การทดสอบประสิทธิภาพในการผลิตแสงของหลอด LED	73
ตอนที่ 4 การพัฒนาระบบอัจฉริยะในการให้แสงในรอบวัน.....	75
(4.1) การออกแบบระบบให้แสงในรอบวัน.....	75
(4.2) รูปแบบการทำงาน (Algorithm) ของระบบอัจฉริยะในการให้แสงในรอบวัน....	78
(4.3) การทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานระบบอัจฉริยะในการให้แสงในรอบวัน	81
3.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ	89
3.3 การพิทักษ์สิทธิ์ในจริยธรรมวิจัยในคน	89
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	91
ตอนที่ 1 การศึกษาสมบัติทางสเปกโตรเมตริก (Spectrometric) ของแสงในรอบวัน	91
(1.1) การกระจายพลังงานสเปกตรัม (SPD).....	91
(1.2) พิกัดบนแผนภาพสี	94
ตอนที่ 2 การคัดเลือกหลอดแอลอีดีสำหรับการออกแบบแสงประดิษฐ์เลียนแบบแสงในรอบวัน..	98
(2.1) การออกแบบระบบส่องสว่างและการประเมิน	98
(2.2) ประสิทธิภาพการส่องสว่างของหลอดประดิษฐ์	100
ตอนที่ 3 การประเมินคุณภาพการส่องสว่างของแสง RGB-LED ในการเลียนแบบแสงในรอบวัน	112

(3.1) หลักการออกแบบและการประเมินคุณภาพการให้แสงเลียนแบบแสงในรอบวันของหลอดประดิษฐ์.....	112
(3.2) ผลการวิเคราะห์คุณภาพแสงเลียนแบบแสงในรอบวัน.....	112
ตอนที่ 4 การพัฒนาระบบอัจฉริยะในการให้แสงในรอบวัน.....	116
(4.1) การออกแบบระบบให้แสงในรอบวัน.....	116
(4.2) การทำงานของระบบการส่องสว่างอัจฉริยะ.....	118
(4.3) รูปแบบการทำงาน (Algorithm) ของระบบอัจฉริยะในการให้แสงในรอบวัน.....	119
(4.4) การทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานของระบบอัจฉริยะในการให้แสงในรอบวัน....	122
(4.4.1) สมบัติของแสงในรอบวัน (photometry and radiometry).....	122
(4.4.2) การทดสอบความพึงพอใจในการนำไปใช้ของระบบส่องสว่างอัจฉริยะ...	133
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	148
ตอนที่ 1 การศึกษาสมบัติทางสเปกโตรเมตริก (Spectrometric) ของแสงในรอบวัน.....	148
ตอนที่ 2 การพัฒนาระบบส่องสว่างและการคัดเลือกหลอด LED.....	148
ตอนที่ 3 การประเมินคุณภาพการส่องสว่างของแสง RGB-LED ในการเลียนแบบแสงในรอบวัน.....	149
ตอนที่ 4 การพัฒนาระบบอัจฉริยะในการให้แสงในรอบวัน.....	149
บรรณานุกรม.....	153
ภาคผนวก ก.....	165
ภาคผนวก ข.....	167
ภาคผนวก ค.....	169
ภาคผนวก ง.....	173
ประวัติผู้เขียน.....	224



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 หน่วยโฟโตเมตริกทั่วไปที่ใช้	34
ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับผลของแสงที่มีต่อการตอบสนองที่ไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็น	42
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติบางประการของ Arduino nano v.3.....	62
ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างค่าเป้าหมายในการออกแบบการควบคุมการผลิตแสง	65
ตารางที่ 3.1 ค่ารหัส RGB LED ในการทดสอบประสิทธิภาพของหลอด.....	72
ตารางที่ 3.2 ค่ารหัส RGB LED ในการทดสอบประสิทธิภาพของหลอด.....	74
ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ LED-A และ LED-B ในการเลียนแบบแสงในรอบวัน..	75
ตารางที่ 3.4 รหัสของแสงสีตาม CCT ของแสงในรอบวันในการสร้างระบบส่องแสงสว่างอัจฉริยะ ...	80
ตารางที่ 3.5 กำหนดการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของโคมไฟแสงประดิษฐ์	87
ตารางที่ 4.1 ลักษณะและสมบัติเฉพาะของตัวอย่างหลอดแอลอีดีที่ใช้ในการศึกษา	99
ตารางที่ 4.2 สมบัติทางเรติโอเมตริกและโฟโตเมตริกของ LED-A LED-B และ c-LED.....	110
ตารางที่ 4.3 สมบัติทางเรติโอเมตริกและโฟโตเมตริกของแสงอาทิตย์ในฤดูร้อนและฤดูหนาว	111
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการให้แสงสว่างของแสงประดิษฐ์เลียนแบบแสงในรอบวันของ LED-A และ LED-B เมื่อเทียบกับค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้	114
ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ที่แสดงถึงสมบัติของตัวอย่างแสงจากโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะและโคมไฟทางการค้า	125
ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ที่แสดงถึงสมบัติของตัวอย่างแสงจากโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะและโคมไฟทางการค้า	127
ตารางที่ 4.7 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับผู้เข้าร่วมการวิจัย (n = 32).....	133
ตารางที่ 4.8 ระดับความพึงพอใจของผู้เข้าร่วมการวิจัย (n = 32) ที่มีต่อประสิทธิภาพของแสงที่ใช้ในการสร้างระบบส่องสว่างอัจฉริยะและแสงทางการค้า	143

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความพึงพอใจของผู้เข้าร่วมการวิจัย (n = 32) ที่มีต่อประสิทธิภาพของแสงที่ใช้ในการสร้างระบบส่องสว่างอัจฉริยะและแสงทางการค้า โดยใช้การวิเคราะห์ repeated ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น $P < 0.05$ 145



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 ผลของแสงต่อกิจวัตรประจำวันของมนุษย์	30
ภาพที่ 2.2 วัฏจักรฮอริโมนในรอบวัน	31
ภาพที่ 2.3 การกระจายพลังงานของสเปกตรัมของแสงธรรมชาติตั้งแต่ 5,000 – 7,500 เคลวิน	32
ภาพที่ 2.4 โฟโตปิก ($V(\lambda)$) แสงในรอบวัน ($C(\lambda)$) ฟังก์ชันประสิทธิภาพการส่องสว่างและการกระจายพลังงานของสเปกตรัมของแสง	32
ภาพที่ 2.5 โฟโตปิกและประสิทธิภาพส่องสว่างของแสงในรอบวัน	34
ภาพที่ 2.6 ความไวสัมพันธ์ของฟังก์ชันประสิทธิภาพส่องสว่างแบบโฟโตปิกและแสงในรอบวัน	35
ภาพที่ 2.7 ฟังก์ชันประสิทธิภาพการส่องสว่างแบบโฟโตปิกและเซลล์รูปกรวยทั้งสามแบบ	35
ภาพที่ 2.8 ฟังก์ชันประสิทธิภาพที่แตกต่างกันของแสงในรอบวัน	36
ภาพที่ 2.9 ฟังก์ชัน “Gall” (ซ้าย) และฟังก์ชัน “Rea” (ขวา)	37
ภาพที่ 2.10 สเปกตรัมจากฟังก์ชันของแสงแบบสี่เดี่ยวและแบบหลายสี	37
ภาพที่ 2.11 ฟังก์ชันความไวของดวงตาที่สอดคล้องกันสำหรับแสงสว่างโตปิกและเมลาโนปิก	39
ภาพที่ 2.12 ไดอะแกรมพิกัดบนแผนภาพสีระบบ CIE	40
ภาพที่ 2.13 ความไวแสงของตามนุษย์	50
ภาพที่ 2.14 แผนภาพระบบควบคุมแสงสว่างอัจฉริยะ	55
ภาพที่ 2.15 สัมประสิทธิ์ของแสงกลางวัน	57
ภาพที่ 2.16 การเบี่ยงเบนของลำแสง A และลำแสง B	57
ภาพที่ 2.17 ความเชื่อมโยงระหว่างซอฟต์แวร์และการจำลอง	58
ภาพที่ 2.18 ช่วงขององค์ประกอบแสง RGB	59
ภาพที่ 2.19 ภาพรวมของระบบประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ	61
ภาพที่ 2.20 โครงสร้างของบอร์ด Arduino Nano	62

ภาพที่ 2.21 โครงสร้างของบอร์ด Node MCU ESPF266.....	63
ภาพที่ 2.22 แอปพลิเคชัน App inventor.....	64
ภาพที่ 3.1 พื้นที่ระนาบสถานที่ศึกษาวิจัยแสงในเขตร้อน อำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดมหาสารคาม.....	70
ภาพที่ 3.2 แผนผังการทำงานของระบบการควบคุมการส่องสว่าง RGB-LEDs (A) การติดตั้งระบบการวัดสำหรับ RGB-LEDs และ (B) ระบบควบคุมการผลิตแสงผ่านซอฟต์แวร์ RGB LED Input....	71
ภาพที่ 3.3 กระบวนการศึกษาประสิทธิภาพของหลอด LED.....	73
ภาพที่ 3.4 วงจรควบคุมการทำงานของหลอด การป้อนรหัสสี และการกำหนดความสว่างของแสง .	76
ภาพที่ 3.5 ไดอะแกรมระบบควบคุมการส่องสว่างอัจฉริยะ	77
ภาพที่ 3.6 ระบบควบคุมการส่องสว่างอัจฉริยะ (ฮาร์ดแวร์).....	77
ภาพที่ 3.7 โคมไพแสงประดิษฐ์และโครงสร้าง.....	78
ภาพที่ 3.8 รูปแบบการให้แสงจ้าและเลียนแบบแสงในรอบวันของฤดูร้อนและฤดูหนาว	79
ภาพที่ 3.9 การวางตำแหน่งระบบอัจฉริยะในการให้แสงในรอบวันและการตรวจวัดแสง	81
ภาพที่ 3.10 การทดสอบความพึงพอใจการนำไปใช้ของระบบส่องแสงสว่างเลียนแบบแสงในรอบวัน	84
ภาพที่ 3.11 กระบวนการทดสอบตัวอย่างแสงแต่ละตัวอย่าง.....	88
ภาพที่ 4.1 ความเข้มของแสงในรอบวัน ในฤดูร้อน (A และ C) และฤดูหนาว (B และ D) ณ ตำบลหัวขวาง อำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดมหาสารคาม ในช่วงเวลาเช้า (A และ B) และช่วงบ่าย (C และ D)	93
ภาพที่ 4.2 ความไวต่อสเปกตรัมของตัวรับแสงของมนุษย์ในการตอบสนองแบบโฟโตปิก สโคโทปิก และการตอบสนองต่อการกดเมลาโทนิน (melatonin suppression) โดยเมื่อเทียบกับเส้นโค้งการกระจายพลังงานสเปกตรัมของแสงในฤดูร้อน (---) และฤดูหนาว (----) ของแสงในรอบวันของประเทศไทย	94
ภาพที่ 4.3 พิกัดแผนภาพสี บนระบบพิกัด x และ y ของแสงอาทิตย์ในรอบวันของฤดูร้อน (●) และฤดูหนาว (▲).....	95
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง CCT ที่เปลี่ยนแปลงการกระจายเชิงมุมของแสงอาทิตย์ในวันที่ท้องฟ้าโปร่งของฤดูร้อน (●) และฤดูหนาว (◆).....	97

ภาพที่ 4.5 กระบวนการติดตั้งระบบการเก็บข้อมูลตัวอย่างแสงในการตรวจวัดและการประเมินคุณภาพแสง	100
ภาพที่ 4.6 ลักษณะการกระจายพลังงานกำลังของสเปกตรัมแสงของ LED-A และ LED-B ในลักษณะของแสงที่เป็นคลื่นไวท์ (เส้นสีน้ำเงิน: A และ C) และแสงที่เป็นวอร์มไวท์(เส้นที่ส้ม: B และ D) โดยเปรียบเทียบกับโคมไฟทางการค้า (c-LED)	102
ภาพที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ MacAdam ellipses ของการเบี่ยงเบนของแสงจาก LED-A (A) และ LED-B (B) โดยเทียบระยะจากแสงมาตรฐาน D65	103
ภาพที่ 4.8 องค์ประกอบคุณภาพแสงที่อธิบายถึงสมบัติของแสง: (A) ประสิทธิภาพการส่องสว่างของการแผ่รังสี (luminous efficacy of radiation, LER); (B) ประสิทธิภาพการส่องสว่าง (luminous efficiency, LE); (C) ประสิทธิภาพการส่องสว่างในทางชีวภาพ (circadian efficacy of radiation, CER); (D) ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของแสงในรอบวัน (circadian action factors, CAF); (E) ดัชนีการกดเมลาโทนิ (the melatonin suppression index, MSI) และ (F) อัตราส่วนของ S/P ของตัวอย่างหลอด LED-A (- - -), the LED-B (—), c-LED (*), และแสงอาทิตย์ (o) ณ CCT ต่าง ๆ	105
ภาพที่ 4.9 ค่าการกระตุ้นการรับรู้แสงรอบวัน (Circadian Stimulus, CS) กับความสัมพันธ์เชิงลอการิทึมของความเข้มของแสงในลักษณะ (A-D) และความเข้มของแสงทางชีวภาพในรอบวัน (Circadian light, CL _A)(E-H).....	108
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง CCT กับ CL _A ของ LED-A (A) LED-B (B) และแสงกลางวัน (C) ที่ 30 ลักซ์ (○) และ 300 ลักซ์ (●).....	109
ภาพที่ 4.11 ไดอะแกรมพิกัดแผนภาพสีของแสงที่ได้จากการเลียนแบบแสงในรอบวันของ (A) ฤดูร้อน (เดือนพฤษภาคม) และฤดูหนาว (เดือนพฤศจิกายน) ของประเทศไทย โดยเปรียบเทียบระหว่างแสงอาทิตย์ (▲) LED-A (◆) LED-B (●).....	113
ภาพที่ 4.12 ลักษณะของแสงที่ปรากฏที่ได้จากการจำลองของแสงประดิษฐ์เลียนแบบแสงในรอบวันของฤดูร้อนและฤดูหนาว	115
ภาพที่ 4.13 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงค่า CCT ของแสงในรอบวันของฤดูร้อน (A) และฤดูหนาว (B) และการนำไปใช้ในการกำหนดค่า CCT ในการเลียนแบบแสงในรอบวันของ LED-A และ LED-B	116

ภาพที่ 4.14 ส่วนประกอบและรูปลักษณะของโคมไฟแสงประดิษฐ์ (ภายใน) (A) RGB-LED (B) White-LED 6,500 เคลวิน (C) Bright light LED 6,500 เคลวิน และ (D) ภาพถ่ายโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะขณะทำงาน..... 117

ภาพที่ 4.15 โคมไฟแสงประดิษฐ์และโครงสร้าง..... 118

ภาพที่ 4.16 รูปแบบการให้แสงเลียนแบบแสงในรอบวันและแสงจ้าของฤดูร้อนและฤดูหนาว โดยเส้นสีแดงแสดงค่า CS ที่โคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะทำได้..... 120

ภาพที่ 4.17 การกระจายตัวของสเปกตรัมแสงตัวอย่างจากโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะสำหรับการเลียนแบบแสงในรอบวันของฤดูร้อน (A1 – A13) แสงในช่วงค่ำ (B) แสงจันทร์ (C) การเลียนแบบแสงในรอบวันของฤดูหนาว (D1 – D13) แสงจ้า E(D65) แสงจากโคมไฟทางการค้า (F – G) และ แสงจากหลอด RGB ที่ใช้ในการออกแบบแสงเลียนแบบแสงในรอบวัน 121

ภาพที่ 4.18 ไดอะแกรมพิกัดบนแผนภาพสี (พิกัด x และ y) เมื่อเปรียบเทียบกับแสงที่ได้จากโคมไฟแสงประดิษฐ์ LED-A (●) และ White LED + RGB LED (●) ของแสงในรอบวัน (●) ในฤดูร้อน (A) และฤดูหนาว (B) 128

ภาพที่ 4.19 ค่าการตอบสนองต่อการกระตุ้นของแสงในรอบวัน (CS) ตามระดับความสว่างของแสงที่ได้จากการทำงานของโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะในการเลียนแบบแสงในรอบวันของฤดูร้อน (A1 – A13) ฤดูหนาว (D1 – D13) แสงในตอนค่ำและแสงจันทร์ (B) แสงจ้า (C) โดยเปรียบเทียบกับโคมไฟทางการค้า (F – G) และแสงสีแดง (R) เขียว (G) และน้ำเงิน (B) 131

ภาพที่ 4.20 ค่าการตอบสนองของแสงตัวอย่างจากโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะและโคมไฟทางการค้าที่มีต่อ Cyanopic S-cone, Melanopic Sensitivity, Rhodopic Rod Cells, Chloropic M Cones และ Erythopic L Cones..... 132

ภาพที่ 4.21 กิจกรรมการอบรมเกี่ยวกับการใช้โคมไฟและการสาธิตการติดตั้งและการใช้งานโคมไฟแสงประดิษฐ์ โดยผู้เข้าร่วมการวิจัยดำเนินการฝึกปฏิบัติด้วยตนเอง..... 135

ภาพที่ 4.22 กิจกรรมการอบรมเกี่ยวกับแผนและแบบการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสง และการฝึกปฏิบัติการด้วยตัวผู้เข้าร่วมการวิจัยเอง 136

ภาพที่ 4.23 การบันทึกผลการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของโคมไฟแสงประดิษฐ์..... 137

ภาพที่ 4.24 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้เข้าร่วมการวิจัยที่มีต่อประสิทธิภาพของแสงที่ใช้ในการสร้างระบบส่องสว่างอัจฉริยะโดยเมื่อเทียบกับแสงทางการค้า..... 141

ภาพที่ 4.25 ความพึงพอใจต่อคุณสมบัติของโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะ และโคมไฟทางการค้า.. 146



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

แสงมีความสำคัญต่อระบบชีวภาพโดยแสงเป็นแหล่งของพลังงานสำหรับสิ่งมีชีวิต ซึ่งเริ่มต้นจากพืชโดยผ่านกระบวนการการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthesis) ทำให้ได้สารผลิตภัณฑ์ คือ แป้ง และน้ำตาล รวมถึงพลังงานในรูปของ ATP (adenosine triphosphate) ซึ่งเป็นที่มาของจุดเริ่มต้นของห่วงโซ่พลังงานสำหรับมนุษย์ และสัตว์ เนื่องด้วยแสงมีสมบัติวิภาคกล่าวคือ สามารถเป็นได้ในรูปคลื่นและพลังงาน ด้วยเหตุนี้แสงจึงสามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลังงาน และเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลังงานเป็นพลังงานอื่นได้ เช่น พลังงานไฟฟ้าที่พบเห็นในปัจจุบันจำพวกเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) หรือแสงเปลี่ยนเป็นพลังงานกล เช่น เครื่องจักรกลแสงอาทิตย์ (sun engine) และพลังงานเคมี เช่น แสงเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีบนฟิล์มในกล้องถ่ายภาพทำให้ซิลเวอร์คลอไรด์ (silver chloride) ซิลเวอร์โบรไมด์ (silver bromide) หรือ ไอโอดิด (iodide) สำหรับการฉายบนฟิล์มกลายเป็นเม็ดละเอียด (colloidal Silver) ทำให้ไม่ละลายได้ในน้ำยาล้างภาพ เป็นต้น

นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงพลังงานเป็นแสง (แสงที่เกิดจากแสงที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กันหลายขนาดมาผสมกันเกิดเป็นแสงสีหนึ่ง เช่น แสงสีจากดวงอาทิตย์ แสงไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งแสงเหล่านี้เกิดจากแสงสีอื่น ๆ ที่มีความยาวคลื่นหลากหลายมาผสมกลมกลืนเข้าด้วยกัน ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้โดยการกำหนดช่วงความยาวคลื่นทำให้ได้แสงสีที่มีเอกลักษณ์และคุณสมบัติที่หลากหลายตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ นอกเหนือจากการให้แสงสว่างแล้ว แสงยังสามารถนำมาใช้ในรูปแบบอื่นอีกด้วย เช่น ในทางการเกษตรได้มีการนำเทคโนโลยีด้านแสงสว่างมาประยุกต์ในการจัดการระบบควบคุมฟาร์มเกษตรที่เกี่ยวกับการเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจได้หลากหลายชนิด โดยการควบคุมการปลูก การรดน้ำ การให้ปุ๋ยด้วยระบบอัตโนมัติในรูปแบบสมาร์ทฟาร์ม (smart farming) การใช้แสงสีจำเพาะในการจัดการศัตรูพืช การใช้แสงสีช่วงความยาวคลื่นในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช ในทางอาหารได้มีการนำเทคโนโลยีความยาวคลื่นแสงมาประยุกต์ใช้ในการกำหนดอัตราการสุก-แก่ของผลไม้ รวมถึงการฆ่าเชื้อในน้ำหรือพื้นผิวสัมผัสอาหารด้วยแสงในช่วงรังสียูวี ในทางการแพทย์ได้มีการใช้แสงที่เป็นลำแสงขนาดเล็กที่มีความเข้มหรือพลังงานความร้อนสูง (แสงเลเซอร์) มาใช้เป็นมีดผ่าตัด การรักษาเกี่ยวกับดวงตาหรืออาการผิดปกติที่เกิดขึ้นกับดวงตา การรักษา มะเร็ง ศัลยกรรมตกแต่ง เป็นต้น

นอกจากประโยชน์ของแสงและเทคโนโลยีของแสงที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แสงเป็นองค์ประกอบหนึ่งในการมองเห็นโดยเมื่อแสงสว่างส่องมายังดวงตาทำให้เกิดการส่งสัญญาณไปยังต่อมไพเนียล (pineal gland) ทำให้หยุดการผลิตของสารเมลาโทนิน (melatonin sleepy) ซึ่งเป็นฮอร์โมนที่ทำให้เกิดความง่วงนอน ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับนาฬิกาชีวิตของร่างกายมนุษย์ โดยเป็นเซลล์เริ่มต้นในการทำหน้าที่รับสัญญาณในการรับรู้แสงจะอยู่ที่บริเวณด้านหลังของดวงตาซึ่งเซลล์เหล่านี้จะถูกระตุ้นอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อได้รับแสงสว่าง ด้วยเหตุนี้แสงจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อประสิทธิภาพในการทำงานของมนุษย์ การทำกิจกรรมในชีวิตประจำวันและผลต่อการทำงานของระบบทางชีวภาพของร่างกาย ด้วยเหตุนี้เทคโนโลยีของแสงจึงได้มีการศึกษาและพัฒนาเชิงลึกมากยิ่งขึ้น เช่น การพัฒนาระบบควบคุมช่วงความยาวของคลื่นแสงที่เหมาะสมสำหรับกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ในแต่ละวัน หรือการนำสีส้มของแสงสีมาใช้เพิ่มวิวัฒนาการของมนุษย์ การบำบัดด้านอารมณ์ สุขภาพ ความทรงจำ การเรียนรู้แยกแยะ ความคิดสร้างสรรค์ และความรู้สึกทำให้เกิดจากกระบวนการรับรู้ผ่านประสาทสัมผัสทางสายตาแล้วส่งต่อข้อมูลที่ได้อุปกรณ์ที่ส่งต่อไปประมวลผลผลลัพธ์ที่ส่งต่อไป การออกแบบด้านการตกแต่งทางสถาปัตยกรรม และการเลือกใช้แสงสีทุกเฉดสีทั้งภายในและภายนอกจึงมีผลต่อความรู้สึกของมนุษย์

วัฏจักรแสงในรอบวันของมนุษย์ (circadian cycle of human) เป็นตัวกำหนดช่วงเวลาของนาฬิกาชีวภาพสำหรับการทำงานทางสรีรวิทยา (physiological functions) ที่สำคัญ เมื่อมนุษย์ได้รับแสงตามช่วงเวลา เช่น ตอนเช้า ตอนเที่ยง และตอนเย็น เป็นต้น ส่งผลให้ร่างกายของมนุษย์สามารถรับรู้และทำกิจกรรมประจำวันจึงเรียกว่า “นาฬิกาชีวภาพ (biological clock)” ซึ่งส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิร่างกาย การทำงานของสมอง การผลิตฮอร์โมน และการสร้างเซลล์ใหม่ ดังนั้นวัฏจักรการนอนหลับมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ อุณหภูมิของร่างกาย การเปลี่ยนแปลงความดันโลหิต การถ่ายอุจจาระ การผลิตฮอร์โมน กิจกรรมของระบบภูมิคุ้มกันระดับความตื่นตัว การประสานงานของกล้ามเนื้อเวลาในการตอบสนองระดับความแข็งแรงของกล้ามเนื้อและกิจกรรมทางชีววิทยาอื่น ๆ [1]

แสงในรอบวันถูกควบคุมโดยนาฬิกาชีวภาพภายในของมนุษย์ ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับซุพราไคแอสมาติกนิวเคลียส (suprachiasmatic nucleus; SCN) ที่อยู่ในสมองส่วนไฮโปทาลามัส (hypothalamus) [2] สิ่งเร้า (stimuli) ของระบบประสาทจะกระตุ้นเซลล์รับแสงในเรตินาเพื่อส่งไปยัง SCN ผ่านทางเรติโนไฮโปทาลามิก (retinohypothalamic) ของเส้นประสาทตา (optic nerve) และสร้างวงจรการทำงานประมาณ 24 ชั่วโมง ในกิจกรรมทางประสาทที่เรียกว่าจังหวะ (rhythm) ที่สอดคล้องกับวัฏจักรแสงในรอบวัน [3, 4] หากมนุษย์เราได้รับแสงในรอบวันที่ไม่เพียงพอในช่วงเวลากลางวันอาจทำให้ SCN หยุดชะงัก เนื่องจากได้รับแสงในรอบวันในตามวัฏจักรปกติหายไป ยิ่งไปกว่านั้นการทำงานของต่อมไพเนียล (pineal gland) ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเมลาโทนิน และการหลั่งออก

สู่กระแสเลือดจะเปลี่ยนไป [5] สามารถตรวจพบเมลาโทนินในเลือด น้ำลาย และปัสสาวะเป็นปัจจัยที่แสดงถึงสถานะของนาฬิกาชีวภาพภายใน [6]

ความไวของตัวรับแสงของมนุษย์ต่อแสงสีเดี่ยวยังได้รับการรายงานว่ามีค่าความยาวคลื่นแสงสูงสุดที่ 464 นาโนเมตร ในขณะที่ระดับของการกดเมลาโทนินเพิ่มขึ้น ซึ่งเมลาโทนินในเลือดมีผลต่อการควบคุมและการทำงานของอวัยวะภายในหลายอย่างรวมทั้งส่งเสริมการผ่อนคลายและการนอนหลับและการกดเมลาโทนินสามารถทำให้ตื่นตัวและพร้อมที่จะทำงานทั้งทางร่างกายและสติปัญญา เมื่อมีการได้รับแสงรังสีที่ดวงตาเพิ่มขึ้นและมีความเกี่ยวข้องกับอายุและสุขภาพของมนุษย์ [7] ต่อมาได้มีการรายงานการทดลองโดย Brainard และคณะ ปี ค.ศ.2008 [8] พบว่าการตอบสนองต่อการกดเมลาโทนินต่อความไวแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่นแสง 420 นาโนเมตร นอกจากนี้แสงวอร์มไวท์ (warm white) และแสงคูลไวท์ (cool white) ยังยับยั้งเส้นโค้งการตอบสนองสำหรับการกดเมลาโทนินสูงสุดสำหรับความยาวคลื่นแสงระหว่าง 420 ถึง 520 นาโนเมตร ซึ่งอาจเป็นส่วนหนึ่งของการทำงานของเซลล์รูปแท่งและเซลล์รูปกรวยในตาขาว [7, 9, 10]

แสงที่มีผลต่อการมองเห็นในการปฏิบัติงานโดยตรงโดยมองเห็นรายละเอียดที่สำคัญของงานได้มากขึ้นหรือน้อยลง แสงไม่เพียงพอสามารถทำให้ยากที่จะมองเห็นและสามารถทำให้เกิดการลื่นไถล สะดุด ล้มลง หรือ ในขณะที่แสงสว่างมากเกินไปทำให้เกิดแสงจ้าอาจก่อให้เกิดอันตราย [11] โดยแสงที่ไม่เพียงพอระหว่างพื้นผิวการทำงานหรือระหว่างความสว่างสูงหรือแสงจ้าที่สะท้อนเงาและการกระพริบของแสงทำให้การมองเห็นไม่ชัดเจนในขณะที่ปฏิบัติงาน ปัญหาแสงที่ไม่เหมาะสมดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของบุคลากรในอาคารทำให้เกิดความเครียดดวงตา ปวดศีรษะ และความเจ็บปวดที่เกี่ยวข้องกับท่าทางที่ไม่ดี [11, 12]

นอกจากนี้แสงในรอบวันของมนุษย์มีผลต่อความรู้สึกไม่สบายของดวงตา และอาจส่งผลกระทบต่ออารมณ์ และแสงที่ไม่พึงประสงค์หรือการได้รับแสงในรอบวันที่ไม่เพียงพอในระยะเวลานานอาจส่งผลในการเปลี่ยนแปลงของแสงในรอบวันของมนุษย์ ซึ่งความผิดปกตินี้มีผลต่อการนอนหลับ การย่อยอาหาร และลำไส้หรือนำไปสู่การเกิดโรคไมเกรน [13] อาการปวดศีรษะ [14] อาการหงุดหงิด [15] ภาวะซึมเศร้าตามฤดูกาล [16] เกิดข้อบกพร่องของระบบภูมิคุ้มกัน [17] อาการอ่อนเพลียเรื้อรัง [18] โรคอ้วน [19] โรคเบาหวาน [20] อาการหยุดชะงักของระบบไหลเวียนโลหิตและประสิทธิภาพของระบบภูมิคุ้มกัน [21, 22] นอกจากนี้ยังพบว่าในบางกรณีที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของแสงตามแสงในรอบวันอาจส่งผลให้นาฬิกาชีวภาพของสิ่งมีชีวิตเกิดการเลื่อน (shift) ออกไป

แสงธรรมชาติมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในเรื่องของปริมาณ ทิศทาง และการกระจายพลังงานสเปกตรัม หรือ SPD (spectral power distribution; SPD) การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้ส่วนใหญ่เกิดจากช่วงเวลาของวัน และยังขึ้นอยู่กับสภาพทางอุตุนิยมวิทยา ละติจูดประเทศ และสภาพแวดล้อม ซึ่งในความเป็นจริงแสงอาทิตย์หากได้รับโดยตรงสามารถก่อให้เกิดการรบกวนเพราะมี

ความจ้าหรือสว่างเกินไป นอกจากนี้ยังนำพารังสี เช่น รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) และอินฟราเรด (IR) ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพ ซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่แสดงข้างต้น ช่วงการเปลี่ยนแปลงของแสงธรรมชาติในพื้นที่กลางแจ้งมีตั้งแต่ระดับความสว่างต่ำสุดของแสงในฤดูหนาวจนถึงพื้นดิน 1,000 ลักซ์ โดยมีห้องฟ้ามีดครึ้มมากจนถึงสูงสุด 150,000 ลักซ์ ในฤดูร้อนในวันที่มีห้องฟ้าแจ่มใส [23-25] SPD ของแสงธรรมชาติเปลี่ยนแปลงมากในระหว่างวันตั้งแต่เช้าจนถึงเย็นและขึ้นอยู่กับปริมาณของเมฆ CCT ที่เกี่ยวข้อง (correlated color temperature; CCT) อาจแตกต่างกันมากจาก 4,000 เคลวิน ในวันที่มีเมฆเฉลี่ยสูงถึง 10,000 เคลวิน วัดได้เมื่อห้องฟ้าปราศจากเมฆและหมอกควันอย่างสมบูรณ์ เพื่ออธิบายสีของแสงธรรมชาติ CIE แนะนำให้ใช้หลอดไฟ D-series มาตรฐานแสงกลางวัน (CIE 015:2004) ตั้งแต่ D50 ถึง D75 ซึ่งมี CCT ตั้งแต่ 5,000 – 7,500 เคลวิน ตามลำดับ

ความแตกต่างระหว่างการสัมผัสโดยตรงของผิวหนังกับแสงแดดและแสงธรรมชาติในความรู้สึกโดยทั่วไปว่าเป็นผลกระทบโดยรวมของแสงของห้องฟ้าและแสงของดวงอาทิตย์ ห้องฟ้าอาจมีสภาพอากาศที่แปรปรวนอย่างมากซึ่งการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมของแสงที่กระจายโดยชั้นบรรยากาศของโลกและอาจบดบังแสงแดดโดยตรง ซึ่งแสงของห้องฟ้าเป็นรูปแบบหนึ่งของการให้แสงสว่างทางอ้อม

“แสงธรรมชาติ” หมายถึงแสงทั้งหมดที่ผลิตจากดวงอาทิตย์ ซึ่งรวมกับแสงบรรยากาศที่กระจายอยู่บนห้องฟ้าและแสงที่สะท้อนจากพื้นดิน น้ำ และวัตถุ โดยองค์การนานาชาติเกี่ยวกับแสงและสี (Commission International de l’Eclairage (CIE) หรือในชื่ออังกฤษ เรียกว่า International Commission on Illumination; CIE) ได้อธิบายถึงสเปกตรัมแสงธรรมชาติของ CIE 015 2004 ตามมาตรฐาน D [26] ที่กำหนดไว้ตาม CCT ของแสงประดิษฐ์ ซึ่งเมื่อแสงเข้ามาในดวงตาของเราสิ่งสำคัญที่จะใช้ป้องกันผลของแสงอาทิตย์ทางสรีรวิทยาที่มีต่อโดยตรงกับผิวหนัง โดยแสงไม่ว่าจะเป็นแสงธรรมชาติหรือแสงประดิษฐ์ ซึ่งเป็นที่เข้าใจการส่องสว่างมีความสัมพันธ์กับแสงภายนอกและภายในของอาคาร [27]

ตั้งแต่ปี ค.ศ.1800 หลอดไส้ (incandescent light) ถูกคิดค้นขึ้นครั้งแรกโดย Thomas Alva Edison ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของมนุษย์ที่สามารถสร้างแสงโดยใช้ไฟฟ้า ซึ่งอาจนำไปสู่ผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ในลักษณะที่แตกต่างกัน จนกระทั่งในปี ค.ศ.1960 ไดโอดเปล่งแสง (light emitting diode, LED) ที่สามารถใช้งานได้จริงครั้งแรกได้รับการพัฒนาโดย Nick Holonyak Jr. จนถึงขณะนี้ การปฏิวัติการส่องสว่าง LED เริ่มขึ้นอีกครั้งในปี ค.ศ.2000 และได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วและกำลังถูกแทนที่ระบบแสงสว่างทั่วไปแบบเดิม สำหรับเทคโนโลยีแสงสว่างนี้ได้รับความน่าสนใจในอุตสาหกรรมทั่วโลกเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากมีการพัฒนาความพร้อมในการใช้งานอย่างต่อเนื่อง และแสงที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นสำหรับที่อยู่อาศัย

LED เป็นส่วนประกอบออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (optoelectronic) ที่ทำโดยการเชื่อมต่ออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (semiconductors) สองตัว ในส่วนของสารกึ่งตัวนำแทนด้วย P และ N จะมีการเพิ่มความไม่บริสุทธิ์ (impurities are added) ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ เพื่อเพิ่ม (P) หรือลด (N) จำนวนอิเล็กตรอนในพันธะของตาข่ายคริสตัล การไม่มีอิเล็กตรอนในพันธะอะตอมทำให้เกิดช่องว่าง เมื่อกระแสอิเล็กตรอนไหลจากโซน N ที่มีอิเล็กตรอนไหลไปยังโซน P ซึ่งเต็มไปด้วยช่องว่างอิเล็กตรอนจะเติมเต็มช่องว่างเพื่อลดพลังงานศักย์และปล่อยโฟตอนออกมา โดยความยาวคลื่นของแสงที่ปล่อยออกมานั้นขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความต่างศักย์ระหว่างโซน P และโซน N นอกจากนี้การเปล่งแสงนี้เกิดขึ้นในช่วงสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าแคบ ๆ นั้นหมายความว่าที่ได้แสงจาก LED จะปล่อยแสงสีที่มีระดับความเข้มตัวสูง นอกจากการผลิตแสงแล้วกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไปส่วนต่าง ๆ ในวงจรจะส่งผลให้เกิดความร้อนกระจายไปยังข้อต่อ PN ที่ชิปเซมิคอนดักเตอร์ โดยแสงจาก LED จะเปล่งแสงออกมาก็ต่อเมื่อเป็นโพลาริซายด์โดยตรง คือเมื่อกระแสไฟฟ้าของประจุบวกไหลจาก P ไปยัง N ซึ่งหมายความว่าแหล่งกำเนิดแสงนี้จะต้องใช้พลังงานจากไฟฟ้ากระแสตรง (DC) หรือในบางกรณีใช้พลังงานจากไฟฟ้ากระแสสลับ (AC)

แสงเป็นปัจจัยภายนอกที่สำคัญที่สุดต่อสิ่งมีชีวิต [28] เมื่อมนุษย์ได้สัมผัสกับแสงประดิษฐ์มากขึ้นและสัมผัสกับแสงธรรมชาติน้อยลง ดังนั้นระบบแสงประดิษฐ์ที่ควรได้รับจึงควรเป็นแสงที่มีผลกระทบต่อมนุษย์น้อยที่สุด ซึ่งมนุษย์มีระบบนาฬิกาชีวิตภายในที่ควบคุมกระบวนการทางชีวภาพรวมทั้งส่งผลต่อการนอนหลับและสุขภาพของมนุษย์ ปัจจุบันทุกวันนี้จะพบว่ามีการผู้สูงอายุเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผู้สูงอายุที่มีความบกพร่องทางสายตาและการสูญเสียความจำหรือระบบความจำเสื่อมลง (cognitive impairments) นอกจากนี้ร้อยละ 40 – 50 ของผู้สูงอายุจะประสบปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการนอนหลับ ดังนั้นการเตรียมสภาพแวดล้อมภายนอกที่เหมาะสมควรเป็นเรื่องที่ต้องให้ความสำคัญ ซึ่งการออกแบบสภาพแวดล้อมสำหรับผู้สูงอายุจะต้องกระตุ้นกระบวนการสร้างนวัตกรรมที่มีประโยชน์สำหรับการพัฒนาเศรษฐกิจและเพื่อปรับปรุงคุณภาพชีวิตของสังคมโดยรวม

โดยการประยุกต์ใช้หลักการเหล่านี้ในการออกแบบแสงสว่างระบบแสงควรสอดคล้องกับแนวคิด เช่น ความยืดหยุ่นในการทำงาน ความเรียบง่าย การรับรู้ความทนทานต่อความผิดพลาด ความพยายามทางกายภาพที่ลดลงและความสามารถในการปรับให้เข้ากับขนาดและพื้นที่ ๆ เพียงพอ [29, 30]

การออกแบบแสงประดิษฐ์ภายในอาคารในอดีตที่ผ่านมาไม่มีวัตถุประสงค์เพื่อตอบสนองความต้องการรับรู้ของมนุษย์ในทิศทางที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นและมุ่งเน้นไปที่ผลกระทบทางสรีรวิทยาที่มีอิทธิพลต่ออารมณ์และผลกระทบที่อาจมีต่อพฤติกรรมของมนุษย์ [31, 32] รวมทั้งผลของแสงที่ไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็นมีผลต่อร่างกายมนุษย์ผ่านกลไกอื่น ๆ นอกเหนือจากการควบคุมเมลาโทนิโดยตรงต่อระบบประสาทของมนุษย์และผลกระทบต่อระดับความตื่นตัว [33] อารมณ์

[34] พฤติกรรม [34, 35] และพารามิเตอร์ทางสรีรวิทยาของมนุษย์อื่น ๆ เช่น อัตราการเต้นของหัวใจ และอุณหภูมิของร่างกาย เป็นต้น

ความสนใจทางทฤษฎีของการวิจัย คือการเข้าใจความเฉพาเจาะจงและการปรับปรุงคุณสมบัติทั่วไปที่สามารถนำไปใช้เพื่อประโยชน์ของกลุ่มผู้ใช้ เช่น บุคคลทั่วไป หรือกลุ่มผู้สูงอายุ เพื่อให้ตระหนักถึงประโยชน์ต่อสุขภาพของมนุษย์และความเป็นอยู่ที่ดี จากการทบทวนวรรณกรรมต่าง ๆ พบว่าการพัฒนาระบบแสงในรอบวัน (circadian light) มีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้ (1) การตรวจสอบตัวชี้วัดแสงเพื่อออกแบบระบบควบคุมแสงแบบแสงในรอบวัน (2) การพัฒนาระบบควบคุมห้องแสงแบบแยกส่วนเพื่อการทดสอบแสงในรอบวันที่ต้องการด้วยการออกแบบอัลกอริทึม (3) การทดลองแบบนำร่องเพื่อประเมินระบบแสงสว่างแบบแสงในรอบวันกับกลุ่มเป้าหมาย ซึ่งการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอระบบการควบคุมแสงประดิษฐ์ให้เลียนแบบแสงธรรมชาติในรอบวัน

จากรายงานวิจัยโดย Badia และคณะ ในปี ค.ศ. 1991 [36] รายงานว่าแสงมีผลกระทบต่อจิตสรีรวิทยาและพฤติกรรมของการกระตุ้นด้วยแสง ซึ่งในการทดสอบพบว่าแสงอาทิตย์มีผลต่อการเพิ่มการกระตุ้นอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังช่วยลดอาการง่วงนอนและเพิ่มอุณหภูมิของร่างกาย และในการทดลองมีผลต่อการกระตุ้นคลื่นสมอง โดยพบว่ามีความสัมพันธ์กับสหสัมพันธ์ CCT ที่ 5,000 เคลวิน และแสงสีฟ้าหรือแสงแสงสีขาวสามารถเพิ่มกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานซ่อมแซมหน่วยความจำและความสนใจในการกระตุ้นการได้ยิน [37, 38] ผลของแสงเหล่านี้ได้รับการยืนยันจากการศึกษาของ Hakaguchi ปี ค.ศ. 1999 [39] โดยพบว่าการทำงานของหน่วยความจำและอัตราการเต้นของหัวใจเพิ่มขึ้นหลังจากได้รับแสงเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง

จากผลงานก่อนหน้านี้นี้แสดงให้เห็นว่าแสงสีฟ้าเดี่ยวมีประสิทธิภาพมากขึ้นในการกดเมลาโทนิมากกว่าแสงสีขาว ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบแสงสีฟ้าบวกกับส่วนประกอบของแสงสีเหลือง ซึ่งคาดว่าความไวจ่อประสาทตาที่ความยาวคลื่นสูงสุดอยู่ที่ 480 นาโนเมตร โดยค่านี้ได้รับการปรับปรุงเป็น 490 นาโนเมตร [40-43] โดยในองค์ประกอบของแสงสีฟ้าที่มีความยาวคลื่นแสงสูงสุดที่ 460 นาโนเมตร มีผลต่อลดลงของเมลาโทนิและมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของร่างกาย อัตราการเต้นหัวใจ ซึ่งไม่เหมือนกับผลของแสงสีเหลืองที่มีความยาวคลื่นแสงสูงสุดที่ 550 นาโนเมตร โดย Cajochen และคณะ ในปี ค.ศ. 2005 [33] พบว่าการได้รับแสงจ้าในช่วงแสงสีเหลืองมีผลต่อดวงตาน้อยกว่าแสงสีน้ำเงินทั้งที่ระดับความเข้มแสงสูงมีผลต่ออัตราการเต้นหัวใจ โดยเฉพาะในช่วงท้ายของชั่วโมงของได้รับแสงที่ 1,000 ลักซ์ (4,000 เคลวิน) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแม้จะอยู่ภายใต้สภาวะแสงกลางวัน ซึ่งไม่ได้อยู่ในความมืดเมลาโทนิยังคงตอบสนองต่อระดับความเข้มแสงมากขึ้นและสามารถปรับปรุงการตื่นตัวและควมมีชีวิตชีวาของมนุษย์เช่นเดียวกับประสิทธิภาพภายในสรีรวิทยา [44]

ความสัมพันธ์ระหว่างแสงและผู้ใช้เป็นหนึ่งในหัวข้อพื้นฐานสำหรับการทำความเข้าใจผลกระทบของแสงประดิษฐ์ที่มีต่อคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุเกี่ยวกับประเด็นต่าง ๆ เช่น ความรู้สึกเป็นอิสระต่อความเป็นอยู่ ความสะดวกสบายและสุขภาพที่บ้าน เพื่อปรับปรุงกิจกรรมประจำวัน การป้องกันอุบัติเหตุ และปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง นอกเหนือจากที่มีผลต่อการมองเห็น เช่น ภาวะสมองเสื่อมในวัยชราและภาวะซึมเศร้าตามฤดูกาล (seasonal affective disorder, SAD) ซึ่งทุกวันนี้แสงประดิษฐ์เริ่มเข้ามามีบทบาทและผู้ผลิตออกแบบตามคุณลักษณะคล้ายกับแสงธรรมชาติ รายงานก่อนหน้านี้โดย Figueiro และคณะ ปี ค.ศ.2008 [45] ได้นำเสนอโปรแกรมแสงประดิษฐ์ 24 ชั่วโมงสำหรับผู้สูงอายุ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงการมองเห็นระบบแสงในรอบวัน โดยหลักการของระบบแสงสว่างจะขึ้นอยู่กับการกระตุ้นแสงในรอบวัน โดยได้รับแสงสว่างอย่างน้อยกว่า 400 ลักซ์ที่ CCT 6,500 เคลวิน รวมถึงการออกแบบโคมไฟในเวลากลางคืนที่ให้แสงสว่างและสัญญาณภาพที่ชัดเจนเพื่อให้ผู้สูงอายุเคลื่อนไหวได้อย่างสะดวกและปลอดภัย [46] และองค์ประกอบของแสงในการออกแบบแสงสำหรับผู้ป่วยโรคสมองเสื่อมต้องพิจารณาถึง [47, 48]

ในทางประเทศแถบอเมริกาเหนือพบว่ามีคามผิดปกติด้านอารมณ์เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของฤดูกาล (SAD) และภาวะซึมเศร้า ซึ่งอาการของผู้ที่มีภาวะซึมเศร้าจะมีอาการดังต่อไปนี้ อาการเพลีย นอนตื่นยากในช่วงเช้า ชอบทานอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต ขาดพลังงาน มีสมาธิสั้นต่อการทำงาน อาการระเมอ อาการกระวนกระวาย และความรู้สึกไม่อยากเข้าสังคม ซึ่งในปัจจุบันปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นนี้สามารถใช้แสงบำบัด (bright light treatment, BLT) ได้ เช่น ความผิดปกติจากการนอนไม่เป็นไปตามแสงในรอบวัน (circadian sleep disorder) อาการเพลียจากการปรับตัวอย่างฉับพลันเกี่ยวกับระยะเวลาในการเดินทางระยะไกลหรือการทำงานแบบกะเข้ากะป่วย (jet lag or shift work adjustment) ภาวะซึมเศร้าของมารดาในขณะตั้งครรภ์ ขณะหลังคลอด จากงานวิจัยที่ผ่านมารายงานว่า BLT สามารถใช้บำบัดกับอาการดังกล่าวได้ โดยพบว่า BLT เป็นวิธีการหนึ่งที่มีความเหมาะสมในการบำบัดและเป็นวิธีการแรกที่ทางการแพทย์ได้แนะนำสำหรับการบำบัดผู้ป่วยที่มีภาวะซึมเศร้า (SAD and winter blues) และเป็นวิธีที่มีความปลอดภัยหากนำไปใช้ได้ อย่างถูกต้องและไม่ก่อให้เกิดผลกระทบทางกายภาพของผู้ป่วยและสามารถใช้ร่วมกับยาหรือสารควบคุมทางอารมณ์หรืออาจจะต้องมีการใช้ยาร่วมกันได้ทั้งนี้ต้องอยู่ภายใต้การดูแลของแพทย์ [49] การบำบัดรักษาด้วยแสงจ้า โดยมีปัจจัยอยู่ด้วยกันใน 2 สภาวะ ได้แก่ ระยะเวลา และความเข้มของแสงที่ใช้ในการบำบัดรักษาที่ถูกต้องตามหลักการแพทย์ โดยหลักการทั่วไป BLT ในอุดมคติของการออกแบบห้องบำบัดควรมีระดับความเข้มของแสงไม่น้อยกว่า 2,500 – 10,000 ลักซ์ ซึ่งในทางการแพทย์พบว่าดวงตาของมนุษย์สามารถรับแสงที่ระดับสูงสุดได้ 10,000 ลักซ์ โดยตำแหน่งในการติดตั้งโคมที่ให้แสงจ้าที่เหมาะสมควรอยู่ในระดับเหนือสายตาในการมองเห็น และอยู่ตรงกลางด้านหน้าของดวงตามนุษย์

แสงบำบัดสามารถใช้ได้กับทุกคน และจะมีประสิทธิภาพเมื่อถูกใช้อย่างเหมาะสมพบว่า โดยทั่วไปการบำบัดด้วยแสงจ้าจะมีผลต่อการรักษาได้ถึงร้อยละ 65 – 85 ของระยะเวลาในการรักษา ซึ่งจะเห็นผลต่อการรักษาได้ภายใน 2 สัปดาห์ อย่างไรก็ตามความซับซ้อนอาจเกิดขึ้นได้ในบางกรณี จากผลงานวิจัยพบว่าการตอบสนองต่อการรักษาร้อยละ 65 – 85 โดยระยะเวลาการตอบสนองสั้น ภายใน 5 – 10 วัน และมีน้อยมากมีภาวะดีและต้านทานต่อการรักษา โดยแสงจ้าอาจเกิดผลข้างเคียงขึ้นได้จากการรักษา เช่น อาการปวดศีรษะ อาการเกร็งของกล้ามเนื้อตา อาการระคายเคืองของดวงตา อาการระอึกกระอวน อาการวิงเวียนศีรษะ ซึ่งพบว่าอาการดังกล่าวจะมีเฉพาะในช่วงแรกของการบำบัดประมาณ 3 – 4 วัน แต่ในบางกรณีพบว่าการต่อต้านต่อระดับของแสงสามารถปรับระดับความเข้มแสงลงได้ โดยต้องอยู่ภายใต้การดูแลของแพทย์อย่างระมัดระวัง ซึ่งในอเมริกาและแคนาดาพบว่าสตรีที่มีความเสี่ยงต่อโรคภาวะซึมเศร้ามากกว่าผู้ชายถึง 4 เท่า และพบมากในกลุ่มที่มีอายุตั้งแต่ 20 – 50 ปี ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ทางตอนเหนือของอเมริกาและแคนาดาโดยพบมากในชาวอเมริกาเหนือถึง 50 ล้านคน การใช้แสงจ้าในการบำบัดรักษาให้มีประสิทธิภาพต้องทำเป็นประจำทุกวันในช่วงเวลาเดิมและควรบำบัดในช่วงเวลาเช้าตรู่หรือหลังจากตื่นนอน โดยเริ่มต้นด้วยการปรับระยะเวลาที่ได้รับการบำบัดเป็นเวลานาน 30 นาที และปรับระดับขึ้น-ลงในทุก ๆ 5 นาที โดยสามารถปรับระดับความเข้มแสงเพิ่มขึ้นทุก 5 นาที/ครั้ง ตามระดับการตอบสนอง ซึ่งอาจต้องใช้ระยะเวลา 2 – 3 วัน สำหรับแสงในรอบวันที่ระดับความสว่างสูงมีความสำคัญและจำเป็นต่อการสังเคราะห์วิตามิน D ของมนุษย์ แต่อย่างไรก็ตามแสงในรอบวันมีปริมาณรังสี UV รวมอยู่ด้วย ซึ่งมีผลทำให้เสี่ยงต่อการระคายเคืองของดวงตาและผิวหนังมนุษย์ ซึ่งข้อดีของแสงจ้าของแสงประดิษฐ์สามารถลดความเสี่ยงดังกล่าวได้เพราะแสงประดิษฐ์ไม่มีปริมาณรังสี UV

ในช่วงไม่นานมานี้ระบบควบคุมแสงสว่างส่วนใหญ่มีการพัฒนามาเพื่อการอนุรักษ์พลังงานมากยิ่งขึ้น [50, 51] สำหรับการปรับปรุงแสงในรอบวันและการออกแบบเพื่อใช้ภายในอาคารมีข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับระดับความสว่างมากหรือน้อยตามแสงในรอบวัน Li และคณะ ในปี ค.ศ.2016 นำเสนอวิธีการใหม่โดยใช้ตัวตรวจจับแสงในรอบวันโดยใช้ตัวตรวจจับแสงเพื่อลดค่าใช้จ่ายและความซับซ้อนในการติดตั้ง [52] Tang และคณะ ในปี ค.ศ.2017 นำเสนอระบบแสงสว่างอัจฉริยะด้วยคุณลักษณะด้านความปลอดภัยขั้นสูงและระบบแสงสว่างอัจฉริยะใช้เซ็นเซอร์วัดแสงและโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ Android สำหรับควบคุมการทำงานภายในบ้านพักอาศัย [53]

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อออกแบบและสร้างระบบส่องสว่างอัจฉริยะสำหรับเลียนแบบแสงในรอบวันและแสงจ้า
- 2) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบส่องสว่างอัจฉริยะที่พัฒนาขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ดำเนินการศึกษาสมบัติของแสงในรอบวันในเขตฤดูร้อนและฤดูหนาวของประเทศไทย ณ พื้นที่ระนาบในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย
- 2) การประเมินประสิทธิภาพจะทดสอบในกลุ่มผู้มีสุขภาพดีทั่วไป (อายุ 35 – 60 ปี) จำนวน 32 คน โดยการใช้แบบสอบถามเกี่ยวกับผลของแสงที่มีต่อการรับรู้แสงและความพึงพอใจ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้

- 1) เพื่อสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติแสงในรอบวันของประเทศไทย
- 2) เพื่อพัฒนาระบบส่องสว่างอัจฉริยะเพื่อเลียนแบบแสงในรอบวันและแสงจ้าเพื่อนำสู่การพัฒนาหลอดประดิษฐ์ที่เหมาะสมกับกลุ่มเป้าหมายแต่ละกลุ่ม
- 3) สามารถนำระบบส่องสว่างอัจฉริยะที่พัฒนาขึ้นไปช่วยผู้ป่วยที่มีปัญหาการนอนหลับยากได้

1.5 คำนิยามและศัพท์เทคนิค

ความส่องสว่าง (Luminance, L) คือ ความส่องสว่างในทิศทางที่กำหนด ณ จุดใด ๆ บนพื้นผิวในทิศทางที่กำหนดต่อพื้นที่ผิวที่ปรากฏ หรือความสว่างที่สะท้อนออกมาจากวัตถุ หน่วยอังกฤษใช้หน่วยแคนเดลาต่อตารางฟุต และหน่วยเมตริก ใช้หน่วยเป็น แคนเดลาต่อตารางเมตร

ความสว่าง (Illuminance, E) คือ ปริมาณแสงตกกระทบบน 1 หน่วยพื้นที่ใด ๆ (อาจส่องผ่านหรือดูดซับฟลักซ์ส่องสว่างไว้) ความหนาแน่นของฟลักซ์ส่องสว่างที่ตกลงบนพื้นผิวนั้น เรียกว่า ความเข้มแสงมีหน่วยเป็นลูเมนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ หน่วยอังกฤษใช้หน่วยเป็น ลูเมนต่อตารางฟุต และหน่วยเมตริกใช้หน่วยเป็น ลูเมนต่อตารางเมตร (ลูเมนต่อตารางเมตร นิยมเรียกว่า ลักซ์)

แสงจ้า (Brightness, B) คือ องศาของการส่องสว่างของดวงไฟ หรือผลที่เกิดจากที่แสงถูกสะท้อนออกจากผิววัตถุ หรือพุ่งออกจากแหล่งกำเนิดแสงในระยะของเวลาตามสายตา (visual field) ทำให้ตาู้สึกว่ามีแสงสว่างมากเกินไปกว่าตาที่จะปรับได้ ทำให้ผู้มองเกิดความไม่สบายในการมองเห็น หรือทำให้มองเห็นวัตถุได้ยาก หรือไม่สามารถมองเห็นวัตถุได้สิ้นเชิง หน่วยอังกฤษใช้ หน่วยแคลเดลา และหน่วยเมตริกใช้หน่วยเป็น ลักซ์ต่อตารางเมตร

ฟลักซ์ส่องสว่าง (Luminous flux, ϕ) คือ พลังงานแสงสว่างที่แผ่ออกจากแหล่งกำเนิดแสงต่อหน่วยเวลาหน่วยอังกฤษและหน่วยเมตริกใช้หน่วยเป็น ลูเมน (1 ลูเมน หมายถึง ปริมาณแสงที่ส่องบนพื้นที่หนึ่งตารางเมตร บนผิวทรงกลมที่มีรัศมีหนึ่งเมตรโดยมีแหล่งกำเนิดแสงหนึ่งแคนเดลา หรือ หนึ่งกำลังเทียนวางที่จุดศูนย์กลางของวงกลม ซึ่งเมื่อพิจารณาพื้นที่ทั้งหมดของทรงกลมจะมีค่าเท่ากับ 12.57 ตารางหน่วยพื้นที่ที่ดังนั้น ค่าความเข้มแห่งการส่องสว่าง 1 แคนเดลา จะสามารถเปล่งปริมาณจำนวนเส้นแรงของแสงสว่างออกไปได้เท่ากับ 12.57 ลูเมน)

ความเข้มของการส่องสว่าง (Luminous intensity, I) คือความหนาแน่นของฟลักซ์ส่องสว่างหรือพลังงานที่ส่องออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงในทิศทางใด ๆ ต่อมุมเชิงของแข็ง (solid angle) หน่วยเป็นลูเมน/สเตอเรเดียน หรือ แคนเดลา (1 แคนเดลา เท่ากับ 12.57 ลูเมน)

อุณหภูมิสีของแสง (Color temperature) อุณหภูมิสีเป็นค่าบ่งบอกถึงสีของแสงที่ได้จากหลอดไฟมีหน่วยเป็นเคลวิน (kelvin: K) หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการบอกสีทางด้านการส่องสว่าง โดยแสดงค่าในรูปอุณหภูมิ เช่น หลอดไฟที่มีอุณหภูมิปานกลาง เช่น หลอดคู่คูลไวท์ที่มี CCT ระหว่าง 3,000 – 5,000 เคลวิน จะให้โทนแสงออกสีขาว เหมาะสำหรับการให้แสงสว่างในห้างสรรพสินค้า หรือโรงพยาบาล ซึ่งต้องการสีของแสงที่ทำให้วัตถุทุกโทนสีดูเด่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่มีอุณหภูมิ 6,500 เคลวิน จะมีสีของแสงเทียบเท่ากับแสงที่เปล่งออกมาจากวัตถุสีดำที่ถูกเผาให้ร้อนถึงอุณหภูมิ 6,500 เคลวิน เป็นต้น อุณหภูมิสี (color temperature) ถือเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบสีของแหล่งกำเนิดแสง (หลอดไฟ) ได้แก่ ให้พลังงานความร้อนกับวัตถุดำ (black body) ไปเรื่อย ๆ จนทำให้สีของวัตถุนั้นมีการเปลี่ยนสีโดยทั่วไปสีของวัตถุดำจะเปลี่ยนไปเรื่อยตามค่าอุณหภูมิของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงไป ส่วนสีของแหล่งกำเนิดแสงที่ไม่ปรากฏบนเส้นพลาจเคียนโลกัส (planckian locus) สามารถระบุได้โดยกำหนดอุณหภูมิสีได้โดยวิธี อุณหภูมิสีสัมพันธ์ (correlated color temperature, CCT) ของแหล่งกำเนิดแสงโดยเทียบแหล่งกำเนิดแสงกับสีของวัตถุดำที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

2.1 โฟโตเมตรีและแสงในรอบวัน

ปัจจุบันการออกแบบระบบการส่องสว่างในอาคารและการประเมินถึงประสิทธิภาพของแสงได้รับความสนใจในการวิจัยและประยุกต์ใช้ในหลายสาขามากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะพิจารณาถึงระดับของแสงกลางวัน (daylight) ในอาคารจะพบว่ามีค่าแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ประเภทอาคาร พื้นที่ วิธีการใช้งาน การออกแบบเพื่อความสวยงาม และระดับการใช้พลังงาน เป็นต้น

เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยเหล่านี้วิธีการประเมินที่ละเอียดทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ จะช่วยให้การออกแบบระบบการส่องสว่างมีความเหมาะสมและถูกต้องมากยิ่งขึ้น รวมทั้งปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการออกแบบการให้แสงในอาคาร เช่น การวางแนวและทิศทางของส่วนประกอบในอาคาร อัตราส่วนของหน้าต่างกับผนัง ระดับมุมของแสงและเงา เป็นต้น ซึ่งจะมีผลต่อปริมาณและคุณภาพของแสงกลางวันที่ได้รับในอาคาร เช่น รูปแบบของแสงกลางวันตามฤดูกาล (climate-based daylight modelling) เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของแสงกลางวันในอาคารที่มีต่อสุขภาพของผู้ใช้ สามารถวัดหรือกำหนดปริมาณได้ด้วยค่าความสว่างของแสงในรอบวัน (circadian illuminance) ที่จำเพาะกับพื้นที่และเวลา ดังนั้นการวัดปริมาณและระดับความสว่างในพื้นที่อาจจำเป็นต้องใช้โปรแกรมการจำลอง โดยมีปัจจัยหลายประการที่เกี่ยวข้องและเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน เช่น การใช้แบบจำลองสภาพอากาศเข้ามาเพื่อประเมินการวางตำแหน่งและการวางผังของอาคาร ซึ่งได้นำมาใช้ในการคำนวณปริมาณรังสีหรือความส่องสว่างของแสงจากดวงอาทิตย์และท้องฟ้า [54] โดยแบบจำลองสภาพอากาศสามารถคาดการณ์ที่ชัดเจนกับตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ ทิศทางของอาคาร องค์ประกอบของอาคาร และลักษณะของอาคาร โดยวิธีการจำลองนี้สามารถทำให้การประเมินประสิทธิภาพที่ดีกับพื้นที่ ๆ มีแสงสว่างที่เหมาะสมเมื่อเทียบกับความเป็นจริง ซึ่งสามารถใช้ประกอบการตัดสินใจในการออกแบบอาคารเพื่อเพิ่มระดับของพื้นที่แสง

โดยทั่วไปเกณฑ์ในการประเมินมาตรฐานจะใช้ค่าความส่องสว่างของแสง (photopic illuminance) ซึ่งค่าความส่องสว่าง คือค่าฟลักซ์ส่องสว่างต่อหน่วยพื้นที่ ณ จุดใดจุดหนึ่งบนพื้นผิวที่สัมผัสกับแสง ณ ตำแหน่งตกกระทบ [55] ในที่นี้การส่องสว่างด้วยแสง คือการฉายรังสีของแสงที่เพิ่มขึ้นตามเส้นโค้งการตอบสนองที่เกี่ยวข้องกับการมองเห็นของดวงตามนุษย์ ในขณะที่ความสว่างรอบทิศทาง คือ การแผ่รังสีแบบเดียวกัน แต่ให้ระดับความเข้มของแสงตอบสนองต่อแสงทางชีวภาพ (biological light response, BLR) ในร่างกายที่แตกต่างกัน โดยความแตกต่างระหว่างการส่องสว่างแบบ photopic และแสงในรอบวัน (circadian light) คือ การตอบสนองต่อแสงของดวงตาแบบที่

เกี่ยวข้องกับการมองเห็น (visual responses) และการตอบสนองต่อแสงที่ไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็น (non-visual responses)

นอกจากนี้ระบบเมตริกและระบบต่าง ๆ ได้ให้นิยามถึงปริมาณแสงในอาคารโดยการวัดความส่องสว่างของแสง โดยกำหนดการตั้งค่าความเข้มแสงที่ระดับสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยที่จำเป็นตามมาตรฐานของแหล่งกำเนิดแสงแต่ละชนิด อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยล่าสุดได้ระบุถึงความจำเป็นในการพิจารณาถึงความส่องสว่างของแสงในรอบวัน เนื่องจากแสงมีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ โดยการตอบสนองทางชีวภาพ สามารถนำไปใช้เพื่อการอ้างอิงถึงผลที่มีต่อมนุษย์กับการตอบสนองที่ไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็น และเป็นพารามิเตอร์แสงอื่น ๆ ที่ละเอียดมากขึ้น เช่น ระยะเวลาในการได้รับแสงนั้น ๆ และประวัติการได้รับแสง เป็นต้น โดยการวัดแสงทั่วไปจะพิจารณาแสงกลางวันบนพื้นผิวแนวนอน เช่น ที่ความสูงของโต๊ะซึ่งอยู่ห่างจากพื้น 80 เซนติเมตร อย่างไรก็ตามการใช้วิธีนี้เหมาะสมกับการวัดในอาคารสำนักงานมากกว่า ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องมียกระดับแสงที่เฉพาะเจาะจงบนโต๊ะทำงาน กรณีนี้ไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะในอาคารที่อยู่อาศัยเนื่องจากผู้อยู่อาศัยมีโอกาสที่จะเคลื่อนที่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงปัจจัยอื่น ๆ ของผู้ใช้ร่วมด้วย เช่น ผลต่อทางจิตวิทยาของแสงและการมีพื้นที่ผ่อนคลายทำให้ผู้อยู่อาศัยมีความรู้สึกสบายเมื่ออยู่ในบ้าน ซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่เอื้อต่อคุณภาพของแสง

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับผู้ใช้นั้นยากที่จะประเมินได้อย่างชัดเจนเนื่องจากมีความแตกต่างกันอย่างมากระหว่างเพศ วัฒนธรรม และกลุ่มอายุที่แตกต่างกัน แต่เป็นปัจจัยหลักที่ควรนำมาพิจารณาในระหว่างการออกแบบที่อยู่อาศัย การประเมินพื้นที่อยู่อาศัยโดยอาศัยการส่องสว่างด้วยแสง (photopic illuminance) เพียงอย่างเดียวนั้นจึงไม่เพียงพอ เนื่องจากควรมีการประเมินที่บ่งชี้ถึงการตอบสนองความต้องการทางชีวภาพโดยเฉพาะการตอบสนองที่ไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็น

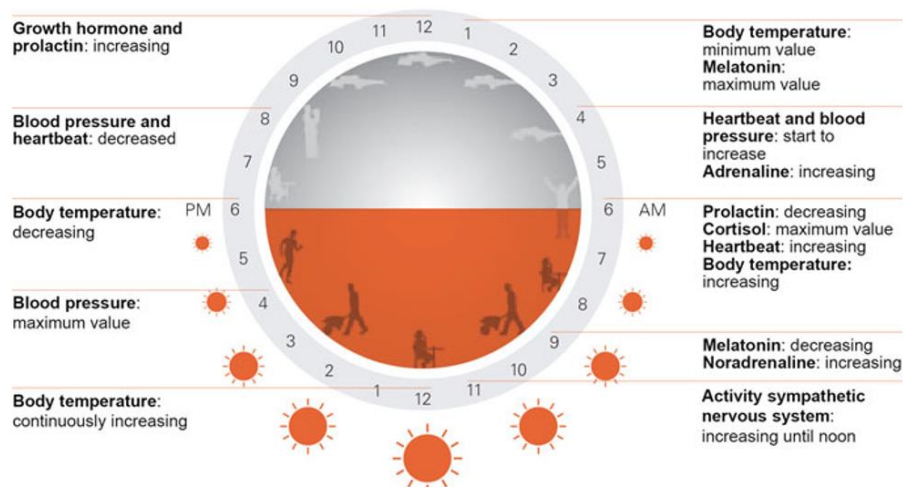
2.1.1 ผลของแสงในรอบวันต่อมนุษย์

แสงมีผลต่อสรีรวิทยา กระบวนการเมตาบอลิซึม (metabolism) และพฤติกรรมของมนุษย์อย่างมาก ซึ่งวัฏจักรประจำวันของแสงกลางวันและกลางคืนเรียกว่า “แสงในรอบวัน (circadian rhythms)” เป็นนาฬิกาชีวิตประจำวันเนื่องจากแสงในรอบวันมาจากภาษาละตินแปลว่า “รอบ” และ “วัน” ดังนั้นจึงแปลตามตัวอักษรว่าเป็น “ประมาณหนึ่งวัน” อย่างไรก็ตามแสงในรอบวันไม่ได้คงอยู่ตลอด 24 ชั่วโมง เนื่องจากวัฏจักรนี้ต้องได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้าภายนอกซึ่งก็คือความสว่างสลับกับความมืดในแต่ละวัน [56]

นอกจากแสงที่เกี่ยวกับการมองเห็นของมนุษย์แล้ว แสงในรอบวันมีส่วนช่วยให้กระบวนการต่าง ๆ ในร่างกาย เช่น วัฏจักรการนอนและการตื่นนอน อุณหภูมิของร่างกาย การตื่นตัว และประสิทธิภาพการทำงานของร่างกาย รวมถึงการผลิตฮอร์โมน [57] กระบวนการที่กล่าวข้างต้น

สามารถจัดอยู่ในประเภทการตอบสนองแสงทางชีวภาพ (biological light responses) ซึ่งเป็นการตอบสนองที่ไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็น (non-visual response) ที่มีการควบคุมโดยตัวรับแสงชนิดต่าง ๆ ในเรตินาของดวงตา การตอบสนองแสงทางชีวภาพ (biological light responses) ถูกควบคุมโดยตัวรับแสงที่ไม่ใช่เซลล์รูปแท่งและเซลล์รูปกรวยของดวงตามนุษย์ที่เรียกว่าเซลล์ประสาทตา (intrinsically photosensitive retinal ganglion cells; ipRGCs) ตัวรับแสงนี้ถูกค้นพบในปี ค.ศ.1990 และเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจในการทำวิจัยจำนวนมาก ซึ่งมีการกล่าวถึงผลกระทบของแสงที่ไม่เกี่ยวกับการมองเห็นของแสง (non-visual effects of light) ซึ่งตัวรับนี้มีรงควัตถุรับแสง (photopigment) ชื่อเมลานอพซิน (melanopsin) ที่มีความไวต่อแสงความยาวคลื่นแสงสั้น (สีน้ำเงิน) ที่ $\lambda_{\max} \cong 460 - 480$ นาโนเมตร เมื่อเทียบกับโฟโตพิกที่มีความยาวคลื่นแสงที่ $\lambda_{\max} = 555$ นาโนเมตร ซึ่งการตอบสนองของตัวรับแสงของเซลล์รูปกรวย พบว่าความไวสูงสุดของ ipRGCs นั้นยังไม่ชัดเจนทั้งหมด เนื่องจากนักวิจัยมีการค้นพบที่แตกต่างกัน ipRGCs มีหน้าที่ส่งสัญญาณเหนี่ยวนำแสงไปยังกับซูพราไคแอสมาติกนิวเคลียส (suprachiasmatic nucleus; SCN) ที่มีประมาณ 50,000 เซลล์ ที่อยู่ในสมองส่วนไฮโปทาลามัส (Hypothalamus) ซึ่งอยู่ภายใต้การควบคุมการทำงานของยีนเวลา (clock genes) และตอบสนองต่อสัญญาณของแสงหรือความมืดที่ส่งต่อมาจากระบบประสาทของดวงตา [58] จากนั้น SCN จะส่งสัญญาณไปยังส่วนอื่น ๆ ของสมอง (pineal gland) เพื่อควบคุมระยะเวลาของการตอบสนองแสงทางชีวภาพที่แตกต่างกัน เช่น ระบบฮอริโมน ระบบควบคุมอุณหภูมิในร่างกาย และระบบการทำงานของร่างกายอื่น ๆ ซึ่งได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ [56]

ทั้งนี้ร่างกายของเราจะอยู่ในสภาวะหลับหรือตื่นได้นั้น จะขึ้นอยู่กับสัญญาณ SCN ที่ส่งมาจากสมองส่วนไฮโปทาลามัส หากเป็นตอนเช้าสัญญาณจะส่งผลให้ร่างกายมีอุณหภูมิมากขึ้น และกระตุ้นให้ร่างกายสร้างฮอริโมนคอร์ติซอล (cortisol) ซึ่งเป็นฮอริโมนที่เกี่ยวกับการใช้พลังงานการสันดาปในร่างกายและชะลอการหลั่งฮอริโมนเมลาโทนิน (melatonin) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการนอนหลับ ซึ่งในขณะที่เวลากลางคืนสัญญาณจะส่งไปยังระบบฮอริโมนเพื่อเพิ่มการหลั่งของฮอริโมนเมลาโทนิน และทำให้สามารถหลับได้นั่นเอง ซึ่งเวลาการนอนของแต่ละคนอาจไม่ตรงกันด้วยเหตุนี้ เป็นผลมาจากการกลายพันธุ์ของยีนเวลา ได้แก่ กลุ่มตื่นเช้านอนเร็ว (lark phenotype) จะทำให้นาฬิกาชีวิตที่เริ่มต้นทำงานแต่เช้า และส่งผลให้เข้านอนเร็วพบได้บ่อยในผู้สูงอายุ และกลุ่มตื่นสายนอนช้า (owl phenotype) จะตื่นในช่วงกลางวันหรือช่วงบ่าย และจะเข้านอนในช่วงใกล้เช้าทำให้นาฬิกาชีวิตจะค่อนข้างสลับกับกลุ่มตื่นเช้านอนเร็ว พบได้ในกลุ่มวัยรุ่น ผู้ใหญ่ตอนต้น และผู้ที่ทำงานในเวลา กลางคืน



ภาพที่ 2.1 ผลของแสงต่อกิจวัตรประจำวันของมนุษย์

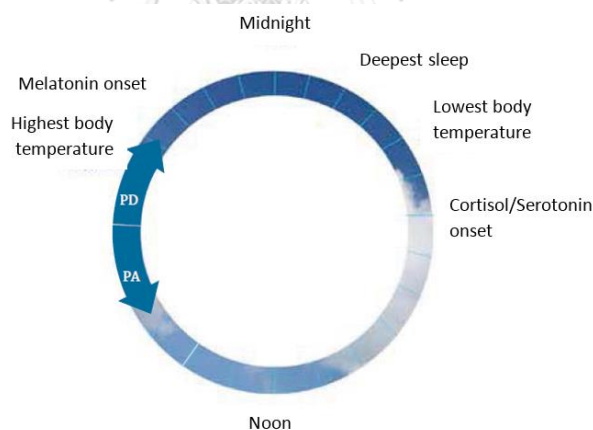
ที่มา: Rossi (2019)

แม้ว่าเซลล์ประสาทตา (ipRGCs) จะเป็นตัวรับแสงหลักแต่ตัวรับแสงอื่น ๆ สามารถมีส่วนร่วมในการตอบสนองแสงทางชีวภาพผ่านกลไกต่าง ๆ ได้เช่นกัน ซึ่งในงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าการได้รับแสงสลัวเป็นระยะสั้น ๆ ที่มีความยาวคลื่นแสงในช่วงแคบประมาณ 555 นาโนเมตรสามารถรักษาการตอบสนองที่ไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็นได้อย่างต่อเนื่องโดยการกระตุ้นเซลล์รับแสงรูปกรวย [59] ดังนั้นการร่วมกันทำงานของเซลล์รูปแท่ง เซลล์รูปกรวย และเซลล์ประสาทตา ipRGCs ต่อการตอบสนองที่ไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็นยังคงได้รับความสนใจและเป็นเรื่องของการวิจัยต่อไปในอนาคต [60]

เนื่องจากความไวสูงสุดของเซลล์ประสาทตา (ipRGCs) มีแนวโน้มไปทางแสงสีน้ำเงิน ประเภทของการได้รับแสงจึงมีส่วนสำคัญในการกระตุ้นการตอบสนองแสงทางชีวภาพ โดยจากงานวิจัยต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเทียบกับแสงสีขาวแล้ว แสงสีน้ำเงินช่วยกระตุ้นการตื่นตัว ประสิทธิภาพทางอารมณ์และคุณภาพการนอนหลับ [61] สำหรับข้อเสียนั้นจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาการได้รับแสง ซึ่งหลายงานวิจัยได้กล่าวถึงข้อเสียหากมีการสูญเสียสมดุลของแสงในรอบวัน โดยพบว่าเวลาในการสัมผัสกับแสงกลางวันส่งผลกระทบต่อร่างกาย และมีผลเสียต่อประสิทธิภาพการตื่นตัวรวมทั้งสุขภาพของมนุษย์หากไม่ได้รับแสง [56] โดยฮอร์โมนบางตัวที่ผลิตในระหว่างวัน ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.2 [62] เช่น การผลิตเมลาโทนินสูงสุดในเวลากลางคืนและลดลงในระหว่างวัน ซึ่งจะควบคุมวัฏจักรการนอนหลับ [63, 64] งานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการได้รับแสงจ้าในเวลากลางคืนสามารถกดเมลาโทนินได้โดยตรงและกระตุ้นให้เมลานอพซินชะลอระยะเวลาการนอนหลับและลดความง่วงนอนในกระบวนการที่เรียกว่า phase delay [64, 65] นอกจากนี้การได้รับแสงจ้าในเวลา

กลางวัน (สูงกว่า 1,000 ลักซ์) จะช่วยลดความง่วงนอนและเพิ่มประสิทธิภาพซึ่งเรียกว่า phase advance ซึ่งทำให้เลื่อนช่วงเวลาการนอนออกไป [66]

เมื่อนาฬิกาชีวิต (circadian clock) สูญเสียการนอนจะมีผลกระทบต่อภาวะที่เกี่ยวข้องกับสุขภาพอื่น ๆ เช่น อาการเจ็ทแลก (jet lags) หรืออาการเปลี่ยนแปลงของเวลาในการรับแสงอันเนื่องมาจากการเดินทางด้วยเครื่องบินระยะไกล หรือความผิดปกติในการทำงานเป็นกะ (shift work disorders) ซึ่งในอาการการเดินทางด้วยเครื่องบินระยะไกลที่ต้องผ่านเส้นแบ่งเวลาอาจส่งผลให้นาฬิกาชีวิตไม่สามารถทำงานได้ตามปกติเพราะนาฬิกาชีวิตจะไม่สามารถปรับตัวเข้าสู่วงจรความมืด-ความสว่างได้ในทันทีและส่งผลให้ร่างกายเกิดอาการอ่อนเพลีย เนื่องจากต้องใช้เวลาประมาณหนึ่งวันต่อเขตเวลา (a day per time zone) อย่างไรก็ตามอาการเจ็ทแลกไม่รุนแรงเท่ากับความผิดปกติของการทำงานกะ (shift work disorders) ที่คนทำงานในตอนกลางคืนและนอนหลับระหว่างวันจึงเป็นการต่อต้านแสงในรอบวัน [67, 68] เนื่องจากอาจส่งผลในระยะสั้น ความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุและการบาดเจ็บจากการง่วงนอนและความเสี่ยงต่อสุขภาพในระยะยาว [61, 69] นอกจากนี้งานวิจัยพบว่าเด็กที่ใช้จอแสดงผลแบบเรืองแสง เช่น ไอแพด (ipads) ในเวลากลางคืนทำให้นอนหลับได้ล่าช้า [70] ดังนั้นระยะเวลา ความเข้มสเปกตรัมของแสง และเวลาในการได้รับแสงเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการตอบสนองแสงทางชีวภาพของมนุษย์ [71]



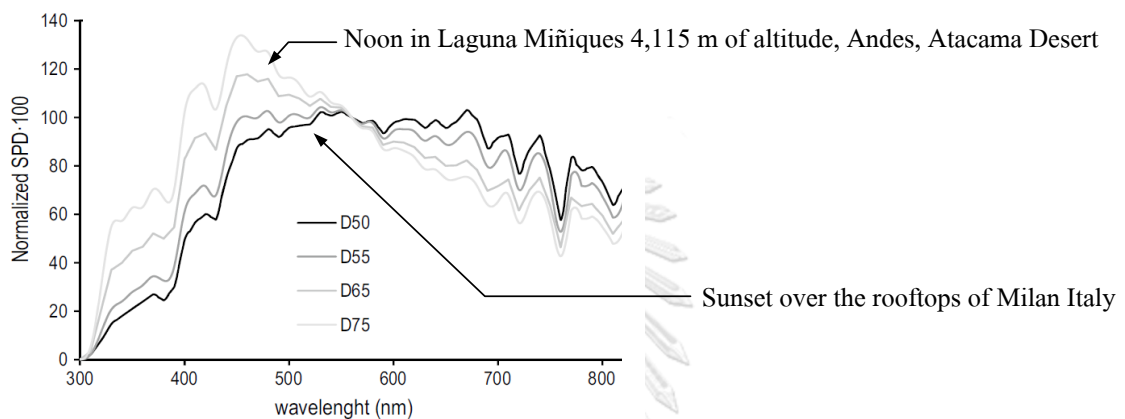
ภาพที่ 2.2 วัฏจักรฮอร์โมนในรอบวัน

ที่มา: Mardaljevic *et al.* (2012)

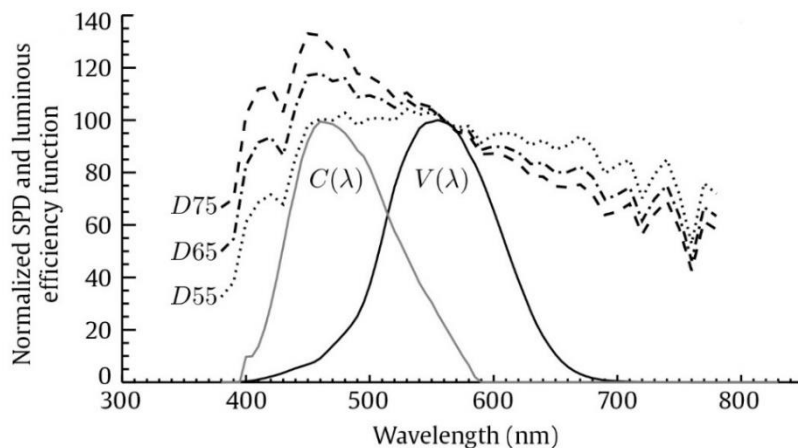
2.1.2 โฟโตเมตริกกับการรับรู้แสงของมนุษย์

ตัวแปลงสัญญาณแสงในดวงตาประกอบด้วย เซลล์รูปแท่ง เซลล์รูปกรวยที่ตอบสนองต่อแสงในช่วงคลื่นสั้น กลาง ยาว และ ipRGCs ตามที่กล่าวมานี้ความไวต่อสเปกตรัมของการมองเห็นของมนุษย์และช่องสัญญาณแสงในรอบวัน เช่น วิธีที่มนุษย์ตอบสนองต่อความยาวคลื่นที่แตกต่างกันของแสงจะถูกระบุว่าเป็นฟังก์ชันประสิทธิภาพการส่องสว่างโฟโตปิกต่อแสงในรอบวัน

(photopic/circadian) ที่แตกต่างกันของแสงทั้งสองฟังก์ชันโดยจะวัดจากพลังงานจากสเปกตรัมของแสง เพื่อการวัดความเข้มของการส่องสว่าง ตัวอย่างคือฟังก์ชันประสิทธิภาพการส่องสว่างของ photopic ($V(\lambda)$) ซึ่งคูณและรวมเข้ากับการกระจายพลังงานของสเปกตรัม (spectrum power distribution, SPD) ที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงเพื่อตรวจสอบความเข้มของการส่องสว่างของ ตัวอย่างแสดงดังในภาพที่ 2.3 [56] D75 D65 และ D55 ตามมาตรฐาน CIE และแหล่งกำเนิดแสงที่มีการกระจายพลังงานของสเปกตรัมที่แตกต่างกันในความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.3 การกระจายพลังงานของสเปกตรัมของแสงธรรมชาติตั้งแต่ 5,000 – 7,500 เคลวิน
ที่มา: Rossi (2019)



ภาพที่ 2.4 โฟโตปิก ($V(\lambda)$) แสงในรอบวัน ($C(\lambda)$) ฟังก์ชันประสิทธิภาพการส่องสว่างและการกระจายพลังงานของสเปกตรัมของแสง
ที่มา: Shalaby (2017)

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าฟลักซ์ความส่องสว่างของโฟโตปิก (photopic luminous flux) ดังสมการต่อไปนี้

$$\Phi_{\text{Photo}}(\text{lm}) = 683 \int_{380}^{780} V(\lambda) \Phi_{\text{radio}}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

เมื่อ

Φ_{Photo} คือฟลักซ์ความส่องสว่างของโฟโตปิกในหน่วยลูเมน

683 คือประสิทธิภาพความส่องสว่างของโฟโตปิกในหน่วยลูเมนต่อวัตต์

$V(\lambda)$ คือฟังก์ชันประสิทธิภาพความส่องสว่างของโฟโตปิก

$\Phi_{\text{radio}}(\lambda)$ คือสเปกตรัมการแผ่รังสีในช่วงที่มองเห็นในหน่วยวัตต์

โดยสมการดังกล่าวมีความแตกต่างจากการคำนวณหาค่าฟลักซ์ความส่องสว่างของแสงในรอบวัน (circadian luminous flux) ดังนี้

$$\Phi_{\text{circadian}}(\text{lm}) = 4557 \int_{380}^{780} C(\lambda) \Phi_{\text{radio}}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

เมื่อ

$\Phi_{\text{circadian}}$ คือฟลักซ์ความส่องสว่างของแสงในรอบวันในหน่วยลูเมน

4557 คือประสิทธิภาพความส่องสว่างของแสงในรอบวันหน่วยลูเมนต่อวัตต์

$C(\lambda)$ คือฟังก์ชันประสิทธิภาพความส่องสว่างของแสงในรอบวัน

$\Phi_{\text{radio}}(\lambda)$ คือสเปกตรัมการแผ่รังสีในช่วงที่มองเห็นในหน่วยวัตต์

ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักสเปกตรัม (spectral weighting function) จะใช้เพื่อให้ได้ค่าทั้งหมดที่ได้จากการวัดแสงดังที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ ตัวอย่างของหน่วยต่าง ๆ ที่ใช้แสดงอยู่ในตารางที่ 2.1 [72] ตัวชี้วัดมี 2 อย่าง คือประสิทธิภาพความส่องสว่างและความสว่าง ประสิทธิภาพการส่องสว่าง คืออัตราส่วนของลูเมนทั้งหมดที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงหารด้วยวัตต์จะเท่ากับลูเมน อย่างไรก็ตามฟังก์ชันนี้ไม่สามารถใช้ได้โดยตรงในการจำลองสำหรับการคำนวณโฟโตปิก และค่าความสว่างของแสงในรอบวันดังสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

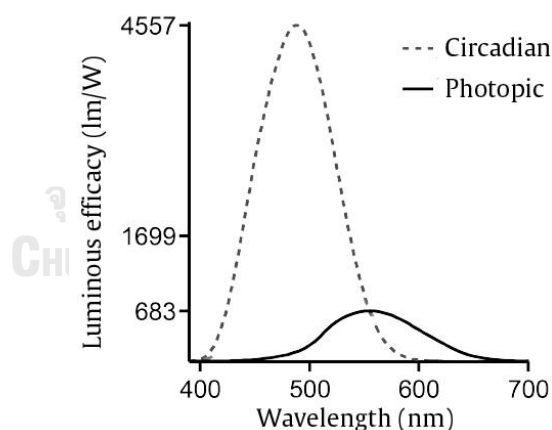
ตารางที่ 2.1 หน่วยโฟโตเมตริกทั่วไปที่ใช้

	Unit	Abbreviation	Equivalence
ความเข้มส่องสว่าง (Luminous intensity)	แคนเดลา	cd	lm/sr
ฟลักซ์ส่องสว่าง (Luminous flux)	ลูเมน	lm	lm/4πsr
ความเข้มแสง (Illuminance)	ลักซ์	lux	lm/m ²
ประสิทธิภาพส่องสว่าง (Luminous efficacy)	-	-	lm/W

หมายเหตุ: ความเข้มแสง 1 ฟุตแคนเดิล มีค่าเท่ากับ 10.76 ลักซ์ หน่วยพื้นฐาน คือแคนเดลา (candela; cd) ซึ่งเป็นหน่วยของความเข้มส่องสว่าง (luminous intensity) หรือแรงเทียน (candle power)

ที่มา: Amundadottir, *et al.* (2015) และ ไชยะ แซ่มซ้อย (2544)

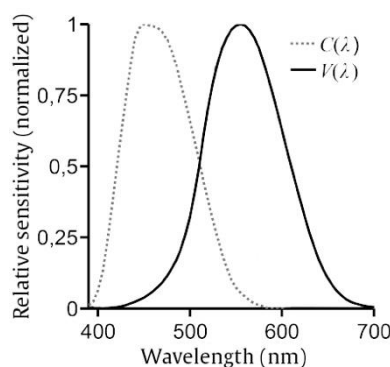
เส้นโค้งประสิทธิภาพส่องสว่างแบบโฟโตปิกและแสงในรอบวันมีประสิทธิภาพส่องสว่างที่แตกต่างกันดังในภาพที่ 2.5 [73] ซึ่งค่าของโฟโตปิกและแสงในรอบวัน (683 ลูเมนต่อวัตต์ และ 4,557 ลูเมนต่อวัตต์) ในสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเซลล์ประสาท (ganglion cells) มีความไวต่อแสงเป็นฟลักซ์การแผ่รังสีขนาดเล็ก (radiometric flux) จะผลิตฟลักซ์ของแสงในรอบวันสูงในหน่วยของลูเมนส์



ภาพที่ 2.5 โฟโตปิกและประสิทธิภาพส่องสว่างของแสงในรอบวัน

ที่มา: Amundadottir, *et al.* (2015) และ ไชยะ แซ่มซ้อย (2544)

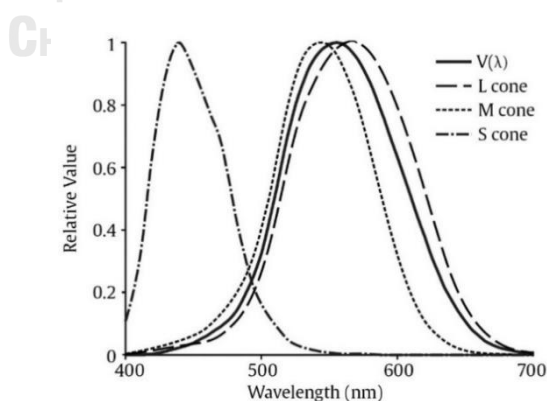
เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบความไวของเส้นโค้งทั้งสองได้ดังภาพที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าการตอบสนองของแสงในรอบวันนั้นเลื่อนไปทางสีน้ำเงิน ซึ่งเกี่ยวกับการตอบสนองแบบโฟโตปิกและเส้นโค้งนี้สามารถนอร์มัลไลเซชัน (normalization) โดยการแจกแจงทำให้เป็นบรรทัดฐานที่ 100 หรือ 1 ได้ดังนี้



ภาพที่ 2.6 ความไวสัมพัทธ์ของฟังก์ชันประสิทธิภาพส่องสว่างแบบโฟโตพิกและแสงในรอบวัน
ที่มา: Shalaby (2017)

2.1.2.1 ฟังก์ชันประสิทธิภาพส่องสว่างแบบโฟโตพิก

การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าประสิทธิภาพส่องสว่างแบบโฟโตพิกที่แตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 2.7 [72] ซึ่งมีจุดสูงสุดประมาณ 555 นาโนเมตร ($V(\lambda)$) ซึ่งเป็นมาตรฐานระดับสากลโดย CIE ในปี 1924 (Commission International de l'Éclairage, 1924) ฟังก์ชันนี้ถูกใช้โดยนักวิจัยและโปรแกรมจำลองคอมพิวเตอร์ดังในภาพที่ 2.7 $V(\lambda)$ ขึ้นอยู่กับเซลล์รูปกรวยทำหน้าที่เป็นเซลล์รับแสงในที่สว่างซึ่งสามารถแบ่งย่อยได้ 3 ประเภท คือ L cones มีหน้าที่ในการรับแสงช่วงความยาวคลื่นยาว (แสงสีแดง) และ M cones มีหน้าที่ในการรับแสงช่วงความยาวคลื่นปานกลาง (แสงสีเขียว) และ S cones มีหน้าที่ในการรับแสงช่วงความยาวคลื่นสั้น (แสงสีน้ำเงิน) โดยเมื่อเซลล์รูปกรวยรวมกันอยู่บริเวณ fovea ทำให้สามารถมองเห็นรูปที่มีความชัดเจนมากที่สุดและสามารถจำแนกสีได้ จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงเป็นที่มาของแม่สีของแสงที่มองเห็นสี แดง เขียว และน้ำเงิน หรือ RGB



ภาพที่ 2.7 ฟังก์ชันประสิทธิภาพการส่องสว่างแบบโฟโตพิกและเซลล์รูปกรวยทั้งสามแบบ
ที่มา: Shalaby (2017); Rea (2013)

2.1.2.2 ฟังก์ชันประสิทธิภาพส่องสว่างของแสงในรอบวัน

การกำหนดประสิทธิภาพส่องสว่างของแสงในรอบวันอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแสงกับตัวรับแสงที่มีเมลานอปซิน (melanopsin-containing) หรือ ipRGC (intrinsically photosensitive retinal ganglion cells) ซึ่งมีหน้าที่เป็นตัวรับแสงหลักในการตอบสนองที่ไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็น (ค่าสูงสุดที่ 480 นาโนเมตร) [40, 74] นอกจากนี้ยังมีกลไกอื่น ๆ ที่แสงสามารถกระตุ้นตัวรับแสงประเภทต่าง ๆ เพื่อเพิ่มการตอบสนองแบบไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็นประเภทต่าง ๆ ตัวอย่างของฟังก์ชันประสิทธิภาพส่องสว่างของแสงในรอบวันที่แตกต่างกันแสดงในภาพที่ 2.8 โดยฟังก์ชันเสนอโดย Gall ในปี ค.ศ.2004 [75]

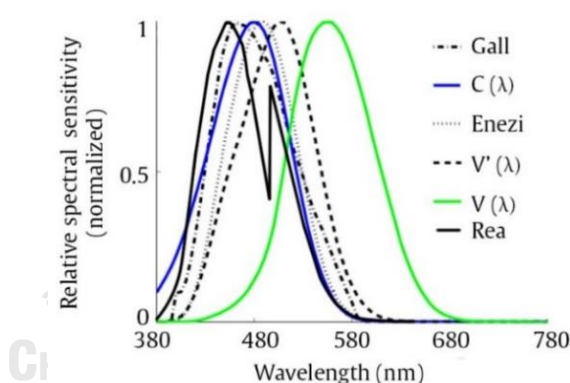
$C(\lambda)$ คือฟังก์ชันแสงในรอบวันมีค่าสูงสุดที่ 480 สำหรับ ipRGC ที่มีเมลานอปซิน

Enezi คือฟังก์ชันที่เสนอโดย Enezi ในปี ค.ศ. 2011 [76]

$V'(\lambda)$ คือฟังก์ชันสโคโตปิก

$V(\lambda)$ คือฟังก์ชันโฟโตปิก

Rea คือฟังก์ชันแหล่งกำเนิดแสงสีเดียวที่เสนอโดย Rea ในปี ค.ศ. 2011

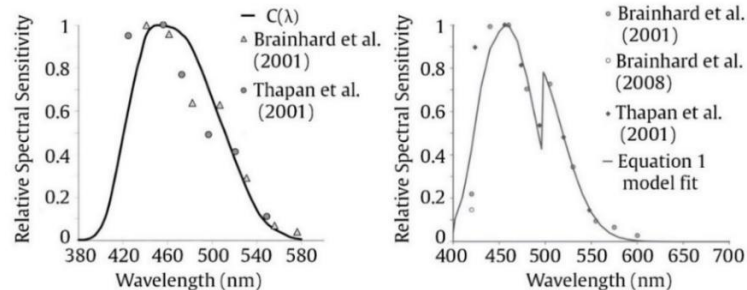


ภาพที่ 2.8 ฟังก์ชันประสิทธิภาพที่แตกต่างกันของแสงในรอบวัน

ที่มา: Shalaby (2017); Berson, *et al.* (2002); Hattar, *et al.* (2002)

เป็นที่น่าสังเกตว่าค่าสเปกตรัมสูงสุดของเมลานอปซินเกิดขึ้นที่ 480 นาโนเมตร แต่เส้นโค้งบางส่วนในภาพที่ 8 มีค่าสูงสุดที่ประมาณ 460 นาโนเมตร รวมถึงค่าที่เสนอโดย “Gall” และ “Rea” นอกจากนี้ยังเป็นที่น่าสนใจของ “Enezi” ในปี ค.ศ.2011 และ “Rea” ได้สร้างงานวิจัยในปี ค.ศ.2012 มีสองฟังก์ชันที่แตกต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยที่ผ่านมาดังกล่าวจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและทดสอบต่อไปในอนาคต เพื่อให้สามารถตรวจสอบความถูกต้องและรวมฟังก์ชันประสิทธิภาพส่องสว่างของแสงในรอบวัน [46, 77] ซึ่งฟังก์ชันนี้ขึ้นอยู่กับข้อมูลการกตเมลาโทนินแบบฉับพลันที่ถูก

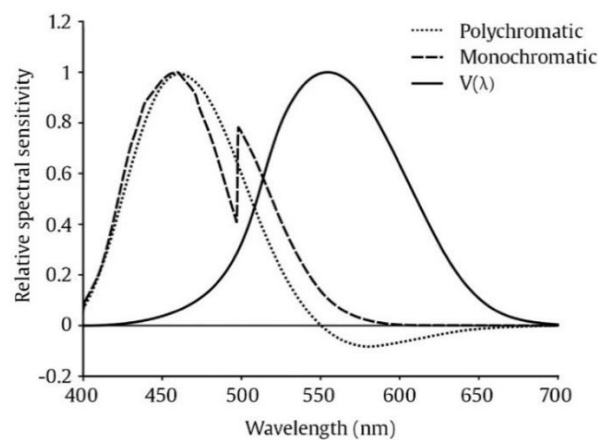
นำเสนอโดย Brainard และ Thapan ในปี ค.ศ.2001 [7, 9] โดยค่าสูงสุดของความยาวคลื่นแสงอยู่ที่ 460 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ฟังก์ชัน “Gall” (ซ้าย) และฟังก์ชัน “Rea” (ขวา)

ที่มา: Gall (2004); Rea, *et al.* (2012); Brainard and Thapan (2001); Brainard *et al.* (2008); Thapan *et al.* (2001)

ฟังก์ชันที่เสนอโดย Rea ประกอบด้วยเส้นโค้งความไวสำหรับแสงสีเดียวและหลายสีดังภาพที่ 2.10 เช่นเดียวกับฟังก์ชันที่เสนอโดย Gall (2004) โดยอ้างอิงจากผลงานของ Brainard and Thapan (2001) แต่มีรายละเอียดมากกว่าหนึ่งที่เสนอโดย Gall และรวมถึงงานวิจัยล่าสุด นอกจากนี้การพิจารณาฟังก์ชันสำหรับแสงหลายสี (polychromatic light) จะเป็นประโยชน์ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแสงจากท้องฟ้า (skylight) โดยจะรวมอยู่ในการจำลองโดยมีสเปกตรัมในรูปแบบฟังก์ชันแสงหลายสี ในภาพที่ 2.10 [72] จึงถูกเสนอให้ใช้ในหลาย ๆ งานวิจัยเพื่อคำนวณ “ความส่องสว่างของแสงในरोอบวัน” ในขณะที่ “Gall” จะใช้ข้อมูลอ้างอิงในการคำนวณบางส่วนเท่านั้นเนื่องจากการใช้งานในงานวิจัยก่อนหน้านี้โดย [56] ฟังก์ชันหลายสีมีพื้นที่เชิงลบระหว่าง 550 – 730 นาโนเมตร



ภาพที่ 2.10 สเปกตรัมจากฟังก์ชันของแสงแบบสีเดียวและแบบหลายสี

ที่มา: Shalaby (2017); Andersen, *et al.* (2012)

2.1.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสมบัติแสงแบบโฟโตเมตริก

ค่าสำคัญที่สุดของปริมาณแสงของการแผ่รังสี (Radiometric) และโฟโตเมตริก (photometric) คือส่องสว่างและความส่องสว่าง ค่าดังกล่าวเกี่ยวข้องกับความไวของเซลล์รับแสงในดวงตามนุษย์ โดยการส่องสว่างจะแสดงด้วยกำลังของแสงต่อมุมตันต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย ($W_{opt}/(m^2sr)$) ซึ่งในขณะที่ความส่องสว่าง คือปริมาณความสว่างของแสงที่มีประโยชน์สำหรับดวงตามนุษย์ โดยใช้ฟังก์ชันความไวของการแผ่รังสีสเปกตรัม $P_L(\lambda)$ ในขอบเขตการมองเห็น $V(\lambda)$ สามารถคำนวณดังสมการที่ 3 มีหน่วยเป็น $lm/(m^2sr)$ หรือ cd/m^2

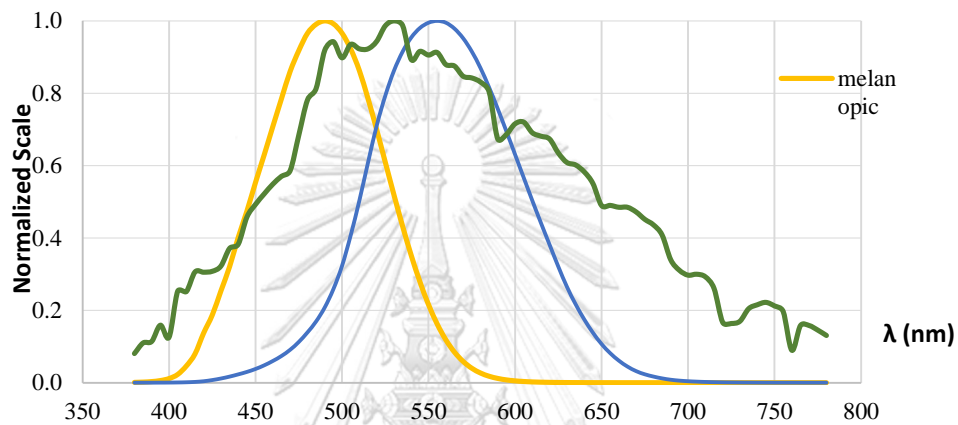
$$L = 638 \text{ lm}/w_{opt} \int P_L(\lambda)V(\lambda)d\lambda \quad (3)$$

ระดับความสว่างจะใช้สำหรับการกำหนดขอบเขตของการมองเห็น จากการศึกษาในช่วงแรกพบว่ามีขีดจำกัดความสว่างของช่วงโฟโตปิกและสโคโตปิกนั้นแตกต่างกันในช่วง 0.003 – 10 แคนเดลา/ตารางเมตร และ 0.001 – 3 แคนเดลา/ตารางเมตร ตามลำดับ ในการศึกษาดังกล่าวซึ่งเป็นฟังก์ชันความไวแสงต่อดวงตาที่บ่งชี้ถึงการตอบสนองของเซลล์รูปแท่งและเซลล์รูปกรวย ซึ่งกำหนดพร้อมกับการตอบสนองต่อการมองเห็น โดยช่วงสโคโตปิกเป็นช่วงที่ตัวรับแสงเซลล์รูปแท่งทำงานอย่างเดียวในการมองเห็นวัตถุต่าง ๆ เป็นสีขาว-ดำ แต่จะไม่สามารถจำแนกสีของแสงได้ และทำหน้าที่รับแสงสว่างที่ไวต่อแสงที่มีความเข้มน้อย (แสงสว่างสลัว) โดยค่าความไวสูงสุดที่ความยาวคลื่น 507 นาโนเมตร ในทางกลับกันการมองเห็นช่วงโฟโตปิกเป็นช่วงที่เซลล์รูปกรวยทำงานอย่างเดียวและจะเป็นการมองเห็นวัตถุต่าง ๆ ที่สามารถจำแนกแสงแต่ละสีได้เช่นเดียวกับสภาพความรู้สึกสีได้ของดวงตาและจะทำหน้าที่ไวเฉพาะแสงที่มีความเข้มแสงสูง ซึ่งเซลล์รูปกรวยที่มีความไวต่อแสงที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตร และการมองเห็นช่วงเมโซปิก (mesopic) ซึ่งอยู่ระหว่างช่วงโฟโตปิกและสโคโตปิกของช่วงเซลล์รูปกรวยและเซลล์รูปแท่งทั้งสองที่ทำงานร่วมกันจะทำให้สามารถมองเห็นวัตถุต่าง ๆ ในลักษณะสีปนขาวและดำที่ถูกต้องและสามารถบอกรายละเอียดของวัตถุได้อย่างชัดเจนเมื่อได้รับแสงสว่าง โดยในปี ค.ศ. 2010 มีการรายงานใหม่เพิ่มเติมเกี่ยวกับระบบการวัดที่ได้รับการแนะนำที่เสนอโดย CIE ซึ่งการระบุขอบเขตระหว่างการมองเห็นของโฟโตปิกและเมโซปิกได้ปรับเป็น 0.005 แคนเดลา/ตารางเมตร และระหว่างการมองเห็นแบบเมโซปิกและโฟโตปิกเป็น 5 แคนเดลา/ตารางเมตร ความสว่างของเมโซปิก จะแสดงโดย L_{mes} และ m ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับระหว่างการปรับตัวทางสายตา สามารถคำนวณได้ดังสมการ (4) และ (5) ตามลำดับ โดย $V(\lambda)$ $V'(\lambda)$, และ $V_{mes}(\lambda)$ คือ โฟโตปิกกับสโคโตปิกและฟังก์ชันความไวของดวงตาแบบเมโซปิก ตามลำดับ $P(\lambda)$ คือ การแผ่รังสีของสเปกตรัม $M(m)$ เป็นค่าคงที่นอร์มัลไลเซชันเท่ากับค่าสูงสุดของ $V_{mes}(\lambda)$ ถึง 1 และ λ_0 คือ 555 นาโนเมตร

$$M(m)V_{mes}(\lambda) = mV(\lambda) + (1-m)V'(\lambda) \quad (4)$$

$$L_{mes} = 683/V_{mes}(\lambda_0) \int V_{mes}(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

ฟังก์ชันความไวของดวงตาที่สอดคล้องกันสำหรับแสงสว่างโตปิกดังในภาพที่ 2.11 และฟังก์ชันความไวของขอบเขตเมลาโนปิก (melanopic regime) สำหรับส่องสว่างโฟโตปิกของแสงที่ 0.5 แคนเดลา/ตารางเมตร โดยขอบเขตการมองเห็นจำเป็นต้องกำหนดปริมาณการแผ่รังสีและโฟโตเมตริก

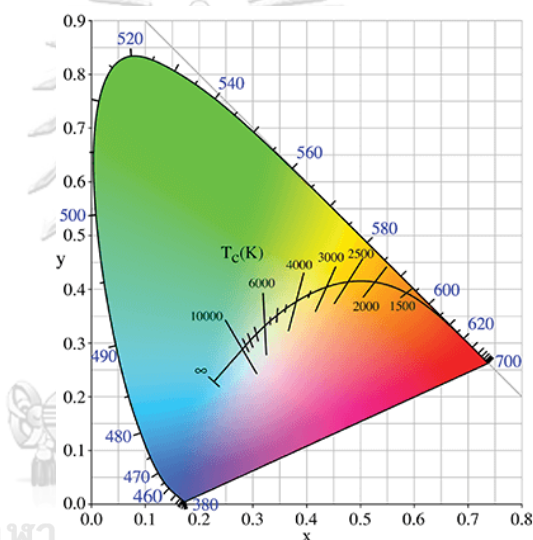


ภาพที่ 2.11 ฟังก์ชันความไวของดวงตาที่สอดคล้องกันสำหรับแสงสว่างโตปิกและเมลาโนปิก
ที่มา: ดัดแปลงจาก Rea (2013)

2.1.3.1 พิกัดบนแผนภาพสี

การระบุถึงสีของแหล่งกำเนิดแสงที่ไม่ขึ้นอยู่กับความส่องสว่างสามารถหาได้จากค่าไตรสติมุลัส ซึ่งหมายถึงค่า x , y และ z โดยจะแสดงเป็นพิกัดสีที่มีค่าผลรวมเท่ากับ 1 เสมอ [26] ดังนั้นในการรายงานค่าพิกัดสีสามารถรายงาน หรือคำนวณได้จากค่า x , y และ Y (ความสว่าง) [26] ดังแผนภาพระนาบสองมิติที่แสดงในภาพที่ 2.12 ซึ่งเป็นการแสดงพิกัดบนแผนภาพสี CIE 1931 (x , y) โดยมีเส้นด้านนอกของพิกัดบนแผนภาพสีเรียกว่าสเปกตรัมโลกัส (spectral locus) และมีความยาวคลื่นแสงเป็นหน่วยนาโนเมตร โดยมีเส้นภายในโค้ง คือเส้นโลกัสของวัตถุดำ (blackbody locus) หรือ พลาซเคียนโลกัส (planckian locus) ซึ่งใช้ระบุพิกัดบนแผนภาพสีของการแผ่รังสีวัตถุดำ (blackbody radiator) ที่อุณหภูมิสัมพัทธ์ต่าง ๆ ทั้งนี้พิกัดบนแผนภาพสีสามารถใช้เพื่อแสดงขอบเขตของแผนภาพ การกำหนดลักษณะการผสมสีและข้อมูลสีเกี่ยวกับแหล่งกำเนิดแสงในพิกัดบนแผนภาพสี (chromaticity diagram) และสามารถใช้เพื่อแสดงการผสมสีของแหล่งกำเนิดแสงตามกฎของ Grassmann [77]

โดยองค์การนาชาติเกี่ยวกับแสงและสี หรือ CIE ได้กำหนดมาตรฐานของแสงและสี ระบบนี้จะแสดงค่าสีในรูปของพารามิเตอร์ 3 ตัว x, y, Y หรือที่เรียกว่า Chromaticity coordinate และหากต้องการจะกล่าวถึงสีในรูปของสีที่มองเห็นตามความรู้สึกของคนทั่วไปจะต้องนำค่าพารามิเตอร์ x, y ไปหาตำแหน่งบนไดอะแกรมพิกัดแผนภาพสี ซึ่งตำแหน่ง (x, y) สามารถคำนวณได้จากการกระจายพลังงานของสเปกตรัมในการแผ่รังสีของแสงที่ปล่อยออกมาจากวัตถุที่มีสีและเป็นปัจจัยที่เกิดจากเส้นโค้งความไวที่วัดได้สำหรับสายตามนุษย์ โดยจุดต่าง ๆ ที่อยู่ในบริเวณที่ล้อมรอบโดยเส้นโค้งล็อกส์ S จะถูกแทนที่ด้วยสีต่าง ๆ ซึ่งมีเส้นตรง P ที่ถูกเชื่อมต่อกันกับเส้นโค้งล็อกส์ S และเส้นโค้งพลาจเคียนโลกส์ของวัตถุดำบนไดอะแกรมพิกัดแผนภาพสีเรียกว่าพลาจเคียนโลกส์ เช่น จุด W ดังแสดงในภาพที่ 2.12 คือจุดที่มีค่าตำแหน่ง 0.33, 0.33 ซึ่งแทนค่าสีที่มีค่าสเปกตรัมของพลังงานเท่ากันโดยองค์การนาชาติเกี่ยวกับแสงและสีกำหนดตำแหน่งนี้เป็นแสงสีขาว



ภาพที่ 2.12 ไดอะแกรมพิกัดบนแผนภาพสีระบบ CIE

ที่มา: CIE (1931)

2.1.3.2 ประสิทธิภาพส่องสว่างของการแผ่รังสี

ในการวัดค่าประสิทธิภาพส่องสว่างของการแผ่รังสีเป็นค่าหนึ่งมีความสำคัญของแหล่งกำเนิดแสงที่ตอบสนองต่อดวงตามนุษย์ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพส่องสว่างของการแผ่รังสี (luminous efficacy of optical radiation, LER) ในหน่วยของลูเมนต่อวัตต์ ($\text{lm}/\text{W}_{\text{opt}}$) สามารถคำนวณโดยสมการที่ 6 เมื่อ $P(\lambda)$ และ $V(\lambda)$ คือค่าการกระจายพลังงานของสเปกตรัม (SPD) และการตอบสนองดวงตาในช่วงโฟโตพิกตามลำดับ โดยสเปกตรัมแสงขาวนี้มาจากแหล่งกำเนิดแสงเดี่ยวที่มีความยาวคลื่น 555 นาโนเมตร ดังนั้นค่าสูงสุดของ LER จะมีค่าอยู่ที่ 683 ลูเมนต่อวัตต์ ($\text{lm}/\text{W}_{\text{opt}}$) ซึ่งหากพลังงานแสงน้อยการแผ่รังสีช่วงคลื่นที่มีพลังงานต่ำจะทำให้ไม่ตอบสนองต่อดวงตา

$$\text{LER (lm/W}_{\text{opt}}) = \frac{683 \text{ lm/W}_{\text{opt}} \int_{380}^{780} P(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda)d\lambda} \quad (6)$$

2.1.3.3 ประสิทธิภาพความสว่าง

ประสิทธิภาพความสว่างของแหล่งกำเนิดแสงเรียกว่าประสิทธิภาพความสว่าง (luminous efficiency, LE) สามารถคำนวณได้โดยประสิทธิภาพของแสงที่แผ่ออกมาตามที่ดวงตามนุษย์รับรู้ตามกำลังทางไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป (P_{elect}) ดังนั้น LE ถูกคำนวณได้ดังสมการที่ 7 ในหน่วยของลูเมนต่อวัตต์ ($\text{lm/W}_{\text{elect}}$) นอกจากนี้ค่า LE ยังมีความสัมพันธ์กับ LER โดยการ conversion efficiency (PCE) ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 8

$$\text{LE (lm/W}_{\text{elect}}) = \frac{683 \text{ lm/W}_{\text{opt}} \int_{380}^{780} P(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{P_{\text{elect}}} \quad (7)$$

$$\text{LE (lm/W}_{\text{elect}}) = \text{LER} \left(\frac{\int_{380}^{780} P(\lambda)d\lambda}{P_{\text{elect}}} \right) = \text{LER} \times \text{PCE} \quad (8)$$

2.1.3.4 อัตราส่วนของ S/P

เป็นตัวบ่งชี้หนึ่งที่เราเรียกว่าอัตราส่วนของ scotopic/photopic (S/P) ใช้สำหรับอธิบายถึงประสิทธิภาพของแสงที่มีต่อการทำงานของเซลล์รูปแท่ง ซึ่งเป็นอัตราส่วนของ สโคโตปิก LER (scotopic LER) กับโฟโตปิก LER (photopic LER) ดังสมการที่ 9 โดยอัตราส่วนของ S/P ใช้สำหรับกล่าวถึงการรับรู้ของแสงจรร่วมกับความชัดเจนในการมองเห็นของแหล่งกำเนิดแสง และนอกจากนี้อัตรส่วนดังกล่าวยังมีความสัมพันธ์กับค่า CCT ของแหล่งกำเนิดแสงและใช้อธิบาย ลักษณะการทำงานของรูม่านตา โดยลำแสงที่ผ่านเข้ามาายังดวงตา ณ จุดตรงกลางของเรตินา (retina) ทำให้การมองเห็นความชัดเจนยิ่งขึ้น

$$\text{S/P} = \frac{1699 \text{ lm/W}_{\text{opt}} \int_{380}^{370} P(\lambda)V'd\lambda}{683 \text{ lm/W}_{\text{opt}} \int_{380}^{370} P(\lambda)Vd\lambda} \quad (9)$$

2.1.4 ปัจจัยของแสงที่ส่งผลต่อการตอบสนองที่ไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็น

แสงมีหน้าที่กระตุ้นการตอบสนองแสงทางชีวภาพ (biological light responses) ในลักษณะที่ต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความยาวคลื่น ความเข้ม รูปแบบ เวลา และประวัติการได้รับแสง เป็นต้น โดยความยาวคลื่นเกี่ยวข้องกับการตอบสนองของมนุษย์ต่อความยาวคลื่นแสงที่ต่างกัน ซึ่งเป็นฟังก์ชันประสิทธิภาพการส่องสว่างที่กล่าวไว้ก่อนหน้านั้นมีความเข้มเกี่ยวข้องกัผลของความเข้มของแสงที่มีต่อการตอบสนองแสงทางชีวภาพ เช่น

ความสัมพันธ์ของการตอบสนองความเข้มแสงที่มีความสัมพันธ์กับการได้รับแสงในเวลากลางคืนและการตอบสนองแสงทางชีวภาพในลักษณะความสัมพันธ์ที่ไม่ใช่เชิงเส้น ซึ่งมีความยากในการประเมิน โดยเฉพาะงานวิจัยที่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับการตอบสนองในช่วงกลางวัน

รูปแบบแสงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการตอบสนองแสงทางชีวภาพ เนื่องจากการวิจัยพบว่า การได้รับแสงเพื่อที่จะกระตุ้นการตอบสนองแสงทางชีวภาพไม่จำเป็นต้องต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังเป็นรูปแบบของแสงสว่างและความมืดตลอด 24 ชั่วโมง ที่ควบคุมนาฬิกาทางชีวภาพ (biological rhythms) ไม่เพียงแต่แสงกลางวันเท่านั้น แต่เวลาก็มีความสำคัญเช่นกันเนื่องจากการตอบสนองแสงทางชีวภาพของมนุษย์ถูกควบคุมโดย เส้นโค้งการตอบสนองของเฟส (phase response curve) ซึ่งเป็นเส้นโค้งที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งกระตุ้นกับการได้รับแสงและการตอบสนอง เช่น การเปลี่ยนแปลงในระบบแสงในรอบวัน [78] การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะเกิดขึ้นหากการได้รับแสงในตอนเช้าทำให้เกิดการเลื่อนขึ้นของแสงในรอบวัน (shifts it earlier) [79] นอกจากนี้ประวัติของการให้รับแสงยังมีผลกระทบเนื่องจากแสงที่ไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็น ซึ่งจะทำให้ปรับเปลี่ยนการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงในช่วงเวลาที่นานขึ้นที่เกี่ยวข้องกับการมองเห็น [57, 72] ซึ่งวิธีการทดสอบผลกระทบของแสงที่ไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็น (methods examining non-visual effect of light) แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 การวิจัยที่ทดสอบผลกระทบของแสงที่ไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็น [80]

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับผลของแสงที่มีต่อการตอบสนองที่ไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็น

Research paper	Proposed model	Simulation parameters	Evaluation method
Day lighting.	Software used: Radiance	Simulation time:	A simply ramp
Artificial Lighting and Non-Visual Effects	Referent of the circadian luminous efficiency function: (Pechacek, <i>et al</i> , 2008)	Annual simulation comparing eight countries.	function showing the illuminance
Study for a Residential Building (Mardaljevic, <i>et al</i> , 2012)[71]		History of light exposure: Not considered	values to achieve the non-visual effect.

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับผลของแสงที่มีต่อการตอบสนองที่ไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็น (ต่อ)

Research paper	Proposed model	Simulation parameters	Evaluation method
Modeling non-visual responses to light: unifying spectral and temporal characteristics in a single model structure (Amundadottri, <i>et al</i> , 2013)[56, 81]	Software used: Proposed model by the author. Referent of the circadian luminous efficiency function: Different based on the time of light exposure and the Interaction between multiple photoreceptors. Three models were proposed	Simulation time: The model considered multiple parameters but the simulation time was not note. History of light exposure: Not considered	The three models considered different factors in details.
Beyond illumination: an interactive simulation framework for non-visual and perceptual aspects of daylighting performance (Andersen, <i>et al</i> , 2013)	Software used: Light solve and Proposed model by the author. Referent of the circadian luminous efficiency function: Different based on the time of occurrence. “Linear-nonlinear-linear” (L-N-L) model by the author.	Simulation time: Annual simulation History of light exposure: Not considered	Relative N-V response as predicted by the L-N-L model based on illuminance values.
Metrics of circadian lighting for clinical investigations (Barroso, <i>et al</i> , 2014)	<i>Software used:</i> Calculations based on the model proposed by author. Referent of the circadian luminous efficiency function: None	<i>Simulation time:</i> Calculation for a three day period History of light exposure: Not considered	Calculating the illuminance values based on four models: magnitude, contrast, clustering and variability.

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับผลของแสงที่มีต่อการตอบสนองที่ไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็น (ต่อ)

Research paper	Proposed model	Simulation parameters	Evaluation method
Spectral daylighting simulations: computing circadian light (Inanici, <i>et al</i> , 2015)[80]	Software used: Lark plug-in, Grasshopper in Rhino. Referent of the circadian luminous efficiency function: (Rea, <i>et al</i> , 2005) and (Lucas, <i>et al</i> , 2014)	Simulation time: December, March and June History of light exposure: Not considered	Circadian illuminance based on the 'Rea' and 'Lucas' Luminous efficiency functions.
Simulation-based evaluation of non-visual responses to daylight: proof-of-concept study of healthcare-design. (Amundadottri, <i>et al</i> , 2013) [57]	Software used: Developed by the author. Human light-response (HLR) model. Referent of the circadian luminous efficiency function: Different based on the time of occurrence.	Simulation time: Annual and summer and winter periods History of light exposure: Not considered	Maximum non-visual response in each month. Percentage frequency of the maximum non-visual relative response greater than a threshold (T=0.75).

2.1.4.1 การแผ่รังสีของประสิทธิภาพแสงในรอบวัน

จากศึกษาก่อนหน้าพบว่าความไวต่อสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นสั้นมีผลต่อความไวในการกตเมลาโทนินมากที่สุด โดยในการทำงานของแหล่งกำเนิดแสงในลักษณะที่เป็นแสงในรอบวัน และการมองเห็นซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีองค์ประกอบแสงสีน้ำเงินของสเปกตรัมแสงเนื่องจากความไวของสเปกตรัม โดย ipRCGs มีความไวต่อสิ่งเร้าในช่วงแสงแคบ λ_{max} ที่ความยาวคลื่น 480 นาโนเมตร ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ค่ากระจายพลังงานของสเปกตรัมแสงขาวหรือแสงกลางวัน ทั้งนี้สามารถคำนวณค่าของ LER ก่อนเพื่อหาค่าของ CER (Circadian efficacy of radiation, CER) ได้ตามลำดับ และค่าดังกล่าวนี้ยังสามารถใช้ในการกำหนดค่าที่บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการมองเห็นตามประสิทธิภาพของแสงในรอบวัน สำหรับทุก ๆ แหล่งกำเนิดแสง จากรายงานก่อน

หน้าค่าของ CER ได้จากอัตราส่วนของ circadian luminous flux ต่อ the radiant flux ดังสมการที่ (10)

$$\text{CER}(\text{blm/W}) = \frac{K_{C0} \text{ lm/W}_{\text{opt}} \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} C(\lambda)P(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda) d\lambda} \quad (10)$$

เมื่อ $P(\lambda)$ คือฟังก์ชันประสิทธิภาพการส่องสว่างสเปกตรัมแสงช่วงโฟโตบิก

$C(\lambda)$ คือฟังก์ชันความไวของสเปกตรัมของแสงในรอบวัน

ในรายงานก่อนหน้าโดย Gall และคณะ ในปี ค.ศ.2004 ได้กล่าวถึง $P(\lambda)$ มีความยาวคลื่นสูงสุดที่ 550 นาโนเมตร และ $C(\lambda)$ มีความยาวคลื่นสูงสุดที่ประมาณ 460 นาโนเมตร โดยจากข้อมูลพื้นฐานของสเปกตรัมที่มีต่อการปรับสมดุลเมลาโทนิน สามารถคำนวณได้จาก K_{C0} ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพแสงในรอบวันสำหรับการมองเห็นแสง ($K_{C0} = 683$ ลูเมนต่อวัตต์) ดังนั้น LER และ CER จึงสามารถใช้บ่งชี้ถึงความสว่างที่เกี่ยวกับการแผ่รังสีสเปกตรัมกับการมองเห็นและไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็นของดวงตามนุษย์ โดยงานวิจัยก่อนหน้าเสนอว่าหน่วยการวัดฟลักซ์แสงในรอบวันควรเป็น cirlm หรือ blm ดังนั้นจุดประสงค์หน่วยของ CER และ K_{C0} อาจเป็น cirlm/W หรือ blm/W [75]

2.1.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของแสงในรอบวัน

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของแสงในรอบวัน (circadian action factor, CAF) เป็นหลักการทางโฟโตเมตรี (photometry) กล่าวคือ เป็นการวัดความสว่างของวัตถุหรือของแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งอาจเป็นแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์หรือแหล่งกำเนิดแสงธรรมชาติถูกนำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพแสงที่เกี่ยวข้องกับการมองเห็นแต่ไม่เหมาะกับการอธิบายแสงในมุมมองของแสงในรอบวัน ทั้งนี้ Gall เสนอว่า CAF ของ $C(\lambda)$ ที่ได้จากผลการศึกษาของ Brainard และ Thapan โดยพบว่าการกดเมลาโทนินที่การกระตุ้นโดยแสงที่มีความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน [76] ซึ่งเป็นวิธีโดยตรงที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์กับระดับของแสงในรอบวันกับโฟโตเมตรีต่อค่า CAF [9] จากการศึกษาของเส้นโค้ง CAF นักวิจัยพบว่าความยาวคลื่นสั้น (ในช่วงสีน้ำเงิน) มีความไวสูงสุด ตามเส้นโค้งความไวในการมองเห็น [74] ซึ่งรายงานวิจัยนี้นำไปสู่ความเข้าใจว่าแสงประดิษฐ์ในอาคารโดยเฉพาะแสงเดี่ยวยังไม่ส่งผลต่อการกดเมลาโทนินในช่วงเวลาของวัน เมื่อเทียบกับแสงธรรมชาติที่มีความยาวคลื่นสั้นหลายคลื่นแสง (สีฟ้าและสีม่วง) [8, 9]

โดยค่า CAF สามารถบ่งชี้ถึงความสามารถของแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อนาฬิกาชีวภาพ (biological clock) ในการเป็นอยู่ของมนุษย์ ดังนั้นในการออกแบบแสงสว่างตามแสงในรอบวันมีความสำคัญมาก ซึ่ง Gall พบว่า CAF และ CCT จากแหล่งกำเนิดแสงเป็นสัมประสิทธิ์ที่สัมพันธ์กันกับประสิทธิภาพของแสงในรอบวัน ที่สามารถผสมผสานเข้ากับกิจกรรมของมนุษย์อย่างเหมาะสมได้ [82] ในรายงานก่อนหน้านี้ CAF พบว่า ความสัมพันธ์ของค่า CER ต่อ LER สามารถใช้บ่งชี้ถึงกิจกรรมต่อการตอบสนองทางชีวภาพต่อการมองเห็น โดยค่าความแตกต่างของ CAF ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาของวัน กล่าวคือ CAF สูงในเวลากลางวันและ CAF ต่ำในเวลากลางคืน ซึ่งค่า CAF นี้สามารถใช้เป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบแสงประดิษฐ์กับสุขภาพมนุษย์ ดังนั้นประสิทธิภาพของแสงในรอบวันแสดงดังสมการที่ 11 ซึ่งกล่าวถึงความสว่างของแสงที่ไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็นจากแสงประดิษฐ์ โดยที่ $P(\lambda)$ คือ ฟังก์ชันประสิทธิภาพส่องสว่างของสเปกตรัมช่วงโฟโตพิก โดย Gall และ Beiske เสนอว่า $C(\lambda)$ คือ ฟังก์ชันความไวของสเปกตรัมของแสงในรอบวันในลักษณะของ circadian action factor (CAF) ซึ่งกำหนดเป็นอัตราส่วนของประสิทธิภาพของแสงในรอบวันต่อประสิทธิภาพส่องสว่างดังนี้

$$\text{CAF}(\text{blm/lm}) = \frac{\int_{380}^{780} C(\lambda)P(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{780} V(\lambda)P(\lambda)d\lambda} = \frac{\text{CER}}{\text{LER}} \quad (11)$$

เมื่อ $P(\lambda)$ คือฟังก์ชันประสิทธิภาพส่องสว่างของสเปกตรัมช่วงโฟโตพิก

$C(\lambda)$ คือฟังก์ชันความไวของสเปกตรัมของแสงในรอบวัน

2.1.4.3 ดัชนีบ่งชี้การกตเมลาโทนิน

ในงานวิจัยวิทยาศาสตร์สุขภาพและวิทยาศาสตร์ชีวภาพ ส่วนประกอบของแสงได้มีการให้นิยามสเปกตรัมที่บ่งชี้ถึงความสัมพันธ์กับการสังเคราะห์แสงและกิจกรรมในแต่ละวัน ซึ่งผลของการกตเมลาโทนินและอัตราส่วนกำลังแผ่รังสีช่วงสโคโตพิกต่อความสว่างของช่วงโฟโตพิก ในปี ค.ศ.2011 หลักการเกี่ยวกับการกระจายตัวของแสงอาจมีผลต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตที่ไวต่อแสงที่แตกต่างกัน เนื่องจากความแตกต่างกันในการได้รับแสงที่เกี่ยวข้องกับการมองเห็น โดยในบางครั้งอาจมีการวิเคราะห์ความไวต่อแสง UV ร่วมด้วย ในงานวิจัยโดยทั่วไปจะกำหนดให้มีความหลากหลายของสเปกตรัมเพื่อวิเคราะห์แสงที่ได้รับสู่ดวงตามนุษย์ภายใต้สภาวะการมองเห็นช่วงสโคโตพิก ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้หนึ่งที่มีช่วงตั้งแต่ 0 – 1 โดยการทำให้เป็น normalization เพื่อจำแนกลักษณะผลกระทบสเปกตรัมที่เกิดขึ้นกับกระบวนการทางชีวภาพในการกตเมลาโทนินกับการมองเห็นของช่วงสโคโตพิก

การคำนวณดัชนีบ่งชี้การกดเมลาโทนินจากการกระจายพลังงานสเปกตรัม (SPD) ในหน่วยลูเมน โดยใช้ค่า SPD จำนวนเฉพาะในช่วง 440 – 540 นาโนเมตร เนื่องจากปริมาณคลื่นแสงเป็นค่าความไวของสเปกตรัมในการพิจารณากระบวนการทางชีวภาพ (biological process) ที่ใช้บ่งชี้ผลของแสงต่อการกดเมลาโทนิน (melatonin suppression index, MSI) ซึ่งเป็นการคำนวณลักษณะเดียวกันกับที่ใช้แสงมาตรฐาน CIE D65 ในหน่วยลูเมนจากการกระจายพลังงานสเปกตรัมของหลอดไฟ โดยอัตราส่วนของลูเมนที่การกระจายพลังงานสเปกตรัมหารกับค่าคงที่ของแสงมาตรฐาน CIE D65 ที่มีการกระจายพลังงานสเปกตรัม โดยการอินทิเกรตจำกัดเขตของแสงเดี่ยวในช่วง 380 – 780 นาโนเมตร ดังสมการที่ 12 เมื่อ $V(\lambda)$ คือฟังก์ชันประสิทธิภาพส่องสว่างของสเปกตรัมช่วงโฟโตปิก และ $M(\lambda)$ คือฟังก์ชันความไวของสเปกตรัมของแสงในรอบวัน ในกรณีของฟังก์ชันการถ่ายโอนของชั้นบรรยากาศ (มีเมฆหรือมีหมอก ละอองน้ำ) ถูกนำไปใช้กับกระจายพลังงานของสเปกตรัมในหน่วยลูเมนเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบแสงมาตรฐาน CIE D65 ภายใต้สภาวะเดียวกัน

$$MSI = \frac{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} P(\lambda)M(\lambda)d\lambda}{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} P_{(D65)}(\lambda)M(\lambda)d\lambda} \quad (12)$$

2.1.4.4 ค่ากระตุ้นของแสงในรอบวันทางชีวภาพ

ค่ากระตุ้นของแสงในรอบวัน (circadian light, CL_A) เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงการแผ่รังสีของสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงที่อ้างอิงถึงการสะท้อนต่อความไวของแสงในรอบวันจะถูกวิเคราะห์ถึงการกดเมลาโทนินอย่างฉับพลันภายใต้สภาวะการได้รับแสง 1 ชั่วโมง โดยแสงในรอบวันสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (13) – (14) โดยการนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ค่า CL_A [46] โดยทั่วไปกำหนดค่าคงที่ไว้ที่ 1,662 ตามหลักการแผ่รังสีของวัตถุดำ (blackbody radiational) CCT ที่ 2,856 เคลวิน มีค่า CL_A ประมาณ 1,000 ลักซ์ ค่าคงที่ครึ่งหนึ่งของการอิมิตัวที่รับแสงของเซลล์รูปแท่งต้องใช้แสง 6.5 วัตต์ต่อตารางเมตร โดยค่าคงที่ k เท่ากับ 0.2616 a_{b-y} เท่ากับ 0.7 และ a_{rod} เท่ากับ 3.3 โดยเส้นโค้งเฉลี่ยของ normalization (I_{norm}) ทำให้เป็นค่าฐานซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1

$$CL_A = 1622 \times \left[\int M_{C\lambda} E_\lambda d\lambda + \left(a_{b-y} \left(\int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} |_{norm} E_\lambda d\lambda - a_{rod} \left(1 - e^{-\frac{\int V'_\lambda E_\lambda d\lambda}{RodSat}} \right) \right) \right) \right] \quad (13)$$

$$\text{if } \int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} |_{norm} E_\lambda d\lambda - k \int \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} |_{norm} E_\lambda d\lambda \geq 0$$

$$CL_A = 1622 \times \int M_{C\lambda} E_\lambda d\lambda$$

$$\text{if } \int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} |_{\text{norm}} E_\lambda d\lambda - k \int \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} |_{\text{norm}} E_\lambda d\lambda < 0 \quad (14)$$

เมื่อ

E_λ คือการแผ่รังสีสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง

$M_{c\lambda}$ คือเมลาโทนิน (แสงส่องผ่านเลนซ์)

S_λ คือค่าพื้นฐานของเซลล์รูปกรวย

mp_λ คือค่าส่องผ่านของตัวรับ

V_λ คือประสิทธิภาพส่องสว่างช่วงโฟโตปิก

V'_λ คือประสิทธิภาพส่องสว่างช่วงสโคโตปิก

2.1.4.5 ค่าการกระตุ้นแสงในรอบวัน

โดยทั่วไปในทางปฏิบัติความเข้มและองค์ประกอบสเปกตรัมมีความสัมพันธ์ต่อการกระตุ้นของระบบแสงในรอบวัน เช่น ความสว่าง (ลักซ์) และ CCT และการบ่งชี้ถึงการกระตุ้นของแสงของแสงในรอบวัน โดยนิยามของการกดเมลาโทนินในรูปร้อยละเรียกว่า Circadian Stimulation metric (CS metric) [85] สำหรับค่าการกระตุ้นโดยแสงในรอบวัน (circadian stimulus, CS) มีความเกี่ยวข้องกับ CL_A ซึ่งตรงข้ามกับฟังก์ชันประสิทธิภาพส่องสว่างคือ $V(\lambda)$ ในขณะที่แสงในรอบวันขึ้นอยู่กับ ipRCGs ที่อยู่ในเซลล์รูปแท่งและรูปกรวยส่งสัญญาณผ่านการเชื่อมต่อเส้นประสาท ได้แก่ คู่ตรงข้ามชั้นนอกของจอประสาทตา (retina) CL_A ซึ่งสามารถใช้เพื่อแสดงถึงระดับของค่า CS และใช้เพื่ออธิบายถึงกระบวนการส่งสัญญาณผ่านทางแสง CL_A จะเป็นการคำนวณการแผ่รังสีสำหรับแสงในรอบวันของมนุษย์ ซึ่ง CS ใช้กล่าวถึงแสงมากกว่าการส่องสว่าง ซึ่งได้จากการทำออร์มัลไลเซชันของสเปกตรัมของแสงที่เกี่ยวข้องกับการมองเห็นของมนุษย์

สำหรับการวัดแสงในรอบวันในนิยามของ CS หมายถึงการกระตุ้นโฟโตปิกต่อสโคโตปิก (photopic/scotopic) โดยการกดเมลาโทนินในช่วงกลางคืนฉบับปล้น [83] อย่างไรก็ตามสิ่งสำคัญสำหรับการทำความเข้าใจผลของแสงที่มีต่อแสงในรอบวัน เช่น การกระจายตามระยะทาง ระยะเวลา ช่วงเวลา ประวัติของการได้รับแสง ดังนั้นค่า CS จึงได้ถูกนำมาใช้ในการประเมินสถานะของระยะในการแผ่รังสีของสเปกตรัมของแสงที่ตกกระทบบนกระจกตา (cornea) ซึ่งสามารถคำนวณ CL_A ได้จากระยะในการกระจายสเปกตรัมของการแผ่รังสีของแสง ซึ่งก็คือการส่องแสงมายังดวงตาโดยดูจากแสงที่สะท้อนถึงความไวสเปกตรัมของดวงตา แสงในรอบวันมนุษย์สามารถวัดจากการกดเมลาโทนินภายหลังสัมผัสแสง 1 ชั่วโมง และค่า CS นอกจากจะเป็นประสิทธิภาพปริมาณการแผ่รังสีที่ตกกระทบต่อกระจกตา โดยเริ่มต้น CS เท่ากับ 0.1 ถึงระดับความอึดตัวที่ 0.7 ดังนั้นฟังก์ชัน

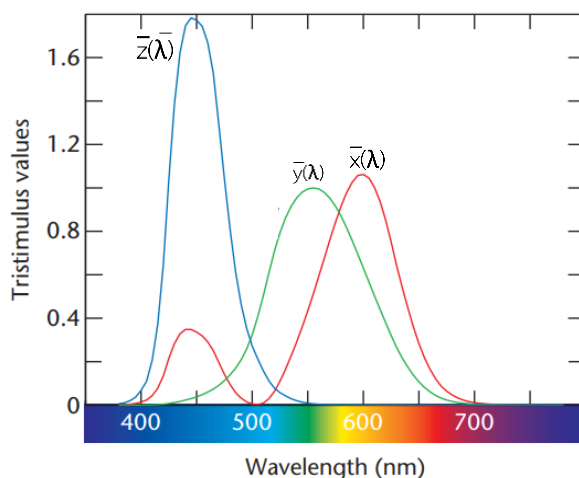
ความไวสเปกตรัมของแสงในรอบวันของมนุษย์มีความสัมพันธ์ระหว่าง CL_A กับ CS ที่ระดับแสงหนึ่ง ๆ (ปกติใช้ 30 ลักซ์ และ 300 ลักซ์) โดยค่า CS จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแสงที่ทำให้เกิดการกอดเมลาโทนินในช่วงเวลากลางคืน ซึ่งค่า CS แสดงได้ตามสมการดังนี้ [72]

$$CS = 0.7 - \frac{0.7}{1 + \left(\frac{CL_A}{355.7}\right)^{1.1026}} \quad (15)$$

ในงานวิจัยส่วนใหญ่การวิเคราะห์องค์ประกอบของแสง CS และ CL_A ได้ถูกนำมาใช้ในการประเมินแสงประดิษฐ์ในช่วงแสงในรอบวัน ความสัมพันธ์เส้นโค้งการตอบสนองต่อสเปกตรัมเชิงสัมพันธ์ต่อการกระจายพลังงานสเปกตรัม ตัวอย่างเช่น การปรับค่า LED ของแหล่งกำเนิดแสงขาว (เทียบเป็นร้อยละ) ให้อยู่ในช่วง CCT ซึ่งให้ไม่สอดคล้องกันระหว่างองค์ประกอบในส่วนของปริมาณของแสงที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง CCT ที่อาจมีผลต่อค่า CS ที่ขึ้นอยู่กับ peak ของ violet/blue บน SPD ดังนั้นควรคำนึงผลของหลอด LED ที่มีต่อแสงในรอบวันดังในรายงาน USDOE (2017) เกี่ยวกับผลของแสงในรอบวันต่อการทำลายสุขภาพมนุษย์ โดยหากมนุษย์ได้รับแสงจากหลอด LED หรือ หลอดประดิษฐ์อื่น ๆ เป็นระยะเวลาอันยาวนานอาจส่งผลที่ไม่ดีต่อสุขภาพ ถึงแม้ว่าจะยังไม่มีตัวอย่างของการรายงานเกี่ยวกับการทำลายสุขภาพโดยแสงในรอบวันของมนุษย์จากการติดตั้งแสง LED ในที่สาธารณะก็ตาม [84]

2.2 ค่าดัชนีบ่งชี้ความถูกต้องของสี

ค่าไตรสติมูลัส XYZ ได้พัฒนามาจากระบบสีมาตรฐาน CIE ซึ่งมีแนวพื้นฐานมาจากทฤษฎี 3 องค์ประกอบ (three-component theory) ในการมองเห็น ซึ่งได้กล่าวไว้ว่าดวงตาของมนุษย์ประกอบด้วยเซลล์ไวต่อแสงสี 3 ชนิด ได้แก่ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ซึ่งสีที่มองเห็นจะเกิดจากการผสมของสามสีหลัก ในปี ค.ศ. 1931 มาตรฐาน CIE ได้กำหนดมาตรฐานการมองเห็นของมนุษย์เพื่อให้ได้ฟังก์ชันความไวแสงของเซลล์ทั้งสาม (color-matching function) $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ และ $\bar{z}(\lambda)$ ดังภาพที่ 13 โดยค่าไตรสติมูลัส XYZ ที่พิจารณาจากฟังก์ชัน $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ และ $\bar{z}(\lambda)$ กำหนดโดยมาตรฐาน CIE ในปี ค.ศ.1993 โดยปกติค่าไตรสติมูลัส XYZ จะระบุที่ 2 องศา ซึ่งจะเหมาะกับมุมมองที่ 4 องศา



ภาพที่ 2.13 ความไวแสงของตามนุษย์

ที่มา: Stone (2005)[85]

การคำนวณค่าไตรสติมูลัส XYZ ตามมาตรฐาน CIE 1931 ของตัวอย่างสีทดสอบและการแปลงค่าสีของระบบ XYZ ตลอดความยาวคลื่น [86] ถูกนำไปใช้ในการพิจารณาการรบกวนสีสำหรับผู้สังเกตที่ใช้กับมุมมอง 2 องศา หรือเล็กกว่า ซึ่งพบว่ามีค่าความแตกต่างกันระหว่างความสว่างอ้างอิงและการทดสอบแหล่งกำเนิดแสง ตามมาตรฐานค่าดัชนีบ่งชี้วัดความถูกต้องของสี (color rendering index, CRI) ตามมาตรฐาน CIE 1931 คือ R_i ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณความสอดคล้องกันในลักษณะสีจากการกระจายพลังงานสเปกตรัม (SPD) ของตัวอย่างที่ทดสอบ ซึ่งในปี 1964 ค่าดังกล่าวจะถูกคำนวณในบริเวณสีในเทอมของ CIE $W * U * V *$

แนวคิดของการอธิบายสีกับกระบวนการรับรู้ด้วยการมองเห็นซึ่งรับสัญญาณแสงของดวงตามนุษย์ โดยที่เซลล์รับแสงของกระจกตา (cornea photoreceptors) ทำหน้าที่วิเคราะห์ข้อมูลความไวสเปกตรัมแสงผ่านประสาทสัมผัสการมองเห็น แล้วส่งสัญญาณไปยังศูนย์สลับเปลี่ยนสัญญาณในสมองไปสู่ศูนย์การมองเห็น โดยฟังก์ชันการจับคู่สี (color matching functions) หรือฟังก์ชันแทนการทำงานของดวงตามนุษย์ ซึ่งฟังก์ชันนี้คือค่าไตรสติมูลัสของสเปกตรัมที่ความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นสามารถนำไปใช้แทนความไวแสงของตามนุษย์ที่สอดคล้องกับเซลล์รูปกรวยในตามนุษย์ ซึ่งเป็นการปรากฏสีของวัตถุจากการสะท้อนสเปกตรัมแสงต่อดวงตามนุษย์ให้เห็นเป็นสีที่ตอบสนองกับองค์ประกอบเชิงสเปกตรัมของแสงที่ใช้ในการส่องสว่างวัตถุ หากพิจารณาเฉพาะปัจจัยดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้การกระจายพลังงานของสเปกตรัมต่าง ๆ ให้ลักษณะของสีวัตถุเดียวกันจะแตกต่างกันด้วยเหตุนี้สีของวัตถุจึงเป็นหลักเกณฑ์ในการประเมินแสงตัวอย่าง เช่น การทดสอบแสงเมื่อมีการตรวจวัดตามเงื่อนไขดังกล่าว แหล่งกำเนิดแสงจะให้ลักษณะเฉพาะสีของแสงที่ปล่อยออกมาและการแสดงออกของสี ซึ่งสามารถอธิบายโดยค่าต่าง ๆ ดังนี้ ค่า CCT ไดอะแกรมพิกัดบนแผนภาพสี (chromaticity diagram) ระยะของโลกส์พลางเคียน (planckian locus) ตามพิกัดบนแผนภาพสี

Duv และ MacAdam ellipses (ที่ถูกแปลงเป็นพารามิเตอร์ binning ในกรณีของแสง LED) การประเมินสี โดยดำเนินการตามค่าดัชนีบ่งชี้ความถูกต้องของสี (CRI R_a) ตามมาตรฐานที่เสนอโดยองค์การนานาชาติเกี่ยวกับแสงและสี (CIE) ซึ่งได้รับการยอมรับจากคณะกรรมการมาตรฐานแห่งชาติว่าเป็นมาตรฐานที่ถูกต้อง และสามารถนำไปใช้กับแหล่งกำเนิดแสงที่มีความเข้มแสงสูง และการกระจายพลังงานของสเปกตรัม ซึ่งเป็นค่าความเข้มแสงมีค่าสูงมากกว่าค่าดัชนีบ่งชี้ความถูกต้องของสี โดยเฉพาะการกระจายพลังงานของสเปกตรัม ซึ่งจะทำให้ค่าแสงที่วัดได้มีคุณภาพต่ำกว่าความเป็นจริง

ตัวอย่างแหล่งกำเนิดแสงดังกล่าว คือแสง LED โดยดัชนีการบ่งชี้สี R_a โดยเปรียบเทียบกับ การกระจายพลังงานของสเปกตรัมของแสงสีอ้างอิง ซึ่งระบบมาตรฐานนี้ถูกนำมาใช้นานกว่า 50 ปี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแหล่งกำเนิดแสงสร้างสีของวัตถุที่ส่องสว่างได้อย่างแม่นยำหรือน่าเชื่อถือเพียงใดเมื่อเทียบกับแสงอาทิตย์หรือยังดัชนีบ่งชี้ที่สูงขึ้นเท่าใดสีของวัตถุโดยรอบจะเป็นธรรมชาติมากขึ้นเท่านั้น

เนื่องจากวิธีการแก้ปัญหานี้ถูกกล่าวไว้ในมาตรฐานการส่องสว่าง PN-EN 12464-1 [87] สำหรับตัวอย่างที่กำหนดสีภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทดสอบเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง R_a จากการคำนวณความแตกต่างของสีและลดลงเมื่อความแตกต่างเพิ่มขึ้น โดยหลักการแล้วแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงที่ใช้ในการเปรียบเทียบจะต้องมี CCT เท่ากับแหล่งกำเนิดแสง (หลอดไฟ) และค่าดัชนีบ่งชี้ความถูกต้องของสีที่ดีที่สุดบนเส้นโค้งพลังเคียน (planckian) โดยจะกำหนดค่าในช่วง CCT ที่ต่ำกว่า 5,000 เคลวิน และ CCT ที่สูงกว่า 5,000 เคลวิน ในการคำนวณความแตกต่าง (ΔE_i) ของความเป็นสีที่เกิดจากการส่องสว่างเปรียบเทียบกับสีมาตรฐาน 8 สีระหว่างแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ทดสอบและแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง โดยความแตกต่างของสีแต่ละสีถูกกำหนดให้เป็น R_i โดยที่ i คือ หมายเลขสีมาตรฐาน R_1 - R_8 (R_1 สีแดง R_2 สีเหลือง (เหมือนสีของมีสตาร์ด) R_3 สีเขียวอ่อน R_4 เป็นสีเขียวอ่อน R_5 สีเขียวขุ่น R_6 ท้องฟ้าสีฟ้า R_7 แอสเตอร์สีม่วง R_8 สีฟ้าอมม่วง) ซึ่งสามารถคำนวณ R_i ดังนี้

$$R_i = 100 - 4.6 \times \Delta E_i \quad (16)$$

ค่าเฉลี่ย CRI R_a ที่ได้จากการหาค่าดัชนีเฉลี่ย (R_i) ทั้ง 8 ตัวอย่าง ดังนี้

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (17)$$

ค่าดัชนีบ่งชี้วัดความถูกต้องของสีหมายถึง ความถูกต้องของสีแหล่งกำเนิดแสง (หลอดไฟ) ที่ส่องสว่างไปถูกวัตถุแล้วสามารถแสดงคุณลักษณะของสีว่ามีประสิทธิภาพและการแสดงสีที่ถูกต้อง มากน้อยเพียงใด ซึ่งแสดงในหน่วยร้อยละ โดยนิยามของแหล่งกำเนิดแสงใด ๆ ที่มีค่าความถูกต้อง ร้อยละ 100 หมายถึงเมื่อแสงของหลอดใด ๆ ส่องสว่างไปที่วัตถุแล้วสีของวัตถุที่มองเห็นไม่มีความ

เพี้ยนของสี โดยในการเทียบคุณลักษณะของสีของแหล่งกำเนิดแสง CIE จะใช้ค่าดัชนีบ่งชี้ความถูกต้องของสีที่เกิดจากหลอดที่ถูกทดสอบแล้วนำมาเทียบกับแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงที่มี CCT เท่ากัน ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบตัวอย่างที่คำนวณการเปลี่ยนสีของตัวอย่างสะท้อนแสงที่กำหนดไว้ โดยเมื่อส่องสว่างด้วยแหล่งกำเนิดแสงเฉพาะ ตามวิธีการของ CIE (1995) [88] ที่พัฒนาโดย International Commission on Illumination ซึ่ง CRI สามารถคำนวณจากความแตกต่างของความเป็นสีที่เกิดจากการส่องสว่างเปรียบเทียบของสีมาตรฐาน 8 สี ระหว่างตัวอย่างทดสอบและแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงที่มีสีเหมือนกัน ยิ่งความแตกต่างโดยเฉลี่ยน้อยลงค่า CRI จะยิ่งสูงขึ้น

เมื่อทดสอบแหล่งกำเนิดแสงที่ CCT ในช่วงที่น้อยกว่า 5,000 เคลวิน และ CCT ที่สูงกว่าช่วงนี้ซึ่งเป็นเวลากลางวันที่มากกว่า 5,000 เคลวิน แหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงคือการแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody radiator) จะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง ชุดตัวอย่างสีมันเซล (Munsell) ซึ่งแสดงสี โดยการเปรียบเทียบชุดสี 8 สี [89] มีความอึมตัวและเท่ากับความสว่างของ CRI [90] ต่อมามีการเพิ่มสีอีก 6 สี ที่มีความอึมตัวสูงกว่าชุดตัวอย่างสีแรก โดยมีทั้งหมด 14 สี [88, 91] ค่าดัชนีบ่งชี้ความถูกต้องของสี R_a เป็นการกำหนดถูกต้องของสีที่เปรียบเทียบ 8 สีแรกของสเปกตรัมการเปรียบเทียบสี 14 สี เป็นค่าเฉลี่ยของดัชนีที่แสดงถึงสี 8 สีแรก โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์คงที่อยู่ที่ 4.6 ตามสมการข้างต้น [88, 92]

ตัวอย่างค่าดัชนีบ่งชี้ความถูกต้องของสีของแหล่งกำเนิดแสงใด ๆ เช่น หลอดไฟคายประจุ (discharge lamp) มีลักษณะการกระจายพลังงานของสเปกตรัมที่ใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดแสงตามมาตรฐานที่แสดงถึงความถูกต้องของสี (CRI สูง) มีการกระจายพลังงานของสเปกตรัมดี แต่มีประสิทธิภาพต่ำ หลอดอินแคนเดสเซนต์หรือหลอดไส้มีการกระจายพลังงานของสเปกตรัมใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานแต่มีประสิทธิภาพต่ำ หลอดฟลูออเรสเซนต์ (fluorescent lamp) มีการกระจายพลังงานของสเปกตรัมใกล้เคียงมากเมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานและมีประสิทธิภาพสูง

2.3 ดัชนีบ่งชี้คุณภาพสี

ค่าดัชนีบ่งชี้ความถูกต้องของสีที่กำหนดโดย CIE ว่าเป็น “ผลของแสงที่มีต่อลักษณะสีของวัตถุ โดยการเปรียบเทียบกับลักษณะสีของแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง” ค่าดัชนีบ่งชี้ความถูกต้องของสี CIE เพื่อการประเมินคุณภาพของการสร้างสีที่แม่นยำยิ่งขึ้นได้มีการพัฒนาวิธีดัชนีบ่งชี้คุณภาพสี ซึ่งประเมินคุณภาพของแสงโดยเทียบกับมาตรฐานแสงอ้างอิงจำนวน 15 สี

ดัชนีบ่งชี้ความถูกต้องของสี CRI ได้รับการพัฒนาในช่วงกลางศตวรรษที่ 20 เพื่อประเมินประสิทธิภาพการแสดงสีของหลอดฟลูออเรสเซนต์ (fluorescent lamp) รุ่นใหม่ ๆ สำหรับการผลิตหลอดไฟฟ้าโดยใช้ไดโอดเปล่งแสง (LED) สำหรับการส่องสว่างทั่วไปชี้ให้เห็นข้อบกพร่องบางประการ

ของ CRI ซึ่งบางส่วนมีความโดดเด่นเมื่อนำไปใช้กับ LED ในการนำไปสู่การพัฒนามาตรฐานดัชนีบ่งชี้คุณภาพสี (color quality scale, CQS) ซึ่งต้องการแก้ปัญหาจากค่า CRI โดยสามารถใช้ได้กับเทคโนโลยีแหล่งกำเนิดแสงทั้งหมดและประเมินคุณภาพของสีนอกเหนือจากการแสดงสี

โดยแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงของ CQS มีลักษณะเช่นเดียวกับดัชนีบ่งชี้ความถูกต้องของสีเป็นวิธีการทดสอบสีที่มีความแตกต่างของสี (ในพื้นที่สีของวัตถุที่สม่ำเสมอ) โดยจะคำนวณจากชุดอ้างอิงสีที่กำหนดไว้ตามแหล่งกำเนิดแสงทดสอบและแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง โดยพื้นฐานแล้วการจำลองลักษณะของสีของวัตถุจะถูกกำหนดและเปรียบเทียบเมื่อส่องสว่างจากแหล่งทดสอบและแสงส่องสว่างอ้างอิง ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงจะเหมือนกับดัชนีบ่งชี้ความถูกต้องของสี ซึ่งเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดแสงทดสอบที่ CCT ในช่วงที่น้อยกว่า 5,000 เคลวิน โดยแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงจากพิกัดบนเส้นพลังเคียนที่ CCT เดียวกับแหล่งกำเนิดแสงทดสอบ โดยมีขั้นตอนการคำนวณ colorimetry ใช้หลักการของ CIE ตามสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงตามพลังเคียน (planckian) โดย $S_{ref}(\lambda)$ คำนวณได้ดังนี้

$$S_{ref}(\lambda, T) = \frac{L_{e,\lambda}(\lambda, T)}{L_{e,\lambda}(56 \text{ nm}, T)} \quad (18)$$

โดยที่ T คือ CCT ของแหล่งทดสอบและ $L_{e,\lambda}$ คือ ความสว่างของสเปกตรัมสัมพัทธ์ที่คำนวณดังนี้

$$L_{e,\lambda}(\lambda, T) = \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{1.4388 \times 10^{-2}}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (19)$$

ตามคำจำกัดความหากไม่มีความแตกต่างในลักษณะสีของวัตถุแหล่งกำเนิดแสงจะถูกกำหนด CRI เป็น 100 ดังนั้นสำหรับความแตกต่างเล็กน้อย CRI จะใกล้เคียงกับ 100 มากขึ้น ซึ่งในขณะที่ความแตกต่างที่มากขึ้นจะส่งผลให้ค่า CRI ลดลง เมื่อเปรียบเทียบ CCT ในช่วง 2,000 – 5,000 เคลวิน และแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงด้วย CCT มากกว่า 5,000 เคลวิน (ช่วง Daylight) กับแหล่งกำเนิดแสงทดสอบ โดยวิธีการคำนวณการกระจายพลังงานสเปกตรัมของแสงส่องสว่างในเวลากลางวัน เริ่มต้นด้วยการกำหนดพิกัดแผนภาพสี (x_D, y_D) ของการส่องสว่างที่มี CCT ในช่วง 7,000 เคลวิน โดยที่ X_D สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$X_D = \frac{-4.6070 \times 10^9}{(T_{cp})^3} + \frac{2.9678 \times 10^6}{(T_{cp})^2} + \frac{0.09911 \times 10^3}{T_{cp}} + 0.244063 \quad (20)$$

สำหรับการส่องสว่าง CCT ในช่วง CCT > 7000 เคลวิน โดยที่ X_D คือ

$$X_D = \frac{-2.0064 \times 10^9}{(T_{cp})^3} + \frac{1.9018 \times 10^6}{(T_{cp})^2} + \frac{0.24748 \times 10^3}{T_{cp}} + 0.237040 \quad (21)$$

ค่า y (Y_D) คำนวณได้โดย

$$Y_D = -3.000x_D^2 + 2.870x_D - 0.375 \quad (22)$$

2.4 ระบบควบคุมแสงสว่างอัจฉริยะ

ตัวชี้วัดถึงความสำเร็จในออกแบบระบบควบคุมแสงสว่างอัจฉริยะมีความสำคัญในการพัฒนาระบบควบคุมแสงสว่างอัจฉริยะตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ โดยพื้นฐานระบบจะประกอบด้วยฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบส่องสว่าง ซึ่งโดยปกติจะต้องพิจารณาถึงเป้าหมายในการนำไปใช้ด้วย

2.4.1 ระบบควบคุมแสงสว่าง

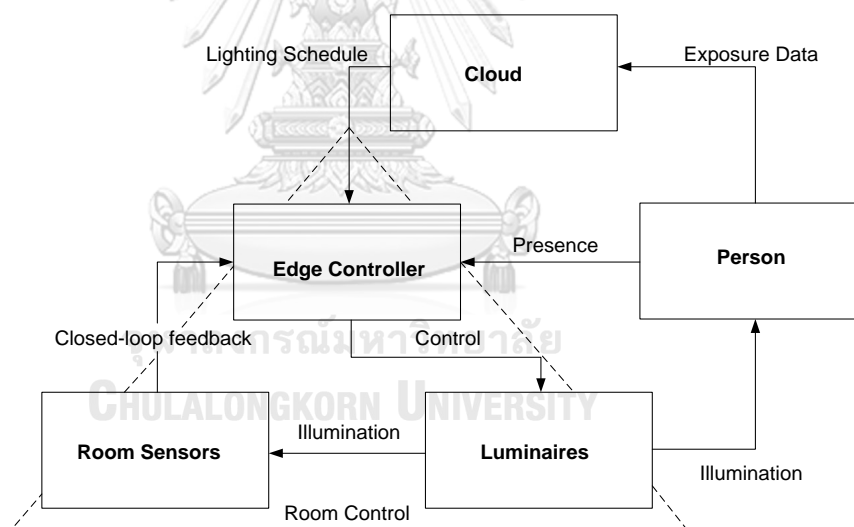
ในปัจจุบันการพัฒนาและความเข้าใจเกี่ยวกับระบบควบคุมแสงสว่างมีมากขึ้นและมีความมุ่งมั่นที่จะนำไปสู่การประยุกต์ใช้กับเป้าหมายที่แตกต่างกัน จากทบทวนวรรณกรรมของ Caicedo และคณะ ในปี ค.ศ.2015 [93] ระบุไว้ว่าการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอาคารอัจฉริยะโดยมีการตรวจจับแสงกลางวันเพื่อปรับแสงสว่างของโคมไฟตามแสงกลางวันแบบอัตโนมัติภายในอาคาร ทั้งนี้ระบบควบคุมสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือการควบคุมแบบศูนย์กลาง (centralized) และการควบคุมแบบกระจาย (distributed) โดยความแตกต่างในการประดิษฐ์ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการควบคุมว่าจะให้แสงอยู่ในส่วนกลางหรือที่โคมไฟแต่ละดวง ซึ่งจำเป็นต้องใช้แนวทางแบบรวมศูนย์สำหรับระบบควบคุมแบบแยกส่วน [51]

ในการพิจารณาระบบการปรับแสงกลางวันภายในอาคาร ซึ่งมีข้อจำกัดด้านการส่องสว่างและการลดความสว่าง โดยมีวัตถุประสงค์ในการหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและประหยัดพลังงานให้น้อยที่สุดและไม่จำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับแสงกลางวัน โดย Li และคณะ ในปี ค.ศ.2016 [52] ได้นำเสนอวิธีการตรวจจับแสงกลางวันโดยใช้ ตัวตรวจจับแสง LED ในโคมไฟ เพื่อลดค่าใช้จ่ายและความซับซ้อนในการติดตั้ง โดย Tang และคณะในปี ค.ศ.2017 [53] ได้นำเสนอระบบแสงสว่างอัจฉริยะภายในบ้านที่เกี่ยวข้องกับระบบความปลอดภัย โดยระบบแสงสว่างอัจฉริยะภายใน

บ้านโดยใช้เซ็นเซอร์วัดแสงภายนอกผ่านอุปกรณ์เคลื่อนที่ Android ด้วยอัลกอริทึมควบคุมวงแบบปิด (closed loop control algorithm) โดย Imam และคณะ ในปี ค.ศ.2018 [94] ได้นำเสนอระบบแสงสว่างอัจฉริยะที่ใช้ในการพัฒนาประสิทธิภาพการจัดการพลังงานและการนำไปใช้ควบคุมโดยมีวัตถุประสงค์ในการควบคุมที่แตกต่างกัน ซึ่งการควบคุมระบบแสงสว่างแบบบูรณาการกับแสงภายนอกเป็นวิธีการออกแบบตัวควบคุมขั้นพื้นฐานสำหรับระบบแสงสว่างและมีประโยชน์ในการควบคุมการปรับแสงกลางวัน

2.4.2 ระบบควบคุมแสงอัจฉริยะ

ภาพรวมของระบบควบคุมแสงอัจฉริยะสำหรับการส่องสว่างแบบบูรณาการ (หรือแบบแสงในรอบวัน) ประกอบด้วยโคมไฟ คน เมฆและตัวควบคุม ห้อง เซ็นเซอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับการควบคุมแสงวงปิด (closed-loop) เพื่อให้แสงประดิษฐ์สามารถส่องสว่างที่เหมาะสมสำหรับสุขภาพของมนุษย์ แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมแสงสว่างแสดง ดังภาพที่ 2.14 องค์ประกอบของระบบควบคุมแสง



ภาพที่ 2.14 แผนภาพระบบควบคุมแสงสว่างอัจฉริยะ

ที่มา: Lee (2020)

โดย Pandharipande และ Newsham ปี ค.ศ.2018 [95] ได้ระบุว่าระบบควบคุมแสงสว่าง LED เป็นระบบหนึ่งที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการออกแบบแสงในรอบวันเนื่องจากแสงจาก LED สามารถปรับความละเอียดของแสงให้สอดคล้องกับแสงในรอบวันได้ดีกว่าหลอดชนิดอื่น Gleason และคณะในปี ค.ศ.2019 ได้ทดลองใช้ระบบควบคุมแสงสว่างในโรงพยาบาลเพื่อศึกษาถึงผล

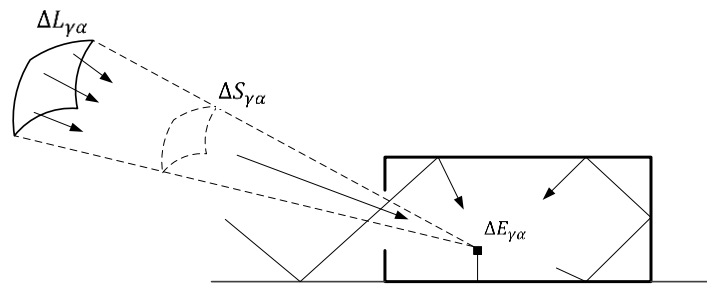
ของแสงในรอบวันที่มีต่อนาฬิกาชีวิตของผู้ป่วย ซึ่งในการศึกษาดังกล่าวได้ใช้หลักการส่องสว่างโดยใช้ troffer-based lighting ในการปรับความเข้มแสงและองค์ประกอบสเปกตรัมของแสง [98] ซึ่งมีการนำไปใช้ในงานวิจัยหลาย ๆ งานวิจัย ซึ่งเป้าหมายเบื้องต้นส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในขั้นต้น เพื่อแสดงให้เห็นว่าแสงที่ทดสอบนั้นอาจนำไปสู่การส่องสว่างแบบปรับค่าได้ โดยผลจากการนำไปใช้สามารถช่วยให้ลดผลลบของการนอนของผู้ป่วยในโรงพยาบาล ซึ่งปัญหาดังกล่าวในการศึกษาส่วนใหญ่ใช้ CCT ของแสงเป็นค่าที่ใช้ในการปรับสเปกตรัม ซึ่งอาจจะไม่ตรงตามมาตรฐานของสเปกตรัมของแสงที่วัดได้ในรอบวัน เนื่องจากค่า CCT ที่ได้อาจจะมีความเกินจุดที่กำหนด อย่างไรก็ตามยังคงนิยมใช้ในการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการและมีการปรับปรุงกระบวนการทำงานของระบบควบคุมแสงสว่างอย่างต่อเนื่อง [96]

เพื่อให้ได้แสงที่เหมาะสมกับระบบการควบคุมแสงอัจฉริยะจะต้องออกแบบโคมไฟให้สามารถปรับตามแสงในรอบวันได้ ซึ่งปัจจุบันนี้ผู้ผลิตพยายามที่จะออกแบบและผลิตขึ้นเพื่อให้มีความแตกต่างของแสงสว่างของโคมไฟมีความแตกต่างกันออกไป โดยโคมไฟที่ผลิตขึ้นจะประกอบด้วยโมดูลคอนโทรลเลอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นป้อนค่าในการควบคุมแบบผ่านสายเชื่อมต่อหรือแบบไร้สาย ซึ่งมีเอาต์พุตเป็นสเปกตรัมแสง โดยการควบคุม LED ให้สามารถปรับแสงสว่างได้ตามต้องการ เช่น แสงขาวที่มี CCT ต่างกัน หรือให้แสงสีเดียว หรือหลายสีผสมกัน โดย LED ที่ใช้ทางการค้าทั่วไปจะควบคุมแสงขาวให้มีสีขาวนวลหรือแบบปรับสีได้ตามต้องการ เช่น การใช้ LED RGB หรือ RGBW เป็นต้น

2.4.2.1 ซอฟต์แวร์สำหรับการจำลองแสงกลางวัน

ซอฟต์แวร์จำนวนมากได้รับการพัฒนาเพื่อจำลองแสงกลางวันในอาคาร ตัวอย่างเช่น ซอฟต์แวร์ที่มีการใช้วิธีการติดตามลำแสง (ray tracing) ที่ซับซ้อน ซึ่งบางส่วนใช้วิธีการคำนวณจากสัมประสิทธิ์ของแสงกลางวัน (daylight coefficient) และจะมีเครื่องมือที่ใช้เป็นรอยต่อ (interface) ในการจำลองการแผ่รังสีของแสง (Radiance) การใช้วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์แสงกลางวันควบคู่กับแบบจำลอง perez sky models [97] ทำให้สามารถพัฒนาสิ่งที่เรียกว่าแบบจำลองแสงกลางวันตามสภาพอากาศ (climate based daylight modelling) ได้

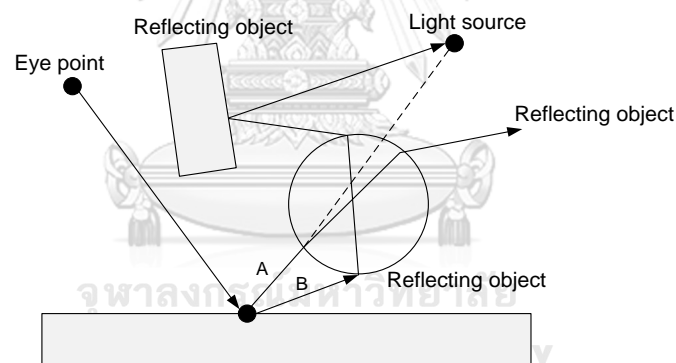
Tregenza และ Waters ในปี ค.ศ.1983 เสนอวิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แสงกลางวันซึ่งเป็นวิธีการคำนวณแบบ Radiance ในการเพิ่มความเร็วในการคำนวณรายปี โดยการสร้างค่าสัมประสิทธิ์เวลากลางวัน ซึ่งเป็นเพียงเมทริกซ์ของตัวเลขที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละส่วนบนท้องฟ้า และแต่ละจุดคำนวณในห้อง สิ่งนี้ทำได้โดยการแบ่งซีกโลกออกเป็นส่วนท้องฟ้าที่ไม่ปะติดปะต่อกันในทางทฤษฎีจากนั้นคำนวณการมีส่วนร่วมของส่วนท้องฟ้าแต่ละส่วนต่อความสว่างทั้งหมดที่จุดเซนเซอร์ (sensor) ต่าง ๆ ในอาคาร ดังภาพที่ 2.15 ดังสมการต่อไปนี้ [97]



ภาพที่ 2.15 สัมประสิทธิ์ของแสงกลางวัน

ที่มา: Tregenza and Waters (1983)

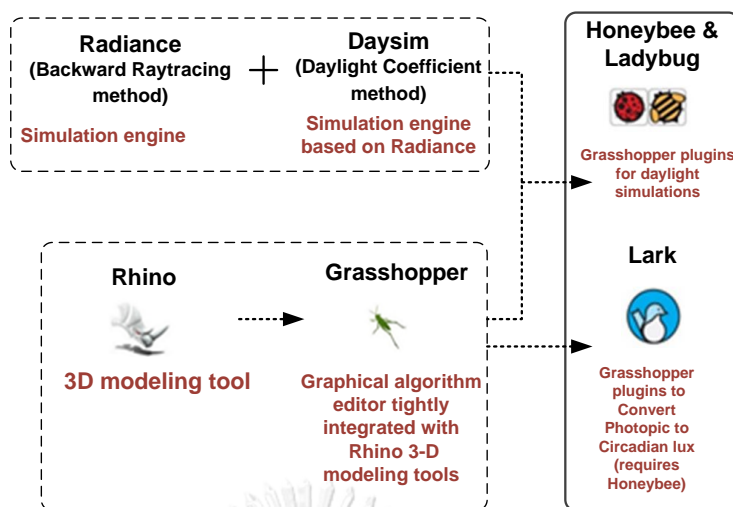
ในซอฟต์แวร์ทั่วไปส่วนใหญ่จะใช้หลักการติดตามลำแสง (ray tracing) เป็นวิธีการคำนวณที่ขึ้นอยู่กับการแผ่รังสีไปสู่ดวงตาหรือตำแหน่งการวิเคราะห์ไปยังสภาพแวดล้อม โดยรอบจนกว่าจะถึงแหล่งกำเนิดแสงหรือสะท้อนจากพื้นผิวโดยรอบจนกว่าจะถึงจำนวนรอบสะท้อนดังในภาพที่ 2.16 โดยที่ลำแสง A (ray A) จะเบี่ยงเบนออกไปจากแหล่งกำเนิดแสงในขณะที่ลำแสง B (ray B) ไปถึงแหล่งกำเนิดแสง [98, 99]



ภาพที่ 2.16 การเบี่ยงเบนของลำแสง A และลำแสง B

ที่มา: Shalaby (2017)

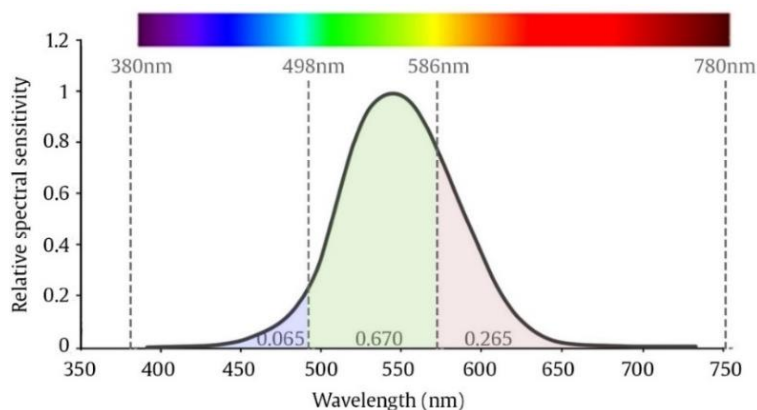
เนื่องจากความแตกต่างระหว่างวิธีการติดตามลำแสง (raytracing) แบบย้อนกลับและวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ในเวลากลางวันและความสัมพันธ์ในกลไกการจำลองดังภาพที่ 2.17 แสดงลำดับขั้นของกลไกการจำลองวิธีการและซอฟต์แวร์ที่มีอยู่บางส่วน



ภาพที่ 2.17 ความเชื่อมโยงระหว่างซอฟต์แวร์และการจำลอง
ที่มา: Shalaby (2017)

ข้อจำกัดของซอฟต์แวร์ปัจจุบัน ซอฟต์แวร์ปัจจุบันที่ใช้ Radiance (เช่น Diva และ Honeybee) เป็นวัสดุผ่านโมเดล RGB (3 ช่องสัญญาณ) แต่ไม่รวมข้อมูลสีท้องฟ้าในการจำลอง ซอฟต์แวร์จะคำนวณเฉพาะการกระจายความสว่างและความสว่างบนท้องฟ้าสำหรับการจำลองแบบรายปีและรายชั่วโมง เนื่องจาก Daysim จะแปลงข้อมูลสีทั้งหมดจากนั้นจึงประมวลผลเป็นสีเทา เนื่องจากศักยภาพของแสงในรอบวันได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของสี โดยการใช้ซอฟต์แวร์ดังกล่าวโดยไม่คำนึงถึงสีท้องฟ้าจึงไม่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยอื่น ๆ เช่น งานวิจัยของ Amundadottir และคณะ ในปี ค.ศ. 2013 ได้ใช้แบบจำลองที่ซับซ้อนโดยคำนึงถึงการกระจายพลังงานสเปกตรัมทั้งหมดบนท้องฟ้า ซึ่งในการวิจัยดังกล่าวนี้มีการเสนอแบบจำลองที่ง่ายขึ้น [81]

นอกจากนี้ซอฟต์แวร์ปัจจุบันยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการคำนวณแสงในรอบวันตามเส้นโค้งความไวแสงเพื่อแก้ปัญหาข้อจำกัดที่กล่าวมาของซอฟต์แวร์ Grasshopper plugin ชื่อ Lark ได้ถูกนำมาใช้นอกเหนือจาก Honeybee เพื่อสร้างไฟล์ท้องฟ้าที่แม่นยำยิ่งขึ้นเป็นรายชั่วโมงและการจำลองที่แม่นยำยิ่งขึ้น โดยมีส่วนประกอบ 3-channel circadian illuminance โดยใช้สมการคำนวณความส่องสว่างช่วงโฟโตพิกและแสงในรอบวัน [46] ซึ่งใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากส่วนประกอบ R, G และ B ได้มาจาก $V(\lambda)$ และ $C(\lambda)$ ในช่วงโฟโตพิกและแสงในรอบวันตามลำดับ โดยแบ่งส่วนโค้งออกเป็นสามส่วนที่ความยาวคลื่นเฉพาะดังแสดงในภาพที่ 2.18 [80]



ภาพที่ 2.18 ช่วงขององค์ประกอบแสง RGB

ที่มา: Inanici *et al.* (2015); Shalaby (2017)

2.4.3 การสร้างแบบจำลองสำหรับแสงในรอบวัน

ปัจจุบันการจำลองส่องสว่างของแสงในรอบวันได้รับความสนใจจากศาสตร์หลายแขนง โดยส่วนใหญ่จะอาศัยซอฟต์แวร์ในการควบคุมการส่องสว่างในอาคาร แต่จากการตรวจสอบผลของการเปลี่ยนแปลงทางสถาปัตยกรรมที่มีต่อศักยภาพของแสงในรอบวัน พบว่ายังคงมีข้อจำกัดบางประการของเครื่องมือจำลองปัจจุบันและยังคงมีความพยายามนำเสนอเครื่องมือใหม่ ๆ เข้ามาในการสร้างแบบจำลองแสงในรอบวันให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการใช้เทคโนโลยีแห่งสรรพสิ่งหรือเรียกว่า IoTs (internet of things: IoTs)

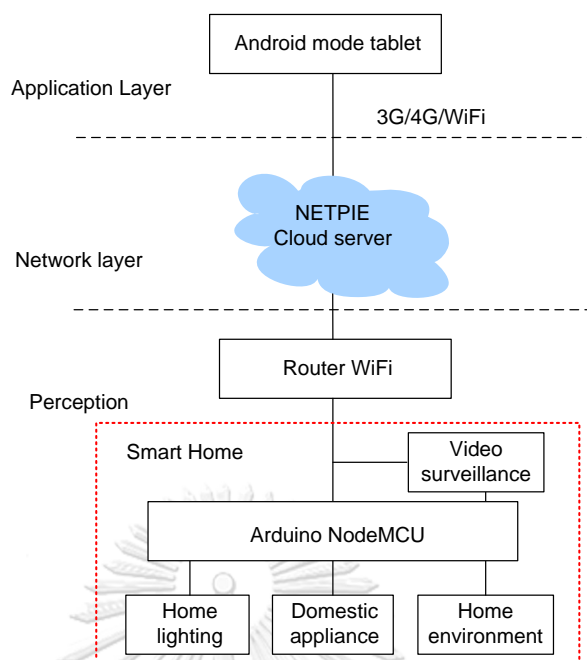
Ashton ในปี ค.ศ.1999 ได้กล่าวถึงอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง (internet of things, IoTs) ถูกคิดค้นจากเทคโนโลยี RFID ที่จะทำให้เป็นมาตรฐานระดับโลกสำหรับ RFID Sensors ต่าง ๆ และต่อมาในยุคหลังปี 2000 พบว่าโลกมีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากรวมทั้งได้มีการใช้คำว่าสมาร์ทมากขึ้น ตัวอย่างเช่น Lunina smart device, smart grid, smart home, smart network, smart intelligent transportation เป็นต้น โดย Kevin Ashton ให้นิยาม “internet-Like” หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สามารถสื่อสารได้ ซึ่งศัพท์คำว่า “Things” ใช้เรียกแทนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [100]

เทคโนโลยีแห่งสรรพสิ่ง คือการที่สิ่งต่าง ๆ ถูกเชื่อมโยงทุกอย่างเข้าสู่โลกอินเทอร์เน็ต ทำให้มนุษย์สามารถสั่งการควบคุมใช้งานอุปกรณ์ต่าง ๆ ผ่านทางเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เช่น การสั่งเปิดหรือปิด เครื่องใช้ไฟฟ้า รถยนต์ เครื่องมือสื่อสารต่าง ๆ เครื่องใช้ในสำนักงาน เครื่องมือทางการเกษตร เครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม อาคารบ้านเรือน ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เป็นต้น ซึ่งเทคโนโลยีนี้อาจกล่าวได้ว่ามีทั้งคุณประโยชน์และมีความเสี่ยงไปพร้อม ๆ กัน หากเครือข่ายอินเทอร์เน็ตหรือระบบรักษาความปลอดภัยไม่ดี ซึ่งอาจส่งผลให้ผู้ไม่ประสงค์ดีกับข้อมูลต่าง ๆ ได้

ดังนั้นการพัฒนาไปสู่ IoTs จึงมีความสำคัญต่อการพัฒนามาตรการและเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการรักษาความปลอดภัยไอทีที่เรียก Machine to Machine หรือรู้จักกันในชื่อของ M2M ซึ่งเป็นเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตที่เชื่อมอุปกรณ์กับเครื่องมือต่าง ๆ เช่น โทรศัพท์มือถือ รถยนต์ โทรศัพท์ และอื่น ๆ เข้าด้วยกัน โดยการเชื่อมโยงผ่านระบบอินเทอร์เน็ตและคาดการณ์ในปี ค.ศ. 2020 สิ่งต่าง ๆ กว่าแสนล้านชิ้นที่สามารถเชื่อมต่อด้วยระบบ IoTs ซึ่งจะส่งผลให้ผู้บริโภคทั่วไปมีความคุ้นเคยกับเทคโนโลยีที่ทำให้สามารถควบคุมสิ่งของต่าง ๆ จากที่ต่าง ๆ ได้ [101] ซึ่งองค์ประกอบในการพัฒนาจะประกอบด้วยองค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้

2.4.3.1 การประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ

อัคริมา บุญอยู่ และ นภดล แก้วบรรพต (2558) ได้กล่าวถึง Cloud computing หรือการประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ (cloud computing) ที่เกี่ยวกับการทำงานที่ใช้ทรัพยากรต่าง ๆ ที่มีอยู่บนเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เช่น พื้นที่เก็บข้อมูลแพลตฟอร์มทางธุรกิจ แอปพลิเคชันพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์การตลาดออนไลน์ผู้ใช้งานคอมพิวเตอร์สามารถเลือกใช้งานได้ผ่านผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ต (Internet Service Provider, ISP) ที่ให้บริการใดบริการหนึ่งกับผู้ใช้โดยผู้ให้บริการจะแบ่งปันทรัพยากรให้กับผู้ต้องการใช้งานและจ่ายค่าบริการตามการใช้งานจริงหรือหรือกล่าวได้ว่าเป็นระบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ประมวลผลบนเครือข่ายอินเทอร์เน็ตและรับและส่งข้อมูลรวมทั้งแสดงผลผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ซึ่งแต่เดิมการประมวลผลผู้ใช้ต้องติดตั้งโปรแกรมและเปิดใช้งานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ เช่น Microsoft office (Word, Excel ฯลฯ) โดยการประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ จะเรียกใช้งานโปรแกรมต่าง ๆ ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตที่ผู้ให้บริการ เช่น Google docs, Office เป็นต้น โดยใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่สามารถเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตได้ Cloud computing เน้นการขยายตัวได้อย่างยืดหยุ่นสามารถที่จะปรับขนาดได้ตามความต้องการของผู้ใช้และมีการจัดสรรทรัพยากรที่เน้นการทำงานระยะไกลและเป็นโครงสร้างพื้นฐานสามารถใช้ความรู้ในเชิงเทคนิคสำหรับพื้นฐานการทำงาน เช่น การบริการในลักษณะของเว็บแอปพลิเคชันทำให้ผู้ใช้สามารถทำงานผ่านเว็บเบราว์เซอร์ โดยซอฟต์แวร์และข้อมูลต่าง ๆ จะถูกเก็บไว้บนเซิร์ฟเวอร์ของผู้ให้บริการ โดยทั่วไปประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ ได้แก่ ชั้นระดับของซอฟต์แวร์ หรือแอปพลิเคชัน (application layer) ชั้นระดับเครือข่าย (network layer) และชั้นระดับการรับ (perception layer) ดังในภาพที่ 2.19 [102, 103]



ภาพที่ 2.19 ภาพรวมของระบบประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ
ที่มา: Khunchai and Thongchaisuratkrul (2021)

2.4.3.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino

Arduino เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR เป็นการพัฒนาแบบเปิดเผยข้อมูลทั้งด้านฮาร์ดแวร์ (hardware) และด้านซอฟต์แวร์ (software) ซึ่งออกแบบมาเพื่อให้เหมาะสมกับผู้ใช้งานใช้งานได้สะดวกและไม่ซับซ้อน นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาเพิ่มเติมและต่อยอดได้ทั้งตัวบอร์ดและโปรแกรม และยังสามารถเพิ่มอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยผู้ใช้งานสามารถสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มเติมได้ตามต้องการ สำหรับโปรแกรม Arduino IDE (integrated development environment; IDE) เป็นเครื่องมือหนึ่งที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมโดยมีชุดคำสั่งต่าง ๆ เช่น คำสั่ง Compile, Run ตัวอย่างของ IDE เช่น NetBeans Editplus, UCreator, Eclipse แต่ Notepad ไม่นับว่าเป็น IDE เนื่องจากตัว Notepad เองไม่มีเครื่องมืออำนวยความสะดวกสำหรับการเขียนโปรแกรมใด ๆ นอกจากนี้ยังรวมคำสั่ง เมนู และ GUI ต่าง ๆ เพื่อนำมาสร้างเป็นโปรแกรมใช้งานได้ตามต้องการ ซึ่งภาษาที่ใช้ของโปรแกรม IDE ผู้ใช้สามารถใช้ภาษาในการเขียนโปรแกรมได้หลายภาษา เช่น ภาษา C Pascal, Java เป็นต้น

Arduino Nano V.3 เป็นโมดูลที่มีขนาด 1.8 x 4.8 เซนติเมตร ซึ่งสามารถใช้กับงานที่ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย โดยใช้ CPU ATMEGA328 เหมือนกับรุ่น UNO และสามารถใช้ได้กับระบบปฏิบัติการ Windows XP, Windows 7, Windows 8 ทั้ง 32/64bit, Linux, Mac OS โดยมี

จำนวน input/output น้อยกว่า เพราะต้องการให้มีขนาดเล็ก Arduino Nano สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ โดยมีพอร์ตอินพุตเอาต์พุต 14 พอร์ต (มี 6 พอร์ต PWM output) พื้นที่หน่วยความจำ 2 KB (ATmega328) ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 16 MH และ EEPROM 1KB (ATmega328) มีพอร์ตอนาล็อกอินพุต 8 พอร์ต และบนบอร์ดมีเรกกูเลเตอร์สามารถจ่ายไฟได้ตั้งแต่ 7 – 12V เพื่อให้บอร์ดทำงาน และรองรับแหล่งจ่ายไฟ 5V และมีกระแสไฟที่จ่ายได้ในแต่ละพอร์ตดังข้อมูลตามตารางที่ 2.3 [101]

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติบางประการของ Arduino nano v.3

Microcontroller	Atmel ATmega328
Operating Voltage (logic level)	5 V
Input Voltage(recommended)	7-12 V
Input Voltage (limits)	6-20 V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	8
DC Current per I/O Pin	40 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328) of which 2 KB used by bootloader
SRAM	2 KB(ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz
Dimension sd	4.8" x 1.80"

ที่มา: Arduino Nano (2018)[104]

CHULAI

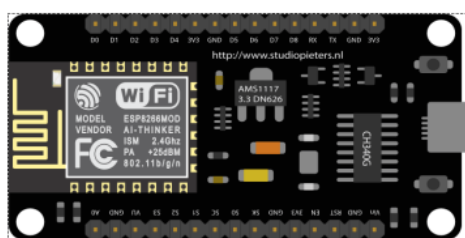


ภาพที่ 2.20 โครงสร้างของบอร์ด Arduino Nano

ที่มา: Arduino Nano (2018)

2.4.3.3 อุปกรณ์ควบคุมการทำงานผ่าน App สมาร์ทโฟน

Node MCU ESP8266 เป็นโมดูล WiFi ในการติดต่อสื่อสารบนมาตรฐาน WiFi โดยมีหน้าที่ใช้งานในโหมด Access Point และโหมด station ได้เมื่อนำมารวมกับ Node MCU จึงกลายเป็น Node MCU ESP8266 ซึ่งทำให้รวมไมโครคอนโทรลเลอร์และโมดูล WiFi อยู่ในอุปกรณ์เดียวกัน ซึ่งคุณสมบัตินี้ทำให้เหมาะแก่การทำงานในด้าน IoT โดยแรงดันไฟฟ้าใช้งาน 3.0 – 3.6 V และกระแสใช้งานโดยเฉลี่ย 80 mA รองรับคำสั่ง deep sleep ใช้กระแสน้อยกว่า 10 ไมโครแอมป์ สามารถ wake up กลับมาส่งข้อมูลใช้เวลาน้อยกว่า 2 มิลลิวินาที ภายในมี Low power MCU 32 bit ทำให้เขียนโปรแกรมสั่งงานได้รวมทั้งมีวงจร analog digital Converter ทำให้สามารถอ่านค่าจาก analog ที่อุณหภูมิ -40 – 125 องศาเซลเซียส โดยข้อมูลเพิ่มเติมอ้างอิงตาม ESP8266 Datasheet โดยชิพของโมดูลหลายรุ่นจะขึ้นต้นด้วย ESP8266 แล้วตามด้วยรุ่น เช่น ESP-01, ESP-03, ESP-07 ติดต่อกับ WiFi แบบ Serial สามารถเขียนโปรแกรมเพื่อส่งคำสั่งให้ทำงานโดยใช้ Arduino IDE นอกจากนี้ชิพของโมดูล ESP8266 มีโครงสร้างและขาที่ใช้งานจะมีลักษณะคล้ายกันคือ GPIO0 เป็นขาสำหรับเลือกโหมดเมื่อต่อกับ GND จะเข้าโหมดโปรแกรมเมื่อต้องการให้ทำงานปกติซึ่งไม่ต้องต่อ GPIO15 เป็นขาที่ต้องต่อลง GND เพื่อให้โมดูลทำงาน CH PD หรือ EN เป็นขาที่ต้องต่อไฟ VCC เพื่อ pull up สัญญาณให้โมดูลทำงานโมดูลบางรุ่นไม่มีขา Reset มาให้เมื่อต้องการรีเซ็ตให้ต่อขา CH PD กับ GND Reset ต่อกับไฟ VCC เพื่อ pull up สัญญาณโดยเมื่อต้องการเซตให้ต่อกับไฟ GND VCC สำหรับจ่ายไฟเลี้ยงที่ 3.0 – 3.6V GND ต่อกับไฟ 0 V และGPIO เป็นขาดิจิตอล INPUT / OUTPUT ทำงานที่ไฟ 3.3 V ADC เป็นขา Analog INPUT รับแรงดันสูงสุด 1 V ความละเอียด 10 bit หรือ 1024 ค่า นอกจากนี้บอร์ด ESP8266 ได้รวมวงจร USB TTL กับ Arduino ทำให้มีความสะดวกต่อการใช้งานควบคุมอุปกรณ์เพิ่มขึ้น เช่น NodeMCU, Wemos mini เป็นต้น [105]



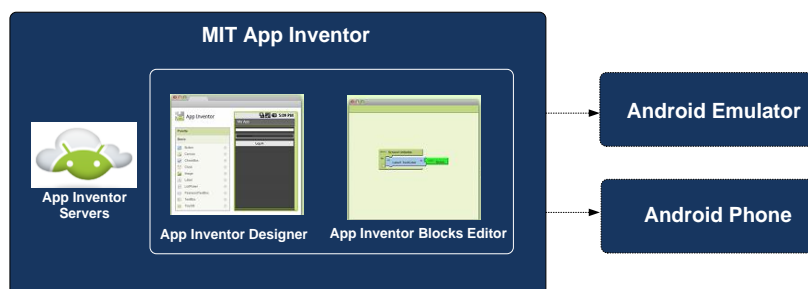
ภาพที่ 2.21 โครงสร้างของบอร์ด Node MCU ESP8266

ที่มา: Al Dahoud and Fezari (2018) [106]

2.4.3.4 แอปพลิเคชัน App inventor

แอปพลิเคชัน คือซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับช่วยในการทำงานของผู้ใช้โดย Application จะต้องมีสิ่งที่เรียกว่าส่วนติดต่อกับผู้ใช้ นอกจากนี้ยังสามารถแบ่ง Application เป็นประเภทย่อย ๆ ตามสภาพแวดล้อมการทำงานได้แก่ Desktop application ซึ่งเป็น Application ที่ทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ เช่น IPC หรือ Mac เป็นต้น และ Mobile application จะทำงานบนโทรศัพท์ และ Web application จะทำงานบนเว็บไซต์ เช่น Gmail เป็นต้น

App inventor เป็นเครื่องมือสำหรับสร้างแอปพลิเคชันในสมาร์ทโฟนหรือแท็บเล็ตที่เป็นระบบปฏิบัติการ Android ซึ่งบริษัท Google ร่วมมือกับ MIT พัฒนาโปรแกรม App inventor ใช้สำหรับพัฒนาโปรแกรมบนมือถือ Android จากบริการผ่านอินเทอร์เน็ต โดยข้อมูลของงานต่าง ๆ จากผู้ใช้และถูกเก็บไว้ที่เครื่องแม่ข่ายที่ให้บริการ (cloud computing) ต่อมา MIT พัฒนาต่อโดยเน้นกลุ่มผู้ใช้งานด้านการศึกษาในนามของ MIT App inventor ลักษณะคล้ายๆ กับ Scratch แต่มีความซับซ้อนมากกว่า โดยลักษณะการเขียนโปรแกรมแบบ Visual programming กล่าวคือเขียนโปรแกรมด้วยการเชื่อมต่อบล็อกคำสั่ง เน้นการออกแบบเพื่อแก้ปัญหาโดยการสร้างโปรแกรมบนโทรศัพท์มือถือสมาร์ทโฟน และผู้ใช้สามารถพัฒนาระบบ Android โดยสร้างงานและเขียนโปรแกรมบนเว็บเบราว์เซอร์ ที่เชื่อมต่อไปยัง App Inventor servers และนอกจากนี้ยังสามารถทดสอบกับโปรแกรมมือถือจำลองหรือโทรศัพท์มือถือบนระบบ Android ได้ โดยขั้นตอนการสร้างโปรแกรมดังภาพที่ 2.22 เริ่มจากออกแบบหน้าต่างโปรแกรมบนมือถือด้วยโปรแกรม App inventor designer ซึ่งใช้สำหรับสร้างส่วนโปรแกรมต่าง ๆ (components) เพื่อใช้งานในโปรแกรมมือถือที่จะสร้างขึ้น จากนั้นเขียนโปรแกรมให้แต่ละส่วนโปรแกรม ด้วยโปรแกรม App inventor blocks editor ซึ่งใช้วิธีการต่อบล็อกคำสั่ง เพื่อให้ทำงานตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งในการเขียนโปรแกรมในบางครั้งอาจมีการแก้ไข เพิ่มเติม หรือลบบางส่วนโปรแกรมออกไป โดยต้องแก้ไขโปรแกรมให้สามารถทำตามที่ออกแบบไว้ เมื่อโปรแกรมสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วและสามารถทดสอบโดยการติดตั้งโปรแกรมบนมือถือ Android และนอกจากนี้ยังสามารถทดสอบผ่านโปรแกรมมือถือจำลองในคอมพิวเตอร์ได้



ภาพที่ 2.22 แอปพลิเคชัน App inventor

ที่มา: <https://programmingappinventor.wordpress.com/>

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โดย Mashkov และคณะในปี ค.ศ.2015 ได้เสนอหลักการออกแบบและสร้างหลอดไฟ LED ให้มีลักษณะที่สามารถปรับสเปกตรัมแสงได้ โดยหลอดไฟ LED สีขาว สีเขียว สีน้ำเงิน และสีแดง เพื่อให้ได้ความสามารถควบคุมการปรับ CCT [107] โดย Burgos-Fernandez และคณะในปี ค.ศ. 2016 พบว่าแหล่งกำเนิดแสงที่ปรับโดย LED แบบใหม่สำหรับการสร้างไฟส่องสว่างมาตรฐาน CIE ขึ้นใหม่โดยใช้ไฟ LED แบบโมนโครม (monochromatic LED) ที่มีความแตกต่างกัน 31 ชนิด เพื่อควบคุม CCT พิกัดบนแผนภาพสีและตัวบ่งชี้ความถูกต้องของสี (CRI) ให้เป็นไปตามแสงมาตรฐาน [108] Chew และคณะในปี ค.ศ.2016 ได้นำแหล่งกำเนิดแสง LED ที่ปรับแต่งได้เพื่อนำเสนอ อัลกอริทึมการควบคุมแบบวงปิด (closed loop control algorithm) และเซ็นเซอร์สเปกตรัมของแสง โดยการจับคู่ CCT และระยะทางแบบยูคลิด (euclidean) ของแหล่งกำเนิดแสง LED ที่ปรับได้กับสเปกตรัมของแสง [109] โดย Lin และคณะ ปี ค.ศ.2017 พบว่าโคมไฟที่มีแสงสีแดง เหลือง และฟ้า สามารถปรับค่า CCT ได้ ซึ่งตรงตามดัชนีคุณภาพแสงต่าง ๆ [110] โดย Wei และคณะ ปีค.ศ. 2017 ได้นำเสนอการออกแบบเครื่องจำลองแสงกลางวันแบบปรับสเปกตรัมสำหรับไฟส่องสว่างมาตรฐานโดยใช้ช่องสัญญาณ LED จำนวน 6 ช่อง โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยใช้ดัชนีการแพร่กระจายของ CIE ของแสงกลางวัน จำลองผลร่วมกับชุดการผสม CCT แบบคงที่หลายชุด [111] และ ElGhoroury และคณะ ปี ค.ศ.2020 ได้เสนอหลอดไฟ LED แสงสีขาวที่ปรับ CCT ได้ โดยอาศัยโครงสร้าง LED แบบปรับสีโมนโไลติก (monolithic color) ที่พัฒนาขึ้นใหม่ (ตารางที่ 2.4) [112]

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างค่าเป้าหมายในการออกแบบการควบคุมการผลิตแสง

ผู้วิจัย	ปี ค.ศ.	ค่าเป้าหมายในการกำหนด
Chew <i>et al.</i>	2016	Reproduction, CCT
Burgos-Fernandez <i>et al.</i>	2016	Standard illuminant reproduction, CCT
Wei <i>et al.</i>	2017	Daylight simulator, CCT
Lin <i>et al.</i>	2019	CCT
El-Ghoroury	2020	CCT
Feng <i>et al.</i>	2020	Daylight simulator, CCT

ในตลาดปัจจุบันหลอดไฟแสงอัจฉริยะมีการแข่งขันกันอย่างสูงในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เนื่องจากการตลาดเชิงรุกโดยบริษัทผู้ผลิตหลอดแสงสว่างทั้งหลายรวมทั้งความต้องการของตลาดที่หลากหลาย เช่น Wyze Bulb, Philips Hue, Lix, Ikea Tradfri, Sengled, C by GE และ TP-LINK Kasa รูปแบบการควบคุมสำหรับแสงอัจฉริยะนั้นจะมีลักษณะคล้ายกันกับในงานวิจัยกล่าวคือ ยังคงใช้

CCT และโฆษณาถูกละเลยการควบคุม RGB เพื่อเพิ่มความสนใจให้กับผู้ที่ชื่นชอบทริยภาพ จากนั้นเพื่อนำความจำเป็นในการปรับแสงในรอบวันกับการควบคุมสเปกตรัมของแสงต่าง ๆ

Bohar *et al.* (2017) ได้ศึกษาเรื่องของการควบคุมรูปแบบของสเปกตรัมตามเวลาในรอบวันสำหรับการผลิตแสงในรอบวันตามแสงในรอบวันและฤดูกาล พบว่า สิ่งที่ต้องวิเคราะห์เป็นสิ่งแรกคือประโยชน์และประสิทธิภาพของสเปกตรัมของแสงในรอบวันที่มีต่อมนุษย์ ซึ่งจำเป็นต้องมีข้อมูลเกี่ยวกับความเข้มของแสงตามพิกัดเชิงมุมของแสงอาทิตย์ตั้งแต่พระอาทิตย์ขึ้นจนกระทั่งพระอาทิตย์ตกดิน [113]

Prapatsimpa and Linartz (2020) ได้ศึกษาถึงการใช้แสงในที่ทำงานเพื่อสุขภาพและการปรับปรุงประสิทธิภาพการนอนด้วยลักษณะของแสงในรอบวัน ซึ่งพบว่าในกระบวนการดังกล่าวจำเป็นต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับระดับพลังงานที่เหมาะสมต่อการจ่ายแสงที่กระทบต่อสมบัติทางชีวภาพน้อยที่สุด รวมถึงความแตกต่างของความคลาดเคลื่อนของพฤติกรรม และช่วงเวลาในการได้รับแสงที่เหมาะสมของแต่ละบุคคล [114]

Marin-Donagueda *et al.* (2021) ได้ศึกษาถึงการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแสงในรอบวันที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสำหรับการออกแบบระบบอัจฉริยะในการส่องสว่าง พบว่า CCT เป็นค่าที่สามารถมีการตอบสนองที่ไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็น (non-visual response) ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมและอธิบายถึงคุณภาพชีวิต (quality of life) และค่า CER เป็นค่าที่สามารถอธิบายถึงภาพรวมของสมบัติแสงในรอบวันได้ดี นอกจากนี้พบว่า ในการผลิตแสงในรอบวันให้มีความเหมาะสมในการควบคุมการใช้ LED ร่วมกันมากกว่า 1 ชนิด (white LED และ RGB LED) จะช่วยทำให้แหล่งของการส่องสว่างของแสงมีลักษณะสีแสงใกล้เคียงกับแสงในรอบวันมีประสิทธิภาพ [115]

Shishegar *et al.* (2021) ได้ศึกษาการปรับปรุงสิ่งแวดล้อมในการส่องสว่างให้เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพในการนอนของผู้สูงอายุที่มีภาวะนอนหลับยาก พบว่า สภาวะในการส่องสว่างในห้องพักผ่อนสำหรับผู้สูงอายุที่มีสุขภาพดีว่าเป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญที่มีผลต่อคุณภาพการนอนของกลุ่มเป้าหมาย และพบว่าทำให้สภาวะการส่องแสงที่มีระดับความเข้มแสงและ CCT ที่แตกต่างในรอบวัน ซึ่งมีแสงสีน้ำเงินที่มีความเข้มสูงในช่วงกลางวันและจะค่อย ๆ มีแสงสีเหลืองในช่วงเย็นมีผลปรับปรุงคุณภาพการนอนในผู้สูงอายุได้อย่างชัดเจน [116]

Oh and Lim (2021) ได้ศึกษาการพัฒนาและการวิเคราะห์เกี่ยวกับจังหวะของแสงในรอบวันโดยใช้แสง LED เข้าไปช่วยปรับปรุงการส่องสว่างของแสงที่มีสัดส่วนของแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นเช่นเดียวกับแสงธรรมชาติเปรียบเทียบผลการจำลองการได้รับแสงที่ผลิตจาก LED ที่มีสภาวะแวดล้อมความยาวคลื่นสั้นกับแสงในสภาวะแวดล้อมทั่วไป พบว่า มีผลเพิ่มระดับเมลาโทนินขึ้นร้อยละ 17 และ 24 ภายในเวลา 7 และ 14 วันตามลำดับ [37]

Nie *et al.* (2021) ได้ศึกษาอันตรายของแสงสีน้ำเงินปริมาณน้อยสำหรับการปรับค่าการเปล่งของแสง LED ที่มีความชัดเจนสูงและประสิทธิภาพในการนำไปใช้กับการผลิตแสงในรอบวัน พบว่า การผสมแสงด้วยแสงขาวมีความปลอดภัย สมาร์ท มองเห็นได้อย่างสบายตา และทำให้เป็นแหล่งของแสงสว่างเป็นมิตรกับการตอบสนองที่ไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็น นอกจากนี้พบว่าในทางปฏิบัติแสงสีน้ำเงินเมื่อผสมกับแสงขาวสามารถเปลี่ยนแปลง CCT ของแสงได้ตั้งแต่ 2,500 เคลวิน ถึง 7,000 เคลวิน และมีผลต่อค่า CAF จาก 0.23 เป็น 0.89 ซึ่งมีประโยชน์ต่อการนำไปใช้กับการพัฒนาแสงในรอบวัน [117]

Zarindast *et al.* (2021) ได้เสนอระบบคำแนะนำในการส่องสว่างอัจฉริยะส่วนบุคคล ซึ่งจะช่วยเพิ่มความพึงพอใจและพัฒนาระบบที่สอดคล้องกับกลุ่มเป้าหมาย พบว่าการฝึกฝนผู้ใช้มีผลส่งเสริมให้สมรรถนะในการทำนายการทำงานของระบบที่มีต่อการกำหนดค่า และคำแนะนำในการนำไปใช้ [118]

Zandi *et al.* (2021) ได้ศึกษาระดับที่จำกัดของเมลาโท닌ต่อการหาสเปกตรัมที่เหมาะสมในการผสมแสงสีสำหรับระบบสมาร์ตสำหรับการส่องสว่างแบบหลายช่อง (multi-channel) แสดงให้เห็นว่าการนำแสงมาใช้ประโยชน์ในตอนเช้าและตอนกลางคืนอาจมีผลกระทบต่อสรีรวิทยาและระดับการนอนของกลุ่มเป้าหมายอย่างชัดเจน และการส่องสว่างแบบ LED หลายช่อง มีประโยชน์ชัดเจนต่อแนวคิดในการพัฒนาระบบสมาร์ตในการส่องสว่างในอนาคต [119]

จากที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ว่าการพัฒนาระบบสมาร์ตสำหรับเลียนแบบแสงในรอบวัน จำเป็นต้องมีข้อมูลเกี่ยวกับระดับความเข้มและ CCT ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของโลกที่ทำมุมกับพระอาทิตย์ ซึ่งมีความแตกต่างกันตามฤดูกาลและตำแหน่งของพื้นที่ ซึ่งการรับแสงในรอบวันมีผลต่อวัฏจักรการนอนและการตื่น ซึ่งมีผลต่อสุขภาพของมนุษย์ที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองต่อแสงแบบไม่เกี่ยวข้องกับการมองเห็น ทั้งนี้ปริมาณของแสงในช่วงคลื่นสั้น หรือ แสงสีน้ำเงิน เป็นองค์ประกอบแสงสีที่มีผลต่อการทำงานของเมลาโท닌ที่ผ่านกลไกดวงตามนุษย์ ด้วยเหตุนี้การนำ LED เข้ามาช่วยในการผลิตแสงประดิษฐ์ ซึ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการผสมแสงสีด้วยแสงขาว (LED) เข้ากับ LED อื่น ๆ สามารถช่วยให้ได้แสงที่มีสมบัติใกล้เคียงกับแสงธรรมชาติ ทั้งนี้ควรพิจารณาจากค่า CCT CAF และ CER เป็นหลักในการพัฒนาระบบอัจฉริยะในการส่องสว่างที่สำคัญในการพัฒนาระบบส่องสว่างอัจฉริยะควรพิจารณาถึงประโยชน์และกลุ่มเป้าหมายในการนำไปใช้ โดยควรคำนึงถึงพฤติกรรมและรูปแบบการใช้ชีวิตของผู้ใช้ด้วย โดยเฉพาะการนำไปใช้กับการปรับปรุงคุณภาพการนอน

จากงานวิจัยพบว่าการออกแบบแสงสว่างเพื่อให้ตรงตาม CCT แทนที่จะเป็นเมตริกแสงในรอบวัน และนิยมใช้เซ็นเซอร์เพื่อลดความซับซ้อนในการสร้างสเปกตรัมของแสง เนื่องจากในการวิจัยส่วนใหญ่นิยมใช้ LED แบบโมนโครม (monochromatic LEDs) ซึ่งโคมไฟที่ปรับได้จะแสดงการ

ควบคุมความเข้มแสงโดยตรงจึงเป็นไปได้ที่จะปรับการแสดงผลในการควบคุมสเปกตรัมของแสงได้ละเอียดมากขึ้น

2.6 สรุปช่องว่างงานวิจัย

ความผิดปกติของแสงในรอบวันเกิดจากส่วนหนึ่งของการรับแสงในเวลาที่ไม่ถูกต้องของสเปกตรัมในบางช่วง โดยจากการจำลองแสงแสดงให้เห็นว่าแสงมีประโยชน์ต่อสุขภาพมนุษย์หากอยู่ภายใต้สภาวะการได้รับแสงที่เหมาะสม

ขั้นแรกในการศึกษาจำเป็นต้องวัดปริมาณแสงนั้น ๆ โดยหนึ่งในปัญหาการวัดปริมาณแสง คือ การกำหนดองค์ประกอบการส่องสว่างของแสงในรอบวัน ซึ่งมีมาตรฐานในการวัดที่หลากหลายมากเกินไปและการแยกส่วนระหว่างการคำนวณจึงนิยมนำมาใช้ ดังนั้นจึงควรยึดตามมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับการวิจัยเกี่ยวกับแสง มาตรฐานแสงในรอบวัน รวมทั้ง CCT และความสว่าง (ลักซ์) ตามมาตรฐาน CIE 2018 [124]

หลังจากนั้นจึงกำหนดองค์ประกอบการส่องสว่างของแสงในรอบวันตามมาตรฐานจากการทบทวนวรรณกรรม สำหรับการกำหนดค่าเป้าหมายเพื่อตามวัตถุประสงค์ โดยทั่วไปการตั้งเวลาแสงและเป้าหมายของแสงในรอบวัน ซึ่งเป้าหมายที่เลือก คือ 30 – 300 ลักซ์ โดยจะมีประโยชน์ในการทดสอบการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากการควบคุมที่เหมาะสมของระบบแสงสว่างอัจฉริยะจำเป็นต้องมีการทดสอบระบบ (validation and verification) เพื่อให้ได้ระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพต่อไป

การทบทวนระบบควบคุมแสงอัจฉริยะพบว่า มีหลายวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหา เช่น แสงกลางวันและการใช้ชีวิต เป็นต้น ซึ่งระบบควบคุมอัจฉริยะสามารถทดแทนด้วยแสงประดิษฐ์ ในบางกรณีการใช้งานต้องปฏิบัติตามมาตรฐานแสงในรอบวัน ซึ่งในปัจจุบันจะควบคุมความสว่าง (ลักซ์) และ CCT ดังนั้นช่องว่างในการวิจัยคือการใช้ตัวควบคุมสำหรับมาตรฐานแสงในรอบวัน เป็นรูปแบบหนึ่งสำหรับอัลกอริทึมคอนโทรลเลอร์

ปัจจุบันมีคอมพิวเตอร์หลายชนิดในงานวิจัยและในทางการค้าหรือทางการตลาดจึงได้พยายามที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะการใช้เทคโนโลยี LED เนื่องจากสามารถปรับตามสเปกตรัมของแสงได้ อย่างไรก็ตามการปรับแสงตามมาตรฐานของแสงในรอบวันยังไม่ได้ศึกษามากนักในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผู้ใช้ที่สามารถใช้งานได้ จึงได้พัฒนากระบวนการกำหนดลักษณะต่าง ๆ เพื่อให้สามารถควบคุมการเลียนแบบแสงในรอบวันและแสงจ้า

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการพัฒนากระบวนการควบคุมของระบบการส่องสว่างอัจฉริยะสำหรับเลียนแบบแสงในรอบวันและแสงจ้า โดยมีเป้าหมายเพื่อสร้างระบบส่องสว่างอัจฉริยะเลียนแบบแสงในรอบวันและแสงจ้า เพื่อการนำไปใช้ในชีวิตประจำวันสำหรับการปรับปรุงแบบการได้รับแสงในรอบวัน ซึ่งจากการทบทวนก่อนหน้านี้งานวิจัยนี้จะดำเนินการ 4 ส่วน ดังต่อไปนี้

3.1 การออกแบบและการดำเนินงานวิจัย

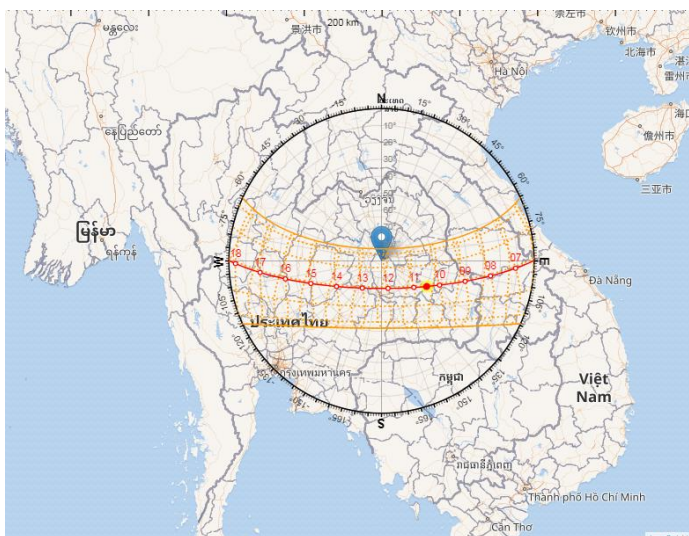
ตอนที่ 1 การศึกษาสมบัติทางสเปกโตรเมตริก (Spectrometric) ของแสงในรอบวัน

เพื่อการพัฒนาการส่องสว่างอัจฉริยะเลียนแบบแสงในรอบวันและแสงจ้า การศึกษางานวิจัยนี้จึงเริ่มต้นด้วยการ ดำเนินการศึกษาสมบัติสเปกตรัมของแสงในรอบวันของประเทศไทย โดยจะทำการตรวจวัดแสงในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส หรือไม่มีเมฆและไม่มีฝน ในช่วงฤดูร้อนและฤดูหนาวของประเทศไทย ณ พิกัดจุดศูนย์กลางของภาค ตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เนื่องจากเป็นพื้นที่ ๆ มีระนาบกว้างที่สุดในประเทศไทย ซึ่งตั้งอยู่ใน อำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดมหาสารคาม (ละติจูดที่ 16.288505944 องศา ลองจิจูดที่ 103.117675781 องศา ดังภาพที่ 3.1 [120] โดยในการศึกษานี้ จะดำเนินการโดยใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ดังนี้

- (1) เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) (ยี่ห้อ Ocean Optics รุ่น HR2000CG-UV-NIR high resolution spectrometer, USA) โดยจะวัดช่วงคลื่นแสงที่มองเห็นตั้งแต่ 380 – 780 นาโนเมตร อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสเปกโตรมิเตอร์อยู่ที่ 300: 1
- (2) คอมพิวเตอร์สำหรับการบันทึกข้อมูลแบบเรียลไทม์ (Real time) สเปกตรัม และ ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ

การวัดค่าสเปกตรัมจะดำเนินการบันทึกค่าในช่วงเวลาต่าง ๆ ตั้งแต่เวลา 05:00 น. – 19:00 น. (โดยการบันทึกค่าทุก ๆ 1 ชั่วโมง จำนวน 5 วัน) ในช่วงฤดูร้อน ณ วันที่ 10 – 15 พฤษภาคม 2563 และในฤดูหนาว ณ วันที่ 10 – 15 พฤศจิกายน 2563 ตั้งแต่เวลา 06:00 น.– 18:00 น. ซึ่งจากพยากรณ์อากาศในช่วงวันดังกล่าวสภาพภูมิอากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ไม่มีเมฆ หมอก และไม่มีฝน (Andrewmarch.com/software, excuted in 2020) โดยการตรวจวัดลักษณะแสงในรอบวันได้แก่ การกระจายพลังงานของสเปกตรัม (Spectral power distribution, SPD) CCT (เคลวิน) ระดับความสว่างของแสง (ลักซ์) และการแผ่รังสี (mW/cm^2) นอกจากนี้ปัจจัยแวดล้อมอื่น ๆ ข้อมูลจากการพยากรณ์อากาศในพื้นที่ที่จะถูกใช้เพื่ออ่านค่าความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งความสำคัญของการบันทึก

ค่าพารามิเตอร์นี้เนื่องจากสเปกตรัมของแสงนั้นขึ้นอยู่กับระดับของความชื้นหากโมเลกุลของน้ำมีอยู่ในอากาศมากจะทำให้สเปกตรัมที่ตรวจวัดค่าแสงที่ได้จะมีค่าความผิดพลาดมากขึ้น เมื่อดำเนินการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เสร็จเรียบร้อยแล้วจึงนำข้อมูลที่ได้ไปดำเนินการวิเคราะห์หาค่าต่าง ๆ ดังนี้ ค่าความสว่าง SPD, LE, LER, CER, CCT, Duv, XYZ, CAF, CL_A, CS, MSI, S/P, CRI และ CQS [113, 121-123]



ภาพที่ 3.23 พื้นที่ระนาบสถานที่ศึกษาวิจัยแสงในเขตร้อน อำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดมหาสารคาม
ที่มา: Andrewmarsh.com/software, ดำเนินการในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2563)

ตอนที่ 2 การสร้างและการติดตั้งระบบส่องสว่าง

(2.1) การสร้างและการติดตั้งระบบส่องสว่าง

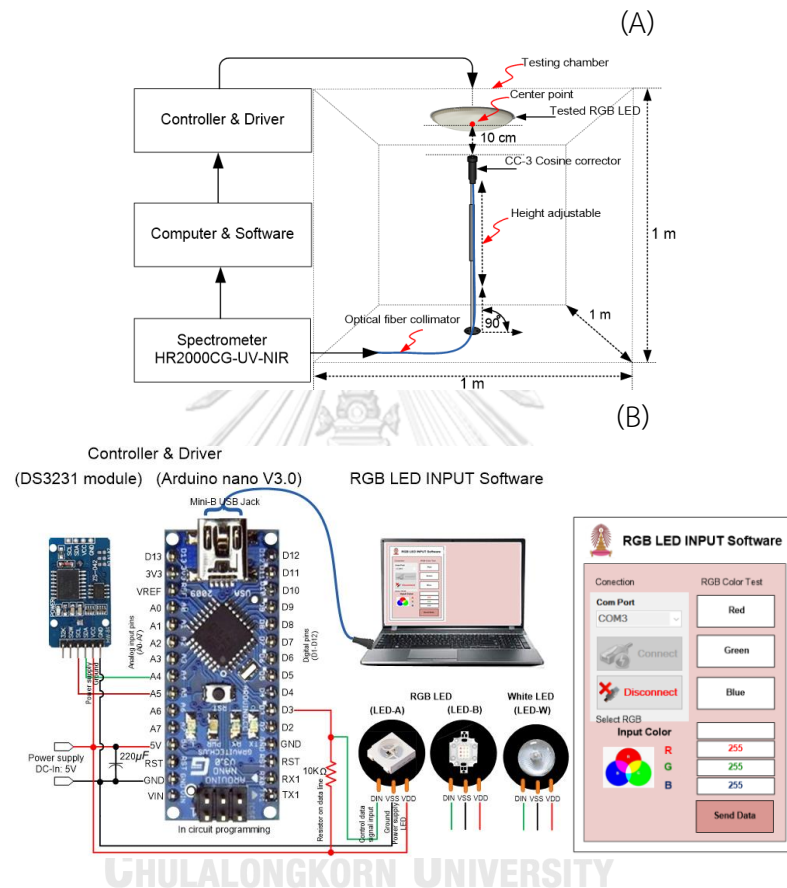
แผนผังการทำงานของระบบการควบคุมการส่องสว่าง RGB-LEDs ในการศึกษานี้ได้แสดงไว้ในภาพที่ 3.2 โดย RGB-LED จะควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรขับกระแสไฟฟ้าของ LED แต่ละบิต เพื่อกำหนดแสงการส่องสว่างให้เป็นไปตามค่าเป้าหมายของค่า CCT ที่กำหนดได้ (3,000 – 10,000 เคลวิน) โดยการออกแบบและติดตั้งระบบควบคุมแสงสำหรับภายในห้องทดสอบ ขนาดกว้าง 1 เมตร ความยาว 1 เมตร และความสูง 1 เมตร ที่มีความเข้มของแสงระดับในช่วง 200 – 5,000 ลักซ์ โดยใช้ RGB-LEDs เป็นตัวกำเนิดแสงภายในโคมไฟ

(2.2) หลักการติดตั้งระบบควบคุม RGB-LED

1) แบ่งช่วง CCT ระหว่างวอร์มไวท์ (warm white) กับคูลไวท์ (cool white) ตามมาตรฐาน CRI 1995 [88, 124] กล่าวว่า ถ้า CCT >5,000 เคลวิน เป็นแสงคูลไวท์ และถ้า CCT <5,000 เคลวิน เป็นแสงวอร์มไวท์)

2) ทดสอบความสามารถของหลอด (validation) ตามค่าเป้าหมายของค่า CCT ในช่วง 3,000 – 10,000 เคลวิน

3) การตรวจวัดค่าแสง (Optical spectrometer (Ocean Optics, Model; HR2000CG-UV-NIR) คำนวณโดยใช้โปรแกรม ColorCalculator Software version 7.77 (Osram, USA)



ภาพที่ 24 แผนผังการทำงานของระบบการควบคุมการส่องสว่าง RGB-LEDs (A) การติดตั้งระบบการวัดสำหรับ RGB-LEDs และ (B) ระบบควบคุมการผลิตแสงผ่านซอฟต์แวร์ RGB LED Input

(2.3) การทดสอบประสิทธิภาพในการให้แสงของหลอด RGB-LEDs

เมื่อดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์และซอฟต์แวร์ควบคุมการผสมแสงสีของหลอด RGB-LEDs (ตามพิกัดบนเส้นพลาจเคียนโลกัส มาตรฐาน CIE 1931 เพื่อกำหนดค่ารหัสแสงสีตาม CCT) แล้ว จากนั้นจึงดำเนินการศึกษาประสิทธิภาพของหลอด โดยในการศึกษาค้างนี้จะทำการศึกษาประสิทธิภาพของหลอด RGB-LED จำนวน 2 ตัวแทน คือ หลอด LED-A จะเป็นตัวแทนหลอดที่มีการปรับค่า RGB-LEDs ของกระแสไฟทั้ง I_R , I_G และ I_B และหลอด LED-B จะเป็นตัวแทนหลอดที่มี

การปรับค่า RGB-LEDs เฉพาะกระแส I_G และ I_B รวมทั้งมี RGB-LEDs ทางการค้า (c-LED) มาใช้เปรียบเทียบผลการแสดงออกของแสงสีและข้อจำกัดในการให้แสงสีของหลอด ทั้งนี้แผนภาพอัลกอริทึม (algorithm) สำหรับการป้อนข้อมูลการเข้ารหัส RGB ได้กำหนดหลักการทำงานตามภาพที่ 19 ในการกำหนดของแสงสีแต่ละช่วง CCT มีเกณฑ์สำคัญ 2 ประการ ในการเลือกแหล่งกำเนิดแสง เพื่อพัฒนาการเลียนแบบแสงในรอบวัน ได้แก่ CCT ของแสง และทดสอบความแม่นยำของแสงสี (precision) ตามวิธีการมาตรฐานของทดสอบ CRI 1995 โดยแสงคู่หลอดที่มี CCT ต่ำ ($CCT > 5,000$ เคลวิน) ตามมาตรฐานพิกัดบนพลาจเคียนโลกัสและสำหรับโทนแสงวอร์มไวท์ที่มี CCT สูง ($CCT < 5,000$ เคลวิน) โดยใช้มาตรฐาน D65 เป็นมาตรฐาน ซึ่งในการทดสอบนี้ได้กำหนดค่าอุณหภูมิสีสัมพันธ์บนพิกัดตามค่ากำหนดบนพลาจเคียนโลกัสที่ 3,000 – 10,000 เคลวิน โดยระบบควบคุมการตั้งค่าแสงสีจะได้รับคำสั่งจากซอฟต์แวร์ RGB LED input โดยกำหนดรหัสสีตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่ารหัส RGB LED ในการทดสอบประสิทธิภาพของหลอด

CCT	รหัสสี	CCT	รหัสสี
3,000 K	255, 180, 107	6,000 K	255, 243, 239
3,500 K	255, 196, 137	7,000 K	245, 243, 255
4,000 K	255, 209, 163	8,000 K	227, 233, 255
4,500 K	255, 219, 186	9,000 K	214, 225, 255
5,000 K	255, 228, 206	10,000 K	207, 218, 255

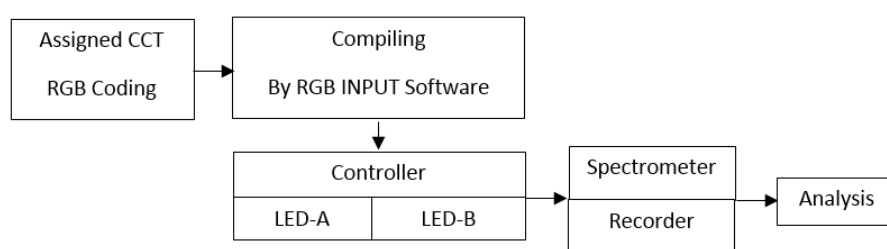
เพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องของหลอดประดิษฐ์เพื่อให้ได้ CCT ตามเป้าหมายที่ตั้งไว้และพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ทางโฟโตเมตรีและเรดิโอเมตรี ได้แก่ ค่าความสว่าง SPD, LE, LER, CER, CCT, Duv, XYZ, CAF, CL_A , CS, MSI, S/P, CRI และ CQS โดยใช้ โปรแกรม ColorCalculator Software version 7.77 (Osram, USA)

ตอนที่ 3 การออกแบบระบบควบคุม RGB-LED เพื่อผลิตแสงเลียนแบบแสงในรอบวัน

(3.1) การสร้างและการติดตั้งระบบการส่องสว่าง

ดำเนินการพัฒนาระบบการส่องสว่างจะใช้ข้อมูลในการกำหนดพิกัดของค่าสีที่ได้จากการศึกษาในตอนที 2 และใช้ระบบส่องแสงสว่างที่ได้จากการพัฒนาจากการศึกษาในตอนที 2 โดยมีหลักการดำเนินงานดังนี้

- 1) กำหนดรหัส RGB ที่ได้จากการศึกษาแสงในรอบวันในฤดูร้อนและฤดูหนาว โดยใช้โปรแกรม ColorCalculator Software version 7.77 (Osram, USA)
- 2) ป้อนรหัสเข้าสู่ซอฟต์แวร์ RGB LED Input
- 3) การตรวจวัดค่าแสงในรอบวัน (Optical spectrometer (Ocean Optics, Model; HR2000CG-UV-NIR high resolution spectrometer, USA)) โดยจะวัดช่วงคลื่นแสงที่มองเห็น ตั้งแต่ 380 – 780 นาโนเมตร อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของเครื่องวัดอยู่ที่ 300:1 และวิเคราะห์ผลผ่านโปรแกรม ColorCalculator Software version 7.77 (Osram, USA)



ภาพที่ 3.25 กระบวนการศึกษาประสิทธิภาพของหลอด LED

(3.2) การทดสอบประสิทธิภาพในการผลิตแสงของหลอด LED

เมื่อดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์และซอฟต์แวร์ควบคุมการผสมแสงสีของหลอด RGB-LED แล้ว จึงดำเนินการศึกษาประสิทธิภาพของหลอด โดยในการศึกษาค้างนี้จะทำการศึกษาประสิทธิภาพของหลอด RGB-LED 2 ตัวอย่าง คือ หลอด LED-A จะเป็นตัวอย่างหลอดที่มีการปรับค่า RGB ทั้ง I_R , I_G และ I_B หลอด LED-B จะเป็นตัวอย่างหลอดที่มีการปรับค่า RGB เฉพาะ I_G และ I_B โดยมี RGB-LEDs ทางการค้ามาใช้เปรียบเทียบผลการแสดงออกและข้อจำกัดในการให้แสง โดยการทดสอบนี้ กำหนดค่า CCT บนพิกัดแผนภาพสีตามค่าที่กำหนดบนเส้นพลาจเคียนโลกัสที่ 3,000 – 10,000 เคลวิน โดยระบบควบคุมการตั้งค่าแสงจะได้รับการคำสั่งจากซอฟต์แวร์ RGB LED input โดยกำหนดรหัสสีตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่ารหัส RGB LED ในการทดสอบประสิทธิภาพของหลอด

ช่วง เวลา	ฤดูร้อน				ฤดูหนาว			
	CCT	รหัสสี	รหัสสี	รหัสสี	CCT	รหัสสี	รหัสสี	รหัสสี
06:00 น.	5,441 K	255	232	229	5,314 K	187	255	214
07:00 น.	5,226 K	249	255	230	5,313 K	197	255	208
08:00 น.	5,327 K	228	255	194	5,341 K	210	255	196
09:00 น.	5,500 K	225	254	187	5,354 K	222	255	186
10:00 น.	5,560 K	227	255	182	5,630 K	226	255	181
11:00 น.	5,790 K	233	255	177	6,202 K	228	255	179
12:00 น.	5,896 K	231	255	177	7,006K	226	255	175
13:00 น.	5,842 K	229	255	182	6,568 K	229	255	180
14:00 น.	5,646 K	225	255	184	5,974 K	228	255	179
15:00 น.	5,570 K	225	255	184	5,547 K	226	254	179
16:00 น.	5,174 K	218	255	197	5,374 K	225	255	178
17:00 น.	5,381 K	226	255	191	5,307 K	219	255	188
18:00 น.	5,454 K	233	255	210	5,282 K	205	255	201

เพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องของหลอดประดิษฐ์เพื่อให้ได้ CCT ตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ และพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ทางโฟโตเมตริกและเรติโอเมตริกเช่นเดียวกับวิธีการศึกษาในตอนที่ 2 ได้แก่ ค่าความสว่าง SPD, LE, LER, CER, CCT, Duv, XYZ, CAF, CL_A, CS, MSI, S/P, CRI และ CQS โปรแกรม ColorCalculator Software version 7.77 (Osram, USA) และเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหลอดโดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนในการให้แสงสีของหลอด (δ) โดย

(1) กำหนดค่า

CCT₀ คือ Standard CCT ของ Circadian ข้อมูลได้มาจากช่วงฤดูร้อน (summer) และฤดูหนาว (winter)

CCT₁ คือ CCT ของหลอด LED-A และ LED-B ที่สามารถทำได้

(2) คำนวณค่าความแตกต่างหรือสัมพัทธ์

$$\delta = \frac{|CCT_1 - CCT_0|}{CCT_0} \times 100\% \quad (26)$$

จากผลการทดสอบเบื้องต้นโดยพิจารณาจากค่า δ พบว่าหลอด LED-A มีประสิทธิภาพในการให้แสงสว่างใกล้เคียงค่าเป้าหมายได้มากกว่า LED-B ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ซึ่งจากผลการ

ทดลองดังกล่าวทำให้ทราบถึงปัญหาด้านขีดจำกัดของหลอด LED ด้วยเหตุนี้ในการพัฒนาหลอดในการศึกษาตอนต่อไปจำเป็นต้องใช้หลอด LED แสงขาว (whiter LED) เพื่อปรับปรุงค่า CCT ของแสงให้ใกล้เคียงค่าเป้าหมายมากที่สุด

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ LED-A และ LED-B ในการเลียนแบบแสงในรอบวัน

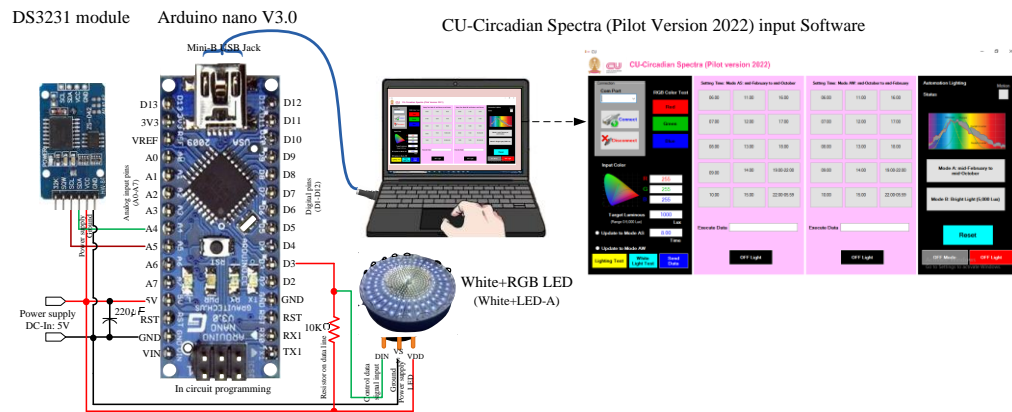
Efficiency	LED-A	LED-B
Summer		
δ_{CCT}	-49 K	-1,263 K
δ_{CCT} (%)	3.00%	23.00%
Winter		
δ_{CCT}	-150 K	-1,153 K
δ_{CCT} (%)	3.00%	20.00%
Overall		
δ_{CCT}	-100 K	-1,208 K
δ_{CCT} (%)	3.07%	21.55%

ตอนที่ 4 การพัฒนาระบบอัจฉริยะในการให้แสงในรอบวัน

(4.1) การออกแบบระบบให้แสงในรอบวัน

ในส่วนนี้จะดำเนินการโดยพัฒนาส่วนของฮาร์ดแวร์ที่ได้จากตอนที่ 3 เพื่อพัฒนาระบบอัจฉริยะส่องสว่างสำหรับการให้แสงในรอบวัน (circadian light) และแสงจ้า (bright light) ในขั้นตอนนี้จะมีการตั้งค่าความเข้มแสงเป้าหมายสูงสุดที่ 5,000 ลักซ์ ในระยะ 60 เซนติเมตร โดยประกอบด้วย หลอด RGB-LEDs หลอดแสงขาว (white light LED) โคมไฟและโครงสร้างชุดควบคุมการป้อนรหัสสีและความสว่างของแสง (controller and driver) คอมพิวเตอร์ และสมาร์ตโฟน (รองรับระบบ android) ซอฟต์แวร์ และ application สำหรับควบคุมการทำงานอัจฉริยะสำหรับเลียนแบบแสงในรอบวัน โดยมีรายละเอียดและหลักการในการทำงาน ดังต่อไปนี้

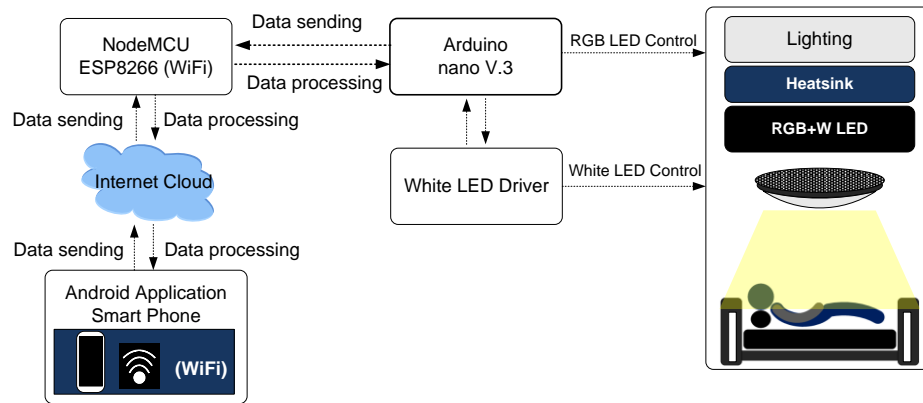
(4.1.1) ชุดควบคุมการป้อนรหัสสีและความสว่างของแสง



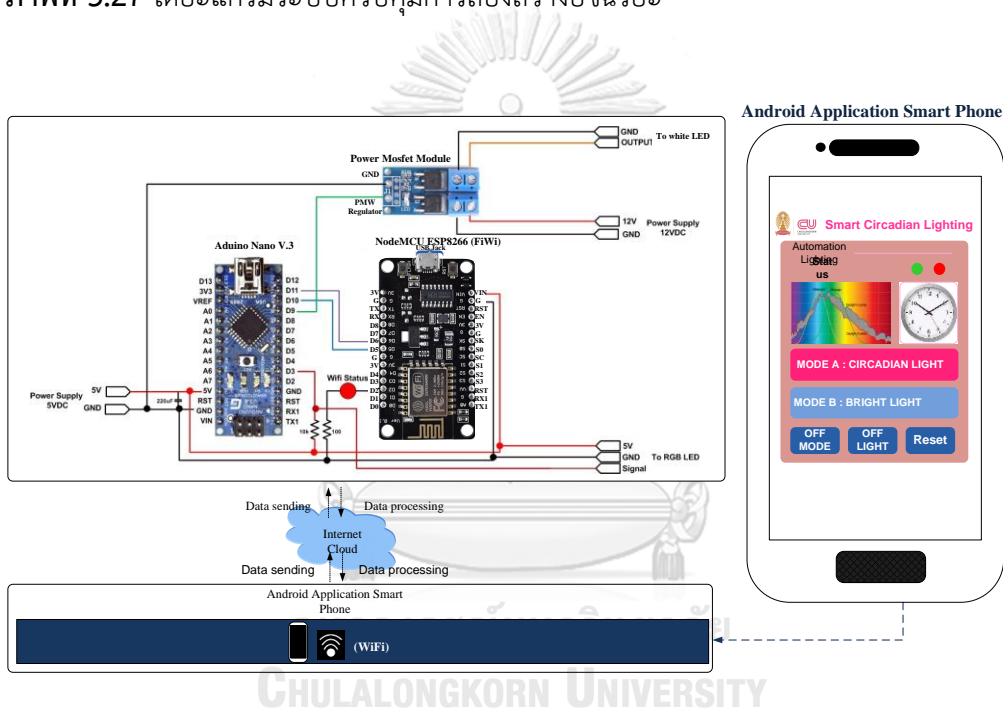
ภาพที่ 3.26 วงจรควบคุมการทำงานของหลอด การป้อนรหัสสี และการกำหนดความสว่างของแสง

(4.1.2) การทำงานของระบบการส่องสว่างอัจฉริยะ

ระบบควบคุมการทำงานของหลอดส่องสว่างแบบอัจฉริยะ เป็นระบบที่สามารถควบคุมโคมไฟส่องสว่างผ่านสมาร์ทโฟนในการแสดงสถานะและควบคุมการทำงานผ่าน Android Application กับอุปกรณ์ IoT (internet of thing) เชื่อมต่อระหว่าง NodeMCU ESP8266 ซึ่งทำหน้าที่เป็น Client ในการเชื่อมต่อไปยัง WiFi Router ซึ่งทำหน้าที่ในการกระจายสัญญาณ WiFi และเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตที่จะรับส่งคำสั่งขึ้น Cloud และส่งไปยัง Router ปลายทางซึ่งสามารถควบคุมอุปกรณ์ได้จากสมาร์ทโฟนโดยอาศัยเครือข่ายการสื่อสารของ Internet เป็นสื่อกลางในการควบคุม การสั่งการระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ (android operating system) โดยผู้ใช้สมาร์ทโฟน (User smart phone) สามารถเลือกรูปแบบคำสั่งไปยังบอร์ดควบคุมส่องสว่าง 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบการเลียนแบบแสงในรอบวัน (circadian light) และรูปแบบแสงจ้า (bright light) ตามผู้ใช้ต้องการ และเมื่อมีการใช้งานจากผู้ใช้ส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย WiFi โพลโตคอล TCP/IP ไปยังบอร์ดควบคุม Arduino nano V.3 และ White LED Driver ซึ่งการควบคุมการทำงานของโคมไฟทำงานดังภาพที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ



ภาพที่ 3.27 ไดอะแกรมระบบควบคุมการส่องสว่างอัจฉริยะ

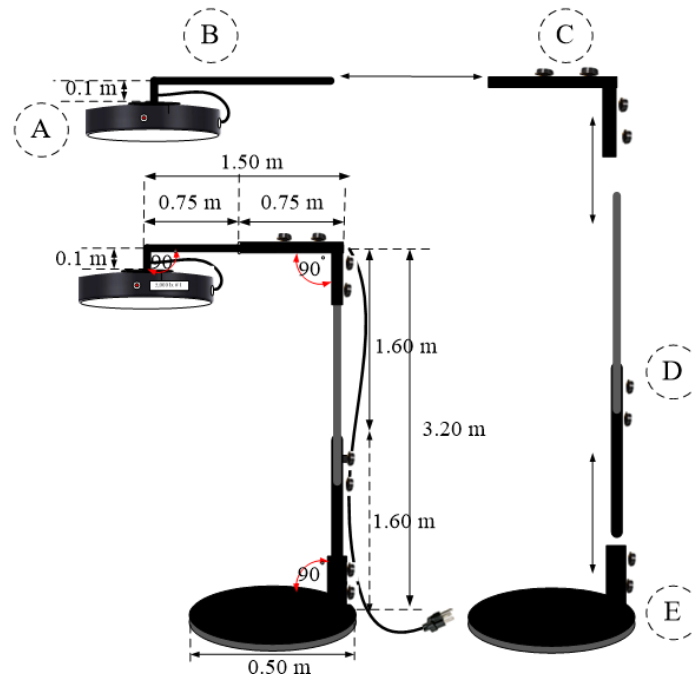


ภาพที่ 3.28 ระบบควบคุมการส่องสว่างอัจฉริยะ (ฮาร์ดแวร์)

(4.1.3) โคมไฟแสงประดิษฐ์และโครงสร้าง

ชุดโคมไฟแสงประดิษฐ์และโครงสร้างประกอบไปด้วย โคมไฟทำด้วยเหล็กแผ่น มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร โดยโคมไฟแสงประดิษฐ์มีขนาดความกว้าง 395 มิลลิเมตร ความยาว 395 มิลลิเมตร และความสูง 80 มิลลิเมตร และชุดโครงสร้างเสาสร้างขึ้นเพื่อรองรับส่วนของโคมไฟแสงประดิษฐ์ทำจากเหล็กแบบกลมประกอบด้วย 4 ส่วน โดยส่วน A มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{1}{2}$ นิ้ว และมีความยาว 1.50 เมตร ทำมุมฉาก 90 องศา เพื่อรองรับโคมไฟแสงประดิษฐ์และรองรับส่วน B ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว และมีความยาว 0.75 เมตร ทำมุมฉาก 90 องศา เพื่อรองรับส่วน C ที่ประกอบด้วย เหล็กแบบกลม 2 ขนาด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{1}{2}$ นิ้ว และ 1 นิ้ว โดยมีขนาด

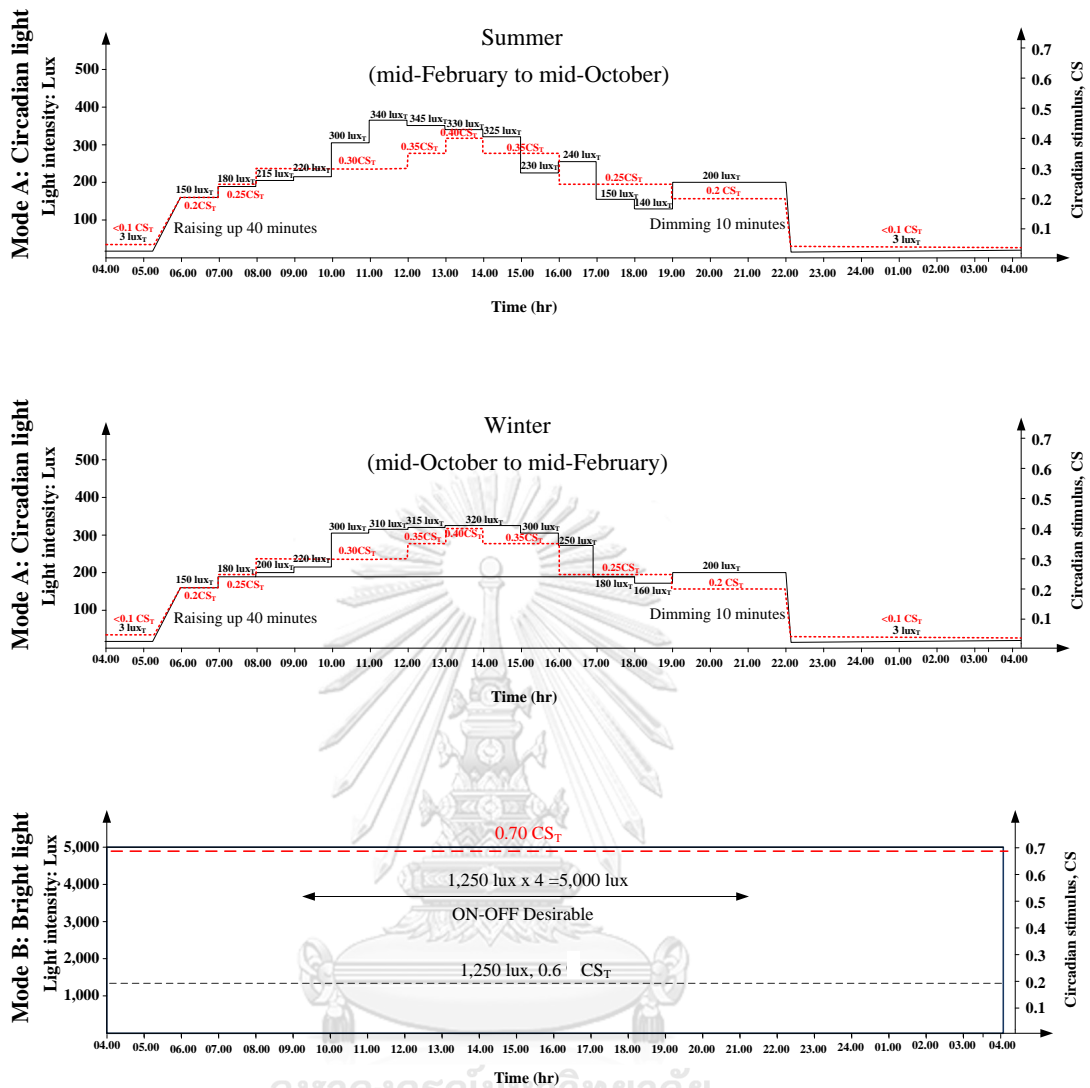
ความยาว 1.60 เมตร และส่วน D เป็นฐานรองรับโครงสร้างและโคมไฟประดิษฐ์ทำจากเหล็กแผ่นมีความหนา 2 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลม 0.5 เมตร



ภาพที่ 3.29 โคมไฟแสงประดิษฐ์และโครงสร้าง

(4.2) รูปแบบการทำงาน (Algorithm) ของระบบอัจฉริยะในการให้แสงในรอบวัน

ระบบควบคุมสำหรับแสงในรอบวันประกอบด้วยโคมไฟ (หลอดไฟ LED ที่ควบคุม CCT ในช่วงระหว่าง 2,000 – 6,500 เคลวิน โดยใช้ข้อมูล CCT ของแสงกลางวันที่ได้จากการศึกษาในตอนเช้า และออกแบบระบบไมโครคอนโทรลเลอร์พร้อมเซ็นเซอร์ควบคุมแสงแบบวงปิด (closed-loop lighting) ภายในห้อง (เชื่อมต่อ NodeMCU ESP8266) ออกแบบและตั้งค้าระบบควบคุมแสงภายในด้วยความเข้มของแสงโดยใช้ RGB-LED เพื่อให้ความสว่างเลียนแบบแสงในรอบวันแบบสมาร์ตตามรูปแบบ (mode) 2 รูปแบบ โดยรูปแบบที่ 1 คือ รูปแบบการเลียนแบบแสงในรอบวัน และรูปแบบที่ 2 คือ รูปแบบแสงจำที่ระดับความสว่าง 5,000 ลักซ์ ซึ่งในการออกแบบจะให้แสงที่มี CCT ตามฤดูกาลจากการศึกษาในตอนเช้า โดยกำหนดระดับความสว่างจะพิจารณาจากเกณฑ์ระดับของค่า CS ที่เหมาะสม โดยช่วงเวลา 06:00 น. – 07:00 น. กำหนดที่ CS = 0.20 ช่วงเวลา 07:00 น. – 08:00 น. กำหนดที่ CS = 0.25 ช่วงเวลา 08:00 น. – 12:00 น. กำหนดที่ CS = 0.30 ช่วงเวลา 12:00 น. – 13:00 น. กำหนดที่ CS = 0.35 ช่วงเวลา 13:00 น. – 14:00 น. กำหนดที่ CS = 0.40 ช่วงเวลา 14:00 น. – 16:00 น. กำหนดที่ CS = 0.35 ช่วงเวลา 16:00 น. – 19:00 น. กำหนดที่ CS = 0.25 ช่วงเวลา 19:00 น. – 22:00 น. กำหนดที่ CS = 0.20 ดังในภาพที่ 3.8 [125-127]



ภาพที่ 3.30 รูปแบบการให้แสงจำและเลียนแบบแสงในรอบวันของฤดูร้อนและฤดูหนาว

จากหลักการออกแบบการทำงานของหลอดดังกล่าว จะทำให้ได้ลักษณะของแสงที่ออกมาจากโคมไฟแสงประดิษฐ์จำนวน 29 ตัวอย่าง และโคมไฟทางการค้า จำนวน 2 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 31 ตัวอย่าง โดยแสงแต่ละแบบจะมีการวิเคราะห์ถึงสมบัติและความถูกต้องของแสงตามเป้าหมายที่ตั้งไว้และพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ทางโฟโตเมตรีและเรติโอเมตรีเช่นเดียวกับวิธีการศึกษาในตอน ที่ 2 ได้แก่ ค่าความสว่าง SPD, LE, LER, CER, CCT, Duv, XYZ, CAF, CL_A, CS, MSI, S/P, CRI และ CQS คำนวณโดยใช้โปรแกรม ColorCalculator Software version 7.77 (Osram, USA) และเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหลอดโดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนในการให้แสงสีของหลอด (δ) ณ พิกัด 1 เมตร ในแนวตั้งฉากจากหลอดประดิษฐ์ โดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับวิธีการใน

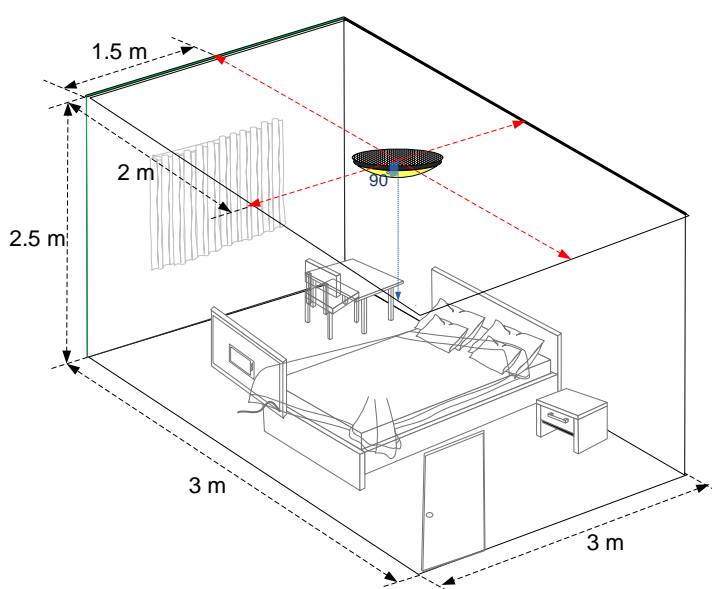
ตอนที่ 3 ข้อ 3.2 โดยรหัสของแสงสีตาม CCT และคุณสมบัติของแสงในรอบวันสำหรับการสร้างระบบส่องสว่างอัจฉริยะได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 รหัสของแสงสีตาม CCT ของแสงในรอบวันในการสร้างระบบส่องสว่างอัจฉริยะ

Sample	R	G	B	CCT (K)	Illumination (Lux)	CS
A1 (06:00)	255	232	229	5,441 K	150	0.20
A2 (07:00)	249	255	230	5,226 K	180	0.25
A3 (08:00)	228	255	194	5,327 K	215	0.30
A4 (09:00)	225	254	187	5,500 K	220	0.30
A5 (10:00)	227	255	182	5,560 K	300	0.30
A6 (11:00)	233	255	177	5,790 K	340	0.30
A7 (12:00)	231	255	177	5,896 K	345	0.35
A8 (13:00)	229	255	182	5,842 K	330	0.40
A9 (14:00)	225	255	184	5,646 K	325	0.35
A10 (15:00)	225	255	184	5,570 K	230	0.35
A11 (16:00)	218	255	197	5,174 K	240	0.25
A12 (17:00)	226	255	191	5,381 K	150	0.25
A13 (18:00)	233	255	210	5,454 K	140	0.20
B (19:00 – 22:00)	246	238	213	4,100 K	200	0.20
C (22:00 – 05:00)	246	238	213	4,100 K	1	<0.10
D1 (06:00)	187	255	214	5,314 K	150	0.20
D2 (07:00)	197	255	208	5,313 K	180	0.25
D3 (08:00)	210	255	196	5,341 K	200	0.30
D4 (09:00)	222	255	186	5,345 K	220	0.30
D5 (10:00)	226	255	181	5,630 K	300	0.30
D6 (11:00)	228	255	179	6,202 K	310	0.30
D7 (12:00)	226	255	175	7,006 K	315	0.35
D8 (13:00)	229	255	180	6,568 K	320	0.40
D9 (14:00)	228	255	179	5,974 K	320	0.35
D10 (15:00)	226	254	179	5,547 K	300	0.35
D11 (16:00)	225	255	178	5,374 K	250	0.25
D12 (17:00)	219	255	188	5,307 K	180	0.25
D13(18:00)	205	255	201	5,282 K	160	0.20
E (D65) (19:00)	255	255	255	5,600 K	1,250	0.7
F (WW) (6.00)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
G (CW) (18.00)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

(4.3) การทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานระบบอัจฉริยะในการให้แสงในรอบวัน

ในการศึกษานี้ได้ออกแบบระบบให้แสงสว่างอัจฉริยะในการให้แสงในรอบวันเพื่อนำไปใช้ในห้องต่าง ๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้กับห้องที่มีพื้นที่ขนาดต่าง ๆ และตำแหน่งต่าง ๆ ได้ ทั้งนี้เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการนำไปใช้ จึงได้จำลองสถานการณ์ในห้องมีขนาดอย่างน้อยมีความกว้าง 3 เมตร x ความยาว 3 เมตร x ความสูง 2.5 เมตร โดยมีพื้นผนังเป็นสีขาว และกำหนดตำแหน่งของหลอดทดสอบที่บริเวณจุดศูนย์กลางของห้องที่ทำมุมกับดวงตามนุษย์ขณะนอนที่ 90 องศา และกำหนดพิกัดในการวัดค่าความเข้มแสงและคลื่นแสง ณ บริเวณพื้นห้องดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.31 การวางตำแหน่งระบบอัจฉริยะในการให้แสงในรอบวันและการตรวจวัดแสง

(4.3.1) สมบัติของแสงในรอบวัน (photometry and radiometry)

ภายหลังจากการติดตั้งแล้วแสงที่ได้จะมีการวิเคราะห์ถึงสมบัติ และความถูกต้องของแสงตามเป้าหมายที่ตั้งไว้และพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ทางโฟโตเมตรีและเรดิเมตรีเช่นเดียวกับวิธีการศึกษาในตอนที่ 2 ได้แก่ ค่าความสว่าง SPD, LE, LER, CER, CCT, Duv, XYZ, CAF, CL_A, CS, MSI, S/P, CRI และ CQS โปรแกรม ColorCalculator Software version 7.77 (Osram, USA) และเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหลอดโดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนในการให้แสงสีของหลอด (δ) ณ พิกัดต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ในภาพที่ 3.9 เพื่อให้หลอดไฟที่อยู่ภายในโคมไฟสามารถเลียนแบบแสงในรอบวันและให้มีระดับที่ปลอดภัย โดยปริมาณแสงมีความเหมาะสมอยู่ในช่วงมาตรฐานของการใช้งาน ตามคู่มือแนวทางการออกแบบการส่องสว่างภายในอาคารสมาคมไฟฟ้า

แสงสว่างแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2563 และตามวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้ (EN 12464-1, 2011; CIE S008/E, 2002)

(4.3.2) การทดสอบความพึงพอใจในการนำไปใช้ของระบบส่องสว่างอัจฉริยะ

เพื่อบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของระบบส่องสว่างอัจฉริยะในรูปแบบของแสงจ้า และแสงในรอบวันต่อการนำไปใช้ภายในห้องนอนหรือห้องพักผ่อน โดยงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการศึกษาถึงความพึงพอใจในการนำไปใช้ของระบบส่องสว่างอัจฉริยะที่มีผลต่อการรับรู้แสงและความเหมาะสมต่อดวงตา และผลที่มีต่อความพึงพอใจของผู้เข้าร่วมการวิจัย

กลุ่มตัวอย่างผู้เข้าร่วมการวิจัยในการศึกษานี้ คำนวณขนาดกลุ่มตัวอย่างโดยใช้วิธีการประมาณการจากค่าเฉลี่ยของกลุ่ม (single mean group) โดยจากงานวิจัยของ Li *et al.* (2021)[128] ใช้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\sigma = 0.14$)

$$n > \frac{Z_{\alpha}^2 \sigma^2}{e^2} > \frac{3.84 \times (0.14)^2}{(0.05)^2} > 30.11 = 31 \text{ คน}$$

โดย ค่า $Z_{\alpha} = 1.96$ ที่ 95% CI (ค่ามาตรฐานภายใต้เส้นโค้งปกติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 เท่ากับ 1.96), $Z_{\alpha}^2 = 3.84$ และค่า $e^2 =$ ค่าความแม่นยำ (precision)

เพื่อให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นในการทดสอบในครั้งนี้จะใช้ผู้เข้าร่วมวิจัยที่มีสุขภาพดีจำนวน 32 คน ที่มีอายุตั้งแต่ 35 – 60 ปี ซึ่งเป็นกลุ่มที่อยู่ในวัยทำงาน โดยผู้วิจัยจะดำเนินการเป็นผู้คัดกรองด้วยตนเอง โดยใช้เกณฑ์การคัดเข้าและคัดออกสำหรับผู้เข้าร่วมการวิจัยดังนี้

เกณฑ์การคัดเข้า (inclusion criteria)

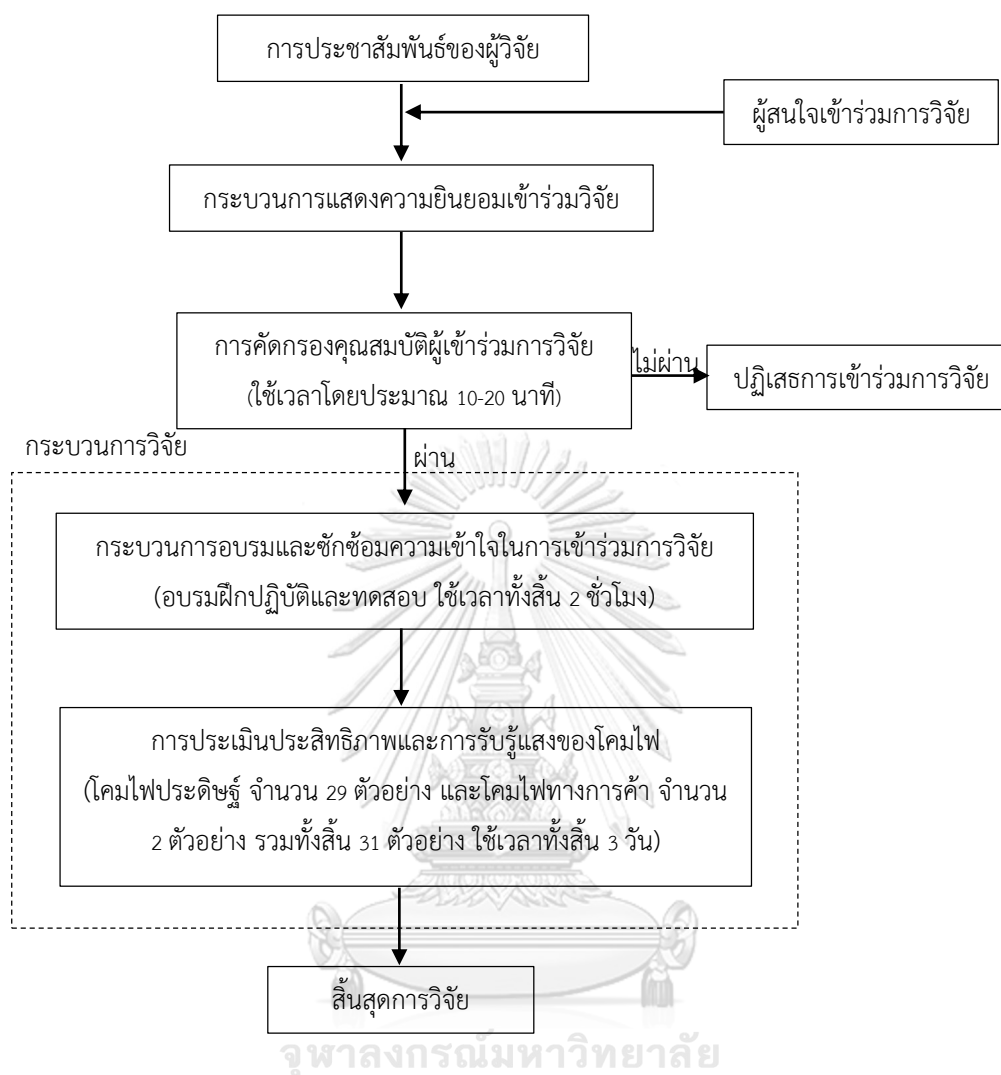
- ไม่เป็นโรคติดต่อและโรคติดเชื้อร้ายแรง ได้แก่ วัณโรค ภูมิคุ้มกันบกพร่อง โคโรนา-19 โรคหัด โรคอีสุกอีใส โรคไข้หวัด โรคตาแดง เป็นต้น
- ไม่อยู่ในระหว่างการรักษาหรือการบำบัดโรคที่เป็นอุปสรรคต่อการเข้าร่วมการทดสอบ เช่น ผ่าตัดดวงตา ผู้ป่วยที่อยู่ในระยะพักฟื้นหลังการรักษาที่ไม่สามารถช่วยเหลือตนเองได้ หรือไม่เหมาะสมต่อการทำกิจกรรมเป็นระยะเวลานาน เป็นต้น
- ไม่เป็นหญิงมีครรภ์ หรือ หลังคลอด หรือ ระหว่างให้นมบุตร
- ไม่มีปัญหาด้านการมองเห็นที่เป็นอุปสรรคต่อการรับแสง เช่น ตาบอดสี เป็นต้น
- ในบ้านหรือห้องพักมีเครื่องปรับอากาศและม่านปิดแสง
- ยินยอมให้มีการติดตั้งคอมพิวเตอร์ในบ้านได้
- มีห้องพักขนาดความกว้าง x ความยาว x ความสูง อย่างน้อย 3 x 3 x 2.5 เมตร
- มีความสามารถในการอ่านภาษาไทยได้
- มีความสามารถใช้นิ้วตบคู้ได้ (ทางผู้วิจัยจะให้ยืมใช้ในการทดสอบ)
- มีความพร้อมในการเข้าร่วมกระบวนการวิจัย

เกณฑ์การออก (Exclusion criteria)

- มีอาการปวด หรือ ระคายเคืองตาระหว่างการทดสอบ
- มีอาการวิงเวียนศีรษะ หรืออาเจียน ขณะทำการทดสอบกระบวนการ
- ขอดถอนตัวจากการเข้าร่วมระหว่างการศึกษา

ทางผู้วิจัยทำการประกาศหาผู้สนใจเข้าร่วมการวิจัยทางสื่อประชาสัมพันธ์ โดยการติดต่อประกาศ ณ บริเวณป้ายประชาสัมพันธ์ของหน่วยงานต่าง ๆ เช่น โรงพยาบาล สถานศึกษา เป็นต้น โดยให้ผู้สนใจสามารถติดต่อผู้วิจัยได้โดยตรงผ่านทางหมายเลขโทรศัพท์ หรืออีเมลตามที่ระบุในใบประกาศประชาสัมพันธ์โครงการ เมื่อผู้วิจัยได้รับการติดต่อจากผู้สนใจเข้าร่วมโครงการ ทางผู้วิจัยจะทำการนัดหมายเพื่อให้ผู้สนใจเพื่อเข้ารับฟังคำชี้แจงในการเข้าร่วมการวิจัย เกี่ยวกับที่มาและวัตถุประสงค์ของโครงการ กระบวนการในการเข้าร่วมการวิจัย และความเสี่ยงจากการวิจัย โดยผู้วิจัยจะเปิดโอกาสให้ผู้สนใจสอบถามได้อย่างละเอียด และสามารถขอคำแนะนำในการเข้าร่วมโครงการวิจัยนี้จากครอบครัว เพื่อน หรือแพทย์ประจำตัวได้ และมีเวลาอย่างเพียงพอในการตัดสินใจโดยอิสระ ถ้าหากผู้สนใจตัดสินใจแล้วว่าจะเข้าร่วมในโครงการวิจัยนี้ ทางผู้วิจัยจะให้ลงนามในเอกสารข้อมูลสำหรับผู้มีส่วนร่วมในการวิจัยและหนังสือแสดงยินยอมเข้าร่วมการวิจัย

หลังจากนั้นทางผู้วิจัยจะทำการนัดหมายกับผู้เข้าร่วมการวิจัยเพื่อทำการเข้าสู่กระบวนการคัดกรองคุณสมบัติ และการอบรมกระบวนการวิจัยตามแนวทางในคู่มือแนวปฏิบัติในการประเมินและบันทึกผลการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสง โดยเครื่องมือดังกล่าวถูกพัฒนาขึ้นโดยการดัดแปลงจากงานวิจัยของ van Duijnhoven และคณะในปี ค.ศ.2017 [129] และเครื่องมือดังกล่าวมีกระบวนการพิจารณาความถูกต้องของเครื่องมือโดยผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 3 คน และมีการทดลองใช้เครื่องมือที่ถูกพัฒนาขึ้น จำนวน 30 คน เพื่อศึกษาความเที่ยงตรงของเครื่องมือก่อนที่จะนำไปใช้ทดสอบกับผู้เข้าร่วมการวิจัย จำนวน 32 คน



ภาพที่ 3.32 การทดสอบความพึงพอใจการนำไปใช้ของระบบส่องแสงสว่างเลียนแบบแสงในรอบวัน

หมายเหตุ การอบรมติดตั้งอุปกรณ์การอบรมจะดำเนินการโดยผู้วิจัยจะเป็นผู้อบรมถึงกระบวนการการติดตั้ง ซักซ้อมความเข้าใจและสาธิตโดยตรงก่อนล่วงหน้าอย่างน้อย 1 วัน ซึ่งจะดำเนินการโดยการนัดหมายตามสะดวกของผู้เข้าร่วมวิจัยเป็นหลักหรือที่บ้านของผู้เข้าร่วมวิจัยก็ได้ โดยใช้เวลาทั้งสิ้น 2 ชั่วโมง (ประเมินความถูกต้องในการติดตั้งโคมไฟตามที่ระบุไว้ในคู่มือแนวปฏิบัติในการประเมินและการบันทึกผลการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสง)

การตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือ

ผู้ศึกษาได้สร้างเครื่องมือและตรวจสอบเครื่องมือโดย

1. ตรวจสอบความตรง (validity) โดยตรวจสอบความตรงตามเนื้อหา (content validity) ของเครื่องมือโดยให้ผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบ 3 คน ในการพิจารณาความถูกต้องและความชัดเจนของการใช้ภาษา การครอบคลุมเนื้อหา หลังจากผู้เชี่ยวชาญได้ตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาของเครื่องมือและให้ข้อเสนอแนะ โดยตรวจสอบความสอดคล้อง (index of congruence: OC) โดยให้คะแนนตามเกณฑ์ดังนี้

ถ้าข้อความวัดได้ตรงจุดประสงค์ ได้ +1 คะแนน

ถ้าไม่แน่ใจว่าข้อความนั้นวัดตรงจุดประสงค์หรือไม่ ได้ 0 คะแนน

ถ้าข้อความวัดได้ไม่ตรงจุดประสงค์ ได้ -1 คะแนน

นำคะแนนของผู้เชี่ยวชาญทุกคนที่ประเมินมารวมลงในแบบวิเคราะห์ความสอดคล้องของข้อความกับจุดประสงค์เพื่อหาค่าเฉลี่ยสำหรับข้อความแต่ละข้อใช้สมการที่ (27) ดังนี้

$$IOC = \frac{\sum R}{N} \quad (27)$$

โดยที่

IOC คือค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อสอบกับจุดประสงค์ (index of item-objective Congruence)

$\sum R$ คือแทนผลรวมของคะแนนความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ

N คือจำนวนผู้เชี่ยวชาญ

โดยเกณฑ์การคัดเลือกข้อคำถามมีดังนี้

1) ข้อคำถามที่มีค่า IOC ตั้งแต่ 0.5 – 1.00 คัดเลือกไว้ใช้ได้

2) ข้อคำถามที่มีค่า IOC ต่ำกว่า 0.5 ควรพิจารณาปรับปรุงหรือตัดทิ้ง

แล้วนำเครื่องมือที่ปรับปรุงข้อคำถามให้มีความเหมาะสมชัดเจนด้วยสำนวนภาษาความครอบคลุมของเนื้อหาที่ได้รับคำแนะนำและข้อคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญทุกท่านแล้วให้อาจารย์ที่ปรึกษาตรวจสอบความถูกต้องก่อนนำแบบสอบถามไปทดลองใช้ (try out) ซึ่งค่า $IOC > 0.5$

2. หาความเชื่อมั่น (reliability) โดยนำแบบสอบถามที่ได้รับการปรับปรุงแก้ไขไปทดสอบเครื่องมือ (try out) ในประชากรที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 30 คน ซึ่งมีลักษณะสภาพแวดล้อมและบริบทของการศึกษาที่ใกล้เคียงกันก่อนนำไปใช้จริงกับกลุ่มตัวอย่าง

แนวทางในการปฏิบัติ

ก่อนการทดสอบ

1. ก่อนการทดสอบนั้นผู้เข้าร่วมวิจัยจะได้รับอุปกรณ์ต่อไปนี้ (โดยผู้ร่วมวิจัยสามารถมารับเองได้ หรือให้ผู้วิจัยนำไปให้ก็ได้) ก่อนเริ่มการทดสอบกรุณาตรวจสอบว่าท่านได้รับอุปกรณ์ครบถ้วนหรือไม่
 - (1) โคมไฟแสงประดิษฐ์ จำนวน 1 โคม
 - (2) โคมไฟทางการค้า จำนวน 1 โคม
 - (3) คอมพิวเตอร์โน้ตบุค จำนวน 1 เครื่อง (สภาพพร้อมใช้งาน)
 - (4) นาฬิกาจับเวลา จำนวน 1 เครื่อง
 - (5) โต๊ะทำงาน จำนวน 1 ตัว (กรณีผู้เข้าร่วมการวิจัยไม่มี)
2. ทางผู้วิจัยขอความกรุณาท่านดำเนินการประกอบและจัดสถานที่ให้พร้อมก่อนถึงวันทดสอบ
3. ก่อนการทดสอบขอความร่วมมือผู้เข้าร่วมการทดสอบงดดื่มกาแฟหรือเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนเป็นส่วนผสม อย่างน้อย 1 วัน จนกระทั่งท่านได้ดำเนินการทดสอบเสร็จสิ้นแล้วจึงจะสามารถดื่มกาแฟหรือเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนได้
4. กรณีที่ท่านมีความจำเป็นต้องสวมแว่นสายตาสั้น หรือ สายตายาว ในการทดสอบขอให้ท่านสวมแว่นที่มีเลนส์ใส ไม่มีสี หรือที่ไม่ใช่เลนส์ชนิดกรองแสง
5. ก่อนการทดสอบขอให้ผู้เข้าร่วมทดสอบเลือกห้องที่มีอากาศถ่ายเท ปลอดโปร่ง หรือ สภาวะปกติต่อการใช้ชีวิตประจำวันของท่าน และควรมีเครื่องปรับอากาศระหว่างการทดสอบ และที่สำคัญต้องปิดประตูและหน้าต่าง (หากเป็นกระจกให้ใช้ผ้ามาปิดให้มิดชิด) ในระหว่างการทดสอบ
6. รบกวนท่านอ่านคำชี้แจงเกี่ยวกับกิจกรรมระหว่างการทดสอบอีกครั้ง
7. ในการทดสอบเกี่ยวกับประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของโคมไฟนี้ จะมีตัวอย่างแสงทั้งสิ้น 31 ตัวอย่าง และใช้เวลารวม 3 วัน ในการทดสอบ โดยผู้เข้าร่วมการวิจัยจะต้องดำเนินการกิจกรรมตามเวลาที่กำหนดในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 กำหนดการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของโคมไฟแสงประดิษฐ์

กำหนด	วันแรก (15 ตัวอย่าง)	วันที่ 2 (14 ตัวอย่าง)	วันที่ 3 (2 ตัวอย่าง)
เวลาทดสอบ	รหัสตัวอย่าง	รหัสตัวอย่าง	รหัสตัวอย่าง
06:00	A1	D1	F (WW)
07:00	A2	D2	ไม่มีการทดสอบ
08:00	A3	D3	ไม่มีการทดสอบ
09:00	A4	D4	ไม่มีการทดสอบ
10:00	A5	D5	ไม่มีการทดสอบ
11:00	A6	D6	ไม่มีการทดสอบ
12:00	A7	D7	ไม่มีการทดสอบ
13:00	A8	D8	ไม่มีการทดสอบ
14:00	A9	D9	ไม่มีการทดสอบ
15:00	A10	D10	ไม่มีการทดสอบ
16:00	A11	D11	ไม่มีการทดสอบ
17:00	A12	D12	ไม่มีการทดสอบ
18:00	A13	D13	G (CW)
19:00	B	E (D65)	สิ้นสุดการทดสอบ
22:00	C	ไม่มีการทดสอบ	
รวมเวลา	15 ชั่วโมง	14 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง

หมายเหตุ การทดสอบตัวอย่างแสงแต่ละตัวอย่าง แสดงดังภาพที่ 3.11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ระหว่างการทดสอบ CHULALONGKORN UNIVERSITY

8. ระหว่างการทดสอบ ท่านสามารถนั่งบนเก้าอี้ หรือ เติง และสามารถนอน (ห้ามหลับในระหว่างทดลอง)
9. ระหว่างการทดสอบ ท่านสามารถทำกิจกรรมต่าง ๆ ได้ โดยอยู่ในรัศมี 1 เมตร จากแนวตรงกลางของแสงที่กระทบพื้น ซึ่งกิจกรรมดังกล่าวต้องที่ไม่กระทบต่อร่างกายและอารมณ์ของท่านมากเกินไป
10. ในการทดสอบตัวอย่างแสงแต่ละตัวอย่างนั้น ให้ท่านหลับตา นาน 5 นาที แล้วจึงลืมตาขึ้น แล้วให้ดวงตารับแสง 15 นาที โดยมองไปรอบ ๆ ห้อง และสามารถกระพริบตาได้ตามปกติ แล้วจึงจะเริ่มให้คะแนนประเมินความพึงพอใจในส่วนที่ 1 ข้อ (1) – ข้อ (6) ของแต่ละตัวอย่างแสง แล้วจึงทำกิจกรรมใน ข้อที่ (7) การอ่านหนังสือ และข้อที่ (8) การอ่านข้อความบนจอโน้ตบุค ซึ่งท่านจะ

ได้รับเอกสารบทความเนื้อหาในส่วนของบทนำในรูปแบบของเอกสารใช้ตอบคำถามข้อที่ (7) และไฟล์ .pdf (เปิดด้วยโปรแกรม Adobe) ใช้สำหรับการตอบคำถามในข้อที่ (8)

11. สำหรับคำถามในส่วนของข้อที่ (9) และ ข้อที่ (10) ให้ดำเนินการประเมินเมื่อสิ้นสุดการทดสอบทั้งหมด (ตอบครั้งเดียว)



ภาพที่ 3.33 กระบวนการทดสอบตัวอย่างแสงแต่ละตัวอย่าง

เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบ

12. เมื่อสิ้นสุดการทดสอบแล้วให้ผู้เข้าร่วมการวิจัย แจ้งต่อผู้วิจัย เพื่อดำเนินการต่อไป
13. ทั้งนี้ หากมีข้อขัดข้องระหว่างการทดสอบให้แจ้งต่อผู้วิจัยทันที

3.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ใช้สถิติเชิงพรรณนา (descriptive statistics) ได้แก่ ค่าความถี่ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เป็นต้น และทดสอบความแตกต่างระหว่างชุดทดสอบความแปรปรวน (ANOVA) โดยใช้ F-test ที่ระดับความเชื่อมั่น $P < 0.05$ และวิเคราะห์ความแตกต่างภายในกลุ่ม repeated ANOVA โดยใช้ Bonferroni test ที่ระดับความเชื่อมั่น $P < 0.05$ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS version 28.0 (สหรัฐอเมริกา)

3.3 การพิทักษ์สิทธิในจริยธรรมวิจัยในคน

งานวิจัยนี้จะดำเนินการขออนุญาตการดำเนินงานวิจัยในคน จากคณะกรรมการจริยธรรมวิจัยในคน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยผู้วิจัยคำนึงถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อผู้เข้าร่วมการวิจัย ตามจริยธรรมของการวิจัย ดังต่อไปนี้ ได้แก่ การเคารพในสิทธิส่วนบุคคล (respect for person) โดยผู้เข้าร่วมการวิจัยที่เข้าร่วมจะได้รับการอธิบายถึงรายละเอียดของกระบวนการวิจัย ข้อดี ข้อเสีย ผลกระทบที่อาจ เกิดขึ้นจากการศึกษาวิจัยอย่างละเอียดชัดเจน ก่อนที่จะตัดสินใจเข้าร่วมในกระบวนการศึกษาวิจัย โดยข้อมูลส่วนบุคคลจะถูกปกปิดเป็นความลับ ทั้งนี้ผู้เข้าร่วมการวิจัยสามารถตัดสินใจที่จะเข้าร่วมการวิจัยหรือไม่ก็ได้ รวมถึงยังสามารถออกจากกระบวนการ วิจัยได้ตลอดเวลา หลักการคำนึงถึงผลประโยชน์ของผู้เข้าร่วมการวิจัย (beneficence/non-maleficence) โดยการศึกษานี้จะไม่ได้ก่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้เข้าร่วมการวิจัยโดยตรง แต่มีประโยชน์ต่อการพัฒนาระบบส่องสว่างที่มีคุณภาพต่อชีวิตมนุษย์ในภาพรวม และในการศึกษานี้การให้กลุ่มผู้เข้าร่วมการวิจัยได้รับแสงจากหลอดประดิษฐ์ถือเป็นความเสี่ยงต่ำ เนื่องจากเป็นการใช้แสงไฟจากหลอดประดิษฐ์ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายแก่กลุ่มตัวอย่างเป็นระดับความเข้มแสงที่พบในชีวิตประจำวันอยู่แล้ว ทั้งนี้อาการข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้น เช่น ปวดตา ปวดศีรษะ คลื่นไส้ ซึ่งอาการเหล่านี้สามารถหายได้เองภายในระยะเวลา 2 – 3 วัน ผู้วิจัยจะติดตามการเกิดผลข้างเคียงอย่างใกล้ชิด และให้คำแนะนำรวมถึงการส่งต่อการรักษาไปยังโรงพยาบาลของรัฐเพื่อเข้าสู่การรักษาโดยแพทย์ต่อไป หากผู้เข้าร่วมการวิจัยเกิดผลข้างเคียงจากการศึกษานี้ผู้วิจัยจะเป็นผู้รับผิดชอบการรักษาให้ทั้งหมดจนหายดี และในกรณีที่คอมพิวเตอร์ประดิษฐ์และคอมพิวเตอร์ทางการค้าเกิดความเสียหายขอความร่วมมือผู้เข้าร่วมการวิจัยหยุดการทดลองทันทีและรีบประสานมายังผู้วิจัยทันที ทั้งนี้ผู้เข้าร่วมวิจัยไม่ต้องชดเชยค่าเสียหายที่เกิดขึ้น โดยผู้เข้าร่วมการวิจัยจะได้รับการดูแลภายใต้มาตรการป้องกันการแพร่ระบาดของ Covid-19 ตลอด

ระยะเวลาการศึกษาวิจัย และหลักการยุติธรรมต่อกลุ่มผู้เข้าร่วมการวิจัย (justice) โดยผู้เข้าร่วมการวิจัยที่เข้าเกณฑ์การคัดเลือกจะได้รับโอกาสเข้าร่วมการศึกษาวิจัยโดยเท่าเทียมกัน และได้รับเอกสารชี้แจงข้อมูลคำอธิบายสำหรับผู้เข้าร่วมในโครงการวิจัย (เนื่องด้วยผู้เข้าร่วมการวิจัยใช้เวลาในการเข้าร่วมการวิจัยอีกทั้งยังเสียสละเวลาในการเข้าร่วมกิจกรรม 3 วัน จึงมีค่าชดเชยการเสียเวลาและแบ่งจ่ายแต่ละครั้ง ๆ ละ 300 บาท (รวม 900 บาท)



บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในการวิจัยนี้มี 4 ตอน ประกอบด้วย การศึกษาสมบัติทางเรดิโอเมตรี และโฟโตเมตรีของแสงในรอบวัน การพัฒนาระบบส่องสว่าง การสร้างระบบส่องสว่างอัจฉริยะเพื่อเลียนแบบแสงในรอบวันและแสงจ้า และการศึกษาประสิทธิภาพของระบบส่องสว่าง ซึ่งผลการศึกษาอธิบายได้ดังนี้

ตอนที่ 1 การศึกษาสมบัติทางสเปกโตรเมตริก (Spectrometric) ของแสงในรอบวัน

(1.1) การกระจายพลังงานสเปกตรัม (SPD)

หลักการประเมินคุณภาพของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงต่าง ๆ สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ สมบัติทางโฟโตเมตรีและเรดิโอเมตรี ซึ่งเป็นการกำหนดคุณสมบัติของแสงโดยพิจารณาจากการวัดปริมาณการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีหน่วยเป็นจูล (joule) หรือวัตต์ (watts) และวิธีการวัดแสงสว่างในสเปกตรัมโดยพิจารณาจากความไวของดวงตามนุษย์ที่มองเห็น ซึ่งอยู่ในช่วงคลื่นแสงที่ 360 – 830 นาโนเมตร มีหน่วยเป็นลูเมน (lumen) หรือแคนเดลา (candela) ซึ่งการวัดดังกล่าวเป็นพื้นฐานที่มีความสำคัญในการประเมินประสิทธิภาพและประสิทธิผลของแหล่งกำเนิดแสงสีขาวที่ใช้สำหรับการออกแบบการใช้งานแสงทั่วไป เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงอาจมีช่วงความยาวคลื่นแสงที่ดวงตามนุษย์ไม่สามารถมองเห็นได้ ดังนั้นในการวิเคราะห์สมบัติสเปกตรัมของแสงจึงควรมีความสอดคล้องกับความไวของตามนุษย์มากที่สุด ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์การออกแบบแหล่งกำเนิดแสงสามารถวิเคราะห์ได้จากการกระจายพลังงานสเปกตรัมของแสง (SPD) ที่สัมพันธ์กับสเปกตรัมความไวต่อดวงตาของมนุษย์

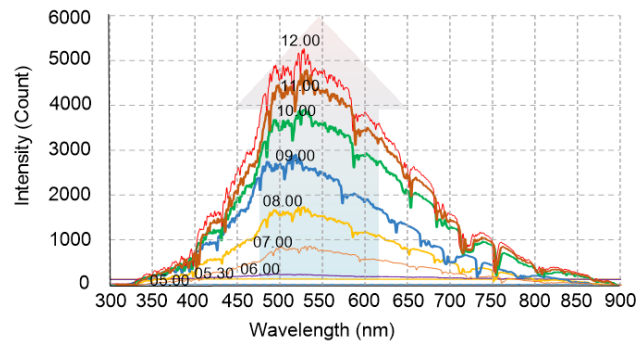
ในการศึกษานี้ได้เริ่มต้นด้วยการศึกษาสมบัติของแสงในรอบวันของประเทศไทยโดยได้ดำเนินการวัดแสงในรอบวันละติจูดที่ 16.288505944 องศาเหนือ ลองจิจูด 103.117675781 (ตำบลหัวขวาง อำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดมหาสารคาม ประเทศไทย) ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส หรือไม่มีเมฆและไม่มีฝน ในสองฤดูกาลของประเทศไทย ได้แก่ วันที่ 10 – 15 พฤษภาคม 2563 (ช่วงฤดูร้อนของประเทศไทย) และในวันที่ 10 – 15 พฤศจิกายน 2563 (ในช่วงฤดูหนาวของประเทศไทย) โดยในช่วงฤดูร้อนแสงของดวงอาทิตย์ขึ้นเวลา 05:37 น. และแสงดวงอาทิตย์ตกดินเวลา 18:30 น. ผู้วิจัยทำการวัดและเก็บข้อมูลเวลาตั้งแต่ 05:30 น. – 19:00 น. และในช่วงฤดูหนาวแสงของดวงอาทิตย์ขึ้นเวลา 06:11 น. และแสงจากดวงอาทิตย์ตกดินเวลา 17:30 น. วัดและเก็บข้อมูลตั้งแต่เวลา 06:00 น. –

18:00 น. เนื่องจากสเปกตรัมของแสงกลางวันมีความสัมพันธ์กับมุมตกกระทบของแสงกลางวัน ซึ่งมีความสมมาตรในตอนกลางวันและตอนบ่าย ดังนั้นพารามิเตอร์ของแสงกลางวันจึงถูกวิเคราะห์เพื่อหาค่า CCT และค่าพิกัด x และ y

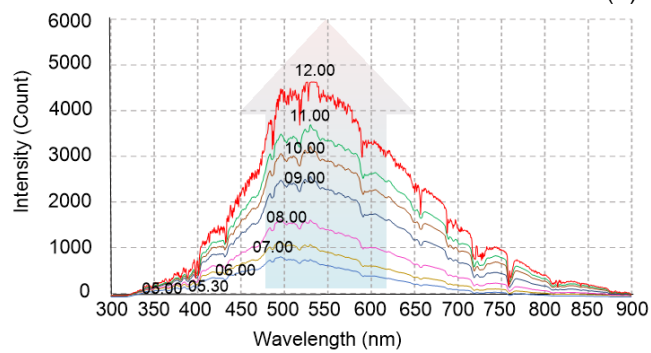
จากการศึกษาสามารถสังเกตได้ว่าแสงอาทิตย์ในรอบวัน สามารถสังเกตได้ว่าการกระจายพลังงานสเปกตรัมระหว่าง 300 นาโนเมตร ถึง 900 นาโนเมตร (ภาพที่ 4.1) ทั้งสองฤดู ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสในรูปแบบการกระจายพลังงานสเปกตรัมที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับระดับความเข้มของแสงในฤดูร้อน (ภาพที่ 4.1 A และ C) และฤดูหนาว (ภาพที่ 4.1 B และ D) การกระจายพลังงานสเปกตรัมในฤดูร้อนและฤดูหนาวเพิ่มขึ้นในช่วงเช้าและเข้าใกล้ระดับความเข้มแสงสูงสุดในช่วงเที่ยงวัน และลดลงในช่วงบ่าย นอกจากนี้ระดับความเข้มแสงสูงสุดของการกระจายพลังงานสเปกตรัมที่สังเกตพบได้อยู่ที่ 555 นาโนเมตร อย่างไรก็ตามค่าสูงสุดนี้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของมุมแสงอาทิตย์ในพื้นที่ที่สังเกต ดังนั้นจึงพบว่าแสงอาทิตย์สีฟ้าหรือแสงสีทองผสมกันในช่วงเช้าหรือในช่วงพระอาทิตย์ตกยามเย็นเรียกว่า “ชั่วโมงแสงสีทอง (golden hour)” ในช่วงเช้าและ “ชั่วโมงสีน้ำเงิน (blue hour)” ในช่วงเที่ยง [24]

Forenoon

(A)

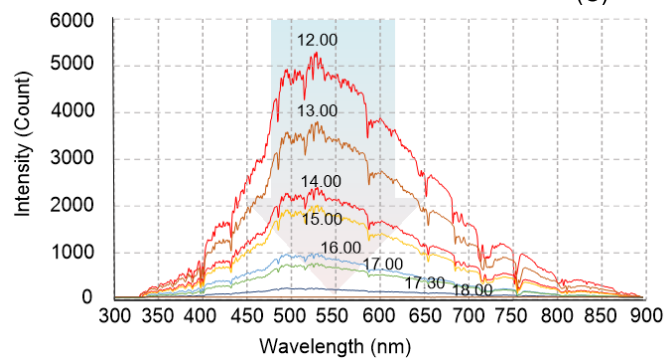


(B)

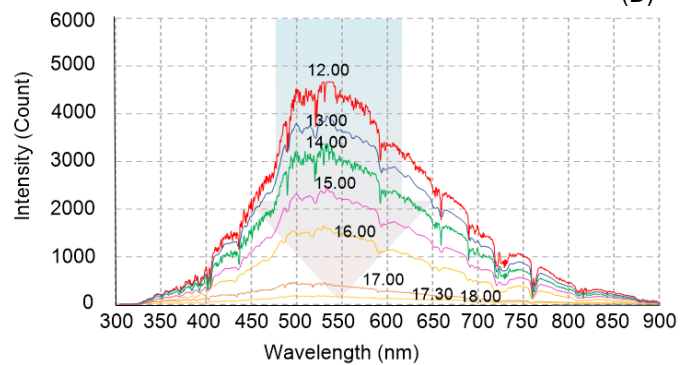


Afternoon

(C)

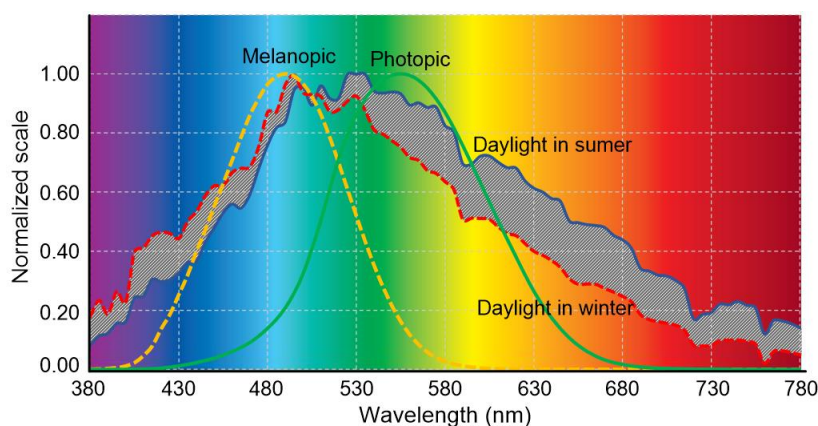


(D)



ภาพที่ 34.1 ความเข้มของแสงในรอบวัน ในฤดูร้อน (A และ C) และฤดูหนาว (B และ D) ณ ตำบลหัวขวาง อำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดมหาสารคาม ในช่วงเวลาเช้า (A และ B) และช่วงบ่าย (C และ D)

ภาพที่ 4.2 แสดงฟังก์ชันความไวของดวงตามนุษย์ (spectral sensitivity) ที่เกี่ยวข้องกับระดับแสงสโคโตปิกและโฟโตปิก โดยทั่วไปฟังก์ชันความไวของดวงตามนุษย์จะประกอบด้วยของระบบความไวของแสงมีโซปิก (mesopic sensitivity) และความไวความส่องสว่างแบบโฟโตปิก (photopic sensitivity) คือ 0.5 แคนเดลา/ตารางเมตร (cd/m^2) เพื่ออธิบายระบบการมองเห็นจำเป็นต้องตรวจวัดจากปริมาณการแผ่คลื่นรังสีและโฟโตเมตริก ในบางช่วงสีแดงของแสงจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการกระเจิงเล็กน้อยตามชั้นบรรยากาศในตอนเช้าหรือตอนพลบค่ำ ซึ่งภาพที่ 4.2 เป็นลักษณะสเปกตรัมของแสงในฤดูร้อนและฤดูหนาวของประเทศไทย

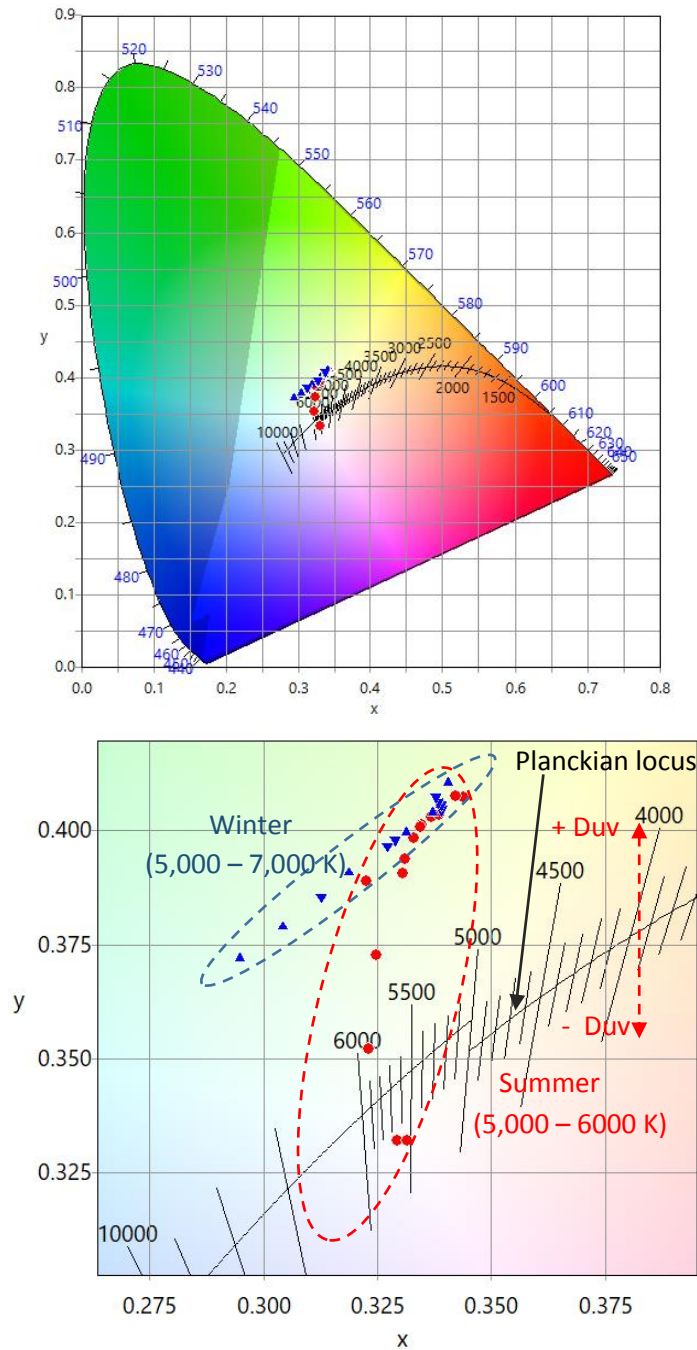


ภาพที่ 4.35 ความไวต่อสเปกตรัมของตัวรับแสงของมนุษย์ในการตอบสนองแบบโฟโตปิก สโคโตปิก และการตอบสนองต่อการกดเมลาโทนิน (melatonin suppression) โดยเมื่อเทียบกับเส้นโค้งการกระจายพลังงานสเปกตรัมของแสงในฤดูร้อน (---) และฤดูหนาว (----) ของแสงในรอบวันของประเทศไทย

(1.2) พิกัดบนแผนภาพสี

ในการศึกษาพิกัดบนแผนภาพสี (the chromaticity co-ordinates) ของแสงแบบพลวัตในช่วงวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสของฤดูร้อนและฤดูหนาวแสดงในภาพที่ 4.3 แนวตั้งเปรียบเทียบแสงที่แตกต่างกันสองแบบซึ่งแสดงถึงระดับของ CCT ที่ระบุมุมของดวงอาทิตย์ โดยมีความแตกต่างกันเนื่องจากความชื้นในบรรยากาศ เส้นมาตราส่วน CCT แบบแคบนี้ใช้เพื่อให้ได้ CCT สำหรับแบบจำลองของแสงกลางวันและตลอดทั้งปี พิกัดสีเปลี่ยนจาก CCT ต่ำเป็น CCT สูงตามตำแหน่งพลาจเดียนในตอนบ่าย แล้วกลับมาในแนวโน้มเดิม เห็นได้ชัดว่า CCT ช่วงกลางวันแบบพลวัตในฤดูร้อนแตกต่างจากที่พบในฤดูหนาว CCT ของแสงอาทิตย์ในฤดูร้อนอยู่ในช่วง 5,000 – 6,000 เคลวิน ซึ่งแคบกว่าช่วงฤดูหนาวในช่วง 5,000 – 7,000 เคลวิน นอกจากนี้ CCT ของแต่ละฤดูกาลยังไปใน

ทิศทางที่ต่างกัน นอกจากนี้ค่า D_{uv} ในฤดูร้อน (0.015 – 0.036) และฤดูหนาว (0.033 – 0.037) มีความแตกต่างกัน การเบี่ยงเบนเชิงบวกจากเส้นพลังงานโลกก็อาจเกิดจากการกระเจิงในชั้นบรรยากาศ



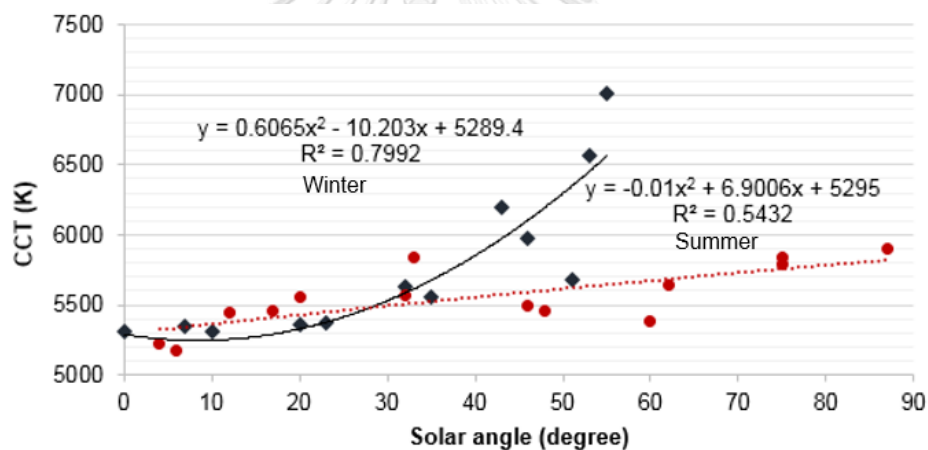
ภาพที่ 4.36 พิกัดแผนภาพสี บนระบบพิกัด x และ y ของแสงอาทิตย์ในรอบวันของฤดูร้อน (●) และฤดูหนาว (▲)

เนื่องจากละติจูดและลองจิจูดของของสถานที่ศึกษาแสงของดวงอาทิตย์ในวันที่ 10 – 15 พฤษภาคม และ 10 – 15 พฤศจิกายน 2563 พบว่า ระยะเวลาในกลางวันไม่เท่ากัน คือ ในฤดูร้อน 12 ชั่วโมง 53 นาที (05:37 น. – 18:30 น.) และในฤดูหนาว 11 ชั่วโมง 22 นาที (06:11 น.) – 17:33 น.) เนื่องจากมุมตกกระทบของดวงอาทิตย์ในเวลากลางวันในทั้งสองฤดูกาลที่แตกต่างกัน โดยมุมการตกกระทบของแสงจากดวงอาทิตย์มายัง ณ จุดสังเกต ได้แก่ พลบค่ำในทะเล (twilight) (ระนาบสุริยะ < 0 องศา) พลบค่ำยามค่ำคืน (ระนาบสุริยะ 0 – 6 องศา) และเที่ยงวัน (จุดศูนย์กลางของความเข้มแสงสูงสุด) ดังนั้น เราจะพบการเปลี่ยนแปลงของแสงที่มีความแตกต่างได้อย่างชัดเจนวันละสองครั้งในช่วงเช้าตรู่จนถึงพระอาทิตย์ขึ้น และอีกครั้งในตอนเย็นในช่วงพระอาทิตย์ตกดิน ในระหว่างการศึกษานี้ มีการสังเกตแสงพลบค่ำ ในช่วงเช้า (05:14 น. – 05:37 น.) และตอนเย็น (18:30 น. – 18:53 น.) ดังนั้นเวลารวมในฤดูร้อนคือ 46 นาที ในทางตรงกันข้าม พลบค่ำของแสงในช่วงวันของฤดูหนาวพบในช่วงเช้า (05:48 น. – 06:11 น.) และตอนเย็น (17:33 น. – 17:56 น.) รวมเวลาราชการทั้งสิ้น 45 นาที

ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่รู้กันดีว่าเวลากลางวันในฤดูหนาวสั้นกว่าในฤดูร้อนโดยเฉพาะที่พบในซีกโลกเหนือ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลโดยทั่วไปที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของเชิงมุมระหว่างโลกและดวงอาทิตย์ ซึ่งส่งผลต่อการแผ่รังสี SPD ของแสงอาทิตย์และทำให้เกิดรูปแบบแสงที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลา ความเปลี่ยนแปลงดังกล่าวยังเกิดขึ้นตามสถานที่ หรือตำแหน่งต่าง ๆ บนโลก ซึ่งขึ้นกับละติจูดของโลกและรวมถึงการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของบรรยากาศ โดยทั่วไปในตอนเช้าและตอนค่ำ SPD องค์ประกอบของคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นยาวจะมีสัดส่วนมากกว่าตอนกลางวัน ในขณะที่ในตอนเที่ยงกำลังสเปกตรัมของแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นจะมีสัดส่วนมากขึ้น ในการศึกษานี้ได้ทำการทดลองในวันฤดูร้อนและฤดูหนาวของประเทศไทย ซึ่งมุมแสงของดวงอาทิตย์มายังโลกมีความแตกต่างกัน 35 องศาในรอบ 6 เดือน โดยในการแผ่รังสีที่ 90 องศา ในฤดูร้อนจะเกิดขึ้นหลังเที่ยงวัน ณ เวลา 12:04 น. และในฤดูหนาวจะทำมุมสูงสุดที่ 55 องศา ก่อนเที่ยง ณ เวลา 11:52 น.

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น พารามิเตอร์หลักของแสงสองประการ ได้แก่ การกระจายพลังงานสเปกตรัมอย่างต่อเนื่องและ CCT แบบพลวัต มีการเปลี่ยนแปลงทุกวันตลอดทั้งปี ระหว่าง 5,200 เคลวิน ถึง 7,000 เคลวิน ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาของวันและเดือน (ภาพที่ 4.4) ในฤดูร้อน ค่า CCT ของจุดทั่วไปเริ่มต้นที่ 10 ลักซ์ ที่ 2,700 เคลวิน เวลา 05:30 น. ในตอนเช้า จากนั้นจึงพิจารณาถึงระดับความเข้มข้นสูงสุดอย่างน้อย 100,000 ลักซ์ ที่ 5,700 เคลวิน ในตอนกลางวัน และกลับมาเป็น 20 ลักซ์ ของ 2,780 เคลวิน เวลา 18.00 น. อย่างไรก็ตาม ในฤดูหนาวค่า CCT ของแสงอาทิตย์ในเวลากลางวันแตกต่างกันมากเริ่มต้นที่ 10 ลักซ์ ที่ 5,300 เคลวิน ในตอนเช้า ถึงความเข้มสูงสุดที่ 100,000 ลักซ์ ที่ 7,000 เคลวิน ในตอนกลางวัน และลดลงเมื่อพระอาทิตย์ตกดินถึง 10 ลักซ์ ที่

5,300 เคลวิน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแสงอาทิตย์ในเวลากลางวันที่แตกต่างกัน รวมถึงการพิจารณาค่า CCT ของแสงรอบวัน และการเปลี่ยนแปลงแบบพลวัตในรอบวันที่มีความแตกต่างของทิศทาง ดังแสดงในไดอะแกรมพิคัดบนแผนภาพสี (chromaticity diagram) (ภาพที่ 4.3) สาเหตุหลักมาจากทิศทางของวิถีจักรประจำปีของโลกรอบดวงอาทิตย์ นอกจากนี้ ขึ้นอยู่กับฤดูกาล อุณหภูมิสัมพัทธ์ของสีที่ผันผวนส่งผลต่อสีของแสงในรอบวัน นอกจากนี้ยังได้รับผลกระทบจากสภาพอากาศด้วย เช่น ความชื้น ฝุ่นละออง หมอก คิววัน และมลภาวะ เป็นต้น แท้จริงแล้วในช่วงฤดูร้อนบางช่วงในประเทศไทยมักมีการก่อตัวเป็นพายุทำให้เกิดฝุ่นละอองในอากาศสูง ดังนั้นการวัด SPD จึงมีความผันผวนในช่วงที่มีพายุ ในทางตรงกันข้ามในช่วงต้นฤดูหนาวของประเทศไทยอาจมีพายุเกิดขึ้นโดยมีฝนตกบ้าง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสภาวะเหล่านี้จะตามมาด้วยมวลอากาศเย็นที่ทำให้บรรยากาศแห้งกว่า เนื่องจากท้องฟ้าโดยทั่วไปจะแจ่มใสในฤดูหนาวมากกว่าในฤดูร้อน ความบริสุทธิ์ของแสงอาทิตย์ในฤดูหนาวจึงค่อนข้างสูงกว่าในฤดูร้อน จึงทำให้ค่า CCT ของแสงในตอนกลางวันสูงขึ้นในช่วงฤดูหนาว



CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่าง CCT ที่เปลี่ยนแปลงการกระจายเชิงมุมของแสงอาทิตย์ในวันที่ท้องฟ้าโปร่งของฤดูร้อน (●) และฤดูหนาว (◆)

ตอนที่ 2 การคัดเลือกหลอดแอลอีดีสำหรับการออกแบบแสงประดิษฐ์เลียนแบบแสงในรอบวัน

(2.1) การออกแบบระบบส่องสว่างและการประเมิน

การทดลองนี้ได้ติดตั้งระบบส่องสว่างสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแสงประดิษฐ์ที่สามารถผลิตแสงที่มี CCT พิกัดสี และพารามิเตอร์อื่น ๆ ตามคำแนะนำของ CIE ทั้งนี้แผนผังการทำงานของระบบการควบคุมการส่องสว่าง RGB-LED แสดงไว้ในภาพที่ 3.2 และแผนผังไดอะแกรมอัลกอริธึมเพื่อป้องกันข้อมูลของการเข้ารหัส RGB ที่กำหนดพิกัดและอุณหภูมิของแสงแต่ละสีของ RGB-LED โดยผ่านชุดควบคุมการป้อนรหัสสีในการทำงานของกระแสไฟที่มีคุณสมบัติเฉพาะของหลอด RGB โดยจากการศึกษาเบื้องต้นซึ่งได้มีการเลือกใช้หลอด RGB-LED ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดหลายชนิด พบว่า มีเพียง 2 ชนิด ที่เหมาะสำหรับการนำมาใช้พัฒนาต่อ ได้แก่ LED-A และ LED-B ซึ่งมีกำลังไฟ 30 วัตต์ ดังคุณสมบัติที่ได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.1 LED-A เป็นตัวอย่างของ LED ประเภทที่มีหลอดไฟกำลังต่ำ (0.3 วัตต์) พร้อมหลอด LED 100 บิต ในขณะที่ LED-B เป็นตัวอย่าง LED ที่มีหลอดไฟกำลังสูง (10 วัตต์) พร้อมหลอด LED 3 บิต ในการศึกษาที่ใช้หลอดไฟทางการค้า RGB-LED ขนาด 24 วัตต์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางแสงของสเปกตรัม

ในการประเมินคุณภาพแสงของ LED สัดส่วนพลังงานแสงของ LED สีน้ำเงิน สีเขียว และสีแดง ตามรหัสที่ใช้กำหนดค่า CCT เป้าหมายผ่านการจำลองและการปรับให้เหมาะสมโดยใช้ซอฟต์แวร์ ColorCalculator (เวอร์ชัน 7.77, Osram, USA) ทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับกำลังแสงกับกระแส ซึ่งได้นำมาเป็นเกณฑ์ในการเลือกแหล่งกำเนิดแสงเพื่อพัฒนาระบบส่องสว่างเลียนแบบแสงในรอบวัน (circadian lighting) ประกอบด้วย ค่า CCT ของแสงตามแสงในรอบวันและความแม่นยำของแสงที่ผลิตซ้ำ ตามวิธีการทดสอบ CRI 1995 แสงวอร์มไวท์มี CCT ต่ำ (CCT < 5,000 เคลวิน) บนเส้นพลาจเคียน โดยเปรียบเทียบกับ SPD ของแสงมาตรฐาน และใช้แสงคูลไวท์ตามมาตรฐาน D65 ที่มี CCT สูง (CCT > 5,000 เคลวิน) เป็นแสงมาตรฐาน [15]

ดังนั้นในการศึกษาจึงได้มีการกำหนดให้ตัวอย่างหลอด RGB จำนวน 2 ตัวอย่าง ได้แก่ LED-A และ LED-B ให้แสงตามรหัส RGB ที่มีค่า CCT ที่กำหนดบนตำแหน่งพลาจเคียนโลกัสและตำแหน่งมาตรฐานของหลอดไฟประดิษฐ์ (ANSI, 2000) ที่ 3,000, 3,250, 3,500, 4,000, 5,000, 6,000, 7,000, 7,500, 8,000, 8,500, 9,000, 9,500 และ 10,000 เคลวิน โดยในการศึกษาได้ใช้ซอฟต์แวร์อินพุต RGB-LED (ภาพที่ 3.2) ในระหว่างการทดลอง ตัวอย่างแสงที่ถูกกำหนดจะมีโพรบวัดสเปกตรัมของแสง (CC3-cosine Corrector) สำหรับเก็บข้อมูลสเปกตรัมของแสงที่ระดับความเข้ม 500 – 1,000 ลักซ์ ภายในกล่องสีขาว 1 ลูกบาศก์เมตร (ภาพที่ 4.5) แสงที่ผลิตออกมาถูกรวบรวมโดยใช้โพรบทรงกลมในตัวมีขนาด 500 มิลลิเมตร ถ่ายโอนข้อมูลผ่านใยแก้วนำแสงและถูกบันทึกโดยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ความละเอียดสูง (Ocean Optics รุ่น HR2000CG-UV-NIR สหรัฐอเมริกา)

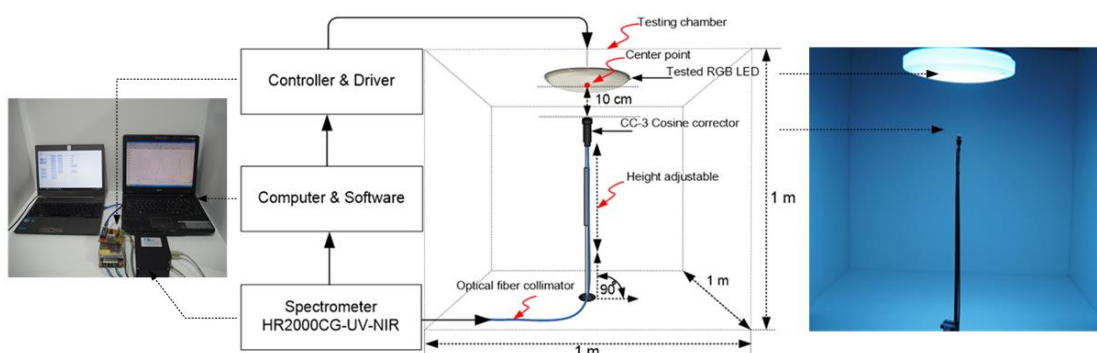
ตารางที่ 4.1 ลักษณะและสมบัติเฉพาะของตัวอย่างหลอดแอลอีดีที่ใช้ในการศึกษา

Parameters	LED-A	LED-B	c-LED
Power (W)	0.3	10	24
Forward Voltage (V)			
Red	2.0 – 2.2	6.0 – 8.0	N/A
Green	3.0 – 3.2	9.0 – 11.0	N/A
Blue	3.0 – 3.2	9.0 – 11.0	N/A
Working Current (mA)			
Red	20	1,200	N/A
Green	20	1,050	N/A
Blue	20	1,050	N/A
Dominate Wavelength (nm)			
Red	620 – 625	620 – 630	590 – 600
Green	520 – 525	520 – 530	520 – 535
Blue	465 – 470	460 – 470	450 – 460
Luminous intensity (mcd)			
Red	700 – 1,000	28,6447 – 38,197	N/A
Green	2,200 – 3,300	76,394 – 85,944	N/A
Blue	1,100 – 1,500	9,549 – 19,099	N/A
Power supply voltage (V_{DD})	+3.5~+5.5 V	+6.0~+12.0 V	+6.0~+12.0 V
Logic input voltage (V_i)	-0.5~ $V_{DD}+0.5$ V	-0.5~ $V_{DD}+0.5$ V	-0.5~ $V_{DD}+0.5$ V
Operation junction temperature (T_{opt})	-40~+85 °C	-25~+100 °C	-20~+100 °C
Storage temperature range (T_{stg})	-55~+150 °C	-40~+120 °C	-50~+120 °C
Beam Angle (θ)	120°	120°	120°

หลังจากทำการวัดสเปกตรัมของแสงจะถูกรวบรวมเพื่อวิเคราะห์สำหรับฟังก์ชันการจับคู่สีตามแนวคิดของคำอธิบายสีของแหล่งกำเนิด โดยการวิเคราะห์ในรูปแบบของสีของแสงที่เปล่งออกมาและการแสดงสี CCT อธิบายสีของแสงที่ผลิตแสงออกมา พิกัดแผนภาพสี และระยะห่างจากพลาจเคียนโลกัสบนพิกัดแผนภาพสี (Duv) และ MacAdam ellipses ค่าดัชนีบ่งชี้ความถูกต้องของสี (CRI) และดัชนีบ่งชี้คุณภาพสี (CQS) ที่กำหนดโดย Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) [42, 43]

และมีการวิเคราะห์ลักษณะโพโตเมตริกและเรติโอเมตริกอื่น ๆ ได้แก่ ประสิทธิภาพการส่องสว่างของการแผ่รังสี (LER), อัตราส่วนของ scotopic/photopic (S/P), ค่าการกระตุ้นของแสง

ในรอบวันทางชีวภาพ (CL_A) ค่าการกระตุ้นของแสงในรอบวัน (circadian stimulus, CS) ประสิทธิภาพความสว่าง (LE) การแผ่รังสีของประสิทธิภาพของแสงในรอบวัน (CER) ค่าปัจจัยคุณภาพแสงในรอบวัน (CAF) และดัชนีการกดเมลาโทนิน (MSI) รวมถึงการตั้งค่าต่าง ๆ และการตรวจสอบความถูกต้องของแสงประดิษฐ์ ดังแสดงในภาพประกอบและอธิบายไว้ในส่วนต่อไปนี ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ของแสงที่สำคัญได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1



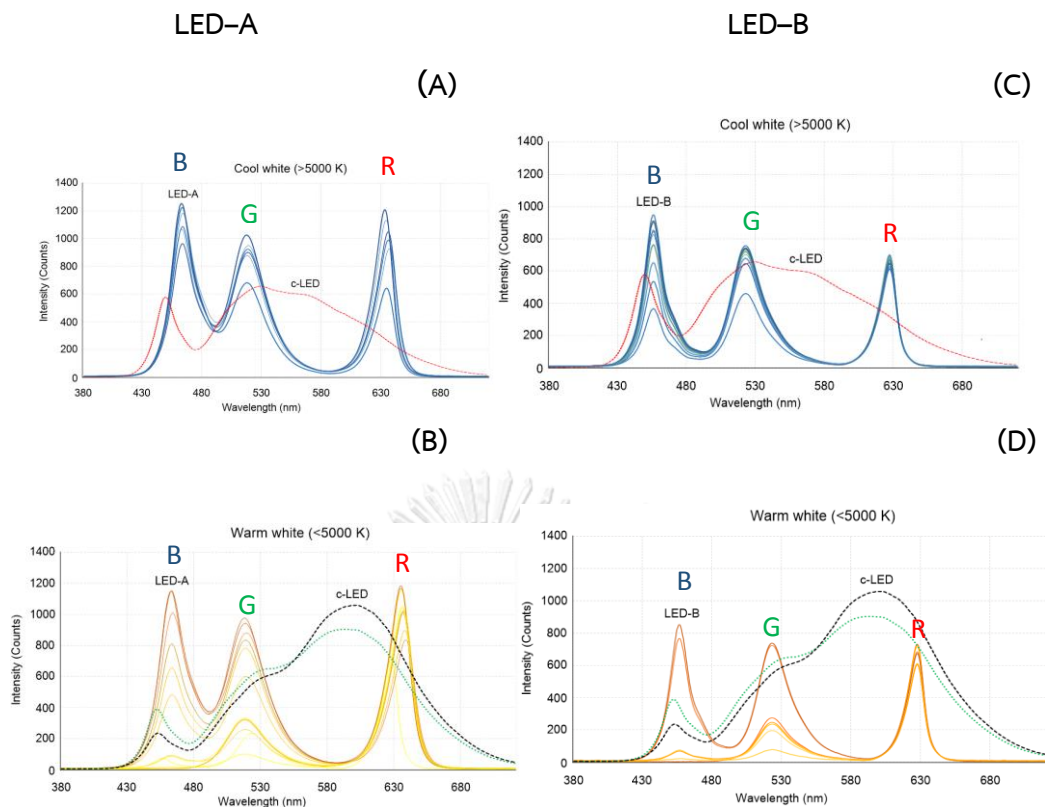
ภาพที่ 4.38 กระบวนการติดตั้งระบบการเก็บข้อมูลตัวอย่างแสงในการตรวจวัดและการประเมินคุณภาพแสง

(2.2) ประสิทธิภาพการส่องสว่างของหลอดประดิษฐ์

ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ในช่วงกลางวันที่ต้องพึ่งพาแสง (ทั้งฤดูร้อนและฤดูหนาว) ดวงอาทิตย์จะแผ่รังสีด้วยความยาวคลื่นที่สั้นกว่าอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับการแผ่รังสีในตอนเย็น ซึ่งส่งผลต่อการกดเมลาโทนินทั้งในมนุษย์และสัตว์ส่วนใหญ่ โดยจะควบคุมด้วยคลื่นแสงส่วนที่เป็นสีน้ำเงินของสเปกตรัม ดังนั้นการได้รับแสงสีน้ำเงินไม่เพียงพอในตอนเช้าจึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในวัฏจักรชีวิตได้ [18]

สิ่งสำคัญคือต้องตระหนักว่าเฉดสีของแสงสีขาวที่เปล่งออกมาจะส่งผลต่อวัฏจักรชีวิตด้วยเช่นกัน ด้วยการส่องสว่างเป็นแสงคู่ไลท์ สมองจะได้รับสัญญาณที่บ่งบอกว่าเป็นเวลากลางวัน เนื่องจากมีปริมาณของคลื่นแสงสีน้ำเงินเข้ม ซึ่งทำหน้าที่กดเมลาโทนินของร่างกายในขณะที่แสงวอร์มไวท์ไม่ทำให้เกิดผลกระทบดังกล่าว เนื่องจากนาฬิกาชีวิตสามารถควบคุมโดยการปรับสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงและ CCT ของแหล่งกำเนิดแสง ดังนั้นจึงควรเลือกใช้เฉดแสงสีวอร์มไวท์สำหรับแสงในรอบวันเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบของแสงที่มีต่อนาฬิกาชีวิตของมนุษย์

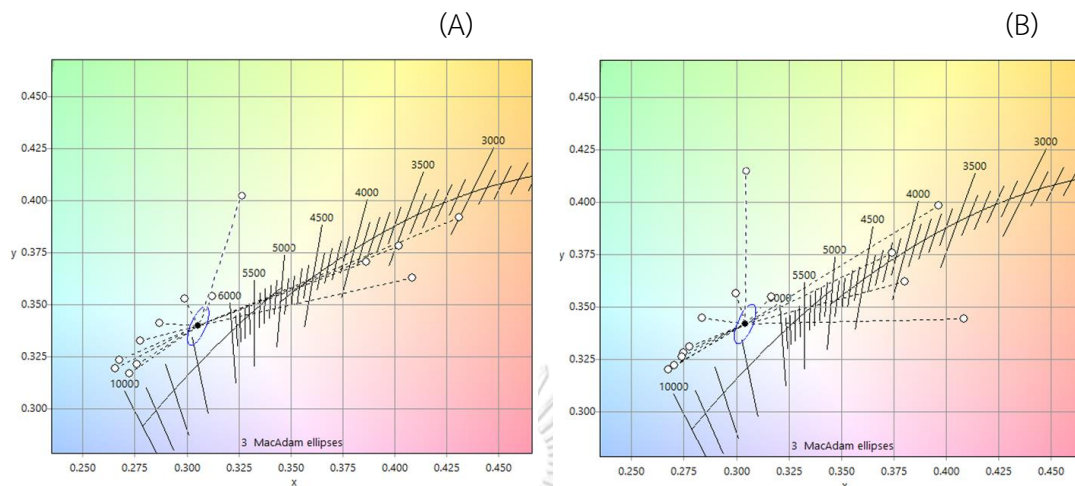
ในงานวิจัยนี้ จากการพัฒนาระบบส่องสว่างสำหรับ 2 ตัวอย่าง ได้แก่ LED-A และ LED-B โดยในขั้นตอนแรกได้ดำเนินการวิเคราะห์แสงโดยการนำข้อมูลด้านพิกัด x และ y มากำหนดรหัส RGB และ SPD ที่ความเข้มของการส่องสว่างระหว่าง 1,000 – 1,200 ครั้ง (counts) ดังแสดงในภาพที่ 4.6 โดย SPD ของโคมไฟแสงประดิษฐ์มีช่วงของค่า CCT ทั้งที่เป็นโชนคูลไวท์และวอร์มไวท์ซึ่งในการพิจารณาเฉดของแสงทั้งสองแบบนี้ใช้อาศัยจุดตัดที่ 5,000 เคลวิน โดย SPD ของ LED-A แสดงให้เห็นถึงสเปกตรัมแสงสูงสุดสามช่วง ได้แก่ สเปกตรัมแสงสีน้ำเงินที่ 465 นาโนเมตร สีเขียวที่ 518 นาโนเมตร และสีแดงที่ 635 นาโนเมตร LED-B ได้รับสเปกตรัมแสงสูงสุดที่คล้ายกันสามสเปกตรัม ได้แก่ สเปกตรัมแสงสีน้ำเงินที่ 455 นาโนเมตร สีเขียวที่ 522 นาโนเมตร และสีแดงที่ 626 นาโนเมตร ดังนั้น ความแตกต่างของ λ_{\max} ระหว่างหลอด RGB-LED ที่ทดสอบพบว่า สำหรับคลื่นแสงสีน้ำเงิน สีเขียว และสีแดง เท่ากับ 10, 4 และ 9 นาโนเมตร ตามลำดับ (ภาพที่ 4.6) ขณะที่ c-LED แสงสีน้ำเงิน สีเขียว และสีแดง มีค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่ 468, 522 และ 632 นาโนเมตร ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า การแปลงค่า CCT ของ LED-A และ LED-B มีรูปแบบที่แตกต่างกัน โดย LED-A มีการเปลี่ยนแปลงแบบพลวัตของแสงผ่านการควบคุมกระแสไฟได้ทั้ง I_B , I_G และ I_R ขณะที่ LED-B ไม่มีการควบคุมการกระแสไฟของ I_R มีเพียง I_B และ I_G ที่สามารถควบคุมกระแสได้



ภาพที่ 4.39 ลักษณะการกระจายพลังงานกำลังของสเปกตรัมแสงของ LED-A และ LED-B ในลักษณะของแสงที่เป็นคูลไวท์ (เส้นสีน้ำเงิน: A และ C) และแสงที่เป็นวอร์มไวท์ (เส้นที่ส้ม: B และ D) โดยเปรียบเทียบกับโคมไฟทางการค้า (c-LED)

จากภาพที่ 4.7 แสดงพิกัดบนแผนภาพสีจะเห็นได้ว่า ณ CCT เดียวกันจะสามารถมีพิกัดสีได้ตามแนวเส้นพลาจเคียนโลกัส โดยความแตกต่างดังกล่าวทำให้แสงมีหลายเฉดสี สำหรับความแม่นยำของพิกัดของตัวอย่างแสงที่ทำได้เมื่อเทียบบนเส้นระนาบพลาจเคียน ดังแสดงในภาพที่ 4.7 MacAdam ellipses analysis ซึ่งแสดงค่าเบี่ยงเบนในแสงประดิษฐ์เมื่อเปรียบเทียบระยะจากแสงมาตรฐาน D65 ระยะทางที่ห่างกว่าของจุด CCT ที่กำหนดบนแผนภาพสีบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของหลอดที่ต่ำสุด ในขณะที่จุด CCT ที่ใกล้ที่สุดบนตำแหน่งพลาจเคียนโลกัสและเส้นมาตรฐาน ANSI ของโคมไฟแสงประดิษฐ์ซึ่งบ่งชี้ว่ามีประสิทธิภาพมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองหลอด โดย LED-A มีความใกล้เคียงมากกว่า โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาจากตำแหน่งพลาจเคียนโลกัสของ CCT ทั้งช่วงที่เป็นคูลไวท์และวอร์มไวท์ ได้มากกว่าที่พบใน LED-B นอกจากนี้พบว่า ค่าพิกัดดังกล่าวมีความแปรปรวนของค่า CCT อย่างเห็นได้ชัด (6,000 เคลวิน สำหรับ LED-A และ 5,000 เคลวิน สำหรับ LED-B) ข้อจำกัดเหล่านี้ อาจเกิดจากการทำงานในการให้แสงของ I_B , I_G และ I_R ในการเปล่งแสงเพื่อผสมแสงสี ซึ่งอาจทำให้ไม่สามารถเปล่งแสงผสมที่มีแสงสีขาวในระดับความสว่างสูงขึ้นไปได้ จากผลการทดลอง

จะพบว่า LED-A จะมีความแม่นยำมากกว่า LED-B เมื่อเทียบกับแสงขาว D65 (หลอดทั้ง 2 มีความเหมาะสมกับแสงวอร์มไวท์แต่ไม่เหมาะกับคูลไวท์)



ภาพที่ 4.40 ผลการวิเคราะห์ MacAdam ellipses ของการเบี่ยงเบนของแสงจาก LED-A (A) และ LED-B (B) โดยเทียบระยะจากแสงมาตรฐาน D65

ภาพที่ 4.8 แสดงพารามิเตอร์คุณภาพแสงที่ CCT ต่าง ๆ ที่ผลิตโดย LED-A และ LED-B (3,000 – 12,000 เคลวิน), c-LED (3,000, 3,200 และ 3,500 เคลวิน) และแสงอาทิตย์ (5,000, 6,000 และ 7,000 เคลวิน) รวมทั้ง LER, LE, CER, CAF, MSI และอัตราส่วน S/P จากการตรวจสอบแนวโน้มของ LER พบว่า LED-A และ LED-B มีค่าใกล้เคียงกันในค่า LER ที่ CCT ต่าง ๆ (ภาพที่ 41A) อย่างไรก็ตามแสงที่มีค่า CCT ในช่วง 9,500 – 12,000 เคลวิน มีค่า LER นั้นต่ำกว่าแสงที่มีค่า CCT ที่ต่ำกว่า และค่า LER ของการศึกษานี้คล้ายกับรายงานก่อนหน้า (ช่วง 260 – 371 ลูเมน/วัตต์ ($\text{lm}/\text{W}_{\text{opt}}$)) [8, 130-132] นอกจากนี้งานวิจัยบางงานวิจัยพบว่า ค่า LER จะลดลงเมื่อค่า CCT เพิ่มขึ้น [8, 130, 132, 133] ในขณะที่งานวิจัยอื่น ๆ พบว่า LER ขึ้นกับส่วนประกอบที่ลดทอนของคลื่นแสง เช่น การรวมกันของแสงขาวใน LED RGB ในทำนองเดียวกัน ค่า LE ของ LED-A และ LED-B มีแนวโน้มเหมือนกันตลอด CCT ที่ 3,000 – 12,000 เคลวิน

โดยสรุป LER มีรูปแบบการกระจายตัวของ CCT ที่คล้ายกัน ซึ่งสังเกตเห็นว่าค่าของ LER ในช่วง CCT ที่ 9,000 – 12,000 เคลวิน น้อยกว่าช่วงอื่น ๆ และ LE พบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับ LER โดย LER เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่ตรวจจับโดยเครื่องวัด ในขณะที่ LE เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพและคุณสมบัติของ RGB-LED ทั้งนี้จากการทดสอบพบว่า เมื่อเทียบกับผลของหลอดทางการค้า (c-LED) หลอด LED-A และ LED-B มีค่า LER สูงกว่าหลอด c-LED ซึ่ง

ในขณะที่เดียวกันค่า LER มีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่า LER อยู่ ในช่วงของแสงกลางวัน 5,000 – 7,000 เคลวิน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ c-LED แต่มีค่าน้อยกว่าแสงธรรมชาติในช่วง 5,000 – 7,000 เคลวิน

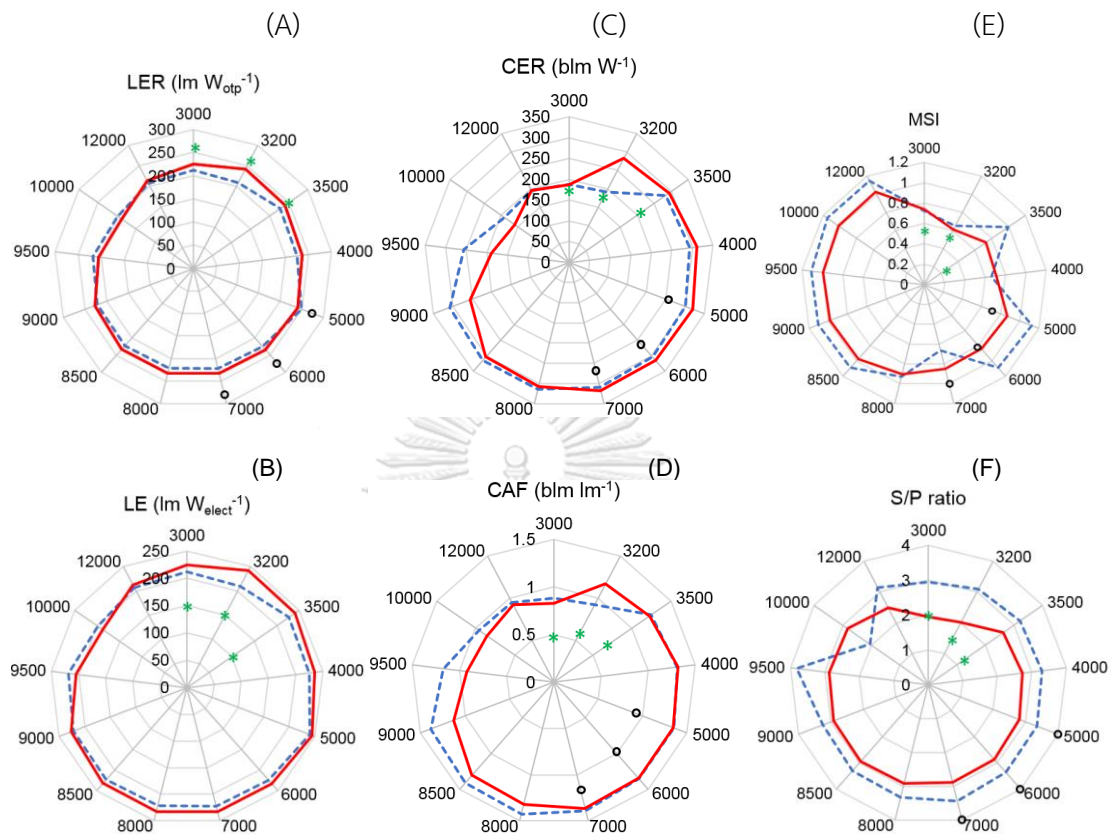
เมื่อเปรียบเทียบกับ c-LED แล้ว LED-A และ LED-B มีค่า LER ที่ต่ำกว่า และมีค่า LE ที่สูงกว่าค่า LE ของ c-LED (ภาพที่ 4.8 B) โดยค่า LER สามารถบ่งชี้ถึงสเปกตรัมของแสงกลางวันที่มีความสว่างสูงกว่า LED-A และ LED-B ทั้งนี้ค่า LER ขึ้นอยู่กับความไวและความแม่นยำของอุปกรณ์ตรวจจับแสง อย่างไรก็ตามค่า LE ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของ LED ดังนั้น LED-A และ LED-B จำเป็นต้องเพิ่มกำลังของแสงสว่างสูงเท่าที่จะสามารถให้แสงที่มี CCT ที่สูงขึ้น (โดยเฉพาะแสงคูโลวท์)

โดยทั่วไปค่า LE ของแหล่งกำเนิดแสงประเภท LED จะอยู่ในช่วงระหว่าง 54 – 100 ลูเมน/วัตต์ ($\text{lm/W}_{\text{elec}}$) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทสารกึ่งตัวนำของ LED [130, 133] นอกจากนี้ยังพบว่าค่า LE ของหลอดประเภท LED จะมีค่าต่ำกว่า หลอดไส้ หลอดฟลูออโรเรสเซนต์ และหลอดเมทัลฮาไลด์ แต่จะมีค่าต่ำกว่าหลอดโซเดียมความดันต่ำและแรงดันสูง [130, 133]

ลักษณะค่า CER ของ LED-A และ LED-B มีค่าใกล้เคียงกันในช่วง CCT ที่ 3,500 – 8,500 เคลวิน แต่ทั้งนี้ค่า CCT ในช่วงที่ 3,000 – 3,500 เคลวิน และ 8,500 – 10,000 เคลวิน จะสังเกตค่า CER แปรผันในช่วงระหว่าง 372-160 ไบโอลลูเมน/วัตต์ นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงของแสงที่มีค่า CCT สูง LED-A ให้แสงที่มีค่า CER ที่สูงกว่า LED-B ในขณะที่ LED-B นั้นจะให้แสงที่มีค่า CER ที่สูงกว่าในแสงที่มีค่า CCT ในช่วง 3,000 – 3,500 เคลวิน อย่างไรก็ตาม CER ของ LED-A อยู่ในช่วงเดียวกับค่า CER ของ c-LED ทั้งนี้ค่า CER ที่สังเกตได้ในเวลากลางวันซึ่งมีค่า CCT 5,000 – 7,000 เคลวิน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าค่า CER ของหลอดแอลอีดีส่วนใหญ่จะมีค่าอยู่ในช่วง 69 – 334 ไบโอลลูเมน/วัตต์ [31, 32] นอกจากนี้พบว่าเนื่องจากค่า CAF สามารถหาได้จากอัตราส่วนของ CER ต่อ LER ด้วยเหตุนี้ทำให้ค่า CAF มีแนวโน้มเดียวกันกับค่า CER ดังแสดงในภาพที่ 4.8 C-D) ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง 0.85 – 1.39 ไบโอลลูเมน/ลูเมน จากการวิจัยก่อนหน้านี้รายงานไว้โดยทั่วไป CAF ของ LED แปรผันจาก 0.45 – 1.75 ไบโอลลูเมน/ลูเมน จากผลการศึกษา พบว่า CER และ CAF ขึ้นอยู่กับค่า CCT ของแสง [7, 31, 32]

ค่า MSI ของ LED-A และ LED-B แสดงให้เห็นแนวโน้มเดียวกัน โดยมีความแปรผันจาก 0.56 – 1.13 ภายใต้อุณหภูมิ CCT ในช่วงของแสงวอร์มไวท์ (<5,000 เคลวิน) พบว่า หลอด LED-A และ LED-B ในช่วง CCT ที่ 3,000 – 7,000 เคลวิน มีความแตกต่างกัน แต่ทั้งนี้ค่า CCT ในช่วงที่ 8,000 – 12,000 เคลวิน มีค่าใกล้เคียง โดยเมื่อเทียบกับหลอด c-LED และหลอด LED-A ให้ค่า MSI สูงกว่าหลอด LED-B นอกจากนี้พบว่า MSI ของแสงกลางวัน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม CCT ในช่วง 5,000 – 7,000 เคลวิน ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง MSI ของหลอด LED-A และ LED-B อย่างไรก็ตามสำหรับค่า MSI ของ LED-A พบว่า มีความผันผวนในแสงที่มีค่า CCT อยู่ในช่วงคูโลวท์ ซึ่งแตกต่างจาก MSI ที่พบใน LED-B (ภาพที่ 4.0 E) ในขณะที่ c-LED ให้ MSI ใกล้เคียงกับที่พบใน LED-A และ LED-B

ในช่วง 3,000 – 3,500 เคลวิน ค่า MSI ของสเปกตรัมกลางวันและลดลงในช่วง LED-A และ LED-B ที่มีค่า CCT ในช่วง 5,000 – 7,000 เคลวิน



ภาพที่ 4.41 องค์ประกอบคุณภาพแสงที่อธิบายถึงสมบัติของแสง: (A) ประสิทธิภาพการส่องสว่างของการแผ่รังสี (luminous efficacy of radiation, LER); (B) ประสิทธิภาพการส่องสว่าง (luminous efficiency, LE); (C) ประสิทธิภาพการส่องสว่างในทางชีวภาพ (circadian efficacy of radiation, CER); (D) ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของแสงในรอบวัน (circadian action factors, CAF); (E) ดัชนีการกดเมลาโทนิน (the melatonin suppression index, MSI) และ (F) อัตราส่วนของ S/P ของตัวอย่างหลอด LED-A (---), the LED-B (—), c-LED (*), และแสงอาทิตย์ (o) ณ CCT ต่าง ๆ

นอกจากนี้พบว่า ค่าอัตราส่วน S/P มีแนวโน้มของหลอด LED-A สูงกว่าหลอด LED-B ในทุก ๆ ช่วงของ CCT โดยทั้ง 2 หลอดนี้มีค่าสูงกว่าหลอด c-LED แต่น้อยกว่าแสงกลางวันในช่วง CCT ที่ 5,000 – 7,000 เคลวิน โดยค่า MSI และ S/P เป็นผลมาจากประสิทธิภาพของหลอดและการผสมสีของ RGB ตามคุณสมบัติของหลอด LED-A และ LED-B ดังกล่าวในสเปกตรัมของหลอด LED-A และ LED-B ดังภาพที่ 4.8 อัตราส่วน S/P ของ LED-A มีค่าในช่วงกว้างกว่าค่าอัตราส่วน S/P ที่พบใน LED-B และมีค่าที่สูงกว่า c-LED และแสงกลางวัน (ภาพที่ 4.8 F) ก่อนหน้านี้

Oh *et al.* (2015) รายงานว่า MSI ของ LED แตกต่างกันไปในช่วง 0.19 – 1.13 ซึ่งเกี่ยวข้องกับ CCT ของแหล่งกำเนิดแสง [32, 134] นอกจากนี้ Aube *et al.* (2013) รายงานต่อ MSI ของ LED ประเภทต่าง ๆ ที่แตกต่างกันในช่วง 0.077 – 0.52 [133, 135] และอัตราส่วนของ S/P เกิดขึ้นตามประสิทธิภาพของ LED โดยการผสมสีแบบหลักของคลื่นแสง RGB ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จาก SPD (ภาพที่ 4.8) โดยอัตราส่วนของ S/P สามารถใช้เพื่อระบุอัตราส่วนของการรับรู้ความสว่างภายใต้ระบบการมองเห็นแบบสโคโตปิกและโฟโตปิก [132]

จากการศึกษาพบว่าตัวอย่างแสงมีค่า CS ของแสงที่ระดับความสว่าง (luminous; lux) ที่เท่ากันแสงที่มีค่า CCT ที่สูงกว่าจะมีค่า CS ที่สูงกว่า CCT ที่ต่ำกว่า และในขณะเดียวกัน ค่า CS ที่เท่ากัน จะมีความแตกต่างกันของความสว่างที่ระดับแสงที่มีค่า CCT ที่แตกต่างกัน โดยพบว่า LED-A มีค่าความสว่างแสงอยู่ในช่วงระหว่าง 100 – 1,000 ลักซ์ ที่ค่า CS เท่ากัน โดยเมื่อเทียบกับหลอด LED-B, c-LED และจากการทดสอบชี้ให้เห็นว่าในความสว่างแสงที่เท่ากัน (100 ลักซ์) หลอด LED-A และ LED-B มีค่าใกล้เคียงกันให้ค่า CS เท่ากับ ร้อยละ 30 ซึ่งในขณะที่แสงสว่างในช่วงคลื่นไวท์ (<5,000 เคลวิน) หลอด LED-A จำเป็นต้องใช้ความสว่างแสงที่มากกว่าหลอด LED-B ประมาณ 20% ถึงจะกระตุ้นการตื่นตัว (Circadian stimulus; CS) สำหรับข้อดีของหลอด LED-A ให้แสงสว่างกว่าหลอด LED-B แต่ไม่กระทบต่อ CS มากเกิน (CS มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งาน เช่น ต้องการให้ตื่นตัวเพิ่มค่า CS ให้สูงขึ้น แต่ถ้าต้องการพักผ่อนลดค่า CS ให้ต่ำลง ดังแสดงในภาพที่ 4.9

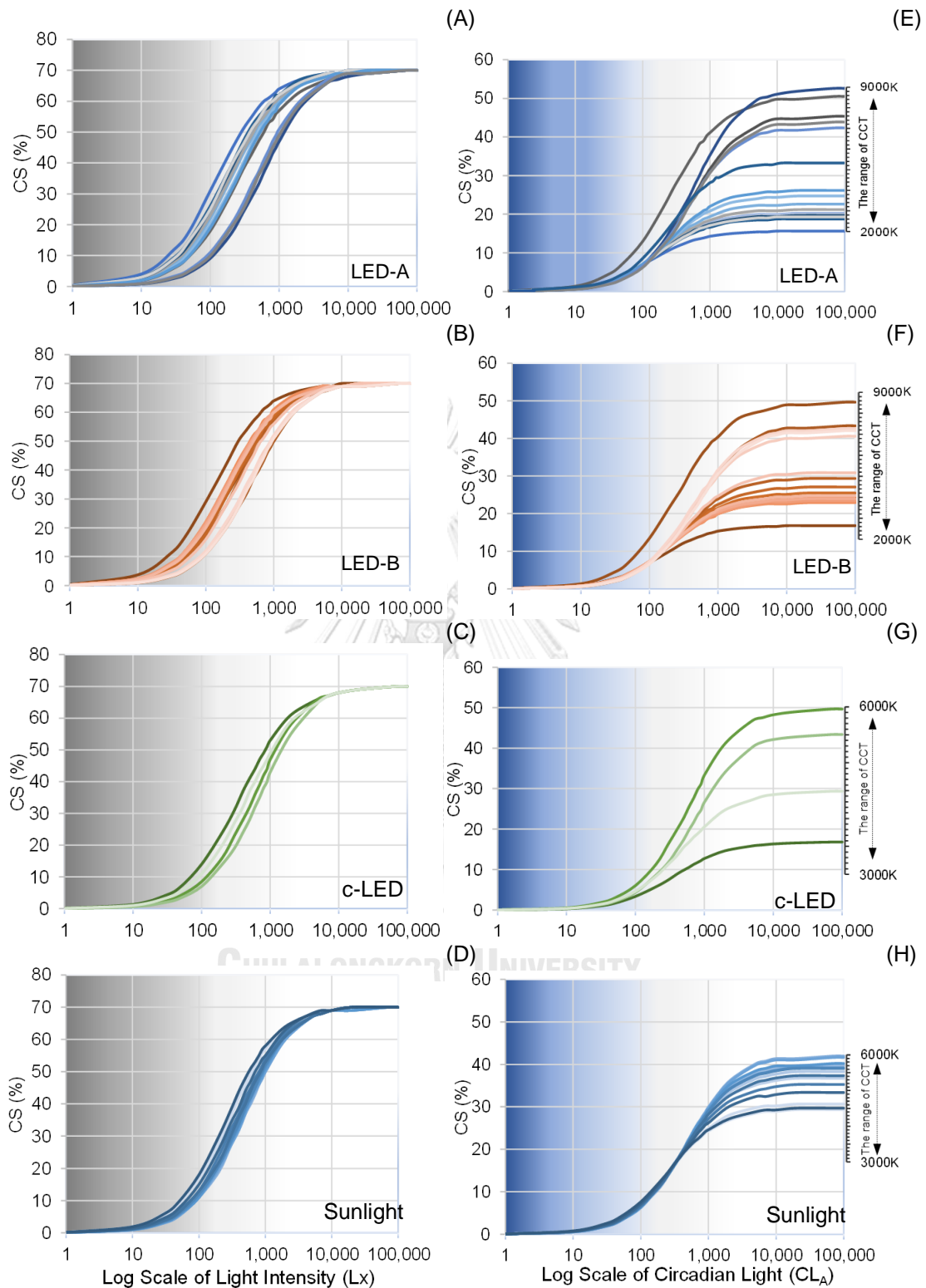
ดังนั้นหลอด LED-A จึงมีความเหมาะสมมากกว่าหลอด LED-B ในช่วงเวลากลางคืน ซึ่งมีลักษณะเดียวกันกับแสงกลางวัน พบว่าหากใช้ปริมาณแสงของกลางวันในช่วง 100-300 ลักซ์ สามารถกระตุ้นการตื่นตัว CS ได้ถึง 40 – 50% ในขณะที่หลอดประดิษฐ์อาจต้องใช้แสงคลื่นไวท์ถึง 300 – 500 ลักซ์ ส่วนหลอดทางการค้า c-LED พบว่าการตอบสนองต่อค่า CS ในระดับที่ต่ำกว่า กล่าวคือต้องใช้ความสว่างแสงที่มากกว่า 300 – 1,000 ลักซ์

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง CS กับ CL_A พบว่ามีแนวโน้มที่สัมพันธ์กับ CCT โดยหลอด LED-A จะมี CCT ในช่วง 2,000 – 10,000 เคลวิน ที่ CS ร้อยละ 18 – 52 และ หลอด LED-B ที่ CS ร้อยละ 17 – 50 ในขณะที่หลอด c-LED พบว่าให้ค่าช่วงในระดับเดียวกันแต่ทั้งนี้ CCT อยู่ในช่วง 3,000 – 6,000 เคลวิน (เนื่องจากการผสมแสงขาวภายในหลอด c-LED แต่กรณีของแสงกลางวัน พบว่ามีค่าการกระตุ้นการตื่นตัวที่สูงกว่าในช่วง CCT 5,000 – 6,000 เคลวิน ที่ค่า CS ร้อยละ 30 – 40

ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าหลอด LED-A มีระดับการตอบสนองต่อเมลานอปซิน (melanopsin) ในดวงตาโดยใช้ความสว่างที่ต่ำกว่าแต่สามารถกระตุ้นให้ตื่นตัวได้มากกว่าหลอด LED-B ในทุก ๆ

อุณหภูมิแสงที่ระดับเดียวกัน ซึ่งในขณะที่หลอด c-LED ให้การกระตุ้นการตื่นตัวที่ต่ำกว่าหลอด LED-A และหลอด LED-B ทั้งนี้ CL_A เป็นค่าบ่งชี้ Bio-illuminance ในช่วงคลื่นแสง 430 – 580 นาโนเมตร ที่ตอบสนองต่อดวงตามนุษย์ (melanopsin) ซึ่งมีความแตกต่างจาก illuminance (ลักซ์) ที่ให้ความสว่างของแสงในช่วงคลื่นแสง 380 – 780 นาโนเมตร ดังนั้นผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระดับของ CL_A ที่เท่ากันหลอด LED-A มีผลกระตุ้นการตื่นตัว (CS) มากกว่า เมื่อเทียบกับหลอด LED-B และหลอด c-LED ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้หลอด LED-A ในปริมาณแสงสว่างที่น้อยกว่าแต่สามารถกระตุ้นการตื่นตัวได้มากกว่าหลอด LED-B และหลอด c-LED

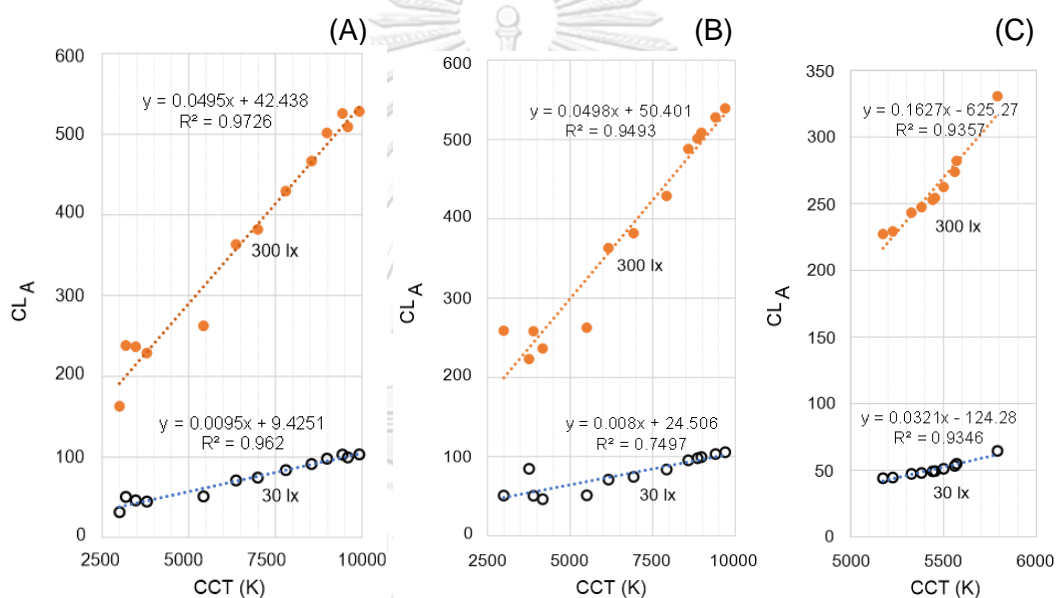




ภาพที่ 4.42 ค่าการกระตุ้นการรับรู้แสงรอบวัน (Circadian Stimulus, CS) กับความสัมพันธ์เชิงลอการิทึมของความเข้มของแสงในลักษณะ (A-D) และความเข้มของแสงทางชีวภาพในรอบวัน (Circadian light, CL_A)(E-H)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสว่าง (ลักซ์), CS และ CL_A สำหรับการประเมินแสงประดิษฐ์ในช่วงของแสงในรอบวัน ดังภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ของเส้นโค้งการตอบสนองต่อสเปกตรัมของแสงแต่ละองค์ประกอบในส่วนของขนาด (ของแสง) ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ CCT อาจส่งผลต่อ CS ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มของแสงสีในช่วงความยาวคลื่นสีน้ำเงินเป็นหลัก และจากการสังเกต แสงกลางวัน พบว่าต้องใช้ CL_A ที่สูงกว่าจึงจะสามารถกระตุ้น CS ได้เท่ากับหลอด LED-A, LED-B และ c-LED เนื่องจากมีแสงขาวในทุกช่วงคลื่นแสง

ภาพที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CCT กับ CL_A ของหลอด LED-A และ LED-B และแสงกลางวันในช่วง 30 ลักซ์ (○) และ 300 ลักซ์ (●) จากการทดสอบพบว่าค่าความสว่างมากขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับ CCT และ CL_A ที่มากขึ้น



ภาพที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่าง CCT กับ CL_A ของ LED-A (A) LED-B (B) และแสงกลางวัน (C) ที่ 30 ลักซ์ (○) และ 300 ลักซ์ (●)

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางเรติโอเมตรีและโฟโตเมตรีของ LED-A LED-B และ c-LED

CCT _T	CCT(meas)	Δ CCT	lumen	CRI	CQS	LER	LE	CER	CAF	MSI	S/P	CL _A *	CS*
K	K	K	lm	-	-	(lm/W _{app})	(lm/W _{elec})	(blm/W)	(blm/lm)	-	-	-	-
LED-A													
3,000	3,002	2	18,038	43	54	212	96	187	0.88	0.56	1.9	31.46	0.05
3,200	3,184	-16	16,644	44	58	198	90	189	0.96	0.62	2.04	50.39	0.07
3,500	3,469	-31	18,147	46	57	207	94	196	0.95	0.65	2.09	46.04	0.07
4,000	3,791	-209	13,960	62	73	209	95	192	0.92	0.99	2.01	44.59	0.06
6,000	6,364	364	23,535	62	62	218	99	256	1.17	1.13	3.82	70.86	0.10
5,000	5,426	426	18,881	47	60	287	130	333	1.16	0.66	3.29	50.00	0.07
7,000	6,988	-12	27,555	65	61	227	103	283	1.25	1.09	2.95	74.42	0.11
8,000	7,798	-202	28,857	67	62	225	102	294	1.31	0.67	3.09	83.71	0.12
8,500	8,539	39	30,578	68	62	225	102	304	1.35	0.93	3.21	91.04	0.13
9,000	8,984	-16	32,274	64	60	223	101	310	1.39	1.09	3.29	97.90	0.14
9,500	9,433	-67	33,333	65	60	223	101	314	1.41	1.11	3.34	102.65	0.14
10,000	9,586	-414	31,054	71	64	222	101	308	1.39	1.11	3.3	99.38	0.14
LED-B													
3,000	2,991	-9	11,010	64	79	187	85	160	0.86	0.74	1.85	50.73	0.07
3,200	3,758	558	14,572	65	72	225	102	187	0.83	0.61	1.94	84.57	0.12
3,500	3,894	394	13,151	65	77	205	93	189	0.92	0.73	2.04	50.42	0.07
4,000	4,172	172	14,023	69	77	213	97	196	0.92	0.71	2.07	45.99	0.07
5,000	5,507	507	16,245	60	50	332	151	372	1.12	0.87	2.8	85.00	0.12
6,000	6,160	160	18,119	76	79	227	103	256	1.13	0.84	2.49	70.82	0.10
7,000	6,924	-76	21,631	79	79	242	110	283	1.17	0.85	2.26	74.33	0.11
8,000	7,922	-78	22,288	80	80	240	109	294	1.22	0.90	2.72	83.63	0.12
8,500	8,577	77	22,392	83	82	233	106	303	1.30	0.97	2.83	95.30	0.13
9,000	8,852	-148	23,430	82	81	236	107	310	1.31	0.98	2.87	97.83	0.14
9,500	8,976	-524	22,818	83	82	233	106	308	1.32	0.99	2.88	99.32	0.14
10,000	9,401	-599	23,645	83	82	234	106	315	1.34	1.01	2.92	103.12	0.14
Warm white	3,025	N/A	53,738	77	77	361	150	171	0.47	0.54	1.24	28.92	0.04
Cool white	3,490	N/A	51,303	79	80	358	149	208	0.58	0.53	1.45	35.32	0.05
Night Light	3,600	N/A	3,907	88	89	243	101	178	0.73	0.26	1.63	46.67	0.07
Daylight	5,352	N/A	399,569	73	77	353	147	298	0.84	0.33	2.00	58.31	0.08

Note: *CL_A and CS values were reported to demonstrate light intensity at 30 lux

ตารางที่ 4.3 สมบัติทางเรติโอเมตรีและโฟโตเมตรีของแสงอาทิตย์ในฤดูร้อนและฤดูหนาว

Lamp Type	Time	CCT (mea) K	Illuminance lm	CRI -	CQS -	CER (blm/W)	CAF (blm/lm)	MSI -	S/P -	CL _A -	CS -
Daylight in Summer	06:00	5,441	11,718	97	96	217	1.16	0.90	2.37	74.89	0.11
	07:00	5,226	14,804	91	91	241	1.09	0.79	2.34	64.51	0.09
	08:00	5,327	44,787	85	86	258	1.00	0.72	2.26	53.24	0.08
	09:00	5,500	96,693	84	85	262	0.99	0.66	2.24	51.02	0.07
	10:00	5,560	137,327	84	84	263	0.97	0.63	2.21	49.11	0.07
	11:00	5,790	243,850	84	85	254	0.92	0.60	2.14	44.06	0.06
	12:00	5,896	309,843	83	84	259	0.93	0.73	2.15	44.49	0.06
	13:00	5,842	220,165	84	85	260	0.95	0.60	2.18	47.21	0.07
	14:00	5,646	167,910	84	84	261	0.96	0.64	2.21	48.03	0.07
	15:00	5,570	115,650	84	85	263	0.97	0.64	2.22	49.39	0.07
	16:00	5,174	49,334	86	87	254	1.02	0.70	2.26	54.88	0.08
	17:00	5,381	43,680	95	98	182	1.17	1.01	2.28	81.78	0.12
18:00	5,454	14,804	91	91	241	1.09	0.79	2.59	64.51	0.09	
Daylight in Winter	06:00	5,314	43,434	80	82	214	1.12	0.90	2.50	73.40	0.10
	07:00	5,313	62,540	81	83	222	1.11	0.89	2.36	66.62	0.09
	08:00	5,341	94,843	82	83	232	1.08	0.76	2.25	57.35	0.09
	09:00	5,354	152,737	83	84	242	1.09	0.69	2.19	50.43	0.08
	10:00	5,630	193,466	83	84	264	0.98	0.65	2.18	45.67	0.08
	11:00	6,202	222,757	83	84	254	0.96	0.64	2.15	46.58	0.07
	12:00	7,006	281,836	82	83	255	0.94	0.75	2.18	48.73	0.06
	13:00	6,568	238,530	84	84	266	0.95	0.63	2.18	49.34	0.07
	14:00	5,974	197,185	83	84	267	0.95	0.65	2.19	49.13	0.06
	15:00	5,547	144,774	83	84	265	0.99	0.67	2.19	50.14	0.07
	16:00	5,374	110,330	83	83	264	1.02	0.72	2.27	64.95	0.08
	17:00	5,307	82,023	83	84	220	1.09	0.98	2.41	85.58	0.09
18:00	5,282	57,782	82	83	221	1.09	0.84	2.30	66.56	0.09	

Note: * CL_A and CS values we reported to demonstrate light intensity at 30 lux

ตอนที่ 3 การประเมินคุณภาพการส่องสว่างของแสง RGB-LED ในการเลียนแบบแสงในรอบวัน

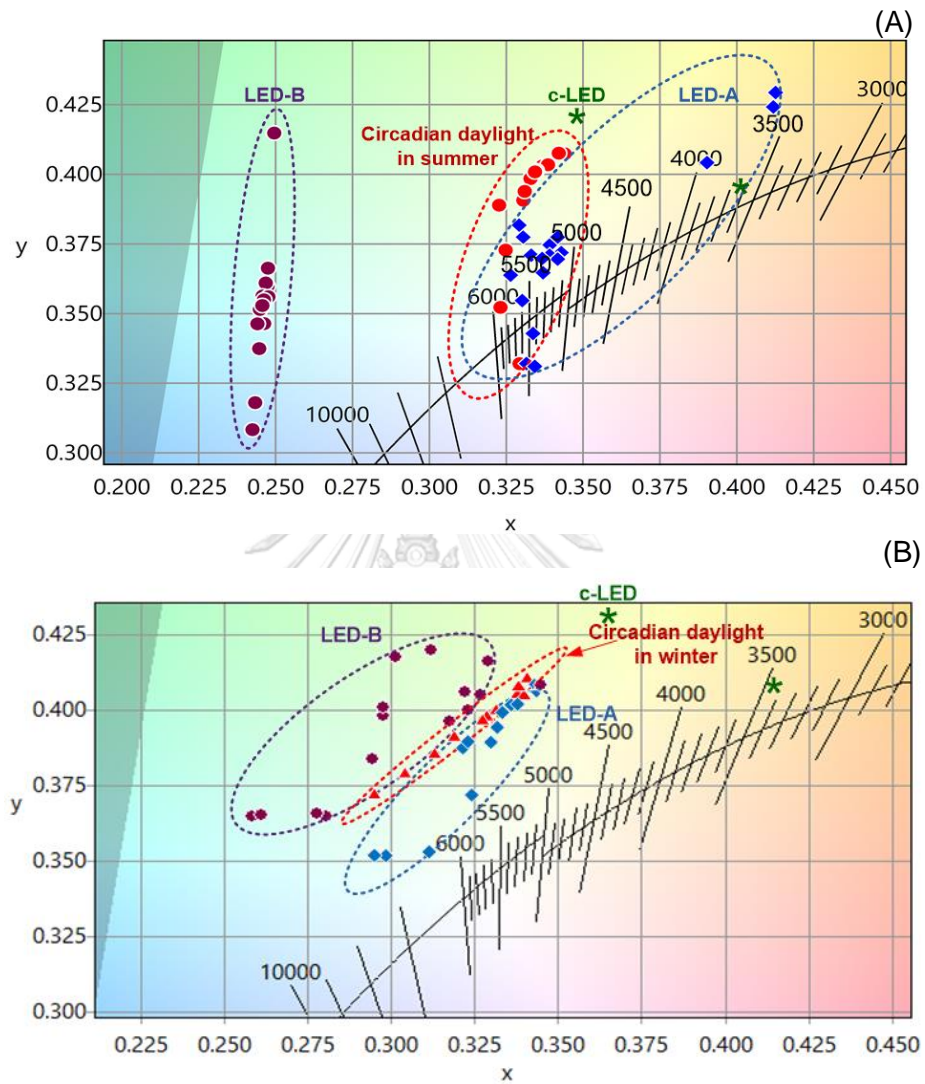
(3.1) หลักการออกแบบและการประเมินคุณภาพการให้แสงเลียนแบบแสงในรอบวันของหลอดประดิษฐ์

ในส่วนนี้การเลียนแบบแสงในรอบวันนั้นได้จำลองจากค่าพิกัด x และ y บนแผนภาพสีที่ได้จากการวิเคราะห์สเปกตรัมของแสงในช่วงวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสในฤดูร้อน (10–15 พฤษภาคม 2563) และในฤดูหนาว (10–15 พฤศจิกายน 2563) ดังที่ได้กล่าวถึงในข้างต้น ในการวิจัยนี้ได้ศึกษาตัวแปรแสงในเวลากลางวันโดยคำนวณเป็นรายชั่วโมง (06:00 น. – 18:00 น.) ColorCalculator (เวอร์ชัน 7.77, Osram, USA) รหัส RGB ถูกสร้างขึ้นตามพิกัดเฉพาะดังแสดงในภาพที่ 4.11 หลังจากนั้น รหัส RGB ที่ได้รับจะถูกกำหนดในเวลาที่กำหนดต่าง ๆ โดยแสงในรอบวันจะกำหนดเพื่อเปรียบเทียบแสงตั้งแต่ช่วงเวลา 06:00 น. – 18:00 น. จากนั้นนำรหัส RGB ที่ได้ตามเวลาดังกล่าวป้อนให้กับซอฟต์แวร์อินพุต RGB-LED ในโหมตการทำงานอัตโนมัติ (ภาพที่ 3.2) โดยโปรแกรมถูกนำไปใช้ควบคุมการส่องสว่างของ LED-A และ LED-B แล้วจึงดำเนินการเก็บข้อมูลสเปกตรัมของตัวอย่างแสงเพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

(3.2) ผลการวิเคราะห์คุณภาพแสงเลียนแบบแสงในรอบวัน

ดังแสดงในภาพที่ 44 ซึ่งเป็นพิกัดแผนภาพสีของ RGB-LED (LED-A และ LED-B) แสดงถึงพิกัดของ CCT ที่เลียนแบบแสงในรอบวันระหว่างวันในฤดูร้อน (เดือนพฤษภาคม) และวันฤดูหนาว (เดือนพฤศจิกายน) โดยพบว่าค่า CCT ที่หลอดทำได้ค่อนข้างแตกต่างจาก CCT ที่กำหนด เมื่อเปรียบเทียบแล้ว LED-A จะสามารถให้แสงที่มีพิกัดเข้าใกล้ เส้นพลาจเคียน และใกล้กับบริเวณ CCT ที่กำหนดมากกว่า LED-B ค่าพิกัดของ LED-A อยู่ในแนวเดียวกับแสงอาทิตย์ในช่วง 5,000 – 6,000 เคลวิน (ฤดูร้อน) และ 5,000 – 7,000 เคลวิน (ฤดูหนาว) แต่มีเพียงบางจุดที่พบว่ามีค่า CCT ต่ำกว่า 5,000 เคลวิน ในทางตรงกันข้าม LED-B พบว่า ค่า CCT นั้นสูงกว่าค่า CCT ที่กำหนดในฤดูร้อนประมาณ 2,000 เคลวิน และสูงกว่าค่า CCT ที่กำหนดในฤดูหนาวประมาณ 5,000 เคลวิน ดังแสดงใน ตารางที่ 4.4 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหลอดไฟประดิษฐ์ (LED-A และ LED-B) ที่เลียนแบบแสงรอบวัน และให้รายละเอียดเพื่ออธิบายปรากฏการณ์นี้ตามที่ระบุไว้ในค่า δ_{CCT} LED-A มีค่า δ_{CCT} เฉลี่ยประมาณ 3.8% ของการเบี่ยงเบน (ในช่วง 0.04 – 10.10%) ในทางตรงกันข้าม LED-B มีความเบี่ยงเบนเฉลี่ย 5.0% โดยมี δ_{CCT} สูงกว่า (ช่วง 1.28 – 34.42%) มากกว่าที่พบใน LED-A อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) อย่างไรก็ตาม ไม่มีเกณฑ์เกี่ยวกับประสิทธิภาพที่กำหนดขึ้นเพื่อประเมินและเลือกแหล่งกำเนิดแสงอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามควรพิจารณาถึงความเบี่ยงเบนของแสงที่เกิดจาก LED นอกเหนือไปจากพารามิเตอร์การให้แสงในรอบวัน เช่น CRI ของ LED ควรมีมากกว่า 80 สำหรับแสงคุณภาพสูง ดังนั้นถ้าหาก CAF และ CRI สูงสามารถใช้แสดงถึงแสงที่มีคุณภาพสูงและ

สามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการเลือกแหล่งกำเนิดแสงเบื้องต้นได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอย่างมากที่จะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อกำหนดการผสมแสงสีของ RGB-LED ที่เหมาะสม



ภาพที่ 4.44 ไดอะแกรมพิกัดแผนภาพสีของแสงที่ได้จากการเลียนแบบแสงในรอบวันของ (A) ฤดูร้อน (เดือนพฤษภาคม) และฤดูหนาว (เดือนพฤศจิกายน) ของประเทศไทย โดยเปรียบเทียบระหว่างแสงอาทิตย์ (▲) LED-A (◆) LED-B (●)

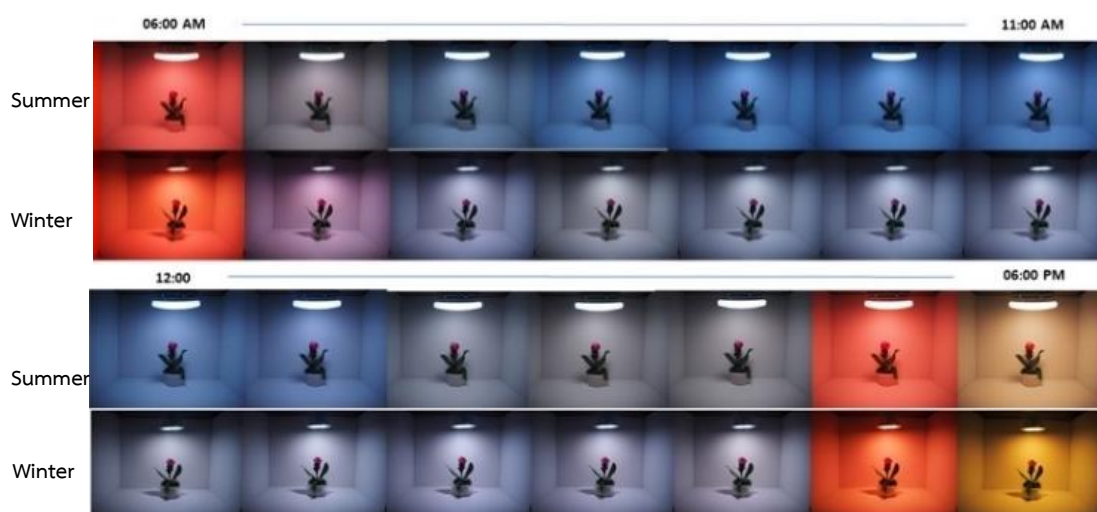
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการให้แสงสว่างของแสงประดิษฐ์เลียนแบบแสงในรอบวันของ LED-A และ LED-B เมื่อเทียบกับค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้

Circadian Time (Attained)	Assigned CCT ₀ (K)	LED-A			LED-B			P-value*
		Arbitrary CCT ₁ (K)	δ_{CCT}	δ_{CCT} (%)	Arbitrary CCT ₁ (K)	δ_{CCT}	δ_{CCT} (%)	
		(Mean±S.D.)			(Mean±S.D.)			
Summer								
06:00	5,441	5,442±66.6	-1	4.30	5,228± 82	213	3.90	0.0000
07:00	5,226	5,453±70.5	-227	4.34	5,326± 73	-67	1.28	0.0012
08:00	5,327	5,560±71.0	-233	4.37	5,700± 79	-249	4.67	0.0705
09:00	5,500	5,844±97.6	-344	6.25	5,999± 64	-333	6.05	0.1053
10:00	5,560	5,789±67.0	-229	4.12	6,693±112	-755	13.59	0.0000
11:00	5,790	5,536±71.3	254	4.39	7,765±114	-1317	22.74	0.0001
12:00	5,896	5,647±62.6	249	4.22	8,940±165	-2029	34.42	0.0002
13:00	5,842	5,647±54.3	195	3.34	8,776±173	-1956	33.48	0.0002
14:00	5,646	5,897±67.3	-251	4.45	7,887±156	-1494	26.46	0.0002
15:00	5,570	5,572±65.0	-2	0.04	6,919±155	-899	16.15	0.0001
16:00	5,531	5,500±86.0	31	0.56	5,839± 61	-205	3.71	0.0018
17:00	5,381	5,381±65.0	0	0	6,468±110	-1,087	20.20	0.0002
18:00	5,454	5,173±16.4	281	5.20	6,692±140	-1,238	22.70	0.0001
Winter								
06:00	5,314	5,535±66.4	-221	4.20	6,130± 71	-816	15.40	0.0219
07:00	5,313	5,195±36.4	118	2.26	5,848±153	-535	10.10	0.0017
08:00	5,341	5,405±14.3	-64	1.20	6,863±147	-1,522	28.50	0.0057
09:00	5,354	5,477±37.4	-123	2.32	6,835±118	-1,481	27.70	0.0008
10:00	5,630	5,818±48.5	-188	3.38	6,875± 69	-1,245	22.16	0.0003
11:00	6,202	6,401±52.0	-199	3.23	7,028± 76	-826	13.34	0.0004
12:00	7,006	7,201±44.6	-195	2.80	9,115± 79	-2,109	30.10	0.0003
13:00	6,568	7,034±63.3	-466	7.10	7,417± 86	-849	12.90	0.0003
14:00	5,974	5,871±18.2	103	1.70	6,917±133	-943	15.82	0.0001
15:00	5,547	5,598±13.9	-51	0.90	6,915± 46	-1,368	24.70	0.0012
16:00	5,374	5,466±27.6	-92	1.71	6,855± 52	-1,481	27.56	0.0062
17:00	5,307	5,350±12.4	-43	0.80	6,607±142	-1,300	24.50	0.0000
18:00	5,282	5,816±16.6	-534	10.10	5,798± 49	-516	9.80	0.0008

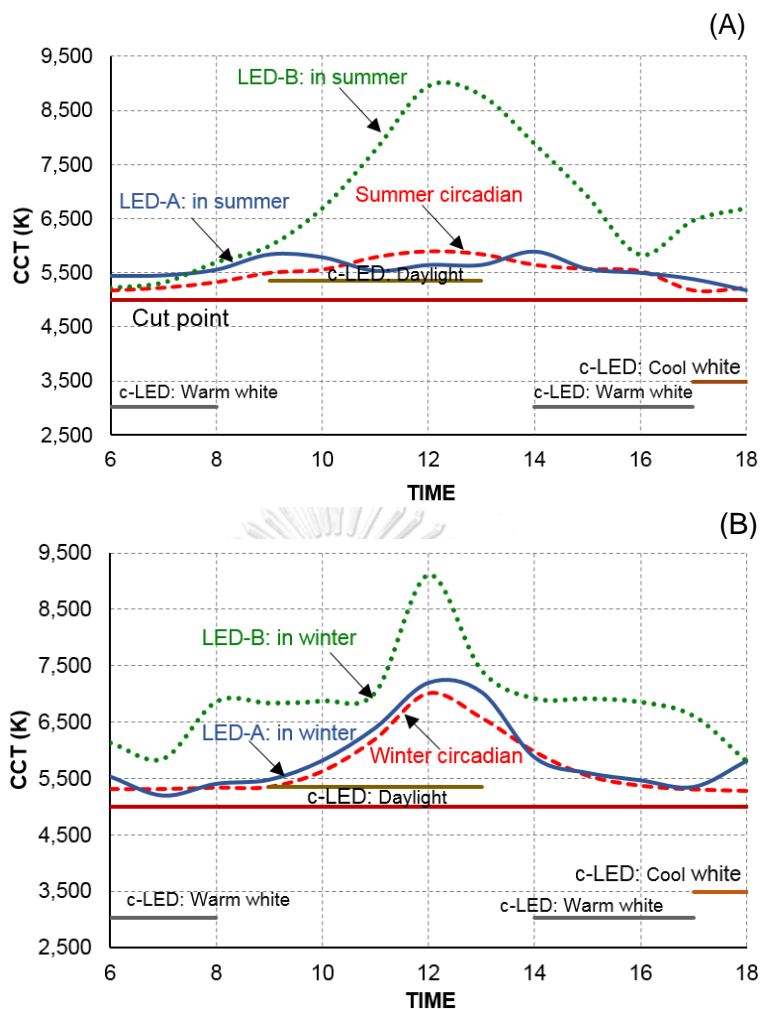
Note:

* The statistical difference between the arbitrary CCT of the LED-A and LED-B by F-test at $P<0.05$.

ภาพที่ 4.12 แสดงถึงคุณสมบัติของแสงธรรมชาติในตอนกลางวันในเดือนพฤษภาคม (ฤดูร้อน) และเดือนพฤศจิกายน (ฤดูหนาว) โดยเปรียบเทียบแสงประดิษฐ์สำหรับ LED-A และ LED-B ความสว่างของแสงอาทิตย์ ซึ่งระบุโดย CCT (เคลวิน) จะสังเกตได้จากค่า CCT ที่สูงขึ้นในตอนกลางวัน ดังที่แสดงไว้ แสงประดิษฐ์ให้แสงที่มีความเข้มต่ำกว่าแสงกลางวัน อย่างไรก็ตามแสงประดิษฐ์ไม่จำเป็นต้องให้แสงที่มีความเข้มเท่ากับแสงกลางวันเพราะแสงธรรมชาติเพียงหนึ่งในสิบก็เพียงพอแล้วสำหรับสภาพแวดล้อมของมนุษย์ทั่วไปและตามมาตรฐานความสว่างในการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์



ภาพที่ 4.45 ลักษณะของแสงที่ปรากฏที่ได้จากการจำลองของแสงประดิษฐ์เลียนแบบแสงในรอบวันของฤดูร้อนและฤดูหนาว



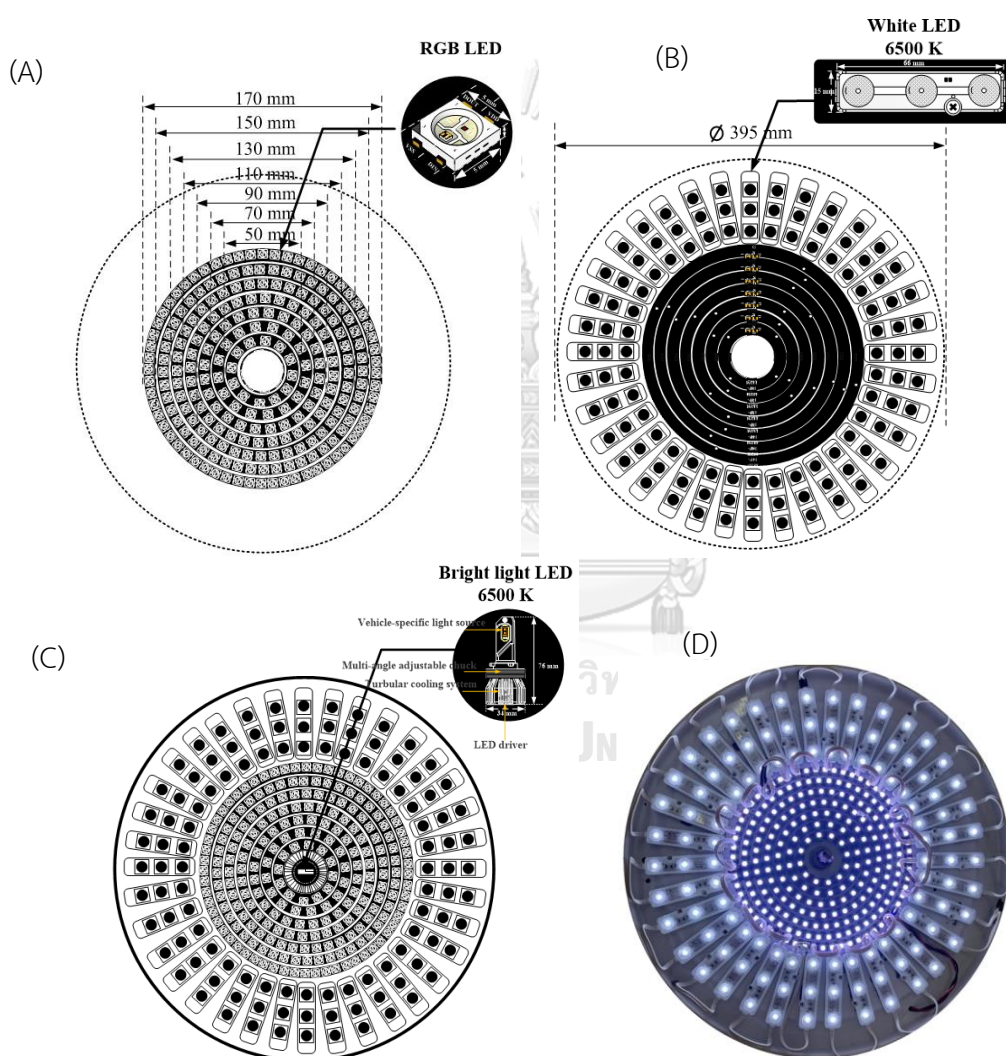
ภาพที่ 4.46 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงค่า CCT ของแสงในรอบวันของฤดูร้อน (A) และฤดูหนาว (B) และนำไปใช้ในการกำหนดค่า CCT ในการเลียนแบบแสงในรอบวันของ LED-A และ LED-B

ตอนที่ 4 การพัฒนาระบบอัจฉริยะในการให้แสงในรอบวัน

(4.1) การออกแบบระบบให้แสงในรอบวัน

จากการพัฒนาระบบอัจฉริยะส่องสว่างสำหรับการให้แสงในรอบวัน (circadian light) และแสงจ้า (bright light) ในขั้นตอนนี้จะมีการตั้งค่าความเข้มแสงเป้าหมายสูงสุดที่ 5,000 ลักซ์ ในระยะ 60 เซนติเมตร โดยประกอบด้วย หลอด RGB-LEDs หลอดแสงขาว (white light LED) โคมไฟแสงประดิษฐ์และโครงสร้าง ชุดควบคุมการป้อนรหัสสีและความสว่างของแสง (controller and driver) คอมพิวเตอร์ และสมาร์ทโฟน (รองรับระบบ android) ซอฟต์แวร์ และ Application สำหรับควบคุมการทำงานอัจฉริยะแสงในรอบวัน โดยมีรายละเอียดและหลักการในการทำงาน ดังต่อไปนี้

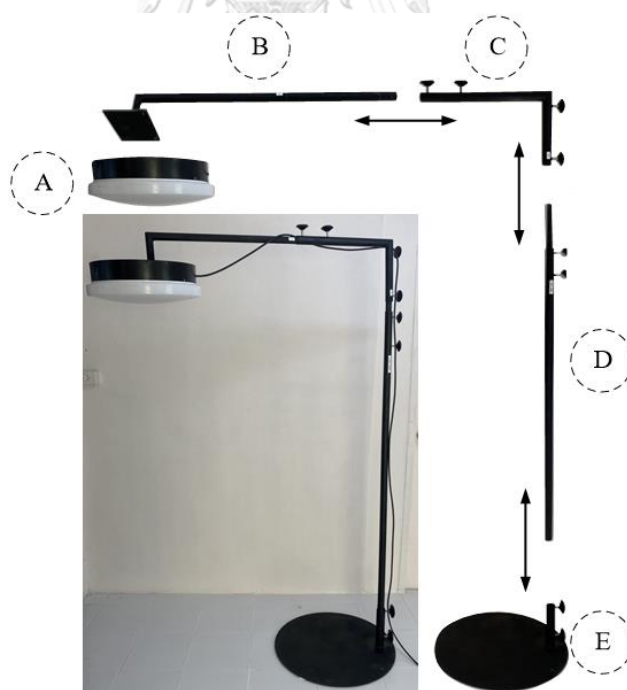
ในการพัฒนาโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะเพื่อเลียนแบบแสงในรอบวันของฤดูร้อนและฤดูหนาวของประเทศไทย ได้ใช้ส่วนประกอบของหลอดทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ RGB – LED (LED-A) จำนวน 232 บิต ซึ่งได้มาจากการคัดเลือกหลอดจากตอนที่ 2 และตอนที่ 3 เพื่อนำใช้ในการให้แสงตามอุณหภูมิสัมพัทธ์ของสี (CCT) หลอดแสงขาว (White – LED 5,600 เคลวิน) จำนวน 36 บิต เพื่อช่วยเพิ่มความสว่างและความสว่างในการทำให้ค่าพิคัดเข้าใกล้แสงในรอบวันมากที่สุด และหลอดแสงจ้า (Bright light LED 6,500 เคลวิน) จำนวน 1 หลอด เพื่อใช้โหมดของแสงจ้า โดยลักษณะโครงสร้างและการจัดเรียงตำแหน่งของหลอดได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.47 ส่วนประกอบและรูปลักษณะของโคมไฟแสงประดิษฐ์ (ภายใน) (A) RGB-LED (B) White –LED 6,500 เคลวิน (C) Bright light LED 6,500 เคลวิน และ (D) ภาพถ่ายโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะขณะทำงาน

(4.2) การทำงานของระบบการส่องสว่างอัจฉริยะ

ระบบควบคุมการทำงานของระบบการส่องสว่างแบบอัจฉริยะ โดยในการศึกษานี้เป็นระบบที่สามารถควบคุมโคมไฟส่องสว่างผ่านสมาร์ทโฟนแสดงสถานะและควบคุมการทำงาน โดยผู้ใช้ผ่านระบบสมาร์ทโฟน โดยสามารถเลือกรูปแบบคำสั่งได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบการเลียนแบบแสงในรอบวัน และรูปแบบแสงจ้า (bright light) โดยโคมไฟแสงประดิษฐ์และโครงสร้างประกอบไปด้วยโคมไฟส่องเป็นวัสดุที่ทำด้วยเหล็กแผ่นมีความหนา 0.5 มิลลิเมตร โดยโคมไฟแสงประดิษฐ์มีขนาดความกว้าง 395 มิลลิเมตร ความยาว 395 มิลลิเมตร และความสูง 80 มิลลิเมตร และชุดโครงสร้างเสาไฟสร้างขึ้นเพื่อรองรับส่วนของโคมไฟแสงประดิษฐ์ทำจากเหล็กแบบกลมประกอบด้วย 4 ส่วน โดยส่วน A มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{1}{2}$ นิ้ว และมีความยาว 1.50 เมตร ทำมุมฉาก 90 องศา เพื่อรองรับโคมไฟแสงประดิษฐ์และรองรับส่วน B ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว และมีความยาว 0.75 เมตร ทำมุมฉาก 90 องศา เพื่อรองรับส่วน C ที่ประกอบด้วย เหล็กแบบกลม 2 ขนาด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{1}{2}$ นิ้ว และ 1 นิ้ว โดยมีขนาดความยาว 1.60 เมตร และส่วน D เป็นฐานรองรับโครงสร้างและโคมไฟแสงประดิษฐ์ทำจากเหล็กแผ่นมีความหนา 2 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลม 0.5 เมตร

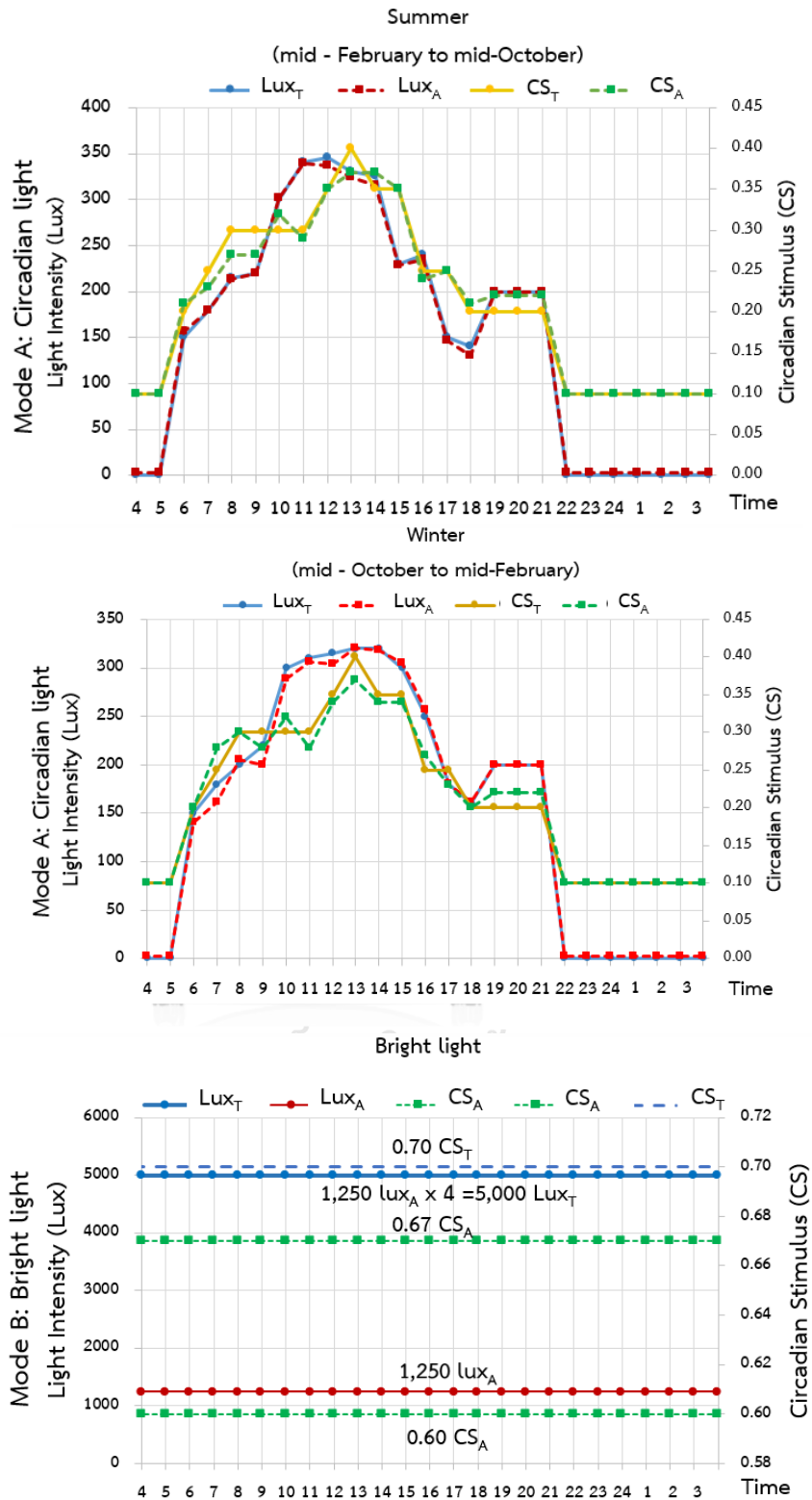


ภาพที่ 4.48 โคมไฟแสงประดิษฐ์และโครงสร้าง

(4.3) รูปแบบการทำงาน (Algorithm) ของระบบอัจฉริยะในการให้แสงในรอบวัน

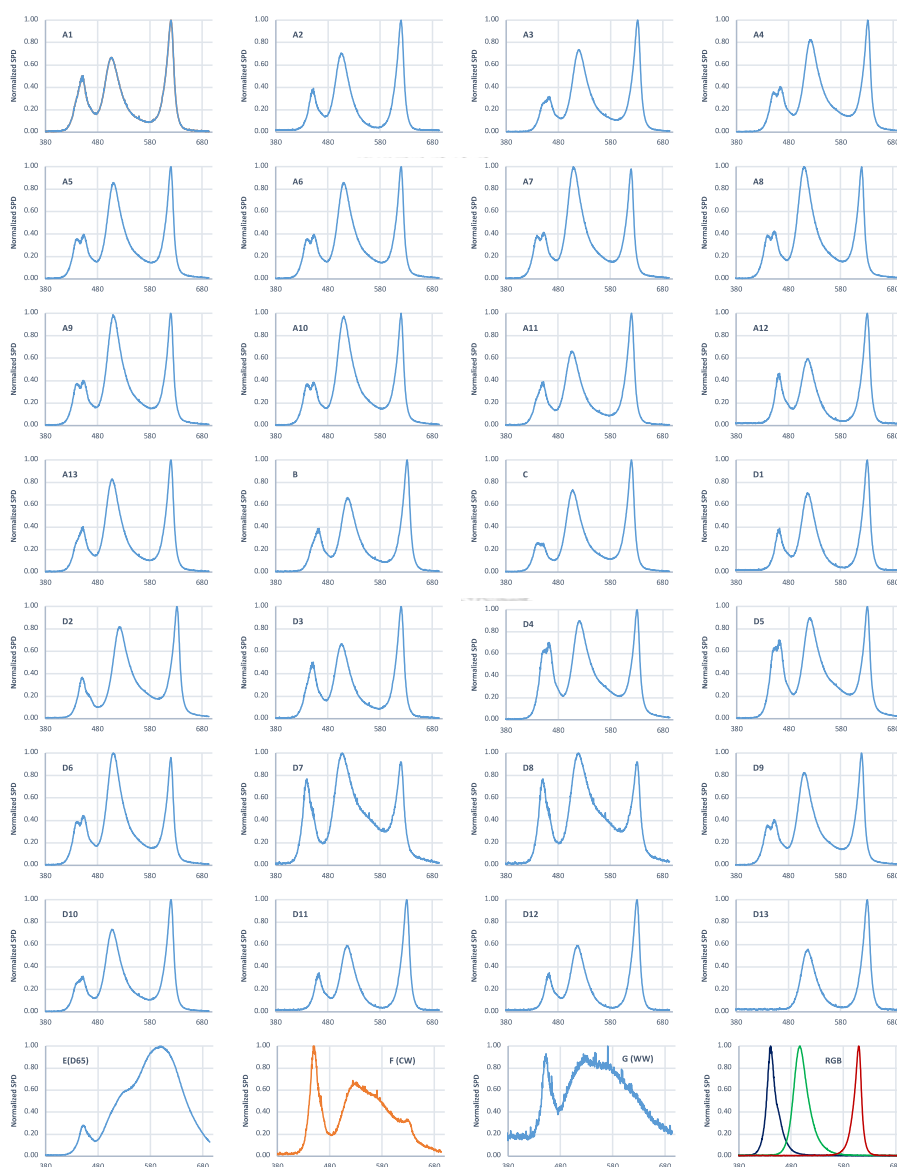
ระบบควบคุมสำหรับแสงในรอบวันประกอบด้วยโคมไฟ (หลอดไฟ LED ที่ควบคุม CCT ในช่วงระหว่าง 2,000 – 6,500 เคลวิน โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิของแสงสีจากแสงอาทิตย์ที่ได้จากการศึกษาในตอนต้นที่ 1 และออกแบบระบบไมโครคอนโทรลเลอร์พร้อมเซ็นเซอร์ควบคุมแสงแบบวงปิด (closed-loop lighting) ภายในห้อง (เชื่อมต่อ NodeMCU ESP8266) ออกแบบและตั้งค่าระบบควบคุมแสงภายในด้วยความเข้มของแสงโดยใช้ RGB/LED เพื่อให้ความสว่างเลียนแบบแสงในรอบวันแบบสมาร์ต ตามรูปแบบ (mode) 2 รูปแบบ โดยรูปแบบที่ 1 คือ รูปแบบการเลียนแบบแสงในรอบวัน และรูปแบบที่ 2 คือ รูปแบบแสงจ้าที่ระดับความสว่าง 5,000 ลักซ์ ซึ่งในการออกแบบจะให้แสงที่มี CCT ตามฤดูกาลจากการศึกษาในตอนต้นที่ 1 โดยกำหนดระดับความสว่างจะพิจารณาจากเกณฑ์ระดับของค่า CS ที่เหมาะสม ดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้นที่ 3





ภาพที่ 4.49 รูปแบบการให้แสงเลียนแบบแสงในรอบวันและแสงจ้าของฤดูร้อนและฤดูหนาว โดยเส้นสีแดงแสดงค่า CS ที่คอมพิวเตอร์จำลองอัจฉริยะทำได้

จากหลักการออกแบบการทำงานของหลอดดังกล่าว จะทำให้ได้ลักษณะของแสงที่ออกมาจากหลอดทั้งหมด 29 ตัวอย่าง โดยแสงแต่ละแบบจะมีการวิเคราะห์ถึงสมบัติและความถูกต้องของแสงตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ และเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหลอดโดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนในการให้แสงสีของโคมไฟแสงประดิษฐ์ (δ) ณ พิกัด 0.80 เมตร ในแนวตั้งฉากจากโคมไฟแสงประดิษฐ์ ดังภาพที่ 4.17 แสดงรูปแบบการกระจายพลังงานของสเปกตรัมแสงตัวอย่างที่ได้จากการกำหนดการให้แสงผ่านระบบ CU Smart Circadian Lighting จำนวน 29 ตัวอย่าง



ภาพที่ 4.50 การกระจายตัวของสเปกตรัมแสงตัวอย่างจากโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะสำหรับการเลียนแบบแสงในรอบวันของฤดูร้อน (A1 – A13) แสงในช่วงค่ำ (B) แสงจันทร์ (C) การเลียนแบบแสงในรอบวันของฤดูหนาว (D1 – D13) แสงจ้า E(D65) แสงจากโคมไฟทางการค้า (F – G) และ แสงจากหลอด RGB ที่ใช้ในการออกแบบแสงเลียนแบบแสงในรอบวัน

(4.4) การทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานของระบบอัจฉริยะในการให้แสงในรอบวัน

ในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของแสงด้วยสมบัติทางเรติโอเมตรีและโฟโตเมตรี รวมทั้งการประเมินความพึงพอใจและการรับรู้ของตัวอย่างแสงที่ได้จากโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะ (SLS) จำนวน 29 ตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบกับแสงที่ได้จากโคมไฟทางการค้า (CLS) จำนวน 2 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 31 ตัวอย่าง โดยในการวัดค่าสมบัติทางเรติโอเมตรีและโฟโตเมตรีดำเนินภายในห้องปิด (มืดสนิท) และติดตั้งระบบการวัดเช่นเดียวกับวิธีในการวัดในตอนเช้า และ 3 ตามลำดับ แต่ทั้งนี้ได้กำหนดระยะในแนวตั้งจากจุดศูนย์กลางของโคมไฟทั้ง 2 ชนิด มายังจุดศูนย์กลางของการวัดที่ 90 องศา ที่ระยะ 80 เซนติเมตร เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหลอด

(4.4.1) สมบัติของแสงในรอบวัน (photometry and radiometry)

ภายหลังจากการออกแบบการให้แสงและการทำงานของโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะ ซึ่งได้กำหนดตัวอย่างการทำงานของโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะ ดังนี้ สำหรับการเลียนแบบแสงในรอบวันในฤดูร้อน จำนวน 13 ตัวอย่าง (A1-A13) สำหรับการเลียนแบบแสงในรอบวันในฤดูหนาว จำนวน 13 ตัวอย่าง (D1-D13) และตัวอย่างแสงในช่วงกลางคืนจำนวน 2 ตัวอย่าง (B และ C) ซึ่งในการใช้งานจริงจะได้รับการปรับระดับความสว่างที่ 200 ลักซ์ ในตอนค่ำ (19:00 น.– 22:00 น.) และ 3 – 5 ลักซ์ ในช่วง 22:00 น. – 06:00 น. และแสงจ้า จำนวน 1 ตัวอย่าง E(D65) โดยเทียบกับโคมไฟทางการค้าซึ่งมีตัวอย่างแสง 2 ตัวอย่าง ได้แก่ แสงวอร์มไวท์ (warm white, F – WW) และแสงคูลไวท์ (cool whiter, G – CW) ภายหลังจากการกำหนดค่าสีของแสงเป้าหมายแล้ว

จากการกำหนดค่าพิกัดของแสงเพื่อเลียนแบบแสงในรอบวันของ SLS โดยคำนวณจากพิกัด x และ y บนพิกัดแผนภาพสีของแสงในรอบวันที่ได้จากการศึกษาสมบัติของแสงในรอบวันทั้งในฤดูร้อนและฤดูหนาวของประเทศไทย ทำให้ได้รหัส RGB สำหรับการควบคุมการผลิตแสงสีของหลอด WRGB-LED ในการออกแบบการทำงานของ SLS จากผลการทดลองและการประเมินคุณภาพของแสงทางด้านเรติโอเมตรีและโฟโตเมตรี ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ในการศึกษาความสามารถของ SLS ในการให้แสงสว่างได้พิจารณาจากค่า CCT ที่ทำได้ (Arbitrary CCT, CCT_A) CCT เป้าหมาย (target CCT, CCT_T) โดยพบว่า SLS ให้แสงในช่วง CCT ที่ใกล้เคียงกับ CCT ของแสงในรอบวัน ณ ไดอะแกรมพิกัดบนแผนภาพสีของทั้ง 2 ฤดูกาล มากขึ้น โดยในการเลียนแบบแสงในรอบวันของฤดูร้อน (A1 – A13) ซึ่งมีค่า CCT_T อยู่ในช่วง 5,174 – 5,896 เคลวิน มีความสามารถในการให้แสงที่ผลิตออกมาได้อยู่ในช่วง 5,166 – 6,349 เคลวิน ซึ่งมีค่าสัมบูรณ์ความผิดพลาดของ CCT (absolute CCT error, IdCCTI) อยู่ในช่วง 8 – 591 เคลวิน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 0.15 – 9.59 เมื่อเทียบกับ CCT_T ในขณะที่การเลียนแบบแสงในรอบวันของฤดูหนาว (D1 – D13) ซึ่งมีช่วงของค่า CCT_T อยู่ระหว่าง 5,282 – 7,006 เคลวิน พบว่า SLS สามารถให้ค่า CCT_A ได้ในช่วง 4,989 – 6,560 เคลวิน มีค่า IdCCTI อยู่ในช่วง 22 – 532 เคลวิน คิดเป็นร้อยละ 0.34 – 9.01 เมื่อเทียบกับค่า CCT_T โดย และ

สำหรับตัวอย่างแสง B และ C ซึ่งเป็นตัวแทนของแสงสำหรับการใช้ชีวิตในช่วงค่ำและกลางคืนตามลำดับ โดยตัวอย่างแสงทั้งสองกำหนดค่าอุณหภูมิสัมพัทธ์ของสีที่ 4,100 เคลวิน มีความเข้มของแสงที่ 200 และ 1 ลักซ์ ตามลำดับ ซึ่งพบว่า ตัวอย่างแสง B และ C ของ SLS สามารถผลิตแสงได้ที่ 3,982 เคลวิน และ 3,902 เคลวิน ตามลำดับ ซึ่งมีค่า IdCCTI เท่ากับ 118 (ร้อยละ 2.96) และ 116 (2.8) ตามลำดับ และ SLS สามารถให้แสงจ้า F(D65) ได้ที่ 5,368 เคลวิน (IdCCTI = 132, ร้อยละ 2.46) โดยที่โคมไฟทางการค้าสามารถผลิตแสง FCW ที่ 3,490 เคลวิน และ GWW ผลิตแสงที่ 3,025 เคลวิน ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยภาพรวมจะพบว่า SLS มีค่า IdCCTI เฉลี่ยเท่ากับ 275.55 เคลวิน (ร้อยละ 4.80)

สำหรับค่า CS ซึ่งเป็นค่าที่สัมพันธ์กับระดับความเข้มของแสงซึ่งในการออกแบบการให้ระดับความสว่างของ SLS ได้ใช้หลักการค่า CS ของแสงในรอบวันที่ส่องสว่างเข้ามาในอาคาร (บ้าน) และสำหรับค่าความเข้มของแสงในช่วงค่ำซึ่งปัจจุบันมนุษย์เรายังมีกิจกรรมจนกระทั่งเข้านอน โดยระดับความเข้มของแสงในเวลาตอนค่ำได้ใช้หลักเกณฑ์มาตรฐานความสว่างเข้ามากำหนดระดับค่าความสว่างของแสงและ CS ด้วยเหตุนี้ค่า CS ในช่วงเวลา 6.00 น. – 8.00 น. จะมีค่าในช่วง 0.20 – 0.30 ในช่วงเช้าซึ่งดวงตาของมนุษย์ค่อย ๆ ได้รับความที่มีความสว่างเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ และจะมีค่า CS สูงขึ้นซึ่งอยู่ในช่วง 0.30 – 0.40 ซึ่งเป็นช่วงที่ดวงตามนุษย์ได้รับการกระตุ้นสูงสุดและมีการตื่นตัวมากที่สุด ส่วนในช่วงเย็นค่า CS จะลดลงอยู่ในช่วง 0.35 – 0.20 เพื่อลดการกระตุ้นการตื่นตัวของร่างกายจากการทดสอบประสิทธิภาพของ SLS พบว่า โดยส่วนใหญ่ตัวอย่างแสงทั้งสำหรับการเลียนแบบแสงในรอบวันของแสงในฤดูร้อนและฤดูหนาวได้กำหนดค่าเข้มของแสงจาก CS เป้าหมาย (CS_T) โดยในช่วงเช้า ช่วงกลางวัน และช่วงเย็นจะกำหนดอยู่ในช่วง 150 – 215, 220 – 340 และ 140 – 240 ลักซ์ ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดสอบประสิทธิภาพการให้แสงของ SLS พบว่า ค่าความเข้มของแสงในช่วงเช้า ช่วงกลางวัน และช่วงเย็น สามารถทำได้อยู่ในช่วง 0.21 – 0.27, 0.32 – 0.37 และ 0.21 – 0.24 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความผิดพลาด (IdCSI) อยู่ในช่วง 0.01 – 0.03 ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความเข้มของแสงในช่วงเช้า ช่วงกลางวัน และช่วงเย็นอยู่ในช่วง 157-180, 316-339 และ 130 – 235 ลักซ์ สำหรับฤดูร้อน และ 141 – 205, 200 – 320 และ 161 – 257 ลักซ์ สำหรับฤดูหนาว ตามลำดับ สำหรับระดับความเข้มของแสงของตัวอย่างแสง B ซึ่งเป็นแสงในช่วงค่ำ (18:00 น. – 22:00 น.) มีค่าความสว่างที่ 200 ลักซ์ และมีค่า CS เท่ากับ 0.20 และตัวอย่างแสง C ซึ่งเป็นแสงในช่วงค่ำ (22:00 น. – 06:00 น.) มีค่าความสว่างที่ 3 – 5 ลักซ์ และมีค่า CS น้อยกว่า 0.10 ส่วนตัวอย่างแสงจ้า E(D65) มีค่าความสว่างสูงสุดที่ 1,250 ลักซ์ และมีค่า CS เท่ากับ 0.60 โดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความสว่างของ CLS พบว่า ตัวอย่างแสง F(CW) และ G(CC) มีค่าความสว่างที่ 125 และ 122 ลักซ์

และมีค่า CS เท่ากับ 0.20 และ 0.20 ตามลำดับ โดยภาพรวมพบว่า SLS มีค่าความผิดพลาดในการให้ความเข้มของแสงที่กำหนดเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 4.75 และมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการให้ค่า CS เท่ากับ 0.0138

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ที่แสดงถึงสมบัติของตัวอย่างแสงจากโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะและโคมไฟทางการค้า

Spectra	CCT _T	CCT _m	IdCCTI	%dCCT	CS _T	CS _A	IdCSI	Lux _T	Lux _A	IdLuxI
A1	5,441	5,704	263	4.61	0.20	0.21	0.01	150	157	7
A2	5,226	5,214	12	0.23	0.25	0.23	0.02	180	180	0
A3	5,327	5,410	83	1.53	0.30	0.27	0.03	215	213	2
A4	5,500	5,831	331	5.68	0.30	0.27	0.03	220	220	0
A5	5,560	5,929	369	6.22	0.30	0.32	0.02	300	302	2
A6	5,790	6,289	499	7.93	0.30	0.29	0.01	340	339	1
A7	5,896	6,349	453	7.13	0.35	0.35	0.00	345	337	8
A8	5,842	6,329	487	7.69	0.40	0.37	0.03	330	324	6
A9	5,646	6,195	549	8.86	0.35	0.37	0.02	325	316	9
A10	5,570	6,161	591	9.59	0.35	0.35	0.00	230	228	2
A11	5,174	5,166	8	0.15	0.25	0.24	0.01	240	235	5
A12	5,381	5,744	363	6.32	0.25	0.25	0.00	150	147	3
A13	5,454	5,790	336	5.80	0.20	0.21	0.01	140	130	10
B	4,100	3,982	118	2.96	0.20	0.22	0.02	200	200	0
C	4,100	3,902	N/A	N/A	<0.1	<0.1	0.00	1	3	2
D1	5,314	5,515	201	3.64	0.20	0.20	0.00	150	141	9
D2	5,313	4,989	324	6.49	0.25	0.28	0.03	180	161	21
D3	5,341	5,735	394	6.87	0.30	0.30	0.00	200	205	5
D4	5,354	5,227	127	2.43	0.30	0.28	0.02	220	200	20
D5	5,630	5,704	74	1.30	0.30	0.32	0.02	300	289	11
D6	6,202	6,474	272	4.20	0.30	0.28	0.02	310	306	4
D7	7,006	6,560	446	6.80	0.35	0.34	0.01	315	304	11
D8	6,568	6,546	22	0.34	0.40	0.37	0.03	320	320	0
D9	5,974	6,364	390	6.13	0.35	0.34	0.01	320	318	2
D10	5,547	6,007	460	7.66	0.35	0.34	0.01	300	305	5
D11	5,374	5,906	532	9.01	0.25	0.27	0.02	250	257	7
D12	5,307	5,185	122	2.35	0.25	0.23	0.02	180	180	0
D13	5,282	5,170	112	2.17	0.20	0.20	0.00	160	161	1
E(D65)*	5,000	5,368	368	7.40	0.7	0.7	0.00	1,250	1,250	0
F CW	N/A	3,025	N/A	N/A	N/A	0.2	N/A	N/A	125	N/A
G WW	N/A	3,490	N/A	N/A	N/A	0.2	N/A	N/A	122	N/A
Red*	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	<0.1	N/A	N/A	48*	N/A
Green*	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.35	N/A	N/A	200*	N/A
Blue*	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.37	N/A	N/A	12*	N/A

Remark: * These values were recorded under 0.6 m to objective observations.

สำหรับคุณสมบัติด้านโฟโตเมตริกอื่น ๆ SLS และ CLS มีดังนี้

SLS มีค่า CRI ของตัวอย่างแสงเลียนแบบฤดูร้อน (A1 – A13) และฤดูหนาว (B1 – B13) อยู่ในช่วง 46 – 83 และ 47 – 91 ตามลำดับ โดยตัวอย่างแสง B, C และ F มีค่า CRI เท่ากับ 42, 77 และ 79 ตามลำดับ ทั้งนี้ ค่า CRI ของ CLS มีค่าอยู่ในช่วง 77 – 79 เช่นกัน สำหรับค่า LER ของ SLS มีค่าในช่วง 270 – 342 และมีค่า LE อยู่ในช่วง 161 – 378 ขณะที่ CLS มีค่า LER อยู่ในช่วง 358 – 361 และมีค่า LE 149 – 150 และพบว่ามีค่า CER และ CAF ของ SLS มีค่าในช่วง 161-378 และ 0.96 – 1.37 ตามลำดับ ขณะที่ค่า CER และ CAF ของ CLS มีค่าในช่วง 171 – 208 และ 0.56 – 0.84 ตามลำดับ

นอกจากนี้ พบว่าค่า Duv ซึ่งบ่งชี้ถึงระยะห่างจากเส้นพลาจเคียนโลกัสของ SLS ของตัวอย่างแสงเลียนแบบแสงในรอบวันของฤดูร้อน (A1 – A13) อยู่ในช่วง 0.0021 – 0.0332 ทั้งนี้มีเพียงตัวอย่าง A1 เท่านั้นที่มีค่า Duv เท่ากับ -0.0039 ซึ่งพิกัดของแสงอยู่ต่ำกว่าเส้นพลาจเคียนโลกัส ขณะที่ค่า Duv ของตัวอย่างแสง SLS สำหรับการเลียนแบบแสงในรอบวันของฤดูหนาว (D1 – D13) มีค่าอยู่ในช่วง 0.0149 – 0.0389 ซึ่งค่าพิกัด x และ y ของตัวอย่างแสงในฤดูหนาวทั้งหมดอยู่เหนือเส้นพลาจเคียนโลกัส ขณะที่ตัวอย่าง B และ C ซึ่งมีค่า CCT เท่ากันแต่ปริมาณความเข้มของแสงแตกต่างกันมากโดย ตัวอย่าง B กำหนดให้มีความเข้มของแสงที่ 200 ลักซ์ ซึ่งมีค่า Duv เท่ากับ 0.0352 ขณะที่ ตัวอย่าง C กำหนดให้มีความเข้มของแสงที่ 3 ลักซ์ ซึ่งมีค่า Duv เท่ากับ 0.0134 ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณแสงสว่างที่น้อยมากทำให้ค่าพิกัดแสงปรากฏในตำแหน่งออกห่างจากแสงขาวมากยิ่งขึ้น และตัวอย่างแสง E(D65) มีค่า Duv เท่ากับ 0.0237 ขณะที่แสงจาก CLS มีค่า Duv เท่ากับ 0.0134 และ 0.0237 สำหรับตัวอย่าง FCC และ GWW ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์อัตราส่วน S/P พบว่า ตัวอย่างแสงในการเลียนแบบแสงในรอบวันของฤดูร้อน (A1 – A13) อยู่ในช่วง 2.38 – 2.89 ซึ่งในขณะที่ตัวอย่างแสง SLS การเลียนแบบแสงในรอบวันของฤดูหนาว (D1 – D13) มีค่าอยู่ในช่วง 2.13 – 2.80 ขณะที่ตัวอย่าง B และ C ซึ่งมีค่า S/P เท่ากับ 2.17 และ 1.28 ตามลำดับ และตัวอย่างแสง E(D65) มีค่าอัตราส่วน S/P เท่ากับ 2.07 ขณะที่แสงจาก CLS ตัวอย่าง FCC และ GWW มีค่าอัตราส่วน S/P เท่ากับ 1.24 และ 1.45 ตามลำดับ

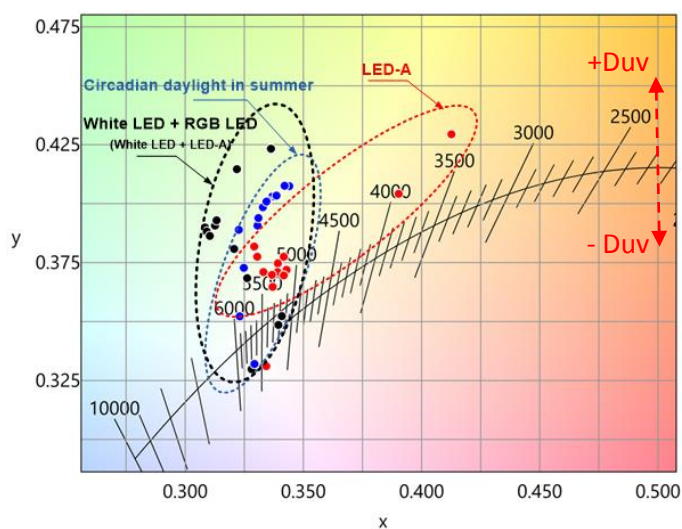
พบว่าตัวอย่างแสงจาก SLS มีค่า EML (ที่ 100 ลักซ์) ของตัวอย่างแสงเลียนแบบแสงในรอบวันสำหรับฤดูร้อน (A1 – A13) และฤดูหนาว (D1 – D13) อยู่ในช่วงระหว่าง 96.80 – 137.40 และ 82.50 – 130.40 ตามลำดับ โดยจะสังเกตเห็นว่าตัวอย่างในช่วงเช้า (A1 และ D1) มีค่า EML สูงมากกว่าตัวอย่างแสงอื่น ๆ เนื่องจากเป็นช่วงที่มีสัดส่วนของแสงสีน้ำเงินสูง ซึ่งสัมพันธ์กับการกระตุ้นการตื่นตัวของมนุษย์

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ที่แสดงถึงสมบัติของตัวอย่างแสงจากโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะและโคมไฟทางการค้า

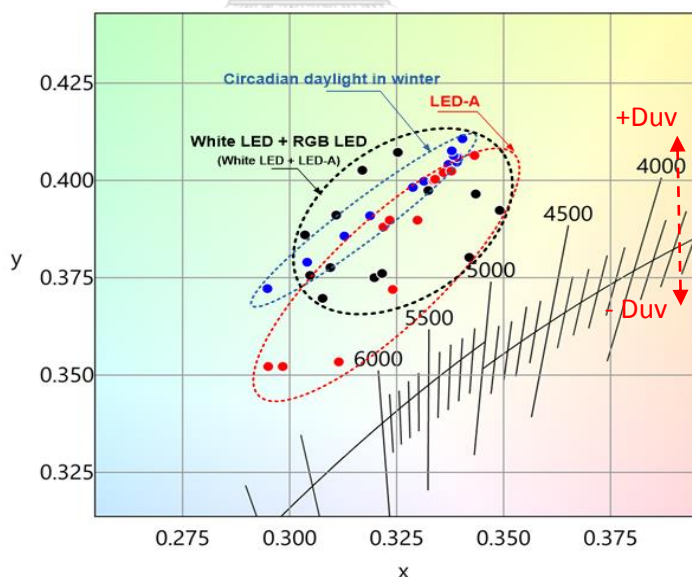
Spectra	CRI (Ra)	LER	LE	CER	CAF	Duv	S/P ratio	EML @ 100 lx
A1	52	280	280	362	1.29	-0.0039	2.89	137.40
A2	38	271	271	371	1.37	0.0008	3.03	130.10
A3	75	330	330	318	0.96	0.0352	2.40	97.30
A4	83	337	337	322	0.96	0.0374	2.38	96.80
A5	79	318	318	359	1.13	0.0240	2.66	113.80
A6	82	320	320	371	1.16	0.0308	2.75	117.30
A7	83	321	321	374	1.16	0.0332	2.76	117.80
A8	83	321	321	372	1.16	0.0321	2.76	117.50
A9	82	322	322	371	1.15	0.0317	2.73	116.30
A10	82	323	323	369	1.14	0.0322	2.72	115.60
A11	55	292	292	354	1.21	0.0021	2.76	122.30
A12	46	270	270	335	1.24	0.0161	2.84	124.00
A13	66	304	304	374	1.23	0.0184	2.84	124.00
B	77	368	367	261	0.85	0.0352	2.17	83.60
C	42	307	308	161	0.44	0.0134	1.28	45.10
D1	67	309	309	326	1.06	0.0262	2.54	130.40
D2	68	317	317	347	1.09	0.0176	2.58	110.30
D3	57	292	292	340	1.16	0.0331	2.76	116.60
D4	83	352	352	286	0.81	0.0389	2.13	82.50
D5	82	340	322	362	0.92	0.0339	2.69	106.50
D6	72	342	342	297	0.87	0.0249	2.16	89.10
D7	89	322	322	338	1.05	0.0288	2.51	106.50
D8	84	319	319	378	1.19	0.0337	2.80	119.80
D9	91	320	320	344	1.08	0.0275	2.57	109.30
D10	88	339	339	314	0.93	0.0346	2.31	94.10
D11	78	316	316	357	1.13	0.0215	2.66	114.00
D12	65	310	310	354	1.14	0.0149	2.66	115.00
D13	47	283	283	321	1.14	0.0215	2.67	113.30
E(D65)	79	297	297	251	0.47	0.0237	2.07	85.10
FCW	77	361	150	171	0.56	0.0134	1.24	40.10
GWW	79	358	149	208	0.84	0.0237	1.45	45.20
Red	12	363	363	23	0.06	-0.0025	0.26	6.80
Green	-11	263	263	668	2.54	0.1474	5.47	257.90
Blue	N/A	42.3	42	387	9.14	-0.2	15.61	917.10

ภาพที่ 4.18 แสดงพิกัด x และ y ของแสงที่ได้จากการส่องสว่างของโคมแสงประดิษฐ์อัจฉริยะบนพิกัดแผนภาพสี โดยหากพิจารณาจากค่า CCT และ Duv แล้วจะเห็นได้ว่าการใช้หลอด White LED ร่วมกับ RGB-LED (LED-A) มีผลช่วยให้เกิดการผสมแสงสีที่ใกล้เคียงกับแสงในรอบวัน (circadian light) ได้มากขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งในกรณีการเลียนแบบแสงในรอบวันของฤดูร้อน (ภาพที่ 4.18 A) และฤดูหนาว (ภาพที่ 4.18 B) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้

(A)



(B)



ภาพที่ 4.51 ไดอะแกรมพิกัดบนแผนภาพสี (พิกัด x และ y) เมื่อเปรียบเทียบกับแสงที่ได้จากโคมไฟแสงประดิษฐ์ LED-A (●) และ White LED + RGB LED (●) ของแสงในรอบวัน (●) ในฤดูร้อน (A) และฤดูหนาว (B)

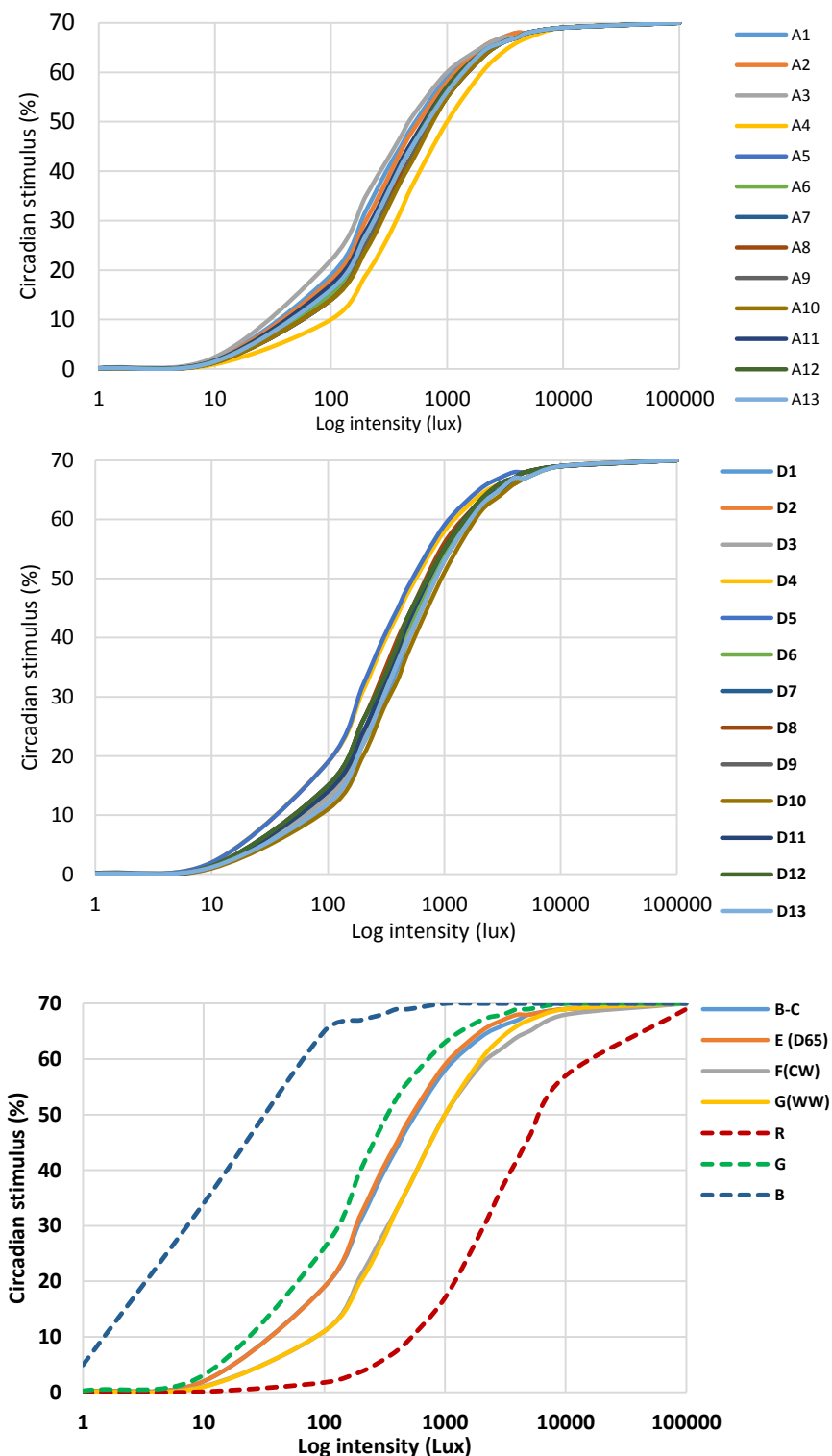
ภาพที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสว่าง (ลักซ์) กับระดับการกระตุ้นการตื่นตัว หรือการกดเมลาโทนินในเทอมของ CS (%) ของตัวอย่างแสงแต่ละสเปกตรัม โดยพบว่าการให้แสงของโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะทั้งในการเลียนแบบแสงในรอบวันของฤดูร้อนและฤดูหนาวมีรูปแบบการเพิ่มขึ้นของค่า CS ในลักษณะเดียวกัน โดยจะเห็นได้ว่าแสงสำหรับการเลียนแบบแสงในรอบวันมีค่า CS มากกว่า ร้อยละ 10 ในช่วง 30 – 100 ลักซ์ และเมื่อความสว่างมากขึ้นในช่วง 100 – 200 ลักซ์ จะพบว่าค่า CS จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยสามารถเพิ่มได้ถึง ร้อยละ 20 – 35 และเมื่อความสว่างเพิ่มถึง 1,000 ลักซ์ จะเห็นว่าค่า CS จะเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า ร้อยละ 50 แต่ทั้งนี้ก็มีข้อสังเกตเพิ่มเติมได้ว่าเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและค่า CS ของตัวอย่างแสงสำหรับการเลียนแบบแสงในฤดูร้อนมีช่วงที่กว้างกว่า ซึ่งลักษณะที่พบในการเลียนแบบแสงรอบวันในฤดูหนาวทั้งนี้อาจเนื่องจากการจำลองหรือเลียนแบบแสงในฤดูร้อนมีทิศทางในการเปลี่ยนแปลงของแสงสีทั้งในแนวตั้ง (Duv) และแนวนอน (CCT) ในขณะที่การเลียนแบบแสงในฤดูหนาวมีการเปลี่ยนแปลงของแสงสีตามพิกัด x และ y ในแนวนอน (CCT) ซึ่งในการกำหนดแสงสีในงานวิจัยนี้ได้อาศัยหลักการแปลงค่าจากพิกัด x และ y เป็นค่ารหัส RGB สำหรับป้อนคำสั่งให้ระบบควบคุมการให้แสงของหลอดซึ่งการทำงานของ RGB-LED จะมีความสามารถเปลี่ยนแปลงการผสมแสงสีได้ดี ซึ่งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า CCT ที่หลากหลาย แต่ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของค่า Duv นั้นอาจจำเป็นต้องคำนึงถึงมิติความมืดและความสว่างมากขึ้นด้วย กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงของค่าอิทธิพลในช่วงใกล้เคียงกับเส้นพลาจเคียนมีส่วนได้รับผลจากระดับความสว่างด้วย ในที่นี้หลอด RGB-LED มีข้อจำกัดด้านความสว่างมากกว่า ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงได้เพิ่ม White-LED เข้ามาเพื่อช่วยทำให้หลอดมีความแม่นยำมากขึ้น ด้วยเหตุนี้อาจเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ค่า CS ที่ตอบสนองต่อความสว่างของแสงในตัวอย่างการเลียนแบบแสงในฤดูร้อนมีช่วงที่กว้างกว่าแสงที่เกิดจากการเลียนแบบแสงในรอบวันของฤดูหนาว สำหรับตัวอย่างแสงจำ E(D65) และแสงที่เลียนแบบแสงพระจันทร์ (D) พบว่า มีลักษณะการตอบสนองเช่นเดียวกันกับแสงสีที่ได้จากการเลียนแบบแสงในรอบวัน แต่ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโคมไฟทางการค้าแล้วจะเห็นว่าลักษณะการตอบสนองของค่า CS ต่อความสว่างของหลอดมีลักษณะที่แตกต่างจากโคมแสงประดิษฐ์โดยโคมไฟทางการค้าจะต้องใช้ความสว่างที่มากกว่าถึง 2 – 3 เท่าที่จะทำให้ได้ค่า CS เท่ากัน หมายความว่า โคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะสามารถใช้กระตุ้นการตื่นตัวของมนุษย์โดยใช้แสงสีที่มีความสว่างต่ำกว่าโคมไฟทางการค้า

จากภาพที่ 4.19 (C) จะเห็นถึงการตอบสนองต่อค่า CS ของสเปกตรัมของแสงสีแดง (R) สีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) โดยจะพบว่า แสงสีน้ำเงินในระดับต่ำกว่า 10 ลักซ์ ก็สามารถทำให้เกิดค่า CS ได้มากกว่า ร้อยละ 10 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้หลายงานวิจัย ในขณะที่แสงสีแดงต้องใช้ถึง 700 – 800 ลักซ์ ถึงจะทำให้เกิดการกระตุ้นได้ที่ ร้อยละ 10 ซึ่งข้อมูลสอดคล้องกับการวิเคราะห์

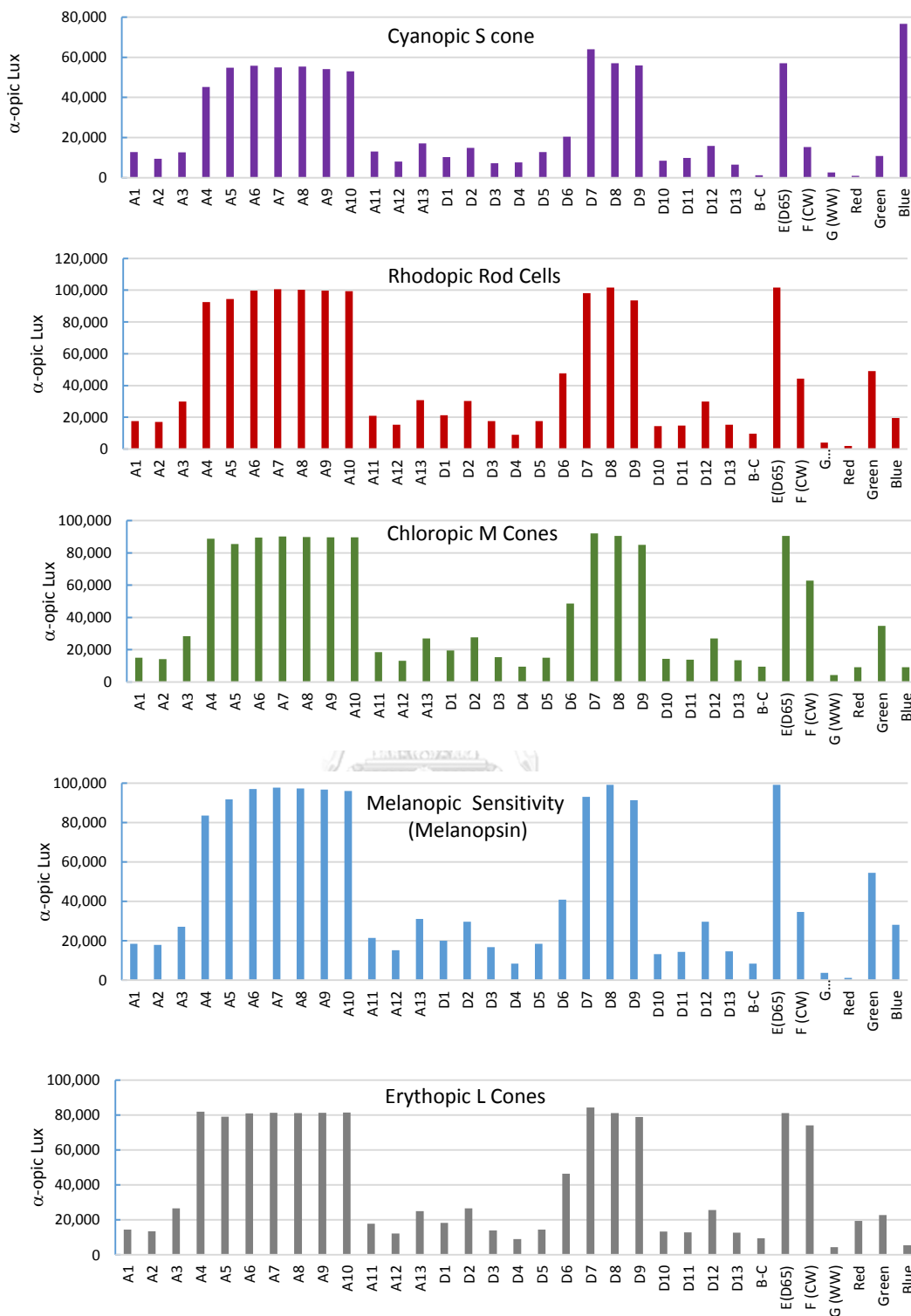
ผลการตอบสนองเซลล์ตัวรับในดวงตามนุษย์ดังภาพที่ 4.20 ได้แก่ Cyanopic S-cone, Melanopic Sensitivity, Rhodopic Rod Cells, Chloropic M Cones และ Erythopic L Cones

Choi *et al.* (2022) ได้เสนอแนวทางในการออกแบบระบบควบคุมแสงสว่างอัจฉริยะ โดยใช้ระบบ Cloud-based smart lighting system ในการประมวลผลข้อมูลของบุคคล เพื่อจำแนก ระดับความเหนื่อยล้าของมนุษย์ในแต่ละวัน และนำผลประมวลที่ได้ควบคุมให้หลอดผลิตแสงสีที่มีค่า CCT ที่เหมาะสมกับระดับความเหนื่อยล้า โดยได้ทดลองใช้ในคนในสองกลุ่ม ได้แก่ กลุ่มวัยรุ่นและวัยทำงาน โดยกำหนดให้แสงที่ 3,000 – 6,000 เคลวิน ที่ความสว่างในช่วง 150 – 700 ลักซ์ ขึ้นอยู่กับ ช่วงวัยและระดับคะแนนความเหนื่อยล้าของผู้ใช้ ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นตัวอย่างงานวิจัยที่พัฒนาด้าน human centric lighting โดยเป็นการเลือกใช้แสงสีที่เหมาะสมกับมนุษย์ [136]

Shishegar *et al.* (2021) ได้เปรียบเทียบผลการใช้ระบบส่องสว่างอัจฉริยะโดยใช้แสงสี ที่ 2,700 เคลวิน กับการใช้แสงสีที่มีอุณหภูมิสีสัมพันธ์ที่หลากหลายในช่วง 2,700 – 6,500 เคลวิน ความสว่างที่ดวงตา 100 – 500 ลักซ์ ตามเวลาที่กำหนดทั้งวันเป็นเวลา 41 วัน โดยใช้ผู้เข้าร่วม การวิจัย จำนวน 21 คน อายุเฉลี่ย 78.81 พบว่า ผลของการผลิตแสงสีทั้งสองแบบมีผลเพิ่มระยะเวลา ในการนอนของผู้เข้าร่วมการวิจัย แต่พบว่าการให้แสงสีที่มีค่า CCT ที่หลากหลายมีผลกระตุ้นการนอน หลับในผู้สูงอายุได้มากกว่า ซึ่งจากผลการทดลองทำให้เห็นว่า CCT มีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพการ นอนของผู้สูงอายุได้ ทั้งนี้เนื่องจาก CCT มีความเกี่ยวข้องกับสัดส่วนของแสงสีน้ำเงิน ซึ่งเป็นแสงสีที่ กระตุ้นให้เกิดการตื่นตัวและแสงสีที่มีความเป็นสีเหลืองซึ่งจะมีสัดส่วนที่มากกว่าในช่วงค่ำทำให้มี ความรู้สึกที่ดีต่อการพักผ่อน ด้วยเหตุนี้การได้รับแสงสีในรอบวัน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งในการทำให้ นอนหลับจึงมีความจำเป็นต่อการปรับสมดุลของร่างกายมนุษย์ โดยเฉพาะวัฏจักรการนอนหลับและ การตื่นนอน [116]



ภาพที่ 4.52 ค่าการตอบสนองต่อการกระตุ้นของแสงในรอบวัน (CS) ตามระดับความสว่างของแสงที่ได้จากการทำงานของคอมพิวเตอร์แสงประดิษฐ์อัจฉริยะในการเลียนแบบแสงในรอบวันของฤดูร้อน (A1 – A13) ฤดูหนาว (D1 – D13) แสงในตอนค่ำและแสงจันทร์ (B) แสงจ้า (C) โดยเปรียบเทียบกับคอมพิวเตอร์ทางการค้า (F – G) และแสงสีแดง (R) เขียว (G) และน้ำเงิน (B)



ภาพที่ 4.53 ค่าการตอบสนองของแสงตัวอย่างจากโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะและโคมไฟทางการค้าที่มีต่อ Cyanopic S-cone, Melanopic Sensitivity, Rhodopic Rod Cells, Chloropic M Cones และ Erythropic L Cones

(4.4.2) การทดสอบความพึงพอใจในการนำไปใช้ของระบบส่องแสงสว่างอัจฉริยะ

จากการคัดเลือกผู้เข้าร่วมการวิจัยตามเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้จำนวน 32 คน โดยผู้เข้าร่วมการวิจัยส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง (ร้อยละ 59.4) มีอายุอยู่ในช่วง 35 – 40 ปี (ร้อยละ 40.6) รองลงมาคือ ช่วงอายุ 41 – 50 ปี (ร้อยละ 31.3) และเป็นผู้ที่มีอายุระหว่าง 50 – 60 ปี (ร้อยละ 28.1) โดยส่วนใหญ่ไม่มีโรคประจำตัว (ร้อยละ 78.1) ทั้งนี้มีผู้ที่เป็นโรคความดันโลหิตสูง โรคอ้วน และโรคเบาหวาน (ชนิดที่ 1) ร้อยละ 12.5 ร้อยละ 6.3 และร้อยละ 3.1 ตามลำดับ ทั้งนี้ทุกคนไม่มีภาวะความเครียดในรอบ 1 เดือน สำหรับระยะเวลาในการนอนหลับส่วนใหญ่ใช้เวลาในการนอน 7 ชั่วโมงต่อวัน (ร้อยละ 43.8) มีการใช้สายตาสำหรับการใช้งานคอมพิวเตอร์หรือโน้ตบุค 5 – 6 ชั่วโมงต่อวัน (ร้อยละ 43.8) และมีพฤติกรรมการใช้งานโทรศัพท์มือถือ (smartphone) 5 – 6 ชั่วโมงต่อวัน (ร้อยละ 56.3) และส่วนใหญ่ใช้เวลาในการดูโทรทัศน์น้อยกว่า 2 ชั่วโมงต่อวัน สำหรับคุณภาพของสายตาพบว่าร้อยละ 50 เป็นผู้มีสายตาปกติ และไม่จำเป็นต้องสวมแว่นสายตา ร้อยละ 84.3 ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับผู้เข้าร่วมการวิจัย (n = 32)

คุณสมบัติ	จำนวน	ร้อยละ
อายุ (ค่าเฉลี่ย 45.41±8.44)		
35 – 40 ปี	13	40.6
41 – 50 ปี	10	31.3
50 – 60 ปี	9	28.1
เพศ		
ชาย	13	40.6
หญิง	19	59.4
โรคประจำตัว		
ไม่มีโรคประจำตัว	25	78.1
โรคอ้วน	2	6.3
โรคเบาหวาน (T2DM)	1	3.1
โรคความดันโลหิตสูง	4	12.5
ภาวะความเครียดในรอบ 1 เดือน		
ไม่มีภาวะความเครียด	32	100
ระยะเวลาที่ใช้ในการนอนหลับ		
น้อยกว่า 6 ชั่วโมงต่อวัน	2	6.3
6 ชั่วโมงต่อวัน	9	28.1
7 ชั่วโมงต่อวัน	14	43.8
8 ชั่วโมงต่อวัน	7	21.9

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับผู้เข้าร่วมการวิจัย (n = 32) (ต่อ)

คุณสมบัติ	จำนวน (คน)	ร้อยละ
ระยะเวลาที่ใช้งานคอมพิวเตอร์ หรือ โน้ตบุ๊ก		
น้อยกว่า 2 ชั่วโมงต่อวัน	5	15.6
2 – 4 ชั่วโมงต่อวัน	13	40.6
5 – 6 ชั่วโมงต่อวัน	14	43.8
ระยะเวลาที่ใช้งานโทรศัพท์มือถือ (smartphone)		
น้อยกว่า 2 ชั่วโมงต่อวัน	5	15.6
2 – 4 ชั่วโมงต่อวัน	9	28.1
5 – 6 ชั่วโมงต่อวัน	18	56.3
ระยะเวลาที่ใช้ในการดูโทรทัศน์		
น้อยกว่า 2 ชั่วโมงต่อวัน	25	78.1
2 – 4 ชั่วโมงต่อวัน	7	21.9
คุณภาพทางสายตา		
มีสายตาปกติ	16	50.0
สายตาสั้น	7	21.9
สายตาวาว	9	28.1
การสวมแว่นตา		
ไม่จำเป็น	27	84.3
จำเป็นต้องใส่ตลอดเวลา	5	28.1

หลังจากที่ผู้เข้าร่วมการวิจัยได้รับทราบแนวทางการเข้าร่วมการวิจัย และลงนามยินยอมเข้าร่วมการวิจัยแล้ว ผู้เข้าร่วมการวิจัยจะต้องเข้าร่วมกิจกรรมการอบรมเกี่ยวกับการใช้คอมพิวเตอร์ และการสาธิตการติดตั้งและใช้งานคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและคอมพิวเตอร์ทางการค้า โดยผู้เข้าร่วมการวิจัยดำเนินการฝึกปฏิบัติด้วยตนเอง ดังแสดงในภาพที่ 4.10 เมื่อผู้เข้าร่วมวิจัยได้ผ่านการทดสอบแล้ว จึงจะเข้าสู่กิจกรรมการอบรมเกี่ยวกับแผนและแบบการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสง และการฝึกปฏิบัติการด้วยตัวผู้เข้าร่วมการวิจัยเองเพื่อซักซ้อมความเข้าใจแนวทางการปฏิบัติในการประเมินประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและคอมพิวเตอร์ทางการค้า ดังแสดงในภาพที่ 4.21 และข้อมูลเกี่ยวกับการเข้าร่วมการทดสอบได้แสดงไว้ในคู่มือแนวปฏิบัติในการประเมินและการบันทึกผลการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสงสำหรับผู้เข้าร่วมการวิจัย (ภาคผนวก ค)



ภาพที่ 4.54 กิจกรรมการอบรมเกี่ยวกับการใช้คอมพิวเตอร์และการสาธิตการติดตั้งและการทำงานของคอมพิวเตอร์แสงประดิษฐ์ โดยผู้เข้าร่วมการวิจัยดำเนินการฝึกปฏิบัติด้วยตนเอง

โดยในการฝึกปฏิบัติเกี่ยวกับแผนและแบบการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสงและการฝึกปฏิบัติการนั้นเพื่อให้ผู้เข้าร่วมการวิจัยมีความเข้าใจในแนวทางและข้อคำถาม และการปฏิบัติตัวระหว่างการทดสอบ ซึ่งจะทำให้ผู้เข้าร่วมการวิจัยมีความมั่นใจในการให้คะแนนลงในแบบประเมินและช่วยลดความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นขณะที่ผู้เข้าร่วมการวิจัยทำการประเมินโดยตนเอง ณ ที่พักของตนเอง ซึ่งกระบวนการในการฝึกปฏิบัติได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค และตัวอย่างลักษณะกิจกรรมที่ผู้เข้าร่วมการวิจัยสามารถกระทำได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.22



อิริยาบถการนอน

การนั่ง



การอ่านข้อความในหนังสือ

การอ่านข้อความบนจอโน้ตบุค

ภาพที่ 4.55 กิจกรรมการอบรมเกี่ยวกับแผนและแบบการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสง และการฝึกปฏิบัติการด้วยตัวผู้เข้าร่วมการวิจัยเอง

ภาพที่ 4.23 แสดงถึงกิจกรรมและอิริยาบถต่าง ๆ ที่ผู้เข้าร่วมการวิจัยปฏิบัติตัวขณะทำการทดสอบประสิทธิภาพความพึงพอใจของคอมพิวเตอร์และการรับรู้แสง ณ ที่พักของตนเอง โดยระยะที่ใช้ในการทดสอบได้กำหนดที่ 80 เซนติเมตร จากคอมพิวเตอร์ไปยังจุดของวัตถุในการมองเห็น และระยะที่ผู้เข้าร่วมการวิจัยสามารถทำกิจกรรม หรือขยับร่างกายเพื่อลดความเครียดขณะทำการทดสอบคือ ภายใต้จุดศูนย์กลางของลำแสงที่ระยะ 1 เมตร



การนอนเอนหลัง

การนอนเล่นมือถือ



การอ่านหนังสือบนเตียงนอน

การนอนเล่น



การอ่านข้อความในหนังสือ

การอ่านข้อความบนจอโน้ตบุค

ภาพที่ 4.56 การบันทึกผลการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของโคมไฟแสงประดิษฐ์

จากผลการประเมินความพึงพอใจของผู้เข้าร่วมการวิจัยที่มีต่อประสิทธิภาพของแสงที่ใช้ในการสร้างระบบส่องสว่างอัจฉริยะโดยเมื่อเทียบกับแสงทางการค้า พบว่า

ตัวอย่างแสงที่ได้จากโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะมีระดับคะแนนความพึงพอใจดังต่อไปนี้

ด้านการให้ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลาย อยู่ในระหว่าง 4.12 – 4.81 คะแนน โดยตัวอย่างแสง D5 มีคะแนนสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 4.87 ± 0.33 คะแนน และตัวอย่างแสง B ซึ่งเป็นแสงประดิษฐ์สำหรับการใช้ชีวิตในช่วง 19:00 น.– 22:00 น. ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.17 ± 0.45 คะแนน แต่ทั้งนี้พบว่าระดับความพึงพอใจด้านการให้ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของโคมไฟแสงประดิษฐ์ในทุกตัวอย่างมีค่าสูงกว่าระดับความพึงพอใจในด้านดังกล่าวของตัวอย่างแสงวอร์มไวท์ (FWW warm white) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.40 ± 0.49 คะแนน ซึ่งเป็นค่าต่ำสุด ขณะที่ตัวอย่างแสงจ้า (E) มีระดับคะแนนอยู่ที่ 4.62 ± 0.55 และตัวอย่างแสงคูโลไวท์ (GCW) มีระดับคะแนนอยู่ที่ 4.21 ± 0.42 คะแนน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแสงที่ได้จากโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะมีคุณภาพด้านการให้ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายที่ดีกว่าโคมไฟทางการค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ดังแสดงในภาพที่ 4.24 และตารางที่ 4.8

ด้านการกระจายตัวของแสงที่เหมาะสม อยู่ในระหว่าง 1.12 – 4.87 คะแนน โดยตัวอย่างแสง A6 และ D4 มีคะแนนสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 4.87 ± 0.33 คะแนน และตัวอย่างแสง C ซึ่งเป็นแสงประดิษฐ์สำหรับตัวแทนของแสงพระจันทร์ระหว่างเวลา 22:00 น. – 06:00 น. ด้วยค่าความเข้มแสงระดับ 1 – 3 ลักซ์ ทำให้มีค่าเฉลี่ยของคะแนนความพึงพอใจต่ำสุด เท่ากับ 1.12 ± 0.42 คะแนน แต่ทั้งนี้พบว่าระดับความพึงพอใจด้านการกระจายตัวของแสงที่เหมาะสมของโคมไฟแสงประดิษฐ์ส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าระดับความพึงพอใจในด้านดังกล่าวของตัวอย่างแสงวอร์มไวท์ (FWW warm white) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.46 ± 0.56 คะแนน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ขณะที่ตัวอย่างแสงจ้า (E) มีระดับคะแนนอยู่ที่ 4.85 ± 0.48 คะแนน และตัวอย่างแสงคูโลไวท์ (GCW) มีระดับคะแนนอยู่ที่ 4.15 ± 0.44 คะแนน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแสงที่ได้จากโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะให้ความรู้สึกการกระจายตัวที่เหมาะสมมากกว่าโคมไฟทางการค้า ดังแสดงในภาพที่ 4.24 และตารางที่ 4.8

ด้านความสว่างของแสงที่ระดับพื้นห้อง อยู่ในระหว่าง 1.43 – 4.84 คะแนน โดยตัวอย่างแสง A6 มีคะแนนสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 4.84 ± 0.44 คะแนน และตัวอย่างแสง C มีค่าเฉลี่ยความสว่างของแสงที่ระดับพื้นห้องต่ำสุด โดยมีค่าเท่ากับ 1.43 ± 0.61 คะแนน แต่ทั้งนี้พบว่าระดับความสว่างของแสงที่ระดับพื้นห้องของตัวอย่างแสงวอร์มไวท์ (FWW warm white) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.62 ± 0.79 คะแนน ซึ่งเป็นค่าต่ำสุด และตัวอย่างแสงคูโลไวท์ (GCW) มีระดับคะแนนอยู่ที่ 4.25 ± 0.67 คะแนน ขณะที่ตัวอย่างแสงจ้า E(D65) มีระดับคะแนนอยู่ที่ 4.87 ± 0.33 คะแนน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแสงที่ได้จากโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะโดยส่วนใหญ่มีคุณภาพด้านการกระจายของแสงที่ระดับพื้นห้องสูงกว่าโคมไฟทางการค้า อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) แต่ทั้งนี้ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการกระจายของแสงคือระดับความสว่างหรือค่าความเข้มของแสงเป็นหลัก ดังแสดงในภาพที่ 4.24 และตารางที่ 4.8

ด้านการให้ความรู้สึกตื่นตัว พบว่า โคมไฟแสงประดิษฐ์มีคะแนนความพึงพอใจด้านการให้ความรู้สึกตื่นตัวอยู่ในระหว่าง 1.50 – 4.92 คะแนน โดยตัวอย่างแสง E(D65) ซึ่งเป็นแสงในรูปแบบของแสงจ้าของโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะซึ่งมีคะแนนสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 4.92 ± 0.06 คะแนน และตัวอย่างแสง C มีค่าคะแนนเฉลี่ยด้านการให้ความรู้สึกตื่นตัวต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 1.50 ± 0.56 คะแนน อย่างไรก็ตามหากพิจารณาโดยภาพรวมพบว่าโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะโดยส่วนใหญ่ให้แสงที่มีคุณสมบัติทำให้ความรู้สึกตื่นตัวสูงกว่าแสงที่ได้จากโคมไฟทางการค้าโดยพบว่าตัวอย่างแสงวอร์มไวท์ (FWW warm white) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.40 ± 0.49 คะแนน ซึ่งเป็นค่าต่ำสุด และตัวอย่างแสงคูลไวท์ (GCW) มีระดับคะแนนอยู่ที่ 3.87 ± 0.65 คะแนน นอกจากนี้พบว่าตัวอย่างแสงจากโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะในช่วงของการเลียนแบบแสงอาทิตย์ในตอนกลางวันมีแนวโน้มค่าคะแนนการให้ความรู้สึกตื่นตัวสูงกว่าในช่วงเวลาเช้าและช่วงเวลาเย็นทั้ง 2 ฤดู อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ดังแสดงในภาพที่ 4.24 และตารางที่ 4.8

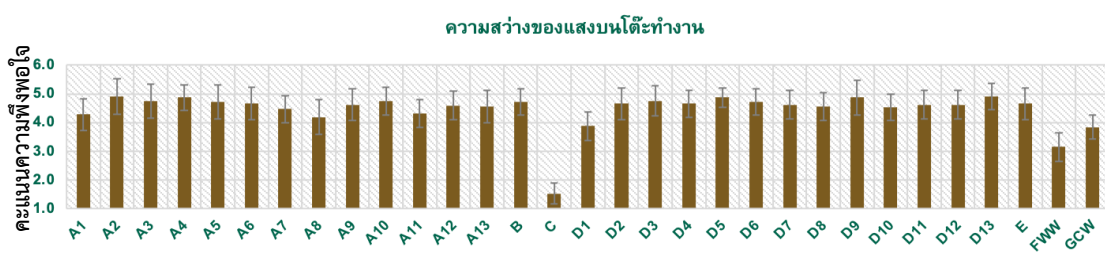
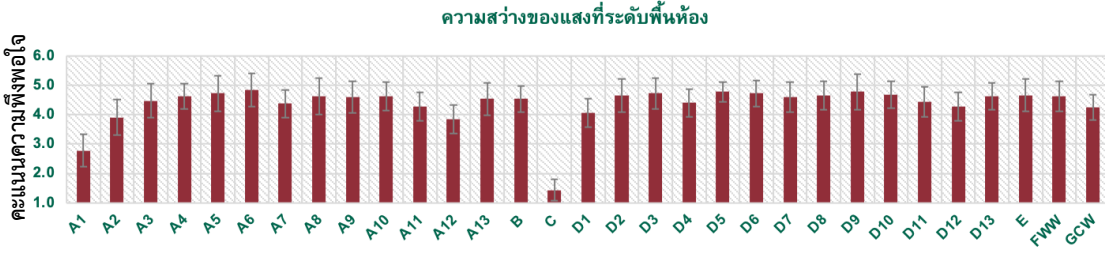
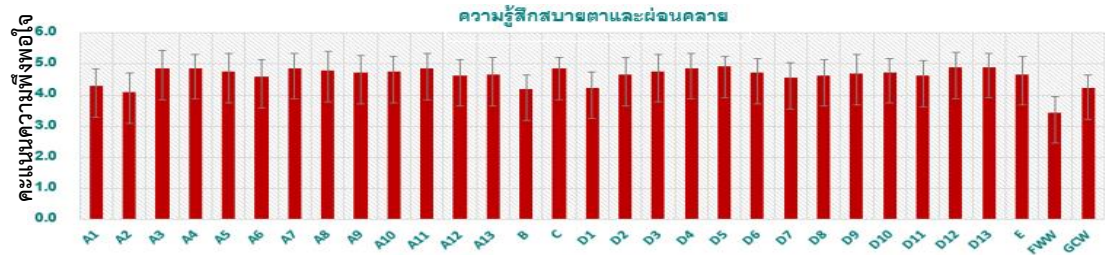
ด้านการให้ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงาน พบว่า โคมไฟแสงประดิษฐ์มีคะแนนความพึงพอใจเฉลี่ยระหว่าง 1.53 – 4.96 คะแนน โดยตัวอย่างแสง E(D65) ซึ่งเป็นแสงในรูปแบบของแสงจ้าของโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะซึ่งมีคะแนนสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 4.96 ± 0.04 คะแนน และตัวอย่างแสง C มีค่าคะแนนเฉลี่ยด้านการให้ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 1.53 ± 0.62 คะแนน อย่างไรก็ตามหากพิจารณาโดยภาพรวมพบว่าโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะโดยส่วนใหญ่ให้แสงที่มีคุณสมบัติในการให้แสงสว่างบนพื้นโต๊ะทำงานสูงกว่าแสงที่ได้จากโคมไฟทางการค้าโดยพบว่า ตัวอย่างแสงวอร์มไวท์ (FWW warm white) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.15 ± 0.36 คะแนน ซึ่งเป็นค่าต่ำสุด และตัวอย่างแสงคูลไวท์ (GCW) มีระดับคะแนนอยู่ที่ 3.84 ± 0.57 คะแนน และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ทั้งนี้ขึ้นกับระดับความสว่างที่กำหนดเป็นหลัก ดังแสดงในภาพที่ 4.24 และตารางที่ 4.8

ด้านการให้ความรู้สึกปกติของแสง พบว่า ค่าเฉลี่ยคะแนนอยู่ในระหว่าง 3.81 – 4.90 คะแนน โดยตัวอย่างแสง D5 และ D7 มีคะแนนสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 4.90 ± 0.29 คะแนน และตัวอย่างแสง A1 มีค่าเฉลี่ยของคะแนนความพึงพอใจด้านการให้ความรู้สึกปกติของแสงต่ำสุดเท่ากับ 3.81 ± 0.47 คะแนน แต่ทั้งนี้พบว่าค่าดังกล่าวของโคมไฟแสงประดิษฐ์ในทุกตัวอย่างมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยที่พบในตัวอย่างแสงวอร์มไวท์ (FWW warm white) ของโคมไฟทางการค้า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.12 ± 0.33 คะแนน ซึ่งเป็นค่าต่ำสุด ขณะที่ตัวอย่างแสงจ้า E(D65) มีระดับคะแนนอยู่ที่ 4.62 ± 0.55 คะแนน และตัวอย่างแสงคูลไวท์ (GCW) มีระดับคะแนนอยู่ที่ 3.90 ± 0.46 คะแนน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แสงที่ได้จากโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะมีคุณภาพด้านการให้ความรู้สึกของแสงปกติที่ดีกว่าโคมไฟทางการค้า อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ดังแสดงในภาพที่ 4.24 และตารางที่ 4.8

ด้านความพึงพอใจขณะอ่านข้อความในหนังสือ อยู่ในระหว่าง 1.25 – 4.90 คะแนน โดยตัวอย่างแสง A6, D6 และ D8 มีคะแนนสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 4.90 ± 0.29 , 4.90 ± 0.29 และ 4.90 ± 0.49 คะแนน ตามลำดับ และตัวอย่างแสง C มีค่าคะแนนเฉลี่ยด้านความพึงพอใจขณะอ่านข้อความในหนังสือต่ำที่สุดเท่ากับ 1.25 ± 0.50 คะแนน แต่ทั้งนี้พบว่า ระดับความพึงพอใจด้านดังกล่าวของโคมไฟแสงประดิษฐ์ในทุกตัวอย่างมีค่าสูงกว่าระดับความพึงพอใจในด้างกล่าวของตัวอย่างแสงวอร์มไวท์ (FWW warm white) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.71 ± 0.58 คะแนน ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดขณะที่ตัวอย่างแสงคูลไวท์ (GCW) มีระดับคะแนนอยู่ที่ 4.59 ± 0.55 คะแนน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แสงที่ได้จากโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะมีคุณภาพด้านความพึงพอใจขณะอ่านข้อความในหนังสือที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้มีปัจจัยทั้งด้านความสว่างและอุณหภูมิสีสัมพันธ์ส่งผลต่อความพึงพอใจในการอ่านข้อความในหนังสือ ดังแสดงในภาพที่ 4.24 และตารางที่ 4.8

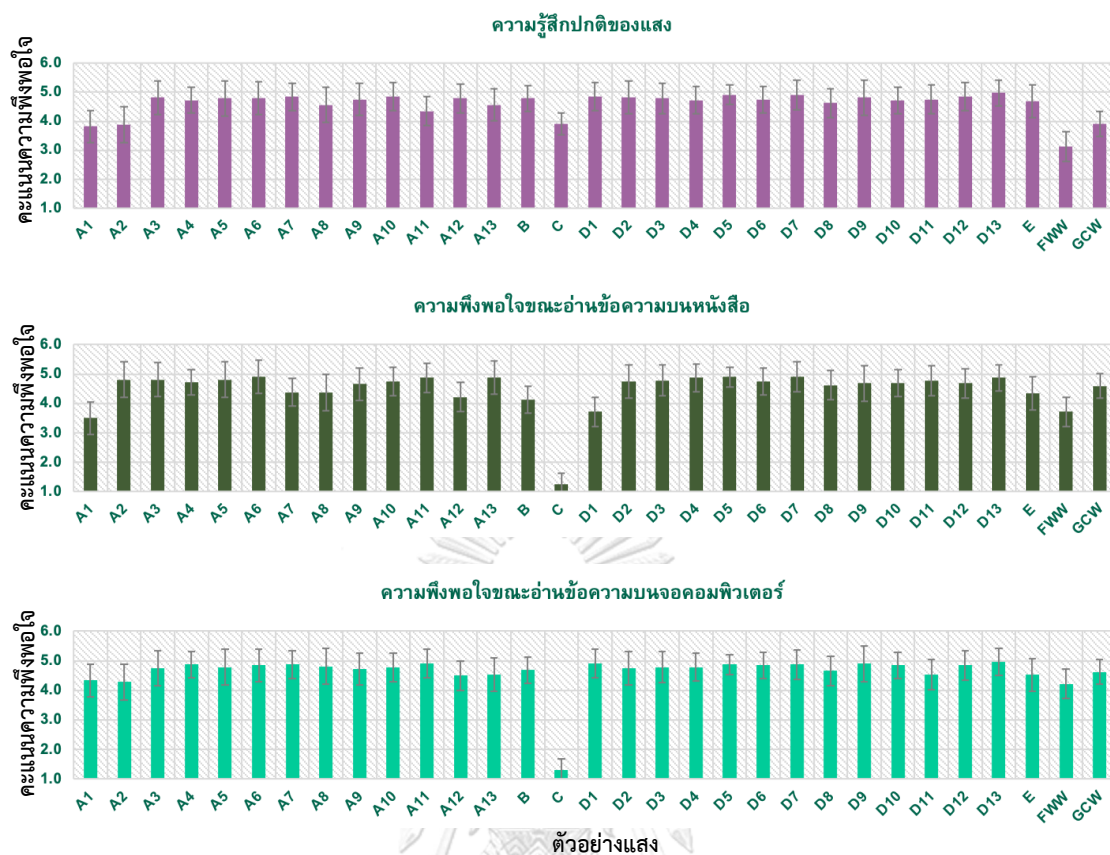
ด้านความพึงพอใจขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์ พบว่า โคมไฟแสงประดิษฐ์มีคะแนนความพึงพอใจเฉลี่ยระหว่าง 1.31 – 4.96 คะแนน โดยตัวอย่างแสง D13 มีค่าคะแนนเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 4.96 ± 0.17 คะแนน และตัวอย่างแสง C มีค่าคะแนนเฉลี่ยด้านดังกล่าวต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 1.31 ± 0.53 คะแนน หากพิจารณาโดยภาพรวมพบว่า โคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะและโคมไฟทางการค้ามีค่าคะแนนความพึงพอใจมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ดังแสดงในภาพที่ 4.24 และตารางที่ 4.8

ด้านคะแนนความพึงพอใจโดยรวม อยู่ในระหว่าง 16.9 – 38.8 คะแนน โดยตัวอย่างแสง D5 มีคะแนนสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 38.83 ± 2.01 คะแนน และตัวอย่างแสง C มีค่าคะแนนความพึงพอใจโดยรวมเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 16.90 ± 1.51 คะแนน แต่ทั้งนี้พบว่าค่าเฉลี่ยคะแนนความพึงพอใจโดยรวมของตัวอย่างแสงวอร์มไวท์ (FWW warm white) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 29.1 ± 2.79 คะแนน และตัวอย่างแสงคูลไวท์ (GCW) มีระดับคะแนนอยู่ที่ 33.4 ± 2.24 คะแนน ขณะที่ตัวอย่างแสงจ้า E(D65) มีระดับคะแนนอยู่ที่ 36.5 ± 3.34 คะแนน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แสงที่ได้จากโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะมีคุณภาพโดยรวมดีกว่าโคมไฟทางการค้า อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ดังแสดงในภาพที่ 4.24 และตารางที่ 4.8



ตัวอย่างแสง

ภาพที่ 4.57 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้เข้าร่วมการวิจัยที่มีต่อประสิทธิภาพของแสงที่ใช้ในการสร้างระบบส่องสว่างอัจฉริยะโดยเมื่อเทียบกับแสงทางการค้า



ภาพที่ 4.24 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้เข้าร่วมการวิจัยที่มีต่อประสิทธิภาพของแสงที่ใช้ในการสร้างระบบส่องสว่างอัจฉริยะโดยเมื่อเทียบกับแสงทางการค้า (ต่อ)

การทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความพึงพอใจของผู้เข้าร่วมการวิจัยที่มีต่อประสิทธิภาพของแสงที่ใช้ในการสร้างระบบส่องสว่างอัจฉริยะและแสงทางการค้า (ตารางที่ 4.9) โดยใช้การวิเคราะห์ Repeated ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น $P < 0.05$ พบว่าในการทดสอบโดยใช้ Mauchly's Test of Sphericity พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเมื่อนำไปทดสอบค่าความแตกต่างภายในกลุ่มโดยใช้ Huynh-Feldt Tests พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญภายในกลุ่ม ($P < 0.05$) ในทุกประเด็นของความพอใจ

จากผลการศึกษาจึงสรุปได้ว่าแสงที่เกิดขึ้นจากการออกแบบระบบส่องสว่างอัจฉริยะสำหรับเลียนแบบแสงในรอบวันและแสงจ้าให้ความรู้สึก ความพึงพอใจของผู้เข้าร่วมการวิจัยในระดับที่แตกต่างกันทั้งแสงที่ได้กำหนดในแต่ละช่วงเวลาและเมื่อเปรียบเทียบกับสองของโคมไฟทางการค้า

ตารางที่ 4.8 ระดับความพึงพอใจของผู้เข้าร่วมการวิจัย ($n = 32$) ที่มีต่อประสิทธิภาพของแสงที่ใช้ในการสร้างระบบส่องสว่างอัจฉริยะและแสงทางการค้า

ตัวอย่างแสง	ความพึงพอใจในคุณภาพของแสง					ความพึงพอใจขณะอ่านข้อความ				คะแนนรวม
	ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลาย	การกระจายตัวของแสงที่เหมาะสม	ความสว่างของแสงที่ระดับพื้นที่	ความรู้สึกตื่นตัว	ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงาน	ความรู้สึกปกติของแสง	ในหนังสือ	บนจอคอมพิวเตอร์	คะแนนรวม	
A1	4.37±0.55 ^{bc}	4.34±0.60 ^{ad}	2.78±0.42 ^h	3.90±0.73 ⁱ	4.28±0.52 ^{ef}	3.81±0.59 ^e	3.50±0.50 ^f	4.34±0.54 ^{ef}	31.3±2.28 ^s	
A2	4.12±0.60 ^c	4.06±0.56 ^e	3.90±0.68 ^s	4.59±0.55 ^{b-s}	4.87±0.33 ^a	3.87±0.49 ^e	4.81±0.47 ^{ab}	4.28±0.56 ^{ef}	34.5±2.21 ^{ef}	
A3	4.71±0.58 ^a	4.71±0.58 ^{ab}	4.46±0.62 ^{b-e}	4.75±0.56 ^{a-e}	4.75±0.56 ^{a-c}	4.81±0.47 ^{a-c}	4.81±0.47 ^{ab}	4.75±0.62 ^{a-d}	37.7±3.54 ^{ab}	
A4	4.75±0.43 ^a	4.75±0.43 ^a	4.62±0.55 ^{a-c}	4.75±0.43 ^{a-e}	4.87±0.33 ^{ab}	4.71±0.45 ^{a-c}	4.71±0.52 ^{ab}	4.87±0.33 ^{ab}	38.0±2.98 ^{ab}	
A5	4.65±0.60 ^{ab}	4.78±0.42 ^{ab}	4.71±0.45 ^{a-c}	4.78±0.42 ^{a-c}	4.71±0.52 ^{a-c}	4.78±0.42 ^{a-c}	4.81±0.47 ^{ab}	4.78±0.42 ^{a-d}	38.0±3.01 ^{ab}	
A6	4.56±0.56 ^{ab}	4.56±0.56 ^{bc}	4.84±0.44 ^b	4.78±0.42 ^{a-c}	4.65±0.54 ^{a-c}	4.78±0.42 ^{a-c}	4.90±0.29 ^a	4.84±0.36 ^{ab}	37.9±2.29 ^{ab}	
A7	4.81±0.47 ^a	4.87±0.33 ^a	4.37±0.55 ^{c-e}	4.65±0.54 ^{af}	4.46±0.50 ^{c-e}	4.84±0.36 ^{a-c}	4.37±0.60 ^{c-e}	4.87±0.33 ^{ab}	37.2±2.56 ^{a-c}	
A8	4.37±0.60 ^{bc}	4.34±0.54 ^{cd}	4.62±0.49 ^{a-c}	4.40±0.49 ^{e-h}	4.18±0.39 ^f	4.56±0.56 ^{cd}	4.37±0.55 ^{c-e}	4.81±0.39 ^{abc}	35.6±2.87 ^{c-e}	
A9	4.65±0.54 ^{ab}	4.71±0.45 ^{ab}	4.59±0.55 ^{a-d}	4.68±0.47 ^{a-f}	4.62±0.60 ^{a-c}	4.75±0.43 ^{a-c}	4.65±0.54 ^{ab}	4.71±0.45 ^{a-d}	37.4±3.38 ^{ab}	
A10	4.78±0.49 ^a	4.81±0.47 ^{ab}	4.62±0.60 ^{a-c}	4.78±0.42 ^{a-c}	4.75±0.50 ^{a-c}	4.84±0.36 ^{a-c}	4.75±0.43 ^{ab}	4.78±0.42 ^{a-d}	38.1±2.91 ^{ab}	
A11	4.78±0.49 ^a	4.78±0.49 ^{a-c}	4.28±0.52 ^{d-f}	4.37±0.70 ^{f-h}	4.31±0.59 ^{d-f}	4.34±0.60 ^d	4.87±0.33 ^{ab}	4.90±0.29 ^{ab}	36.6±2.11 ^{b-d}	
A12	4.62±0.49 ^a	4.59±0.49 ^{a-c}	3.84±0.84 ^s	4.53±0.62 ^{b-s}	4.59±0.55 ^{bc}	4.78±0.42 ^{a-c}	4.21±0.42 ^e	4.50±0.50 ^{de}	35.6±2.59 ^{c-e}	
A13	4.59±0.55 ^{ab}	4.59±0.55 ^{ab}	4.53±0.50 ^{a-e}	4.43±0.56 ^{d-h}	4.56±0.50 ^{cd}	4.56±0.61 ^{cd}	4.87±0.33 ^{ab}	4.53±0.67 ^{c-e}	36.6±2.64 ^{b-d}	
B	4.17±0.45 ^c	4.15±0.51 ^{de}	4.53±0.71 ^{a-c}	4.31±0.53 ^{gh}	4.71±0.52 ^{a-c}	4.78±0.49 ^{a-c}	4.12±0.49 ^e	4.68±0.59 ^{a-d}	35.5±2.83 ^{de}	
C	4.84±0.36 ^a	1.12±0.42 ^s	1.43±0.61 ⁱ	1.50±0.56 ^k	1.53±0.62 ⁱ	3.90±0.73 ^e	1.25±0.50 ^s	1.31±0.53 ^s	16.9±1.51 ⁱ	

หมายเหตุ ตัวอักษร a – k ที่แตกต่างกันในแนวคอลัมน์แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยใช้การทดสอบแบบ Bonferroni

ตารางที่ 4.8 ระดับความพึงพอใจของผู้เข้าร่วมการวิจัย ($n = 32$) ที่มีต่อประสิทธิภาพของแสงที่ใช้ในการสร้างระบบส่องสว่างอัจฉริยะและแสงทางการค้า (ต่อ)

ตัวอย่างแสง	ความพึงพอใจในคุณภาพของแสง				ความพึงพอใจขณะอ่านข้อความ				คะแนนรวม	
	การกระจายตัวของแสงที่เหมาะสม	ความสว่างของแสงที่ระดับพื้นที่	ความรู้สึกรีดตัว	ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงาน	ความรู้สึกรีดตัว	ความรู้สึกรีดตัว	ความสว่างของแสงของแสง	ในหนังสือ		บนจอคอมพิวเตอร์
D1	4.21±0.49 ^c	4.15±0.57 ^{de}	4.06±0.56 ^g	4.21±0.49 ^h	3.87±0.55 ^s	4.84±0.44 ^{a-c}	4.84±0.44 ^{a-c}	3.71±0.72 ^f	4.90±0.29 ^{ab}	34.0±2.22 ^f
D2	4.59±0.55 ^{ab}	4.59±0.55 ^{a-c}	4.65±0.54 ^{a-c}	4.59±0.55 ^{b-s}	4.65±0.48 ^{a-c}	4.81±0.39 ^{a-c}	4.81±0.39 ^{a-c}	4.75±0.50 ^{ab}	4.75±0.43 ^{a-d}	37.4±3.17 ^{ab}
D3	4.71±0.52 ^a	4.78±0.42 ^{ab}	4.71±0.45 ^{a-c}	4.68±0.47 ^{a-f}	4.75±0.43 ^{a-c}	4.78±0.49 ^{a-c}	4.78±0.49 ^{a-c}	4.78±0.42 ^{ab}	4.78±0.42 ^{a-d}	38.0±3.14 ^{ab}
D4	4.81±0.47 ^a	4.87±0.33 ^{ab}	4.40±0.55 ^{ce}	4.75±0.43 ^{a-e}	4.65±0.48 ^{a-c}	4.71±0.45 ^{a-c}	4.71±0.45 ^{a-c}	4.87±0.33 ^{ab}	4.78±0.42 ^{a-d}	37.8±2.85 ^{ab}
D5	4.87±0.33 ^a	4.81±0.47 ^{ab}	4.78±0.42 ^{ab}	4.93±0.24 ^a	4.87±0.33 ^{ab}	4.90±0.29 ^{ab}	4.90±0.29 ^{ab}	4.90±0.29 ^a	4.87±0.33 ^{ab}	38.9±2.37 ^a
D6	4.71±0.45 ^a	4.71±0.45 ^{ab}	4.71±0.52 ^{a-c}	4.56±0.50 ^{b-s}	4.71±0.45 ^{a-c}	4.75±0.50 ^{a-c}	4.75±0.50 ^{a-c}	4.75±0.50 ^{ab}	4.84±0.44 ^{ab}	37.7±2.97 ^{ab}
D7	4.56±0.50 ^{ab}	4.56±0.50 ^{bc}	4.59±0.49 ^{a-d}	4.46±0.56 ^{ch}	4.62±0.49 ^{a-c}	4.90±0.29 ^{ab}	4.90±0.29 ^{ab}	4.90±0.29 ^a	4.87±0.33 ^{ab}	37.5±2.52 ^{ab}
D8	4.62±0.49 ^{ab}	4.62±0.49 ^{a-c}	4.65±0.54 ^{a-c}	4.71±0.45 ^{a-e}	4.56±0.56 ^{cd}	4.62±0.55 ^{bc}	4.62±0.55 ^{bc}	4.62±0.49 ^{a-c}	4.65±0.48 ^{b-d}	37.0±3.60 ^{bc}
D9	4.62±0.60 ^{ab}	4.68±0.47 ^{ab}	4.78±0.42 ^{ab}	4.75±0.43 ^{a-e}	4.87±0.33 ^{ab}	4.81±0.39 ^{a-c}	4.81±0.39 ^{a-c}	4.68±0.47 ^{ab}	4.90±0.29 ^{ab}	38.1±2.81 ^{ab}
D10	4.71±0.45 ^a	4.71±0.45 ^{ab}	4.68±0.47 ^{a-c}	4.71±0.45 ^{a-e}	4.53±0.62 ^{ce}	4.71±0.45 ^{a-c}	4.71±0.45 ^{a-c}	4.68±0.53 ^{ab}	4.84±0.36 ^{ab}	37.6±3.31 ^{ab}
D11	4.56±0.50 ^a	4.56±0.50 ^{bc}	4.43±0.50 ^{be}	4.62±0.49 ^{a-f}	4.62±0.49 ^{a-c}	4.75±0.50 ^{a-c}	4.75±0.50 ^{a-c}	4.78±0.42 ^{ab}	4.53±0.50 ^{ce}	36.8±3.23 ^{b-d}
D12	4.78±0.49 ^a	4.78±0.49 ^{ab}	4.28±0.52 ^{df}	4.59±0.55 ^{b-s}	4.62±0.49 ^{a-c}	4.84±0.36 ^{ab}	4.84±0.36 ^{ab}	4.68±0.53 ^{ab}	4.84±0.44 ^{ab}	37.4±2.77 ^{ab}
D13	4.84±0.44 ^a	4.84±0.44 ^{ab}	4.62±0.55 ^{a-c}	4.84±0.44 ^{ab}	4.60±0.29 ^a	4.96±0.17 ^a	4.96±0.17 ^a	4.87±0.33 ^{ab}	4.96±0.17 ^a	38.5±2.01 ^a
E	4.62±0.55 ^{ab}	4.85±0.48 ^{ab}	4.87±0.33 ^{a-c}	4.92±0.06 ^{fh}	4.96±0.54 ^{a-c}	4.68±0.53 ^{a-c}	4.68±0.53 ^{a-c}	4.34±0.54 ^{de}	4.53±0.56 ^{ce}	39.3±3.34 ^{b-d}
FWW	3.40±0.49 ^d	3.46±0.56 ^f	4.62±0.79 ^{a-c}	3.40±0.49 ⁱ	3.15±0.36 ^h	3.12±0.33 ^f	3.12±0.33 ^f	3.71±0.58 ^f	4.21±0.94 ^f	29.1±2.79 ^h
GCW	4.21±0.42 ^c	4.15±0.44 ^d	4.25±0.67 ^{ef}	3.87±0.65 ⁱ	3.84±0.57 ^s	3.90±0.46 ^{a-c}	3.90±0.46 ^{a-c}	4.59±0.55 ^{b-d}	4.62±0.55 ^{b-d}	33.4±2.24 ^f

หมายเหตุ ตัวอักษร a – k ที่แตกต่างกันในแนวคอลัมน์แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยใช้การทดสอบแบบ Bonferroni

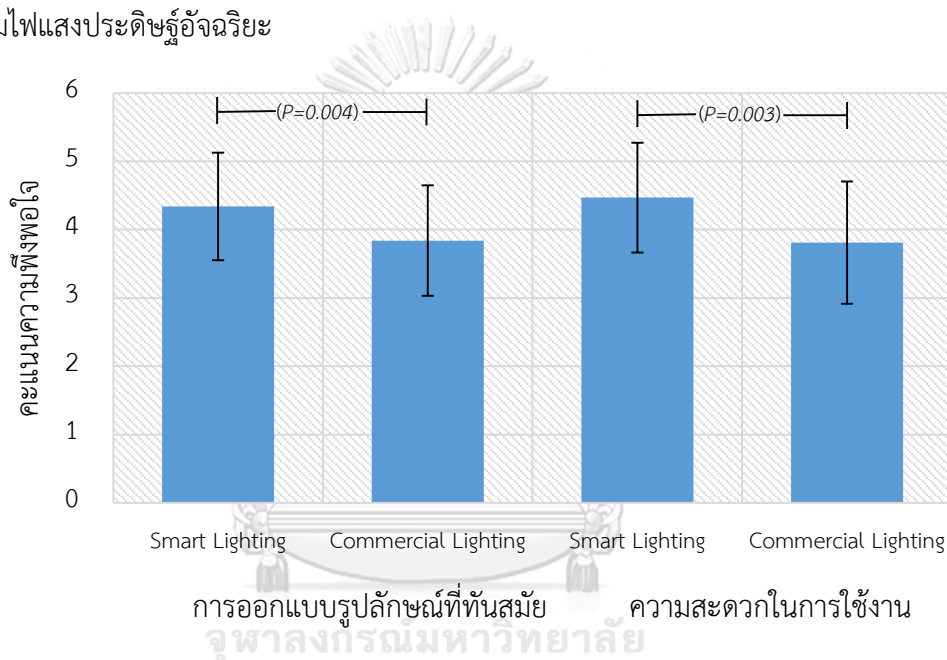
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความพึงพอใจของผู้เข้าร่วมการวิจัย ($n = 32$) ที่มีต่อประสิทธิภาพของแสงที่ใช้ในการสร้างระบบส่องสว่างอัจฉริยะและแสงทางการค้า โดยใช้การวิเคราะห์ repeated ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น $P < 0.05$

ค่าการทดสอบความแตกต่าง (Repeated ANOVA)	Mauchly's Test of Sphericity				Tests of Within-Subjects Effects by Huynh-Feldt.						
	Mauchly's W	Approx. Chi-Square	df	Sig.*	Huynh-Feldt**	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	Sig.*	Partial Eta Squared	Noncent Parameter
<i>ความพึงพอใจในคุณภาพของแสง</i>											
ความรู้สึกลสบายและผ่อนคลาย	<0.05	737	464	<0.05	0.6729	85.67	20.19	4.24	<0.05	0.2787	241.86
การกระจ่ายตัวของแสงที่ เหมาะสม	<0.05	740	464	<0.05	0.6474	85.67	20.19	4.24	<0.05	0.2787	241.86
ความสว่างของแสงที่ระดับพื้นที่	<0.05	705	464	<0.05	0.6030	456.77	19.42	23.52	<0.05	0.6793	1275.48
ความรู้สึกรื่นเริง	<0.05	766	464	<0.05	0.6671	456.77	19.42	23.52	<0.05	0.6793	1275.48
ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงาน	<0.05	758	464	<0.05	0.7163	409.52	21.49	19.06	<0.05	0.6494	1233.48
ความรู้สึกรบกวนใจของแสง	<0.05	877	464	<0.05	0.6387	170.52	19.16	8.90	<0.05	0.4653	616.80
<i>ความพึงพอใจขณะอ่านข้อความ</i>											
ในหนังสือ	<0.05	748	464	<0.05	0.6303	478.04	18.91	25.28	<0.05	0.6967	1346.69
บนจอคอมพิวเตอร์	<0.05	945	464	<0.05	0.3964	395.05	11.89	33.22	<0.05	0.6625	723.61
คะแนนรวม	<0.05	785	464	<0.05	0.5598	16452.95	16.80	979.62	<0.05	0.7114	1283.59
หมายเหตุ											

* การคำนวณค่าปรับค่าองศาอิสระ (α) เท่ากับ 0.5 ($P < 0.05$)

** Epsilon. May be used to adjust the degrees of freedom (df) for the averaged tests of significance. Corrected tests are displayed in the Tests of Within-Subjects Effects Table.

เมื่อเปรียบเทียบถึงคะแนนความพึงพอใจในภาพรวมของโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะ และโคมไฟทางการค้า (ภาพที่ 4.25) พบว่า โคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะมีระดับคะแนนความพึงพอใจในด้านออกแบบรูปปลั๊กซ์ที่ทันสมัยเฉลี่ย 4.34 ± 0.79 คะแนน ซึ่งมีระดับความพึงพอใจสูงกว่าโคมไฟทางการค้า (3.84 ± 0.81 คะแนน) เช่นเดียวกับความสะดวกในการใช้งาน พบว่า โคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะมีระดับคะแนนความพึงพอใจ (4.47 ± 0.80 คะแนน) สูงกว่าโคมไฟทางการค้า (3.81 ± 0.90 คะแนน) ซึ่งจากความคิดเห็นเพิ่มเติม พบว่า โคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะได้รับการพัฒนารูปแบบในการทำงานและการส่องสว่างโดยเฉพาะการให้แสงที่มีความสบายตา รวมทั้งระดับความสว่างของแสงที่มากกว่าหลอดทางการค้า และรูปแบบของการปรับการทำงานในทุก ๆ ชั่วโมงของโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะ



ภาพที่ 4.58 ความพึงพอใจต่อคุณสมบัติของโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะ และโคมไฟทางการค้า

จากงานวิจัยของ Hansen *et al.* (2022) ได้ศึกษาการพัฒนาาระบบส่องสว่างแบบอัจฉริยะโดยอาศัยหลักการควบคุมแสงสว่างแบบพลวัตของแสงภายนอก และการใช้แสงจากหลอดแอลอีดีสำหรับการปรับแสงให้มีความสว่างอยู่ในระดับมาตรฐาน และการเปลี่ยนแปลงของแสงสีที่เหมาะสม โดยระบบควบคุมประกอบด้วย เซนเซอร์ตรวจจับแสงสว่างจากนั้นนำข้อมูลมาประมวลระดับแสงเพื่อกำหนดความสว่างที่ต้องการผลิต นอกจากนี้มีการประเมินประเมินโดยใช้ผู้เข้าร่วมการวิจัย (จำนวน 30 คน) พบว่า แสงที่เกิดจากการควบคุมด้วยระบบดังกล่าว ให้ความสบายตาและมีความเป็นแสงธรรมชาติมากกว่ารวมทั้งมีความเหมาะสมกับการทำงาน แต่มีประเด็นด้านการประมวลผลของหลอดที่ควรควบคุม เช่น การที่มีแสงข้างนอกจ้าเกินไป ระบบจะสั่งการให้หลอดปิดการทำงาน

ทำให้ในอาคารนั้นมีแสงสว่างไม่เพียงพอ [137] ถึงแม้ว่างานวิจัยดังกล่าวมีความแตกต่างจากการศึกษานี้ในด้านหลักการออกแบบแสงสว่าง โดยงานวิจัยดังกล่าวใช้หลักการปรับลักษณะองค์ประกอบของแสงสว่างตามการเปลี่ยนแปลงของแสงสว่างภายนอก แต่ทำให้เห็นว่าการให้แสงสว่างที่มีลักษณะเช่นเดียวกับแสงในรอบวันมีผลทำให้ผู้ทดสอบมีความรู้สึกถึงความเป็นธรรมชาติ และความสบายตา เมื่อได้สัมผัสแสงดังกล่าวเช่นเดียวกับการศึกษาครั้งนี้ แต่ทั้งนี้งานวิจัยดังกล่าวพบข้อเสียในการปรับปรุงแสงตามสภาพแวดล้อมมีผลทำให้เกิดระดับของแสงสว่างที่จ้ามเกินไป เมื่อระดับแสงสว่างภายนอกมีความจ้าม ซึ่งในการศึกษานี้ได้คำนึงถึงปัจจัยด้านความเข้มของแสงที่ส่งผลต่อการรับรู้ของดวงตามนุษย์ โดยได้พิจารณาระดับความสว่างของแสงจากเส้นโค้งการตอบสนองต่อการกระตุ้น CS ทำให้ระดับความเข้มของแสงสว่างไม่จ้ามจนทำให้เกิดความไม่สบายตาของผู้เข้าร่วมการทดสอบ

Samioy *et al.* (2022) ได้เสนอกลยุทธ์ในการออกแบบการให้แสงกลางวันที่มีความเหมาะสมสำหรับเด็ก (นักเรียนอนุบาล) ซึ่งประกอบด้วย การศึกษาบริบทเฉพาะของสถานที่และกิจกรรม (งาน) และสิ่งจำเป็นสำหรับการพัฒนาเด็ก การวัดและประเมินคุณภาพแสงทั้งภายในและภายนอกอาคาร (ลงพื้นที่ตรวจจริง) การพัฒนาแบบจำลองการให้แสงสว่าง (dynamic simulation) ประเมินผลการนำไปใช้ การหาตำแหน่ง และระดับในการให้แสงสว่างที่เหมาะสม โดยพบว่าการใช้แสงสว่างจากภายนอก (แสงอาทิตย์) ร่วมกับการใช้แสงประดิษฐ์ภายในอาคารอย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมเป็นสิ่งที่ควรให้ความสำคัญ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการออกแบบแสงสว่างภายในอาคารในรูปแบบอื่น ๆ ได้ [138] ซึ่งเป็นหลักการที่สามารถนำมาใช้ในการพัฒนาระบบการควบคุมแสงสว่างภายในอาคารที่มีการใช้แสงสว่างจากภายนอก โดยลักษณะอาคารจะต้องเป็นห้องกระจก หรือมีการเปิดรับแสงจากภายนอกได้ หากกรณีในห้องหรืออาคารมีข้อจำกัดในการรับแสงสว่างการศึกษาดังกล่าวอาจมีข้อจำกัด แต่สำหรับงานวิจัยนี้มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับห้องที่มีข้อจำกัดในการรับแสงสว่างมากกว่า

Aslanoglu *et al.* (2021) ได้สำรวจเพื่อวิเคราะห์ถึงปัจจัยในการออกแบบระบบส่องสว่างอัจฉริยะให้มีความพึงพอใจของผู้ใช้พบว่า ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความอัจฉริยะของการส่องสว่างที่เพียงพอ ($r = 0.463$) ความกลมกลืนของแสง ($r = 0.366$) ดัชนีบ่งชี้ความถูกต้องของแสง (CRI)($r = 0.279$) และความจ้าของแสง ($r = 0.124$) นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการได้รับแสงอาทิตย์ในแต่ละวัน เป็นต้น [139] งานวิจัยดังกล่าวทำให้ทราบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อความพึงพอใจของผู้ใช้โคมไฟแสงประดิษฐ์ โดยเฉพาะด้านความเข้มและความกลมกลืนของแสงสว่างเป็นส่วนสำคัญที่เกิดจากประสิทธิภาพของหลอดที่ใช้ในการออกแบบแสงประดิษฐ์ ซึ่งระดับความสว่างและความเข้มของแสงมีผลต่อการรับรู้ต่อแสงของมนุษย์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

ในการวิจัยนี้มี 4 ตอน ประกอบด้วย การศึกษาสมบัติทางเรติโอเมตริกและโฟโตเมตริกของแสงในรอบวัน การพัฒนาระบบส่องสว่าง การสร้างระบบส่องสว่างอัจฉริยะเพื่อเลียนแบบแสงในรอบวันและแสงจ้า และการศึกษาประสิทธิภาพของระบบส่องสว่าง ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ ดังนี้

ตอนที่ 1 การศึกษาสมบัติทางสเปกโตรเมตริก (Spectrometric) ของแสงในรอบวัน

จากการศึกษาลักษณะการกระจายพลังงานสเปกตรัมของแสงในรอบวัน (circadian lighting) สำหรับการนำไปใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาระบบส่องสว่างเลียนแบบแสงในรอบวัน โดยได้ทำการศึกษา ณ พื้นที่สี่อีสาน ณ ตำบลหัวขวาง อำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดมหาสารคาม ละติจูดที่ 16.29 องศาเหนือ พบว่า ในฤดูร้อน (10 – 15 พฤษภาคม 2563) แสงอาทิตย์ในช่วงเช้าจะให้แสงที่ 5,441 เคลวิน (11,718 ลูเมน) ให้แสงที่มี CCT สูงสุดในช่วงเที่ยงที่ 5,896 เคลวิน (309,843 ลูเมน) และลดลงสู่ 5,454 เคลวิน (14,804 ลูเมน) ในตอนค่ำ ขณะที่ในฤดูหนาว (10 – 15 พฤศจิกายน 2563) แสงอาทิตย์ในช่วงเช้าจะให้แสงที่ 5,314 เคลวิน (43,434 ลูเมน) ให้แสงที่มี CCT สูงสุดในช่วงเที่ยงที่ 7,006 เคลวิน (281,836 ลูเมน) และลดลงสู่ 5,282 เคลวิน (57,782 ลูเมน) ในตอนค่ำ ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นของค่าอุณหภูมิสัมพัทธ์ของสีและค่าความเข้มของแสงระหว่างสองฤดูเกิดจากปัจจัยหลักเกี่ยวข้องกับระยะห่างและองศาในการได้รับแสงจากดวงอาทิตย์ และตำแหน่งพิกัดพื้นที่ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยด้านฝุ่น ละอองไอน้ำในอากาศ เป็นต้น เนื่องจากประเทศไทยอยู่ในบริเวณที่ใกล้เส้นศูนย์สูตรทำให้ช่วงระยะเวลากลางวันและกลางคืนของทั้งสองฤดูกาลไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งข้อมูลที่สำคัญสำหรับการนำไปใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาระบบส่องสว่างของหลอดประดิษฐ์เพื่อเลียนแบบแสงในรอบวัน คือ พิกัด x และ y ของแสงจากดวงอาทิตย์ ณ เวลาต่าง ๆ โดยการแปลงค่าเป็นรหัส RGB สำหรับการป้อนคำสั่งเข้าไปยังชุดควบคุมต่อไป

ตอนที่ 2 การพัฒนาระบบส่องสว่างและการคัดเลือกหลอด LED

จากการพัฒนาระบบส่องสว่างสำหรับป้อนคำสั่งผ่าน RGB-Input software จากการคัดเลือกหลอด RGB-LED ในท้องตลาดหลายชนิด พบว่ามีสองชนิดที่สามารถนำมาใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพ ได้แก่ LED-A ซึ่งเป็น RGB-LED ชนิดที่สามารถควบคุมการทำงานของกระแสไฟได้ทั้ง I_R , I_G และ I_B และ LED-B ซึ่งเป็น RGB-LED ที่สามารถควบคุมการทำงานของกระแสไฟเฉพาะ I_G และ I_B เมื่อมีการป้อนคำสั่งในการให้แสงส่องสว่างเพื่อสร้าง (ผสม) แสงสีที่กำหนด จากการทดสอบให้แสงในช่วง 3,500 – 10,000 เคลวิน พบว่า LED-A มีประสิทธิภาพในการควบคุมการให้แสงตาม

กำหนดที่ดีกว่า LED-B โดยพิจารณาจากค่า LER, CER, MSI, LE, CAF และอัตราส่วนของ S/P ratio นอกจากนี้ยังมีค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการออกแบบระดับการกระตุ้นที่เกี่ยวข้องกับการกดเมลาโทนิของแสง คือ ค่า CS ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความสว่างของแสงที่ใช้ และค่า CL_A ที่มีผลต่อระบบชีวภาพของร่างกายและสิ่งมีชีวิต จากผลการทดลองพบว่าค่า CS มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของแสงสีน้ำเงิน (ความยาวคลื่นสั้น) โดยหากตัวอย่างแสงในช่วงใดที่มีปริมาณของแสงสีน้ำเงินสูงจะมีแนวโน้มการกระตุ้นการกดเมลาโทนิได้สูง ด้วยเหตุนี้ในการออกแบบแสงสว่างควรคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลต่อการกดเมลาโทนิด้วย โดยทั่วไปแสงสว่างจะใช้ที่ประมาณ 100 – 300 ลักซ์ ซึ่งจะเป็นช่วงที่ให้ค่า CS อยู่ในช่วง 0.2 – 0.3 ซึ่งจากการวิจัยในครั้งนี้ได้นำความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสว่างและค่า CS ไปกำหนดค่าความสว่างในการพัฒนาโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะ

ตอนที่ 3 การประเมินคุณภาพการส่องสว่างของแสง RGB-LED ในการเลียนแบบแสงในรอบวัน

จากการแปลงรหัส RGB โดยใช้ข้อมูลพิกัด x และ y บน chromaticity diagram ของแสงอาทิตย์ทั้งสองฤดูกาล เพื่อนำมาป้อนคำสั่งผ่าน RGB-input software เพื่อควบคุม LED-A และ LED-B ให้เกิดการเลียนแบบแสงในรอบวันของทั้งสองฤดูตั้งแต่เวลา 06:00 น. – 18:00 น. พบว่า LED-A สามารถให้ค่าแสงตาม CCT เป้าหมายที่กำหนดไว้โดยมีค่าความผิดพลาดของ CCT เฉลี่ยร้อยละ 3.75 ได้ดีกว่า LED-B อย่างชัดเจนซึ่งมีค่าความผิดพลาดของ CCT เฉลี่ยร้อยละ 5.0 ทั้งนี้เนื่องจาก LED-A มีการทำงานที่สามารถปรับค่า I_R , I_G และ I_B ได้มากกว่า LED-B ทำให้มีข้อจำกัดในการทำงานน้อยกว่า ทั้งนี้ถึงแม้ LED-A มีความสามารถในการผลิตแสงได้ตรงตามเป้าหมาย แต่จะพบว่าความสามารถของ LED-A ซึ่งเป็น RGB-LED จะมีความสามารถในการผลิตแสงในช่วง 5,500 – 6,500 เคลวิน ได้ไม่แม่นยำ และมีข้อจำกัดด้านความสว่างเนื่องจากการทำงานของ RGB-LED (LED-A) ซึ่งช่วงดังกล่าวต้องมีการใช้แสงขาวเข้ามาช่วยเพิ่มความสามารถในการให้แสงสีที่มีพิกัดตามเป้าหมายและมีระดับความสว่างเพียงพอต่อการนำไปใช้ต่อไป

ตอนที่ 4 การพัฒนาระบบอัจฉริยะในการให้แสงในรอบวัน

จากการพัฒนาระบบส่องสว่างเพื่อเลียนแบบแสงในรอบวันเพื่อให้มีความเหมาะสมในการใช้งาน ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะที่มีการใช้งานได้ง่ายและมีการให้แสงที่ใกล้เคียงกับแสงในรอบวันมากที่สุด ในระดับที่เหมาะสมกับการกระตุ้นการทำงานของร่างกาย (CS) โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์แสงในรอบวันเพื่อกำหนดความสว่าง (ลักซ์) ตามนาฬิกาชีวิตและกิจวัตรประจำวันของมนุษย์ในปัจจุบัน ร่วมกับข้อกำหนดมาตรฐานความสว่าง โดยโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะได้พัฒนาโดยใช้หลอด LED-A ซึ่งเป็น RGB-LED และหลอด White-LED เพื่อปรับพิกัดของแสงให้ใกล้เคียงกับแสงในรอบวันมากขึ้น โดยจากการศึกษาพบว่าแสงที่ในระยะ 80

เซนติเมตร ซึ่งเป็นระยะที่มนุษย์ทำกิจกรรมที่ต้องใช้สายตาโดยทั่วไป มีระดับความสว่างสูงสุดที่ 339 ลักซ์ ซึ่งเป็นแสงที่ใช้เลียนแบบแสงกลางวันในช่วงเที่ยงของฤดูร้อนซึ่งให้ค่า CS สูงสุดที่ 0.40 ซึ่งจะ เป็นแสงที่เลียนแบบแสงในช่วงบ่ายของทั้งสองฤดู จากผลการทดลองยังพบว่าในระดับแสงสว่างที่ เท่ากันนั้น แสงที่มีองค์ประกอบของแสงคลื่นแสงสีน้ำเงินสูงกว่าจะทำให้การกระตุ้นที่สูงกว่าอย่างชัดเจน ด้วยเหตุนี้ในการออกแบบแสงในรอบวันควรพิจารณาถึงองค์ประกอบของแสงด้วย รวมทั้งข้อจำกัด ของหลอด RGB – LED โดยการเพิ่มแสงขาวเข้ามาในระบบส่องสว่าง พบว่า สามารถช่วยเพิ่ม ประสิทธิภาพของหลอดทั้งในด้านของความสว่างและพิกัดของแสงสีที่ผลิตได้ให้เข้าใกล้แสงในรอบวัน ได้มากขึ้น โดยมีค่าความผิดพลาดในการให้ CCT ระหว่างร้อยละ 0.15 – 9.15 โดยค่า CS ในการ กระตุ้นได้กำหนดไว้ตั้งแต่ 0.2 – 0.4 และกำหนดให้ CS น้อยกว่า 0.1 เมื่อเข้าสู่ช่วงเวลาของการนอน หลับ (22:00 น.) ภายใต้ความเข้มแสง 3 ลักซ์ โดยการทำงานของโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะจะมีความสามารถในการจดจำวันและเวลา ได้ดังนี้ ในทุกวันจะทำงานได้ 24 ชั่วโมง อย่างต่อเนื่อง และจะ เข้าสู่รูปแบบการทำงานในฤดูร้อน 15 กุมภาพันธ์ และเข้าสู่รูปแบบการทำงานในฤดูหนาวในวันที่ 15 ตุลาคม ของทุกปี ระบบมีความสามารถในการควบคุมผ่าน smartphone (Androids) และมีรูปแบบ การทำงานของแสงจำซึ่งกำหนดระดับความสว่างที่ 1,250 ลักซ์ โดยจะทำงานตามเวลาที่ผู้ใช้ต้องการ ให้เกิดการกระตุ้นการตื่นตัวแบบฉับพลันตามที่ต้องการ นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประเมิน ความพึงพอใจในการนำโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะโดยเปรียบเทียบกับโคมไฟทางการค้า จากการ ทดสอบโดยให้ผู้เข้าร่วมการวิจัย จำนวน 32 คน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง อายุเฉลี่ย 45.41 ปี พบว่า ค่าคะแนนเฉลี่ยจากข้อคำถามด้านการให้ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลาย ด้านการกระจายตัวของ แสงที่เหมาะสม ความสว่างของแสงที่ระดับพื้นห้อง การให้ความรู้สึกตื่นตัว ความสว่างบนพื้นโต๊ะ ความรู้สึกปกติของแสง ความพึงพอใจขณะอ่านหนังสือ ความพึงพอใจขณะอ่านข้อความบน จอคอมพิวเตอร์ โดยรวมพบว่า ตัวอย่างแสงจากโคมไฟแสงประดิษฐ์มีคุณภาพโดยรวมมากกว่าโคมไฟ ทางการค้า รวมถึงคะแนนความพึงพอใจเกี่ยวกับการออกแบบที่ทันสมัยและความสะดวกในการใช้ งานของโคมไฟแสงประดิษฐ์อัจฉริยะมีค่าคะแนนเฉลี่ยมากกว่าโคมไฟทางการค้า ทั้งนี้เนื่องจาก รูปแบบของแสงสีที่หลากหลาย ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลาย การให้แสงที่มีการกระพริบ (Flicker) ต่ำ และสามารถเลือกรูปแบบการใช้งานผ่านสมาร์ทโฟนได้

จากการวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงแนวทางในการออกแบบแสงสว่างให้สอดคล้องกับการใช้ ชีวิตประจำวันของมนุษย์ ซึ่งมีความแตกต่างจากสมัยก่อนมาก ด้วยแสงที่มีความเกี่ยวข้องกับการ ควบคุมกลไกทางชีวภาพของร่างกายและมีผลต่อสุขภาพโดยตรงทั้งที่รับรู้ได้และไม่สามารถรับรู้ได้ ด้วยเหตุนี้การวิจัยและพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีแสงสว่างจึงเป็นตัวช่วยทำให้มนุษย์ได้รับแสงที่ เหมาะสมกับการใช้ชีวิตในปัจจุบันมากที่สุด โดยใช้เทคโนโลยีการผลิตแอลอีดีที่มีหลากหลายรูปแบบ และกระบวนการคัดเลือกหลอดแอลอีดีที่มีคุณภาพ การวิเคราะห์สเปกตรัมของแสงเพื่อกำหนดแสงสี

และความสว่างของแสงสีที่เหมาะสมกับกิจวัตรประจำวันของมนุษย์ ซึ่งเป็นประเด็นที่ต้องใช้เทคโนโลยีและนวัตกรรมทางแสงมากยิ่งขึ้น

งานวิจัยในอนาคต

จากงานวิจัยนี้ทำให้มองเห็นถึงโอกาสในการนำเทคโนโลยีแสงสีด้วยการใช้หลอดแอลอีดีเข้าไปสร้างแสงสีที่เหมาะสมได้หลากหลายมากขึ้น ทั้งนี้งานวิจัยนี้ควรมีการต่อยอดในประเด็นดังต่อไปนี้

- (1) การพัฒนาระบบส่องสว่างสำหรับการปรับสมดุลนาฬิกาชีวิต (biological clock) เพื่อพัฒนาคุณภาพชีวิตด้านความปลอดภัยและสุขภาพในผู้สูงอายุ
- (2) การพัฒนาระบบส่องสว่างสำหรับการกระตุ้นการตื่นตัวของบุคคลในที่ทำงานในยุควิถีใหม่
- (3) การศึกษาเกี่ยวกับประเภทและชนิดของแอลอีดีกับประสิทธิภาพในการทดแทนนาฬิกาชีวภาพตามมนุษย์
- (4) การเพิ่มประสิทธิภาพในการเลียนแบบแสงในรอบวันโดยใช้แอลอีดี ที่ครอบคลุมทุกความยาวคลื่นแสง และกำลังในการผสมแสงสี



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

1. Dijk, D.-J. and S.N. Archer, *Light, sleep, and circadian rhythms: together again*. PLoS Biol, 2009. 7(6): p. e1000145.
2. Klein, D., R. Moore, and S. Reppert, *Suprachiasmatic nucleus: the mind's clock*. 1st ed. 1991, New York: Oxford University Press, USA.
3. Morin, L., *The circadian visual system*. Brain Research Reviews, 1994. 19(1): p. 102-127.
4. Czeisler, C.A., et al., *Stability, precision, and near-24-hour period of the human circadian pacemaker*. Science, 1999. 284(5423): p. 2177-2181.
5. Reiter, R.J., *Pineal melatonin: cell biology of its synthesis and of its physiological interactions*. Endocrine reviews, 1991. 12(2): p. 151-180.
6. Rosenthal, N., *Plasma melatonin as a measure of the human clock*. The Journal of clinical endocrinology and metabolism, 1991. 73(2): p. 225-226.
7. Brainard, G.C., et al., *Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor*. Journal of Neuroscience, 2001. 21(16): p. 6405-6412.
8. Brainard, G.C., et al., *Sensitivity of the human circadian system to short-wavelength (420-nm) light*. Journal of biological rhythms, 2008. 23(5): p. 379-386.
9. Thapan, K., J. Arendt, and D.J. Skene, *An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans*. The Journal of physiology, 2001. 535(1): p. 261-267.
10. Rea, M.S., J.D. Bullough, and M.G. Figueiro, *Phototransduction for human melatonin suppression*. Journal of pineal research, 2002. 32(4): p. 209-213.
11. Ticleanu, C. and P. Littlefair, *A summary of LED lighting impacts on health*. International Journal of Sustainable Lighting, 2015. 17: p. 5-11.
12. Ticleanu, O.A., *Differential operators over particular elliptic curves spaces with cryptographic applications*. Electronic Journal of Differential Equations, 2015. 2015(303): p. 1-9.

13. Van Oosterhout, W., et al., *Chronotypes and circadian timing in migraine*. *Cephalalgia*, 2018. 38(4): p. 617-625.
14. Pringsheim, T., *Cluster headache: evidence for a disorder of circadian rhythm and hypothalamic function*. *Canadian journal of neurological sciences*, 2002. 29(1): p. 33-40.
15. Evans, J.A. and A.J. Davidson, *Health consequences of circadian disruption in humans and animal models*, in *Progress in molecular biology and translational science*. 2013, Elsevier. p. 283-323.
16. Rosenthal, N., *Winter Blues: Everything You Need to Know to Beat Seasonal Affective Disorder*. New York, NY: Guilford Press, 2006.
17. Christoffersson, G., et al., *Acute sleep deprivation in healthy young men: impact on population diversity and function of circulating neutrophils*. *Brain, behavior, and immunity*, 2014. 41: p. 162-172.
18. Bonsall, D.R. and M.E. Harrington, *Circadian rhythm disruption in chronic fatigue syndrome*. *Advances in Neuroimmune Biology*, 2013. 4(4): p. 265-274.
19. Reiter, R.J., et al., *Obesity and metabolic syndrome: association with chronodisruption, sleep deprivation, and melatonin suppression*. *Annals of medicine*, 2012. 44(6): p. 564-577.
20. Cedernaes, J., H.B. Schiöth, and C. Benedict, *Determinants of shortened, disrupted, and mistimed sleep and associated metabolic health consequences in healthy humans*. *Diabetes*, 2015. 64(4): p. 1073-1080.
21. Stevens, R.G. and M.S. Rea, *Light in the built environment: potential role of circadian disruption in endocrine disruption and breast cancer*. *Cancer Causes & Control*, 2001. 12(3): p. 279-287.
22. Yadav, A., P. Verma, and S. Singh, *Going beyond the limits: Effect of clock disruption on human health*. *Biological Rhythm Research*, 2017. 48(5): p. 693-700.
23. Begemann, S., G. Van den Beld, and A. Tenner, *Daylight, artificial light and people in an office environment, overview of visual and biological responses*. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 1997. 20(3): p. 231-239.

24. Heschong, L., R.L. Wright, and S. Okura, *Daylighting impacts on human performance in school*. Journal of the Illuminating Engineering Society, 2002. 31(2): p. 101-114.
25. Borisuit, A., et al., *Effects of realistic office daylighting and electric lighting conditions on visual comfort, alertness and mood*. Lighting Research & Technology, 2015. 47(2): p. 192-209.
26. CIE, *COLORIMETRY*. Commission Internationale de l'Eclairage, 2004.
27. CIE, *Ocular lighting effects on human physiology and behaviour, Vienna, Austria, CIE 2004/2009, Report No. CIE 158*. 2009.
28. Duffy, J.F. and K.P. Wright Jr, *Entrainment of the human circadian system by light*. Journal of biological rhythms, 2005. 20(4): p. 326-338.
29. Rizzo, P., *Lighting for universal design*. Ultimate Home Design, 2007. 7: p. 50-59.
30. Steinfeld, E. and J. Maisel, *Universal design: Creating inclusive environments*. 2012: John Wiley & Sons.
31. CIE, *Report on the First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry, Vienna, Austria (2013); CIE2015. Report No.: CIE TN 003:2015*. 2015.
32. IALD, *Joint position paper by LightingEurope and the International Association of Lighting Designers (IALD) on Human Centric Lighting (February 2017)*. Available at: <https://www.iald.org/Advocacy/Publications>. Accessed September 30, 2018. in an office environment, overview of visual and biological responses. International Journal of Industrial Ergonomics, 2017. 20(3): p. 231-239.
33. Cajochen, C., et al., *High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light*. The journal of clinical endocrinology & metabolism, 2005. 90(3): p. 1311-1316.
34. LeGates, T.A., D.C. Fernandez, and S. Hattar, *Light as a central modulator of circadian rhythms, sleep and affect*. Nature Reviews Neuroscience, 2014. 15(7): p. 443-454.
35. Chellappa, S.L., M.C. Gordijn, and C. Cajochen, *Can light make us bright? Effects*

- of light on cognition and sleep*, in *Progress in brain research*. 2011, Elsevier. p. 119-133.
36. Badia, P., et al., *Bright light effects on body temperature, alertness, EEG and behavior*. *Physiology & behavior*, 1991. 50(3): p. 583-588.
 37. Noguchi, H. and T. Sakaguchi, *Effect of illuminance and color temperature on lowering of physiological activity*. *Applied human science*, 1999. 18(4): p. 117-123.
 38. Okamoto, Y. and S. Nakagawa, *Effects of light wavelength on MEG ERD/ERS during a working memory task*. *International Journal of Psychophysiology*, 2016. 104: p. 10-16.
 39. Huiberts, L.M., K.C. Smolders, and Y.A. de Kort, *Non-image forming effects of illuminance level: exploring parallel effects on physiological arousal and task performance*. *Physiology & behavior*, 2016. 164: p. 129-139.
 40. Berson, D.M., *Strange vision: ganglion cells as circadian photoreceptors*. *TRENDS in Neurosciences*, 2003. 26(6): p. 314-320.
 41. Hankins, M. and R. Lucas, *The primary visual pathway in humans is regulated according to long-term light exposure through the action of a nonclassical photopigment*. *Current Biology*, 2002. 12(3): p. 191-198.
 42. Dacey, D.M., et al., *Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN*. *Nature*, 2005. 433(7027): p. 749.
 43. Bailes, H.J. and R.J. Lucas, *Human melanopsin forms a pigment maximally sensitive to blue light ($\lambda_{max} \approx 479$ nm) supporting activation of Gq/11 and Gi/o signalling cascades*. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2013. 280(1759): p. 20122987.
 44. Smolders, K.C., Y.A. De Kort, and P. Cluitmans, *A higher illuminance induces alertness even during office hours: findings on subjective measures, task performance and heart rate measures*. *Physiology & Behavior*, 2012. 107(1): p. 7-16.
 45. Figueiro, M.G., et al., *Developing architectural lighting designs to improve sleep in older adults*. *The open sleep journal*, 2008. 1(1).

46. Rea, M.S., et al., *Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system*. Lighting Research & Technology, 2012. 44(4): p. 386-396.
47. Torrington, J.M. and P. Tregenza, *Lighting for people with dementia*. Lighting Research & Technology, 2007. 39(1): p. 81-97.
48. Hanford, N. and M. Figueiro, *Light therapy and Alzheimer's disease and related dementia: past, present, and future*. Journal of Alzheimer's Disease, 2013. 33(4): p. 913-922.
49. Brand, C.H. *Bright light therapy for bipolar depression*. <https://mnglobals.info/show/wtuUjLusur6lKl/bright-light-therapy-for-bipolar-depression.html>. 2021.
50. Pandharipande, A. and D. Caicedo, *Smart indoor lighting systems with luminaire-based sensing: A review of lighting control approaches*. Energy and Buildings, 2015. 104: p. 369-377.
51. Imam, M.T., S. Afshari, and S. Mishra, *An experimental survey of feedback control methodologies for advanced lighting systems*. Energy and Buildings, 2016. 130: p. 600-612.
52. Li, S., A. Pandharipande, and F.M. Willems, *Daylight sensing LED lighting system*. IEEE Sensors Journal, 2016. 16(9): p. 3216-3223.
53. Tang, S., et al., *Development of a prototype smart home intelligent lighting control architecture using sensors onboard a mobile computing system*. Energy and Buildings, 2017. 138: p. 368-376.
54. Brembilla, E. and J. Mardaljevic, *Climate-Based Daylight Modelling for compliance verification: Benchmarking multiple state-of-the-art methods*. Building and Environment, 2019. 158: p. 151-164.
55. Dictionary, W.s.N.W., *Webster's II new college dictionary*. 2005: Houghton Mifflin Harcourt.
56. Andersen, M., J. Mardaljevic, and S.W. Lockley, *A framework for predicting the non-visual effects of daylight-Part I: photobiology-based model*. Lighting research & technology, 2012. 44(1): p. 37-53.
57. Ámundadóttir, M.L., S.W. Lockley, and M. Andersen. *Integrating non-visual*

- effects of light into lighting simulation: challenges ahead.* in *Proceedings of the 12th European Lighting Conference*. 2013.
58. Mardaljevic, J., et al., *A framework for predicting the non-visual effects of daylight–Part II: The simulation model.* *Lighting Research & Technology*, 2014. 46(4): p. 388-406.
 59. Gooley, J.J., et al., *Melanopsin and rod–cone photoreceptors play different roles in mediating pupillary light responses during exposure to continuous light in humans.* *Journal of Neuroscience*, 2012. 32(41): p. 14242-14253.
 60. Lall, G.S., et al., *Distinct contributions of rod, cone, and melanopsin photoreceptors to encoding irradiance.* *Neuron*, 2010. 66(3): p. 417-428.
 61. Viola, A.U., et al., *Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality.* *Scandinavian journal of work, environment & health*, 2008: p. 297-306.
 62. Volf, C., *Light, Architecture and Health: A Method.* 2013: Aarhus School of Architecture.
 63. Dijk, D.-J. and S.W. Lockley, *Invited Review: Integration of human sleep-wake regulation and circadian rhythmicity.* *Journal of applied physiology*, 2002. 92(2): p. 852-862.
 64. Wehr, T., D. Aeschbach, and W. Duncan Jr, *Evidence for a biological dawn and dusk in the human circadian timing system.* *The Journal of Physiology*, 2001. 535(3): p. 937-951.
 65. Cajochen, C., et al., *Dose-response relationship for light intensity and ocular and electroencephalographic correlates of human alertness.* *Behavioural brain research*, 2000. 115(1): p. 75-83.
 66. Phipps-Nelson, J., et al., *Daytime exposure to bright light, as compared to dim light, decreases sleepiness and improves psychomotor vigilance performance.* *Sleep*, 2003. 26(6): p. 695-700.
 67. Lockley, S., *Influence of light on circadian rhythmicity in humans.* *Encyclopedia of Neuroscience.* Oxford, UK, 2008.
 68. Veitch, J., et al., *Ocular lighting effects on human physiology and behaviour.* CIE

- Publication, 2004. 158.
69. Mills, P.R., S.C. Tomkins, and L.J. Schlangen, *The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance*. *Journal of circadian rhythms*, 2007. 5(1): p. 1-9.
 70. Chang, A.-M., et al., *Evening use of light-emitting eReaders negatively affects sleep, circadian timing, and next-morning alertness*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015. 112(4): p. 1232-1237.
 71. Mardaljevic, J., et al., *Daylighting, Artificial Lighting and Non-Visual Effects Study for a Residential Building*. 2012.
 72. Rea, M.S., *New benefit metrics for more valuable lighting*. *Journal of Light & Visual Environment*, 2013: p. IEIJ130000498.
 73. Ámundadóttir, M.L., S.W. Lockley, and M. Andersen, *A unified framework for evaluating non-visual spectral effectiveness of ocular light exposure: key concepts*. 2015.
 74. Hattar, S., et al., *Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity*. *Science*, 2002. 295(5557): p. 1065-1070.
 75. Gall, D. and K. Bieske, *Definition and measurement of circadian radiometric quantities*. 2004: Univ.-Bibliothek.
 76. Enezi, J.a., et al., *A “melanopic” spectral efficiency function predicts the sensitivity of melanopsin photoreceptors to polychromatic lights*. *Journal of biological rhythms*, 2011. 26(4): p. 314-323.
 77. Grassmann, P., XXXVII. *On the theory of compound colours*. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1854. 7(45): p. 254-264.
 78. Khalsa, S.B.S., et al., *A phase response curve to single bright light pulses in human subjects*. *The Journal of physiology*, 2003. 549(3): p. 945-952.
 79. Mansbach, P., *Phase Response Curve (PRC)*. [Online] Available at: <http://www.circadiansleepdisorders.org/info/PRC.php> [Accessed 22 July 2021]. 2014.

80. Inanici, M., M. Brennan, and E. Clark. *Spectral daylighting simulations: Computing circadian light*. in *Proceedings of BS2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, India*. 2015.
81. Ámundadóttir, M.L., S.W. Lockley, and M. Andersen. *Simulation-based evaluation of non-visual responses to daylight: proof-of-concept study of healthcare re-design*. in *BS 2013: 13th International Conference of the International Building Performance Simulation Association*. 2013.
82. Wandachowicz, K., *Calculation of the circadian illuminance distribution*. Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, 2006(52): p. 193-200.
83. Rea, M.S., et al., *Circadian light*. Journal of circadian rhythms, 2010. 8(1): p. 1-10.
84. Clark, E. and N. Lesniak, *Circadian Lighting Solutions Are Real and Important—Why Aren't They Being Used*. Metropolis, New York, 2017.
85. Stone, M.C., *Representing colors as three numbers [color graphics]*. IEEE Computer Graphics and Applications, 2005. 25(4): p. 78-85.
86. von Kries, J., *Chromatic Adaptation, Festschrift der Albercht-Ludwig-Universität*. 1902, Fribourg.
87. PN-EN12464-1, *Światło i oświetlenie – Oświetlenie miejsc pracy. Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach*. Polski Komitet Normalizacyjny 2012. . 2012.
88. CIE, *Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources, Vienna (Austria): CIE. Publication No: CIE 13.3-1995*. 1995, Commission Internationale de l'Eclairage.
89. Munsell, A.H., *Atlas of the Munsell color system*. 1915: Wadsworth, Howland & Company, Incorporated, Printers.
90. Wyszecki, G. and W.S. Stiles, *Color science*. Vol. 8. 1982: Wiley New York.
91. Schanda, J., *Colorimetry: understanding the CIE system*. 2007: John Wiley & Sons.
92. Davis, W. and Y. Ohno, *Approaches to color rendering measurement*. Journal of Modern Optics, 2009. 56(13): p. 1412-1419.

93. Caicedo, D., A. Pandharipande, and M. Vissenberg, *Smart modular lighting control system with dual-beam luminaires*. *Lighting Research & Technology*, 2015. 47(4): p. 389-404.
94. Imam, M.T., S. Afshari, and S. Mishra, *Smart lighting control systems*, in *Intelligent Building Control Systems*. 2018, Springer. p. 221-251.
95. Pandharipande, A. and G.R. Newsham, *Lighting controls: Evolution and revolution*. *Lighting Research & Technology*, 2018. 50(1): p. 115-128.
96. Gleason, J.D., et al., *Smart lighting clinical testbed pilot study on circadian phase advancement*. *IEEE journal of translational engineering in health and medicine*, 2019. 7: p. 1-10.
97. Tregenza, P., *The Monte Carlo method in lighting calculations*. *Lighting Research & Technology*, 1983. 15(4): p. 163-170.
98. Arvo, J., *Backward Ray tracing*, Chelmsford: Apollo comp, Inc.. 1986.
99. Shalaby, M., *The Effect of Architectural Configurations on the Biological Light Response in Residential Buildings*. 2017.
100. Ashton, K., *That 'internet of things' thing*. *RFID journal*, 2009. 22(7): p. 97-114.
101. พันธุ์พัฒนาสกุล, อ., et al. การพัฒนาระบบควบคุม เปิด-ปิด ไฟฟ้าและเครื่องปรับอากาศผ่านสมาร์ทโฟน. in การประชุมมหาดไทยวิชาการระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 10. 2563. สงขลา.
102. Khunchai, S. and C. Thongchaisuratkrul. *Development of Smart Home System Controlled by Android Application*. in *2019 6th International Conference on Technical Education (ICTechEd6)*. 2019. IEEE.
103. บุญอยู่, อ. and น. แก้วบรรพต, *Cloud Computing คืออะไร?* . *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ* 2558. 58: p. 1-4.
104. arduino, M. <https://www.myarduino.net/article>. 2021.
105. แซ่ ฉิน , ท . เร็ ย น เช็ ย น โป ร แ ก ร ม ตั ว ย *App Inventor* กั บ ค รุ ท วิ ป <https://programmingappinventor.wordpress.com/>. 2561.
106. Al Dahoud, A. and M. Fezari, *NodeMCU V3 For Fast IoT Application Development*. *Notes*, 2018. 5.
107. Mashkov, P., et al. *Tunable LED lamp-Design and thermal management*. in *2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*. 2015.

- IEEE.
108. Burgos-Fernandez, F.J., et al., *Spectrally tunable light source based on light-emitting diodes for custom lighting solutions*. *Optica Applicata*, 2016. 46(1): p. 117--129.
 109. Chew, I., et al., *A spectrally tunable smart LED lighting system with closed-loop control*. *IEEE Sensors Journal*, 2016. 16(11): p. 4452-4459.
 110. Lin, D., P. Zhong, and G. He, *Color temperature tunable white LED cluster with color rendering index above 98*. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017. 29(12): p. 1050-1053.
 111. Wei, M., B. Yang, and Y. Lin, *Optimization of a spectrally tunable LED daylight simulator*. *Color Research & Application*, 2017. 42(4): p. 419-423.
 112. El-Ghoroury, H.S., et al., *Color temperature tunable white light based on monolithic color-tunable light emitting diodes*. *Optics express*, 2020. 28(2): p. 1206-1215.
 113. Bohar, J., G.E. Fernandes, and J. Xu. *Spectral-temporal LED lighting modules for reproducing daily and seasonal solar circadian rhythmicities*. in *2017 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)*. 2017. IEEE.
 114. Papatsimpa, C. and J.-P. Linnartz, *Personalized office lighting for circadian health and improved sleep*. *Sensors*, 2020. 20(16): p. 4569.
 115. Marín-Doñágueda, M., et al., *Simultaneous optimization of circadian and color performance for smart lighting systems design*. *Energy and Buildings*, 2021. 252: p. 111456.
 116. Shishegar, N., et al., *Tuning environmental lighting improves objective and subjective sleep quality in older adults*. *Building and Environment*, 2021. 204: p. 108096.
 117. Nie, J., et al., *Low blue light hazard for tunable white light emitting diode with high color fidelity and circadian performances*. *Optics & Laser Technology*, 2021. 135: p. 106709.
 118. Zarindast, A., J. Wood, and A. Sharma, *A data-driven personalized smart lighting recommender system*. *arXiv preprint arXiv:2104.02164*, 2021.

119. Zandi, B., et al., *Melanopic limits of metamer spectral optimisation in multi-channel smart lighting systems*. *Energies*, 2021. 14(3): p. 527.
120. Andrew, J.M. *Sunpath3d*. Available at: <http://andrewmarsh.com/apps/staging/sunpath3d.html>. 2020.
121. Oh, J.H., S.J. Yang, and Y.R. Do, *Healthy, natural, efficient and tunable lighting: four-package white LEDs for optimizing the circadian effect, color quality and vision performance*. *Light: Science & Applications*, 2014. 3(2): p. e141-e141.
122. Nie, J., et al., *Tunable LED Lighting With Five Channels of RGCWW for High Circadian and Visual Performances*. *IEEE Photonics Journal*, 2019. 11: p. 1-12.
123. Koppel, T., *Dynamic Lighting System for Workplaces at Northern Latitudes*. *Safety of Technogenic Environment*, 2012(3): p. 39-44.
124. CIE, *Commission internationale de l'éclairage proceedings, 1931*. Cambridge University, Cambridge, 1931.
125. Arunchanayuth, J. and A. Srisutapan, *Guidelines for Using Circadian Daylighting Evaluation in Thailand*. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies (JARS)*, 2021. 18(1): p. 115-130.
126. Busatto, N., et al. *Circadian lighting experiences in an health residence for non self-sufficient elderly people*. in *Proceedings of BSO 2018: 4th Building Simulation and Optimization Conference*. 2018.
127. Figueiro, M.G., K. Gonzales, and D. PeDler, *Designing with circadian stimulus*. *Ld+ a*, 2016. 8: p. 30-34.
128. Li, Y., et al., *Effects of illuminance and correlated color temperature of indoor light on emotion perception*. *Scientific Reports*, 2021. 11(1): p. 1-12.
129. van Duijnhoven, J., et al. *Office light: Window distance and lighting conditions influencing occupational health*. in *Healthy Buildings Europe 2017, HB 2017*. 2017.
130. CIE, *Recommended System for Visual Performance Based Mesopic Photometry*. *CIE Publication*
191. Vienna. 2010.

131. Rosenthal, N.E., *Winter blues: Everything you need to know to beat seasonal affective disorder*. 2012: Guilford Press.
132. Speier, I. and M. Salsbury. *Color temperature tunable white light LED system*. in *Sixth International Conference on Solid State Lighting*. 2006. International Society for Optics and Photonics.
133. TN003, C., *Report on the First International Workshop on Circadian and neurophysiological Photometry*. 2015.
134. Oh, J.H., et al., *Analysis of circadian properties and healthy levels of blue light from smartphones at night*. *Scientific reports*, 2015. 5(1): p. 1-9.
135. Aubé, M., J. Roby, and M. Kocifaj, *Evaluating potential spectral impacts of various artificial lights on melatonin suppression, photosynthesis, and star visibility*. *PloS one*, 2013. 8(7): p. e67798.
136. Choi, S., A. Choi, and M. Sung, *Cloud-based lighting control systems: Fatigue analysis and recommended luminous environments*. *Building and Environment*, 2022: p. 108947.
137. Hansen, E.K., et al., *An experiment of double dynamic lighting in an office responding to sky and daylight: Perceived effects on comfort, atmosphere and work engagement*. *Indoor and Built Environment*, 2022. 31(2): p. 355-374.
138. Samiou, A., L. Doulos, and S. Zerefos, *Daylighting and artificial lighting criteria that promote performance and optical comfort in preschool classrooms*. *Energy and Buildings*, 2022. 258: p. 111819.
139. Aslanoğlu, R., et al., *An international survey on residential lighting: Analysis of winter-term results*. *Building and Environment*, 2021. 206: p. 108294.



ภาคผนวก ก

เอกสารรับรองการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในคน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภารกิจบริหารและธุรการ
วันที่ ๑๑ มี.ค. ๖๕ เวลา 11.23 น.
Lesspaper รับที่ ๐311

บันทึกข้อความ

ส่วนงาน คณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในคน กลุ่มสหสถาบัน ชุดที่ 1 โทร.0-2218-3202
ที่ จว 011/2565 (ผ) วันที่ 19 มกราคม 2565
เรื่อง แจ้งผลผ่านการพิจารณาจริยธรรมการวิจัย

เรียน คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

สิ่งที่ส่งมาด้วย เอกสารแจ้งผ่านการรับรองผลการพิจารณา

ตามที่นิสิต/บุคลากรในสังกัดของท่านได้เสนอโครงการวิจัยเพื่อขอรับการพิจารณาจริยธรรมการวิจัย จากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในคน กลุ่มสหสถาบัน ชุดที่ 1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย นั้น ในกรณี กรรมการผู้ทบทวนหลักได้เห็นสมควรให้ผ่านการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยได้ ดังนี้

โครงการวิจัยที่ 220.1/64 เรื่อง ระบบส่องสว่างอัจฉริยะสำหรับการเลียนแบบแสงในรอบวัน และแสงจ้า (A SMART LIGHTING SYSTEM FOR CIRCADIAN MIMICKING LIGHTING AND BRIGHT LIGHT) ของ นายสมยศ สันติมาลัย นิสิตระดับดุษฎีบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (๑๑ ไร่ ไร่)

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

จ.วิวัฒน์ มิวกันไธ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ระวีพันธ์ มีงักคณีย์)

กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในคน
กลุ่มสหสถาบัน ชุดที่ 1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ประกาศนียบัตร ผ่านการอบรมหลักสูตร GCP online Training
แนวทางการปฏิบัติการวิจัยทางคลินิกที่ดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



คณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในคน มธ. ชุดที่ 1 และ ศูนย์วิจัยทางคลินิก คณะแพทยศาสตร์

ประกาศนียบัตรฉบับนี้ได้เพื่อแสดงว่า

สมยศ สันติมาลัย

ได้ผ่านการอบรมหลักสูตร GCP online training (Computer based)
“แนวทางการปฏิบัติการวิจัยทางคลินิกที่ดี (ICH-GCP:E6(R2))”

ประกาศนียบัตรฉบับนี้มีผลตั้งแต่วันที่ 13 มิถุนายน 2564 ถึงวันที่ 13 มิถุนายน 2566

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์วิมล ชันตรีเมธียง)
ประธานคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในคน มธ. ชุดที่ 1

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์สมนิต มุ่งขวัญงษา)
รองคณบดีฝ่ายวิจัย





บันทึกข้อความ

สำนักงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ โทร. 02-218-6492-4

ที่ อว 64.17/ 3170

วันที่ 14 ตุลาคม 2564

เรื่อง ขอเชิญเป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบเครื่องมือวิจัย

เรียน รองศาสตราจารย์ ดร.สุรัชย์ ชัยทัศน์

ด้วย นายสมยศ สันติมาลัย รหัสประจำตัวนิสิต 6271021221 เป็นนิสิตหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร
 ดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ซึ่งอยู่ในระหว่างการดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์
 เรื่อง “ระบบส่องสว่างอัจฉริยะสำหรับการเลียนแบบแสงในรอบวันและแสงจ้า โดยมี รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย
 เตชสุนันต์ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ในการนี้จึงขอเชิญเป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบเครื่องมือวิจัย ทั้งนี้ยินดีจะได้
 ประสานงานในรายละเอียดต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อขอความอนุเคราะห์จากท่านโปรดเป็นผู้เชี่ยวชาญดังกล่าว เพื่อประโยชน์
 ทางวิชาการต่อไป และขอขอบคุณมาในโอกาสนี้

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 CHULALONGKORN UNIVERSITY



บันทึกข้อความ

สำนักงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ โทร. 02-218-6492-4

ที่ อว 64.17/ 3170

วันที่ 14 ตุลาคม 2564

เรื่อง ขอเชิญเป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบเครื่องมือวิจัย

เรียน อาจารย์ แพทย์หญิงปณิษฐา ศรีสวาท

ด้วย นายสมยศ สันติมาลัย รหัสประจำตัวนิสิต 6271021221 เป็นนิสิตหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ซึ่งอยู่ในระหว่างการดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์เรื่อง “ระบบส่องสว่างอัจฉริยะสำหรับการเลียนแบบแสงในรอบวันและแสงจ้า โดยมี รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ในการนี้จึงขอเชิญเป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบเครื่องมือวิจัย ทั้งนี้ นิสิตจะได้ประสานงานในรายละเอียดต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อขอความอนุเคราะห์จากท่านโปรดเป็นผู้เชี่ยวชาญดังกล่าว เพื่อประโยชน์ทางวิชาการต่อไป และขอขอบคุณมาในโอกาสนี้

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



บันทึกข้อความ

สำนักงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ โทร. 02-218-6492-4

ที่ อว 64.17/ 3170

วันที่ 14 ตุลาคม 2564

เรื่อง ขอเชิญเป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบเครื่องมือวิจัย

เรียน ดร.พิสิษฐ์พล จิรพจนานุกรักษ์

ด้วย นายสมยศ สันติมาลัย รหัสประจำตัวนิสิต 6271021221 เป็นนิสิตหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ซึ่งอยู่ในระหว่างการดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์เรื่อง “ระบบส่องสว่างอัจฉริยะสำหรับการเลียนแบบแสงในรอบวันและแสงจ้า โดยมี รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ในการนี้จึงขอเชิญเป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบเครื่องมือวิจัย ทั้งนี้ นิสิตจะได้ประสานงานในรายละเอียดต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อขอความอนุเคราะห์จากท่านโปรดเป็นผู้เชี่ยวชาญดังกล่าว เพื่อประโยชน์ทางวิชาการต่อไป และขอขอบคุณมาในโอกาสนี้

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ง

คู่มือแนวปฏิบัติในการประเมินและการบันทึกผลการประเมิน
ประสิทธิภาพและการรับรู้แสง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



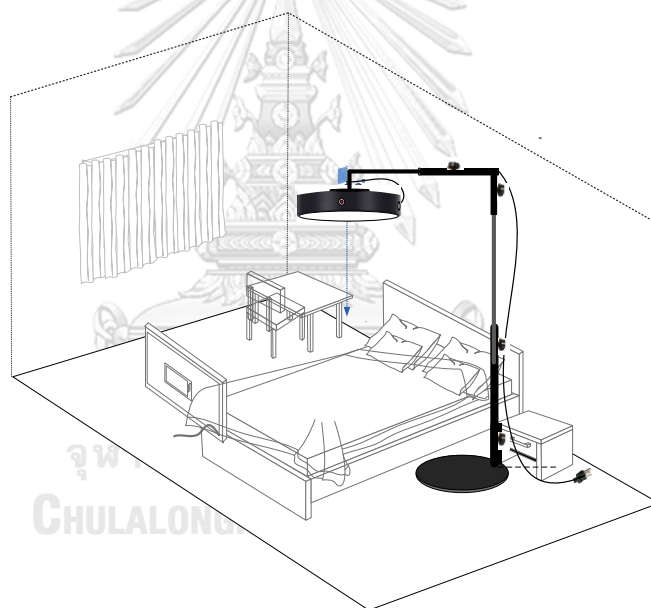
คู่มือแนวปฏิบัติในการประเมินและการบันทึกผลการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสง

สำหรับ

ผู้เข้าร่วมการวิจัย (รหัส

โครงการ

ระบบส่องสว่างอัจฉริยะสำหรับการเลียนแบบแสงในรอบวันและแสงจ้า



สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2565

คำนำ

คู่มือแนวปฏิบัติในการประเมินและการบันทึกผลการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสงฉบับนี้ได้เขียนขึ้น สำหรับการสร้างความเข้าใจและใช้สำหรับการอบรมเกี่ยวกับการติดตั้ง การใช้งาน โคมไฟ และเครื่องมือในการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของโคมไฟประดิษฐ์และโคมไฟทางการค้าระหว่างผู้เข้าร่วมการวิจัยและผู้วิจัย โครงการระบบส่องสว่างอัจฉริยะสำหรับการเลียนแบบแสงในรอบวันและแสงจ้า รวมทั้งสำหรับการบันทึกข้อมูลตั้งแต่ขั้นตอนแสดงยินยอมของผู้สนใจเพื่อเข้าร่วมวิจัย ขั้นตอนการคัดกรองผู้เข้าร่วมการวิจัย ขั้นตอนการอบรม และขั้นตอนการประเมิน ข้อมูลเกี่ยวกับความปลอดภัย รวมถึงรายละเอียดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารระหว่างผู้วิจัยและผู้เข้าร่วมวิจัยในกรณีต่าง ๆ เพื่อความปลอดภัยของผู้เข้าร่วมการวิจัยระหว่างการดำเนินงานวิจัย ทั้งนี้ หากมีข้อมูลใดที่ท่านสงสัยหรือผิดพลาดสามารถประสานมายังผู้วิจัยได้ที่ ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้เข้าร่วมวิจัยเป็นอย่างสูงสำหรับการเสียสละเวลาของท่านในการเข้าร่วมการวิจัยครั้งนี้ ถึงแม้งานวิจัยนี้อาจจะไม่มีประโยชน์ต่อท่านโดยตรง แต่ข้อมูลที่ได้จากการเสียสละของท่านนี้สามารถก่อประโยชน์ต่อการพัฒนาด้านเทคโนโลยีแสงของประเทศและของโลกต่อไป

ขอขอบพระคุณยิ่ง
สมยศ สันติมาลัย
ผู้วิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

เนื้อหา	หน้าที่
ส่วนที่ 1 สำหรับผู้สนใจเข้าร่วมการวิจัย	4
1.1 คำชี้แจงโครงการวิจัย	5
1.2 เอกสารข้อมูลสำหรับผู้มีส่วนร่วมในการวิจัยและหนังสือแสดงยินยอมเข้าร่วมการวิจัย	8
1.3 แบบคัดกรองคุณสมบัติผู้เข้าร่วมการวิจัย	12
ส่วนที่ 2 สำหรับผู้ที่มีคุณสมบัติเป็นผู้เข้าร่วมการวิจัย	13
2.1 กำหนดการและขั้นตอนการเข้าร่วมการดำเนินการวิจัย	14
2.2 การอบรมเกี่ยวกับการใช้คอมพิวเตอร์	14
2.2.1 คอมพิวเตอร์ประดิษฐ์	14
2.2.2 คอมพิวเตอร์ทางการค้า	15
2.2.3 วิธีการติดตั้งคอมพิวเตอร์	15
2.2.4 วิธีการใช้งานคอมพิวเตอร์	17
2.2.5 ค่าเดือนและข้อพึงระวัง	17
2.3 การอบรมเกี่ยวกับแนวปฏิบัติในการทดสอบ	17
2.3.1 แนวทางในการทดสอบ	17
2.3.2 แบบฝึกปฏิบัติการสอบด้วยตนเอง	19
ส่วนที่ 3 สำหรับการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของคอมพิวเตอร์	22
3.1 แนวทางในการปฏิบัติ	23
3.2 แบบบันทึกผลการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของคอมพิวเตอร์ประดิษฐ์	26
3.2.1 การทดสอบวันแรก	26
3.2.2 การทดสอบวันที่สอง	35
3.2.3 แบบประเมินภาพรวมของคอมพิวเตอร์ประดิษฐ์	43
3.3 แบบบันทึกผลการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของคอมพิวเตอร์ทางการค้า	44
3.3.1 การทดสอบวันที่สาม	44
3.3.2 แบบประเมินภาพรวมของคอมพิวเตอร์ทางการค้า	46
3.4 แนวปฏิบัติเมื่อเสร็จสิ้นการประเมิน	46
คำกล่าวขอขอบคุณผู้เข้าร่วมวิจัย	46



ส่วนที่ 1
สำหรับผู้สนใจเข้าร่วมการวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1. คำชี้แจงโครงการวิจัย

ชื่อโครงการวิจัย ระบบส่องสว่างอัจฉริยะสำหรับการเลียนแบบแสงในรอบวันและแสงจ้า

ชื่อผู้วิจัย นายสมยศ สันติมาลัย **ตำแหน่ง** นิสิตปริญญาเอก

สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โทรศัพท์มือถือ 086-8305373 **E-mail:** somyod.santimalai@gmail.com

ที่มาและความสำคัญ

รูปแบบการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ในปัจจุบันพบว่ามีความแตกต่างจากอดีตเป็นอย่างมาก ซึ่งมีผลทำให้มีผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตทั้งในด้านบวกและด้านลบ แสงถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการใช้ชีวิต ถือได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญของชีวิต ในอดีตมนุษย์ได้รับแสงจากดวงอาทิตย์ซึ่งเป็นแสงธรรมชาติเป็นหลัก ทำให้เกิดรูปแบบของชีวิตตามวัฏจักรของแสงในรอบวันและทำให้เกิดกระบวนการทางชีวภาพที่เรียกว่านาฬิกาชีวิตขึ้น ซึ่งทำให้มนุษย์และสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ มีการกำหนดกิจวัตรประจำวันทำให้สมดุลของร่างกายเป็นไปตามปกติ จนกระทั่งต่อมา เมื่อมีการค้นพบไฟทำให้มนุษย์เริ่มรู้จักแสง และนำไปสู่การค้นพบไฟฟ้าในระยะต่อมาซึ่งนำไปสู่การสร้างแสงประดิษฐ์ขึ้นเพื่อนำมาใช้เอื้ออำนวยความสะดวกในการใช้ชีวิตและการทำงานของมนุษย์มากยิ่งขึ้น โดยปัจจุบันเรามีการพัฒนาแหล่งจ่ายของแสงได้หลากหลายชนิด อย่างไรก็ตามการที่มนุษย์ได้รับแสงสว่างในเวลากลางคืนนั้นย่อมมีผลต่อกระบวนการทางสรีรวิทยาของมนุษย์ด้วย โดยเฉพาะการได้รับแสงทำให้มนุษย์เกิดการตื่นตัว แล้วทำให้วัฏจักรการหลับนอน การตื่นนอนเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ยังมีผลต่อการทำงานของระบบฮอร์โมนและการสื่อสารสัญญาณประสาท การควบคุมการทำงานของร่างกายเปลี่ยนแปลงไปอย่างไม่รู้ตัว ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อมนุษย์ในระยะยาวได้ เพื่อการลดผลกระทบดังกล่าวปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีแสงจึงได้มีความพยายามที่จะเลียนแบบแสงในรอบวันเพื่อให้มนุษย์ได้รับแสงใกล้เคียงกับธรรมชาติมากที่สุด ซึ่งอาจจะช่วยลดผลกระทบต่อร่างกายอันเนื่องมาจากการรับแสงที่ไม่เหมาะสม

ดังนั้น โครงการวิจัยจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบส่องสว่างโดยอาศัยหลักการเลียนแบบแสงในรอบวันของประเทศไทย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้หลอดแอลอีดี (LED) ที่มีการออกแบบระบบควบคุมเฉพาะ และได้มีการศึกษาประสิทธิภาพเกี่ยวกับแสงของหลอดมาแล้วเบื้องต้น โดยปริมาณแสงมีความเหมาะสมอยู่ในช่วงมาตรฐานของการใช้งาน ตามคู่มือแนวทางการออกแบบการส่องสว่างภายในอาคาร สมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2563 และตามวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้ (EN 12464-1, 2011; CIE S 008/E, 2002) โดยงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาการพัฒนาระบบส่องสว่างอัจฉริยะสำหรับการเลียนแบบแสงในรอบวันและแสงจ้า ซึ่งมีการศึกษาแนวทางในการ

พัฒนาหลอดและระบบควบคุมเพื่อให้ได้แสงและโคมไฟแสงประดิษฐ์ที่มีความเหมาะสมและปลอดภัย และตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ซึ่งประกอบด้วย 4 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 การศึกษาสมบัติทางสเปกโตรเมตริก (spectrometric) ของแสงในรอบวัน (Circadian lighting) ซึ่งเป็นการศึกษาสมบัติของแสงในรอบวันของประเทศไทย ทั้งในฤดูร้อนและฤดูหนาว ในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งตั้งอยู่ในอำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดมหาสารคาม เพื่อเป็นตัวแทนของสมบัติแสงในประเทศไทย

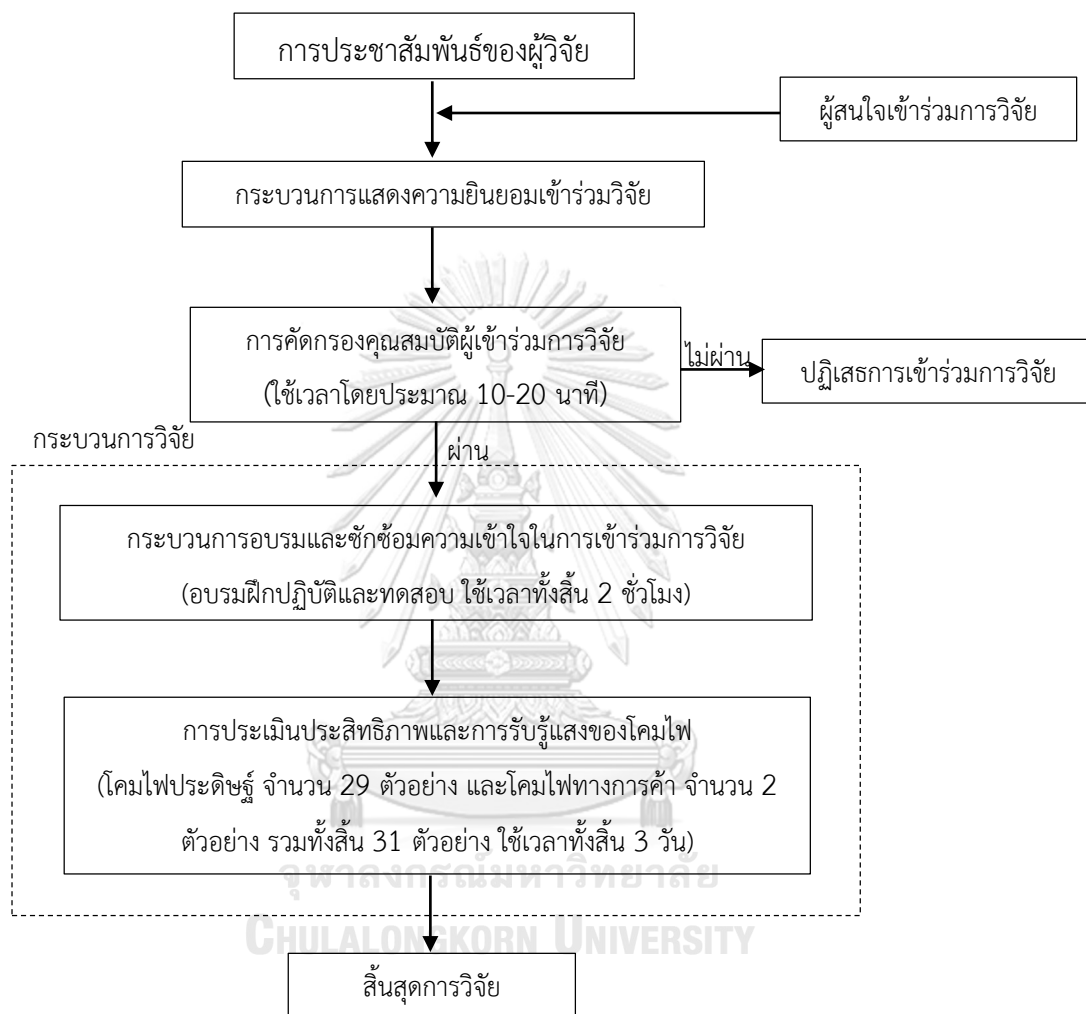
ตอนที่ 2 การสร้างและติดตั้งระบบส่องสว่าง ในการศึกษาขั้นตอนนี้ดำเนินการเพื่อคัดเลือกชนิดของหลอดแอลอีดี (LED) และพัฒนาระบบควบคุม (control system) การให้แสงของหลอด

ตอนที่ 3 การออกแบบระบบควบคุม RGB-LED เพื่อผลิตแสงเลียนแบบแสงในรอบวัน ในขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยได้นำสมบัติเกี่ยวกับค่าอุณหภูมิสัมพัทธ์ของแสง (CCT) จากสเปกตรัมของแสงในแต่ละช่วงมาใช้ในการออกแบบรหัสควบคุมการให้แสงของหลอดและได้พัฒนารูปแบบลักษณะของโคมไฟแสงประดิษฐ์ขึ้น เพื่อให้หลอดสามารถเลียนแบบแสงในรอบวันและให้มีระดับที่ปลอดภัย โดยปริมาณแสงมีความเหมาะสมอยู่ในช่วงมาตรฐานของการใช้งาน ตามคู่มือแนวทางการออกแบบการส่องสว่างภายในอาคาร สมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2563 และตามวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้ (EN 12464-1, 2011; CIE S 008/E, 2002)

ตอนที่ 4 การพัฒนาระบบอัจฉริยะในการให้แสงในรอบวัน (smart circadian lighting system) ในขั้นตอนนี้จะเป็นการพัฒนาอัจฉริยะในการทำงานของหลอดให้มีลักษณะการทำงานแบบอัตโนมัติและสามารถเลือกรูปแบบในการทำงานของโคมไฟแสงประดิษฐ์ได้และให้อยู่ในระดับของแสงที่ปลอดภัยตามคู่มือแนวทางการออกแบบการส่องสว่างภายในอาคารเช่นเดียวกับตอนที่ 3 ทั้งนี้เพื่อให้การศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของแสงแต่ละช่วงที่ใช้ในการออกแบบหลอดนั้นมีข้อมูลที่สอดคล้องกับเป้าหมายในการนำไปใช้ จึงจำเป็นต้องประเมินความพึงพอใจและประสิทธิภาพของหลอดโดยมนุษย์

ด้วยเหตุนี้ ทางผู้วิจัยจึงมีความประสงค์เรียนเชิญท่านเข้าร่วมในโครงการวิจัยนี้ ทั้งนี้ ขอให้ท่านอ่านคู่มือการใช้งาน แนวปฏิบัติ และการประเมินฉบับนี้อย่างถี่ถ้วน เพื่อให้ท่านได้ทราบถึงเหตุผลและรายละเอียดของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ หากท่านมีข้อสงสัยใด ๆ เพิ่มเติม กรุณาซักถามจากผู้ทำวิจัย ซึ่งจะเป็นผู้ที่สามารถตอบคำถามและให้ความกระจ่างแก่ท่านได้ และท่านสามารถขอคำแนะนำในการเข้าร่วมโครงการวิจัยนี้จากครอบครัว เพื่อน หรือแพทย์ประจำตัวของท่านได้ ท่านมีเวลาอย่างเพียงพอในการตัดสินใจโดยอิสระ ถ้าท่านตัดสินใจแล้วว่าจะเข้าร่วมในโครงการวิจัยนี้ ขอให้ท่านลงนามในเอกสารข้อมูลสำหรับผู้มีส่วนร่วมในการวิจัยและหนังสือแสดงยินยอมเข้าร่วมการวิจัย ในหัวข้อ 1.2

ทั้งนี้ หากท่านได้ยินยอม ทางผู้วิจัยขอความอนุเคราะห์เท่าเข้าสู่กระบวนการคัดกรองคุณสมบัติผู้เข้าร่วมการวิจัย หลังจากนั้นหากท่านผ่านคุณสมบัติทางผู้วิจัยจะทำการประสานกับท่านเพื่อเข้าร่วมการวิจัยต่อไป



ภาพที่ 1 ขั้นตอนในการเข้าร่วมการวิจัย

1.2 เอกสารข้อมูลสำหรับผู้มีส่วนร่วมในการวิจัยและหนังสือแสดงยินยอมเข้าร่วมการวิจัย

ชื่อโครงการวิจัย ระบบส่องสว่างอัจฉริยะสำหรับการเลียนแบบแสงในรอบวันและแสงจ้า

ชื่อผู้วิจัย นายสมยศ สันติมาลัย **ตำแหน่ง** นิสิตปริญญาเอก

สถานที่ติดต่อผู้วิจัย (ที่ทำงาน) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ที่บ้าน) 3/56 ถ.บ้านบึง-บ้านค่าย ต.บ้านบึง อ.บ้านบึง จ.ชลบุรี 20170

โทรศัพท์มือถือ 086-8305373 **E-mail:** somyod.santimalai@gmail.com

ขอเรียนเชิญเข้าร่วมการวิจัย ก่อนตัดสินใจเข้าร่วมในการวิจัย โปรดทำความเข้าใจว่างานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับอะไรและทำเพราะเหตุใด กรุณาใช้เวลาในการอ่านข้อมูลต่อไปนี้อย่างรอบคอบ หากมีข้อความใดที่อ่านแล้วไม่เข้าใจหรือไม่ชัดเจน โปรดสอบถามเพิ่มเติมกับผู้วิจัยได้ตลอดเวลา ผู้วิจัยจะอธิบายจนกว่าจะเข้าใจอย่างชัดเจน

1. โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างหลอดประดิษฐ์ที่มีการเลียนแบบแสงในรอบวัน (ของประเทศไทย) ซึ่งเป็นหลอดไฟแอลอีดี (LED) ที่มีการออกแบบระบบควบคุมเฉพาะ และได้มีการศึกษาประสิทธิภาพเกี่ยวกับแสงของหลอดมาแล้วเบื้องต้น โดยปริมาณแสงมีความเหมาะสมอยู่ในช่วงมาตรฐานของการใช้งานและตามวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้ เพื่อให้การศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของแสงแต่ละช่วงที่ใช้ในการออกแบบหลอดนั้นมีข้อมูลที่สอดคล้องกับเป้าหมายในการนำไปใช้ จึงจำเป็นต้องประเมินความพึงพอใจและประสิทธิภาพของหลอดโดยมนุษย์
2. หากผู้สนใจเข้าร่วมเป็นอาสาสมัครทางสื่อ โดยให้ผู้สนใจสามารถติดต่อผู้วิจัยได้ โดยตรง เมื่อผู้เข้าการวิจัยได้รับการติดต่อเพื่อนัดหมายเข้ารับฟังคำชี้แจงในการเข้าร่วมการวิจัย อาสาสมัครจะได้รับคำชี้แจงวัตถุประสงค์ วิธีการดำเนินการวิจัย และความเสี่ยงจากการวิจัย โดยผู้วิจัยอย่างละเอียด พร้อมลงลายมือรับรองเข้าร่วมการวิจัยในใบแสดงความยินยอมเข้าร่วมการวิจัยก่อนการเข้ารับการทดสอบ

3. รายละเอียดของผู้เข้าร่วมการวิจัยและคุณสมบัติ

การทดสอบในครั้งนี้ใช้อาสาสมัครที่มีสุขภาพดีจำนวน 32 คน โดยใช้เกณฑ์การคัดเลือกผู้เข้าร่วมวิจัย ดังนี้

เกณฑ์การคัดเลือก (inclusion criteria)

- เป็นผู้ที่มีอายุตั้งแต่ 35 – 60 ปี (นับตามวันเดือนปีที่เกิด)

- ไม่เป็นโรคติดต่อและโรคติดเชื้อร้ายแรง ได้แก่ วัณโรค ภูมิคุ้มกันบกพร่อง โควิด-19 โรคหัด โรคอีสุกอีใส โรคไขหวัด โรคตาแดง เป็นต้น
- ไม่อยู่ในระหว่างการรักษาหรือการบำบัดโรคที่เป็นอุปสรรคต่อการเข้าร่วมการทดสอบ เช่น ผ่าตัดดวงตา ผู้ป่วยที่อยู่ในระยะพักฟื้นหลังการรักษาที่ไม่สามารถช่วยเหลือตนเองได้ หรือไม่เหมาะสมต่อการทำกิจกรรมเป็นระยะเวลานาน เป็นต้น
- ไม่เป็นหญิงมีครรภ์ หรือ หลังคลอด หรือ ระหว่างให้นมบุตร
- ไม่มีปัญหาด้านการมองเห็นที่เป็นอุปสรรคต่อการรับแสง เช่น ตาบอดสี เป็นต้น
- ในบ้านหรือห้องพักมีเครื่องปรับอากาศและม่านปิดแสง
- ยินยอมให้มีการติดตั้งคอมพิวเตอร์ในบ้านได้
- มีห้องพักขนาดความกว้าง x ความยาว x ความสูง อย่างน้อย 3 เมตร x 3 เมตร x 2.5 เมตร
- มีความสามารถในการอ่านภาษาไทยได้
- มีความสามารถใช้นิตบุคได้ (ทางผู้วิจัยจะให้ยืมใช้ในการทดสอบ)
- มีความพร้อมในการเข้าร่วมกระบวนการวิจัย

เกณฑ์การออก (Exclusion criteria)

- มีอาการปวด หรือ ระคายเคืองตาระหว่างการทดสอบ
- มีอาการวิงเวียนศีรษะ หรือ อาเจียน ขณะทำการทดสอบกระบวนการ
- ขอดถอนตัวจากการเข้าร่วมระหว่างการวิจัย

5. ในการเข้าร่วมงานวิจัย มีการดำเนินการกับผู้มีส่วนร่วมในการวิจัย ดังนี้

- ก่อนการทดสอบ ให้ท่านกรอกข้อมูลส่วนตัวของท่านลงในแบบคัดกรองประวัติผู้เข้าร่วมการวิจัย ซึ่งมีจำนวน 10 ข้อ และข้อมูลส่วนตัวของผู้เข้าร่วมการวิจัยจำนวน 6 คำถาม ใช้เวลาประมาณ 1 – 2 นาที และรบกวนท่านอ่านคำชี้แจงเกี่ยวกับกิจกรรมระหว่างการทดสอบอีกครั้ง
- หลังจากท่านผ่านเกณฑ์การคัดกรองคุณสมบัติแล้วท่านจะได้รับคู่มือแนวปฏิบัติในการประเมินและการบันทึกการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสง และทางผู้วิจัยจะแจ้งทำการนัดหมายท่านเพื่ออบรมเกี่ยวกับแนวปฏิบัติในการทดสอบ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง (ล่วงหน้าอย่างน้อย 1 วันก่อนการทดสอบ)
- ก่อนการทดสอบนั้นผู้เข้าร่วมการทดสอบจะได้รับการอบรมการติดตั้งอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ ประดิษฐ์ และคู่มือการใช้งาน รวมถึงจะได้รับ

- โคมไฟแสงประดิษฐ์ จำนวน 1 โคม
 - โคมไฟทางการค้า จำนวน 1 โคม
 - คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก จำนวน 1 เครื่อง (สภาพพร้อมใช้งาน)
 - นาฬิกาจับเวลา จำนวน 1 เครื่อง
 - โต๊ะทำงาน จำนวน 1 ตัว (กรณีผู้เข้าร่วมการวิจัยไม่มี)
- ก่อนการทดสอบขอให้ผู้เข้าร่วมทดสอบเลือกห้องที่มีอากาศถ่ายเท ปลอดภัย หรือ สภาพแวดล้อมการใช้ชีวิตประจำวันของท่าน และควรมีเครื่องปรับอากาศระหว่างการทดสอบ และที่สำคัญต้องปิดประตูและหน้าต่าง (หากเป็นกระจกให้ใช้ผ้ามาปิดให้มิดชิด) ในระหว่างการทดสอบ
 - กรณีที่ท่านมีความจำเป็นต้องสวมแว่นสายตาสั้น หรือ สายตายาว ในการทดสอบขอให้ท่านสวมแว่นที่มีเลนส์ใส ไม่มีสี หรือที่ไม่ใช่เลนส์ชนิดกรองแสง
 - ก่อนการทดสอบขอความร่วมมือผู้เข้าร่วมการทดสอบงดดื่มกาแฟหรือเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนเป็นส่วนผสม อย่างน้อย 1 วัน
 - ให้ปิดดวงไฟในห้องเดิมก่อนเริ่มกระบวนการทดสอบโคมไฟแสงประดิษฐ์และโคมไฟทางการค้า
 - ในการทดสอบเกี่ยวกับการรับรู้แสงนี้จะมีตัวอย่างแสงทั้งสิ้น 31 ตัวอย่าง และใช้เวลารวม 3 วัน ในการทดสอบ โดยผู้เข้าร่วมการรับรู้แสงนี้จะต้องดำเนินการกิจกรรมตามเวลาที่กำหนด
 - ระหว่างการทดสอบ ท่านสามารถนั่งบนเก้าอี้ หรือ เติง สามารถนอนได้ (ห้ามหลับระหว่างการทดสอบ)
 - ระหว่างการทดสอบ ท่านสามารถทำกิจกรรมต่าง ๆ ได้ โดยอยู่ในรัศมี 1 เมตร จากแนวตรงกลางของแสงที่กระทบพื้น ซึ่งกิจกรรมดังกล่าวต้องที่ไม่กระทบต่อร่างกายและอารมณ์ของท่านมากเกินไป
 - ในการประเมินโดยตอบคำถามในส่วนของ 2 เกี่ยวกับความพึงพอใจและข้อมูลการใช้แสงประดิษฐ์ มีข้อคำถาม จำนวน 10 ข้อ
 - ในการทดสอบตัวอย่างแสงแต่ละตัวอย่างนั้น ให้ท่านหลับตา นาน 5 นาที แล้วจึงลืมตาขึ้น แล้วให้ดวงตาปรับแสง 15 นาที โดยมองไปรอบ ๆ ห้อง และสามารถกระพริบตาได้ตามปกติ แล้วจึงจะเริ่มตอบคำถามในข้อ (1) – ข้อ (6) แล้วจึงทำกิจกรรมใน ข้อที่ (7) การอ่านหนังสือ และ ข้อที่ (8) การอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์ แล้วจึงให้คะแนนประเมิน (ตอบจำนวน 31 ตัวอย่าง)

- สำหรับคำถามในส่วนที่ 2 ข้อที่ (9) และ ข้อที่ (10) ให้ดำเนินการประเมินเมื่อสิ้นสุดการทดสอบทั้งหมด (ตอบครั้งเดียว)
- เมื่อสิ้นสุดการทดสอบแล้วให้ผู้เข้าร่วมการวิจัย แจ้งต่อผู้วิจัย เพื่อดำเนินการต่อไป
- ทั้งนี้ หากมีข้อขัดข้องระหว่างการทดสอบให้แจ้งต่อผู้วิจัยทันทีที่ **นายสมยศ สันติมาลัย**
โทรศัพท์ 086-8305373

6. ความเสี่ยง/อันตราย และความไม่สะดวกต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากการเข้าร่วมการวิจัย

นอกจากท่านได้สละเวลาส่วนตัว ในระหว่างการทดสอบตัวอย่างแอสอง อาจมีผลต่อร่างกายท่าน เช่น การระคายเคืองต่อดวงตา อาการเวียนศีรษะ คลื่นไส้ หากท่านมีอาการดังกล่าวข้างต้น ให้ท่านพักการทดสอบทันที แล้วให้ปิดตาชั่วขณะ ให้รอสังเกตอาการ หากมีอาการที่ไม่ดี ให้รีบแจ้งต่อ **ผู้วิจัยทันที (หมายเลขโทรศัพท์ 086-8305373)** การส่งต่อการรักษาไปยังโรงพยาบาลของรัฐ เพื่อเข้ารับการรักษาโดยแพทย์ต่อไป หากผู้เข้าร่วมการวิจัยเกิดผลข้างเคียงจากการศึกษานี้ และผู้วิจัยจะเป็นผู้รับผิดชอบการรักษาให้ทั้งหมดจนหายดี และในกรณีที่คอมพิวเตอร์และโปรแกรมที่ใช้จะเกิดความเสียหายขอความร่วมมือผู้เข้าร่วมการวิจัยหยุดการทดลองทันทีและรีบประสานมายังผู้วิจัยทันที ทั้งนี้ผู้เข้าร่วมวิจัยไม่ต้องชดเชยค่าเสียหายที่เกิดขึ้น

7. ประโยชน์ในการเข้าร่วมการวิจัย

จากการที่ท่านช่วยเสียสละเวลาในการเข้าร่วมการวิจัยครั้งนี้ก่อให้เกิดประโยชน์ทางวิชาการ เกี่ยวกับการนำไปพัฒนาเกี่ยวกับเทคโนโลยีแสงที่มีต่อสุขภาพของมนุษย์ต่อไปในอนาคต

8. ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับผู้มีส่วนร่วมในการวิจัยจะเก็บเป็นความลับโดยเอกสารยินยอมจะเก็บไว้ในตู้ที่มีกุญแจที่ต้องใช้รหัสผ่านในการเปิดและข้อมูลในการไปใช้วิเคราะห์จะกำหนดรหัสผู้มีส่วนร่วมแทนการใช้ชื่อ-นามสกุลจริง หากมีการเสนอผลการวิจัยจะเสนอเป็นภาพรวม ข้อมูลใดที่สามารถระบุถึงตัวผู้มีส่วนร่วมในการวิจัยได้จะไม่ปรากฏในรายงาน

9. เมื่อเสร็จสิ้นการวิจัยแล้ว ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับผู้เข้าร่วมวิจัยทั้งหมดจะถูกทำลาย

10. ผู้วิจัยไม่มีอะไรจะมอบให้นอกจากคำขอบคุณที่ท่านสละเวลามาร่วมงานวิจัย ไม่มีค่าเสียเวลาในการเข้าร่วมงานวิจัย ไม่มีค่าพาหนะ เป็นต้น

11. การเข้าร่วมการวิจัยเป็นโดย **สมัครใจ** สามารถปฏิเสธที่จะเข้าร่วมหรือถอนตัวจากการวิจัยได้ทุกขณะ โดยไม่ต้องให้เหตุผล ไม่สูญเสียประโยชน์ที่พึงได้รับ และไม่มีผลกระทบใด ๆ ต่อผู้เข้าร่วมวิจัย

12. หากมีข้อสงสัย โปรดสอบถามเพิ่มเติมจากผู้วิจัยได้ตลอดเวลา และหากผู้วิจัยมีข้อมูลเพิ่มเติมที่เป็นประโยชน์หรือโทษเกี่ยวกับการวิจัย ผู้วิจัยจะแจ้งให้ท่านทราบอย่างรวดเร็ว
13. หากได้รับการปฏิบัติไม่ตรงตามข้อมูลดังกล่าวสามารถร้องเรียนได้ที่ คณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในคน กลุ่มสหสถาบัน ชุดที่ 1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 254 อาคารจามจุรี 1 ชั้น 2 ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทรศัพท์ 0-2218-3202, 0-2218-3049 E-mail: eccu@chula.ac.th

ข้าพเจ้าได้รับการอธิบายจากผู้วิจัย และเข้าใจข้อมูลดังกล่าวข้างต้นทุกประการแล้ว จึงลงนามเข้าร่วมการวิจัยนี้ด้วยความสมัครใจ และได้รับเอกสารไว้ 1 ชุดแล้ว

ลงชื่อ.....

(นายสมยศ สันติมาลัย)

ผู้วิจัยหลัก

วันที่...../...../.....

ลงชื่อ.....

(.....)

ผู้เข้าร่วมการวิจัย

วันที่...../...../.....

ลงชื่อ.....

(.....)

พยาน

วันที่...../...../.....

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.3 แบบคัดกรองคุณสมบัติผู้เข้าร่วมการวิจัย

ส่วนที่ 1 แบบคัดกรองประวัติผู้เข้าร่วมวิจัย

ผู้เข้าร่วมวิจัย รหัส มีอายุ ปี (นับวันเดือนปีเกิด) เพศ ชาย หญิง

คำชี้แจง โปรดทำเครื่องหมาย / ในช่องคำตอบตามความเป็นจริงของท่าน

คำถาม	รายละเอียด	ใช่	ไม่ใช่	หมายเหตุ
ข้อที่ 1	ท่านไม่มีโรคติดต่อและโรคติดเชื้อร้ายแรง ดังต่อไปนี้ ได้แก่ วัณโรค ภูมิคุ้มกันบกพร่อง โควิด-19 โรคหัด โรคอีสุกอีใส โรคไขหวัด โรคตาแดง เป็นต้น			
ข้อที่ 2	ไม่อยู่ในระหว่างการรักษาหรือการบำบัดโรคที่เป็นอุปสรรคต่อการเข้าร่วมการทดสอบ เช่น ผ่าตัดดวงตา ผู้ป่วยที่อยู่ในระยะพักฟื้นหลังการรักษา			
ข้อที่ 3	ไม่เป็นหญิงมีครรภ์ หรือ หลังคลอด หรือ ระหว่างให้นมบุตร			
ข้อที่ 4	ไม่มีปัญหาด้านการมองเห็นที่เป็นอุปสรรคต่อการรับแสง เช่น ตาบอดสี เป็นต้น			
ข้อที่ 5	ในบ้านหรือห้องพักของท่านมีเครื่องปรับอากาศ และมานเปิดแสง			
ข้อที่ 6	ยินยอมให้มีการติดตั้งคอมพิวเตอร์แบบตั้งพื้นชั่วคราวในบ้านได้			
ข้อที่ 7	มีห้องพักขนาดความกว้าง x ความยาว x ความสูง อย่างน้อย 3 x 3 x 2.5 เมตร			
ข้อที่ 8	มีความสามารถในการอ่านภาษาไทยได้			
ข้อที่ 9	มีความสามารถใช้โน้ตบุ๊คได้ (ทางผู้วิจัยจะให้ยืมใช้ในการทดสอบ)			
ข้อที่ 10	มีความพร้อมในการเข้าร่วมกระบวนการวิจัย			

ส่วนที่ 2 ข้อมูลส่วนตัวของผู้ร่วมวิจัย

คำถาม	รายละเอียด
ท่านมีโรคประจำตัวหรือไม่	<input type="checkbox"/> ไม่มี <input type="checkbox"/> มี <input type="checkbox"/> โรคอ้วน <input type="checkbox"/> โรคเบาหวาน <input type="checkbox"/> โรคความดันโลหิตสูง <input type="checkbox"/> โรคไต <input type="checkbox"/> อื่น ๆ
ในระยะ 2-4 สัปดาห์ที่ผ่านมาท่าน	<input type="checkbox"/> มีความเครียด <input type="checkbox"/> ไม่มี ความเครียด
ในระยะ 2-4 สัปดาห์ที่ผ่านมาท่านนอนหลับพักผ่อนวันละกี่ชั่วโมง	<input type="checkbox"/> < 6 ชั่วโมง <input type="checkbox"/> 6 ชั่วโมง <input type="checkbox"/> 7 ชั่วโมง <input type="checkbox"/> 8 ชั่วโมง <input type="checkbox"/> > 8 ชั่วโมง
ในระยะ 2-4 สัปดาห์ที่ผ่านมาท่านใช้สายตาอยู่กับอุปกรณ์ต่อไปนี้นานเท่าไร (ต่อวัน)	คอมพิวเตอร์/โน้ตบุ๊ค/iPad <input type="checkbox"/> < 2 ชั่วโมง <input type="checkbox"/> 2 - 4 ชั่วโมง <input type="checkbox"/> 5 - 6 ชั่วโมง <input type="checkbox"/> > 6 ชั่วโมง อุปกรณ์มือถือ/Smart phone <input type="checkbox"/> < 2 ชั่วโมง <input type="checkbox"/> 2 - 4 ชั่วโมง <input type="checkbox"/> 5 - 6 ชั่วโมง <input type="checkbox"/> > 6 ชั่วโมง โทรทัศน์ <input type="checkbox"/> < 2 ชั่วโมง <input type="checkbox"/> 2 - 4 ชั่วโมง <input type="checkbox"/> 5 - 6 ชั่วโมง <input type="checkbox"/> > 6 ชั่วโมง
สุขภาพทางตา	<input type="checkbox"/> สายตาสั้น <input type="checkbox"/> สายตาสั้น <input type="checkbox"/> สายตายาว <input type="checkbox"/> สายตาเอียง
ในชีวิตประจำวันท่านต้องสวมแว่นตลอดเวลาหรือไม่ ถึงจะสามารถสังเกตวัตถุชัด	<input type="checkbox"/> ไม่ต้อง <input type="checkbox"/> ต้องสวม <input type="checkbox"/> ในระยะใกล้ ๆ (ไม่สามารถสังเกตเห็นวัตถุได้ชัด) <input type="checkbox"/> ในระยะมากกว่า 2 เมตร

ส่วนที่ 2

สำหรับผู้ที่มีคุณสมบัติเป็นผู้เข้าร่วมการวิจัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.1 กำหนดการและขั้นตอนการเข้าร่วมการดำเนินการวิจัย

เพื่อให้มีความเข้าใจถึงกระบวนการทดสอบ ดังนั้นในการเข้าร่วมการวิจัย ผู้เข้าร่วมการวิจัย จะต้องเข้าร่วมกิจกรรมดังต่อไปนี้

กำหนดการนัดหมาย วันที่ เวลา สถานที่

กิจกรรมที่ 1 การอบรมเกี่ยวกับการใช้โคมไฟ (20 นาที)

- โคมไฟแสงประดิษฐ์
- โคมไฟทางการค้า

กิจกรรมที่ 2 การสาธิตการติดตั้งและการทำงานหลอด (20 นาที)

- โคมไฟแสงประดิษฐ์
- โคมไฟทางการค้า

กิจกรรมที่ 3 การอบรมเกี่ยวกับแผนและแบบประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสง (30 นาที)

- แผนและขั้นตอนในการประเมิน
- การใช้แบบประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสง

กิจกรรมที่ 4 ฝึกปฏิบัติการสอบด้วยตนเอง (30 นาที)

2.2 การอบรมเกี่ยวกับการใช้โคมไฟ

2.2.1 โคมไฟแสงประดิษฐ์

คุณลักษณะผลิตภัณฑ์

ชื่อผลิตภัณฑ์: โคมไฟแสงประดิษฐ์ จำนวน 1 โคม

ประเภท: โคมไฟแสงประดิษฐ์แบบตั้งพื้น

ประโยชน์: ให้แสงสว่างในที่พักอาศัย

ข้อมูลทางเทคนิค

- ใช้กับแรงดันไฟฟ้า 220 VAC ความถี่ 50 Hz
- โคมไฟแสงประดิษฐ์สามารถทำงานได้อัตโนมัติตามรูปแบบที่กำหนด 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบแสงในรอบวัน และแบบแสงจำ
- แสงของสี: ให้แสงของสีต่าง ๆ 29 ตัวอย่าง ในที่พักอาศัย
- ความเข้มแสงสูงสุด: 5,000 ลักซ์ (ที่ระยะ 1 เมตร)
- ขนาดของโคมไฟแสงประดิษฐ์: (กว้างxยาวxสูง): 395x395x88 มิลลิเมตร
- ปราศจากแสงยูวี

- โครงสร้างของโคมไฟประกอบด้วย 5 ชั้นส่วน สามารถถอดประกอบได้
- ใช้สำหรับตั้งพื้น และเคลื่อนย้ายได้ตามต้องการ
- สามารถปรับระดับแสงสัมผัสได้สูงสุด 2.5 เมตร

2.2.2 โคมไฟทางการค้า

คุณลักษณะผลิตภัณฑ์

ชื่อผลิตภัณฑ์: โคมไฟทางการค้า (Commercial) จำนวน 1 โคม

ประเภท: โคมไฟทางการค้าแบบตั้งพื้น

ข้อมูลทางเทคนิค

- ใช้กับแรงดันไฟฟ้า 220 VAC ความถี่ 50 Hz
- โคมไฟทางการค้าสามารถทำงานได้อัตโนมัติ
- แสงของสี: ให้แสงของสีต่าง ๆ 2 ตัวอย่าง ในที่พักอาศัย
- ขนาดของโคมไฟทางการค้า: (กว้างxยาวxสูง): 390x390x85 มิลลิเมตร
- ปราศจากแสงยูวี
- โครงสร้างของโคมไฟประกอบด้วย 5 ชั้นส่วน สามารถถอดและประกอบได้
- ใช้สำหรับตั้งพื้น เคลื่อนย้ายได้ และสามารถปรับระดับแสงสัมผัสได้สูงสุด 2.5 เมตร

2.2.3 วิธีการติดตั้งโคมไฟ

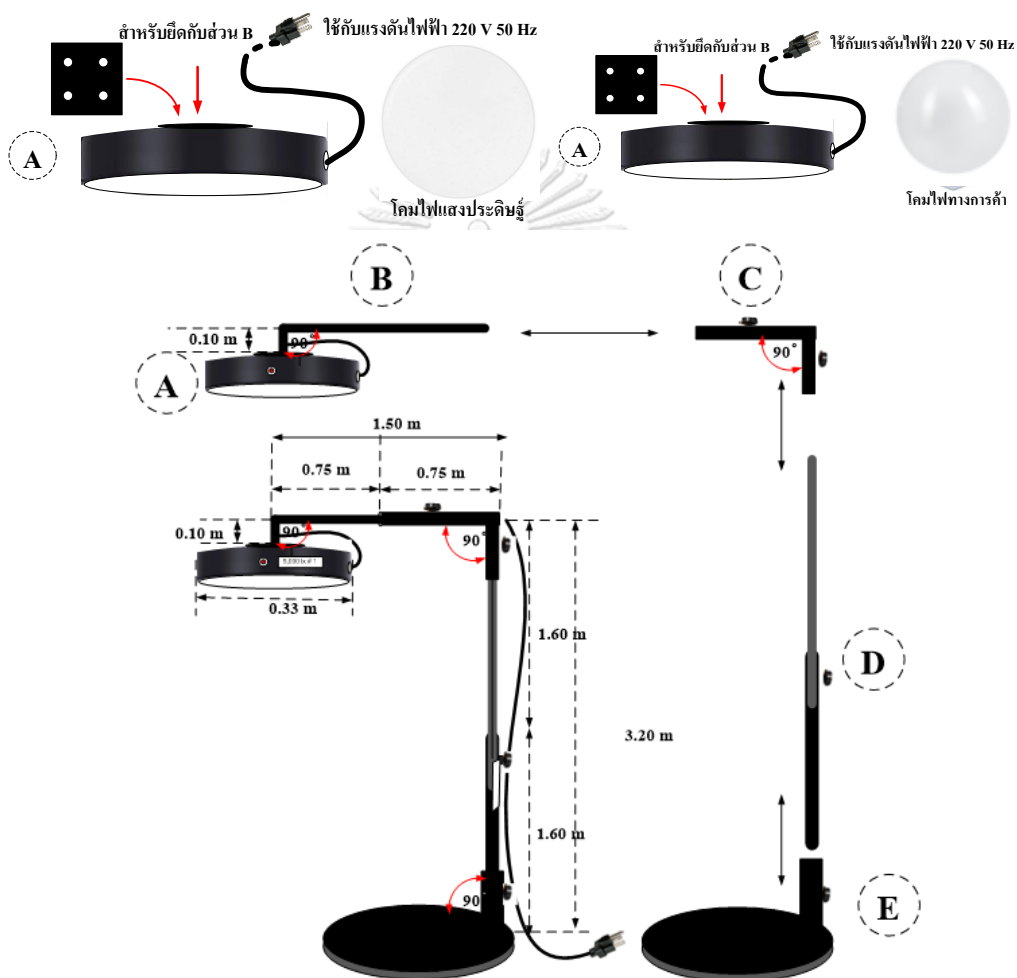
วิธีการติดตั้งโคมไฟแสงประดิษฐ์และโคมไฟทางการค้า

การติดตั้งโคมไฟแสงประดิษฐ์โคมไฟประกอบไปด้วย 5 ชั้นส่วนประกอบ ดังนี้

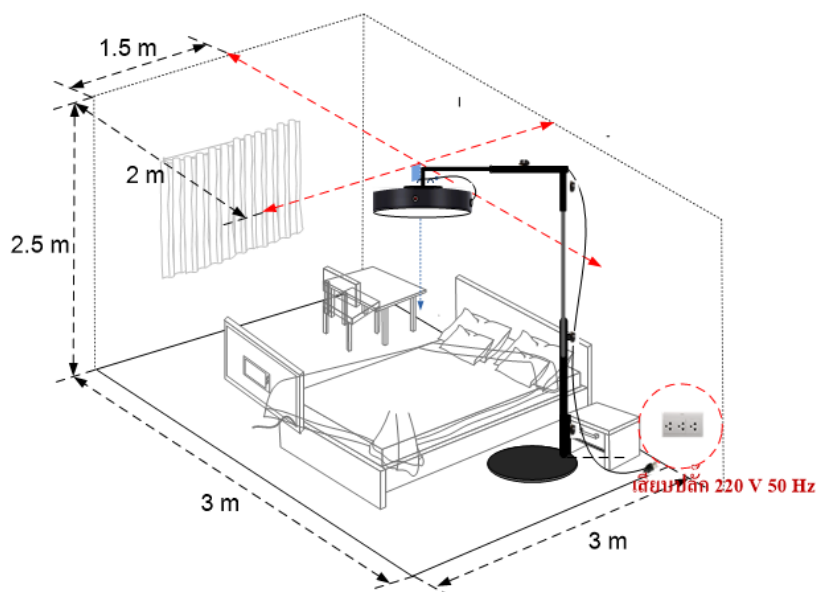
- ชั้นส่วน A โคมไฟแสงประดิษฐ์ ด้านบนของโคมไฟสามารถยึดติดกับส่วน B
- ชั้นส่วน B เหล็กกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ½ นิ้ว และมีความยาว 1.50 เมตร ทำมุมฉาก 90 องศาเพื่อใช้สำหรับยึดกับตัวโคมไฟประดิษฐ์ และปลายอีกด้านใช้สำหรับเชื่อมต่อกับส่วน C
- ชั้นส่วน C เหล็กกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว และมีความยาว 0.75 เมตร ทำมุมฉาก 90 เพื่อเชื่อมต่อกับส่วน D
- ชั้นส่วน D ประกอบด้วยเหล็กแบบกลมจำนวน 2 ขนาด ได้แก่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ½ นิ้ว และ 1 นิ้ว โดยมีขนาดความยาว 1.60 เมตร

- ชั้นส่วน E เป็นฐานรองรับโครงสร้างและโคมไฟแสงประดิษฐ์ทำจากเหล็กแผ่นมีความหนา 2 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลม 500 มิลลิเมตร

ตำแหน่งในการติดตั้งโคมไฟแสงประดิษฐ์จะอยู่จุดกึ่งกลางของเตียงนอน และละเมื่อประกอบโคมไฟแสงประดิษฐ์และโครงสร้างสำเร็จแสดงได้ดังภาพที่ 2 และภาพที่ 3 ตามลำดับ



ภาพที่ 2 ชั้นส่วนประกอบของโคมไฟแสงประดิษฐ์และโคมไฟทางการค้า



ภาพที่ 3 ตำแหน่งในการติดตั้งโคมไฟแสงประดิษฐ์และโคมไฟทางการค้าภายในที่พัก

2.2.4 วิธีการใช้งานโคมไฟ

โคมไฟแสงประดิษฐ์

1. เสียบปลั๊กไฟตัวเครื่องเข้ากับปลั๊กไฟเต้ารับของอาคารหรือบ้านเรือนที่มีแรงดันไฟฟ้า 220VAC (ไฟฟ้ากระแสสลับ) สังเกตที่ตัวโคมไฟแสงประดิษฐ์จะมีหลอดแอลอีดี (LED) สว่างบ่งบอกสถานะของโคมไฟแสงประดิษฐ์พร้อมใช้งานอัตโนมัติ ตามรูปแบบที่กำหนดไว้

2. เมื่อตัวเครื่องอยู่ในสภาวะพร้อมใช้ผู้ใช้โคมไฟแสงประดิษฐ์สามารถทำการทดสอบเกี่ยวกับการรับรู้แสงโดยจะมีตัวอย่างแสงในรอบวันให้แสงของสีต่าง ๆ 29 ตัวอย่าง ตามเวลาที่กำหนด

โคมไฟทางการค้า

1. เสียบปลั๊กไฟตัวเครื่องเข้ากับปลั๊กไฟเต้ารับของอาคารหรือบ้านเรือนที่มีแรงดันไฟฟ้า 220VAC (ไฟฟ้ากระแสสลับ) สังเกตที่ตัวโคมไฟทางการค้าจะมีเสียงแจ้งเตือนแสดงถึงพร้อมใช้งานอัตโนมัติ

2. เมื่อโคมไฟทางการค้าอยู่ในสภาวะพร้อมใช้ผู้ใช้โคมไฟทางการค้าสามารถทำการทดสอบเกี่ยวกับการรับรู้แสงโดยจะมีตัวอย่างแสง ตามรูปแบบที่กำหนด 2 ตัวอย่าง

2.2.5 คำเตือนและข้อพึงระวัง

- ใช้ภายในอาคาร ห้ามใช้ภายนอกอาคารและบริเวณที่มีความชื้นสูง
- ในการประกอบโคมไฟทางการค้าและโครงสร้างต้องยึดให้ติดแน่นหนา เพื่อป้องกันการตกหล่นที่สาเหตุให้เกิดอุบัติเหตุกับผู้ใช้

- ขณะติดตั้งคอมพิวเตอร์ทางการค้าปิดทุกครั้งเมื่อมีการติดตั้งหรือเปลี่ยนอุปกรณ์
- ไม่ควรใช้ในบริเวณที่มีอุณหภูมิแวดล้อมสูงเกิน 40 องศาเซลเซียส
- ไม่ควรจ้องมองเมื่อดวงแสงแอลอีดีโดยตรงขณะทำงาน เนื่องจากแสงจ้าอาจเป็นอันตรายต่อดวงตาได้

2.3 การอบรมเกี่ยวกับแนวปฏิบัติในการทดสอบ

2.3.1 แนวทางในการทดสอบ

วิธีการทดสอบ

1. ก่อนการทดสอบนั้นผู้เข้าร่วมการทดสอบจะได้รับการอบรมการติดตั้งอุปกรณ์คอมพิวเตอร์แสงประดิษฐ์ และคู่มือการใช้งาน รวมถึงจะได้รับตัวอย่างคอมพิวเตอร์ จำนวน 2 โคม ได้แก่ คอมพิวเตอร์แสงประดิษฐ์ จำนวน 1 โคม และคอมพิวเตอร์ทางการค้า จำนวน 1 โคม (โดยการนำคอมพิวเตอร์กลับไปที่บ้านของผู้ร่วมทดสอบสามารถมารับเองได้ หรือให้ผู้วิจัยนำไปให้ก็ได้)
2. อบรมให้ความรู้ความเข้าใจที่ตรงกันกับผู้เข้าร่วมการวิจัยเกี่ยวกับคำเตือนและข้อพึงระมัดระวัง
3. ก่อนการทดสอบขอความร่วมมือผู้เข้าร่วมการทดสอบงดดื่มกาแฟหรือเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนเป็นส่วนผสม อย่างน้อย 1 วัน
4. กรณีที่ท่านมีความจำเป็นต้องสวมแว่นสายตาสั้น หรือ สายตายาว ในการทดสอบขอให้ท่านสวมแว่นที่มีเลนส์ใส ไม่มีสี หรือที่ไม่ใช่เลนส์ชนิดกรองแสง
5. ก่อนการทดสอบขอให้ผู้เข้าร่วมทดสอบเลือกห้องที่มีอากาศถ่ายเท ปลอดโปร่ง หรือ สภาวะปกติต่อการใช้ชีวิตประจำวันของท่าน และควรมีเครื่องปรับอากาศระหว่างการทดสอบ และที่สำคัญต้องปิดประตูและหน้าต่าง (หากเป็นกระจกให้ใช้ผ้ามาปิดให้มิดชิด) ในระหว่างการทดสอบ
6. ให้ปิดดวงไฟในห้องเดิมก่อนเริ่มกระบวนการทดสอบคอมพิวเตอร์แสงประดิษฐ์และคอมพิวเตอร์ทางการค้า
7. ก่อนการทดสอบ ให้ท่านกรอกข้อมูลส่วนตัวของท่านลงในแบบสอบถาม ซึ่งมีจำนวน 10 ข้อ ใช้เวลาประมาณ 1-2 นาที และรบกวนท่านอ่านคำชี้แจงเกี่ยวกับกิจกรรมระหว่างการทดสอบอีกครั้ง
8. ในการทดสอบเกี่ยวกับการรับรู้แสงนี้จะมีตัวอย่างแสงทั้งสิ้น 31 ตัวอย่าง และใช้เวลารวม 3 วัน ในการทดสอบ โดยผู้เข้าร่วมการรับรู้แสงนี้จะต้องดำเนินการกิจกรรมตามเวลาที่กำหนด
9. ระหว่างการทดสอบ ท่านสามารถนั่งบนเก้าอี้ หรือ เติง สามารถนอนได้ (ห้ามหลับในระหว่างการทดลอง)
10. ระหว่างการทดสอบ ท่านสามารถทำกิจกรรมต่าง ๆ ได้ โดยอยู่ในรัศมี 1 เมตร จากแนวตรงกลางของแสงที่กระทบพื้น ซึ่งกิจกรรมดังกล่าวต้องที่ไม่กระทบต่อร่างกายและอารมณ์ของท่านมากเกินไป

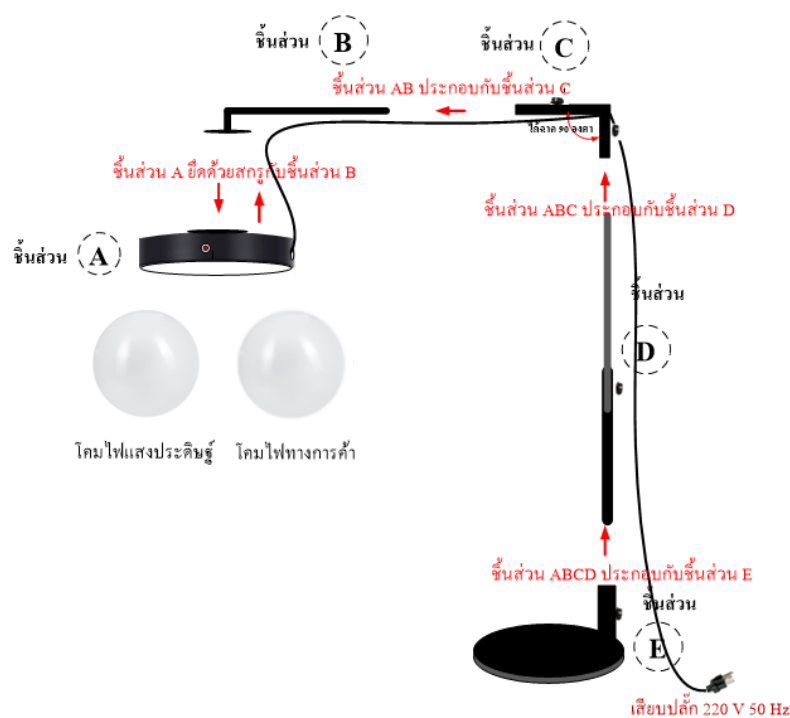
- 11.ในการประเมินโดยตอบคำถามใน ส่วนที่ 2 เกี่ยวกับความพึงพอใจและข้อมูลการใช้แสงประดิษฐ์ มี
ข้อคำถาม จำนวน 10 ข้อ
- 12.ในการทดสอบตัวอย่างแสงแต่ละตัวอย่างนั้น ให้ท่านหลับตา นาน 5 นาที แล้วจึงลืมตาขึ้น แล้วให้
ดวงตาปรับแสง 15 นาที โดยมองไปรอบ ๆ ห้อง และสามารถกระพริบตาได้ตามปกติ แล้วจึงจะเริ่ม
ตอบคำถามในข้อ (1) - ข้อ (6) แล้วจึงทำกิจกรรมใน ข้อที่ (7) การอ่านหนังสือ และ ข้อที่ (8) การ
อ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์ แล้วจึงให้คะแนนประเมิน (ตอบจำนวน 31 ตัวอย่าง)
13. สำหรับคำถามใน ส่วนที่ 2 ข้อที่ (9) และ ข้อที่ (10) ให้ดำเนินการประเมินเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ
ทั้งหมด (ตอบครั้งเดียว)
14. เมื่อสิ้นสุดการทดสอบแล้วให้ผู้เข้าร่วมการวิจัย แจ้งต่อผู้วิจัย (นายสมยศ สันติมาลัย โทรศัพท์
086-8305373) เพื่อดำเนินการต่อไป
15. ทั้งนี้ หากมีข้อขัดข้องระหว่างการทดสอบให้แจ้งต่อผู้วิจัยทันที ที่นายสมยศ สันติมาลัย
โทรศัพท์ 086-8305373



2.3.2 แบบฝึกปฏิบัติการทดสอบด้วยตนเอง

แบบทดสอบที่ 1 การฝึกติดตั้งอุปกรณ์ด้วยตนเอง

คำชี้แจง จากภาพให้ผู้เข้าร่วมการวิจัยทดลองประกอบการติดตั้งด้วยตนเอง และวางตำแหน่งที่เหมาะสม



ภาพที่ 4 ลำดับการประกอบชิ้นส่วนของโคมไฟและการติดตั้ง (สำหรับการฝึกปฏิบัติด้วยตนเอง)

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบ

ที่	รายละเอียด	ผลการประเมิน
1	ประกอบชิ้นส่วนการประกอบ A เข้ากับชิ้นส่วน B ตาม ภาพที่ 4	<input type="checkbox"/> ถูกต้อง <input type="checkbox"/> ไม่ถูกต้อง
2	ประกอบชิ้นส่วนการประกอบ C เข้ากับชิ้นส่วน B ตาม ภาพที่ 4	<input type="checkbox"/> ถูกต้อง <input type="checkbox"/> ไม่ถูกต้อง
3	ประกอบชิ้นส่วนการประกอบ D เข้ากับชิ้นส่วน C ตาม ภาพที่ 4	<input type="checkbox"/> ถูกต้อง <input type="checkbox"/> ไม่ถูกต้อง
4	ประกอบชิ้นส่วนการประกอบ ABCD เข้ากับชิ้นส่วน E ตาม ภาพที่ 4	<input type="checkbox"/> ถูกต้อง <input type="checkbox"/> ไม่ถูกต้อง
5	วางตำแหน่งของโคมไฟได้ ณ ตำแหน่งที่เหมาะสม ตามภาพที่ 3	<input type="checkbox"/> ถูกต้อง <input type="checkbox"/> ไม่ถูกต้อง

หมายเหตุ กรณีที่ทำการทำสอบไม่ผ่านให้ทำใหม่จนกว่าผู้เข้าร่วมการวิจัยสามารถปฏิบัติได้ถูกต้องครบทั้ง 5 ข้อ

แบบทดสอบที่ 2 การฝึกทำการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสงโคมไฟ

คำชี้แจง ให้ผู้เข้าร่วมการวิจัยทดลองใช้แบบประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของโคมไฟจากตัวอย่างแสงที่ปรากฏ โดยตอบคำถามตามสถานการณ์ต่อไปนี้

ขั้นตอนก่อนการได้รับตัวอย่างแสง

ตารางที่ 2 ตารางบันทึกการปฏิบัติของผู้เข้าร่วมวิจัย (สำหรับการฝึกปฏิบัติ)

คำถาม	ปฏิบัติ	ไม่ได้ปฏิบัติ
ก่อนเริ่มการทดสอบ		
(1) ท่านได้ติดตั้งโคมไฟแสงประดิษฐ์ให้อยู่สถานะที่พร้อมใช้แล้ว ณ ตำแหน่งที่เหมาะสม (ดังภาพที่ 2)		
(2) ท่านได้ปิดประตูห้องและหน้าต่างก่อนทำการทดสอบหรือไม่ หรือกรณีที่ห้องพักของท่านมีแสงจากภายนอกส่องถึงท่านได้ใช้ผ้าปิดช่องผ่านของแสงแล้วหรือไม่		
(3) ท่านได้เปิดเครื่องปรับอากาศ ณ อุณหภูมิที่ท่านรู้สึกสบายตัว		
(4) ท่านได้งดดื่มกาแฟหรือเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนเป็นส่วนผสม อย่างน้อย 1 วัน		
(5) ท่านได้สวมแว่นชนิดเลนส์ใส ไม่มีสี หรือไม่ใช่เลนส์กรองแสง		
ขั้นตอนเมื่อเริ่มการทดสอบ		
(5) ระหว่างการทดสอบท่านได้อยู่ในห้องทดสอบเพียงคนเดียวเท่านั้น		
(6) ก่อนเริ่มการทดสอบปรับแสงให้ท่านหลับตา นาน 5 นาที แล้วจึงลืมตาขึ้น		
(7) ระหว่างการทดสอบ ท่านสามารถนั่งบนเก้าอี้ หรือ เติง สามารถนอน (ห้ามหลับ)		
(8) ระหว่างการทดสอบ ท่านสามารถทำกิจกรรมต่าง ๆ ได้ โดยอยู่ในรัศมี 1 เมตร จากแนวตรงกลางของแสงที่กระทบพื้น ซึ่งกิจกรรมดังกล่าวต้องที่ไม่กระทบต่อร่างกายและอารมณ์ของท่านมากเกินไป		

ขั้นตอนภายหลังจากได้รับตัวอย่างแสง 15 นาที (สามารถกระพริบตาได้ตามปกติ)

ในการให้คะแนนประเมินระดับความพึงพอใจในประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของโคมไฟประดิษฐ์ (วันแรก) ขั้นตอนภายหลังจากได้รับตัวอย่างแสง 15 นาที โดยมองไปรอบ ๆ ห้อง และสามารถกระพริบตาได้ตามปกติ โดยให้ท่านทำเครื่องหมาย / ลงในช่องคะแนนตามความรู้สึกของท่าน ในการพิจารณาให้คะแนนความพึงพอใจหรือความคิดเห็นของท่าน โดย

มากที่สุด	หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับมากที่สุด
มาก	หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับมาก
ปานกลาง	หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับปานกลาง
น้อย	หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับน้อย
น้อยที่สุด	หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับน้อยที่สุด

ตัวอย่างแสง

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					

ขั้นตอนทดสอบขณะทำกิจกรรม

ในขั้นตอนนี้ทางผู้วิจัยจะให้ท่านเลือกอ่านหนังสือที่ท่านสนใจ โดยมีพื้นหลังของหนังสือเป็นสีขาว แล้วท่านจึงทดลองอ่านหนังสือภายใต้ตัวอย่างแสง ประมาณ 1 – 2 นาที แล้วจึงทำการประเมินความพึงพอใจในข้อ 7

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					

ในขั้นตอนนีทางผู้วิจัยจะให้ท่านทดลองอ่านเอกสาร (ไฟล์.pdf) บนจอโน้ตบุค (ซึ่งผู้วิจัยจะให้ผู้เข้าร่วมการวิจัยไปพร้อมกับคอมพิวเตอร์และคอมพิวเตอร์พกพา) ภายใต้วอย่างแสง ประมาณ 1-2 นาที แล้วจึงทำการประเมินความพึงพอใจในข้อ 8

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนีระดับใด					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอโน้ตบุค					



ส่วนที่ 3

สำหรับการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของโคมไฟ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.1 แนวทางในการปฏิบัติ

ก่อนการทดสอบ

14. ก่อนการทดสอบนั้นผู้เข้าร่วมวิจัยจะได้รับอุปกรณ์ต่อไปนี้ (โดยผู้ร่วมวิจัยสามารถมารับเองได้ หรือ ให้ผู้วิจัยนำไปให้ก็ได้) ก่อนเริ่มการทดสอบกรุณาตรวจสอบว่าท่านได้รับอุปกรณ์ครบถ้วนหรือไม่
- | | | |
|-------------------------|--|--|
| (1) โคมไฟแสงประดิษฐ์ | จำนวน 1 โคม | <input type="checkbox"/> ได้รับ <input type="checkbox"/> ไม่ได้รับ |
| (2) โคมไฟทางการค้า | จำนวน 1 โคม | <input type="checkbox"/> ได้รับ <input type="checkbox"/> ไม่ได้รับ |
| (3) คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก | จำนวน 1 เครื่อง (สภาพพร้อมใช้งาน) | <input type="checkbox"/> ได้รับ <input type="checkbox"/> ไม่ได้รับ |
| (4) นาฬิกาจับเวลา | จำนวน 1 เครื่อง | <input type="checkbox"/> ได้รับ <input type="checkbox"/> ไม่ได้รับ |
| (5) โต๊ะทำงาน | จำนวน 1 ตัว (กรณีผู้เข้าร่วมการวิจัยไม่มี) | <input type="checkbox"/> ได้รับ <input type="checkbox"/> ไม่ได้รับ |
15. ทางผู้วิจัยขอความกรุณาท่านดำเนินการประกอบและจัดสถานที่ให้พร้อมก่อนถึงวันทดสอบ
16. ก่อนการทดสอบขอความร่วมมือผู้เข้าร่วมการทดสอบงดดื่มกาแฟหรือเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนเป็นส่วนผสม อย่างน้อย 1 วัน จนกระทั่งท่านได้ดำเนินการทดสอบเสร็จสิ้นแล้วจึงจะสามารถดื่มกาแฟหรือเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนได้
17. กรณีที่ท่านมีความจำเป็นต้องสวมแว่นสายตาสั้น หรือ สายตายาว ในการทดสอบขอให้ท่านสวมแว่นที่มีเลนส์ใส ไม่มีสี หรือที่ไม่ใช่เลนส์ชนิดกรองแสง
18. ก่อนการทดสอบขอให้ผู้เข้าร่วมทดสอบเลือกห้องที่มีอากาศถ่ายเท ปลอดโปร่ง หรือ สภาวะปกติต่อการใช้ชีวิตประจำวันของท่าน และควรมีเครื่องปรับอากาศระหว่างการทดสอบ และที่สำคัญต้องปิดประตูและหน้าต่าง (หากเป็นกระจกให้ใช้ผ้ามาปิดให้มิดชิด) ในระหว่างการทดสอบ
19. รบกวนท่านอ่านคำชี้แจงเกี่ยวกับกิจกรรมระหว่างการทดสอบอีกครั้ง
20. ในการทดสอบเกี่ยวกับประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของโคมไฟนี้ จะมีตัวอย่างแสงทั้งสิ้น 31 ตัวอย่าง และใช้เวลารวม 3 วัน ในการทดสอบ โดยผู้เข้าร่วมการวิจัยจะต้องดำเนินการกิจกรรมตามเวลาที่กำหนดในตารางที่ 1

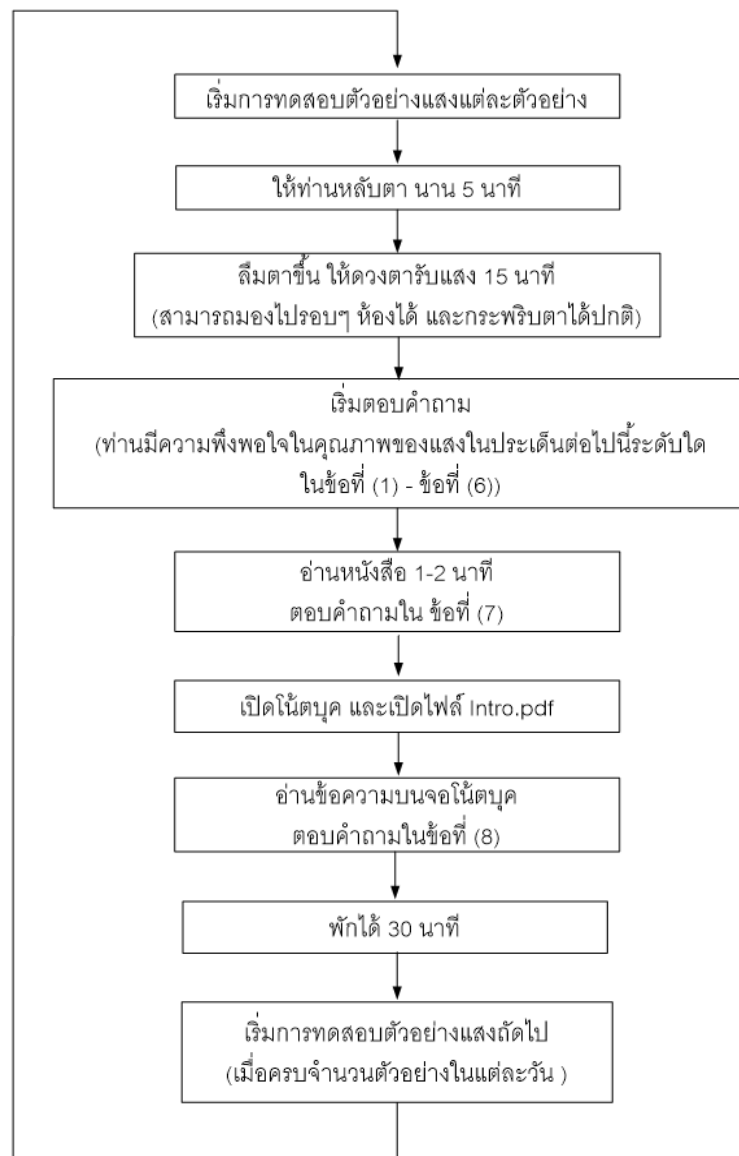
ตารางที่ 3 กำหนดการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของโคมไฟ

กำหนด	วันแรก (15 ตัวอย่าง)	วันที่ 2 (14 ตัวอย่าง)	วันที่ 3 (2 ตัวอย่าง)
ตัวอย่าง	โคมไฟแสงประดิษฐ์		โคมไฟทางการค้า
เวลาทดสอบ	รหัสตัวอย่าง	รหัสตัวอย่าง	รหัสตัวอย่าง
06:00	A1	D1	F (WW)
07:00	A2	D2	ไม่มีการทดสอบ
08:00	A3	D3	ไม่มีการทดสอบ
09:00	A4	D4	ไม่มีการทดสอบ
10:00	A5	D5	ไม่มีการทดสอบ
11:00	A6	D6	ไม่มีการทดสอบ
12:00	A7	D7	ไม่มีการทดสอบ
13:00	A8	D8	ไม่มีการทดสอบ
14:00	A9	D9	ไม่มีการทดสอบ
15:00	A10	D10	ไม่มีการทดสอบ
16:00	A11	D11	ไม่มีการทดสอบ
17:00	A12	D12	ไม่มีการทดสอบ
18:00	A13	D13	G (CW)
19:00	B	E (D65)	สิ้นสุดการทดสอบ
22:00	C	ไม่มีการทดสอบ	
รวมเวลา	15 ชั่วโมง	14 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง

ระหว่างการทดสอบ

21. ระหว่างการทดสอบ ท่านสามารถนั่งบนเก้าอี้ หรือ เติง สามารถนอน (ห้ามหลับ)
22. ระหว่างการทดสอบ ท่านสามารถทำกิจกรรมต่าง ๆ ได้ โดยอยู่ในรัศมี 1 เมตร จากแนวตรงกลางของแสงที่กระทบพื้น ซึ่งกิจกรรมดังกล่าวต้องที่ไม่กระทบต่อร่างกายและอารมณ์ของท่านมากเกินไป
23. ในการทดสอบตัวอย่างแสงแต่ละตัวอย่างนั้น ให้ท่านหลับตา นาน 5 นาที แล้วจึงลืมตาขึ้น แล้วให้ดวงตารับแสง 15 นาที โดยมองไปรอบ ๆ ห้อง และสามารถกระพริบตาได้ตามปกติ แล้วจึงจะเริ่มให้คะแนนประเมินความพึงพอใจในส่วนที่ 1 ข้อ (1) - ข้อ (6) ของแต่ละตัวอย่างแสง แล้วจึงทำกิจกรรมใน ข้อที่ (7) การอ่านหนังสือ และ ข้อที่ (8) การอ่านข้อความบนจอโน้ตบุค ซึ่งท่านจะได้รับเอกสารบทความเนื้อหาในส่วนของบทนำในรูปแบบของเอกสารใช้ตอบคำถามข้อที่ (7) และไฟล์ .pdf (เปิดด้วยโปรแกรม Adobe) ใช้สำหรับการตอบคำถามในข้อที่ (8)

24. สำหรับคำถามในส่วนที่ 2 ข้อที่ (9) และ ข้อที่ (10) ให้ดำเนินการประเมินเมื่อสิ้นสุดการทดสอบทั้งหมด (ตอบครั้งเดียว)



ภาพที่ 5 ขั้นตอนแนวปฏิบัติสำหรับการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสงแต่ละตัวอย่าง

เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบ

25. เมื่อสิ้นสุดการทดสอบแล้วให้ผู้เข้าร่วมการวิจัย แจ้งต่อผู้วิจัย เพื่อดำเนินการต่อไป
26. ทั้งนี้ หากมีข้อขัดข้องระหว่างการทดสอบให้แจ้งต่อผู้วิจัยทันที

3.2 แบบบันทึกผลการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของโคมไฟแสงประดิษฐ์

3.2.1 การทดสอบวันแรก

คำชี้แจง ขอความร่วมมือผู้เข้าร่วมการวิจัยทดลองใช้แบบประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของโคมไฟ จากตัวอย่างแสงที่ปรากฏ โดยตอบคำถามตามสถานการณ์ต่อไปนี้

กรุณาทำเครื่องหมาย / ในช่องปฏิบัติ กรณีท่านได้ปฏิบัติตามข้อคำถามที่ และ / ในช่องไม่ได้ปฏิบัติ กรณีท่านไม่ได้ปฏิบัติตามข้อคำถามที่ (1) – (8)

ตารางที่ 1 ตารางบันทึกการปฏิบัติของผู้เข้าร่วมวิจัยวันแรก

คำถาม	ปฏิบัติ	ไม่ได้ปฏิบัติ
ก่อนเริ่มการทดสอบ		
(1) ท่านได้ติดตั้งโคมไฟแสงประดิษฐ์ให้อยู่สถานะที่พร้อมใช้แล้ว ณ ตำแหน่งที่เหมาะสม (ดังภาพที่ 2)		
(2) ท่านได้ปิดประตูห้องและหน้าต่างก่อนการทำการทดสอบหรือไม่ หรือกรณีที่ห้องพักของท่านมีแสงจากภายนอกส่องถึงท่านได้ใช้ผ้าปิดช่องผ่านของแสงแล้วหรือไม่		
(3) ท่านได้เปิดเครื่องปรับอากาศ ณ อุณหภูมิที่ท่านรู้สึกสบายตัว		
(4) ท่านได้งดดื่มกาแฟหรือเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนเป็นส่วนผสม อย่างน้อย 1 วัน		
(5) ท่านได้สวมแว่นชนิดเลนส์ใส ไม่มีสี หรือไม่ใช่เลนส์กรองแสง (เฉพาะกรณีที่ท่านต้องสวมแว่นสายตา)		
ขั้นตอนเมื่อเริ่มการทดสอบ		
(5) ระหว่างการทดสอบท่านได้อยู่ในห้องทดสอบเพียงคนเดียวเท่านั้น		
(6) ก่อนเริ่มการทดสอบรับแสงให้ท่านหลับตา นาน 5 นาที แล้วจึงลืมตาขึ้น		
(7) ระหว่างการทดสอบ ท่านสามารถนั่งบนเก้าอี้ หรือ เติง สามารถนอน (ห้ามหลับ)		
(8) ระหว่างการทดสอบ ท่านสามารถทำกิจกรรมต่าง ๆ ได้ โดยอยู่ในรัศมี 1 เมตร จากแนวตรงกลางของแสงที่กระทบพื้น ซึ่งกิจกรรมดังกล่าวต้องที่ไม่กระทบต่อร่างกายและอารมณ์ของท่านมากเกินไป		

คำชี้แจง

ในการให้คะแนนประเมินระดับความพึงพอใจในประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของโคมไฟประดิษฐ์ (วันแรก)
 ขั้นตอนภายหลังได้รับตัวอย่างแสง 15 นาที โดยมองไปรอบ ๆ ห้อง และสามารถกระพริบตาได้ตามปกติ โดยให้
 ท่านทำเครื่องหมาย / ลงในช่องคะแนนตามความรู้สึกของท่าน ในการพิจารณาให้คะแนนความพึงพอใจหรือความ
 คิดเห็นของท่าน โดย

มากที่สุด	หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับมากที่สุด
มาก	หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับมาก
ปานกลาง	หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับปานกลาง
น้อย	หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับน้อย
น้อยที่สุด	หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับน้อยที่สุด

บันทึกผล

การทดสอบวันแรก เวลาที่ทำการประเมิน: 06:00 น. ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: A1

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันแรก เวลาที่ทำการประเมิน: 07:00 น. ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: A2

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันแรก เวลาที่ทำการประเมิน: 08:00 น. ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: A3

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันแรก

เวลาที่ทำการประเมิน: 09:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: A4

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันแรก

เวลาที่ทำการประเมิน: 10:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: A5

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันแรก

เวลาที่ทำการประเมิน: 11:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: A6

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันแรก

เวลาที่ทำการประเมิน: 12:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: A7

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันแรก

เวลาที่ทำการประเมิน: 13:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: A8

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันแรก

เวลาที่ทำการประเมิน: 14:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: A9

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันแรก

เวลาที่ทำการประเมิน: 15:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: A10

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันแรก

เวลาที่ทำการประเมิน: 16:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: A11

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันแรก

เวลาที่ทำการประเมิน: 17:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: A12

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันแรก

เวลาที่ทำการประเมิน: 18:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: A13

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันแรก

เวลาที่ทำการประเมิน: 19:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: B

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันแรก

เวลาที่ทำการประเมิน: 22:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: C

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

3.2.2 การทดสอบวันที่สอง

คำชี้แจง ขอความร่วมมือผู้เข้าร่วมการวิจัยทดลองใช้แบบประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของโคมไฟ จากตัวอย่างแสงที่ปรากฏ โดยตอบคำถามตามสถานการณ์ต่อไปนี้

กรุณาทำเครื่องหมาย / ในช่องปฏิบัติ กรณีท่านได้ปฏิบัติตามข้อคำถามที่ และ / ในช่องไม่ได้ปฏิบัติ กรณีท่านไม่ได้ปฏิบัติตามข้อคำถามที่ (1) – (8)

ตารางที่ 2 ตารางบันทึกการปฏิบัติของผู้เข้าร่วมวิจัยวันที่สองของการทดสอบ

คำถาม	ปฏิบัติ	ไม่ได้ปฏิบัติ
ก่อนเริ่มการทดสอบ		
(1) ท่านได้ติดตั้งโคมไฟแสงประดิษฐ์ให้อยู่สถานะที่พร้อมใช้แล้ว ณ ตำแหน่งที่เหมาะสม (ดังภาพที่ 2)		
(2) ท่านได้ปิดประตูห้องและหน้าต่างก่อนการทำการทดสอบหรือไม่ หรือกรณีที่ห้องพักของท่านมีแสงจากภายนอกส่องถึงท่านได้ใช้ผ้าปิดช่องผ่านของแสงแล้วหรือไม่		
(3) ท่านได้เปิดเครื่องปรับอากาศ ณ อุณหภูมิที่ท่านรู้สึกสบายตัว		
(4) ท่านได้งดดื่มกาแฟหรือเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนเป็นส่วนผสม อย่างน้อย 1 วัน		
(5) ท่านได้สวมแว่นชนิดเลนส์ใส ไม่มีสี หรือไม่ใช่เลนส์กรองแสง (เฉพาะกรณีที่ท่านต้องสวมแว่นสายตา)		
ขั้นตอนเมื่อเริ่มการทดสอบ		
(5) ระหว่างการทดสอบท่านได้อยู่ในห้องทดสอบเพียงคนเดียวเท่านั้น		
(6) ก่อนเริ่มการทดสอบปรับแสงให้ท่านหลับตา นาน 5 นาที แล้วจึงลืมตาขึ้น		
(7) ระหว่างการทดสอบ ท่านสามารถนั่งบนเก้าอี้ หรือ เติง สามารถนอน (ห้ามหลับ)		
(8) ระหว่างการทดสอบ ท่านสามารถทำกิจกรรมต่าง ๆ ได้ โดยอยู่ในรัศมี 1 เมตร จากแนวตรงกลางของแสงที่กระทบพื้น ซึ่งกิจกรรมดังกล่าวต้องที่ไม่กระทบต่อร่างกายและอารมณ์ของท่านมากเกินไป		

คำชี้แจง

ในการให้คะแนนประเมินระดับความพึงพอใจในประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของโคมไฟประดิษฐ์ (วันแรก)
ขั้นตอนภายหลังจากได้รับตัวอย่างแสง 15 นาที โดยมองไปรอบ ๆ ห้อง และสามารถกระพริบตาได้ตามปกติ โดยให้
ท่านทำเครื่องหมาย / ลงในช่องคะแนนตามความรู้สึกของท่าน ในการพิจารณาให้คะแนนความพึงพอใจหรือความ
คิดเห็นของท่าน โดย

มากที่สุด	หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับมากที่สุด
มาก	หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับมาก
ปานกลาง	หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับปานกลาง
น้อย	หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับน้อย
น้อยที่สุด	หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับน้อยที่สุด

บันทึกผล

การทดสอบวันที่สอง

เวลาที่ทำการประเมิน: 06:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: D1

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันสอง

เวลาที่ทำการประเมิน: 07:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: D2

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันสอง

เวลาที่ทำการประเมิน: 08:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: D3

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันสอง

เวลาที่ทำการประเมิน: 09:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: D4

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันสอง

เวลาที่ทำการประเมิน: 10:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: D5

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันสอง

เวลาที่ทำการประเมิน: 11:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: D6

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันสอง

เวลาที่ทำการประเมิน: 12:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: D7

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันสอง

เวลาที่ทำการประเมิน: 13:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: D8

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันสอง

เวลาที่ทำการประเมิน: 14:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: D9

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันสอง

เวลาที่ทำการประเมิน: 15:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: D10

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันสอง

เวลาที่ทำการประเมิน: 16:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: D11

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันสอง

เวลาที่ทำการประเมิน: 17:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: D12

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันสอง

เวลาที่ทำการประเมิน: 18:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: D13

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันสอง

เวลาที่ทำการประเมิน: 19:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: E(D65)

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

3.2.3 แบบประเมินภาพรวมของโคมไฟแสงประดิษฐ์ (ประเมินครั้งเดียว)

คำชี้แจง

ในการให้คะแนนประเมินระดับความพึงพอใจในประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของโคมไฟประดิษฐ์ (วันที่ 2 ของการทดสอบ) โดยให้ท่านทำเครื่องหมาย / ลงในช่องคะแนนตามความรู้สึกของท่าน ในการพิจารณาให้คะแนนความพึงพอใจหรือความคิดเห็นของท่าน โดย

- มากที่สุด** หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับมากที่สุด
- มาก** หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับมาก
- ปานกลาง** หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับปานกลาง
- น้อย** หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับน้อย
- น้อยที่สุด** หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับน้อยที่สุด

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจต่อคุณสมบัติของหลอดต่อไปนี้ระดับใด					
(9) การออกแบบรูปลักษณ์ของหลอดเหมาะสมง่ายต่อการใช้งานที่ทันสมัย					
(10) ระบบการทำงานของหลอดมีสะดวกต่อการใช้งาน					

3.3 แบบบันทึกผลการประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของโคมไฟทางการค้า

3.3.1 การทดสอบวันที่สาม

คำชี้แจง ขอความร่วมมือผู้เข้าร่วมการวิจัยทดลองใช้แบบประเมินประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของโคมไฟ จากตัวอย่างแสงที่ปรากฏ โดยตอบคำถามตามสถานการณ์ต่อไปนี้

กรุณาทำเครื่องหมาย / ในช่องปฏิบัติ กรณีท่านได้ปฏิบัติตามข้อคำถามที่ และ / ในช่องไม่ได้ปฏิบัติ กรณีท่านไม่ได้ปฏิบัติตามข้อคำถามที่ (1) – (8)

ตารางที่ 3 ตารางบันทึกการปฏิบัติของผู้เข้าร่วมวิจัยวันที่สามของการทดสอบ

คำถาม	ปฏิบัติ	ไม่ได้ปฏิบัติ
ก่อนเริ่มการทดสอบ		
(1) ท่านได้ติดตั้งโคมไฟแสงทางการค้าให้อยู่สถานะที่พร้อมใช้แล้ว ณ ตำแหน่งที่เหมาะสม (ดังภาพที่ 2)		
(2) ท่านได้ปิดประตูห้องและหน้าต่างก่อนการทำกรทดสอบหรือไม่ หรือกรณีที่ห้องพักของท่านมีแสงจากภายนอกส่องถึงท่านได้ใช้ผ้าปิดช่องผ่านของแสงแล้วหรือไม่		
(3) ท่านได้เปิดเครื่องปรับอากาศ ณ อุณหภูมิที่ท่านรู้สึกสบายตัว		
(4) ท่านได้งดดื่มกาแฟหรือเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนเป็นส่วนผสม อย่างน้อย 1 วัน		
(5) ท่านได้สวมแว่นชนิดเลนส์ใส ไม่มีสี หรือไม่ใช่เลนส์กรองแสง (เฉพาะกรณีที่ท่านต้องสวมแว่นสายตา)		
ขั้นตอนเมื่อเริ่มการทดสอบ		
(5) ระหว่างการทดสอบท่านได้อยู่ในห้องทดสอบเพียงคนเดียวเท่านั้น		
(6) ก่อนเริ่มการทดสอบรับแสงให้ท่านหลับตา นาน 5 นาที แล้วจึงลืมตาขึ้น		
(7) ระหว่างการทดสอบ ท่านสามารถนั่งบนเก้าอี้ หรือ เติง สามารถนอน (ห้ามหลับ)		
(8) ระหว่างการทดสอบ ท่านสามารถทำกิจกรรมต่าง ๆ ได้ โดยอยู่ในรัศมี 1 เมตร จากแนวตรงกลางของแสงที่กระทบพื้น ซึ่งกิจกรรมดังกล่าวต้องที่ไม่กระทบต่อร่างกายและอารมณ์ของท่านมากเกินไป		

คำชี้แจง

ในการให้คะแนนประเมินระดับความพึงพอใจในประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของโคมไฟทางการค้า
ขั้นตอนภายหลังได้รับตัวอย่างแสง 15 นาที โดยให้ท่านทำเครื่องหมาย / ลงในช่องคะแนนตามความรู้สึก
ของท่าน ในการพิจารณาให้คะแนนความพึงพอใจหรือความคิดเห็นของท่าน โดย

มากที่สุด	หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับมากที่สุด
มาก	หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับมาก
ปานกลาง	หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับปานกลาง
น้อย	หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับน้อย
น้อยที่สุด	หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับน้อยที่สุด

บันทึกผล

การทดสอบวันที่สาม

เวลาที่ทำการประเมิน: 06:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: F(WW)

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

บันทึกผล

การทดสอบวันที่สาม

เวลาที่ทำการประเมิน: 18:00 น.

ตัวอย่างแสงที่ทดสอบ: G(CW)

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจในคุณภาพของแสงในประเด็นต่อไปนี้ระดับใด					
(1) ความรู้สึกสบายตาและผ่อนคลายของแสง					
(2) การกระจายของแสงมีความเหมาะสม					
(3) ความสว่างของแสงที่พื้นห้อง					
(4) แสงสีทำให้รู้สึกตื่นตัว					
(5) ความสว่างของแสงบนโต๊ะทำงานในห้อง					
(6) แสงสีให้ความรู้สึกปกติเช่นเดียวกับแสงที่ใช้ในชีวิตประจำวัน					
ท่านมีความพึงพอใจในแสงขณะทำกิจกรรมต่อไปนี้ระดับใด					
(7) ความจำขณะอ่านหนังสือ					
(8) ความจำขณะอ่านข้อความบนจอคอมพิวเตอร์					

3.2.4 แบบประเมินภาพรวมของโคมไฟทางการค้า (ประเมินครั้งเดียว)

คำชี้แจง

ในการให้คะแนนประเมินระดับความพึงพอใจในประสิทธิภาพและการรับรู้แสงของโคมไฟทางการค้า (วันที่สามของการทดสอบ) โดยให้ท่านทำเครื่องหมาย / ลงในช่องคะแนนตามความรู้สึกของท่าน ในการพิจารณาให้คะแนนความพึงพอใจหรือความคิดเห็นของท่าน โดย

มากที่สุด หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับมากที่สุด

มาก หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับมาก

ปานกลาง หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับปานกลาง

น้อย หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับน้อย

น้อยที่สุด หากท่านมีระดับความพึงพอใจระดับน้อยที่สุด

คำถาม	ระดับความพึงพอใจ				
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
ท่านมีความพึงพอใจต่อคุณสมบัติของหลอดต่อไปนี้ระดับใด					
(9) การออกแบบรูปลักษณ์ของหลอดเหมาะสมง่ายต่อการใช้งานที่ทันสมัย					
(10) ระบบการทำงานของหลอดมีสะดวกต่อการใช้งาน					

ข้อเสนอแนะ/ความเห็นที่เป็นประโยชน์เพิ่มเติม

.....

.....

.....

.....

3.4 แนวปฏิบัติเมื่อเสร็จสิ้นการประเมิน

เมื่อเสร็จสิ้นการประเมินแล้ว ให้ผู้เข้าร่วมวิจัยดำเนินการติดต่อ หรือ นัดแนะกับผู้วิจัยเพื่อคืนอุปกรณ์ที่ใช้ทั้งหมด ที่นายสมยศ สันติมาลัย โทรศัพท์ 086-8305373 รวมทั้งท่านจะได้รับค่าตอบแทนในการเสียสละเวลาของท่านเป็นจำนวนเงินคนละเก้าร้อยบาทถ้วน (900 บาท)

คำกล่าวขอขอบคุณผู้เข้าร่วมวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้เข้าร่วมวิจัยในการให้ความร่วมมือในโครงการวิจัยฯ ของท่านมา ณ โอกาสนี้



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายสมยศ สันติมาลัย
วัน เดือน ปี เกิด	20 มกราคม พ.ศ.2524
สถานที่เกิด	จังหวัดชลบุรี
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 3/56 ถนนบ้านบึง-บ้านค่าย, แขวง/ตำบล บ้านบึง, เขต/อำเภอ บ้านบึง, จังหวัดชลบุรี, รหัสไปรษณีย์ 20170 โทรศัพท์ 0868305373



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY