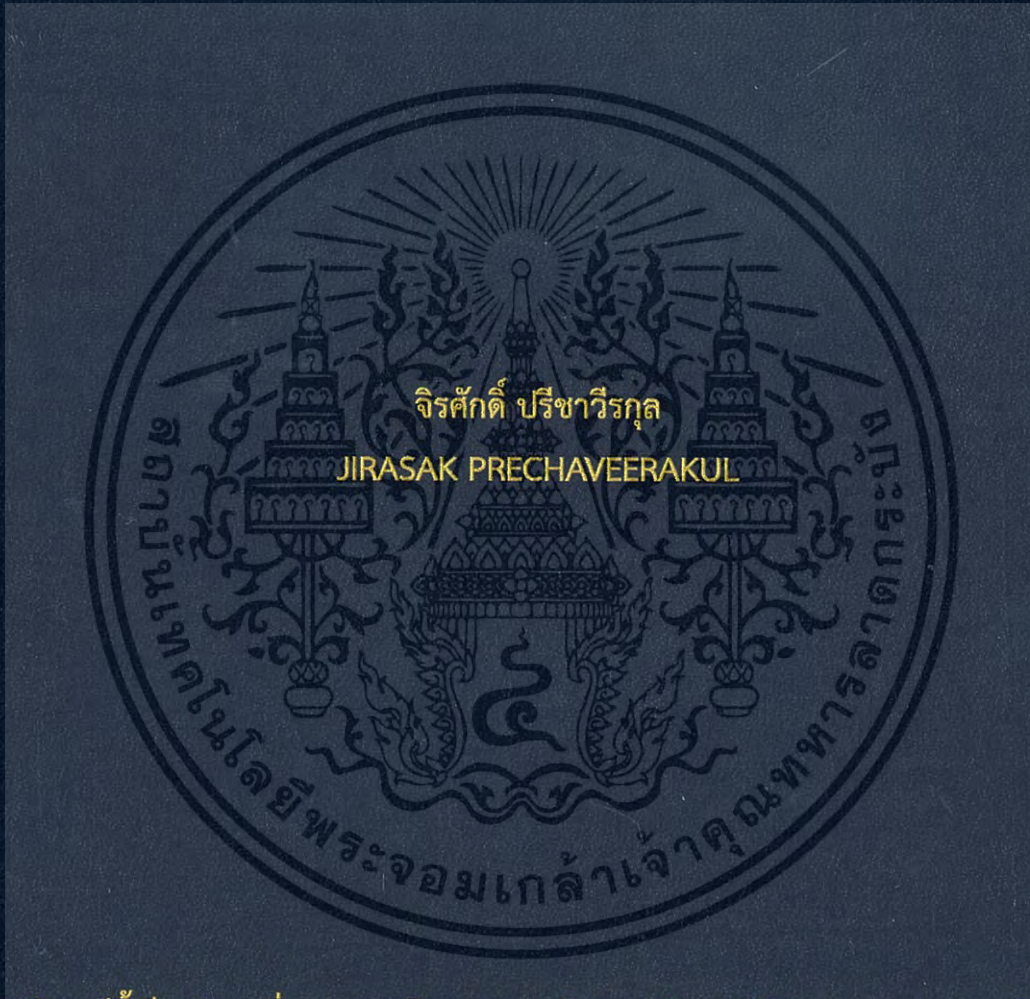


การประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีแอลอีดีสำหรับงานจัดแสงสตูดิโอ

LED TECHNOLOGY IN STUDIO LIGHTING APPLICATIONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-D-018-157

การประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีแอลอีดีสำหรับงานจัดแสงสตูดิโอ

LED TECHNOLOGY IN STUDIO LIGHTING APPLICATIONS



T148667



จรัสศักดิ์ ปรีชาวีรกุล

JIRASAK PRECHAVEERAKUL

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 148667  
รับเดือนปี 14 11 2560

b. 00267449  
l. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-D-018-157

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LED TECHNOLOGY IN STUDIO LIGHTING APPLICATIONS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

KMITL-2017-EN-D-018-157

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีแอลอีดีสำหรับงานจัดแสงสตูดิโอ  
Thesis Title LED Technology in Studio Lighting Applications  
นักศึกษา นายจิรศักดิ์ ปรีชาวีรกุล  
รหัสประจำตัว 54610164  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.เชาว์ ชมภูอินไหว  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-D-018-157

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.เกียรติ	ชยะกุลศิริ	
รศ.ดร.สมชาติ	จิรวินิจการ	
ผศ.ดร.ชาย	ชมภูอินไหว	
ผศ.ดร.นิรุช	จิรสวรรณกุล	
ผศ.ดร.เชาว์	ชมภูอินไหว	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีแอลอีดีสำหรับงานจัดแสงสตูดิโอ
นักศึกษา	นายจิรศักดิ์ ปรีชาวีรกุล
รหัสประจำตัว	54610164
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาว์ ชมภูอินโหว

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีหลอดแอลอีดีสำหรับการจัดแสงภายในสตูดิโอ โดยการเปรียบเทียบสมรรถนะทางแสง ประกอบด้วย พื้นฐานทางแสง พื้นฐานสีของแสง การกระจายแสงของโคมไฟรวมถึง สมรรถนะทางไฟฟ้า ซึ่ง ประกอบด้วย ปริมาณทางไฟฟ้า และคุณภาพทางไฟฟ้า พร้อมทั้งความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ผู้วิจัยได้ศึกษาโดยเน้นไปที่การทำงานของโคมไฟในสตูดิโอ ชนิดเฟรสเนล กำหนดหมวดการกระจายแสง 2 หมวด ได้แก่ ่องศาการกระจายแสงแคบ (15 องศา) และ องศาการกระจายแสงกว้าง (50 องศา) ทำการทดสอบ และบันทึกข้อมูล เพื่อศึกษาสมรรถนะทางแสง และสมรรถนะทางไฟฟ้า ภายในสตูดิโอ สำหรับการศึกษาการกระจายแสงโคมไฟ ได้เก็บข้อมูล IES file ด้วยเครื่องวัดค่าการกระจายแสงแบบอาศัยการหมุนของกระจก พร้อมประมวลผลกราฟการกระจายแสง ด้วยโปรแกรม DIALux 4.1 และ ผู้วิจัยได้จัดทำแบบสอบถาม รวบรวมข้อมูล การใช้พลังงานไฟฟ้า และการลงทุน ของโคมไฟทั้ง 2 ประเภท เพื่อการศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ผลการศึกษาพื้นฐานทางแสง พบว่าฟลักซ์ส่องสว่างมีค่าแตกต่างกัน 10 % ความเข้มแสงโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ มีค่ามากกว่า โคมไฟแอลอีดีกำลังสูง ประมาณ 20 % ค่าประสิทธิภาพการส่องสว่างโคมไฟแอลอีดีกำลังสูง มีค่า 103.53 ลูเมนต่อวัตต์ เมื่อเทียบกับโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ มีค่าเพียง 61.60 ลูเมนต่อวัตต์ ด้านพื้นฐานสีของแสง ค่าอุณหภูมิสีของแสงทั้ง 2 ของโคมไฟ สามารถทดแทนกันได้ ขณะที่ค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสงโคมไฟแอลอีดีกำลังสูง มีค่าประมาณ 85% ซึ่งสูงกว่าโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ ด้านคุณภาพทางไฟฟ้า โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า 0.94 แต่โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ มีค่า 0.54 ความผิดเพี้ยนรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนสูงมาก ถึง 140% ขณะที่โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง มีค่าเพียง 30% ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ สำหรับการลงทุน มีช่วงเวลาคืนทุน 7 ปี 7 เดือน เกิดมูลค่าปัจจุบันสุทธิ 60,491 บาท ได้รับอัตราผลตอบแทนการลงทุน 9.70 % และอัตราส่วนของผลประโยชน์ต่อเงินลงทุนมีค่า 1.82

Thesis	LED Technology in Studio Lighting Applications
Student	Mr. Jirasak Prechaveerakul
Student ID.	54610164
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Chow Chompoo-inwai

## ABSTRACT

This research presents applications of LED lighting technologies for an indoor studio lighting design by comparing the optical performance i.e., basic lighting parameters, wavelengths, color rendering index (CRI) and lighting distribution and the electrical performance i.e., electrical quantities and power quality with engineering economic analysis for an investment.

The experiment was conducted with a 104 W HP-LED luminaire in place of 200 W HMI luminaire, with controlled beam output at 15 degree and spread output at 50 degree. The experiment and its data were conducted, recorded and analyzed for its optical and electrical performances in indoor studio environment. In light distribution performance, the data were collected in IES file by using centric moving mirror goniophotometer and light distribution curve were analyzed with DIALux 4.1 program. This research also contains questionnaires for collecting electric energy consumption data and the two type luminaires investment for engineering economic analysis. The findings revealed that, optically, luminous flux differed about 10%, illuminance of the HMI luminaire were higher than HP-LED luminaire about 20%. The HP-LED and HMI luminaires luminous efficacy were 103.53 lm/W and 61.60, respectively. In terms of basic color of light and color temperature, HP-LED could also replace HMI luminaires as they are in the same range wavelength. The Color Rendering Index (CRI) of the HP-LED luminaire was 85%, which was higher than the HMI luminaire. In the electrical aspect, the power factor of HP-LED and HMI luminaires were 0.94 and 0.54, respectively. A total current harmonic distortion (%THDi) of HMI luminaire was 140%. While %THDi of HP-LED luminaire was 30%. The payback period (PBP) for the replacement of HP-LED luminaires was around seven years and seven months. The net present value is 60,491 baht. The investment return is 9.70%. The benefit-cost ratio is 1.82.

## II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.เชาว์ ชมภูอินไหว ที่ให้ความช่วยเหลือ คำชี้แนะ แก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้ และประสบการณ์ที่ดีตลอดเวลาที่ได้ศึกษาในสถาบันแห่งนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอย่างยิ่งมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.กิริติ ชยะกุลศิริ รศ.ดร.สมชาติ จิรีวิภากร ผศ.ดร.ชาย ชมภูอินไหว และ ผศ.ดร.นิรุช จิรสวรรณกุล ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จ และสมบูรณ์ลงได้

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และมูลนิธิการศึกษาเซล 100 ปี ที่ให้การสนับสนุนการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบคุณ คณะผู้บริหาร เพื่อน พี่ น้อง อาจารย์ เจ้าหน้าที่ ศิษย์เก่า และปัจจุบัน สังกัด คณะเทคโนโลยีสื่อสารมวลชน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นายสุทธิพงศ์ บุญทากลาง นายชนกนันท์ หอนิรันดร์พงศ์ และน้องๆ ในห้องปฏิบัติศูนย์วิจัยพลังงานและวิศวกรรมส่องสว่าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคน ที่ให้การช่วยเหลือ และสนับสนุน มาเป็นอย่างดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา มารดา คุณย่า พี่สาว และคนในครอบครัวอันเป็นที่รักอย่างยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ผ่านมา สำหรับได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้แก่ข้าพเจ้า

จิรัชกิติ ปรีชาวีรกุล

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 หลักการจัดแสงภายในและภายนอกสตูดิโอ .....	8
2.2.1 ผลทางภาพที่เกิดขึ้นสำหรับการจัดแสง.....	8
2.2.2 หลักการควบคุมคุณภาพของแสง .....	8
2.2.2.1 ความเข้มของแสง.....	9
2.2.2.2 การกระจายของแสง.....	9
2.2.2.3 สีของแหล่งกำเนิดแสง.....	10
2.2.3 แหล่งกำเนิดแสง.....	10
2.2.3.1 แสงธรรมชาติ .....	10
2.2.3.2 แสงประดิษฐ์.....	10
2.3 การทดสอบตามมาตรฐาน IES LM-79 08 .....	21
2.3.1 สมรรถนะทางแสง (Photometry Performances).....	22
2.3.1.1 พื้นฐานทางแสง .....	22
2.3.1.2 ค่าความสว่างสำหรับการจัดแสง.....	28
2.3.1.3 การกระจายแสงของโคม (Lighting Distributions) .....	30
2.3.1.4 สีของแสง (Colorimetry Terms) .....	33

2.4	อุณหภูมิสีของแหล่งกำเนิดแสง.....	33
2.4.1	ลักษณะสีของแสง.....	33
2.4.2	พื้นฐานค่าสีของแสง (Basic Colorimetric Parameters).....	34
2.4.2.1	ระบบการวัดสี (Color Measuring System).....	34
2.4.3	สีของแหล่งกำเนิดประดิษฐ์ หรือ อุณหภูมิสีของแสง.....	38
2.4.4	ดัชนีความถูกต้องสีของแสง.....	41
2.4.5	สมรรถนะทางไฟฟ้า (Electrical Performances).....	46
2.4.5.1	ปริมาณของระบบไฟฟ้า.....	46
2.4.5.2	คุณภาพทางไฟฟ้า.....	47
2.5	การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์.....	52
2.5.1	เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ค่าทางเศรษฐศาสตร์.....	52
2.5.1.1	ช่วงเวลาคืนทุน (Payback Period; <i>PBP</i> ).....	52
2.5.1.2	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; <i>NPV</i> ).....	53
2.5.1.3	อัตราผลตอบแทนจากเงินลงทุน (Internal Rate of Return; <i>IRR</i> ).....	53
2.5.1.4	อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน (Benefit Cost Ratio; <i>B/C</i> ).....	53
2.5.2	การใช้พลังงานสำหรับการจัดแสง (Lighting Energy Consumption).....	54
2.5.2.1	พลังงานสำหรับการจัดแสง (Lighting Energy).....	54
2.5.2.2	ค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าสำหรับการจัดแสง (Lighting Energy Cost; <i>LEC</i> ).....	54
2.5.3	สมมติฐานการคำนวณ (Hypothesis Methodology Terms).....	54
2.5.3.1	ค่าต้นทุนเริ่มต้นของโคมไฟ (Initial Cost of one Luminaire).....	54
2.5.3.2	ค่าต้นทุนของหลอดไฟ (Cost of one Lamp).....	55
2.5.3.3	อายุการใช้งานของหลอดไฟ (Lamp Life).....	55
2.5.3.4	ระยะเวลาของโครงการลงทุน (Time Project).....	55
2.5.3.5	ชั่วโมงการทำงานต่อปี (Operating Hours per Year, operating.hr/yr.).....	55
2.5.3.6	อัตราค่าไฟฟ้า (Electricity Tariff Rate).....	55
2.5.3.7	อัตราดอกเบี้ย (Internal Rate).....	55
2.6	อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับงานวิจัย.....	56
2.6.1	โคมไฟสำหรับการจัดแสง (Lamp Housing or Luminaire).....	56
2.6.1.1	โคมไฟ เอชเอ็มไอ เฟรชเนล (Hydrargyrum Medium Arc Iodide (HMI) Fresnel).....	57
2.6.1.2	โคมไฟ หลอดแอลอีดีกำลังสูง (High Power Light Emitting Diode (HP-LED) Fresnel).....	58
2.6.2	เครื่องวัดค่าความรับรังสีรวมของแหล่งกำเนิดแสง (Spectroradiometer).....	59

2.6.3 เครื่องวัดค่าการกระจายความเข้มสองสว่างโคมไฟ (Gonio photometer).....	59
2.6.3.1 อาศัยอุปกรณ์ช่วยในการหมุนแหล่งกำเนิดแสง.....	59
2.6.3.2 อาศัยการหมุนของกระจก.....	60
2.6.4 โปรแกรม DIALux 4.10.....	61
2.6.4.1 ตัวอย่างการใช้โปรแกรม DIALux.....	61
2.6.5 เครื่องวัดคุณภาพทางไฟฟ้า (Power Quality Analyzer).....	65
<b>บทที่ 3 การออกแบบและติดตั้ง .....</b>	<b>67</b>
3.1 ภาพรวมของระบบการตรวจวัด .....	67
3.1.1 สตูดิโอสำหรับการจัดแสง.....	69
3.1.2 ห้องปฏิบัติการวัดค่าและข้อมูลการกระจายแสงของโคมไฟ.....	70
3.1.3 การตั้งค่าหมวดควบคุมการกระจายแสงของโคมไฟ.....	70
3.2 การวัดค่าสมรรถนะทางแสง .....	71
3.2.1 พื้นฐานทางแสง.....	73
3.2.2 พื้นฐานสีของแสง.....	74
3.2.3 การกระจายแสงของโคม.....	74
3.3 การวัดค่าสมรรถนะทางไฟฟ้า.....	77
3.3.1 ปริมาณของระบบไฟฟ้า.....	77
3.3.2 คุณภาพไฟฟ้า.....	77
3.4 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์.....	79
3.4.1 การใช้พลังงานสำหรับการจัดแสง.....	80
3.4.2 สมมติฐานทางเศรษฐศาสตร์.....	80
<b>บทที่ 4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการวิจัย.....</b>	<b>83</b>
4.1 การควบคุมผลการศึกษา.....	83
4.2 สมรรถนะทางแสง.....	84
4.2.1 พื้นฐานทางแสง.....	84
4.2.1.1 ผลการศึกษาพื้นฐานทางแสง.....	84
4.2.1.2 วิเคราะห์ผลการวิจัยพื้นฐานทางแสง.....	87
4.2.2 พื้นฐานค่าสีของแสง (Colorimetry Terms).....	88
4.2.2.1 ผลการศึกษาค่าสีของแสง.....	88
4.2.2.2 วิเคราะห์ผลการวิจัยพื้นฐานค่าสีของแสง.....	92
4.2.3 การกระจายแสงของโคม (Lighting Distributions).....	93
4.2.3.1 ผลการศึกษากการกระจายแสงของโคม.....	93
4.2.3.2 วิเคราะห์ผลการวิจัยการกระจายแสงของโคม.....	97

4.3	สมรรถนะทางไฟฟ้า (Electrical Performances).....	98
4.3.1	ผลการศึกษาปริมาณของระบบไฟฟ้า.....	98
4.3.2	ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	99
4.3.3	วิเคราะห์ผลการวิจัยปริมาณทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	102
4.4	การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์.....	103
4.4.1	การศึกษาทางเศรษฐศาสตร์.....	103
4.4.2	วิเคราะห์ผลการวิจัยทางเศรษฐศาสตร์.....	104
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>105</b>
5.1	สรุปผลการวิจัยของสมรรถนะทางแสง.....	105
5.1.1	พื้นฐานทางแสง.....	105
5.1.2	พื้นฐานค่าสีของแสง.....	105
5.1.3	การกระจายแสงของโคม.....	106
5.2	สรุปผลการวิจัยของสมรรถนะทางไฟฟ้า.....	106
5.3	สรุปผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์.....	106
5.4	ข้อเสนอแนะ.....	107
	<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>108</b>
ภาคผนวก ก	ข้อมูล IES File ของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W และ โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W.....	112
ภาคผนวก ข	ข้อมูล ปริมาณทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางไฟฟ้า ของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W และโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W จากเครื่องวัด Chauvin Arnoux C.A. 8335.....	125
ภาคผนวก ค	การคำนวณสมรรถนะทางแสง.....	146
ภาคผนวก ง	การคำนวณค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม.....	204
ภาคผนวก จ	บทความทางวิชาการ.....	213
	ประวัติผู้เขียน.....	271

# สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของหลอดเอชเอ็มไอ .....	12
ตารางที่ 2.2 รายละเอียดของหลอดแอลอีดีกำลังสูง.....	21
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการคำนวณค่าความสว่างในการจัดแสง .....	30
ตารางที่ 2.4 แสดงระดับค่าความสว่างของแหล่งกำเนิดแสง .....	30
ตารางที่ 2.5 สเปกตรัมสีของแสงที่มนุษย์สามารถมองเห็นด้วยตา.....	33
ตารางที่ 2.6 อุณหภูมิสีของแสง .....	39
ตารางที่ 2.7 อุณหภูมิสีของแหล่งกำเนิดแสง .....	40
ตารางที่ 2.8 ปัญหาทางคุณภาพทางไฟฟ้ากับแนวทางการแก้ไข .....	51
ตารางที่ 2.9 กรณศึกษาการใช้พลังงานไฟฟ้าในสตูดิโอประเทศไทย .....	52
ตารางที่ 3.1 รูปแบบ IES File ของดวงโคมไฟ .....	76
ตารางที่ 3.2 กำลังไฟฟารวมของโคมไฟที่ใช้ในการจัดแสงภายในสตูดิโอ .....	81
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลและสมมติฐานสำหรับการคำนวณหาค่าตัวแปรทางเศรษฐศาสตร์.....	82
ตารางที่ 4.1 ค่าพื้นฐานทางแสง โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W และหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W... 84	
ตารางที่ 4.2 ค่าสีของแสงโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W และหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W.....	88
ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาปริมาณทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางไฟฟ้า .....	98
ตารางที่ 4.4 ผลการศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์.....	103
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์.....	104

# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	ความสำคัญสำหรับการจัดแสงจากแหล่งกำเนิดแสงธรรมชาติ.....	8
รูปที่ 2.2	ความเข้มของแสง.....	9
รูปที่ 2.3	การกระจายของแสง.....	9
รูปที่ 2.4	สีของแหล่งกำเนิดแสง.....	10
รูปที่ 2.5	ประเภทของแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์.....	11
รูปที่ 2.6	โครงสร้างภายในหลอดไฟเอชเอ็มไอ.....	11
รูปที่ 2.7	รูปแบบหลอดแอลอีดีกำลังสูง Lumileds Luxeon K2.....	13
รูปที่ 2.8	โครงสร้างหลอดแอลอีดีกำลังสูง.....	13
รูปที่ 2.9	วงจรขับหลอด.....	15
รูปที่ 2.10	ประสิทธิภาพส่องสว่าง.....	17
รูปที่ 2.11	วัสดุยึดประกอบ.....	18
รูปที่ 2.12	ตัวกลางโปร่งแสง.....	19
รูปที่ 2.13	การทำงานของหลอดแอลอีดีกำลังสูง.....	20
รูปที่ 2.14	องค์ประกอบความสว่าง.....	23
รูปที่ 2.15	ฟลักซ์ส่องสว่างจากมุมเชิงของแข็ง.....	23
รูปที่ 2.16	กำลังส่องผกผันของแสง.....	25
รูปที่ 2.17	การหาค่าความเข้มแสงแบบจุด.....	26
รูปที่ 2.18	ทิศทางมุมในการหาค่าความเข้มแสง.....	27
รูปที่ 2.19	หลักการพื้นฐานของตรีโกณมิติ.....	27
รูปที่ 2.20	การหาค่าความสว่างสำหรับการจัดแสง.....	28
รูปที่ 2.21	ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความสว่างในการจัดแสง.....	29
รูปที่ 2.22	กราฟการกระจายแสงของโคมไฟแบบโพลาร์เคิร์ฟ.....	31
รูปที่ 2.23	กราฟการกระจายแสงของโคมไฟแบบไอโซลักซ์.....	31
รูปที่ 2.24	กราฟการกระจายแสงของโคมไฟแบบไอโซอินเทนซิตี.....	32
รูปที่ 2.25	กราฟการกระจายแสงของโคมไฟแบบโคน.....	32
รูปที่ 2.26	แสงธรรมชาติ.....	33
รูปที่ 2.27	ไอแซค นิวตัน.....	34
รูปที่ 2.28	การกระจายพลังงานของแหล่งกำเนิดแสงต่างๆ ตามมาตรฐาน CIE-1931.....	35
รูปที่ 2.29	Color Matching Function.....	35
รูปที่ 2.30	Tristimulus space based on CIE-1931.....	36
รูปที่ 2.31	เส้นโค้งค่าสีของวัตถุดำ.....	39
รูปที่ 2.32	ขั้นตอนการคำนวณหาค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสง.....	45

## IX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.33	ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ .....	46
รูปที่ 2.34	แรงดันเกินชั่วขณะ (Swells voltage) .....	48
รูปที่ 2.35	แรงดันตก (Under voltage) .....	49
รูปที่ 2.36	แรงดันเกิน (Over voltage).....	49
รูปที่ 2.37	ไฟฟ้าดับ (Long interruptions).....	49
รูปที่ 2.38	แรงดันกระเพื่อม (Voltage fluctuations).....	50
รูปที่ 2.39	ลักษณะรูปคลื่นของฮาโมนิกส์ .....	50
รูปที่ 2.40	โครงสร้างโคมไฟประเภทสปอท เฟรสเนลเลนส์ .....	56
รูปที่ 2.41	ลักษณะการกระจายแสงของโคมไฟประเภทสปอท เฟรสเนลเลนส์ .....	57
รูปที่ 2.42	ส่วนประกอบที่สำคัญของโคมไฟ เอชเอ็มไอ เฟรชแนล .....	57
รูปที่ 2.43	ส่วนประกอบที่สำคัญของโคมไฟ หลอดแอลอีดีกำลังสูง .....	58
รูปที่ 2.44	โครงสร้างการทำงานเครื่องวัดค่าความรับรังสีรวม .....	59
รูปที่ 2.45	อาศัยอุปกรณ์ช่วยในการหมุนแหล่งกำเนิดแสง .....	60
รูปที่ 2.46	อาศัยการหมุนของกระจก .....	60
รูปที่ 2.47	โปรแกรม DIALux 4.10 .....	61
รูปที่ 2.48	กราฟการกระจายแสงของโคมไฟหลอดฟลูออโรเรสเซนต์ .....	62
รูปที่ 2.49	กำหนดขนาดห้อง .....	62
รูปที่ 2.50	การกำหนดสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง.....	63
รูปที่ 2.51	กำหนดดวงโคมไฟ Sylvania 58 W 5200 ลูเมน .....	63
รูปที่ 2.52	การกำหนดค่าความสว่าง.....	64
รูปที่ 2.53	การวางดวงโคมไฟ .....	64
รูปที่ 2.54	เส้นทางการส่องสว่าง .....	65
รูปที่ 2.55	เส้นทางการส่องสว่าง .....	66
รูปที่ 3.1	ลำดับขั้นตอนศึกษาการวิจัย.....	68
รูปที่ 3.2	รายละเอียดสตูดิโอสำหรับการจัดแสงในงานวิจัย .....	69
รูปที่ 3.3	ห้องปฏิบัติการทางแสงการวัดค่าการกระจายแสงของโคมไฟ .....	70
รูปที่ 3.4	หมวดควบคุมการกระจายแสงของโคมไฟที่ตำแหน่ง Spot 15 องศา (ก) และตำแหน่ง Flood 50 องศา (ข) .....	71
รูปที่ 3.5	ลักษณะภายนอกของเครื่องมือวัดความรับรังสีรวมของแหล่งกำเนิดแสง (ก) และหน้าจอแสดงผล (ข) .....	72
รูปที่ 3.6	การหาระยะระหว่างโคมไฟถึงลำตัวแบบบุคคล (ก) และแวนตัดแสงหาตำแหน่งโคมไฟ (ข) ....	72
รูปที่ 3.7	จุดรับแสงการอ่านค่าของเครื่องวัด (ก) และจุดกึ่งกลางของวงแสงเพื่อการวัดค่า (ข).....	73
รูปที่ 3.8	การอ่านและบันทึกค่าแสงของเครื่องวัด (ก) และเบื้องหลังการวัดค่าสมรรถนะทางแสง (ข)....	73
รูปที่ 3.9	การวัดค่าพื้นฐานทางแสงและสีของแสง จำนวน 12 ตำแหน่ง ภายในสตูดิโอ.....	74

รูปที่ 3.10	ไดอะแกรมการวัดค่าการกระจายแสง (ก) และการวัดค่าการกระจายแสง ในห้องปฏิบัติการทางแสง (ข) ของโคมไฟหลอดเซอเอ็มไอ 200 W.....	75
รูปที่ 3.11	ไดอะแกรมการวัดค่าการกระจายแสง (ก) และการวัดค่าการกระจายแสง ในห้องปฏิบัติการทางแสง (ข) ของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W .....	76
รูปที่ 3.12	ไดอะแกรมวงจรการวิเคราะห์ (ก) และการวัดค่า (ข) ปริมาณทางไฟฟ้า และคุณภาพไฟฟ้าของโคมไฟหลอดเซอเอ็มไอ 200 W.....	78
รูปที่ 3.13	ไดอะแกรมวงจรการวิเคราะห์ (ก) และการวัดค่า (ข) ปริมาณทางไฟฟ้า และคุณภาพไฟฟ้าของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W .....	79
รูปที่ 4.1	การคำนวณค่าพื้นฐานทางแสง (ก) และการวัดค่าความเข้มแสง (ข) ของโคมไฟหลอดแอลอีดี กำลังสูง 104 W ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา .....	85
รูปที่ 4.2	การคำนวณค่าพื้นฐานทางแสง (ก) และการวัดค่าความเข้มแสง (ข) ของโคมไฟหลอด เซอเอ็มไอ 200 W ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา .....	85
รูปที่ 4.3	การคำนวณค่าพื้นฐานทางแสง (ก) และการวัดค่าความเข้มแสง (ข) ของโคมไฟหลอด แอลอีดีกำลังสูง 104 W ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา .....	86
รูปที่ 4.4	การคำนวณค่าพื้นฐานทางแสง (ก) และการวัดค่าความเข้มแสง (ข) ของโคมไฟหลอด เซอเอ็มไอ 200 W ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา.....	86
รูปที่ 4.5	ตัวแปรการติดตั้ง $T = 1.5$ m, Beam Diameter = 0.4 m ของโคมไฟ HP-LED 104 W ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา (ก) และโคมไฟ HMI 200 W ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา (ข) .....	90
รูปที่ 4.6	ตัวแปรการติดตั้ง $T = 3.0$ m, Beam Diameter = 0.8 m ของโคมไฟ HP-LED 104 W ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา (ก) และโคมไฟ HMI 200 W ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา (ข) .....	90
รูปที่ 4.7	ตัวแปรการติดตั้ง $T = 4.6$ m, Beam Diameter = 1.2 m ของโคมไฟ HP-LED 104 W ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา (ก) และโคมไฟ HMI 200 W ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา (ข) .....	91
รูปที่ 4.8	ตัวแปรการติดตั้ง $T = 1.5$ m, Beam Diameter = 1.4 m ของโคมไฟ HP-LED 104 W ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา (ก) และโคมไฟ HMI 200 W ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา (ข) .....	91
รูปที่ 4.9	ตัวแปรการติดตั้ง $T = 3.0$ m, Beam Diameter = 2.8 m ของโคมไฟ HP-LED 104 W ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา (ก) และโคมไฟ HMI 200 W ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา (ข) .....	92
รูปที่ 4.10	ตัวแปรการติดตั้ง $T = 4.6$ m, Beam Diameter = 4.3 m ของโคมไฟ HP-LED 104 W ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา (ก) และโคมไฟ HMI 200 W ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา (ข).....	92

รูปที่ 4.11	การกระจายแสงของโคมแบบไอโซอินเทนซิตี ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา HP-LED 104 W (ก) และ HMI 200 W (ข).....	94
รูปที่ 4.12	การกระจายแสงของโคมแบบไอโซอินเทนซิตี ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา HP-LED 104 W (ก) และ HMI 200 W (ข).....	94
รูปที่ 4.13	การกระจายแสงของโคมแบบไอโซลักซ์ ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา HP-LED 104 W (ก) และ HMI 200 W (ข).....	95
รูปที่ 4.14	การกระจายแสงของโคมแบบไอโซลักซ์ ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา HP-LED 104 W (ก) และ HMI 200 W (ข).....	95
รูปที่ 4.15	การกระจายแสงของโคมแบบโพลาร์เคิร์ฟ ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา HP-LED 104 W (ก) และ HMI 200 W (ข).....	96
รูปที่ 4.16	การกระจายแสงของโคมแบบโพลาร์เคิร์ฟ ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา HP-LED 104 W (ก) และ HMI 200 W (ข).....	96
รูปที่ 4.17	การกระจายแสงของโคมไฟแบบโพลาร์เคิร์ฟ ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา HP-LED 104 W (ก) และ HMI 200 W (ข).....	97
รูปที่ 4.18	การกระจายแสงของโคมไฟแบบโพลาร์เคิร์ฟ ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา HP-LED 104 W (ก) และ HMI 200 W (ข).....	97
รูปที่ 4.19	รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าโดยการพล็อตกราฟของ HP-LED 104 W (ก) และ HMI 200 W (ข).....	99
รูปที่ 4.20	สเป็คตรัมของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า $\%THD_v$ ของ HP-LED 104 W (ก) และ HMI 200 W (ข).....	100
รูปที่ 4.21	สเป็คตรัมของสัญญาณกระแสไฟฟ้า $\%THD_i$ ของ HP-LED 104 W (ก) และ HMI 200 W (ข).....	101

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันงานทางด้านสื่อสารมวลชน ได้แก่ การผลิตรายการทางโทรทัศน์ จัดเป็นภาคธุรกิจบันเทิงที่มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงที่ใกล้เคียงกับภาคธุรกิจการค้าและอุตสาหกรรม คือ ต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามากในระดับปานกลางแต่มีการใช้งานอย่างต่อเนื่อง และพบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าถูกนำไปใช้ในกระบวนการผลิตรายการ ในด้านของแสงสว่าง หมายถึงความต้องการที่จะเพิ่มความสว่างให้กับฉาก และเวที รวมไปถึงนักแสดงที่ต้องเข้าฉาก และเมื่อศึกษากระบวนการจัดแสงพบว่า ชนิดของหลอดไฟที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงมีหลายชนิด มีขนาดกำลังไฟฟ้าแตกต่างกัน เช่น โคมไฟประเภทหลอดไฟอาร์ค (Hydrargyrum Medium-arc Iodide; HMI ) ขนาดตั้งแต่ 75 วัตต์ ถึง 10,000 วัตต์ จัดอยู่ในกลุ่มอุณหภูมิสีประมาณ 5,600 องศาเคลวิน นิยมสำหรับการจัดแสงภายใน และภายนอกสตูดิโอ ขณะที่การผลิตรายการโทรทัศน์ สำหรับการจัดแสงเพื่อถ่ายทำจะใช้ความสว่างในจำนวนชั่วโมงที่นานต่อเนื่อง และตำแหน่งโคมไฟที่ใช้มีไม่ต่ำกว่า 3 ตำแหน่ง จากข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับการผลิตรายการทางโทรทัศน์ของสถานี BBC Television Centre ประเทศอังกฤษ ตามตารางที่ 1.1 สามารถนำมาใช้ในการพิจารณาเป็นกรณีศึกษาสำหรับใช้เป็นแนวทางประหยัดพลังงานไฟฟ้าภายในประเทศสำหรับการผลิตรายการโทรทัศน์ หากนำข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของหลอดไฟแต่ละชนิดมาพิจารณาการตัดสินใจเปลี่ยนหลอดไฟให้ใช้พลังงานน้อยลงแต่ยังคงค่าความสว่างที่เทียบเท่าหรือสูงขึ้น

ตารางที่ 1.1 ค่าพลังงานไฟฟ้าสำหรับผลิตรายการทางโทรทัศน์สถานี BBC Television Centre [1]

Luminaire	Power (W)	Number	Hours run	Dimming factor	Energy (kWh)
Tungsten Source	1,250	5	2	0.5	6.250
Tungsten Halogen Source	575	5	3	0.2	1.725
Fluorescent	160	3	4	1	1.920
LED	190	3	4	1	2.280

จากการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมากสำหรับการจัดแสงด้วยหลอดไฟที่กล่าวมาในข้างต้น จึงได้มีการนำหลอดแอลอีดี (Light Emitting Diode, LED ) โดยเฉพาะหลอดแอลอีดีกำลังสูง (High Power LED) มาใช้สำหรับการให้แสงสว่างภายในสตูดิโอเพื่อทดแทนหลอดไฟดังกล่าว ปัจจุบันได้มีการพัฒนาขึ้นและมีแนวโน้มให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นกว่าหลอดไฟเอชเอ็มไอ หรือหลอดไฟประเภทอื่น เช่น หลอดทังสเตนฮาโลเจน หลอดฟลูออเรสเซนต์ เนื่องจากมีค่าของการสูญเสียการกระจายของแสงคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ต่ำมากส่งผลให้เกิดค่าความร้อนสูญเสียของหลอดไฟมีเปอร์เซ็นต์ที่สูงมากทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศภายในสตูดิโอลดลงเช่นกัน แสดงดังตารางที่ 1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.2 ค่าการสูญเสียของแหล่งกำเนิดแสง [2]

ชนิดของหลอดไฟ	การแผ่รังสีความร้อน (%)	การระบายความร้อน (%)
Incandescent	81-86	5-6
Metal Halide	57-74	7-20
LED	0-0.2	80-88

นอกจากนี้ยังมีข้อดีหลายด้าน อาทิ อายุการใช้งานนาน สามารถ ปิด เปิด บ่อย โดยไม่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของหลอด และทนทานต่อการสั่นสะเทือนไม่เปาะบางอย่างเช่น หลอดไฟประเภท อินแคนเดสเซนต์ ฟลูออเรสเซนต์ เป็นต้น และค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสง ค่าประสิทธิภาพการส่องสว่างมีค่าเปอร์เซ็นต์ที่สูง

สำหรับงานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมรรถนะทางแสง สมรรถนะทางไฟฟ้า และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูงขนาดกำลังไฟฟ้า 104 W ที่ได้รับความนิยมสำหรับนำมาทดแทนหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ที่นำมาใช้ในการจัดแสงภายในสตูดิโอสำหรับงานทางด้านวิทยุโทรทัศน์ และภาพยนตร์ ตามมาตรฐาน IES LM 79-08

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

เพื่อศึกษา เปรียบเทียบ และวิเคราะห์ ในแง่เทคนิคทางวิศวกรรมศาสตร์ และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างโคมไฟประเภทเฟรสเนลเลนส์ที่ใช้หลอดไฟเอชเอ็มไอ และเทคโนโลยีของหลอดแอลอีดีกำลังสูง สำหรับนำมาใช้ในการจัดแสงภายในสตูดิโอ

1. ศึกษาหลักการทำงานของหลอดเอชเอ็มไอ และหลอดแอลอีดีกำลังสูง
2. เปรียบเทียบ และวิเคราะห์ สมรรถนะทางแสง ได้แก่ พื้นฐานทางแสง พื้นฐานสีของแสง การกระจายแสงของโคมไฟ
3. เปรียบเทียบ และวิเคราะห์ สมรรถนะทางไฟฟ้า ได้แก่ ปริมาณทางไฟฟ้า และคุณภาพไฟฟ้า
4. ศึกษาความเหมาะสมการเลือกใช้กราฟการกระจายแสงของโคมไฟ
5. ศึกษา และวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการลงทุน
6. สามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีหลอดแอลอีดีทดแทนโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษา โคมไฟประเภทเพรสนเนลเลนส์ระหว่างหลอดไฟเอชเอ็มไอ 200 W และ หลอดไฟแอลอีดีกำลังสูง 104 W โดยมีหัวข้อดังต่อไปนี้

1. เปรียบเทียบการวัดและการคำนวณ สมรรถนะทางแสงประกอบด้วย ฟลักซ์ส่องสว่าง ความเข้มส่องสว่าง ความเข้มแสง ประสิทธิภาพส่องสว่าง
2. เปรียบเทียบการวัดและคำนวณ ค่าพื้นฐานสีของแสงประกอบด้วย ค่าไตรสตีมูลัส CIE 1931 ค่าโครมาติกซิตี CIE 1976 อุณหภูมิสีของแสง ดัชนีความถูกต้องสีของแสง
3. เก็บข้อมูลกระจายแสงในรูปแบบ IES file เพื่อนำไปประมวลผลการกระจายแสงของโคมไฟบนโปรแกรม DIALux 4.1 แสดงผลกราฟการกระจายแสงแบบ ไอโซอินเทนซิตี ไอโซลักซ์ โพลาร์
4. วิเคราะห์สมรรถนะทางไฟฟ้า ประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ กำลังไฟฟ้าปรากฏ คุณภาพทางไฟฟ้าของความผิดเพี้ยนฮาโมนิกส์รวมของค่าแรงดัน และค่ากระแส
5. ทำแบบสอบถามเพื่อการรวบรวมข้อมูลสำหรับศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์
6. ประมวลผลการศึกษากการวิเคราะห์สมรรถนะทางแสง ทางไฟฟ้า และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการตัดสินใจเลือกใช้โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ทดแทนโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลที่ได้จากการศึกษาในวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ เป็นการนำโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W มา ทดแทนโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W สำหรับการจัดแสงภายในสตูดิโอ มีต่อไปนี้

1. เข้าใจการคำนวณค่าความเข้มแสง สำหรับการจัดแสงตามกฎแลมเบิร์ตโคไซน์ค์
2. สามารถคำนวณหาค่าอุณหภูมิสีของแสง และค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงโคมไฟทั้ง 2 ประเภท
3. เข้าใจกราฟการกระจายแสงโคมไฟที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สมรรถนะทางแสง เพื่อการเลือกใช้โคมไฟให้เหมาะสม
4. ทราบการประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ ประเภทแหล่งกำเนิดแสงจากสารกึ่งตัวนำตามมาตรฐานการทดสอบ IES LM-79 08
5. ทราบการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ สำหรับการตัดสินใจเลือกใช้โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ทดแทนโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W
6. แนวทางการศึกษาวิจัยสำหรับนำโคมไฟหลอดแอลอีดีทดแทนหลอดไฟประเภทหลอดเอชเอ็มไอ ในการจัดแสงภายในสตูดิโอ สามารถนำไปประยุกต์กับ โคมไฟภายใน บ้านเรือน ภาคอุตสาหกรรม ภาคคมนาคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้มีการดำเนินวิจัยมีขั้นตอน และรายละเอียดต่างๆ ของการศึกษา แบ่งออกเป็น 5 บท ดังต่อไปนี้ คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงที่มา การให้ความสำคัญสำหรับการนำหลอดแอลอีดีกำลังสูง มาทดแทนการให้แสงสว่างของหลอดไฟแบบต่างๆ เช่น หลอดไฟทังสเตน ฮาโรเจน หลอดฟลูออโรเรสเซนต์ หลอดไฟเอชเอ็มไอ เป็นต้น ตลอดจน ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ขอบเขตของการศึกษา ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สำหรับการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ พร้อมอธิบายทฤษฎีด้านหลักการจัดแสงภายในและภายนอกสตูดิโอ ตลอดจนแหล่งกำเนิดแสงที่นำมาใช้ในการจัดแสง โดยยึดตามการทดสอบตามมาตรฐาน IES LM-79 08 ที่ พิจารณาด้านสมรรถนะทางแสง สมรรถนะทางไฟฟ้า และด้านการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบ และการติดตั้งระบบการตรวจวัดโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W และหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ภายในสตูดิโอ เพื่อหาค่าสมรรถนะทางแสง สมรรถนะทางไฟฟ้า และทำแบบสอบถามเพื่อการรวบรวมข้อมูลสำหรับศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

บทที่ 4 ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผลการวิจัย อภิปรายผลการศึกษา ของ สมรรถนะทางแสง สมรรถนะทางไฟฟ้า และวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการลงทุนเปลี่ยนจากการใช้โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W เป็นโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ที่นำมาใช้ในการจัดแสงภายในสตูดิโอ

บทที่ 5 กล่าวถึงสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

# หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้มีแนวคิดเพื่อการศึกษาความเหมาะสม ได้แก่ สมรรถนะทางแสง ทางไฟฟ้า และ ทาง เศรษฐศาสตร์ สำหรับการเลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงของโคมไฟที่นำมาใช้สำหรับการจัดแสงภายในสตูดิโอ เนื่องจากปัจจุบันพบว่ามีการรณรงค์ประหยัดพลังงานสำหรับการใช้ไฟฟ้าเพื่อการผลิตรายการโทรทัศน์ หรือภาพยนตร์ โดยเฉพาะกระบวนการจัดแสงที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นปริมาณมาก และต่อเนื่องหลาย ชั่วโมงต่อการผลิตรายการ 1 รายการ อาจเนื่องมาจากการใช้โคมไฟที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงแบบเดิมที่นำมาใช้สำหรับการจัดแสง อาทิเช่น หลอดไฟทังสเตน-ฮาโลเจน หรือ หลอดไฟเอชเอ็มไอ ที่มีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าสูง และปัจจุบันเริ่มมีการเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงดังกล่าว ทดแทนเป็นหลอดแอลอีดีกำลังสูง เพื่อการประหยัดพลังงานไฟฟ้า แต่ยังไม่ค่อยได้รับความนิยม เนื่องจากยังขาดความเข้าใจเรื่องของ สมรรถนะทางแสง ที่สามารถทดแทนกันได้หรือไม่ และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ผู้วิจัยได้ศึกษา งานวิจัยอื่นๆ ที่ใกล้เคียงดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) Y.K.Cheng and K.W.E Cheng [2] พบว่าหลอดแอลอีดีกำลังสูงถูกนำไปใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสง ที่ให้กำลังการส่องสว่างที่สูง และมีประสิทธิภาพการส่องสว่างสูงเมื่อเทียบกับหลอดไฟ ที่ให้กำเนิดแสง แบบเดิมเช่น ทังสเตน เอชเอ็มไอ เป็นต้น ซึ่งเป็นที่นิยมมากสำหรับงานแสงสว่างกับพื้นที่การทำงานของ อุตสาหกรรม งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการออกแบบวงจรควบคุมที่ค่ากระแสคงที่ และพิจารณาการแก้ไขความ ร้อนของหลอดไฟที่ให้ความสว่างให้ลดลง และการออกแบบวงจรของหลอดแอลอีดีกำลังสูงไปแทนที่กับ วงจรของหลอดไฟที่ให้กำเนิดแสงแบบเดิม

2) Mulkey, Steve [3] กล่าวว่า งานทางด้านสถานีวิทยุโทรทัศน์ให้ความสำคัญกับการลดค่าใช้จ่าย ในขั้นตอนของการผลิตมากขึ้น เห็นได้จากที่มีสถานีบางสถานีเริ่มปรับรูปแบบการนำเทคโนโลยีทางด้าน หลอดแอลอีดี นำมาใช้ในสตูดิโอสำหรับการจัดแสงให้กับฉากและผู้ประกาศข่าวเนื่องจากหลอดแอลอีดีมี ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับการใช้พลังงานไฟฟ้าจากหลอดไฟแบบเดิม และยังมีข้อดี เรื่องของอายุการใช้งานนาน และลดค่าใช้จ่ายส่วนของค่าไฟที่ใช้ในระบบปรับอากาศของสตูดิโอ แม้ว่าการ นำหลอดแอลอีดีมาติดตั้งในช่วงเริ่มต้นจะมีค่าใช้จ่ายสูงแต่ในอนาคตสามารถคืนทุนได้อย่างรวดเร็ว

3) Savitha G. Kini and Abhilash Prabhu [4] ศึกษาแบบจำลองวงจรไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อ หลอดแอลอีดีสี ภายใต้แผงวงจรโคมไฟที่ใช้สำหรับการจัดแสงในสตูดิโอ ด้วยเงื่อนไขการผสมสีของแสง จากความสว่างหลอดแอลอีดีสี ที่กำลังไฟฟ้าแต่ละหลอดมีค่า 1 วัตต์ และประกอบด้วยวงจรย่อยของ หลอดแอลอีดีสีจำนวน 4 วงจร แบ่งตามสีปฐมภูมิ 3 สี คือ แดง, น้ำเงิน และ เขียว โดยเพิ่ม สีน้ำตาลอม เหลืองที่นำมาผสมรวมกับสีปฐมภูมิ 3 สี ดังกล่าว เพื่อช่วยให้ค่าความถูกต้องของสีมีค่าถูกต้องมากขึ้น ให้ เหมาะสมกับค่าการกระจายของแสง และระดับอุณหภูมิสี ที่ต้องการ สำหรับการจัดแสงภายในสตูดิโอ แทนหลอดคอมแพคฟลูออโรเรสเซนต์ แหล่งกำเนิดแสงสีขาว ที่ระดับความส่องสว่าง 300 Lux แผงโคมไฟนี้

ประกอบด้วยวงจรไฟฟ้าหลอดแอลอีดี 4 สี จำนวน 4 วงจรย่อย แยกกันทำงานแบบอิสระกัน แต่ควบคุมการผสมสีให้ได้แสงสีขาว ด้วยวงจรควบคุมเดียวกันที่อยู่ภายในแผงโคมไฟหลอดแอลอีดีที่จำลองขึ้น

4) S Lewis Johnson [5] ศึกษาการออกแบบ และสมรรถนะทางแสง และทางไฟฟ้าของโคมไฟที่นำมาใช้ในการจัดแสงภายในสตูดิโอโทรทัศน์ ผลการศึกษาพบว่า โคมไฟที่ศึกษา เป็นประเภทหลอดไฟทำงานด้วยการคายประจุหรืออาร์ค ได้แก่ หลอดอินแคนเดสเซนต์ ที่ขนาดกำลังไฟฟ้าแตกต่างกัน สามารถควบคุมคุณภาพทางแสง ประกอบด้วยการออกแบบโคมไฟให้เหมาะสม ตัวสะท้อนแสง การควบคุมการกระจายแสง สำหรับคุณภาพทางไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับประเภทของหลอดไฟที่นำมาใช้ ได้ข้อสรุปว่า หลอดอินแคนเดสเซนต์ ให้คุณภาพทางไฟฟ้าได้ดีกว่า หลอดไฟอาร์ค เนื่องจากหลอดอินแคนเดสเซนต์ไม่มีการใช้บัลลาสต์ในการช่วยขั้ววงจร

5) John Luff [6] ศึกษาการนำหลอดไฟคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ และหลอดแอลอีดี มาใช้ในการจัดแสงภายในสตูดิโอ สามารถลดค่าความร้อน และประหยัดพลังงานไฟฟ้า ภายในสตูดิโอได้ เนื่องจากการจัดแสงในอดีตเมื่อเริ่มต้นถ่ายทำ และจบการถ่ายทำรายการทางโทรทัศน์จะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ต่อเนื่อง และมีค่าความร้อนสะสมที่เกิดจากหลอดไฟประเภททั้งสแตนด์-ฮาโรเจน ขนาดกำลังวัตต์ตั้งแต่ 800 วัตต์ ถึง 2,000 วัตต์ และใช้ไม่ต่ำกว่าจำนวน 3 ดวง ต่อการถ่ายทำ 1 ครั้ง ดังนั้นการนำหลอดไฟคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ และหลอดแอลอีดี มาทดแทน จึงถือเป็นทางเลือกที่กำลังได้รับการทดแทนมากขึ้นสำหรับการจัดแสงสตูดิโอในอนาคต

6) B Ackermann et.al. [7] ศึกษาลักษณะสำคัญของการใช้หลอดแอลอีดีเพื่อการจัดแสงสำหรับการประหยัดพลังงาน และรักษาสิ่งแวดล้อม โดยเป็นแนวทางเลือกใหม่ในการออกแบบการจัดแสง และควบคุมความเข้มของแสง สี และคุณลักษณะการกระจายของแสง โดยทั่วไปความต้องการของแสงจะเป็นแสงที่ให้อุณหภูมิแสงสีขาว เกิดจากการผสมของแสงที่เกิดจากหลอดแอลอีดี แม่สี 3 สี คือ แดง เขียว น้ำเงิน พบว่าเป็นแนวทางการนำมาทดแทนหลอดไฟในอนาคต ในงานวิจัยนี้ศึกษาการควบคุมคุณลักษณะสีของหลอดแอลอีดี 3 สี เพื่อการวัดค่าตัวแปรที่ส่งผลต่ออุณหภูมิแสง และ คุณสมบัติสี ของหลอดแอลอีดี ทำการติดตั้งระบบในการตรวจสอบคุณภาพของแสงที่ออกจากหลอดแอลอีดี 3 สี นำผลที่ได้ไปใช้ศึกษาการผสมสีของหลอดแอลอีดีให้ได้แสงตามที่ต้องการ

7) Sohel Uddin.et.al. [8] ศึกษาการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เกี่ยวกับแสงสว่างมีค่าเป็น 1 ใน 5 ส่วนของค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในบ้านอาศัย สำหรับค่าพลังงานความร้อนที่ออกมาจากหลอดมีค่าไม่มาก ได้แก่ หลอดไฟคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ เมื่อเทียบกับหลอดไฟทั้งสแตนด์-ฮาโรเจน แต่ความถูกต้องของแสงจะต่ำกว่าหลอดไฟทั้งสแตนด์-ฮาโรเจน ปัจจุบันพบว่าเทคโนโลยีของสารกึ่งตัวนำที่เรียกว่าหลอดแอลอีดี มีบทบาทเข้ามาทดแทนการนำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงค่อนข้างมากเพราะมีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ต่ำ และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพพลังงานของหลอดแอลอีดี เมื่อเทียบกับหลอดไฟประเภทหลอดไฟทั้งสแตนด์-ฮาโรเจน และคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ และศึกษากระบวนการออกแบบวงจรขับ และวงจรควบคุม หลอดแอลอีดี ให้มีค่าการทำงานในสภาวะการให้กำเนิดแสงได้คงที่ตลอดเวลาที่ใช้งาน

8) W.J.B.Heffernan and L.P.Frater [9] ศึกษาหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่นำมาใช้ในการให้แสงสว่างเป็นเวลายาวนาน แต่พบว่ามีความของประสิทธิภาพในการส่องสว่าง และอายุการใช้งานที่ไม่สูงมาก ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันพบว่าหลอดแอลอีดี ถูกนำมาใช้ในการทดแทนการให้แสงสว่างปัญหาดังกล่าวของหลอดฟลูออเรสเซนต์ และหลอดแอลอีดี ที่สามารถควบคุมการปรับแสง และเปลี่ยนแปลงแสงให้ได้ตามต้องการ งานวิจัยนี้ได้นำหลอดแอลอีดีจำนวน 2 ซิบ มาใช้ในการทดแทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาดความยาว 4 ฟุต พร้อมบาลาสต์ที่ถูกแทนด้วยวงจรขับให้กับหลอดแอลอีดี สำหรับหลอดแอลอีดีซิบตัวแรกประกอบด้วยหลอดสีเทา สีแดง และ สีส้ม หลอดแอลอีดีซิบตัวที่สองประกอบด้วยหลอดสีแดง สีเขียว และ สีน้ำเงิน ทั้ง 2 ซิบ นำมาผสมกันเพื่อให้ได้แสงสีขาว จากนั้นทำการวัดค่าอุณหภูมิแสงสีขาวจากหลอดแอลอีดีทั้ง 2 ซิบนำไปเปรียบเทียบกับแสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์

9) Frank J.P.et.al. [10] ศึกษาแสงสีขาวสารกึ่งตัวนำเรียกว่าหลอดแอลอีดีที่ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นสำหรับการให้แสงสว่าง แสงสีขาวที่เกิดจากหลอดแอลอีดี เป็นการผสมสีกันของหลอดแอลอีดีสีแดง สีเขียว และ สีน้ำเงิน และผสมให้เกิดความหลากหลายของสีได้ ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ นอกจากนี้การเลือกใช้แสงสีขาวจากหลอดแอลอีดี จะมีตัวแปรที่นำมาพิจารณา ได้แก่ ความส่องสว่าง ค่าความยาวคลื่นแสง ค่าประสิทธิภาพการส่องสว่าง และ ค่าอายุการใช้งานของหลอด

10) Xiaohui Qu [11] ออกแบบและพัฒนาหลอดแอลอีดีความส่องสว่างกำลังสูง และประสิทธิภาพในการส่องสว่าง และการจัดการแสงของหลอดแอลอีดี เกี่ยวกับความคงที่ของแสงที่เกิดจากหลอดแอลอีดี พบว่าเกิดจากความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของหลอดแอลอีดีทั้ง 3 สี (RGB) และได้ศึกษาอายุการใช้งานของหลอดแอลอีดีจะสัมพันธ์กับวงจรแปลงแรงดันที่มีการออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุด และสัมพันธ์กับค่าความส่องสว่างที่ต้องการ

11) Kyle Cassidy [12] กล่าวว่ารูปแบบการจัดแสงเบื้องต้นในสตูดิโอ สำหรับการจัดแสงวัตถุที่เป็นสิ่งของหรือบุคคลมีหลักการวางตำแหน่งโคมไฟแบบเดียวกัน แต่จะมีลักษณะและวิธีการแตกต่างออกไปเฉพาะบุคคล ทั้งนี้เพราะการจัดแสงเป็นศิลปะไม่มีกฎเกณฑ์ที่ตายตัวในการจัดแสงจะมีแสงที่เป็นหลักอยู่ 4 ประเภท คือ ไฟหลัก (Key Light หรือ Main Light) ทำหน้าที่ให้แสงสว่างกับสิ่งที่ต้องการบันทึกภาพ ตำแหน่งของโคมไฟจะอยู่ใกล้กับกล้องบันทึกภาพ ไฟเสริม (Fill Light) ทำหน้าที่เป็นไฟลบเงาที่เกิดจากไฟหลักจะอยู่ตรงข้ามกับไฟหลัก ไฟหลัง (Back Light) ช่วยให้เกิดมิติของสิ่งที่ถ่ายจะมีค่าที่ความสว่างสูงสุด และอยู่ตำแหน่งหลังสิ่งที่ถ่าย ไฟฉาก (Back Ground Light) คือไฟที่ส่องไปยังฉาก เพื่อให้ฉากมีความสว่าง และไม่กลืนไปกับสิ่งที่ถ่ายทำ

12) Victor George [13] ศึกษาเปรียบเทียบการเปลี่ยนหลอดไฟแบบอินแคนเดสเซนต์ เป็นหลอดไฟแอลอีดี โดยศึกษาสมรรถนะคุณทางไฟฟ้า ได้แก่ เพาเวอร์แฟคเตอร์ ฮาร์โมนิกส์ คุณภาพทางแสง ประกอบไปด้วย ความสว่าง การกระจายแสง อุณหภูมิสีของแสง และศึกษาความคุ้มค่าสำหรับการเปลี่ยนหลอดเชิงเศรษฐศาสตร์ ผลการศึกษาพบว่า หลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ ยังคงได้เปรียบด้านคุณภาพทางแสง แต่เกิดข้อด้อยเรื่องของคุณภาพทางไฟฟ้า และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ สำหรับหลอดแอลอีดีจะได้เปรียบมากในความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และได้เปรียบทางคุณภาพไฟฟ้า และสามารถทดแทนคุณภาพทางแสงได้ใกล้เคียง

## 2.2 หลักการจัดแสงภายในและภายนอกสตูดิโอ

การจัดแสงมีความสำคัญมากสำหรับกระบวนการขั้นตอนการผลิตรายการโทรทัศน์ หรือภาพยนตร์ ทั้งภายใน และภายนอกสตูดิโอ เนื่องจากช่วยสำหรับการบันทึกภาพ การทำให้เกิดมิติของคนหรือวัตถุ และแสดงให้เห็นถึงการสื่อความหมายทางภาพ ร่วมกับความรู้สึกทางอารมณ์ที่ปรากฏบนภาพ ดังนั้น หลักการพื้นฐานของการจัดแสง จึงประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญดังนี้

### 2.2.1 ผลทางภาพที่เกิดขึ้นสำหรับการจัดแสง

ผลทางภาพที่เกิดขึ้นสำหรับการจัดแสง (Lighting Potentials) [14] การจัดแสงถือเป็นศาสตร์แขนงหนึ่งที่ต้องอาศัยประสบการณ์ และความรู้ ต่างๆ อาทิเช่น ทฤษฎีแสง แสงจากแหล่งกำเนิดแสงธรรมชาติ หรือ แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ อุปกรณ์ และวัสดุสำหรับการจัดแสง นำมาประกอบรวมกันเพื่อช่วยให้การจัดแสงเกิดความสมบูรณ์ และตรงตามวัตถุประสงค์การจัดแสงเพื่อทำให้เกิดสิ่งต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.1 ดังต่อไปนี้

- 1) ทำให้การบันทึกภาพของ วัตถุ บุคคล เป็นต้น เกิดความสมบูรณ์
- 2) สร้างมิติระหว่างความสว่าง และความมืด และเน้นให้เห็นถึงรูปทรงที่ต้องการสื่อ
- 3) สร้างภาพให้เกิดบรรยากาศหรือปรากฏการณ์เวลา เช่น ตอนเช้า ตอนบ่าย หรือตอนค่ำ
- 4) ทำให้เกิดอารมณ์ร่วม เช่น ความรู้สึก ตื่นเต้น ตกใจ น่ากลัว ไปกับภาพที่ปรากฏตลอดจนนักแสดง และผู้ชม



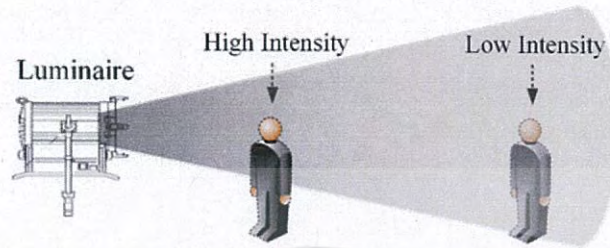
รูปที่ 2.1 ความสำคัญสำหรับการจัดแสงจากแหล่งกำเนิดแสงธรรมชาติ (ก) และแสงประดิษฐ์ (ข)

### 2.2.2 หลักการควบคุมคุณภาพของแสง

หลักการควบคุมคุณภาพของแสง (Lighting Control) การจัดแสงสามารถควบคุมคุณภาพของแสงให้เกิดความต่าง หรือ อ่อนนวล และส่งผลให้มีทำให้เกิดแสงที่มีความเหมาะสมกับการบันทึกภาพ สำหรับการเลือกใช้แหล่งกำเนิดแสง ตลอดจน การกำหนดปริมาณการให้แสงสว่างถือเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการควบคุมแสง นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาความเหมาะสมคุณสมบัติของแสงดังต่อไปนี้ควบคู่กันไป

### 2.2.2.1 ความเข้มของแสง

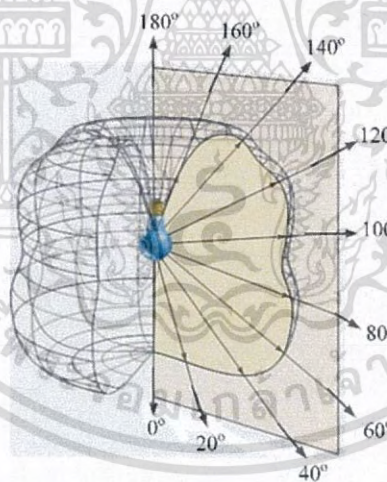
ความเข้มของแสง (Intensity) เป็นปริมาณของแสงที่มีค่าระยะระดับ ที่ โกล้ หรือ โกล ระหว่างแหล่งกำเนิดแสง กับ บุคคล วัตถุ สิ่งของ สถานที่ เป็นต้น ที่สะท้อนเข้าตา ของผู้ที่กำลังมอง ทำให้สามารถกำหนด และระบุความเข้มของแสงดังกล่าวได้ตามความต้องการของผู้ที่จัดแสง แสงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความเข้มของแสง

### 2.2.2.2 การกระจายของแสง

การกระจายของแสง (Distribution) เป็นปริมาณของแสงที่กระจายออกจากแหล่งกำเนิดแสงทุกทิศทาง ทั้งแนวนอน และแนวตั้ง หลังจากการควบคุม หรือ ยังไม่ได้มีการควบคุมความเข้มแสง การกระจายของแสงออกจะสามารถลด หรือ เพิ่ม บังคับ ให้ เคลื่อนที่ไปในทิศทางใด ตามทิศทางองศาแนวตั้ง และแนวนอน ดังรูปที่ 2.3

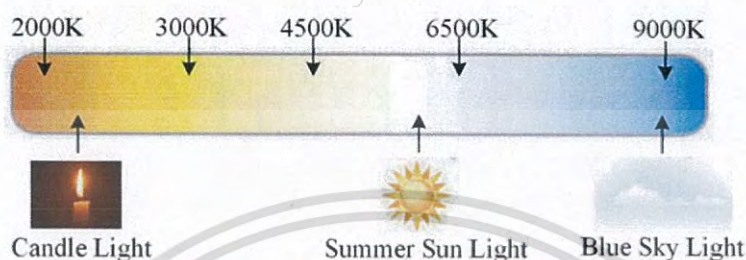


รูปที่ 2.3 การกระจายของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2.3 สีของแหล่งกำเนิดแสง

สีของแหล่งกำเนิดแสง (Correlated Color Temperature) เป็นคุณสมบัติที่ช่วยให้เกิดความรู้สึกกับภาพที่ปรากฏ ในลักษณะสีของภาพโทนเย็น หรือโทนร้อน ส่งผลให้ภาพเกิดความรู้สึก เศร้า สนุก ลึกลับ ตื่นเต้น หรือ เกิดความเป็นมิติ และสร้างให้เกิดความสมจริงในเรื่องของเวลา แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สีของแหล่งกำเนิดแสง

### 2.2.3 แหล่งกำเนิดแสง

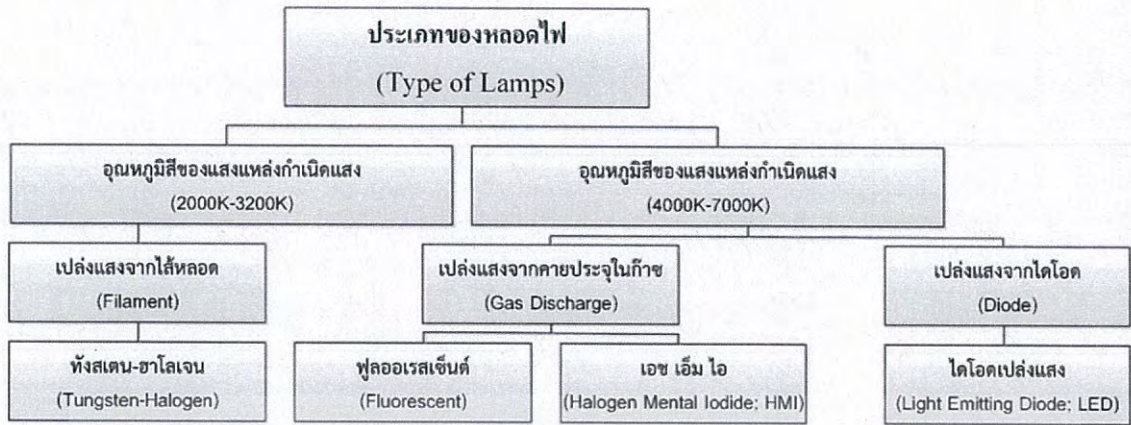
แหล่งกำเนิดแสง (Light Source) [15] สำหรับการจัดแสงเพื่อให้ความสว่างกับ วัตถุ หรือ คน เพื่อการบันทึกภาพจำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดแสง ได้แก่ แสงแดดจากแสงธรรมชาติคือดวงอาทิตย์ หรือดวงจันทร์ มีเพียงแหล่งกำเนิดแสงเดียว และแสงสว่างจากแสงประดิษฐ์จากหลอดไฟประเภทต่างๆ ซึ่งมีหลากหลายประเภท แบ่งตามลักษณะของโครงสร้างภายใน ภายนอก และการทำงานของหลอดไฟ

#### 2.2.3.1 แสงธรรมชาติ

แสงธรรมชาติ (Natural Light) เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีความสำคัญ โดยการให้ความสว่างตอนกลางวัน ได้แก่ ดวงอาทิตย์ เรียกว่า แสงแดดมีช่วงเวลาระหว่าง 9.00 น.-15.00 น. มีค่าอุณหภูมิสี อยู่ระหว่าง 5600K-6000K สำหรับช่วงเวลาดอนกลางคืนได้แก่ ดวงจันทร์ เรียกว่า แสงจันทร์ มีค่าอุณหภูมิสีประมาณ 4100K สำหรับค่าอุณหภูมิสีของความสว่างจากแหล่งกำเนิดแสงทั้ง 2 ประเภท จะเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงระยะเวลา 24 ชั่วโมง

#### 2.2.3.2 แสงประดิษฐ์

แสงประดิษฐ์ (Artificial Light) สำหรับแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ที่ให้แสงสว่าง สำหรับนำมาจัดแสงภายใน และภายนอกสตูดิโอ พิจารณาตามอุณหภูมิสีของแหล่งกำเนิดแสง สามารถแบ่งได้เป็น กลุ่มค่าอุณหภูมิสีของแหล่งกำเนิดแสงประมาณ 2000K-3200Kและค่าประมาณ 4000K-7000K สำหรับในงานวิจัยนี้จะพิจารณา แหล่งกำเนิดแสงที่เกิดจากหลอดเอชเอ็มไอ และหลอดแอลอีดีกำลังสูง แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ประเภทของแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์

ก) หลอดเอชเอ็มไอ

หลอดเอชเอ็มไอ (Halogen Metal Iodide Lamp; HMI) เป็นหลอดไฟที่พัฒนาจากหลอดไฟคาร์บอนอาร์ค บริษัท ออสราม (Osram) เมือง มิวนิค ประเทศ เยอรมนี เริ่มนำมาสำหรับการจัดแสงในปี พ.ศ. 2515 ถูกนำไปใช้ภายในสถานีโทรทัศน์ และแพร่หลายสู่อุตสาหกรรมการผลิตภาพยนตร์

ก.1) การทำงาน

เริ่มต้นจากจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าสลับ 220 โวลต์ ให้กับวงจรหลอดเอช เอ็ม ไอ ทำงานภายใต้การไหลผ่านขั้วไฟฟ้า (Electrode) จากขั้วหนึ่งไปสู่อีกขั้วหนึ่ง ที่ถูกหุ้มด้วยหลอดแก้วบรรจุก๊าซอาร์กอน (Argon gas) เกิดความสว่าง ด้วยสารให้ความสว่าง เมอร์คิวรี อาร์ค (Mercury Arc) โครงสร้างภายในและคุณสมบัติ แสดงดังรูปที่ 2.6 และตารางที่ 2.1 ตามลำดับ [16]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างภายในหลอดไฟเอชเอ็มไอ

ก.2) โครงสร้างประกอบการทำงาน

ส่วนเรือนโคม (Lamp housing) เป็นโครงสร้างหลักของโคมไฟ ประกอบด้วย หัวไฟ (Lamp head) สำหรับรวมวงจรไฟฟ้าทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าจากบัลลาสต์ ส่งเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าภายในหลอดไฟ เพื่อให้เกิดการอาร์ค ของสารให้เกิดความสว่าง

ส่วนบัลลาสต์ (Ballast unit) ทำหน้าที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟเพื่อนำไปสู่หลอดไฟ และจะหน่วงกระแสไฟฟ้า ในเวลาที่จุดหลอด และเมื่อหลอดจุดติด บัลลาสต์ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ให้คงที่สม่ำเสมออย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของหลอดเอชเอ็มไอ

รายละเอียด	ลักษณะเฉพาะ
อุณหภูมิสีของแสง	6000K
ค่าความสว่าง	240,000 lumen
ความถูกต้องของแสง (CRI)	80 %
กำลังไฟฟ้า	2500 Watt
โครงสร้างภายนอก	หลอดแก้วยาว ประมาณ 13 ซม. ยึดติดกับขั้วหลอดอิเล็กทรอนิกส์ ลักษณะสลักคู่
โครงสร้างภายใน	หลอดแก้วสุญญากาศ บรรจุ เมอร์คิวรีอาร์ค และ ก๊าซอาร์กอน
อุปกรณ์การทำงาน	บัลลาสต์ (Ballast) ทำหน้าที่เพิ่มแรงดันไฟฟ้า
การให้แสงสว่าง	การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง ภายในหลอดแก้ว (Tube)
ราคา	10,000 บาท
อายุการใช้งาน	ประมาณ 500 ชั่วโมง
ข้อดี	ใช้เวลาจุดสว่าง เร็ว
ข้อเสีย	อายุการใช้งานของหลอดสั้น

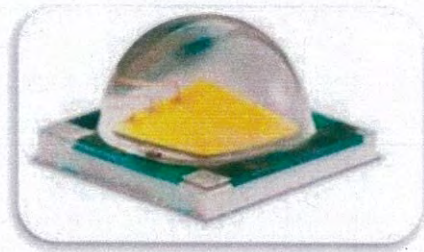
ข) หลอดเปล่งแสงจากอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังสูง

หลอดเปล่งแสงจากอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังสูง หรือเรียกว่า หลอดแอลอีดีกำลังสูง (High Power Light Emitting Diode, HP-LED) มีหลักการทำงานพื้นฐานเหมือนหลอดไดโอดเปล่งแสง (Light-Emitting Diode, LED) มีความแตกต่างการให้กำลังการส่องสว่างมีค่ามากกว่า ไดโอดเปล่งแสงเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอย่างหนึ่ง จัดอยู่ในจำพวกไดโอด ที่สามารถเปล่งแสงในช่วงสเปกตรัมแคบ ด้วยคลื่นความถี่เดียวและเฟสต่อเนื่องกัน หรือกล่าวได้ว่าแสงที่เปล่งออกมา จะแตกต่างจากแสงโดยทั่วไปที่มนุษย์สามารถมองเห็น สีของแสงที่เปล่งออกมาขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุกึ่งตัวนำที่ใช้ ได้แก่ สารประกอบของธาตุแกลเลียม, อาร์เซนิก และฟอสเฟออร์ ปัจจุบันรูปแบบของหลอดแอลอีดีกำลังสูงมีหลายลักษณะ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบของบริษัทผู้ผลิต หลอดแอลอีดีกำลังสูงที่พบส่วนใหญ่มีลักษณะแบบแผ่นสี่เหลี่ยม หรือ รูปทรงกลมบาง เรียกว่า Surface Mount Type (SMT) เช่น Lumileds Luxeon K2, Cree XLamp, Osram Golden Dragon, Nichia แสดงดังรูปที่ 2.7 [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



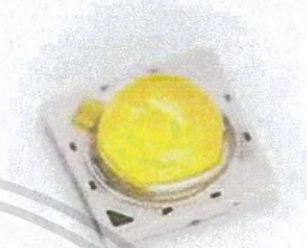
(ก)



(ข)



(ค)

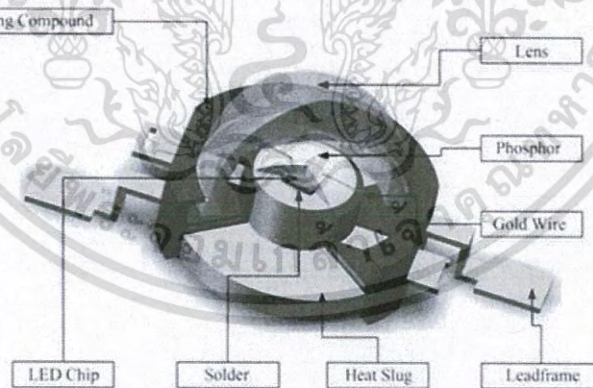


(ง)

รูปที่ 2.7 รูปแบบหลอดแอลอีดีกำลังสูง Lumileds Luxeon K2 (ก) Cree XLamp (ข) Osram Golden Dragon (ค) และ Nichia (ง)

#### ข.1) โครงสร้างหลอด

โครงสร้างพื้นฐานภายในสำหรับหลอดแอลอีดีกำลังสูง มีส่วนประกอบภายในไม่แตกต่างจากหลอดแอลอีดีทั่วไป เช่น ลักษณะรูปทรงหลอด หรือแผ่นที่เรียกว่า แผ่นชิป (Ship) ทั้งนี้ลักษณะของรูปทรงของหลอดขึ้นอยู่กับจำนวนของสารกึ่งตัวนำที่นำมาประกอบขึ้นส่วนเข้าด้วยกัน แสดงดังรูปที่ 2.8 [17]



รูปที่ 2.8 โครงสร้างหลอดแอลอีดีกำลังสูง

ข.1.1) ส่วนยึดประกอบ (Molding Compound) หรือกาอีพ็อกซี่ (Epoxy) ทำหน้าที่สำหรับยึดส่วนประกอบภายในของหลอดแอลอีดีกำลัง มีคุณสมบัติค่าความต้านทานความร้อนสูง, ป้องกันรังสียูวีขนาดเล็ก, อุณหภูมิต่ำ, ความชื้นต่ำ และป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต

ข.1.2) เลนส์กระจาย (Lens) หรือส่วนที่เป็น Resin ทำหน้าที่จำกัดทิศทางแสงที่เกิดจากหลอดแอลอีดีกำลังสูงโดยควบคุมทิศทางให้ไปในองศาที่ต้องการในลักษณะลำแสงกว้างหรือแคบ

ข.1.3) ชิปหลอดแอลอีดี (LED Chip) เป็นชิ้นหลอดแอลอีดีที่นำมาประกอบ มีคุณสมบัติคล้ายหลอดไฟแต่มีค่าความสว่างมากกว่าแต่ใช้กำลังไฟไม่สูง และเมื่อนำชิปหลอดแอลอีดีหลายชิ้นประกอบเข้าด้วยกันจะเรียกว่า หลอดแอลอีดีกำลังสูง (Chip on Board)

ข.1.4) จุดเชื่อมต่อ (Solder) ทำหน้าที่สำหรับเชื่อมต่อ ชิปหลอดแอลอีดี (LED Chip) โดยทั่วไปจะทำขึ้นรูปสำเร็จด้วยการบัดกรีด้วยเครื่องบัดกรีมาจากโรงงานแทนการบัดกรีด้วยหัวแร้ง

ข.1.5) ลวดทองแดง (Gold Wire) เป็นโลหะมีคุณสมบัตินำไฟฟ้า ทำหน้าที่สำหรับการเชื่อมต่อไฟฟ้าระหว่าง ขั้วตัวนำ แอโนด (Anode) กับ LED Chip ทำจากอลูมิเนียมผสม หรือทองคำ

ข.1.6) สารเรืองแสง (Phosphor) เป็นสารประกอบของโลหะประเภท ทราเนอซีชัน หรือ ธาตุหายาก แรร์เอิร์ท (Rees) ทำงานเมื่อได้รับพลังงานแสงที่มีพลังงานสูงเพียงพอที่จะให้เกิดการเปล่งแสง

ข.1.7) แผงระบายความร้อน (Heat Slug) ทำหน้าที่ลดอุณหภูมิขณะทำงานของหลอดแอลอีดีกำลังสูง โดยเพิ่มพื้นที่สัมผัสให้เกิดการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน ออกจากตัวหลอดสู่อากาศโดยรอบ นิยมทำมาจาก อลูมิเนียมหรือทองแดง

ข.1.8) ขั้วตัวนำ (A+, K-) (Lead Frame) เป็นสารกึ่งตัวนำไดโอด ที่ควบคุมให้กระแสไฟฟ้าจากภายนอกไหลผ่านขั้วตัวนำได้ทิศทางเดียว ไดโอดประกอบด้วยขั้ว 2 ขั้ว คือ แอโนด (Anode; A) ซึ่งต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำชนิด p และ แคโทด (Cathode; K) ต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำชนิด n

## ข.2) ตัวแปรที่ใช้สำหรับออกแบบ

ปัจจุบันเทคโนโลยีไดโอดเรืองแสง หรือหลอดแอลอีดี ได้พัฒนาออกแบบขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะหลอดแอลอีดีกำลังสูงที่มีสมรรถนะทางแสงเทียบเท่าหลอดไฟ ได้แก่ ฟลักซ์ส่องสว่าง ความเข้มแสง ความเข้มส่องสว่าง และประสิทธิภาพส่องสว่าง จะส่งผลให้การนำหลอดแอลอีดีกำลังสูงมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงทดแทนแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดไฟประเภทต่างๆ อาทิ หลอดไฟทังสเตน, หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์, หลอดไฟโซเดียม ไอ เป็นต้น ต้องพิจารณาการออกแบบระบบแสงสว่าง ให้เหมาะสมกับความต้องการสำหรับการให้แสงสว่างกับวัตถุ บุคคล หรือ ฉาก ทั้งนี้ต้องพิจารณาตัวแปรพื้นฐานการออกแบบ ประกอบด้วย

### ข.2.1) ระบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์

นอกจากการนำหลอดแอลอีดีกำลังสูงมาประกอบโครงสร้างเป็นโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง การพิจารณาออกแบบร่วมกับส่วนประกอบทางวงจรอิเล็กทรอนิกส์ช่วยให้การทำงานของหลอดเกิดประสิทธิภาพมากที่สุด และเกิดความสว่างสูงสุดสามารถทำงานได้ในระยะเวลายาวนาน ประกอบด้วยโครงสร้างภายในดังนี้

- วงจรขับหลอดแอลอีดีกำลังสูง (Driver High Power LED)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมแรงดัน และไฟฟ้ากระแสตรง ให้กับตัวหลอดแอลอีดีกำลังสูง มีชื่อเรียกว่าวงจรทอนระดับแรงดันหรือเรียกว่าวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมแบบลูปปิด โดยมีวงจรสำหรับควบคุมกระแสให้มีค่าคงที่ รักษาค่าความเสถียรสำหรับจ่ายค่ากระแสให้คงที่ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันภายนอกวงจร หากไม่สามารถควบคุมได้จะเกิดภาวะทำให้เกิดกระแสเกิน หรือเกิดอุณหภูมิความร้อนสะสมส่งผลให้หลอดแอลอีดีกำลังสูงอายุการใช้งานสั้นลง แสดงดังรูปที่ 2.9 (ก)

- ตัวตรวจจับหรี่ไฟ (Dimmer Sensor)

เป็นอุปกรณ์สวิทช์ไฟทำหน้าที่ในการปรับระดับหรือควบคุมปริมาณความสว่างของหลอดแอลอีดีกำลังสูง มีลักษณะการทำงานควบคุมกำลังไฟที่ปล่อยจากแหล่งจ่ายไฟให้ลดต่ำลง ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวตรวจจับหรี่ไฟมีแรงดันตกจากแรงดันปกติ ส่งผลให้กระแสไฟมีค่าลดลง ทำให้ความสว่างของหลอดแอลอีดีกำลังสูงลดลง แสดงดังรูปที่ 2.9 (ข)

- อุปกรณ์ควบคุมแสง (Controller)

ทำหน้าที่ปรับระดับความสว่าง ควบคุมการกระจายของแสง และผสมสีให้ได้สีของแสงจากหลอดแอลอีดีกำลังสูงตามต้องการ ภายในวงจรมีระบบการทำงานตามขั้นตอนคือ วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Inverter AC to DC) จากนั้นผ่านไปยังวงจรการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor correction; PFC) และวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Converter DC to DC) แสดงดังรูปที่ 2.9 (ค)



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 2.9 วงจรขับหลอด (ก) ตัวตรวจจับหรี่ไฟ (ข) และอุปกรณ์ควบคุมแสง (ค)

### ข.2.2) ระบบทางกล (Mechanics)

สำหรับการวิเคราะห์หรือออกแบบหลอดแอลอีดีกำลังสูงจะต้องพิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปทรงโครงสร้าง ที่เกิดจากการตอบสนองของแรงภายนอก หรือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ที่ส่งผลกระทบกับวัสดุที่นำมาประกอบโครงสร้าง

- การแยกของรอยประสาน (Delamination)

เป็นลักษณะการแยกตัวออกตามแนวระนาบที่ขนาน กับพื้นผิวของวัสดุ กับพื้นผิววัสดุที่นำมาเคลือบ หรือผิววัสดุเคลือบแยกตัวออกเป็นชั้นๆ หลังจากกระจายเป็นวงกว้างบนพื้นผิว และหลุดร่อน สาเหตุเกิดจากคุณสมบัติของวัสดุ และแรงกระทำภายนอกการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การแตกร้าว (Crack)

เป็นการเปลี่ยนแปลงแยกออกหรือบางส่วนที่เกิดจากการเลือกใช้ หรือ การประกอบ ติดตั้งชิ้นส่วนที่ไม่ได้มาตรฐาน หรือการออกแบบไม่ถูกต้อง ทำให้เกิดรอยร้าว หรือบิดเปลี่ยนรูปทรง อาจเป็นลักษณะแนวยาว นอกจากนี้อาจเกิดจากความร้อนที่สะสมภายในวัสดุได้เช่นกัน

- ความเค้นและความเครียด (Stress and Strain)

เกิดจากแรงภายนอกที่กระทำกับวัสดุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทรง หรือรูปร่าง ในลักษณะพื้นที่ หรือความยาว ได้แก่ กรณีบนพื้นที่หน้าตัดในลักษณะขนานหรือตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด เรียกว่า ความเค้น และกรณีเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะความยาวเปลี่ยนแปลง เรียกว่า ความเครียด

### ข.2.3) ระบบเกี่ยวกับแสง (Optical)

สำหรับการออกแบบให้แสงสว่างกับวัตถุ บุคคล หรือฉาก ด้วยหลอดแอลอีดีกำลังสูง พอสรุปได้ดังนี้

- ประสิทธิภาพส่องสว่าง (Luminous Efficacy)

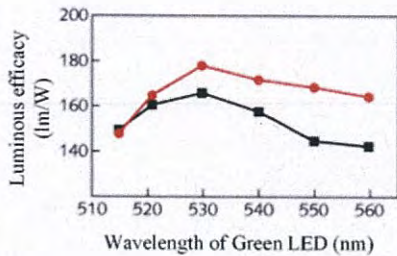
เป็นค่าสัดส่วนระหว่างปริมาณความสว่างที่หลอดแอลอีดีกำลังสูงเปล่งออกมาได้ เรียกค่าความสว่างเป็น ลูเมน (Lumen; lm) ต่อ ค่ากำลังไฟฟ้าของหลอดที่มีหน่วยเป็น วัตต์ (Watt; W) นำมาพิจารณา ค่ากำลังไฟฟ้าของหลอดให้ความสว่างเพียงพอคิดพิจารณาเป็นความสว่างต่อกำลังไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2.10 (ก)

- ดัชนีความถูกต้องของสี (Color Rendering Index)

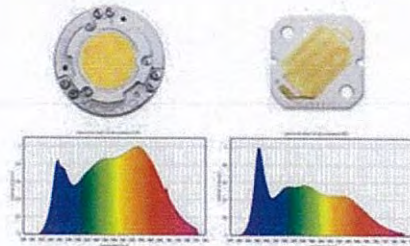
เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ บ่งบอกความถูกต้องสีของแสงมากน้อยเพียงใด ของแหล่งกำเนิดแสง ที่ส่องมายังวัตถุ บุคคล หรือ ฉาก โดยกำหนดแสงธรรมชาติจากดวงอาทิตย์ช่วงกลางวันเป็นค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสงอ้างอิง เมื่อเทียบกับสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ แสดงดังรูปที่ 2.10 (ข)

- อุณหภูมิสีของแสง (Color Temperature)

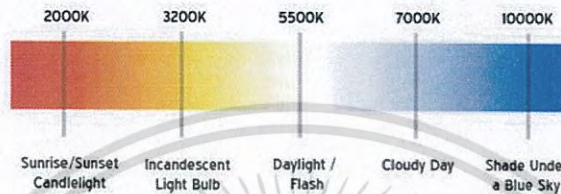
เป็นค่าที่ระบุสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่ปรากฏให้ โดยเทียบกับสีของแสงที่เกิดจากการเผาไหม้วัตถุดำอุดมคติ (Black Body) มีค่าเป็น เคลวิน (Kelvin; K) เช่นสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงหลอดไส้ (Incandescent Tungsten) เมื่อเผาไหม้จะเกิดอุณหภูมิสีของแสง ประมาณ 2420K แสดงดังรูปที่ 2.10 (ค)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.10 ประสิทธิภาพส่องสว่าง (ก) ดัชนีความถูกต้องของสี (ข) และอุณหภูมิสีของแสง (ค)

#### ข.2.4) ระบบทางวัสดุ (Materials)

การออกแบบหลอดแอลอีดีกำลังสูง พิจารณาเลือกใช้วัสดุที่มีความเหมาะสม ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงจากแรงภายนอกที่ทำให้รูปทรงเปลี่ยนไป หรือสาเหตุจากความร้อนที่เกิด การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุที่นำมาขึ้นรูป ประกอบด้วย

- วัสดุยึดประกอบ (Encapsulates)

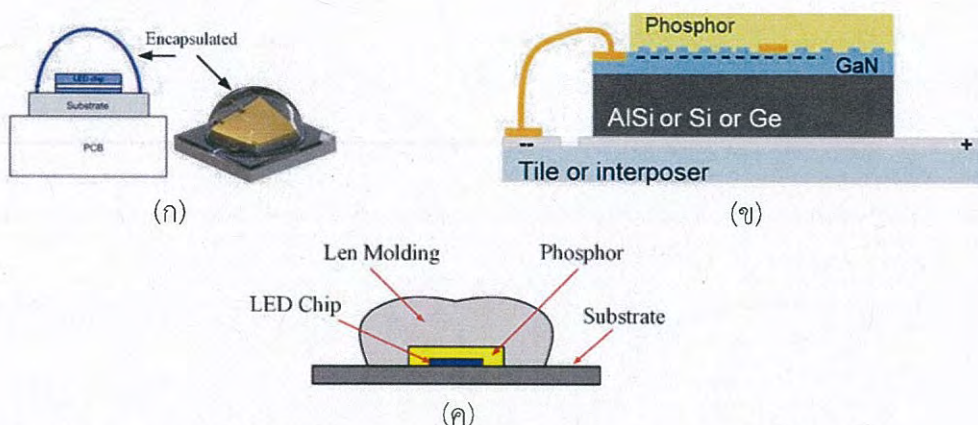
วัสดุยึดประกอบ หรือกาวโปร่งแสง ทำจากสารซิลิกอน (Silicone) ทำหน้าที่ขึ้นรูปอุปกรณ์ มีค่าการส่องผ่านของแสงสูง และการยึดเกาะระหว่างวัสดุระหว่างชิปหลอดแอลอีดีกับเลนส์ แสดงดังรูปที่ 2.11 (ก)

- สารกำหนดสี (Phosphor)

การกำหนดให้อุณหภูมิสีของแสงหลอดแอลอีดีกำลังสูงปรากฏสีตามต้องการ โดยทั่วไปใส่สารเคมี ฟอสเฟอร์ (Phosphor) มีคุณสมบัติเป็นสารทำให้เกิดแสงสีขาว เมื่อเกิดแสงจากหลอดแอลอีดีกำลังสูงกระทบสารจะทำให้เกิดความร้อน และเกิดการเปล่งแสง สังกเกตได้จาก กรณีที่ไม่ใส่สารฟอสเฟอร์ หลอดแอลอีดีจะมีลักษณะภายนอกเป็นสีขาว และหากกรณีที่ไม่ใส่สารฟอสเฟอร์ หลอดแอลอีดีจะมีสีภายนอกเป็นสีเหลือง แสดงดังรูปที่ 2.11 (ข)

- วัสดุของแข็งสารตั้งต้น (Substrates)

วัสดุของแข็งสารตั้งต้นหรือเรียกว่า ตัวดูดซับ (Absorbent) ทำหน้าที่สำหรับดูดซับอะตอมหรือโมเลกุลของสารต่างๆ ให้เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนสถานะเป็นสารแข็งตั้งต้นให้อยู่ตัว เพื่อทำหน้าที่ในการยึดวัสดุ เช่น แผ่นอะลูมิเนียมระบายความร้อนให้ยึดติดกับ แผ่นโครงสร้างซิลิกอนของหลอดแอลอีดีกำลังสูง แสดงดังรูปที่ 2.11 (ค)



รูปที่ 2.11 วัสดุยึดประกอบ (ก) สารกำหนดสี (ข) และวัสดุของแข็งสารตั้งต้น (ค)

### ข.2.5) ระบบกระบวนการผลิต (Process and Equipment)

การขึ้นรูปของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูงต้องศึกษาปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดกระจายแสงที่ดีที่สุด ประกอบกับลักษณะการเกิดสถานะค่าความร้อนสะสม เป็นสาเหตุที่อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากในขั้นตอนกระบวนการผลิตทั้งสิ้น

- ตัวกลางโปร่งแสง (Len Molding)

ควบคุมทิศทางการกระจายแสงของหลอดแอลอีดีกำลังสูงให้เป็นลักษณะวงกว้างหรือแคบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้รูปแบบ ขนาด และวัสดุที่นำมาใช้ในการขึ้นรูปของตัวเลนส์ โดยส่วนใหญ่ทำจากวัสดุที่มีความโปร่งแสง มีค่าการสะท้อนและการส่งผ่านของแสงดี และพิจารณาค่าการทนความร้อนควบคู่ แสดงดังรูปที่ 2.12 (ก)

- จุดรอยต่อ (Die Attach)

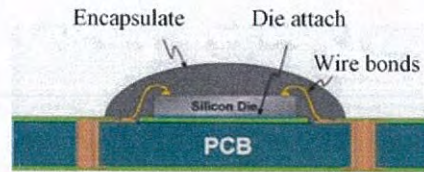
เป็นขั้นตอนการยึดโครงสร้างระหว่าง แผงระบายความร้อน (Heat Slug) ที่ทำจากอลูมิเนียมหรือทองแดง เข้ากับ หลอดแอลอีดีกำลังสูง ด้วยกาวที่มีค่าการทนความร้อนสูงที่มีค่าจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อได้รับความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่จุดรอยต่อดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 2.12 (ข)

- การเคลือบสารกำหนดสี (Phosphor Coating)

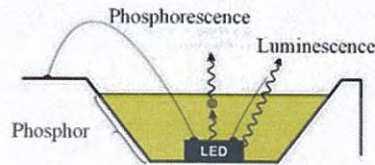
เป็นขั้นตอนการใส่เคลือบสารกำหนดสี ระหว่างตัวชิปของหลอดแอลอีดีกำลังสูงกับสายขั้วตัวนำ (Bond Wire) สิ่งสำคัญต้องทำให้บริเวณที่เคลือบสารมีค่าสถานะเป็นกลาง และไม่มีสิ่งแปลกปลอมตกค้าง มิฉะนั้นจะทำให้จุดที่เคลือบสารฟอสเฟอร์หลุดร่อน แสดงดังรูปที่ 2.12 (ค)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.12 ตัวกลางโปร่งแสง (ก) จูตรอยต่อ (ข) และการเคลือบสารกำหนดสี (ค)

### ข.2.6) ระบบด้านความร้อน (Thermal Science)

เป็นการตอบสนองของวัสดุที่มีต่อความร้อน เช่นวัสดุสามารถดูดซับพลังงานในรูปของความร้อน เมื่อวัสดุมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่ขยายขึ้น ซึ่งเกิดจากอุณหภูมิสูงขึ้น ได้แก่ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังนี้

- ระบายความร้อน (Thermal Dissipation)

หลอดแอลอีดีมีค่าสูงโดยพิจารณาจากอุณหภูมิที่จุดต่อระหว่าง หลอดแอลอีดีมีค่าสูง และตัวขับกระแส การพิจารณาตัวระบายความร้อนที่มีรูปร่างไม่เหมาะสมกับการใช้งาน หรือ มีน้ำหนักมวลที่น้อย ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการระบายความร้อนลดลง ทำให้อุณหภูมิทั้งตัวโคมสูงขึ้น การใช้งานของหลอดแอลอีดีมีค่าสูง มีชั่วโมงในการทำงานลดลง ค่าความสว่างลดลง และความถูกต้องสีของแสงเปลี่ยนแปลง

- ความเค้นจากความร้อน (Thermal Stress)

เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง จะเกิดการขยายตัวสามารถวัดในรูปความเครียดต่อองศาอุณหภูมิ

- ความต้านทานความร้อน (Thermal Resistor)

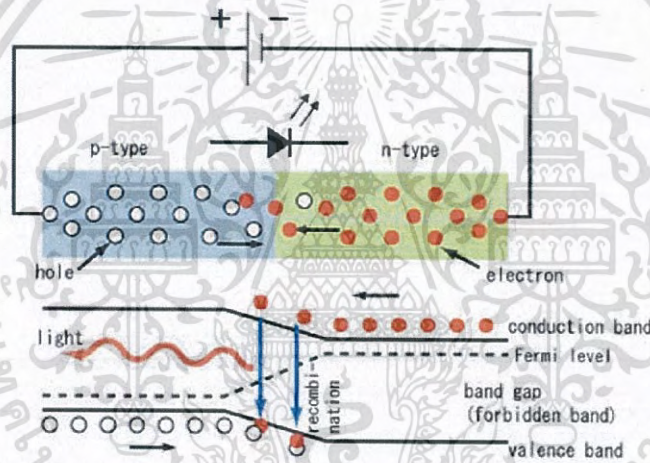
เป็นค่าระบุความเป็นฉนวนกันความร้อนของวัสดุคำนวณได้จากอัตราส่วนความหนาต่อค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุฉนวนกันความร้อนที่ดีจะต้องมีค่าความต้านทานความร้อนสูง

### ข.3) หลักการทำงาน

เมื่อเปิดสวิตช์ไฟ กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านวงจรขับเคลื่อนกระแส (Driver) เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง และเปลี่ยนจากความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงไปสู่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ค่อนข้างต่ำ ประมาณ 2.5-3 โวลต์จากนั้นจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับตัวขับของหลอดแอลอีดีกำลังสูง ซึ่งมีเพียงตัวนำแคโทด และแอโนดโดยหลอดแอลอีดีกำลังสูง จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านน้อยมาก ประมาณ 20 มิลลิแอมป์ ในตัวขับของหลอดแอลอีดีกำลังสูง ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำขั้วประจุบวกชนิด P (Positively

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

changed material) ที่อยู่ห่างจากสารกึ่งตัวนำ ขั้วประจุลบชนิด N (Negatively changed material) จุดนี้เรียกว่ารอยต่อ (Junction) เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านหลอดแอลอีดีกำลังสูง ตัวนำแอนโนดจะดันขั้วประจุบวก และตัวนำแคโทดดันขั้วประจุลบให้ชนกัน เมื่อประจุบวกและลบชนกันที่รอยต่อสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด จะจับตัวกันและคายพลังงานออกมาในรูปแสงสว่าง เรียกว่า “อิเล็กทรอนิกส์อินทรีย์” ทำให้เกิดแสงสว่างบริเวณด้านหน้าตัวหลอด ซึ่งมีอุณหภูมิการทำงานประมาณ 25 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงแสงสว่างที่ออกมาจะลดลง ลักษณะแสงจากหลอดแอลอีดีกำลังสูง มีลักษณะพุ่งในทิศทางเดียว แต่ในกรณีที่ต้องการให้แสงกระจายในมุมแคบหรือกว้างเพิ่มขึ้น จะนำอุปกรณ์ครอบหลอดแอลอีดีกำลังสูงในลักษณะของเลนส์เพื่อบังคับทิศทางการกระจายแสง หลอดแอลอีดีกำลังสูงสามารถเปิดปิดได้ทันที ไม่ต้องใช้ระยะเวลาจุดติดเหมือนหลอดทังสเตนฮาโลเจน หลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดเอชเอ็มไอ ที่ต้องปรับแรงดันก๊าซภายในสำหรับหลอดแอลอีดีกำลังสูงสามารถปรับความเข้มของแสงได้ด้วยอุปกรณ์หรี่ไฟ (Dimmer) รายละเอียดหลอดแอลอีดีกำลังสูง แสดงดังตารางที่ 2.2 และ รูปที่.2.13 [18]



รูปที่ 2.13 การทำงานของหลอดแอลอีดีกำลังสูง

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดของหลอดแอลอีดีกำลังสูง

รายละเอียด	ลักษณะเฉพาะ
อุณหภูมิสีของแสง	5600K
ค่าความสว่าง	1,600 lumen ขนาด 19 Watt
	9,000 lumen ขนาด 100 Watt
ความถูกต้องของแสง (CRI)	90 %
กำลังไฟฟ้า	19 Watt (แทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ 36 Watt)
	100 Watt (แทนหลอดเอชเอ็มไอ 200 Watt)
การให้แสงสว่าง	แสงสว่างเกิดขึ้นจากการเคลื่อนของอิเล็กตรอนภายในสารกึ่งตัวนำ
ราคา	อยู่ระหว่าง 3600 บาท 19 Watt พร้อมโคมแบบฟลูออเรสเซนต์
	อยู่ระหว่าง 3,800 บาท 100 Watt เฉพาะหลอดแอลอีดีกำลังสูง
อายุการใช้งาน	ประมาณ 50,000 ชั่วโมง
การเสื่อมสภาพ	การลัดวงจรไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหลอดแอลอีดีกำลังสูง
ข้อดี	ประหยัดพลังงาน, เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม, อายุการใช้งานยาวนาน
ข้อเสีย	ราคาสูงเมื่อเทียบกับหลอดขนาดกำลังวัตต์เท่ากันทุกประเภท

### 2.3 การทดสอบตามมาตรฐาน IES LM-79 08

มาตรฐาน IESNA (The Illuminating Engineering Society of North America) เป็นมาตรฐานที่ว่าด้วยการทดสอบ การวัดข้อมูลสมรรถนะทางแสง ทางไฟฟ้า และประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ ประเภทแหล่งกำเนิดแสงที่เกิดจาก สารกึ่งตัวนำ Solid-State Lighting (SSL) ได้แก่ LED Lamp และ LED Luminaire เรียกว่า IES LM-79 08 สำหรับขั้นตอนการทดสอบจะควบคุมอุณหภูมิ (Ambient Temperature) ให้อยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส ของแหล่งจ่ายไฟ (Power Supply) เครื่องมือทางไฟฟ้า และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ สำหรับผลการทดสอบจะได้ผลจากการวัดแสดงประกอบด้วย ค่าฟลักซ์ส่องสว่าง (Luminous Flux), ค่าความเข้มส่องสว่าง (Luminous Intensity), ค่าความเข้มแสง (Illuminance) ประสิทธิภาพการส่องสว่าง (Luminous Efficacy), ค่าการกระจายความเข้ม แสง (Light Distribution curve) ระบบการอ่านค่าสีตามมาตรฐาน (Chromaticity) อุณหภูมิสีของแสง (CCT), ดัชนีความถูกต้องสีของแสง (CRI) สำหรับผู้ศึกษาได้กำหนดหัวข้อสำหรับการวิจัยตามมาตรฐานระบบแสงสว่างของหลอดไฟประเภทสารกึ่งตัวนำ IES LM-79 08 ระหว่างโคมไฟ 2 ประเภท จากแหล่งกำเนิดแสงหลอดเอชเอ็มไอ 200 W และหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3.1 สมรรถนะทางแสง (Photometry Performances)

### 2.3.1.1 พื้นฐานทางแสง

การออกแบบและคำนวณหาค่าความสว่างต้องทราบองค์ประกอบที่ทำให้เกิดความสว่าง และเข้าใจความสำคัญขององค์ประกอบแต่ละส่วน จะสามารถนำไปประยุกต์การหาความสว่างกับการจัดแสงภายในและภายนอกสตูดิโอ ซึ่งเป็นลักษณะงานที่ต้องการแสงสว่างแบบเฉพาะทาง

#### 1) ฟลักซ์ส่องสว่าง (Luminous Flux)

เป็นพลังงานแสงสว่างที่ออกจากแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นจุด โดยมีจุดสมมูลถ่วงน้ำหนักกับความไวตามนุษย์เชิงสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น (390 nm-700 nm) เช่น ดวงอาทิตย์, เทียนไข, หลอดไฟ เป็นต้น โดยพิจารณาเทียบกับเวลาหน่วยของเวลาเป็นวินาที ดังสมการที่ (2.1) [20]

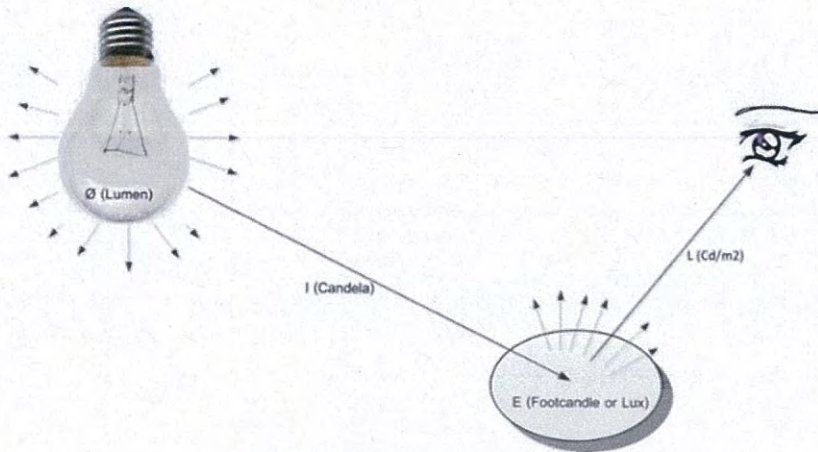
$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad (2.1)$$

เมื่อ	$\phi$	คือ ฟลักซ์ส่องสว่าง (Luminous Flux) หน่วย Lumen; lm
	$Q$	คือ พลังงานแสงสว่าง (luminous Energy) หน่วย lm.s
	$t$	คือ เวลาการเคลื่อนที่ของพลังงานแสงสว่างออกจากจุดกำเนิดแสง หน่วย s

ค่าลูเมนเป็นค่าฟลักซ์ที่เกิดจากพลังงานแสงสว่างที่ออกจากแหล่งกำเนิดแสงแผ่กระจายอยู่ภายในมุมเชิงของแข็ง ( $\omega$ ) [21] ดังรูปที่ 2.14 และหาค่าได้ดังสมการที่ (2.2) โดยแหล่งกำเนิดของแสงจะมีความเข้มแห่งการส่องสว่าง ( $I$ ) 1 แคนเดลา (Candela) [22]

$$\omega = \frac{A}{r^2} \quad (2.2)$$

เมื่อ	$\omega$	คือ มุมเชิงของแข็ง (Solid angle) หน่วย Steradian; sr
	$A$	คือ พื้นที่ผิวทรงกลม หน่วย $m^2$
	$r$	คือ รัศมี หน่วย m



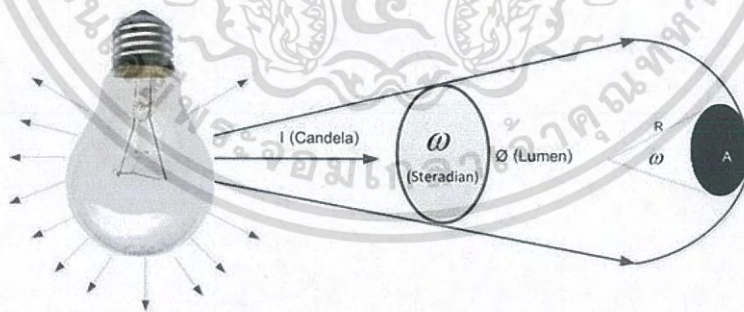
รูปที่ 2.14 องค์ประกอบความสว่าง

2) ความเข้มส่องสว่าง (Luminous Intensity)

ปริมาณความหนาแน่นของฟลักซ์ส่องสว่างที่มาจากแหล่งกำเนิดแสงในทิศทางต่าง ๆ ที่พิจารณาต่อมุมเชิงของแข็ง คำนวณได้จากสมการที่ (2.3) ดังรูปที่ 2.15 [23]

$$I = \frac{d\phi}{d\omega} \tag{2.3}$$

- เมื่อ  $I$  คือ ความเข้มส่องสว่าง หน่วย Candela; cd
- $d\phi$  คือ ปริมาณแสงย่อยใดๆ หน่วย lumen; lm
- $d\omega$  คือ มุมเชิงของแข็งย่อยใดๆ หน่วย Steradian; sr



รูปที่ 2.15 ฟลักซ์ส่องสว่างจากมุมเชิงของแข็ง

3) ความเข้มแสง (Illuminance or Illumination)

เป็นความหนาแน่นของฟลักซ์ส่องสว่าง (ปริมาณแสง) ที่ตกกระทบบนพื้นผิวรูปทรงลักษณะต่างๆ ในทิศทางมุมต่าง ๆ หาค่าได้ตั้งสมการที่ (2.4) และ (2.5) [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีพิจารณาความสว่างแบบเฉลี่ย

$$E = \frac{d\phi}{dA} \quad (2.4)$$

กรณีพิจารณาความสว่างแบบเฉพาะจุด

$$E = \frac{I}{r^2} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $E$  คือ ความเข้มแสง หน่วย Lux; lx (ระบบ SI) , Foot-Candle; FC (ระบบอังกฤษ)  
 $d\phi$  คือ ปริมาณแสงย่อยใดๆ หน่วย lumen; lm  
 $dA$  คือ พื้นที่ย่อยใดๆ หน่วย  $m^2$  (ระบบ SI) ,  $ft^2$  (ระบบอังกฤษ)

#### 4) ความส่องสว่าง (Luminance)

เป็นค่าความเข้มส่องสว่างที่สะท้อนจากพื้นที่ย่อยของพื้นผิวใดๆ เช่น แหล่งกำเนิดแสง, วัสดุสะท้อนแสง หรือ วัสดุส่งผ่านแสง ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งบนพื้นผิวที่สามารถเปล่งแสงหรือส่งผ่านแสงได้ [22] ดังสมการที่ (2.6)

$$L = \frac{d^2\phi}{d\omega \times dA \times \cos\theta} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $L$  คือ ความส่องสว่าง หน่วย  $cd/m^2$   
 $\theta$  คือ มุมระหว่างพื้นผิวปกติและทิศทางต่างๆ หน่วย องศา

#### 5) ประสิทธิภาพการส่องสว่าง (Luminous Efficacy)

เป็นค่าประสิทธิภาพลำแสงเพื่อให้ฟลักซ์ส่องสว่างของหลอดไฟที่พิจารณาสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในรูปของฟลักซ์ส่องสว่างในลำแสงได้มากน้อยเพียงใด โดยทั่วไปโคมไฟส่องสว่างที่มีลำแสงแคบมีค่าประสิทธิภาพลำแสงต่ำกว่าโคมไฟส่องสว่างที่มีลำแสงกว้าง [23] ดังสมการ (2.7)

$$\text{Luminous Efficacy} = \frac{\phi}{P} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $\phi$  คือ ฟลักซ์ส่องสว่างของหลอดไฟ (Luminous Flux) หน่วย Lumen; lm  
 $P$  คือ กำลังไฟฟ้าของหลอดไฟที่ติดตั้งภายในโคมไฟ หน่วย Watt, W

#### 6) กฎการส่องสว่าง (Law of Illumination)

ความเข้มแสง ( $E$ ) ที่ส่องสว่างตกกระทบให้กับพื้นผิวนบน วัตถุ คน หรือ สถานที่ ขึ้นอยู่กับหรือเท่ากับ ปริมาณความหนาแน่นของฟลักซ์ส่องสว่างที่มาจากแหล่งกำเนิดแสง ที่มีระยะทางจากจุดกำเนิดแสงส่องมายังพื้นผิวที่ต้องการให้เกิดความสว่างอย่างสมบูรณ์ ดังสมการ (2.8) [24]

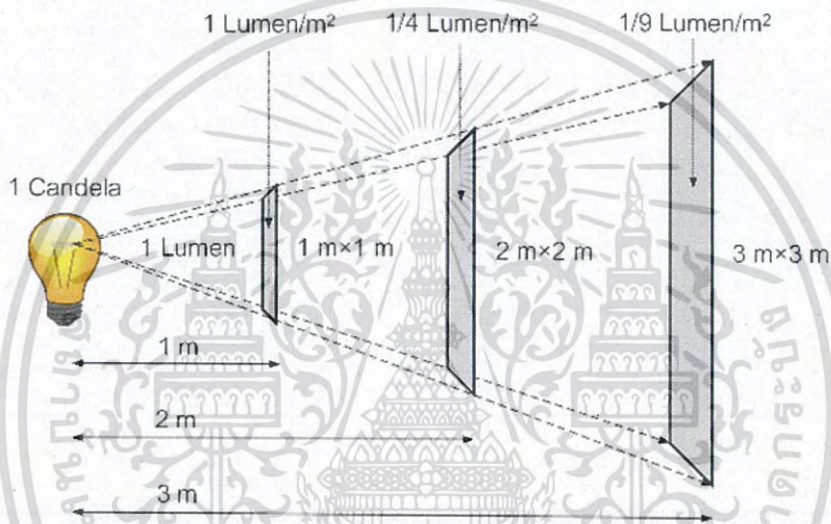
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E \propto I \quad (2.8)$$

### 7) กฎกำลังสองผกผัน (Inverse Square Law)

ความเข้มส่องสว่าง ( $I$ ) จาก แหล่งกำเนิดแสงจะแปรค่าเป็นส่วนกลับกับระยะทางยกกำลังสอง ใช้กับกรณีพื้นที่แสงตกกระทบทำมุมตั้งฉากกับทิศทางแสง หาค่าได้จากสมการ (2.9) และแสดงดังรูปที่ 2.16

$$E = \frac{I}{D^2} \quad (2.9)$$



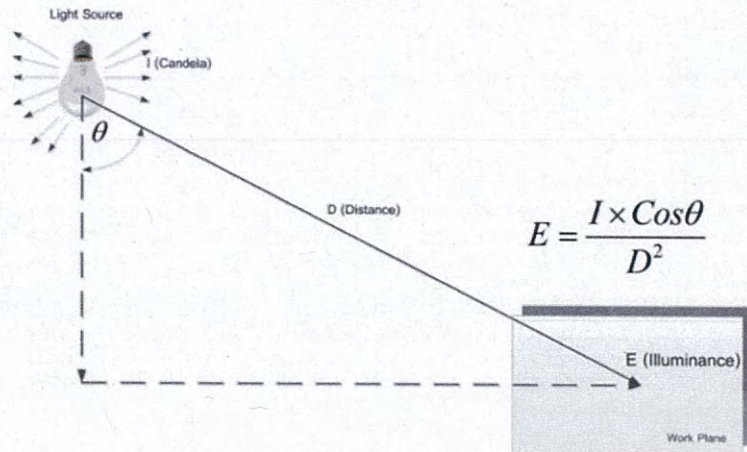
รูปที่ 2.16 กำลังสองผกผันของแสง

จาก รูปที่ 2.16 อธิบายได้ว่า ที่ระยะทาง 1 เมตร จากแหล่งกำเนิดแสง ของค่าฟลักซ์ส่องสว่าง 1 Lumen จะเกิดความเข้มแสงบนพื้นที่ 1 ตารางเมตร หรือ 1 Lux ที่ระยะทาง 2 เมตร จากแหล่งกำเนิดแสง ของค่าฟลักซ์ส่องสว่าง 1 Lumen จะเกิดความเข้มแสงบนพื้นที่ 4 ตารางเมตร หรือ 1/4 Lux และที่ระยะทาง 3 เมตร จากแหล่งกำเนิดแสง ของค่าฟลักซ์ส่องสว่าง 1 Lumen จะเกิดความเข้มแสงบนพื้นที่ 9 ตารางเมตร หรือ 1/9 Lux

### 8) กฎของแลมเบิร์ตโคไซน์ (Lambert's Cosine Law)

ความเข้มส่องสว่าง ( $I$ ) จากแหล่งกำเนิดแสง แปรค่าเป็นส่วนกลับกับระยะทางยกกำลังสอง ใช้กรณีพื้นที่ที่แสงตกกระทบไม่ทำมุมตั้งฉากกับทิศทางแสง หาได้ดังสมการที่ (2.10) และแสดงดังรูปที่ 2.17 [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 การหาค่าความเข้มแสงแบบจุด

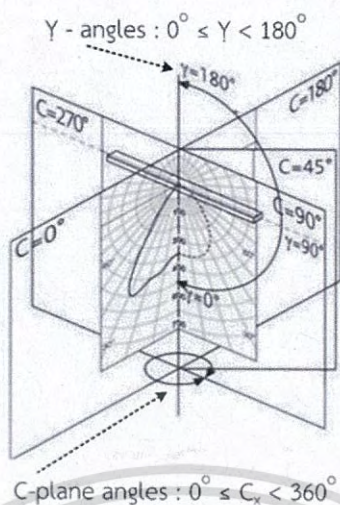
จากรูปที่ 2.19 สามารถหาค่าความเข้มแสงแบบจุด (Point-By-Point Method) ดังสมการ (2.10) เมื่อ  $E$  คือ Illuminance (ความสว่างของแสงที่เกิดจากทิศทางตกลงบนพื้นที่ที่ต้องการให้เกิดความสว่าง) หน่วย Lux ( $\text{lumens}/\text{m}^2$ ) นิยมนำมาใช้ในการให้ความสว่างของพื้นที่ สำหรับการจัดแสงเกี่ยวกับงานโทรทัศน์ Foot-candle ( $\text{lumens}/\text{ft}^2$ ) สำหรับนำมาใช้ในการจัดแสงทางสตูดิโอ โดย 1 Foot-candle เท่ากับ 10.76 Lux และ 1 Lux เท่ากับ 0.0929 Foot-candle

$$E = \frac{I \times \text{Cos}\theta}{D^2} \quad (2.10)$$

- เมื่อ
- $I$  คือ Luminous Intensity of Source (ความเข้มส่องสว่าง) หน่วย Candela; cd
  - $\theta$  คือ มุมระหว่างเส้นตั้งฉากกับระนาบเอียงและตรง ที่ตกกระทบ หน่วย (องศา)
  - $D$  คือ ระยะระหว่างจุดกำเนิดแสงไปยังจุดที่แสงตกกระทบบนพื้นที่ใช้งานในทิศทางแนวเดียวกันองศากับพื้น หน่วย m

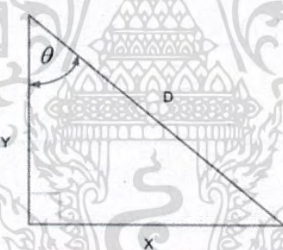
#### 9) การกระจายความเข้มส่องสว่างรอบโคมไฟ (Luminous Intensity of Source)

ความเข้มส่องสว่างที่กระจายออกรอบโคมไฟสามารถหาได้จากตารางคุณสมบัติเฉพาะแหล่งกำเนิดแสงและลักษณะของโคมไฟในทิศทางมุม  $\lambda$  หรือ  $\theta$  (0 องศา ถึง 180 องศา) และ ในทิศทางมุม C (0 องศา ถึง 360 องศา) รอบโคมไฟ ดังรูปที่ 2.18 [25]



รูปที่ 2.18 ทิศทางมุมในการหาค่าความเข้มแสง

- 10) มุมระหว่างเส้นตั้งฉากกับระนาบเอียงและตรงที่ตกกระทบ  
 มุมระหว่างเส้นตั้งฉากกับระนาบเอียงและตรงที่ตกกระทบ (Angle between the Light fall to Plane) [14] พื้นที่ใช้งานพิจารณาการหาค่ามุมโดยใช้หลักการพื้นฐานของตรีโกณมิติ ดังรูปที่ 2.19 และหาค่าได้ดังสมการที่ (2.11) หรือ (2.12)



รูปที่ 2.19 หลักการพื้นฐานของตรีโกณมิติ

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{X}{Y} \right) \quad (2.11)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{Y}{D} \right) \quad (2.12)$$

- เมื่อ  $\theta$  คือ มุมระหว่างเส้นตั้งฉากกับระนาบเอียงและตรงที่ตกกระทบพื้นที่ หน่วย (องศา)  
 $X$  คือ ระยะความกว้างหรือความยาวของพื้นที่ใช้งาน หน่วย m  
 $Y$  คือ ระยะความสูงของโคมไฟถึงพื้นที่ใช้งาน หน่วย m  
 $D$  คือ ระยะระหว่างจุดกำเนิดแสงไปยังจุดที่แสงตกกระทบบนพื้นที่ใช้งาน หน่วย m

11) ระยะทางระหว่างจุดกำเนิดแสงไปยังจุดที่แสงตกกระทบ

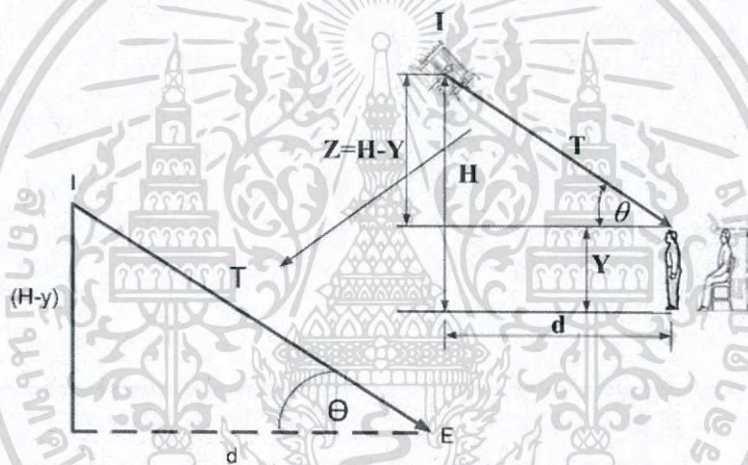
ระยะทางระหว่างจุดกำเนิดแสงไปยังจุดที่แสงตกกระทบ (Distance from Source to Point in Plane) [14] ลงบนพื้นที่ใช้งาน สามารถหาค่าระยะทางได้จากหลักการของทฤษฎีพีทาโกรัส ตามสมการที่ (2.13) หรือ (2.14) ดังรูปที่ 2.18

$$D = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (2.13)$$

$$D = \frac{Y}{\cos\theta} \quad (2.14)$$

### 2.3.1.2 ค่าความสว่างสำหรับการจัดแสง

หลักการคำนวณความสว่างสำหรับนำมาใช้ในการจัดแสงภายในและภายนอกสตูดิโอ ใช้หลักการหาค่าตามกฎแลมเบิร์ตโคไซน์ค์ ได้จากสมการที่ (2.15) ถึง (2.17) และแสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การหาค่าความสว่างสำหรับการจัดแสง

- เมื่อ  $T$  คือ ระยะระหว่างจุดกำเนิดแสงไปยังจุดที่แสงตกกระทบบนพื้นที่ใช้งาน ในทิศทางแนวทำองศากับพื้น คำนวณได้จากหลักการของทฤษฎีพีทาโกรัส หน่วย m
- $d$  คือ ระยะระหว่างจุดกำเนิดแสงไปยังจุดที่แสงตกกระทบบนพื้นที่ใช้งาน ในทิศทางแนวระนาบกับพื้น หน่วย m
- $H$  คือ ระยะความสูงจากพื้นถึงโคมไฟ หน่วย m
- $y, x$  คือ ระยะความสูงจากพื้นถึงจุดที่แสงตกกระทบบนพื้นที่ใช้งาน หน่วย m

$$\text{Throw } (T) = \sqrt{[d^2 + (H - Y)^2]} \quad (2.15)$$

$$E = \frac{I \text{ (Candela)}}{\text{Throw}^2} \times \frac{\text{distance } (d)}{\text{Throw } (T)} = \frac{I \cdot d}{T^3} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ สามารถหาค่าได้ตามหลักการของกฎแลมเบิร์ตโคไซน์

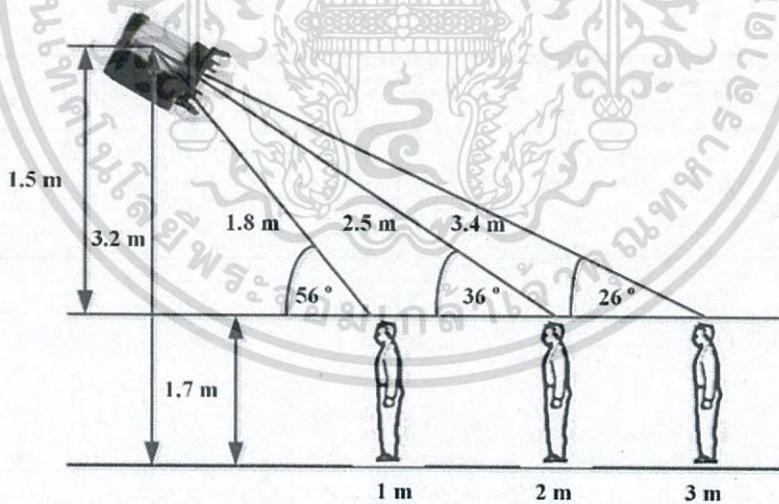
$$\cos\theta = \frac{d}{T} \quad (2.17)$$

นำสมการ (2.17) ตามกฎของแลมเบิร์ตโคไซน์ แทนค่าลงในสมการ (2.10) ทำให้ได้ค่าของสมการที่นำมาแทนค่าได้ดังสมการที่ (2.18) ได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ 2.19

$$E = \frac{I \times \left(\frac{d}{T}\right)}{D^2} \quad (2.18)$$

$$E = \frac{I \times d}{T^3} \quad (2.19)$$

เพราะฉะนั้นการจัดแสงต้องพิจารณาทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงเบื้องต้น เพื่อหาค่าความสว่างที่เหมาะสมไม่เกิดความสว่างมาก หรือ ความสว่างน้อย ที่ทำให้วัตถุ หรือ บุคคล เกิดความไม่สมดุลของความสว่างจากแสง ดังนั้นต้องพิจารณาพื้นฐานการกำหนดทิศทางแสงเบื้องต้น การคำนวณค่าความสว่างในการจัดแสงจะสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (2.10) และ (2.19) ตัวอย่างการคำนวณสามารถแสดง ดังตารางที่ 2.3 และ ดังรูปที่ 2.21 นอกจากนี้ตารางที่ 2.4 แสดงค่าความสว่างของลักษณะแหล่งกำเนิดแสงประเภทต่างๆ [15]



รูปที่ 2.21 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความสว่างในการจัดแสง

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการคำนวณค่าความสว่างในการจัดแสง

Luminaire (kw)	I (cd)	Luminaire Height (m)	Distance (m)	Throw (m)	Angle (degree)	Cosine of angle	Illuminance (Lux)
0.5	9,000	1.5	1	1.80	56	0.56	1,555
1	10,800	1.5	2	2.50	36	0.81	1,383
5	75,000	1.5	3	3.40	26	0.89	5,947

ตารางที่ 2.4 แสดงระดับค่าความสว่างของแหล่งกำเนิดแสง

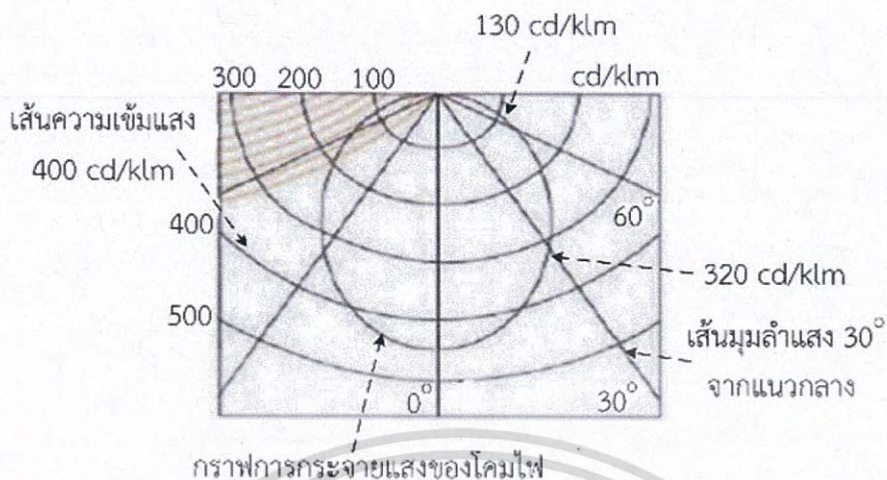
ลักษณะของแหล่งกำเนิดแสง	Foot-candles	Lux
Sunlight	10000-2500	108000-27000
Daylight	2500-2.00	27000-2100
Sunset	10-0.1	108-1
Moonlight	0.01-0.001	0.12-0.01
Store Lighting	500-100	5400-1080
Office Lighting	50-20	540-215
Domestic Lighting	20-5	251-54
Street Lighting	2-0.01	21.5-0.1
Studio Lighting	92.936	1000

### 2.3.1.3 การกระจายแสงของโคม (Lighting Distributions)

การออกแบบระบบแสงสว่างให้เหมาะสมกับพื้นที่ใช้งาน พื้นฐานข้อมูลทางแสง ถือเป็นข้อมูลสำคัญการออกแบบระบบแสงสว่าง การเลือกใช้ดวงโคมไฟฟ้า การหาจำนวนดวงโคมไฟฟ้า การหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของดวงโคมไฟฟ้า ข้อมูลที่ได้มาจากผลการทดสอบจากการวัดในห้องปฏิบัติการ โคมไฟมีหลายชนิดแต่ละโคมไฟมีค่ากราฟกระจายแสงของโคมต่างกัน การนำโคมไฟไปใช้จะต้องเลือกจากกราฟกระจายแสงของโคมไฟที่เหมาะสมกับงานที่ออกแบบระบบแสงสว่าง กราฟการกระจายแสงของโคมไฟ สามารถพิจารณาได้ 5 ลักษณะ [19]

#### 1) Polar curve

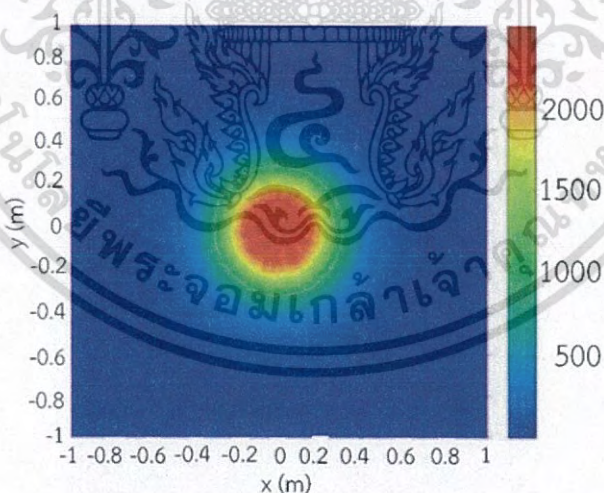
เป็นกราฟที่มีหน่วยเป็นแคนเดลาต่อกิโลลูเมน (cd/klm) ประกอบด้วย เส้นสี่เหลี่ยมเป็นวงตรงกลางแสดงเส้นการกระจายแสงของโคมไฟ ส่วนกราฟเส้นครึ่งวงกลมหลายเส้น มีค่าตั้งแต่ 100-500 cd/klm แสดง ความเข้มแสง และกราฟเส้นที่ลากจากจุดกึ่งกลางบนสุดลงมาแนวตั้งหลายเส้นแสดงเส้นมุมลำแสง  $0^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$  และ  $60^{\circ}$  ทั้งซ้ายและขวาของแนวตั้ง ดังรูปที่ 2.22 [26]



รูปที่ 2.22 กราฟการกระจายแสงของโคมไฟแบบโพลาร์เคิร์ฟ

## 2) Iso-Lux curve หรือ Iso-Foot candle

เป็นกราฟการกระจายแสงของโคมไฟที่พิจารณาจากด้านบน โดยแสดงให้เห็นถึงความสว่าง (Lux) ในระยะห่างจากโคมที่แตกต่างกันออกไป ตามระยะห่างของช่องสเกล (H) ตามแกน X และ แกน Y คูณด้วยปริมาณระยะบนพื้นที่ใช้งานจริงของแต่ละช่องระยะ บนกราฟเส้นสีดำที่บิดเป็นวง คือ เส้นของความส่องสว่าง มีหน่วยเป็น Lux ดังรูปที่ 2.23 [27]

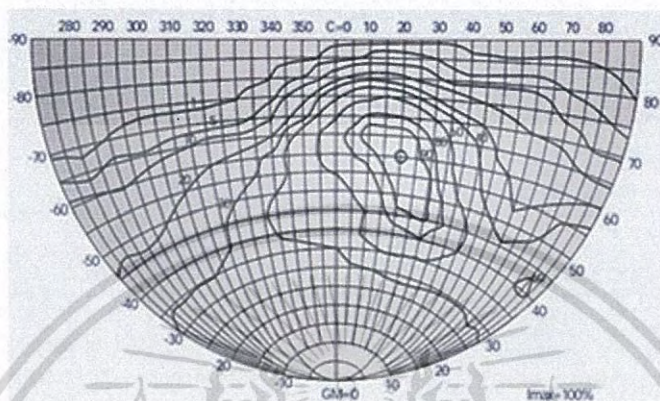


รูปที่ 2.23 กราฟการกระจายแสงของโคมไฟแบบไอโซลักซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3) Iso-Intensity curve หรือ Iso-candela

เป็นกราฟเส้นโค้งความเข้มแสงเท่ากับทรงกลมซีกเดียวโดยมีจุดศูนย์กลาง ณ ศูนย์กลางแผนภูมิที่มีลักษณะของโคมไฟในทิศทางมุม  $\gamma$  หรือ  $\theta$  (0 องศา ถึง 90 องศา) และ ในทิศทางมุม C (0 องศา ถึง 180 องศา) ตามแนวทิศทางรอบโคมไฟ ดังรูปที่ 2.24 [28]



รูปที่ 2.24 กราฟการกระจายแสงของโคมไฟแบบไอโซอินเทนซิตี

### 4) Performance Cones หรือ Beam Spread (ความกว้างของลำแสง)

เป็นกราฟการกระจายแสงของโคมไฟรูปทรงกรวย แสดงขนาดองศาความกว้างของลำแสงตัวโคมอยู่ที่จุดกึ่งกลางบนสุด ข้อมูลทางด้านซ้ายแสดงความสูง ทางด้านขวาแสดงค่าความสว่างเป็น Lux ข้อมูลตรงกลางกรวย แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวยลำแสง ลักษณะองศาความกว้างของลำแสงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ Flood และ Spot แสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 กราฟการกระจายแสงของโคมไฟแบบโคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1.4 สีของแสง (Colorimetry Terms)

#### 1. แสง (Visible Light) หรือ แสงสีขาว (White Light)

มีช่วงความถี่  $10^{14}$  Hz ที่ความยาวคลื่นของการกระจายกำลังการแผ่รังสีในสเปกตรัม (Spectral power distributions) (400-700 nm) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประสาทตาของมนุษย์ที่รับรู้สีได้ และสามารถมองเห็นแยกแยะสีด้วยตา แสดงดังรูปที่ 2.26 และ ตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.26 แสงธรรมชาติ

ตารางที่ 2.5 สเปกตรัมสีของแสงที่มนุษย์สามารถมองเห็นด้วยตา [14], [24]

สีของแสง	ความยาวคลื่น (nm)	ความยาวคลื่นเฉลี่ย (cm)
ม่วง (Violet)	380-430	0.000041
คราม (Indigo)	430-450	0.000043
น้ำเงิน (Blue)	450-480	0.000047
เขียว (Green)	510-550	0.000052
เหลือง (Yellow)	570-590	0.000057
แสด (Orange)	590-610	0.000062
แดง (Red)	610-720	0.000070

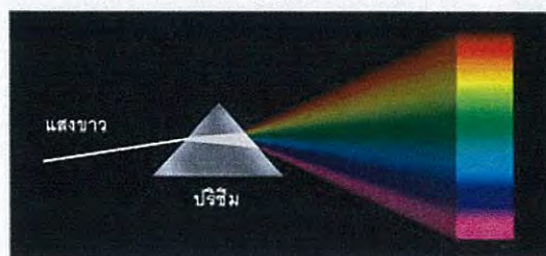
## 2.4 อุณหภูมิสีของแหล่งกำเนิดแสง

### 2.4.1 ลักษณะสีของแสง

ไอแซค นิวตัน ได้ค้นพบสีของแสงจากแท่งแก้วปริซึม เมื่อวางกั้นลำแสงจากดวงอาทิตย์ แสงจะหักเหและให้แถบของสีรุ้งกินน้ำและเมื่อทดลองนำแท่งแก้วปริซึมขึ้นมาวางขวางรับแสงสีรุ้ง แสงที่หักเหผ่านแท่งแก้วปริซึมกลับกลายเป็นสีขาว ดังรูปที่ 2.27



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.27 ไอแซค นิวตัน (ก) และแสงที่หักเหผ่านแท่งแก้วปริซึม (ข)

## 2.4.2 พื้นฐานค่าสีของแสง (Basic Colorimetric Parameters)

### 2.4.2.1 ระบบการวัดสี (Color Measuring System)

#### 1) The CIE-1931 $X, Y, Z$ Tristimulus Values

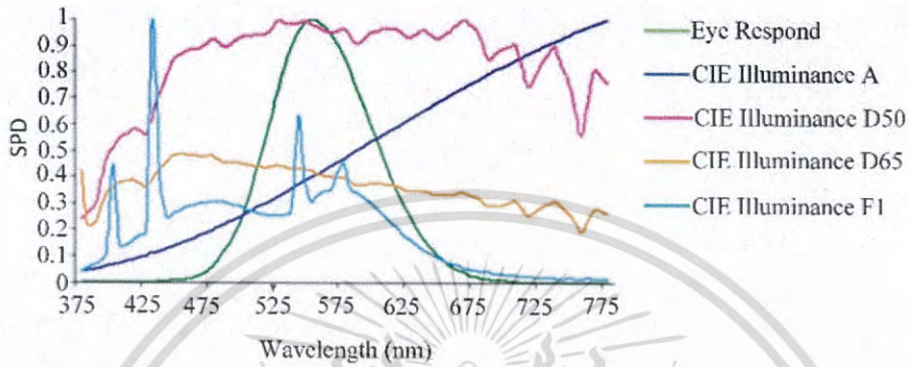
ค่าไตรสติมูลัส สร้างขึ้นปี 1931 โดยคณะกรรมการสร้างและพัฒนาระบบกำหนดสีให้เป็นมาตรฐานสากล (Commission Internationale del' E'clairage หรือ International Commission on Illumination: CIE) จากความต้องการแปลงปริมาณการรับรู้สีให้กลายเป็นตัวเลขทางคณิตศาสตร์ ได้พัฒนาระบบของการวัดสีในรูปของ Objective ที่ไม่ต้องอาศัยประสบการณ์ หรือความคิดของมนุษย์ สำหรับการวัดสี ตามแนวคิดของ W. David Wright John Guild ในช่วงปลายทศวรรษที่ 1920 เช่น ระบบ Mansell การวัดสีระบบนี้มีข้อดี

- ไม่ขึ้นกับการมองเห็นของแต่ละบุคคลทำให้ลดปัญหาการขัดแย้งการมองเห็นสี
- บอกค่าออกมาเป็นตัวเลข ดังนั้นหากตัวชิ้นงานสีจะซีดลงตามกาลเวลา แต่ค่าตัวเลขของสียังคงบอกถึงค่าสีตั้งต้น
- สามารถนำไปคำนวณ และทำนายสูตรสีผสม
- วัดสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน ออกมาเป็นตัวเลข ตามแนวแกน  $X, Y, Z$  ทำให้ง่ายต่อการคำนวณ

ระบบ CIE มีแนวคิดจากปัจจัย สำหรับการมองเห็นสีของมนุษย์ ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง วัตถุที่มีสี และสายตามนุษย์ถือเป็นผู้สังเกต ดังนั้นสามารถวัดสีปัจจัยดังกล่าวออกมาเป็นตัวเลขได้ ในการวัดสีของวัตถุจากเครื่องวัดสี ต้องอาศัยแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ หรือแหล่งกำเนิดแสงธรรมชาติ เพื่อให้สามารถมองเห็นสีได้ แต่ทั้งนี้สีของแสงจะขึ้นอยู่กับการเลือกใช้แหล่งกำเนิดแสง และต้องใช้เครื่องวัดการกระจายคลื่นแสง (Spectroradiometer) เพื่อวัดค่าการกระจายพลังงานที่ความยาวคลื่น (400-700 nm) ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเป็นมาตรฐาน ระบบ CIE ได้กำหนดมาตรฐานการกระจายพลังงานที่ความยาวคลื่น แหล่งกำเนิดแสง (Wavelength, nm CIE Standard source) ได้แก่ Illuminant A, Illuminant B, Illuminant C, Illuminant D เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.28 [29] โดย Illuminant A มีค่าการกระจายพลังงานที่ความยาวคลื่น (SPD) ใกล้เคียงแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ประเภท หลอด Incandescent

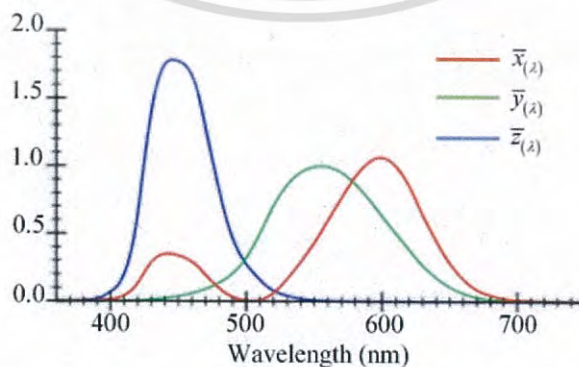
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tungsten ค่าประมาณอุณหภูมิสีของแสง 2420K ส่วน Illuminant D มีค่าการกระจายพลังงานที่ความยาวคลื่น (SPD) ใกล้เคียงแหล่งกำเนิดแสงธรรมชาติจากดวงอาทิตย์ตอนกลางวัน ค่าประมาณอุณหภูมิสีของแสง จาก สีเหลืองจนถึงสีน้ำเงินได้แก่ D65 ค่าประมาณอุณหภูมิสีของแสง 6500K เป็นช่วงเวลาท้องฟ้าโปร่งสีน้ำเงิน



รูปที่ 2.28 การกระจายพลังงานของแหล่งกำเนิดแสงต่างๆ ตามมาตรฐาน CIE-1931

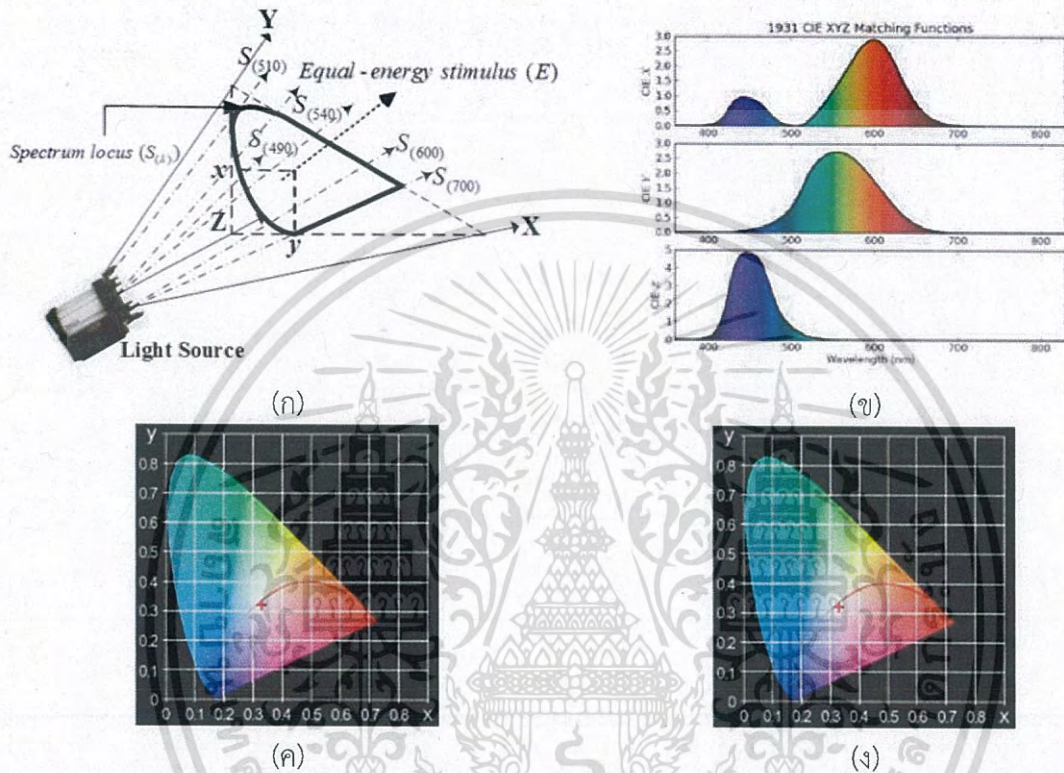
สำหรับค่าฟังก์ชันการปรับค่าสีของระบบ  $X, Y, Z$  ตลอดความยาวคลื่น มีการสร้างฟังก์ชันสำหรับผู้สังเกตที่ใช้ได้กับมุมมองที่ 2 องศา หรือเล็กกว่า สำหรับการมองเห็นสี เทียบได้กับขนาดเรตินาที่ขอบแล้วยืดแขนออกไปสุดความยาวแขนเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดเรตินาที่ขอบกับขนาดของวัตถุต่างๆ ที่เห็นแล้วมีขนาดเล็กมาก วัตถุที่เห็นมีขนาดใหญ่กว่าเรตินามีเช่น ฝาผนัง รถยนต์ [29] มาตรฐานสำหรับสีของระบบ  $X, Y, Z$  ทั้ง 3 คือ  $\bar{x}_{(\lambda)}, \bar{y}_{(\lambda)}, \bar{z}_{(\lambda)}$  ดังรูปที่ 2.29 แสดงฟังก์ชันเชิงปริมาณที่ไม่ใช้คุณลักษณะการดูดกลืนของสีที่แท้จริงมาตรฐานเรตินามนุษย์ แต่เป็นฟังก์ชันความไวที่หาจากข้อมูลจริงในการทดสอบโดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองสัมผัส และความยาวคลื่นสามารถอธิบายด้วยสเปกตรัมปฐุมภูมิที่ใช้ในการคำนวณความสว่างหรือระดับความเข้มแสง ที่วัดตามกฎการเพิ่มของ Grassman (Grassman's additive law) และใช้สีของแสงระบบ  $X, Y, Z$  ดังรูปที่ 2.30 (ก) และถูกกำหนดไว้ในตารางฟังก์ชันการปรับค่าสี  $\bar{x}_{(\lambda)}, \bar{y}_{(\lambda)}, \bar{z}_{(\lambda)}$  ของระบบ  $X, Y, Z$



รูปที่ 2.29 Color Matching Function  $\bar{x}_{(\lambda)}, \bar{y}_{(\lambda)}, \bar{z}_{(\lambda)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสามารถกำหนดค่าปัจจัย สำหรับการมองเห็นสีของมนุษย์ได้ตามที่กล่าว จากนั้นให้นำค่าทั้ง 3 ส่วนมาคำนวณระบุสีของวัตถุด้วยวิธีการคูณตลอดช่วงการกระจายพลังงานที่ความยาวคลื่น (400-700 nm) จะได้ตัวเลขจำนวน 3 ค่า ตามแนวแกน X, Y, Z แสดงดังสมการที่ (2.20) ถึง (2.23) ดังรูปที่ 2.30 (ข) [30]



รูปที่ 2.30 Tristimulus space based on CIE-1931 (ก) The CIE-1931 X, Y, Z Tristimulus (ข) The CIE-1931 (x, y) (ค) และ The CIE-1976 (u', v') (ง)

$$X = k \int_{380nm}^{780nm} SPD_{(\lambda)} \bar{x}_{(\lambda)} d_{(\lambda)} \tag{2.20}$$

$$Y = k \int_{380nm}^{780nm} SPD_{(\lambda)} \bar{y}_{(\lambda)} d_{(\lambda)} \tag{2.21}$$

$$Z = k \int_{380nm}^{780nm} SPD_{(\lambda)} \bar{z}_{(\lambda)} d_{(\lambda)} \tag{2.22}$$

$$k = \frac{100.000}{\int_{380nm}^{780nm} SPD_{(\lambda)} \bar{y}_{(\lambda)} d_{(\lambda)}} \tag{2.23}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) The Chromaticity Coordinates

- The CIE-1931  $(x, y)$

จากการคำนวณหาค่าระบุงสีวัตถุ โดยวิธีการคำนวณด้วย ค่าไตรสติมูลัส  $X, Y, Z$  ตามมาตรฐาน CIE-1931 แม้ว่าจะระบุเป็นค่าสีแดง สีเขียว และ สีน้ำเงิน แต่ยังไม่สามารถระบุสี (Hue) ของวัตถุถึงความสัมพันธ์ของค่าความมืดหรือความสว่างของสี และความเข้มของสี (Chroma) จึงทำให้ไม่สามารถที่จะนำค่าไตรสติมูลัส  $X, Y, Z$  ไปใช้ให้เกิดประโยชน์สำหรับการอ่านค่าสีได้ ดังนั้น การนำวิธีการคำนวณค่า The CIE-1931 Chromaticity Coordinates  $(x, y)$  มาใช้เพื่อให้เกิดความสมบูรณ์สำหรับการอ่านค่าสีได้อย่างถูกต้อง โดยกำหนดให้ ค่า  $x$  และ  $y$  เป็นค่าที่ระบุความเป็นสี ส่วนความสว่างของสีเป็นค่า  $Y$  สามารถคำนวณค่าได้ดังสมการที่ (2.24) และ (2.25) และแสดงดังแผนภูมิที่ใช้บอกสี The CIE-1931  $(x, y)$  CIE Chromaticity Diagram ดังรูปที่ 2.32 (ค) มีลักษณะเป็นรูปเกือบกลม [31]

$$x = \frac{X}{(X+Y+Z)} \quad (2.24)$$

$$y = \frac{Y}{(X+Y+Z)} \quad (2.25)$$

- The CIE-1976  $(u', v')$

ระบบค่าการมองเห็นของสี จาก The CIE-1931  $(x, y)$  ในแกน  $x, y$  สามารถนำมาพิจารณาในแกน CIE Chromaticity Diagram  $u', v'$  เพื่อทำการแปลงค่าในแกนนี้สามารถนำมาช่วยในการหาค่า ดัชนีความถูกต้องสีของแสง และค่าอุณหภูมิสีของแสงเทียบเคียง แสดงดังสมการที่ (2.26) และ (2.27) หรือสามารถคำนวณการหาค่า CIE Chromaticity Diagram  $u', v'$  ในกรณีที่ทราบค่าระบบแกน The CIE-1931  $(x, y)$  โดยใช้สมการที่ (2.28) และ (2.29) และสามารถนำค่าที่ได้มาแสดงดังแผนภูมิที่ใช้บอกสี The CIE-1976  $(u', v')$  CIE Chromaticity Diagram ดังรูปที่ 2.32 (ง) [31]

ดังนั้น หากต้องการคำนวณหาอุณหภูมิสีของแสง (Color Temperature) สามารถคำนวณโดยใช้หลักการหาค่าของ The CIE-1931  $(x, y)$  และ The CIE-1976  $(u', v')$  หรือการพิจารณาจาก CIE Chromaticity Diagram ของทั้ง 2 ระบบได้เช่นกัน

$$u' = \frac{4x}{(-2x+12y+3)} \text{ or } \frac{4X}{(X+15Y+3Z)} \quad (2.26)$$

$$v' = \frac{9y}{(-2x+12y+3)} \text{ or } \frac{9Y}{(X+15Y+3Z)} \quad (2.27)$$

$$x = \frac{27u'}{(18u'-48v'+36)} \quad (2.28)$$

$$y = \frac{12v'}{(18u'-48v'+36)} \quad (2.29)$$

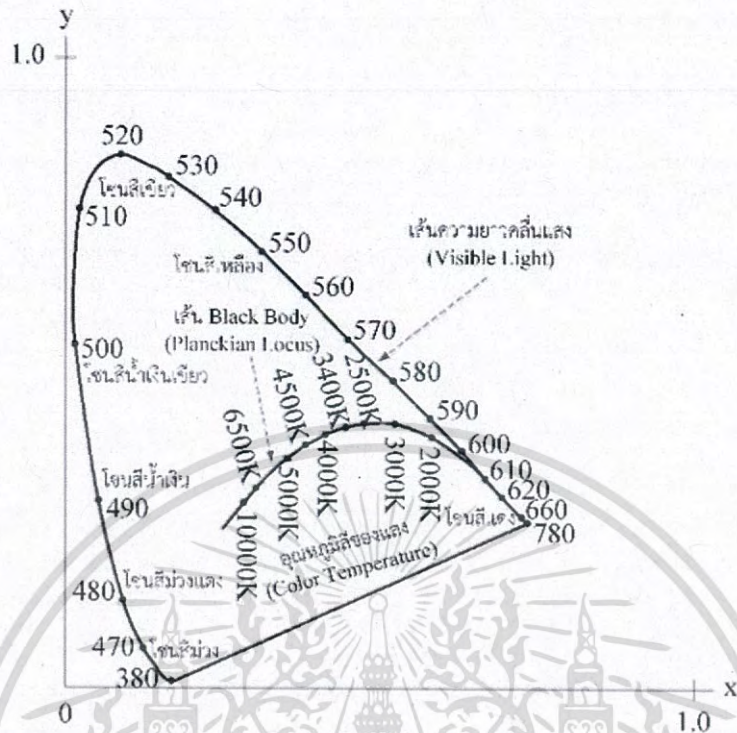
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3 สีของแหล่งกำเนิดประดิษฐ์ หรือ อุณหภูมิสีของแสง

สีของแหล่งกำเนิดประดิษฐ์ หรือ อุณหภูมิสีของแสง (Color Temperature) หากนำวัตถุ ได้แก่ เทียน หรือ ท่อนไม้ จุดหรือเผาภายในที่มีด ที่อุณหภูมิการเผาไหม้ระดับสูงขึ้น จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของ วัตถุดังกล่าวด้วยตา พบว่าจะเริ่มเกิดควันการเผาไหม้ จากนั้นจะเริ่มเกิดการเรืองแสงขึ้นรอบวัตถุ โดยจะ เริ่มจากแสงสีแดงเข้ม ไปเป็นสีส้ม สีเหลือง และสีฟ้าเข้มจนกลายเป็นสีน้ำเงิน และเป็นสีขาว ตามลำดับ จนการเผาไหม้สิ้นสุด การเรืองแสงของวัตถุจะไม่สามารถมองเห็นได้ในที่สุด ท้ายสุด จะกลายเป็นขี้เถ้า เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของแสงได้เป็นระบบจึงสามารถแสดงด้วยกราฟ การกระจายกำลังใน สเปกตรัม (Spectral Power Distribution, SPD) ของวัตถุดำ หรือ Plan Kian Radiator ที่การกระจาย พลังงานความยาวคลื่น (400-700 nm) ดังรูปที่ 2.31 [32] จากรูปจะได้เส้นโค้งค่าสีของวัตถุดำ (Black Body Locus) เริ่มจากสีของแสง เป็นสีแดง ไปเป็นสีน้ำเงิน (จากขวาไปซ้าย) สิ่งที่เปลี่ยนแปลงตามคือค่า อุณหภูมิสีของแสง เริ่มต้นที่ประมาณ 1000K ไปถึงค่าอนันต์ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีของแสง สามารถ บอกแหล่งกำเนิดแสงตามมาตรฐาน CIE Standard source เช่น Illuminant A หลอด Incandescent Tungsten ค่าอุณหภูมิสีของแสงประมาณ 2420K หรือ Illuminant D D65 ค่าอุณหภูมิสีของแสง ประมาณ 6500K ปัจจุบันแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์มีมากมาย เพื่อนำมาทดแทนค่าอุณหภูมิสีของแสงที่ นอกจากค่าอุณหภูมิสีของแสงที่เกิดบนเส้นโค้งค่าสีของวัตถุดำ หรือกล่าวว่ นำมาทดแทนแหล่งกำเนิดแสง มาตรฐาน ของ CIE Standard source ได้แก่ หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent), หลอดเมทัลฮาไลด์ ไอโอไดด์ (Halogen Metal Iodide), หลอดแอลอีดีกำลังสูง (High Power Light Emitting Diode) โดย หาค่าอุณหภูมิสีของหลอดไฟดังกล่าวได้จากการนำค่าอุณหภูมิสีของแสงหลอดไฟวางตามเส้นโค้งค่าสีของ วัตถุดำ เรียกค่าสีที่อ่านได้ว่า “อุณหภูมิสีเทียบเคียง” (Correlated Color Temperature:  $CCT, T_{cp}$ ) มี หน่วยวัด “เคลวิน” (Kelvin: K) แสดงดังตารางที่ 2.6 และตารางที่ 2.7 การหาค่าอุณหภูมิสีของแสง สามารถคำนวณหาค่าได้โดยใช้สูตรของ McCamy ที่ต้องหาค่าของ CIE-1931  $(x, y)$  ที่ปรากฏในสมการ ที่ (2.24) และ (2.25) จากนั้นนำมาแทนค่าลงในสมการที่ (2.30) และ (2.31) ตามลำดับ

$$n = \frac{(x - 0.3320)}{(0.1858 - y)} \quad (2.30)$$

$$CCT = 449n^3 + 3525n^2 + 6823.3n + 5520.33 \quad (2.31)$$



รูปที่ 2.31 เส้นโค้งค่าสีของวัตถุดำ

ตารางที่ 2.6 อุณหภูมิสีของแสง

ค่าอุณหภูมิสีของแสง (K)	ลักษณะของเขตสีจากแสง
1000-2400	สีอมเหลืองถึงเหลือง
3000	สีเหลือง (Yellow Sun Light)
3800-6000	สีขาวนวลอมเหลือง (Sun Light)
7000-8000	สีขาวนวล (Crystal White)
10000	สีขาวอมฟ้า (Crystal Blue)
12000	สีฟ้าอ่อน (Purple Blue)
15000-16000	สีฟ้าเข้ม (Deep Blue)
17000-18000	สีอมม่วง (Purple Red)
20000	สีชมพู (Pink)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 อุณหภูมิสีของแหล่งกำเนิดแสง [24],[33]

ค่าประมาณ อุณหภูมิสี ของแสง (K)	แสงธรรมชาติ	ค่าประมาณ อุณหภูมิสี ของแสง (K)	แสงประดิษฐ์ (หลอดไฟ, Illuminant)
-	-	1700	เปลวไม้ขีดไฟ (ขาวส้ม)
-	-	1925	เปลวเทียน (ขาวส้ม)
2300	แสงพระอาทิตย์ตก	2420	Incandescent Tungsten (ขาวเหลือง, Warm White: WW)
2500	แสงพระอาทิตย์ขึ้น		
-	-	2856	Standard Illuminant A
3500	แสงสนธยา (Twilight) ช่วง 10-15 นาที ก่อน แสงพระอาทิตย์ขึ้นหรือตก	2600-3150	Warm white Fluorescent
		3200	Tungsten halogen Film & TV
		2700-3200	Warm white LED
4100	แสงพระจันทร์	4600-5400	Day white Fluorescent
		4874	Standard Illuminant B
-	-	5503	Standard Illuminant D55
5800-6000	แสงพระอาทิตย์ 9.00-15.00 น. กลางวันท้องฟ้ามีเมฆ	5600-5800	HMI (Halogen Metal Iodide)
		5500-6000	DayLight LED (ขาว, Daylight: D)
-	-	6000	Xenon (Arc หรือ Flash)
6500	ท้องฟ้าโปร่งสีน้ำเงิน	6504	Standard Illuminant D65
-	-	5700-7100	Cool white Fluorescent (ขาวเย็น, Cool White: CW)
-	-	6774	Standard Illuminant C
-	-	7000-7500	Cool white LED
-	-	7504	Standard Illuminant D75
12000	ท้องฟ้าโปร่งขาว	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.4 ดัชนีความถูกต้องสีของแสง

ดัชนีความถูกต้องสีของแสง (Color Rendering Index,  $CRI$  or  $R_a$ ) ค่าเปอร์เซ็นต์ที่บ่งบอกถึงสีของแสงจากแหล่งกำเนิดที่นำมาส่องวัตถุ โดยเทียบกับแหล่งกำเนิดมาตรฐานได้แก่แสงดวงอาทิตย์ หรือ แสงจากหลอดไฟทั้งสแตนด์-ฮาโรเจน ที่มีค่าความถูกต้องสีของแสง 100 % มีลักษณะการกระจายระดับกำลังสเปกตรัม (Spectral Power Distribution, SPD) ของวัตถุค่า ครบทุกสี และมีระดับที่สม่ำเสมอ บางแหล่งกำเนิดแสงจะไม่ครบทุกสี และมีระดับการกระจายกำลังที่แตกต่างกัน หรือกล่าวเป็นค่าที่บอกสีของวัตถุที่เห็นภายใต้แหล่งกำเนิดแสงที่เพี้ยนจากความเป็นจริงโดยพิจารณาเปอร์เซ็นต์มากน้อยเพียงใด การคำนวณหาค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสง อาศัยการหาค่าแบบการเปลี่ยนค่าสี (Color Shift Method) บนค่าสีของวัตถุทดสอบ กับค่าสีมาตรฐาน และหาค่าระยะการเปลี่ยนแปลงของค่าสีทั้ง 2 จากนั้นคำนวณหาค่า ดัชนีความถูกต้องสีของแสงทั่วไป ( $R_a$ ) และดัชนีความถูกต้องสีของแสงเฉพาะสี  $R_i (i=1,2,3...15)$  จะสอดคล้องกับหมายเลขตัวอย่างสีทดสอบสีใดสีหนึ่งที่ศึกษา พอสรุปเป็นขั้นตอนการคำนวณหาค่าต่อไปนี้ ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาค่าอุณหภูมิสีเทียบเคียงของแหล่งกำเนิดสีทดสอบ ( $CCT_k$ ) เริ่มต้นจากการคำนวณค่า  $CIE-1931 (x, y)$  จากข้อมูล การกระจายกำลังในสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงทดสอบ  $SPD_{(k,\lambda)}$  โดยใช้สมการที่ (2.32) ขั้นตอนที่ 2 เลือกชุดแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง (Reference Illuminant)

การหาค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสงต้องอ้างอิงกับชุดแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงเสมอ อาจกำหนดในเชิงคณิตศาสตร์ โดยชุดแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงต้องมีค่าสีของแสงเหมือนกันหรือใกล้เคียงกับสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่ต้องการหาค่า ยกเว้นกรณีทีระบุไว้เป็นอย่างอื่น [34] สำหรับแหล่งกำเนิดแสงทดสอบที่มีค่าอุณหภูมิสีของแสงเทียบเคียงต่ำกว่า 5000K ต้องใช้ชุดแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงเป็นแบบตัวแผ่รังสีของพลังค์ (Planckian Radiator) ตามสมการที่ (2.32) และหากแหล่งกำเนิดแสงทดสอบมีค่าอุณหภูมิสีของแสงเทียบเคียงตั้งแต่ 5000K จะต้องใช้การกระจายกำลังในสเปกตรัมชุดหนึ่งในอนุกรมของแสงอาทิตย์ตามช่วงเวลาต่าง ๆ หาค่าได้ตามสมการที่ (2.32) ถึง (2.35) หรือ แสงประดิษฐ์ (Illuminant Daylight) หาค่าได้ตามสมการที่ (2.36) ถึง (2.38)

$$SPD_{r,\lambda} = 100 \left( \frac{560}{\lambda} \right)^5 \left( \frac{e^{\left( \frac{1.435 \times 10^7}{560T} \right)} - 1}{e^{\left( \frac{1.435 \times 10^7}{\lambda T} \right)} - 1} \right) \quad (2.32)$$

$$T < 7000K; x_D = -4.6070 \left( \frac{10^3}{T} \right)^3 + 2.9678 \left( \frac{10^3}{T} \right)^2 + 0.09911 \left( \frac{10^3}{T} \right) + 0.244063 \quad (2.33)$$

$$T \geq 7000K; x_D = -2.0064 \left( \frac{10^3}{T} \right)^3 + 1.9018 \left( \frac{10^3}{T} \right)^2 + 0.24748 \left( \frac{10^3}{T} \right) + 0.237040 \quad (2.34)$$

$$y_D = -3.000x_D^2 + 2.870x_D - 0.275 \quad (2.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นค่าการกระจายกำลังในสเปกตรัมเทียบเคียงที่ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง  $SPD_{(r,\lambda)}$  สามารถคำนวณหาค่าดังสมการที่ (2.36)

$$SPD_{(r,\lambda)} = S_{0,\lambda} + M_1 S_{1,\lambda} + M_2 S_{2,\lambda} \quad (2.36)$$

เมื่อ  $S_{0,\lambda}, S_{1,\lambda}, S_{2,\lambda}$  คือค่าการกระจายกำลังในสเปกตรัมเทียบเคียงของความยาวคลื่นที่ระบุไว้ในตาราง CIE Publication 15: 2004 "Colorimetry" [35] และ  $M_1, M_2$  คือ ค่าตัวประกอบการคูณ สามารถคำนวณหาค่าได้ดังสมการที่ (2.37) และ (2.38)

$$M_1 = \frac{-1.3515 - 1.7703x_D + 5.9114y_D}{0.0241 + 0.2562x_D - 0.7341y_D} \quad (2.37)$$

$$M_2 = \frac{0.0300 - 31.4424x_D + 30.0717y_D}{0.0241 + 0.2562x_D - 0.7341y_D} \quad (2.38)$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่า CIE-1976  $(u', v')$  ของแต่ละตัวอย่างเฉพาะสีทดสอบ  $(R_i)$  ทั้งหมด 8 สี จากแหล่งกำเนิดแสงทดสอบและแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง [36] โดยเริ่มจากขั้นตอนการคำนวณค่าไตรสติมูลัส  $X, Y, Z$  ตามมาตรฐาน CIE-1931 ของแต่ละตัวอย่างสีทดสอบ  $i = 1$  ถึง 8 โดยใช้สมการที่ (2.20)-(2.22) ร่วมกับค่าสีทดสอบ  $(R_i)$  ทั้งหมด 8 สี ที่ปรากฏในตารางค่าสี CIE แล้วแปลงค่าทั้งหมดของไตรสติมูลัส  $X, Y, Z$  ตามมาตรฐาน CIE-1931 ในขั้นตอน 3.1 ให้เป็นค่า CIE-1976  $(u', v')$  ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทดสอบและแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง โดยใช้สมการที่ (2.26) และ (2.27)

ขั้นตอนที่ 4 โดยทั่วไปค่า CIE-1976  $(u', v')$  ของแหล่งกำเนิดแสงทดสอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.2 จะมีค่าไม่ใกล้เคียงกับ ค่า CIE-1976  $(u', v')$  ของแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง ดังนั้นจะต้องมีการปรับค่าให้ใกล้เคียงที่สุด จึงได้เป็นค่า CIE-1976  $(u_{k,i}, v_{k,i})$  ของแต่ละตัวอย่างสีทดสอบ  $i = 1$  ถึง 8 สามารถหาค่าได้ดังสมการที่ (2.39) และ (2.40)

$$u_{k,i} = \frac{10.872 + 0.404 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - 4 \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}}{16.518 + 1.481 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}} \quad (2.39)$$

$$v_{k,i} = \frac{5.520}{16.518 + 1.481 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}} \quad (2.40)$$

คำนวณค่า ฟังก์ชัน  $c$  และ  $d$  จาก แหล่งกำเนิดแสงทดสอบ  $u_k, v_k$  ที่ให้ค่า  $c_k, d_k$  และตัวอย่าง สีทดสอบที่  $i$  ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทดสอบ  $u_{k,i}, v_{k,i}$  ที่ให้ค่า  $c_{k,i}, d_{k,i}$  โดยใช้สมการที่ (2.41) และ (2.42)

$$c = \frac{1}{(v')} (4 - u' - 10v') \quad (2.41)$$

$$d = \frac{1}{(v')} (1.708v' + 0.404 - 1.481u') \quad (2.42)$$

ขั้นตอนที่ 5 แปลงค่า โคออร์เนตปริภูมิสีกลสมมาเสมอ CIE-1964 ( $W^*_i, U^*_i, V^*_i$ ) ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทดสอบ และแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง โดยใช้สมการที่ (2.43)-(2.45) [34]

$$W^*_i = 25(Y_i)^{\frac{1}{3}} - 17 \quad (2.43)$$

$$U^*_i = 13(W^*_i)(u'_i - u') \quad (2.44)$$

$$V^*_i = 13(W^*_i)(v'_i - v') \quad (2.45)$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณค่าผลลัพธ์การเลื่อนตำแหน่งสี  $\Delta E_i$  เป็นขั้นตอนการหาค่าความแตกต่างระหว่างสีที่สามารถรับรู้ได้จากตัวอย่างสีทดสอบ  $i$  จากแหล่งกำเนิดแสงทดสอบ  $k$  และตัวอย่างสีทดสอบเดียวกันที่ได้รับแสงจากชุดแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง  $r$  สามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.46)

$$\Delta E_i = \left\{ \sqrt{(U^*_{r,i} - U^*_{k,i})^2 + (V^*_{r,i} - V^*_{k,i})^2 + (W^*_{r,i} - W^*_{k,i})^2} \right\} \quad (2.46)$$

ขั้นตอนที่ 7 ดัชนีความถูกต้องสีของแสงเฉพาะสี  $R_i (i=1,2,3...15)$  ที่มีพื้นฐานจากค่า  $\Delta E_i$  ได้มาจากสมการที่ (2.46) จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าดัชนีความถูกต้องสีทดสอบสีใดสีหนึ่งเฉพาะสีที่ต้องการหาแสดงดังสมการที่ (2.47)

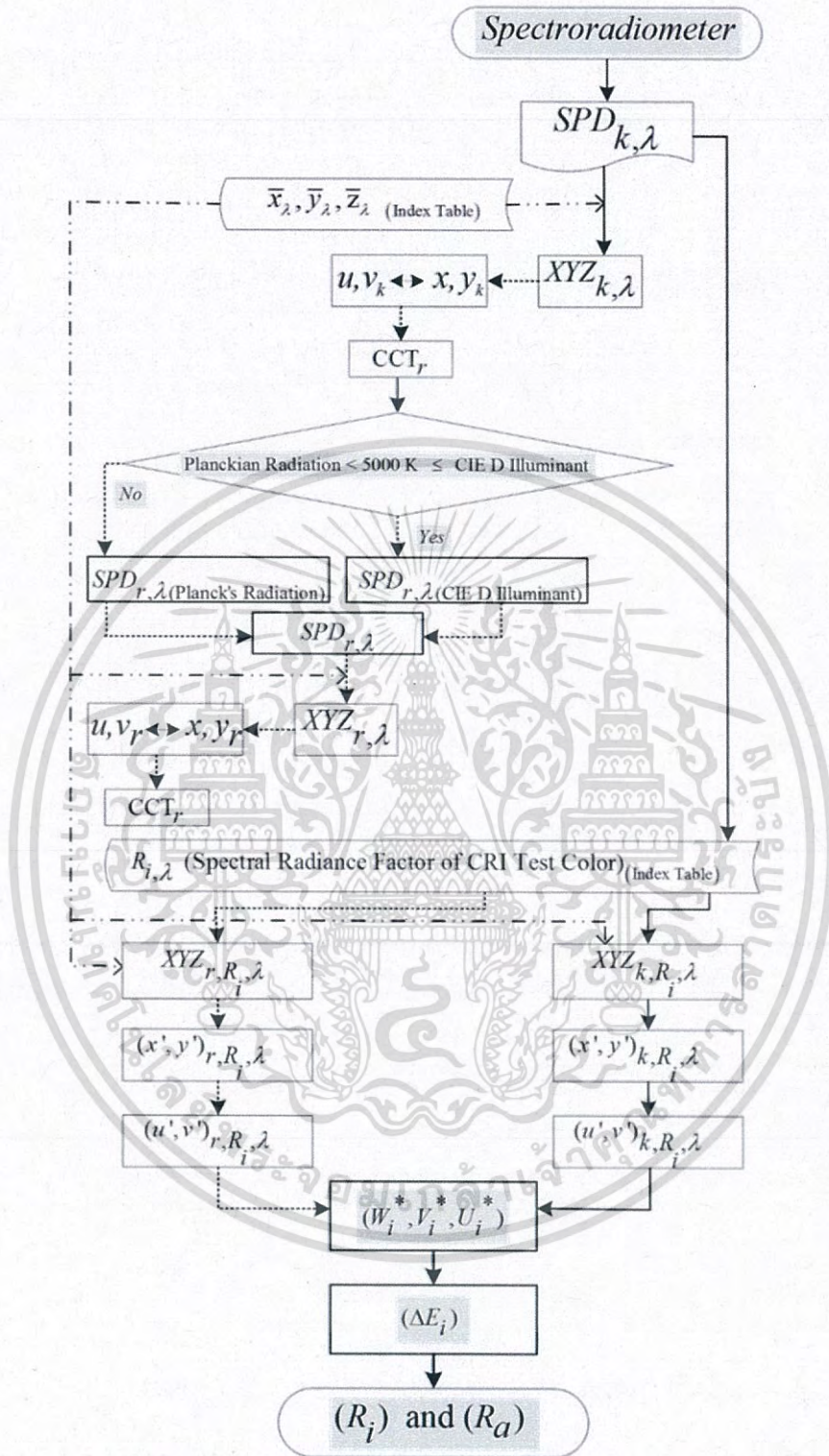
$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i \quad (2.47)$$

ขั้นตอนที่ 8 ดัชนีความถูกต้องสีของแสงทั่วไป  $R_a$  หาจากค่าเฉลี่ยเลขคณิตของดัชนีความถูกต้องสีของแสงเฉพาะสี  $R_i$  สำหรับ CIE 1974 พิจารณาเพียง 8 ค่าของสีตัวอย่างทดสอบที่ 1 ถึง 8 ดังสมการที่ (2.48)

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับขั้นตอนการคำนวณหาค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสงเฉพาะสี  $R_i (i=1,2,3...15)$  และดัชนีความถูกต้องสีของแสงทั่วไป  $R_a$  สามารถสรุปขั้นตอนการคำนวณ แสดงดังรูปที่ 2.34 อธิบายโดยเริ่มต้นจากการอ่านค่าข้อมูลค่าการกระจายกำลังในสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงทดสอบจากเครื่องวัดค่าการรับรังสีรวมของแหล่งกำเนิดแสง (Spectroradiometer) เพื่อนำไปคำนวณหาค่าไตรสติมูลัส  $X, Y, Z$  และอุณหภูมิสีของแสงแหล่งกำเนิดแสงทดสอบ จากนั้นนำค่าอุณหภูมิสีของแสงแหล่งกำเนิดแสงทดสอบไปเทียบเคียงตัดสินใจเลือกข้อมูลค่าการกระจายกำลังในสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดอ้างอิงเพื่อนำไปคำนวณค่าไตรสติมูลัส  $X, Y, Z$  และอุณหภูมิสีของแสงแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงที่ถูกต้องจริง และคำนวณหาค่า CIE-1976  $(u', v')$  ของแต่ละตัวอย่างเฉพาะสีทดสอบ ( $R_i$ ) ทั้งหมด 8 สี จากแหล่งกำเนิดแสงทดสอบและแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง จึงได้เป็นค่า CIE-1976  $(u'_{k,i}, v'_{k,i})$  ของแต่ละตัวอย่างสีทดสอบ  $i = 1$  ถึง 8 เมื่อได้ค่าดังกล่าวให้แปลงค่าโคออร์เนตปริภูมิสีกลสมำเสมอ CIE-1964  $(W^*_i, U^*_i, V^*_i)$  ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทดสอบและแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าผลลัพธ์การเลื่อนตำแหน่งสี  $\Delta E_i$  เพื่อให้ค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสงเฉพาะสี  $R_i (i=1,2,3...8)$  และดัชนีความถูกต้องสีของแสงทั่วไป  $R_a$  สำหรับกรณีค่าที่คำนวณออกมาได้ให้ปิดเศษค่าที่อ่านได้เป็นจำนวนเต็มทีใกล้ที่สุด และกรณีทศนิยมตำแหน่งที่หนึ่งเป็นเลข 5 และตำแหน่งที่สองเป็นเลข 0 ควรปิดเศษเป็นจำนวนเต็มถัดไป



รูปที่ 2.32 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสง

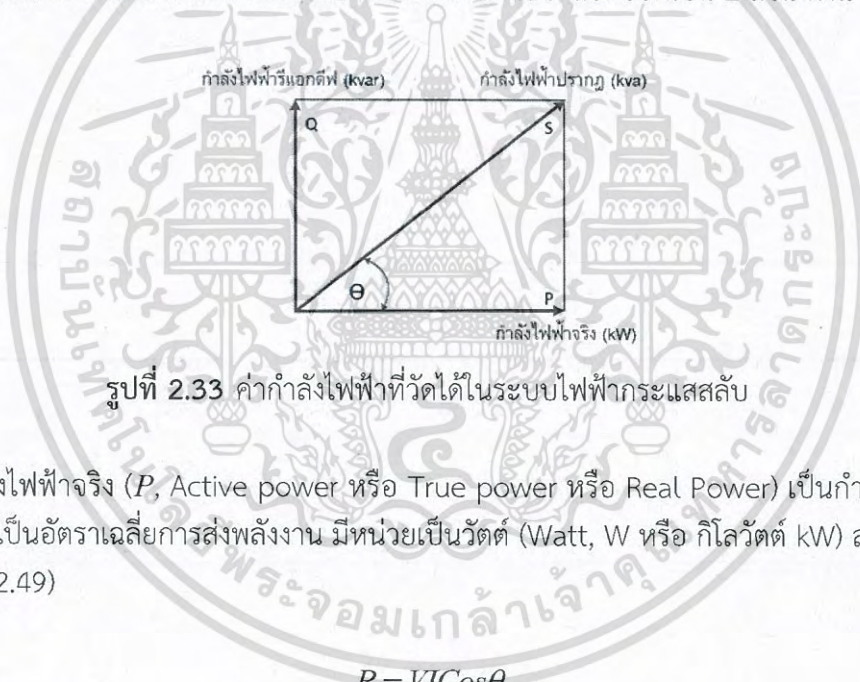
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.5 สมรรถนะทางไฟฟ้า (Electrical Performances)

### 2.4.5.1 ปริมาณของระบบไฟฟ้า

โดยทั่วไปประกอบด้วยปริมาณต่างๆ เช่น ตัวประกอบกำลัง (Power factor) และกำลังไฟฟ้า (Power) 3 ประเภท ที่นำมาพิจารณาค่าคุณภาพไฟฟ้าประเภทฮาร์มอนิกส์ ถูกนิยามขึ้น ภายใต้สภาวะที่ระบบไม่มีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดัน หรือเป็นระบบที่มีแรงดันเป็นรูปคลื่นไซน์อย่างแท้จริง และในสภาวะที่ระบบเกิดการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นเกิดองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ การคำนวณตามนิยามในสภาวะปกติไม่สามารถใช้ได้ [37]

ตัวประกอบกำลัง [38] มีความสำคัญสำหรับระบบไฟฟ้า เนื่องจากเป็นค่าที่ทำให้ค่าใช้จ่ายต่างๆ เพิ่มขึ้น หรือลดลงได้ แสดงดังรูปที่ 2.35 ระบบไฟฟ้าที่มีค่าตัวประกอบกำลังต่ำจะสูญเสียในระบบมาก อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ต้องมีขนาดใหญ่มากขึ้น ค่าใช้จ่ายสำหรับการซื้ออุปกรณ์ต่างๆ ตั้งแต่ต้นทางจนถึงปลายทางต้องชำระมากขึ้นค่าไฟฟ้าที่เสียจะมากขึ้นตาม ดังนั้นการแก้ตัวประกอบกำลังให้มีค่าสูงส่งผลดีต่อระบบไฟฟ้า หมายถึงคุณภาพทางไฟฟ้าที่เกิดจากความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น จะไม่เกิดฮาร์มอนิกส์ สำหรับในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสามารถวัดแยกออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้



รูปที่ 2.33 ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ

กำลังไฟฟ้าจริง ( $P$ , Active power หรือ True power หรือ Real Power) เป็นกำลังไฟฟ้าที่ใช้ทำงานจริง หรือเป็นอัตราเฉลี่ยการส่งพลังงาน มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt, W หรือ กิโลวัตต์ kW) สามารถหาค่าดังสมการที่ (2.49)

$$P = VI \cos \theta \quad (2.49)$$

กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ( $Q$ , Reactive power) เป็นกำลังไฟฟ้าที่ต้องการสำหรับสร้างสนามแม่เหล็ก หรือเป็นส่วนหนึ่งของกำลังไฟฟ้าปรากฏ ที่มีเฟสตั้งฉากกับค่ากำลังงานจริง มีหน่วยเป็น วาร์ (Var หรือ กิโลวาร์ kvar) สามารถหาค่าดังสมการที่ (2.50)

$$Q = VI \sin \theta \quad (2.50)$$

กำลังไฟฟ้าทั้ง 2 ส่วน จากข้างต้น สามารถนำมารวมเข้าด้วยกันทางเฟสเซอร์ (Phasor) เป็นกำลังไฟฟ้าปรากฏ ( $S$ , Apparent power) หรือเป็นผลคูณระหว่างแรงดันและกระแสอาร์เอ็มเอส มีหน่วยเป็นโวลต์แอมป์ (VA หรือ เควีเอ kva) สามารถหาค่าดังสมการที่ (2.51)

$$S = VI \quad (2.51)$$

จากประเภทของกำลังไฟฟ้า ทั้ง 3 ประเภท สามารถหาค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor,  $PF$ ) [39] ได้จากอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังงานจริง และค่ากำลังงานปรากฏ แสดงดังสมการที่ 2.52 ในหน่วยของ ค่าเปอร์เซ็นต์ (%) การใช้พลังงาน มีค่าระหว่าง 0-1 ในสภาวะที่เกิดความผิดเพี้ยน ค่าตัวประกอบกำลังเกิดจากค่าในส่วนของความถี่มูลฐาน และค่าฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่าง กำลังงานจริงที่เกิดขึ้นในทุกความถี่และค่ากำลังงานปรากฏที่จ่ายออกมาจากการไฟฟ้า

$$PF = \frac{P}{S} = \cos\theta \quad (2.52)$$

#### 2.4.5.2 คุณภาพทางไฟฟ้า

ปัจจุบันมีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้าประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง ทั้งในโรงงานอุตสาหกรรม ระบบควบคุมการจ่ายไฟ และในระบบแสงสว่าง อุปกรณ์เหล่านี้มีลักษณะของภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นแบบเชิงเส้น (Nonlinear Load) แต่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเหล่านี้มีความไวต่อการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) แรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) การเกิดทรานเซียนต์ (Transient) และความผิดเพี้ยนเนื่องจากฮาร์โมนิก (Harmonic Distortion) เป็นต้น การรักษาสภาวะการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไม่ให้เกิดเหตุปัจจัยที่กล่าวมา ต้องรักษาระดับแรงดันในรูปของสัญญาณไซน์ที่ป้อนให้คงที่มากที่สุด เรียกว่าเป็นวิธีการควบคุมคุณภาพทางไฟฟ้า

ความหมายของคุณภาพทางไฟฟ้า [39] เป็นวิธีการรักษาความเสถียรภาพ หรือความมั่นคงทางการจ่ายไฟฟ้าของระบบจากการไฟฟ้า ของสัญญาณกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal) ที่ได้กำหนดความถี่ 50 หรือ 60 เฮิร์ตซ์) ต้องมีความต่อเนื่อง โดยค่าจัดความของ IEC และ IEEE ได้ให้ความหมายเป็นคุณลักษณะของสัญญาณ แรงดัน และความถี่ของแหล่งจ่ายไฟในสภาวะปกติที่ไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ในสภาวะปกติมีการทำงานผิดพลาด หยุดการทำงาน หรือได้รับความเสียหาย

สาเหตุของการพิจารณาคุณภาพทางไฟฟ้า [38], [39] ที่ทำให้ต้องมีการพิจารณาคุณภาพกำลังไฟฟ้า ให้เกิดความเสถียรภาพตามที่กล่าวมา หากเกิดความผิดปกติของระบบการจ่ายไฟฟ้าจะส่งผลให้เกิดเหตุหลายประการดังนี้

- 1) เกิดจากการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ได้แก่ ไมโครโปรเซสเซอร์ และรีเลย์บางชนิด โดยเฉพาะโครงสร้างทำจากซิลิคอน เข้ามาประยุกต์ในกระบวนการผลิตอุปกรณ์ควบคุมการทำงานต่าง ๆ ภายในโรงงานอุตสาหกรรม อุปกรณ์ดังกล่าวมีความไวต่อการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ผลของรบกวนการทำงานเนื่องมาจากฮาโมนิกส์ เกิดจากการนำอุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ

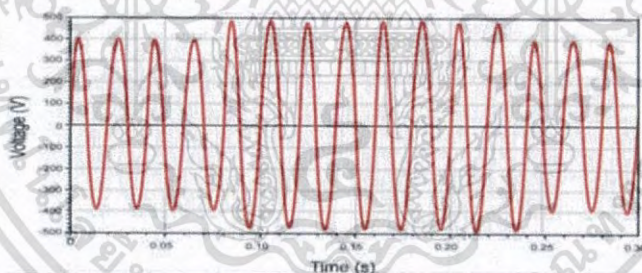
3) เกิดจากผู้บริโภคหรือผู้ใช้ไฟไม่มีความรู้ และความเข้าใจเกี่ยวกับความสำคัญของปัญหา คุณภาพกำลังไฟฟ้ามากขึ้นกว่าอดีต ทำให้ทราบผลกระทบที่เกิดกับกระบวนการผลิต ทำให้ความต้องการพัฒนาหรือปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าดีขึ้น

4) ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาโมนิกส์ เมื่อกระแสฮาโมนิกส์ ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของระบบ ทำให้รูปคลื่นแรงดันเกิดความผิดเพี้ยน ลักษณะความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้านี้ส่งผลถึงผู้ใช้ไฟฟ้าระบบอื่นด้วย

5) มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ มีผลกับผู้ผลิตไฟฟ้า ผู้ใช้ไฟฟ้า และผู้ผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยผ่านกระบวนการผลิตที่มีการใช้เครื่องจักรกลอัตโนมัติ ซึ่งอุปกรณ์ส่วนใหญ่ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวต่อคุณภาพไฟฟ้าส่งผลให้กระบวนการผลิตหยุดทำงาน

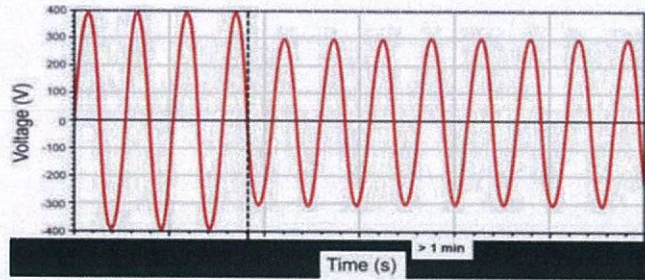
ความผิดปกติของคุณภาพทางไฟฟ้า ตาม IEEE Standards Coordinating Committee 22 ได้สรุปลักษณะความผิดปกติหรือผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณ ที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานอุปกรณ์ทางไฟฟ้าสามารถพอสรุปได้ดังต่อไปนี้ [37]

1) แรงดันเกินชั่วขณะ (Swells voltage) เป็นสภาวะที่ค่าแรงดัน rms มีขนาดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1-1.8 pu. ในช่วงเวลาระหว่าง 10 msec. ถึง 1 min. สาเหตุเกิดขึ้นกับเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดพลาดทางไฟฟ้าโดยตรง ส่งผลกระทบทำให้อุปกรณ์เสียหายหรือทำให้อุปกรณ์ที่มีความไวต่อการตอบสนองมีการทำงานผิดพลาด หรือหยุดทำงานได้ แสดงดังรูปที่ 2.34 [40]



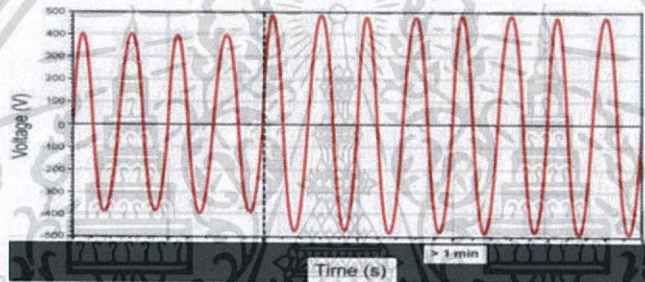
รูปที่ 2.34 แรงดันเกินชั่วขณะ (Swells voltage)

2) แรงดันตก (Under voltage) เป็นค่าแรงดัน rms ที่มีขนาดลดลงระหว่าง 0.8-0.9 pu ในช่วงระยะเวลาานานกว่า 1 นาที มีสาเหตุการต่อโหลดขนาดใหญ่เข้าระบบ หรือปลดคาปาซิเตอร์ จากระบบส่งผลกระทบทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหาย แสดงดังรูปที่ 2.35 [40]



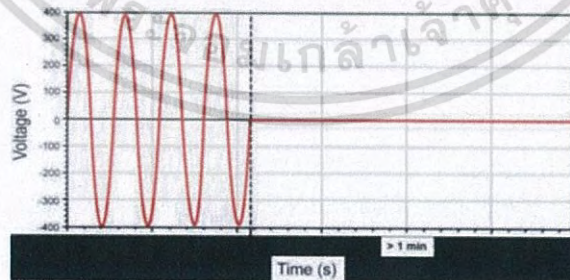
รูปที่ 2.35 แรงดันตก (Under voltage)

3) แรงดันเกิน (Over voltage) เป็นค่าแรงดัน rms ที่มีขนาดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1-1.2 pu ในช่วงเวลานานกว่า 1 นาที มีสาเหตุเกิดจากผลการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบ หรือมีการสวิตชิงคาปาซิเตอร์ เข้าสู่ระบบ ส่งผลกระทบบ้างทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายเนื่องจากแรงดันเกิน แสดงดังรูปที่ 2.36 [40]



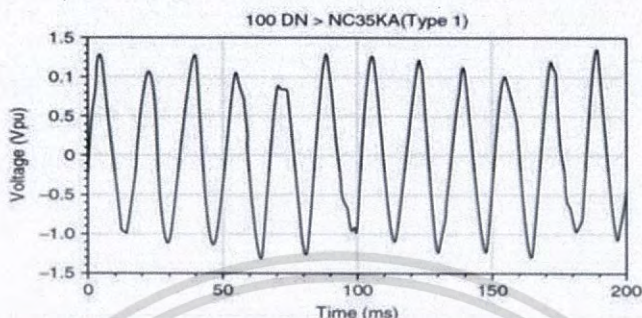
รูปที่ 2.36 แรงดันเกิน (Over voltage)

4) ไฟดับ (Long Interruptions) เป็นแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดลดลงจนเป็นศูนย์ภายในช่วงระยะเวลาเกินกว่า 1 นาที มีสาเหตุเกิดจากความผิดปกติในระบบไฟฟ้า ส่งผลกระทบบ้างอย่างมากต่อสายการผลิต ทำให้การผลิตหยุดชะงัก แสดงดังรูปที่ 2.37 [40]



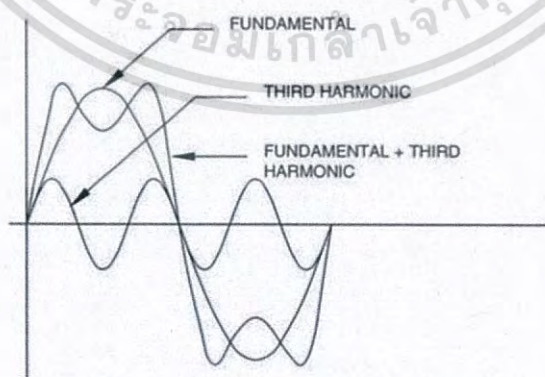
รูปที่ 2.37 ไฟฟ้าดับ (Long interruptions)

5) แรงดันกระเพื่อม (Voltage fluctuations) เป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของค่าแรงดัน (rms) มีขนาดไม่เกินช่วงแรงดัน 0.95-1.05 pu เกิดจากอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นแบบอาร์ค ส่งผลทำให้เกิดการกระพริบ (flicker) ของหลอดไฟ แสดงดังรูปที่ 2.38 [37]



รูปที่ 2.38 แรงดันกระเพื่อม (Voltage fluctuations)

6) ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics) [37] เป็นส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (sine wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆ มีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐานทั่วไปคือ 50 หรือ 60 เฮิร์ต (Fundamental Frequency) รูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนสามารถแยกออกเป็นผลรวมของความถี่มูลฐาน และความถี่ฮาร์โมนิกส์ โดยทั่วไปอุปกรณ์หรือโหลดแบบไม่เชิงเส้น หรืออุปกรณ์ที่มีส่วนประกอบของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ อุปกรณ์ประเภทอินเวอร์เตอร์ เครื่องจักรกลปรับความเร็ว เป็นต้น สาเหตุของการเกิดฮาร์โมนิกส์ ความรุนแรงของฮาร์โมนิกส์ อธิบายได้โดยใช้สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ประกอบด้วยขนาดและมุมของฮาร์โมนิกส์แต่ละค่าโดยที่นิยมนำมาใช้บอกระดับความรุนแรงของฮาร์โมนิกส์ ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวม (Percentage of Total Harmonics Distortion, *THD*) ในรูปของค่าแรงดัน และค่ากระแส การเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Distortion) มีสาเหตุจากอุปกรณ์ไม่เชิงเส้นในระบบ โดยอุปกรณ์ไม่เชิงเส้นมีค่ากระแสไม่เป็นสัดส่วนกับแรงดัน แสดงดังรูปที่ 2.39 [37] เมื่อแรงดันอินพุตมีระดับเพิ่มเพียงเล็กน้อยกระแสจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นและมีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนตามลักษณะของตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2.39 ลักษณะรูปคลื่นของฮาร์โมนิกส์

จากความผิดปกติของคุณภาพทางไฟฟ้าที่ทำให้เกิดความผิดปกติของรูปคลื่นสัญญาณตามที่กล่าวมาพอสังเขปข้างต้น ส่งผลให้การทำงานของอุปกรณ์ทางไฟฟ้า เกิดความเสียหาย ดังนั้นการหาแนวทางการแก้ไขจากความผิดปกติดังกล่าวสามารถพอสรุปได้ ดังตารางที่ 2.8 แนวทางดังกล่าวสามารถกำจัดหรือ บรรเทาผลของความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ แต่ราคาของเครื่องมือเหล่านี้มีราคาค่อนข้างสูง ทำให้เกิดต้นทุนการผลิตสูง ดังนั้นต้องมีความระมัดระวัง สำหรับการวางระบบไฟฟ้าตั้งแต่เริ่มต้นสำหรับกระบวนการผลิตเพื่อเลี่ยงปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

ตารางที่ 2.8 ปัญหาทางคุณภาพทางไฟฟ้ากับแนวทางการแก้ไข [39]

Mitigation Devices	แรงดันเกินชั่วขณะ	แรงดันตก	แรงดันเกิน	ไฟดับ	ฮาร์โมนิกส์	แรงดันกระเพื่อม
BESS	✓	✓	✓	✓		✓
DVR	✓				✓	✓
SMES	✓	✓	✓	✓		✓
APF(TF)					✓	

เนื่องจากปัจจุบันปัญหาคุณภาพไฟฟ้าประเภทฮาร์โมนิกส์ ได้รับความสนใจและนำมาพิจารณา ร่วมกับระบบไฟฟ้ามากขึ้น ส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดัน และกระแสของอุปกรณ์ที่เป็นลักษณะแหล่งจ่ายฮาร์โมนิกส์ โดยทั่วไประบบไฟฟ้ามีการแก้ไขระดับของฮาร์โมนิกส์ไว้ตามมาตรฐาน ซึ่งถ้าระดับฮาร์โมนิกส์อยู่ในระดับมาตรฐานที่กำหนดจะไม่ส่งผลกระทบใด ๆ ต่ออุปกรณ์ที่ทำงาน สำหรับการศึกษางานวิจัยนี้ ได้ศึกษาคุณภาพทางไฟฟ้าของคอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้ในการจัดแสงภายในและภายนอกสตูดิโอ ในการผลิตรายการโทรทัศน์ ทางผู้ศึกษาได้นำมาตรฐาน IEEE-1159.1-2009 (Recorder and data Acquisition Requirements for Characterization of Power Quality Events) มาพิจารณา เน้นศึกษาการควบคุมมาตรฐานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ประเภทบาลาสต์ที่ใช้ร่วมกับคอมพิวเตอร์ การศึกษาค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแส (Total Harmonics Distortion voltage and current, %  $THD_v$ , %  $THD_i$ ) หรือสามารถอธิบายได้ว่า เป็นอัตราส่วนของค่ารากกำลังสองเฉลี่ยองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ทุก ๆ ตัวกับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยขององค์ประกอบมูลฐาน สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 2.53

$$\%THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n V_i^2}}{V_1} \times 100, \quad \%THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_i^2}}{I_1} \times 100, \quad i = 2, 3, 4, \dots, n \quad (2.53)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

แนวการเปลี่ยนโคมไฟจากหลอดเอชเอ็มไอ ทดแทน หลอดแอลอีดีกำลังสูง สำหรับการจัดแสงทั้งภายในและภายนอกสตูดิโอ ต้องพิจารณาค่าคุณสมบัติสีของแสง ดัชนีความถูกต้องสีของแสง ค่าความส่องสว่าง ค่าการกระจายแสงของโคมไฟ และค่ากำลังไฟฟ้า เป็นต้น ทั้งนี้ต้องพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ร่วมกันด้วย ที่ผ่านมาพบว่าแนวทางการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับกระบวนการถ่ายทำสื่อทางด้านโทรทัศน์ ถูกนำไปใช้กับการจัดแสงให้กับ นักแสดง และ ฉาก โดยใช้จำนวนโคมไฟมากกว่า 1 โคมไฟ สำหรับการจัดแสง และใช้ระยะเวลาสำหรับการถ่ายทำมากกว่า 6-8 ชั่วโมง ส่งผลให้เกิดแนวทางสำหรับการประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้าสำหรับการจัดแสง โดยมีการลงทุนในการเปลี่ยนโคมไฟจากหลอดเอชเอ็มไอ มาเป็น หลอดแอลอีดีกำลังสูง มากขึ้น สำหรับสตูดิโอในประเทศไทยได้มีการศึกษาความคุ้มค่าสำหรับการประหยัดพลังงานไฟฟ้าโดยใช้แนวทางการเปลี่ยนโคมไฟ พิจารณาได้จากข้อมูลแสดงค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 กรณีศึกษาการใช้พลังงานไฟฟ้าในสตูดิโอประเทศไทย

	Studio	MCOT	CH 7	TPBS
Detail Studio	Dimension (m) W×L×H	15×35×6	20×30×10	20×20×8
	TV Program	News	News	Variety
	Total installed Real Power (W)	3000	2000	1200
HMI	Operate hr/(day)	7	6	6
HP-LED	Total installed Real Power (W)	1500	600	500
	Operate hr/(day)	8	8	6

### 2.5.1 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ค่าทางเศรษฐศาสตร์

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความคุ้มค่าของการลงทุนการเปลี่ยนโคมไฟจากหลอดเอชเอ็มไอ มาเป็น หลอดแอลอีดีกำลังสูง ที่นำมาใช้สำหรับการจัดแสงภายในและภายนอกสตูดิโอต้องวิเคราะห์ความคุ้มค่าสำหรับการลงทุนการเปลี่ยนโคมไฟโดยใช้เครื่องมือดังต่อไปนี้

#### 2.5.1.1 ช่วงเวลาคืนทุน (Payback Period; *PBP*)

เป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมเงินที่นำมาลงทุนจะสามารถได้เงินคืนเท่ากับที่ลงทุนในช่วงเวลาที่เดือนหรือ กี่ปี ของระยะเวลาที่ดำเนินโครงการ โดยทั่วไปช่วงเวลาที่เหมาะสมคือ ต้องไม่นานกว่าอายุการใช้งานของโครงการสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.54 [41]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 PBP &= \frac{\text{Required Investment}}{(\text{Annual Receipts} - \text{Annual Disbursements})} \\
 &= \frac{\text{First Cost}}{\text{Net Annual Cost Saving}}
 \end{aligned}
 \tag{2.54}$$

### 2.5.1.2 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV)

ผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลการประหยัดต้นทุน พลังงาน ในรูปของตัวเงินที่คาดว่าจะได้รับในแต่ละปี ตลอดอายุโครงการ กับมูลค่าปัจจุบันของเงินที่จ่ายออกไป ณ อัตราลดค่า (Discount rate) โดยค่าที่ได้ ควรมี มูลค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ หมายถึงคุ้มค่าต่อการลงทุน สามารถคำนวณค่าได้ดังสมการที่ 2.55 [42]

$$NPV = \left[ \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} + C_0 \right]
 \tag{2.55}$$

### 2.5.1.3 อัตราผลตอบแทนจากเงินลงทุน (Internal Rate of Return; IRR)

อัตราลดค่าที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดที่คาดว่าจะต้องจ่ายในการลงทุนเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดที่คาดว่าจะได้รับจากตลอดอายุโครงการ และอัตราค่าที่เหมาะสมต่อการลงทุนคือ มากกว่าอัตราดอกเบี้ยเงินฝาก ค่าคำนวณค่าได้ดังสมการที่ 2.56 [43]

$$IRR = \sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} - \left[ \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} + C_0 \right]
 \tag{2.56}$$

### 2.5.1.4 อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน (Benefit Cost Ratio, B/C)

เป็นอัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่างมูลค่าปัจจุบันของกระแสผลตอบแทนกับมูลค่าปัจจุบันของกระแสต้นทุนตลอดอายุโครงการภายใต้อัตราคิดลด ค่าเหมาะสมต่อการลงทุนโดยอัตราค่าที่ได้ควรมากกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง สามารถคำนวณค่าได้ดังสมการที่ 2.57 [43-44]

$$B / C = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} + C_0}
 \tag{2.57}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.55-2.57 เมื่อ	$B_t$	คือ ผลประโยชน์ทั้งหมดของปีที่ $t$
	$C_t$	คือ กระแสเงินสดทั้งหมดของปีที่ $t$
	$C_0$	คือ กระแสเงินสดทั้งหมดของปีแรก
	$t$	คือ ช่วงเวลาที่กำหนด (วัน, เดือน, ปี)
	$i$	คือ อัตราดอกเบี้ยต่อช่วงเวลา (วัน, เดือน, ปี) ( $r = IRR$ )

## 2.5.2 การใช้พลังงานสำหรับการจัดแสง (Lighting Energy Consumption)

ค่าจำนวนการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับการจัดแสงภายในสตูดิโอสามารถนำมาใช้ในการคำนวณค่าต่าง ๆ ทางเศรษฐศาสตร์ ตามที่ได้กล่าวมา ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายประการ [45] ดังต่อไปนี้

### 2.5.2.1 พลังงานสำหรับการจัดแสง (Lighting Energy)

เป็นค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทโคมไฟ และช่วงเวลาการใช้กำลังไฟฟ้าจากโคมไฟ มีหน่วยการวัดเป็น วัตต์-ชั่วโมง ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับพิจารณาต้นทุนค่าไฟฟ้าดำเนินการ ดังสมการที่ (2.58) [46]

$$\text{Lighting Energy} = \text{truepower} \times \text{time} \quad (2.58)$$

### 2.5.2.2 ค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าสำหรับการจัดแสง (Lighting Energy Cost; $LEC$ )

เป็นค่าใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าจริงจากอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทโคมไฟ กับช่วงเวลาการใช้กำลังไฟฟ้าจากโคมไฟหน่วยชั่วโมงต่อปี และคิดเป็นค่าใช้จ่ายต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง รายละเอียดปรากฏบนใบเสร็จค่าไฟฟ้าประจำเดือน มีหน่วยการวัดเป็น บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง แสดงดังสมการที่ (2.59) [47]

$$\begin{aligned} LEC &= \frac{\text{True Power} \times \text{Operating hrs. per year} \times \text{Cost per kWh}}{1000} \\ &= \text{kwh} \times \text{Operating hrs. per year} \times \text{Electricity Tariff rate} \end{aligned} \quad (2.59)$$

## 2.5.3 สมมติฐานการคำนวณ (Hypothesis Methodology Terms)

การคำนวณค่าต่าง ๆ ทางเศรษฐศาสตร์ที่ได้กล่าวมา ต้องมีการกำหนดค่าที่เหมาะสมของตัวแปรบางประเภทเพื่อให้สามารถคำนวณได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมดังต่อไปนี้

### 2.5.3.1 ค่าต้นทุนเริ่มต้นของโคมไฟ (Initial Cost of one Luminaire)

[48] เป็นมูลค่าของโคมไฟหรือส่วนประกอบรวมที่ปรากฏออกมาเป็นราคากลาง รวม ค่าขนส่ง ค่านำเข้า ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม เป็นต้น ออกโดยบริษัทผู้จำหน่าย

### 2.5.3.2 ค่าต้นทุนของหลอดไฟ (Cost of one Lamp)

เป็นมูลค่าของหลอดไฟที่ปรากฏออกมาเป็นราคากลาง รวม ค่าขนส่ง ค่านำเข้า ค่าภาษี เป็นต้น ออกโดยบริษัทผู้จำหน่าย แต่ ค่าความสว่างและอายุการใช้งานของหลอด อาจจะถูกนำมาพิจารณาเป็น ต้นทุนมูลค่าของหลอดไฟด้วยขึ้นอยู่กับการตลาดของบริษัทผู้จำหน่าย [46]

### 2.5.3.3 อายุการใช้งานของหลอดไฟ (Lamp Life)

บริษัทผู้ผลิตของหลอดไฟจะให้ข้อมูลของหลอดไฟต่างๆ เช่น อายุการใช้งานเฉลี่ยของหลอดไฟ โครงสร้างภายในหลอดไฟ วัสดุของหลอดไฟ ลักษณะขั้วหลอดไฟ เป็นต้น [43]

### 2.5.3.4 ระยะเวลาของโครงการลงทุน (Time Project)

เป็นระยะเวลาที่นำมาพิจารณาสำหรับการหาค่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV) เพราะโครงการลงทุนใดที่ใช้ระยะเวลานานจะมีผลกระทบกับค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่เพิ่มขึ้น โดยทั่วไป ระยะเวลาลงทุนที่เหมาะสมสำหรับโครงการประเภทวัสดุอุปกรณ์เครื่องจักรอยู่ที่ 10-15 ปี และหากเป็น ประเภท ที่ดิน ก่อสร้าง อยู่ที่ระยะเวลา 30-40 ปี [49]

### 2.5.3.5 ชั่วโมงการทำงานต่อปี (Operating Hours per Year, operating.hr/yr.)

เป็นค่าที่นำมาใช้ในการคำนวณโดยนำมาจากข้อมูลจริงของการทำงานที่เกิดจากการเก็บข้อมูล จากการบำรุงรักษา เป็นส่วนใหญ่ ยกตัวอย่างเช่น ชั่วโมงการทำงานพิจารณาที่ 24 ชั่วโมงต่อวัน และ 365 วันต่อปี ดังนั้นจึงได้จำนวนชั่วโมงทั้งสิ้น 8760 ชั่วโมงต่อปี แสดงดังสมการที่ 2.60 [46]

$$\text{oper.hr / yr} = \frac{\text{wk}}{\text{yr}} \times \frac{\text{days}}{\text{wk}} \times \frac{\text{hr}}{\text{day}} = \frac{\text{hr}}{\text{yr}} \quad (2.60)$$

### 2.5.3.6 อัตราค่าไฟฟ้า (Electricity Tariff Rate)

เป็นอัตราค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่พิจารณาจากพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของผู้บริโภคคิดเป็นอัตรา บาทต่อหน่วยการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยการไฟฟ้าจะพิจารณาอัตราค่าไฟฟ้าที่ปรับเปลี่ยนตามค่าการลงทุน ในปัจจุบัน

### 2.5.3.7 อัตราดอกเบี้ย (Internal Rate)

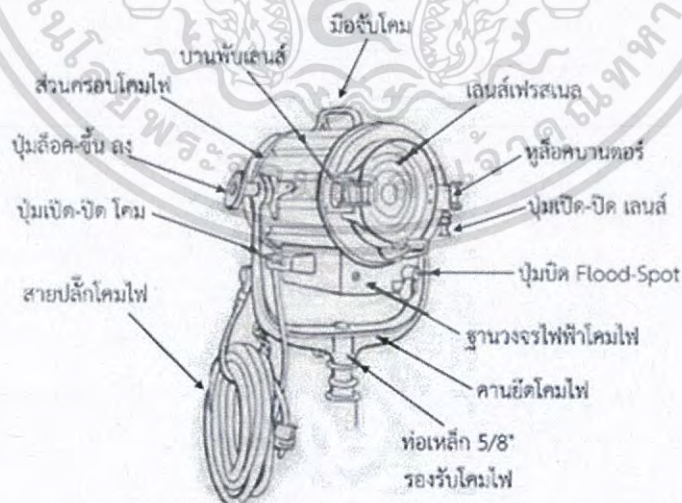
เป็นอัตราดอกเบี้ยที่เกิดจากการลงทุน หรือการคิดผลกำไร ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาของ โครงการ โดยทั่วไปการลงทุนโครงการจะมีการพิจารณากู้เงินลงทุนจากแหล่งเงินทุนต่างๆ ที่ปล่อยอัตรา เงินกู้พร้อมดอกเบี้ยตามสภาพทางเศรษฐกิจของ ปีที่ลงทุนโครงการ

## 2.6 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับงานวิจัย

สำหรับในงานวิจัยนี้พิจารณาโคมไฟสำหรับการจัดแสงภายในและภายนอกที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงหลอดเอชเอ็มไอ และหลอดแอลอีดีกำลังสูง เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแสง และทางไฟฟ้า ภายใต้มาตรฐาน LM-79-08 จะต้องใช้อาศัยอุปกรณ์และเครื่องดังต่อไปนี้

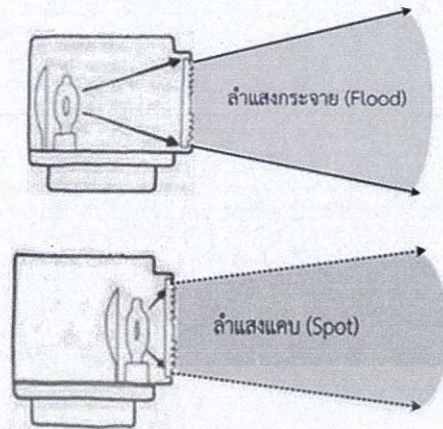
### 2.6.1 โคมไฟสำหรับการจัดแสง (Lamp Housing or Luminaire)

การจัดแสงโดยอาศัยความสว่างจากแสงประดิษฐ์หลอดไฟประเภทต่างๆ ต้องมีการควบคุมทิศทางแสง เพื่อให้ได้คุณภาพแสงสว่างมาก ลำแสงแคบ และมีลักษณะแสงแข็งกระด้างหรืออ่อนนุ่ม กำหนดทิศทางได้ดี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะรูปแบบของโคมไฟ สำหรับโคมไฟประเภทสปอต (Spot Light) เป็นโคมไฟที่ออกแบบมาเพื่อติดตั้งหลอดไฟรูปทรงที่หลากหลาย และขนาดกำลังวัตต์แตกต่างกันไป ให้ลักษณะควบคุมทิศทางแสง และคุณภาพแสงตามหลักการจัดแสงที่กล่าวมา นอกจากนี้ลักษณะของเลนส์เป็นส่วนประกอบสำคัญของโคมไฟทำหน้าที่ควบคุมทิศทาง และคุณภาพของแสง สำหรับโคมไฟประเภทสปอต ใช้เลนส์ เฟรสเนลเลนส์ (Fresnel Lens) [50] ลักษณะเลนส์ประเภทนี้ จะอยู่หน้ากระจกของโคมไฟ จะมีลักษณะเป็นรอยหยัก ช่วยให้เกิดการเกลี่ยลำแสงที่สะท้อนของแสงออกจากตัวหลอดไฟ และออกจากแผ่นสะท้อนแสง ส่งผลให้แสงเกิดความสม่ำเสมอทั้งวงแสง ตำแหน่งของเลนส์สวมอยู่หน้าดวงโคมไฟ และอยู่ส่วนหลังของหลอดไฟ ภายในโคมไฟประกอบด้วยตัวสะท้อนแสง ระยะทางระหว่างหลอดไฟกับเลนส์สามารถปรับระยะทางได้ โครงสร้างของโคมไฟประเภทนี้แสดงดังรูปที่ 2.40 [16] และลำแสงสามารถปรับให้กว้างขึ้น หากปรับให้ลำแสงกระจายออก จะหมุนปุ่มบิด ให้อยู่ในตำแหน่งที่เรียกว่า “Flood” และหากปรับให้ลำแสงรวมหรือบีบแคบลง จะหมุนปุ่มบิด ให้อยู่ในตำแหน่ง “Spot” ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้จัดแสง แสดงดังรูปที่ 2.41 โคมไฟประเภทนี้บางครั้งเรียกว่า เฟรสเนลสปอต (Fresnel Spot) มีขนาดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 100 วัตต์ ไปจนถึง 25 กิโลวัตต์



รูปที่ 2.40 โครงสร้างโคมไฟประเภทสปอต เฟรสเนลเลนส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.41 ลักษณะการกระจายแสงของโคมไฟประเภทสปอต เฟรสนลเลนส์

#### 2.6.1.1 โคมไฟ เอชเอ็มไอ เฟรสนล (Hydrargyrum Medium Arc Iodide (HMI) Fresnel)

เป็นโคมไฟที่หลอดไฟที่ให้แสงสีขาวเหมือนกลางวัน (Day light) ค่าอุณหภูมิสีของแสง ประมาณ 6000K โคมไฟมีขนาดกำลังไฟฟ้า ตั้งแต่ 200 วัตต์ ถึง 12 กิโลวัตต์ โคมไฟประเภทนี้มีเลนส์เฟรสนลครอบอยู่หน้าโคมไฟ และต้องใช้ร่วมกับบัลลาสต์ (Ballast unit) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปสู่หลอดไฟ โดยจะหน่วงกระแสไฟฟ้าในเวลาที่จะจุดหลอด และเมื่อหลอดจุดติดแล้วบัลลาสต์ จะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ให้คงที่หรือมีความสม่ำเสมออย่างต่อเนื่อง โคมไฟประเภทนี้เหมาะสำหรับจัดแสงภายในและภายนอกสตูดิโอ แทนแสงกลางวันและกลางคืน แสดงดังรูปที่ 2.42 [15]



รูปที่ 2.42 ส่วนประกอบที่สำคัญของโคมไฟ เอชเอ็มไอ เฟรสนล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.1.2 โคมไฟ หลอดแอลอีดีกำลังสูง (High Power Light Emitting Diode (HP-LED) Fresnel)

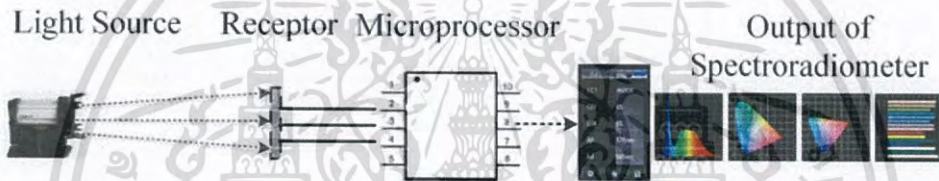
เป็นโคมไฟที่ทำจากสารกึ่งตัวนำประเภทไดโอดที่เปล่งแสงเรียกว่าหลอดแอลอีดีกำลังสูง ให้แสงสีขาวเหมือนกลางวัน (Day light) ค่าอุณหภูมิสีของแสง ประมาณ 5600K โคมไฟมีขนาดกำลังไฟฟ้า ตั้งแต่ 50 วัตต์ ถึง 200 วัตต์ โคมไฟประเภทนี้ใช้เลนส์เฟรเนล ครอบอยู่หน้าโคมไฟ และจะต้องใช้ร่วมกับส่วนของวงจรแปลงไฟ (Inverter unit) โดยทั่วไปนำมาทดแทนการติดตั้งของโคมไฟที่ใช้หลอดไฟประเภท ทังสแตน-ฮาโรเจน ฟลูออเรสเซนต์ และเอชเอ็มไอ เนื่องจากประหยัดค่าไฟฟ้า และทดแทนสมรรถนะทางแสงได้เช่นเดียวกับหลอดไฟดังกล่าว ดังรูปที่ 2.43 [11]



รูปที่ 2.43 ส่วนประกอบที่สำคัญของโคมไฟ หลอดแอลอีดีกำลังสูง

## 2.6.2 เครื่องวัดค่าความรับรังสีรวมของแหล่งกำเนิดแสง (Spectroradiometer)

เป็นเครื่องมือวัดเชิงแสงที่ใช้สำหรับการตรวจวัดคุณสมบัติเฉพาะของแสงที่ความยาวคลื่นของการกระจายกำลังการแผ่รังสีในสเปกตรัม (Spectral power distributions) ที่ประสาทตาของมนุษย์รับ และสามารถมองเห็นแยกแยะสีได้ด้วยตา เครื่องมือประเภทนี้สามารถวัดระบบสีของแสงออกมาเป็นตัวเลขได้ มีอยู่หลายระบบด้วยกัน คือ ระบบ Tristimulus Value ระบบ CIE Chromaticity Coordinate ค่าอุณหภูมิสีของแสง และค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสง การวัดค่าสีของแสงจากเครื่องวัดต้องอาศัยการทำงาน 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดแสง (Light Source) วัดรับแสง (Receptor) และระบบประมวลการอ่านค่าสีของแสง (Microprocessor) ดังรูปที่ 2.44 เนื่องจากการมองเห็นสีของมนุษย์พบว่าแต่ละคนอาจจะอ่านค่าสีแตกต่างกัน สำหรับเครื่องวัดประเภทนี้ให้ค่าที่ได้จากการวัดสีของแหล่งกำเนิดแสง เป็นไปตามทางภาคอุตสาหกรรมตามมาตรฐานสากลของอุตสาหกรรม รวมทั้งยังสามารถที่จะวัดค่าความแตกต่างสีแสงที่มีเจดสีแหล่งกำเนิดแสงต่างออกไปเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้ สามารถกำหนดค่าความแตกต่างสีของแสงได้อย่างถูกต้อง



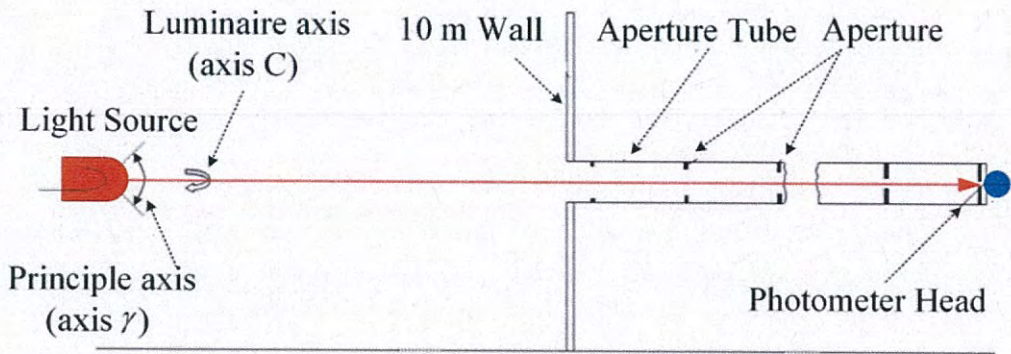
รูปที่ 2.44 โครงสร้างการทำงานของเครื่องวัดค่าความรับรังสีรวม

## 2.6.3 เครื่องวัดค่าการกระจายความเข้มส่องสว่างโคโมไฟ (Gonio photometer)

การกระจายแสงของโคโมไฟจะเกิดความเข้มส่องสว่างมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับชนิดของแหล่งกำเนิดแสงที่เกี่ยวข้องกับรูปทรงของแหล่งกำเนิดแสงที่ส่งผลต่อองค์การกระจายของแสง และยังสัมพันธ์กับชุดควบคุมการกระจายของแสง ที่ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำ ดังนั้นจึงมีออกแบบอาศัยการวัดค่าการกระจายความเข้มแสงหลายรูปแบบ เมื่อทดสอบหาข้อมูลการกระจายความเข้มส่องสว่างของโคโมไฟ จะได้ข้อมูลบันทึกในรูปแบบไฟล์มาตรฐาน IES File เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประมวลภายใต้โปรแกรม Dialux ลักษณะของเครื่องวัดมีหลายรูปแบบดังนี้

### 2.6.3.1 อาศัยอุปกรณ์ช่วยในการหมุนแหล่งกำเนิดแสง

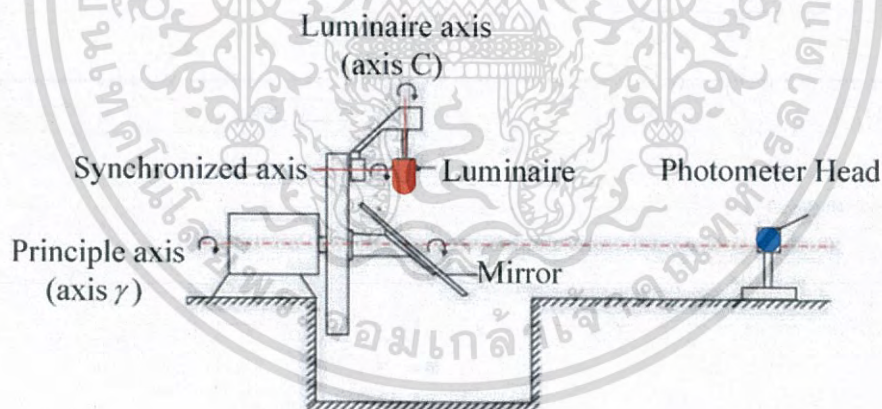
สามารถหมุนรอบแกนในแนวตั้ง (0 องศา ถึง 180 องศา) ทิศทางตามเข็มและทวนเข็ม และแนวระนาบ (0 องศา ถึง 360 องศา) โดยหัววัดค่าความสว่างจะอยู่กับที่ ความแม่นยำของการกระจายความเข้มแสงขึ้นอยู่กับกำหนัดทิศทาง และอุณหภูมิ แหล่งกำเนิดแสงที่เหมาะสมต่อการใช้ประเภทนี้ได้แก่ หลอดไฟทั้งสแตนด์-ฮาโรเจน และหลอดฟลูออโรเรสเซนต์ แสดงดังรูปที่ 2.45 [51-52]



รูปที่ 2.45 อาศัยอุปกรณ์ช่วยในการหมุนแหล่งกำเนิดแสง

### 2.6.3.2 อาศัยการหมุนของกระจก

แหล่งกำเนิดแสงจะหมุนรอบแกนในแนวตั้ง (0 องศา ถึง -180 องศา) และแนวระนาบ (0 องศา ถึง 360 องศา) และการหมุนของกระจกจะหมุนในแนวตั้ง (0 องศา ถึง 180 องศา) สามารถปรับระดับความเอียงของกระจก ให้ถึงสุดปลายห้องที่วัด การสะท้อนและหักเหของกระจก หัววัดความสว่างจะอยู่กับที่ เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงถูกหมุนรอบแกนแนวตั้ง ทำให้จุดศูนย์กลางของหลอดคงที่จึงสามารถวัดค่าการกระจายแสงของหลอดและโคมทุกชนิดได้ เช่น หลอดไฟทั้งสแตนด์-ฮาโรเจน และหลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดไฟเอชเอ็มไอ หรือหลอดไฟที่มีขนาดใหญ่ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัดค่าการกระจายความเข้มสองสว่างโคมไฟแบบอาศัยการหมุนของกระจก แสดงดังรูปที่ 2.46 [51-52]



รูปที่ 2.46 อาศัยการหมุนของกระจก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.4 โปรแกรม DIALux 4.10

โปรแกรมที่สามารถออกแบบ และคำนวณระบบไฟฟ้าแสงสว่าง เป็นประโยชน์ต่อออกแบบระบบการส่องสว่าง จะต้องนำข้อมูลต่าง ๆ เช่น ข้อมูลการกระจายแสงของโคมไฟ และหลอดไฟแต่ละแบบ ที่ได้จากเครื่องวัดค่าการกระจายความเข้มส่องสว่างโคมไฟ (Gonio photometer) ในรูปแบบมาตรฐาน IES File โดยสามารถจำลองกำหนดขนาดห้อง พื้นผิวของห้อง กำหนดประตูและหน้าต่าง การจัดวางตำแหน่งโคมไฟ เป็นต้น ทำให้สามารถนำมาใส่ในแบบจำลองที่สร้างขึ้น และโปรแกรมสามารถแสดงผลของการส่องสว่าง จากโคมไฟและหลอดไฟที่ใช้ออกมาได้อย่างสมจริง เป็นประโยชน์ในการจำลองออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่างก่อนที่จะนำไปติดตั้งจริง ลักษณะโปรแกรม DIALux 4.10 แสดง ดังรูปที่ 2.47 สำหรับตัวอย่างการใช้โปรแกรมมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ [53]

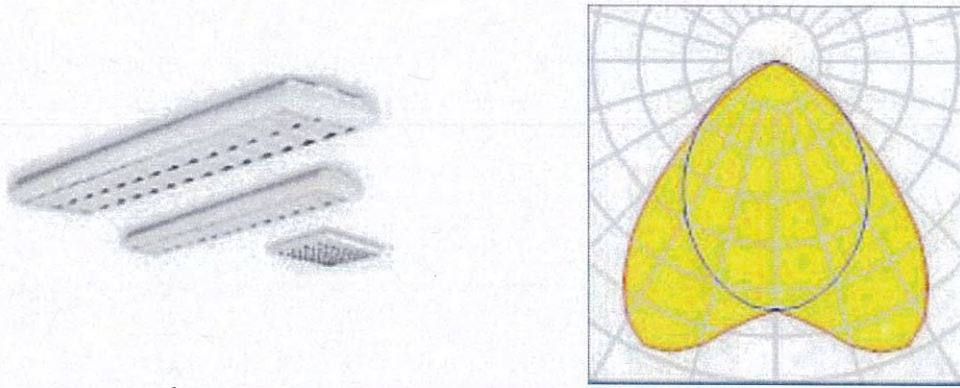


รูปที่ 2.47 โปรแกรม DIALux 4.10

### 2.6.4.1 ตัวอย่างการใช้โปรแกรม DIALux

ห้องปฏิบัติการมีขนาดกว้าง 16 m ยาว 24 m สูง 3 m มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุที่เพดาน, ผนังและพื้น เป็น 70%, 50% และ 20% ตามลำดับ พื้นโต๊ะทำงานอยู่สูงจากพื้น 0.75 m ต้องการค่าความส่องสว่างภายในห้อง 500 ลักซ์ โคมไฟไฟฟ้า Sylvania 0046125 SYL-LOUVER HR 158 A2 ขนาด 58 W 5200 ลูเมน (สมมติให้ 1 หลอด/โคม) มีลักษณะดวงโคมไฟและกราฟการกระจายแสง ดังรูปที่ 2.48

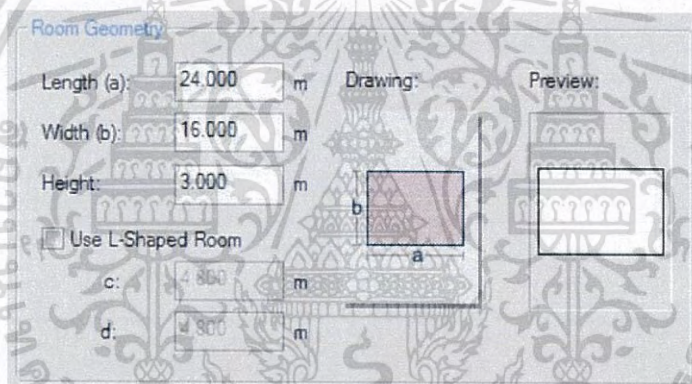
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.48 กราฟการกระจายแสงของโคมไฟหลอดฟลูออเรสเซนต์

โดยมีวิธีกำหนดค่าในโปรแกรม DIALux ด้วยวิธีลู่เมน ดังต่อไปนี้

1. เข้า DiaLux
2. กำหนดขนาดห้องให้มีขนาดกว้าง 16 เมตร ยาว 24 เมตร สูง 3 เมตร ดังรูปที่ 2.49



รูปที่ 2.49 กำหนดขนาดห้อง

3. กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของเพดาน ผนัง และพื้น ของห้อง มีค่า คือ 70%, 50% และ 20% ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.50 (ก)
4. กำหนดค่า Maintenance factor เป็น 0.8 ดังรูปที่ 2.50 (ข)
5. กำหนดค่าความสูงของพื้นที่ทำงานคือ 0.75 เมตร ดังรูปที่ 2.50 (ค)

Reflection factors

Ceiling: 70 % Standard Ceiling

Walls: 50 % Standard Wall

Ground: 20 % Standard Floor

(ก)

Room Parameters

Reference Values:  
Very clean room, low yeas

Maintenance factor: 0.80

(ข)

Workplane

Height: 0.750 m

Wall zone: 0.500 m

(ค)

รูปที่ 2.50 การกำหนด สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (ก) ค่า Maintenance factor (ข) และความสูงของพื้นที่ทำงาน (ค) ในโปรแกรม DIALux

6. กำหนดให้ใช้โคมไฟฟ้า Sylvania 0046125 SYL-LOUVER HR 158 A2 ขนาด 58 W 5200 ลูเมน ดังรูปที่ 2.51 (ก)
7. กำหนดลักษณะการติดตั้งดวงโคมไฟฟ้า ให้อยู่ที่พื้นผิวเพดาน ดังรูปที่ 2.51 (ข)

Luminaire Selection

Luminaire: Sylvania 0046125 SYL-LOUVER HR 158 A2 Catalogues


Select the quantity here:

Luminous emittance 1

Lamp: F 58W

Here you can modify the provided luminous flux of the luminaires:

Luminous Flux: 5200 lm



(ก)

Luminaire Mounting

Mounting Type: Surface-Mounted

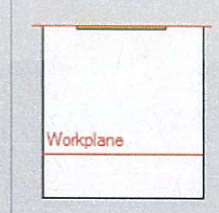
Modify the mounting height via one of the following parameters:

Suspension Height: 0.000 m

Height above Workplane: 2.162 m

Mounting Height: 3.000 m

Dimensions (L x B x H): 1.599 x 0.192 x 0.088 m



(ข)

รูปที่ 2.51 กำหนดดวงโคมไฟฟ้า Sylvania 58 W 5200 ลูเมน (ก) และความสูงการติดตั้งดวงโคม (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. กำหนดให้ค่าความส่องสว่างภายในห้อง 500 ลักซ์ และกดปุ่ม Suggestion โปรแกรมจะคำนวณให้ว่าต้องติดตั้งดวงโคมเท่าไร ดังรูปที่ 2.52

Luminaire: Sylvania 0046125 SYL-LOUVER HR 158 A

Dimensions (L x B x H): 1.599 x 0.192 x 0.088 m

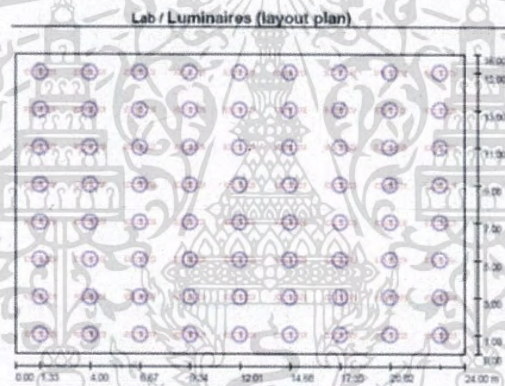
Calculation Parameters

Planned Em: 500 lx

Em from arrangement: 504 lx

รูปที่ 2.52 การกำหนดค่าความส่องสว่าง

9. โปรแกรมทำการติดตั้งดวงโคมจำนวน 72 โคม ดังรูปที่ 2.53

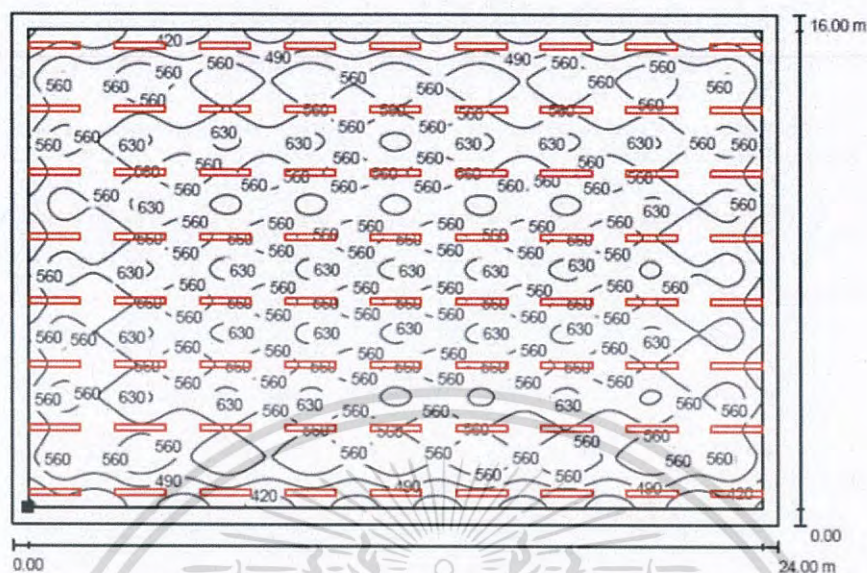


รูปที่ 2.53 การวางดวงโคม

เมื่อให้โปรแกรม DIALux คำนวณค่าความส่องสว่างออกมาจะได้ค่าความส่องสว่างและมีเส้นของความส่องสว่าง ดังรูปที่ 2.54

- ความส่องสว่างเฉลี่ย ( $E_{avg}$ ) = 550 ลักซ์
- ความส่องสว่างต่ำสุด ( $E_{min}$ ) = 340 ลักซ์
- ความส่องสว่างสูงสุด ( $E_{max}$ ) = 657 ลักซ์
- $U_o (E_{min} / E_{avg}) = 0.62$
- $E_{min} / E_{max} = 0.52$

## Lab / Workplane / Isolines (E)



รูปที่ 2.54 เส้นแห่งการส่องสว่าง

## 2.6.5 เครื่องวัดคุณภาพทางไฟฟ้า (Power Quality Analyzer)

คุณสมบัติของเครื่องวัดนี้นำมาใช้สำหรับการตรวจสอบความเหมาะสม และความสมดุลของการทำงานภายในระบบวงจรไฟฟ้า หรือ อุปกรณ์ไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2.55 [40] โดยเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่ใช้สำหรับตรวจวัดจะต้องสามารถตรวจวัดและบันทึกค่าทางไฟฟ้าแบบ True RMS ทั้ง 3 เฟส โดยต้องเก็บข้อมูลได้ทั้ง 2 ประเภท คือ ประเภท Profile Recording เป็นการบันทึกค่า RMS ของค่าเฉลี่ย, ค่าต่ำสุด และค่าสูงสุด ต่อเนื่องเก็บข้อมูลทุก ๆ 10 นาที ตามมาตรฐาน IEC 61010-1 ประกอบด้วย แรงดันไฟฟ้า (Voltage), กระแสไฟฟ้า (Current), กำลังไฟฟ้าจริง (Real Power), กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power), กำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power), ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor), ฮาร์โมนิกส์แรงดัน (Voltage Harmonics) และกระแสฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Current) โดยสามารถเก็บค่าได้ถึงลำดับที่ 50, ฮาร์โมนิกส์กำลัง (Power Harmonics) ต้องสามารถเก็บค่าได้ถึงลำดับที่ 11, ไฟกะพริบ (Flicker) ประกอบด้วย ดรรชนีไฟกะพริบระยะสั้น (Short-Term Severity Values , Pst) และดรรชนีไฟกะพริบระยะยาว (Long-Term Severity Values , Plt) รวมถึงแรงดันไม่สมดุล (Voltage Unbalance) ประกอบด้วย Unbalance Factor, แรงดันไฟฟาลำดับบวก (Positive Sequence Voltage), แรงดันไฟฟาลำดับลบ (Negative Sequence Voltage) และแรงดันไฟฟาลำดับศูนย์ (Zero Sequence Voltage) ระบบการบันทึกแบบ Event Recording คือการบันทึกข้อมูลรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าของเหตุการณ์ผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ประกอบด้วยเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag/Dip), แรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) และไฟดับช่วงสั้น (Short Interruption) มีอัตราการสุ่มสัญญาณอย่างน้อย 128 samples/cycle และสามารถปรับค่า Trigger เพื่อเริ่มการบันทึกและถอดข้อมูลรายงานผลการตรวจวัดได้ตามมาตรฐาน EN 50160 เพื่อใช้สำหรับเปรียบเทียบข้อมูลคุณภาพไฟฟ้ากับเกณฑ์ข้อกำหนด โดยสามารถบันทึกข้อมูลในหน่วยความจำภายในตลอดช่วงเวลาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจวัดเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 30 วัน โดยข้อมูลไม่เกิดการสูญหาย และต้องมีอุปกรณ์สำหรับกักเก็บการสำรองไฟ (Uninterruptible Power Supply) ซึ่งมีระยะเวลาในการสำรองไฟอย่างน้อย 15 นาที กรณีมีเหตุการณ์ไฟดับ พร้อมทั้งต้องมีฟังก์ชันการสตาร์ทอัตโนมัติเมื่อแรงดันไฟฟ้ากลับคืนมาเป็นปกติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบและติดตั้ง

การศึกษาและวิเคราะห์การนำโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง ทดแทนโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอถือเป็นทางเลือกใหม่สำหรับการประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการจัดแสงภายในและภายนอกสตูดิโอ ตามมาตรฐาน IES LM-79 08 ว่าด้วยการทดสอบการวัดข้อมูลสมรรถนะทางแสง ทางไฟฟ้า และประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ประเภทแหล่งกำเนิดแสงที่เกิดจาก สารกึ่งตัวนำ Solid-State Lighting (SSL) ได้แก่ LED Lamp และ LED Luminaire [19] สำหรับการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย สมรรถนะทางแสง สมรรถนะทางไฟฟ้า พร้อมศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

#### 3.1 ภาพรวมของระบบการตรวจวัด

สำหรับการศึกษางานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้รับโจทย์มาจากการทำงานของผู้วิจัย ภายในสตูดิโอ และโจทย์จากภาคอุตสาหกรรมโทรทัศน์ และภาพยนตร์ ที่เริ่มเปลี่ยนจากโคมไฟชนิดแหล่งกำเนิดแสงแบบเก่า ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสงประเภท ทังสเตน-ฮาโลเจน หลอดเอชเอ็มไอ (Halogen Metal Iodide Lamp; HMI) และหลอดฟลูออเรสเซนต์ เป็นต้น มาเป็นหลอดแอลอีดีกำลังสูง สามารถที่จะนำมาทดแทน ได้หรือไม่ ทางผู้วิจัยได้ศึกษาขั้นตอนการวิจัย โดยเริ่มจากนำแนวคิดของปัญหาไปศึกษา หาข้อมูลเพิ่มเติม ได้แก่ งานวิจัยที่ผ่านมา ตลอดจนแนวคิดทฤษฎีที่จะนำมาใช้สำหรับการศึกษาดำเนินการตามหลักการมาตรฐานของ IES LM-79 08 ออกแบบติดตั้งระบบการตรวจวัด โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W และ โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W กำหนดสถานที่สำหรับการวิจัยด้านสมรรถนะทางแสง ประกอบด้วยพื้นฐานทางแสง ได้แก่ ฟลักซ์ส่องสว่าง ความเข้มส่องสว่าง ความเข้มแสง ประสิทธิภาพส่องสว่าง และพื้นฐานสีของแสง ได้แก่ ค่าไตรสตีมูลัส CIE 1931 ค่าโครมาติซิตี CIE 1976 อุณหภูมิสีของแสง ดัชนีความถูกต้องสีของแสง เป็นสตูดิโอปิดทึบ คณะเทคโนโลยีสื่อสารมวลชน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และการศึกษาการกระจายแสงของโคม สมรรถนะทางไฟฟ้า เป็นห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยพลังงานและวิศวกรรมส่องสว่าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พร้อมการเก็บข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้า ได้แก่ ชั่วโมงการทำงานต่อปี กับสถานประกอบการโทรทัศน์สถานีต่างๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์ จากนั้นนำผลการศึกษาและข้อมูลที่บันทึกได้มาศึกษาร่วมกับหลักการทางทฤษฎี ว่ามีความเป็นไปได้หรือไม่สำหรับการนำโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W มาทดแทนโคมไฟแหล่งกำเนิดแสงหลอดเอชเอ็มไอ 200 W สำหรับการจัดแสงภายในสตูดิโอโทรทัศน์ เพื่อจะได้นำไปใช้เป็นกรณีศึกษากับแหล่งกำเนิดแสงประเภทเดียวกันที่มีขนาดกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น หรือแหล่งกำเนิดแสงประเภทอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 3.1



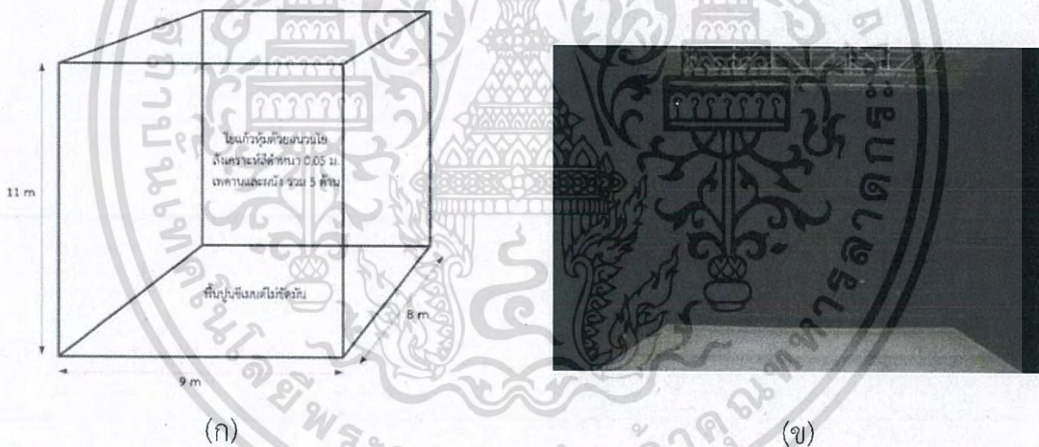
รูปที่ 3.1 ลำดับขั้นตอนศึกษาการวิจัย

องค์ประกอบของโครงสร้างในแต่ละส่วนต้องทำงานสอดคล้องกัน เริ่มจากส่วนกำเนิดสัญญาณ รูปคลื่นไซน์สร้างแรงดันรูปคลื่นไซน์ความถี่ 1.6 kHz ผ่านชิปแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (Digital-to-Analog Converter, DAC) วงจรกรองความถี่ (Filter) และวงจรขยายกำลัง (Power Amplifier) จ่ายให้กับขดลวดที่พันรอบแคลมป์แรงดันเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลในลูปความต้านทานการต่อลงดินจำลอง จากนั้นส่วนการวัดและคำนวณค่าความต้านทานการต่อลงดินจะตรวจจับกระแสดังกล่าวผ่านขดลวดที่พันรอบแคลมป์กระแสเพื่อแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analog-to-Digital Converter, ADC) และคำนวณค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square, RMS) ของสัญญาณแรงดันและกระแสที่ไหลในลูปความต้านทานการต่อลงดิน แล้วนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณค่าความต้านทานในไมโครคอนโทรลเลอร์ จากนั้นจึงแสดงผลบนจอแอลซีดี (LCD) และส่งค่าความต้านทานที่คำนวณได้ผ่านพอร์ตอนุกรม (Serial Port Communication, UART) ให้โมดูลเอ็กซ์บี (XBee Module) และใช้แอลอีดี (LED) ทำงานร่วมกับกริ่ง (Buzzer) ในการแจ้งเตือนเมื่อค่าที่วัดได้มีค่านอกเหนือจากช่วงของค่าความต้านทานที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1 สตูดิโอสำหรับการจัดแสง

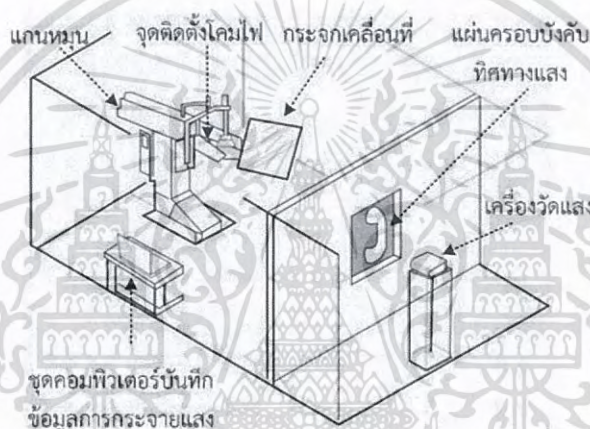
การให้ความสว่างของตัวแบบ วัตถุ ฉาก เป็นต้น ภายในสตูดิโอ สามารถทำได้โดยการยึดหรือวางตำแหน่งของโคมไฟด้วยการนำมาติดตั้งบนพื้นตามจุดที่ต้องการให้เกิดความสว่าง หรือ เกิดจากการนำโคมไฟมาแขวนบนเพดานของสตูดิโอ ทั้งนี้ลักษณะการออกแบบสตูดิโอจะต้องมีพื้นที่กว้างขวาง ขนาดของสตูดิโอ ควรมีขนาดความกว้างหรือความยาวไม่ต่ำกว่า 6 เมตร มีความสูงที่พอเพียงคือไม่ต่ำกว่า 4 เมตร หรือ ควรเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อความสะดวกและความยืดหยุ่นในการทำงาน และควบคุมอุปกรณ์สำหรับการติดตั้งโคมไฟ อุปกรณ์ประกอบฉาก นอกจากนี้สตูดิโอควรมีความปลอดภัย เรื่องของการวางระบบไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นสายไฟหรือปลั๊กไฟต่างๆ พร้อมระบบตู้จ่ายไฟฟ้าที่ควรต่อสายดินกับระบบไฟฟ้าภายในสตูดิโอ นอกจากนี้ผนังรอบสตูดิโอควรบุฉนวนที่เป็นสีโทนทึบ เพื่อควบคุมคุณภาพของแสง ตามหลักการคุณสมบัติการดูดกลืนแสง และการสะท้อนของแสง ทำให้เกิดแสงมีความเหมาะสมกับการบันทึกภาพ และควบคุมทิศทางแสงที่เกิดจากตำแหน่งโคมไฟ การจัดแสงภายในสตูดิโอที่นำมาใช้ในการศึกษาร้านนี้ ติดตั้งโคมไฟบนเพดานสตูดิโอ ตามทฤษฎีการจัดแสงหาค่าความสว่าง (Studio Lighting the Subject) ตามกฎแลมเบิร์ตโคไซน์ สำหรับสตูดิโอที่ใช้ในการศึกษาร้านนี้ มีขนาด กว้าง 9 เมตร ยาว 8 เมตร สูง 11 เมตร ผนังและเพดานปิดทึบทำด้วยใยแก้วหนา 0.05 เมตร หุ้มด้วยผ้าใยสังเคราะห์สีดำ และพื้นซีเมนต์ บนเพดานติดตั้งโครงเหล็กสำหรับยึดโคมไฟ แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 รายละเอียดสตูดิโอสำหรับการจัดแสงในงานวิจัย (ก) และสตูดิโอจริงสำหรับการศึกษา (ข)

### 3.1.2 ห้องปฏิบัติการวัดค่าและข้อมูลการกระจายแสงของโคมไฟ

การกระจายความเข้มส่องสว่างของโคมไฟประเภทแหล่งกำเนิดแสงหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W และ หลอดไฟโซเดียมไอ 200 W สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองภายในห้องมืดที่มีขนาด กว้าง 7 เมตร ยาว 9 เมตร สูง 4 เมตร ผ้าม่านและเพดานปิดทึบด้วยซีเมนต์ทาสีดำ และพื้นซีเมนต์ปิดทึบด้วยผ้าสักหลาดสีดำ ระยะห่างแทนกระจกหมุนถึงเครื่องวัดแสง มีค่า 7 เมตร ความสูง 1 เมตร โดยเครื่องวัดค่าการกระจายความเข้มส่องสว่างโคมไฟแบบอาศัยการหมุนของกระจกในทิศทางแนวตั้ง (0 องศา ถึง 180 องศา) พร้อมปรับระดับความเอียงของกระจกในทิศทางดังกล่าว เพื่อให้เกิดการสะท้อนและหักเหแสงของกระจกจากแหล่งกำเนิดแสงทั้ง 2 ประเภท ไปยังบริเวณแผ่นครอบบังคับทิศทางแสง เพื่อรวมแสงให้ไปตกกระทบลงบนหัวรับแสงของ เครื่องวัดแสงอยู่กับที่อยู่ภายในห้องที่วัด (Illuminance Meter) Topcon รุ่น IM-5 ที่มีค่าความละเอียดการวัดอยู่ระหว่าง 0.005-99990 Lux ดังรูปที่ 3.3



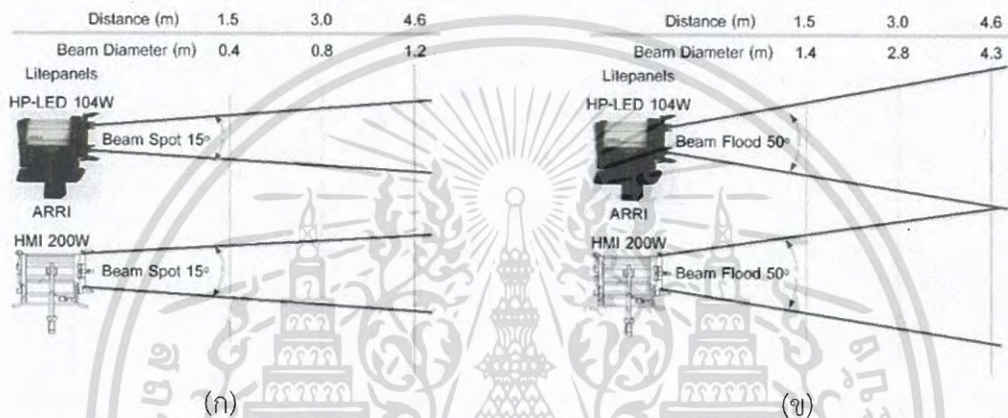
รูปที่ 3.3 ห้องปฏิบัติการทางแสงการวัดค่าการกระจายแสงของโคมไฟ [51]

### 3.1.3 การตั้งค่าหมวดควบคุมการกระจายแสงของโคมไฟ

เป็นการควบคุมทิศทางแสงของโคมไฟ สำหรับงานวิจัยนี้จัดเป็นโคมไฟประเภทสปอต (Spot Light) สามารถควบคุมองศาได้ 2 ลักษณะ คือ ตำแหน่ง 50 องศา เรียกว่า “Flood” ให้ลำแสงกระจายออก และ ตำแหน่ง 15 องศา เรียกว่า “Spot” ให้ลำแสงรวม โดยการปรับมุมควบคุมที่อยู่ด้านหลังของโคมไฟ ทั้งนี้ องศาการกระจายแสงตลอดระยะทางไปถึงจุดที่แสงตกกระทบจะมีค่าการกระจายแสงไม่เท่ากันเสมอไป ทั้ง 2 ลักษณะจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะเฉพาะของผู้ผลิตโคมไฟแต่ละบริษัทที่ระบุในคู่มือผลิตภัณฑ์ เรียกว่า Photometric Data Sheet สำหรับการศึกษาครั้งนี้ทางผู้วิจัยได้พิจารณาโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง ภายใต้ชื่อ ผลิตภัณฑ์ Litepanels Sola 6 ขนาดกำลังไฟฟ้า 104 W ทางผู้ผลิตได้ทำการทดลองภายในห้องปฏิบัติการได้ระบุไว้ในคู่มือว่า สามารถนำไปทดแทนโคมไฟหลอดโซเดียมไอขนาดกำลังไฟฟ้า 200 W ทางผู้ศึกษาได้วิจัยโคมไฟดังกล่าวมีผลิตภัณฑ์ใดที่มีคุณลักษณะใกล้เคียงและเป็นที่ยอมรับสำหรับการนำมาจัดแสงและมีคุณภาพทางด้านผลิตภัณฑ์เป็นที่ยอมรับ พบว่าผลิตภัณฑ์ภายใต้ชื่อ Arri เป็นที่ยอมรับมากในอดีตจนถึงปัจจุบัน และมีขนาดกำลังไฟฟ้าเทียบเท่ากับโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W และมีคุณสมบัติอุณหภูมิสีของแสงได้ใกล้เคียง 5600K นอกจากนี้ในคู่มือผลิตภัณฑ์ ยังได้ระบุระยะจุดกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงไปยังจุดที่แสงตกกระทบบนพื้นที่ใช้งานโดยทั่วไปประกอบด้วย 3 ระยะทาง สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดไว้ที่ 1.5, 3.0, 4.6 เมตร ตามลำดับ พร้อมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงกระจายออก ในตำแหน่ง Flood และ Spot ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันออกไปตามระยะจุดกำเนิดแสงไปยังจุดที่แสงตกกระทบบนพื้นที่ใช้งาน และในแต่ละระยะทางดังกล่าวทางผู้ผลิตจะระบุค่าความเข้มแสง หน่วย Lux ที่มีค่าความเข้มแสงมากที่สุดไปหาน้อยสุด ซึ่งเป็นข้อมูลการเลือกใช้โคมไฟเบื้องต้นสำหรับการจัดแสง และสำหรับผู้ที่จะนำโคมไฟไปใช้ให้เหมาะสมกับค่าความเข้มแสงที่ต้องการ ส่งผลให้ไม่จำเป็นที่จะต้องเลือกใช้โคมไฟที่มีขนาดกำลังไฟฟ้าสูงทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย และค่าพลังงานไฟฟ้า เช่นกัน สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ ได้ระบุข้อมูลผลิตภัณฑ์ของโคมไฟทั้ง 2 ประเภทแสดง ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 หมวดควบคุมการกระจายแสงของโคมไฟที่ตำแหน่ง Spot 15 องศา (ก) และตำแหน่ง Flood 50 องศา (ข)

### 3.2 การวัดค่าสมรรถนะทางแสง

การวัดค่าสมรรถนะทางแสง (Photometric Performance) ในงานวิจัยนี้ทดสอบ และวัดหาข้อมูลสมรรถนะทางแสงตามมาตรฐาน IES LM-79-08 ของผลิตภัณฑ์ประเภทแหล่งกำเนิดแสงที่เกิดจากสารกึ่งตัวนำ ระหว่างโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W และโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ภายใต้สภาวะการจัดแสงเพื่อเพิ่มความสว่างให้กับตัวแบบบุคคล ภายในสตูดิโอ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยใช้เครื่องวัดค่าความรับรังสีรวมของแหล่งกำเนิดแสง (Spectroradiometer) ของ MK350 หน้าจอแสดงผลประกอบด้วยค่า อุณหภูมิสีของแสง ดัชนีความถูกต้องสีของแสง ความเข้มแสง และความยาวคลื่นแสง ดังรูปที่ 3.5 สามารถสรุปขั้นตอนการติดตั้งโคมไฟและเครื่องมือวัด ดังต่อไปนี้

1. ความสูงของโคมไฟจากระดับพื้นของสตูดิโอที่ระยะ 1.7 เมตร
2. ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 1.5, 3.0, 4.6 เมตร ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 3.6 (ก)
3. การตั้งค่าหมวดควบคุมการกระจายแสง จะส่งผลให้เกิดระยะของเส้นผ่านศูนย์กลางของโคมไฟที่แตกต่างกัน ประกอบไปด้วยตำแหน่ง Spot 15 องศา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแสงกระจายแคบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่า 0.4, 0.8, 1.2 เมตร และ Flood 50 องศา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแสงกระจายออก มีค่า 1.4, 2.8, 4.3 เมตร ตามลำดับ ควบคุมตำแหน่งทิศทางแสงจากโคมไฟให้ตรงกับตัวแบบบุคคล โดยใช้แว่นตัดแสง (Contrast Viewing) ในการหาจุดตำแหน่งของโคมไฟ แสดงดังรูปที่ 3.6 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.5 ลักษณะภายนอกของเครื่องมือวัดความรับรังสีรวมของแหล่งกำเนิดแสง (ก) และหน้าจอแสดงผล (ข)



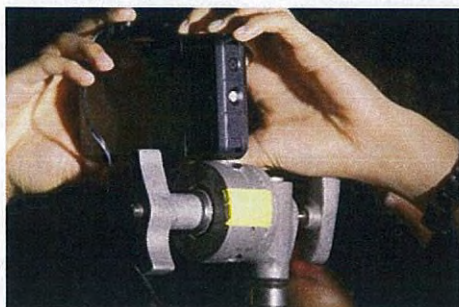
(ก)



(ข)

รูปที่ 3.6 การหาระยะระหว่างโคมไฟถึงลำตัวแบบบุคคล (ก) และแว่นตัดแสงหาตำแหน่งโคมไฟ (ข)

- การวัดค่าความรับรังสีรวมของแหล่งกำเนิดแสง เริ่มจากการวัดตำแหน่งโคมไฟ ทั้ง 2 ประเภท ในแต่หมวดดวงศากการกระจายแสง โดยให้ตำแหน่งจุดวัดแสงเครื่องวัดตั้งกล่าว หันไปยังตำแหน่งแสงของโคมไฟในแนวระนาบเดียวกับจุดการวัดค่าแสงที่ปลายจมูกของตัวแบบ แสดงดังรูปที่ 3.7 (ก) เมื่อได้ตำแหน่งโคมไฟตามที่ต้องการตามระยะทางต่างๆ ให้ตรวจสอบหาจุดกึ่งกลางของวงกระจายแสงเพื่อการวัดค่า ด้วยเครื่องวัดแสงบนหน้าจอจะปรากฏจุดกากบาทบนหน้าจอเครื่องวัดเมื่อลำแสงได้จุดกึ่งกลาง ดังรูปที่ 3.7 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.7 จุดรับแสงการอ่านค่าของเครื่องวัด (ก) และจุดกึ่งกลางของวงแสงเพื่อการวัดค่า (ข)

5. เมื่อได้ตำแหน่งโคมไฟอยู่ในตำแหน่งเดียวกับเครื่องวัดแสง ให้หันหน้าจอแสดงผลต่างๆ ของ ได้แก่ ค่าอุณหภูมิสีของแสง ค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสง ค่าความเข้มแสง และค่าความยาวคลื่น เพื่อเตรียมการบันทึกข้อมูลการวัดโดยกดปุ่มการบันทึกมุมบนด้านขวาของเครื่องวัด ดังรูปที่ 3.8 (ก) ทำการวัดและบันทึกค่าทั้งหมด 12 จุด ประกอบด้วย จำนวนโคมไฟ 2 โคม หมวดควบคุมกระจายแสง 2 หมวด ที่ระยะห่างโคมไฟถึงตัวแบบจำนวน 3 ระยะ และบันทึกผลผ่านเครื่องวัด พร้อมเก็บภาพเบื้องหลังการวัดค่าสมรรถนะทางแสง ดังรูปที่ 3.8 (ข)



(ก)



(ข)

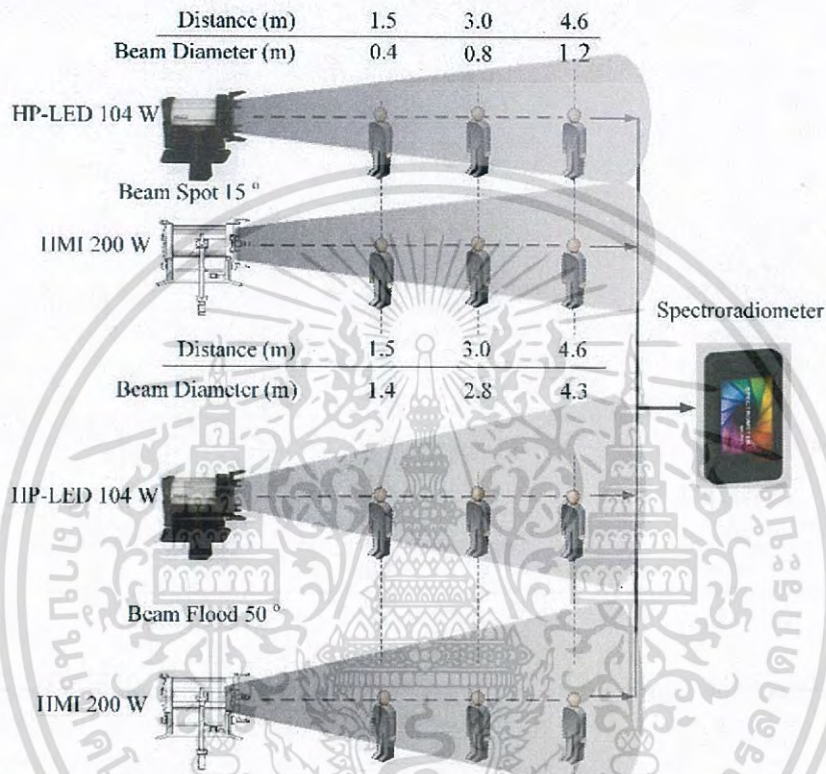
รูปที่ 3.8 การอ่านและบันทึกค่าแสงของเครื่องวัด (ก) และเบื้องหลังการวัดค่าสมรรถนะทางแสง (ข)

### 3.2.1 พื้นฐานทางแสง

รวมตำแหน่งการวัดทั้งหมด 12 จุด ประกอบด้วย จำนวนโคมไฟ 2 โคม หมวดควบคุมกระจายแสง 2 หมวด ที่ระยะห่างโคมไฟถึงตัวแบบจำนวน 3 ระยะ แสดงดังรูปที่ 3.9 ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดความรับรู้สีรวมจะอ่านค่าได้เพียง ค่าความเข้มแสง (Lux) จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหา ฟลักซ์ส่องสว่าง (lm) และความเข้มส่องสว่าง (cd) แต่สำหรับประสิทธิภาพส่องสว่าง ต้องนำค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการวัดจริง ด้วยเครื่องวัดคุณภาพทางไฟฟ้าไปใช้สำหรับวิธีการคำนวณหาค่าพื้นฐานทางแสง แสดงดังภาคผนวก ข.1

### 3.2.2 พื้นฐานสีของแสง

ประกอบด้วยระบบการวัดสีของแสง ได้แก่ ไตรสติมูลัส CIE-1931  $X, Y, Z$  โครมาติคซิตี้ CIE1931  $(x, y)$  โครมาติคซิตี้ CIE1976  $(u', v')$  อุณหภูมิสีของแสง ( $CCT, T_{cp}$ ) และดัชนีความถูกต้องสีของแสง ( $CRI$  or  $R_a$ ) โคมไฟหลอดเซอเมไอ 200 W และหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ภายใต้การจัดแสงภายในสตูดิโอเช่นเดียวกับการวัดค่าพื้นฐานทางแสง แสดงดังรูปที่ 3.9



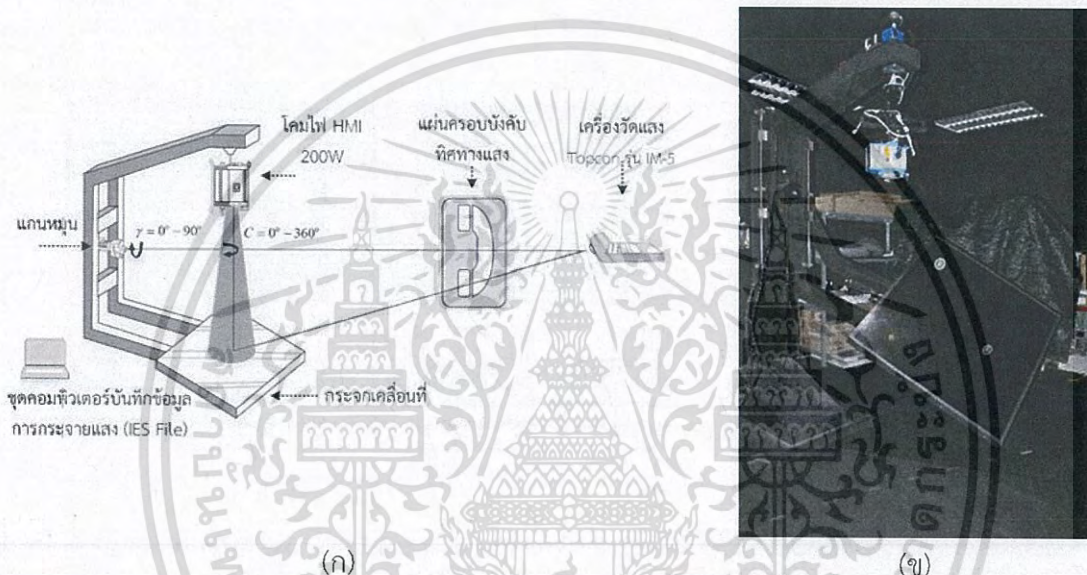
รูปที่ 3.9 การวัดค่าพื้นฐานทางแสงและสีของแสง จำนวน 12 ตำแหน่ง ภายในสตูดิโอ

### 3.2.3 การกระจายแสงของโคม

โคมไฟแหล่งกำเนิดทั้ง 2 ประเภท ที่นำมาใช้สำหรับการศึกษามีลักษณะเป็นโคมไฟเฟรสเนลสปอต (Fresnel Spot) จัดเป็นประเภทชนิด C กราฟกระจายแสงของโคมไฟที่นำมาใช้ในการศึกษา ไอโซอินเทนซิตี ไอโซลักซ์ และโพลาร์เคิร์ฟ ผู้วิจัยได้ติดตั้งโคมไฟภายในศูนย์วิจัยพลังงานและวิศวกรรมส่องสว่าง (Energy System and Illumination Engineering Research Center (ESIRC)) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นเครื่องวัดค่าการกระจายแสงแบบอาศัยการหมุนของกระจก พร้อมอ่านค่าด้วยเครื่องวัดแสง (Illuminance Meter) Topcon รุ่น IM-5 และระบบบันทึกข้อมูลผ่านระบบปฏิบัติการโปรแกรม DIALux ดังรูปที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ สำหรับการบันทึกค่าการสะท้อนแสงหลังจากเปิดระบบการทำงานของเครื่องวัดค่าการกระจายความเข้มส่องสว่างโคมไฟพร้อมโคมไฟทั้ง 2 ประเภท กำหนดตำแหน่งการกระจายแสงของโคม ตำแหน่ง Spot 15 องศา และ Flood 50 องศา และเปิดโคมไฟให้ทำงานในช่วงเวลาหนึ่งเพื่อทำให้ความเข้มแสงของโคมไฟสว่าง

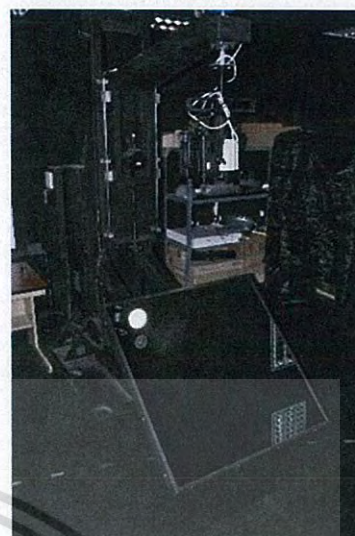
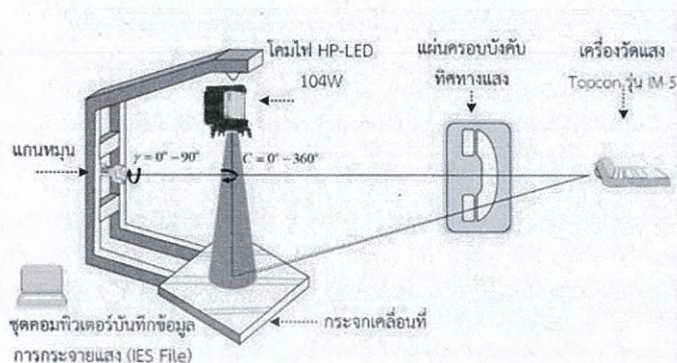
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คงที่ จากนั้นเปิดระบบการทำงานของเครื่องวัดค่าการกระจายความเข้มสองสว่าง กระจกจะเริ่มหมุนไปในทิศทางองศาที่กำหนด คือ ทิศทางแนวตั้ง (Vertical angle) คือ มุม  $\gamma$  ตั้งแต่ 0 องศา ถึง 90 องศา มีระยะห่างในการบันทึกข้อมูลเท่ากับ 2.5 องศา มีข้อมูลองศา เท่ากับ 37 ตัว และสำหรับทิศทางแนวนอน (Horizontal angle) คือ มุม  $C$  ตั้งแต่ 0 องศา ถึง 360 องศา มีระยะห่างในการบันทึกข้อมูลเท่ากับ 15 องศา มีข้อมูลองศา เท่ากับ 25 ตัว เมื่อแสงจากดวงโคมไฟตกกระทบเครื่องวัดแสงในทิศทางดังกล่าวจะได้ข้อมูลในรูปแบบมาตรฐาน IES File Format บันทึกลงคอมพิวเตอร์ ต่อ 1 การทดลอง มีค่าเท่ากับ 925 ตัว แสดงดังตัวอย่างตารางที่ 3.1 ดังนั้นงานวิจัยนี้จะได้ข้อมูลทั้งสิ้น 4 ข้อมูล แสดงดังภาคผนวก ก เพื่อประมวลผลภายใต้โปรแกรม DIALux สำหรับพล็อตกราฟการกระจายแสงต่อไป



รูปที่ 3.10 โต๊ะแตรการวัดค่าการกระจายแสง (ก) และการวัดค่าการกระจายแสงในห้องปฏิบัติการทางแสง (ข) ของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.11 โดอะแกรมการวัดค่าการกระจายแสง (ก) และการวัดค่าการกระจายแสงในห้องปฏิบัติการทางแสง (ข) ของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W

ตารางที่ 3.1 รูปแบบ IES File ของดวงโคมไฟ

ลำดับ	รายละเอียด	ตัวอย่างที่ได้จากงานวิจัย
00	IESNA: LM-XX-XXXX	IESNA:LM-63-2002
01	Name Test	HPLD 104 W15D
02	Date	9-04-14
03	Manufacturing	Li panel
04	Product model	Sola 6
05	Luminaire	Fresnel Spot
06	Lamp	HP-LED 104 W
07	Tilt=<file-spec>or<include>or<none>	none
08	<ballast factor><ballast-lamp photometric factor><input watts>	1 1.0 102.1
09	<of lamps><lumens per lamp><candela multiplier> <# of vertical angle><# of horizontal angles><photometric type>	1 1000 1 37 25 1 2 1 1 0
10	<vertical angle>	0 2.5 5.....90 ⇨ 37 ตัว
11	<horizontal angles>	0 15 30.....360 ⇨ 25 ตัว
12	<candela values for all vertical angles at first horizontal	18416.6 16947.5.....17.5
13	<candela values for all vertical angles at second horizontal	18416.6 16897.7.....17.4
14	<candela values for all vertical angles at n <sup>th</sup> horizontal	17.4 17.4.....0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การวัดค่าสมรรถนะทางไฟฟ้า

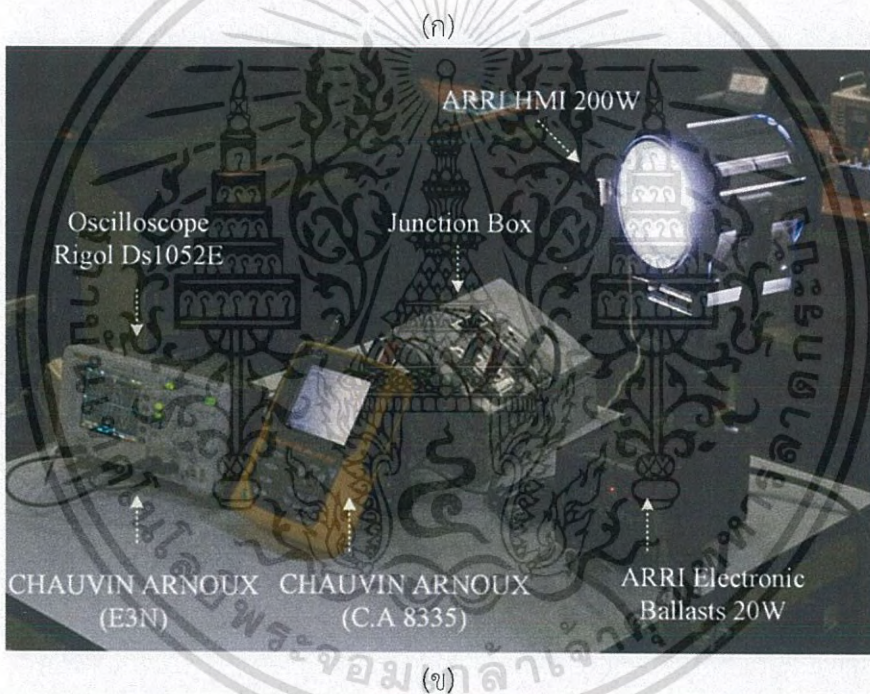
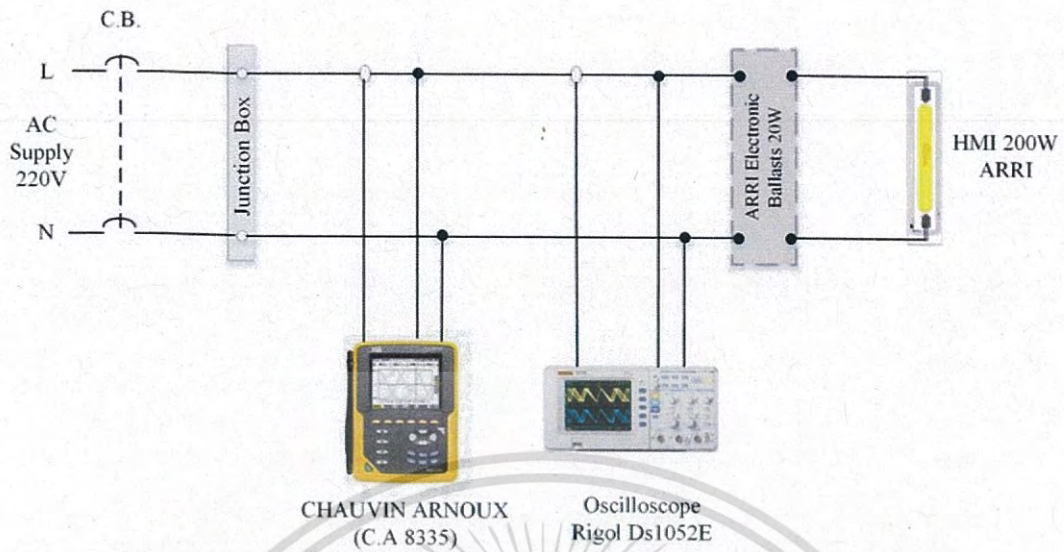
การวัดค่าสมรรถนะทางไฟฟ้า (Electrical Performances) เนื่องจากโคมไฟหลอดเซอเอ็มไอ 200 W ที่ต้องมีการทำงานร่วมกับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างความถี่สูงถึง 50 กิโลเฮิร์ต (kHz) จ่ายให้กับหลอดไฟชนิดดังกล่าว และโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ที่ใช้วงจรช่วยในการทำงานให้กระแสดังที่ ล้วนมีความไวต่อการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสไฟฟ้าอย่างยิ่ง จะส่งผลกระทบต่อตัวแปรต่างๆ ในทางไฟฟ้า ได้แก่ ปริมาณของกระแสขณะทำงานปริมาณของกระแสน้อยเท่าใดความสูญเสียเนื่องจากความร้อนจะลดลง และค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor) เป็นค่าที่บอกว่าบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ หรือ วงจรช่วยที่ใช้อยู่สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันให้สอดคล้องกัน ได้มากน้อยเพียงใด สุดท้าย ค่า THD (Total Harmonics Distortion) เป็นค่าที่บอกว่าบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ หรือ วงจรช่วยที่ใช้อยู่มีสัญญาณรบกวนความถี่สูงมากน้อยเพียงไร สัญญาณรบกวนความถี่สูงที่เกิดขึ้นจะไหลเข้าไปในระบบการทำงานของไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของโคมไฟ

#### 3.3.1 ปริมาณของระบบไฟฟ้า

การวิจัยได้ทำการตรวจวัดปริมาณทางไฟฟ้าต่างๆ กรณีที่ระบบไฟฟ้ามีแรงดันคงที่ 220V และมีระดับการเปลี่ยนแปลงของแสงสว่างจากโคมไฟทั้ง 2 ประเภทโดยไม่ต้องคำนึงการปรับการกระจายแสง เช่น การวิจัยสมรรถนะทางแสง สำคัญต้องเปิดให้โคมไฟทำงานและให้แสงสว่างอยู่ในระดับคงที่ ผู้วิจัยได้กำหนดช่วงเวลาไม่เกิน 10 นาที จากนั้นทำการบันทึกค่าต่างๆ โดยติดตั้งเครื่องวัดคุณภาพทางไฟฟ้า Chauvin Arnoux C.A. 8335 ที่สามารถตรวจวัด และบันทึกปริมาณทางไฟฟ้าที่ต้องการ ประกอบด้วย แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ตัวประกอบกำลัง (Power factor) กำลังไฟฟ้าแอมป์ (W) กำลังไฟฟ้าวาร์แอมป์ (Var) และกำลังไฟฟ้าปรากฏ (VA) โดยเก็บข้อมูลทุก ๆ 10 นาที ตามมาตรฐาน EN 50160 แสดงดังภาคผนวก ข พร้อมเครื่องวัดออสซิลอสโคป ยี่ห้อ RIGOL รุ่น DS1052E กำหนดให้ CH1 แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า และ CH2 แสดงรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า บันทึกภาพเพื่อทวนสอบและตรวจสอบลักษณะความสมบูรณ์ของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าโคมไฟทั้ง 2 ประเภท

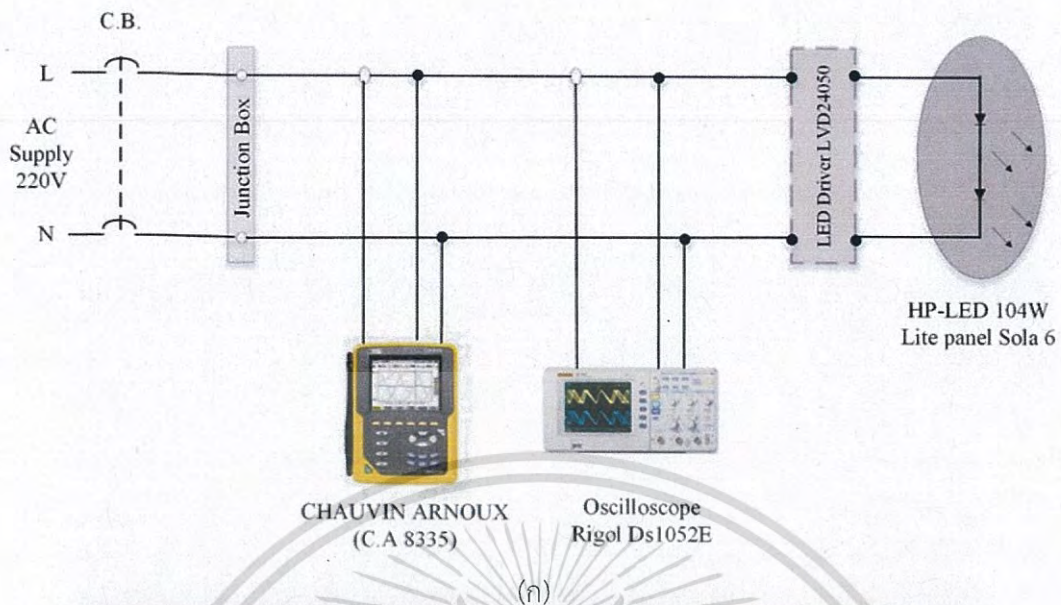
#### 3.3.2 คุณภาพไฟฟ้า

สำหรับงานวิจัยนี้ตรวจสอบคุณภาพทางไฟฟ้าของโคมไฟทั้ง 2 ประเภท ด้วย ฮาร์โมนิกส์แรงดัน (Voltage Harmonics) และกระแสฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Current) เป็นค่ากระแสหรือแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่เป็นจำนวนเต็มของความถี่มูลฐาน 50 Hz อาจเป็น 2 เท่า(100Hz) หรือมากกว่านั้น การเก็บค่าของงานวิจัยเก็บในรูปแบบการบันทึกค่า RMS ของค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด และค่าสูงสุด ต่อเนื่องกัน การเก็บข้อมูลทุก ๆ 10 นาที เช่นเดียวกับการวัดค่าปริมาณของระบบไฟฟ้า สำหรับต้องจรรยาบรรณการวัดค่าสมรรถนะทางไฟฟ้า ใช้เครื่องวัดคุณภาพทางไฟฟ้า Chauvin Arnoux C.A. 8335 บันทึกค่า ร่วมกับ เครื่องวัดออสซิลอสโคป ยี่ห้อ RIGOL รุ่น DS1052E เข้ากับโหนดทางไฟฟ้าประเภทโคมไฟหลอดเซอเอ็มไอ 200 W แสดงดังภาคผนวก ข แสดงดังรูปที่ 3.12 และโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 ไดอะแกรมวงจรการวิเคราะห์ (ก) และการวัดค่า (ข) ปริมาณทางไฟฟ้าและคุณภาพไฟฟ้าของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ไดอะแกรมวงจรการวิเคราะห์ (ก) และการวัดค่า (ข) ปริมาณทางไฟฟ้าและคุณภาพไฟฟ้าของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W

### 3.4 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การจัดแสงภายในสตูดิโอที่เริ่มมีการนำโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W มาทดแทนการใช้โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W นอกจากเหตุผล สมรรถนะทางแสง และทางไฟฟ้า แล้วอีกเหตุผลที่จำเป็นสำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ การวิเคราะห์และตัดสินใจการลงทุนโครงการ สามารถพิจารณาคุณค่าการลงทุนหลายวิธี ที่รวบรวมได้ทั้งทางด้านต้นทุนและผลตอบแทนทางการเงินมาวิเคราะห์และอาศัยหลักการวิเคราะห์ทางการเงินของโครงการลงทุน โดยใช้หลักเกณฑ์ การวิเคราะห์และตัดสินใจการลงทุนโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้ ช่วงเวลาคืนทุน ( $PBP$ ) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ ( $NPV$ ) อัตราผลตอบแทนจากเงินลงทุน ( $IRR$ ) อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน ( $B/C$ ) ทั้งนี้ข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ จะต้องอาศัยข้อมูลประกอบรายละเอียดดังนี้

### 3.4.1 การใช้พลังงานสำหรับการจัดแสง

การใช้พลังงานสำหรับการจัดแสงขึ้นอยู่กับตัวแปรค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภท โคมไฟ ได้แก่ หลอดไฟ บัลลัสต์ และช่วงเวลาการใช้กำลังไฟฟ้าจากอุปกรณ์ไฟฟ้า มีหน่วยการวัดเป็นวัตต์-ชั่วโมง คิดเป็นค่าใช้จ่ายต่อ กิโลวัตต์-ชั่วโมง ที่ปรากฏบนใบเสร็จค่าไฟฟ้าประจำเดือน มีหน่วยการวัดเป็น บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ดังนั้นเมื่อกำหนดการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับการจัดแสงภายใน 1 ปี โดยนำข้อมูลพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดโครงการงานวิจัย ที่กล่าวมา หาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ภายใน 365 วัน วันละ 6 ชั่วโมง เนื่องการทำงานภายในสตูดิโอโดยทั่วไปจะมีการใช้งานอยู่ตลอดเวลา สำหรับการผลิตรายการประจำวันโดยเฉพาะรายการข่าว และการประมาณเวลาตลอดโครงการสำหรับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ 15 ปี เป็นข้อมูลที่ได้มาจากฝ่ายเทคนิคประจำสตูดิโอว่าทางสถานีโทรทัศน์จะมีแผนการบำรุงรักษาโคมไฟอยู่ในช่วงระยะเวลา 15-20 ปี นำมาคำนวณหาค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าต่าง ๆ ของเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป

### 3.4.2 สมมติฐานทางเศรษฐศาสตร์

สมมติฐานทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการคำนวณค่าทางเศรษฐศาสตร์ ข้อมูลอาจจะต้องอาศัยการสอบถาม หรือตรวจสอบข้อมูลเชิงพฤติกรรมการใช้กำลังไฟฟ้า ในการศึกษาครั้งนี้ ทางผู้วิจัยเก็บข้อมูลพฤติกรรมการใช้กำลังไฟฟ้าสำหรับการจัดแสงภายในสตูดิโอ ของ สถานีโทรทัศน์ไทยทีวีสีช่อง 9 (MCOT) สถานีโทรทัศน์สีกองทัพบกช่อง 7 (CH-7) และ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส (Thai PBS) ด้วยเหตุผลคือ ผู้วิจัยพบว่าสถานีโทรทัศน์ดังกล่าวเป็นสถานีโทรทัศน์ที่จัดตั้งเป็นเวลานาน โดยเริ่มแรกสตูดิโอดังกล่าวใช้โคมไฟหลอดทั้งสแตนด์-ฮาโรเจน หลอดฟลูออเรสเซนต์ และหลอดไฟเอชเอ็มไอ สำหรับการจัดแสงภายในสตูดิโอ ปัจจุบันเริ่มมีการเปลี่ยนมาใช้โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง จึงเป็นสถานีโทรทัศน์ที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาในครั้งนี้เมื่อเทียบกับสถานีโทรทัศน์ที่จัดตั้งขึ้นใหม่ ข้อมูลที่สำรวจมาประกอบด้วย พื้นที่ภายในสตูดิโอ ปริมาณค่าการใช้กำลังไฟฟ้าของโคมไฟ และจำนวนชั่วโมงการใช้กำลังไฟฟ้าต่อวัน ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 กำลังไฟฟารวมของโคมไฟที่ใช้ในการจัดแสงภายในสตูดิโอ

รายละเอียด สตูดิโอ		สตูดิโอ	MCOT	CH 7	Thai PBS
		ขนาด (เมตร) กxยxส	15x35x6	20x30x10	20x20x8
		รูปแบบรายการ	ข่าว	ข่าว	สนทนา
รายละเอียด การใช้ กำลังไฟฟ้า	HMI 200 W	กำลังไฟฟาดัดตั้ง โคมไฟ (วัตต์)	3,000	2,000	1,200
		ชั่วโมงการทำงาน ต่อ วัน	7	6	6
	HP-LED 104 W	กำลังไฟฟาดัดตั้ง โคมไฟ (วัตต์)	1,500	600	500
		ชั่วโมงการทำงาน ต่อ วัน	8	8	6

จากตารางที่ 3.3 แสดงข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าจริงของโคมไฟ และบัลลาสต์ พบว่าโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอรวมกับบัลลาสต์ มีค่า 220W ในขณะที่ข้อมูลต้นทุนประกอบด้วย โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูงมีค่า 104 W ราคาโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W มีค่าสูงกว่าโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W หลอดไฟ อยู่ที่ 7,810 บาท และโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W มีค่าใช้จ่ายสำหรับการเปลี่ยนหลอดไฟเท่ากับ 4,528 บาท แต่โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูงมีค่าใช้จ่ายการเปลี่ยนวงจรขับหลอดแอลอีดีกำลังสูงมูลค่า 2,000 บาท กำหนดอัตราค่าไฟฟ้า 3.5 บาทต่อหน่วย ณ เดือน ตุลาคม 2558 และสมมติฐานในการวิเคราะห์ประกอบด้วย จำนวนชั่วโมงของหลอดไฟที่ได้จากคู่มือ ของหลอดไฟเอชเอ็มไอ 200 W มีค่า 2,000 ชั่วโมง สำหรับ หลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W มีค่า 30,000 ชั่วโมง ข้อมูลพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้า เฉลี่ยวันละ 6 ชั่วโมง ในการกำหนดระยะเวลาของโครงการเปลี่ยนโคมไฟครั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดให้มีอายุโครงการทั้งสิ้น 15 ปี ตามข้อกำหนดทางบริษัทโคมไฟที่ระบุอายุการใช้งานเฉลี่ย ผู้วิจัยได้สอบถามข้อมูลการใช้งาน และการรับประกันโคมไฟได้รับประกันว่าโคมไฟมีอายุการใช้งาน 15 ปี และกำหนดอัตราดอกเบี้ยหรืออัตราคิดลด มีค่า 0.8 เปอร์เซ็นต์ อัตราคิดลด ที่ อัตราเงินกู้ MRR ธนาคารกรุงไทย ณ เดือน ตุลาคม 2558 นอกจากนี้ทางผู้วิจัยได้กำหนดให้ความไวเชิงเศรษฐศาสตร์ของโครงการนี้ให้มีค่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง พยายามควบคุมการตั้งสมมติฐานการลงทุนให้ครอบคลุมถึงภายในอนาคตที่อาจเปลี่ยนแปลงตามค่าเงินบาท แต่ถ้าหากค่าใช้จ่ายเริ่มต้นในโครงการสูงกว่าที่คาดการณ์จะส่งผลกระทบต่อผลตอบแทนของโครงการทำให้ผลตอบแทนการลงทุนไม่เป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลและสมมติฐานสำหรับการคำนวณหาค่าตัวแปรทางเศรษฐศาสตร์

รายละเอียด		โคมไฟ	
		HMI	HP-LED
กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	หลอดไฟ	200	104
	Ballast HMI	20	-
ราคา (บาท)	โคมไฟ (include Lamp 200 W + Ballast 20W)	81,600	73,790
	ราคาหลอดไฟ HMI	4,528	-
	อุปกรณ์ขับหลอด HP-LED	-	2,000
	อัตราค่าไฟฟ้า ณ เดือน ตุลาคม 2558	3.5	3.5
สมมติฐาน	อายุการใช้งาน หลอดไฟ (ช.ม.)	2,000	30,000
	ชั่วโมงการทำงานต่อวัน (ช.ม.)	6	6
	อายุโครงการ (ปี)	15	15
	อัตราดอกเบี้ย (%)		
	อัตราเงินกู้ MRR ธนาคารกรุงไทย ณ เดือน ตุลาคม 2558	0.8	0.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการวิจัย

หลังจากการออกแบบ และติดตั้งระบบการตรวจวัดของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W และโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ที่นำมาจัดแสงภายในสตูดิโอ เพื่อหาค่าสมรรถนะทางแสง สมรรถนะทางไฟฟ้า และการวัดค่าการกระจายแสงของโคมไฟ พร้อมความคุ้มค่าในการลงทุนทางเศรษฐศาสตร์ ได้ผลและการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

#### 4.1 การควบคุมผลการศึกษา

เนื่องจากเป็นตรวจวัดเพื่อศึกษาค่าสมรรถนะทางแสง สมรรถนะทางไฟฟ้า และการวัดค่าการกระจายแสงของโคมไฟ ตลอดจนศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าทางผู้วิจัยได้ควบคุมปัจจัยต่างๆ และการขอความอนุเคราะห์ สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ สถานที่ สำหรับการตรวจวัดให้ได้ผลการศึกษาตามมาตรฐาน IES LM-79 08 ประกอบด้วย การควบคุมจำนวนการใช้โคมไฟทั้ง 2 ประเภท โดยการใช้หลอดไฟเอชเอ็มไอ 200 W ที่มีจำนวนชั่วโมงการใช้งานเริ่มต้นมีค่าเป็นศูนย์ ยกเว้นตัวโคมไฟและบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีการใช้งานมาแล้วแต่ยังคงอยู่ในสภาพการใช้งานได้ดีและโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ที่ได้รับการให้ความอนุเคราะห์ใช้โคมไฟที่ยังไม่ได้ผ่านการใช้งาน สำหรับเครื่องมือวัดอยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน และการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของเครื่องมือ ประกอบด้วย เครื่องวัดค่าความรับรังสีรวมของแหล่งกำเนิดแสง (Spectroradiometer) ของ MK350 เครื่องวัดคุณภาพทางไฟฟ้า Chauvin Arnoux C.A. 8335 เครื่องวัดออสซิลโลสโคป ยี่ห้อ RIGOL รุ่น DS1052E สำหรับสถานที่ ได้แก่ การวิจัยด้านสมรรถนะทางแสง ค่าความสว่างของแสง และสีของแสง ใช้สถานที่ในการวัดเป็นสตูดิโอ สำหรับการศึกษาค่าการกระจายแสงของโคมไฟ สมรรถนะทางไฟฟ้า เป็นห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยพลังงานและวิศวกรรมส่องสว่าง ที่มีการควบคุมแสงจากภายนอกไม่ให้รบกวนขณะทำการทดลอง และเพิ่มการดูดซับแสง และลดการสะท้อนแสงจากโคมไฟทั้ง 2 ประเภท ที่ทำการทดลองภายในสตูดิโอ และห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยพลังงานและวิศวกรรมส่องสว่าง ที่ผนังเป็นสีดำ และใช้ผ้าสักหลาดสีดำปูพื้นห้อง ที่สำคัญเปิดให้โคมไฟทั้ง 2 ประเภท ให้ทำงานได้แสงสว่างอยู่ในระดับคงที่ ผู้วิจัยได้กำหนดช่วงเวลาไม่เกิน 10 นาที ทุกการทดลอง สำหรับการศึกษาค่าความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ทางผู้วิจัยได้สำรวจข้อมูล สตูดิโอที่มีแผนสำหรับโครงการปรับปรุงระบบแสงสว่างจากโคมไฟหลอดไฟเอชเอ็มไอ หรือประเภทอื่น มาเป็นโคมไฟหลอดแอลอีดี โดยลงพื้นที่ในการเก็บข้อมูลเชิงพฤติกรรมการใช้กำลังไฟฟ้า ประเภทของระบบแสงสว่าง การตรวจสอบ และบำรุงรักษาประจำปี ตลอดจนค่าใช้จ่ายสำหรับการเริ่มติดตั้งระบบแสงสว่าง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 สมรรถนะทางแสง

### 4.2.1 พื้นฐานทางแสง

ตามหลักการมาตรฐาน IES LM-79 08 กล่าวถึง ค่าความเข้มแสง (Illuminance or Illumination) และประสิทธิภาพการส่องสว่าง (Luminous Efficacy) ของแหล่งกำเนิดแสง สำหรับโคมไฟหลอดแอลอีดี กำลังสูง 104 W และโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W

#### 4.2.1.1 ผลการศึกษาพื้นฐานทางแสง

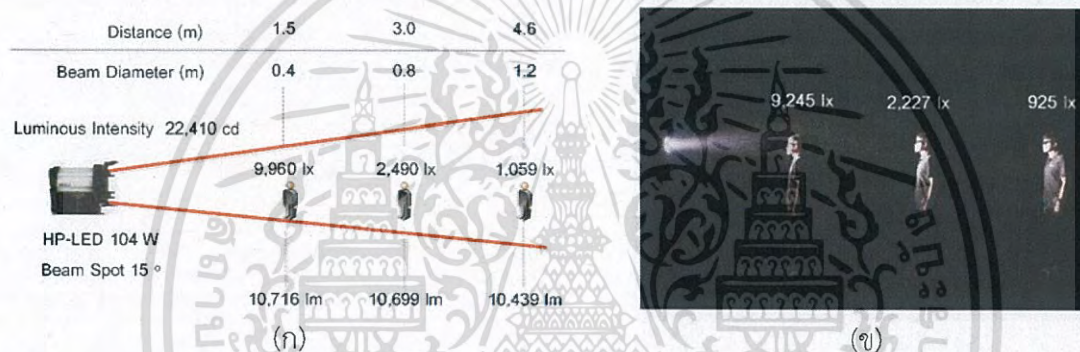
ผลการศึกษาพื้นฐานทางแสง แสดงดังตารางที่ 4.1 ประกอบด้วยตำแหน่งการวัดทั้งหมด 12 จุด ของโคมไฟ 2 ประเภท ที่ห่มวดควบคุมกระจายแสงแบบ Spot 15 องศา และ กระจายแสงกว้าง Flood 50 องศา ที่ระยะห่างโคมไฟถึงตัวแบบจำนวน 3 ระยะ คือ 1.5 3.0 และ 4.6 เมตร ตามลำดับ สำหรับงานวิจัยนี้การศึกษาค่าพื้นฐานทางแสงที่มีความสำคัญต่อการพิจารณา คือ ค่าความเข้มแสง (Lux) โดยเริ่มศึกษาจากการอ่านค่าจากเครื่องวัดความรั้งรังสีรวม จากนั้นนำค่าที่ได้คำนวณหาค่า ฟลักซ์ส่องสว่าง (lm) และความเข้มส่องสว่าง (cd) แต่สำหรับประสิทธิภาพส่องสว่างที่พิจารณาต่อหน่วยกำลังไฟฟ้า ให้นำค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการวัดจริงจากเครื่องวัดคุณภาพทางไฟฟ้านำมาคำนวณ สำหรับผลการศึกษาจากการคำนวณที่แสดงค่าดังตารางที่ 4.1 สำหรับค่าความเข้มแสง พิจารณาห่มวดควบคุมการกระจายแสง และระยะห่างโคมไฟถึงตัวแบบ ของโคมไฟทั้ง 2 ประเภท กรณีเดียวกัน พบว่า ค่าความเข้มแสงจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษาที่ได้จากการวัด

ตารางที่ 4.1 ค่าพื้นฐานทางแสง โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W และหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W

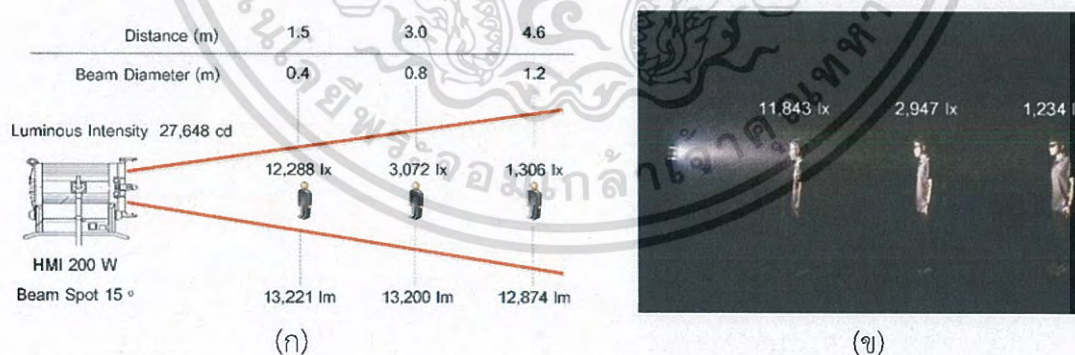
โคมไฟ	ระยะ โคมไฟ (m)	เส้นผ่าน ศูนย์กลางวงแสง (m)	ฟลักซ์ ส่องสว่าง (lm)	ความเข้ม ส่องสว่าง (cd)	ความเข้มแสง (lux)		ประสิทธิภาพ ส่องสว่าง (lm/W)
					คำนวณ	การวัด	
HP-LED 104 W	1.5	0.4	10,716	22,410	9,960	9,245	103.53
	3.0	0.8	10,699	22,410	2,490	2,227	103.37
	15° 4.6	1.2	10,439	22,408	1,059	925	100.85
HMI 200 W	1.5	0.4	13,221	27,648	12,288	11,845	61.60
	3.0	0.8	13,200	27,648	3,072	2,947	61.50
	15° 4.6	1.2	12,874	27,634	1,306	1,234	60.00
HP-LED 104 W	1.5	1.4	10,215	4,446	1,976	1,913	98.69
	3.0	2.8	10,233	4,446	494	448	98.86
	50° 4.6	4.3	10,239	4,443	210	176	98.92
HMI 200 W	1.5	1.4	11,606	5,051	2,245	2,016	54.08
	3.0	2.8	11,621	5,049	561	511	54.16
	50° 4.6	4.3	11,604	5,036	238	203	54.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาจากการวัด หวมควบคุมกระจายแสงแคบ Spot 15° ระหว่างโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ที่มีค่าความเข้มแสงคงที่เท่ากับ 22,410 cd และโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ที่มีค่าความเข้มแสงคงที่เท่ากับ 27,648 cd จากตารางพบว่าที่ระยะห่างโคมไฟถึงตัวแบบ 1.5 เมตร ซึ่งเป็นระยะห่างไกลที่สุด สามารถอธิบายว่า โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W มีค่าความเข้มแสง 9,245 lux ที่ค่าฟลักซ์ส่องสว่าง 10,716 lm ค่าประสิทธิภาพส่องสว่างมีค่า 103.53 lm/W เมื่อเทียบกับโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W มีค่าความเข้มแสงมากที่สุด 11,845 lux ที่ค่าฟลักซ์ส่องสว่าง 13,221 lm ค่าประสิทธิภาพส่องสว่างมีค่า 61.60 lm/W ในขณะที่ระยะห่างโคมไฟถึงตัวแบบ 4.6 เมตร ซึ่งเป็นระยะห่างไกลที่สุด พบว่า โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W มีค่าความเข้มแสง 925 lux ที่ค่าฟลักซ์ส่องสว่าง 10,439 lm ค่าประสิทธิภาพส่องสว่างมีค่า 100.85 lm/W เมื่อเทียบกับโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W มีค่าความเข้มแสงน้อยที่สุด 1,234 lux ที่ค่าฟลักซ์ส่องสว่าง 12,874 lm ค่าประสิทธิภาพส่องสว่างมีค่า 60.00 lm/W แสดงดังรูปที่ 4.1-4.2

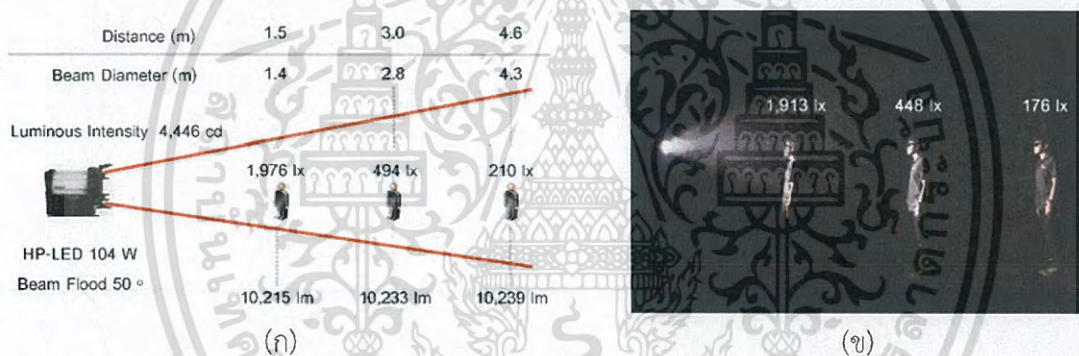


รูปที่ 4.1 การคำนวณค่าพื้นฐานทางแสง (ก) และการวัดค่าความเข้มแสง (ข) ของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา

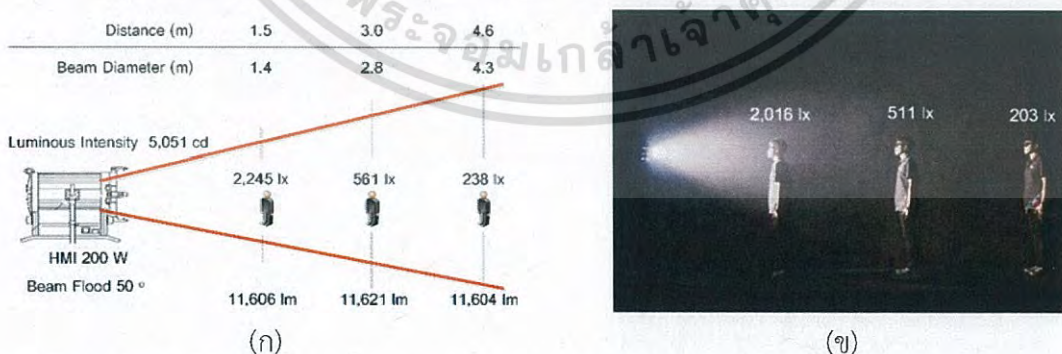


รูปที่ 4.2 การคำนวณค่าพื้นฐานทางแสง (ก) และการวัดค่าความเข้มแสง (ข) ของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา

สำหรับหมวดควบคุมกระจายแสงกว้าง Flood 50° แสดงดังรูปที่ 4.3-4.4 ระหว่าง โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ที่มีค่าความเข้มแสงคงที่เท่ากับ 4,446 cd และโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ที่มีค่าความเข้มแสงคงที่เท่ากับ 5,051 cd จากตารางพบว่าที่ระยะห่างโคมไฟถึงตัวแบบ 1.5 เมตร ซึ่งเป็นระยะห่างใกล้ที่สุด สามารถอธิบายว่า โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W มีค่าความเข้มแสง 1,913 lux ที่ค่าฟลักซ์ส่องสว่าง 10,215 lm ค่าประสิทธิภาพส่องสว่างมีค่า 98.69 lm/W เมื่อเทียบกับโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W มีค่าความเข้มแสงมากที่สุด 2,016 lux ที่ค่าฟลักซ์ส่องสว่าง 11,606 lm ค่าประสิทธิภาพส่องสว่างมีค่า 54.08 lm/W ในขณะที่ระยะห่างโคมไฟถึงตัวแบบ 4.6 เมตร ซึ่งเป็นระยะห่างไกลที่สุด พบว่าโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W มีค่าความเข้มแสง 176 lux ที่ค่าฟลักซ์ส่องสว่าง 10,239 lm ค่าประสิทธิภาพส่องสว่างมีค่า 98.92 lm/W เมื่อเทียบกับโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W มีค่าความเข้มแสงน้อยที่สุด 203 lux และมีค่าฟลักซ์ส่องสว่าง 11,604 lm ค่าประสิทธิภาพส่องสว่างมีค่า 54.07 lm/W สำหรับผลการศึกษจากการคำนวณที่แสดงค่าดังตารางที่ 4.1 สำหรับค่าความเข้มแสงพิจารณาหมวดควบคุมการกระจายแสง และระยะห่างโคมไฟถึงตัวแบบ ของโคมไฟทั้ง 2 ประเภท กรณีเดียวกัน พบว่า ค่าความเข้มแสงจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษาที่ได้จากการวัด



รูปที่ 4.3 การคำนวณค่าพื้นฐานทางแสง (ก) และการวัดค่าความเข้มแสง (ข) ของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา



รูปที่ 4.4 การคำนวณค่าพื้นฐานทางแสง (ก) และการวัดค่าความเข้มแสง (ข) ของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1.2 วิเคราะห์ผลการวิจัยพื้นฐานทางแสง

สำหรับงานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการวัดค่าความเข้มแสง (Illuminance or Illumination) ในหน่วยลักซ์ ของโคมไฟจำนวน 2 โคม ประกอบด้วย โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W และโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ที่เกิดจากการวัด 2 องศาการกระจายแสง ตลอดระยะห่างจากโคมไฟถึงตัวแบบ 3 ระยะทาง รวม ทั้งหมด 12 ตำแหน่ง ด้วยเครื่องวัดค่าการรับรังสีรวมของแหล่งกำเนิดแสง (Spectroradiometer) ผลจากการวัดที่ได้จากเครื่องวัดของโคมไฟทั้ง 2 ประเภททุกตำแหน่ง ผู้วิจัยได้ระบุค่าความเข้มส่องสว่างที่เกิดจากชั้นตอนการวัดแสดงดังรูป (ข) ที่ 4.1-4.4 และสรุปลงในตารางที่ 4.2 ผลปรากฏว่าค่าความเข้มแสง ที่ตำแหน่งลำแสงรวม (Spot) 15 องศา ของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอมีค่าสูงสุด 11,845 lux ในขณะที่หลอดแอลอีดีกำลังสูงมีค่า 9,245 lux และค่าความเข้มแสงต่ำสุด หลอดเอชเอ็มไอมีค่า 1,234 lux และค่าความเข้มแสงต่ำสุดของหลอดแอลอีดีกำลังสูงมีค่า 925 lux สำหรับที่ตำแหน่งลำแสงกระจายออก (Flood) 50 องศา ของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอมีค่าสูงสุด 2,016 lux ในขณะที่หลอดแอลอีดีกำลังสูงมีค่า 1,913 lux และค่าความเข้มแสงต่ำสุด หลอดเอชเอ็มไอมีค่า 203 lux และค่าความเข้มแสงต่ำสุดของหลอดแอลอีดีกำลังสูงมีค่า 176 lux สรุปค่าความเข้มแสงโดยรวมทุกตำแหน่งของโคมไฟทั้ง 2 ประเภท สามารถนำมาทดแทนการจัดแสงให้เกิดความสว่างของตัวแบบได้โดยไม่ต้องคำนวณถึงปริมาณค่าความเข้มแสง แต่จะพิจารณาความเข้มแสงที่ปรากฏขณะบันทึกภาพให้เกิดความสว่างบนตัวแบบไม่มีติดจนเกินไป และไม่จำเป็นที่จะต้องอาศัยความเข้มแสงเป็นจำนวนมาก อาจทำให้ไม่สามารถเห็นรายละเอียดความแตกต่างบนตัวแบบได้หรือกล่าวได้ว่าไม่เกิดมิติบนตัวแบบ ตามหลักการจัดแสงที่กล่าวในบทที่ 2 สำหรับการคำนวณค่าพื้นฐานทางแสง ของโคมไฟทั้ง 2 ประเภท จะต้องเริ่มจากการคำนวณค่าความเข้มส่องสว่าง (Luminous Intensity) พบว่าหลังจากการคำนวณมีค่าแตกต่างจากการวัดมีค่าคลาดเคลื่อนไม่มาก และผลการคำนวณสังเกตว่าค่าความเข้มส่องสว่างมีค่าเท่ากันตามระยะทางจุดตำแหน่งการวัดที่ตำแหน่งเดียวกัน เนื่องจากปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์ส่องสว่างที่มาจากแหล่งกำเนิดแสงเริ่มต้นจากแหล่งเดียว และเมื่อนำค่าความเข้มแสงไปคำนวณหาค่าความเข้มแสง พบว่ามีค่าเท่ากันตามตำแหน่งจุดการวัดที่ตั้งสมมติฐานการวัดเดียวกันเนื่องจากพื้นผิวที่แสงตกกระทบเปลี่ยนแปลงแต่ค่าความเข้มแสงไม่เปลี่ยนแปลง สำหรับการคำนวณค่าฟลักซ์ส่องสว่าง (Luminous Flux) ต้องนำค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของวงลำแสงคำนวณหาค่าพื้นที่ผิว (Surface Area) ผลการคำนวณพบว่า ค่าฟลักซ์ส่องสว่างของโคมไฟทั้ง 2 ประเภท มีค่าสูงสุด 13,221 lm ถึง ต่ำสุด 10,215 lm หรือกล่าวว่ามีค่าพลังงานแสงสว่างใกล้เคียงกัน จึงสรุปว่าสามารถนำโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ทดแทนโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ได้ นอกจากนี้การหาค่าประสิทธิภาพการส่องสว่าง (Luminous Efficacy) สามารถคำนวณจากค่าฟลักซ์ส่องสว่างพิจารณาต่อหน่วยกำลังไฟฟ้าจริงของโคมไฟ พบว่าโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง มีค่าสูงสุด 103.53 lm/W ในขณะที่โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอมีค่าสูงสุดเพียง 61.60 lm/W โดยแสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวกที่ ค.1

## 4.2.2 พื้นฐานค่าสีของแสง (Colorimetry Terms)

### 4.2.2.1 ผลการศึกษาค่าสีของแสง

ผลการศึกษาค่าสีของแสง ประกอบด้วยค่าไตรสติมูลัส CIE-1931  $X, Y, Z$  ที่ได้กำหนดการอ่านค่าในรูปแบบ 2 แกน ตามแกนโครมาติซิตีไดอะแกรม (CIE Chromaticity Diagram) ได้แก่ ระบบแกน CIE-1931  $(x, y)$  และ CIE-1976  $(u', v')$  พร้อมค่าอุณหภูมิสีของแสง (Correlated Color Temperature:  $CCT, T_{cp}$ ) และค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสง (Color Rendering Index,  $CRI, R_a$ ) ผลของการวัดโดยใช้เครื่องวัดค่าการรับรังสีรวมของแหล่งกำเนิดแสง (Spectroradiometer) MK305 ที่เกิดจากการวัดทั้งหมด 12 จุด ของโคมไฟ 2 ประเภท ที่หมวดควบคุมกระจายแสงแคบ Spot 15 องศา และกระจายแสงกว้าง Flood 50 องศา ที่ระยะห่างโคมไฟถึงตัวแบบจำนวน 3 ระยะ คือ 1.5 3.0 และ 4.6 เมตร ตามลำดับ ภาพรวมค่าสีของแสงที่ตำแหน่งต่างๆ ที่อ่านมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากคุณสมบัติค่าสีของแสงจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดแสงเท่านั้น และพบว่าค่าสีของแสงต่างๆ มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน เช่น นำค่า CIE-1931  $(x, y)$  ใช้คำนวณหาค่าอุณหภูมิสีของแสง และนำค่า CIE-1931  $(x, y)$  และ CIE-1976  $(u', v')$  สามารถนำไปคำนวณหาค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสง ตารางที่ 4.2 พบว่าค่าอุณหภูมิสีของแสงจากโคมไฟหลอดแอลอีดี 104 W ที่วัดได้อยู่ระหว่าง 6000K ถึง 6500K และค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสง มีค่าอยู่ระหว่าง 88% ถึง 91% สำหรับค่าอุณหภูมิสีของแสงจากโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ที่วัดได้อยู่ระหว่าง 5200K ถึง 5700K และค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสง มีค่าอยู่ระหว่าง 74% ถึง 78%

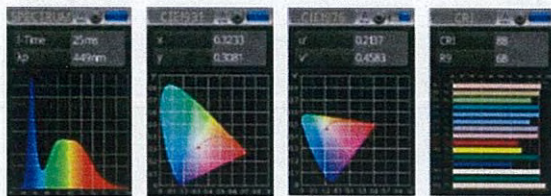
ตารางที่ 4.2 ค่าสีของแสงโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W และหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W

โคมไฟ	ระยะโคมไฟ (m)	เส้นผ่านศูนย์กลางวงแสง (m)	CIE-1931		CIE-1976		CCT (K)	CRI (%)
			$x$	$y$	$u'$	$v'$		
HP-LED 104 W 15°	1.5	0.4	0.3233	0.3081	0.2173	0.4583	6023	88
	3.0	0.8	0.3232	0.3068	0.2142	0.4575	6030	89
	4.6	1.2	0.3217	0.3045	0.2140	0.4560	6135	90
HMI 200 W 15°	1.5	0.4	0.3333	0.3260	0.2134	0.4698	5450	75
	3.0	0.8	0.3362	0.3278	0.2147	0.4712	5312	75
	4.6	1.2	0.3281	0.3224	0.2112	0.4670	5713	74
HP-LED 104 W 50°	1.5	1.4	0.3194	0.3019	0.2134	0.4540	6306	89
	3.0	2.8	0.3152	0.2959	0.2129	0.4498	6657	91
	4.6	4.3	0.3088	0.2871	0.2120	0.4434	7292	89
HMI 200 W 50°	1.5	1.4	0.3382	0.3287	0.2158	0.4720	5219	76
	3.0	2.8	0.3356	0.3245	0.2157	0.4693	5333	78
	4.6	4.3	0.3300	0.3174	0.2146	0.4646	5615	82

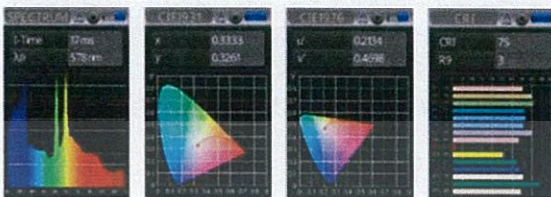
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ค่าผลการศึกษาที่แสดงในตารางที่ 4.2 เกิดจากผลการวัดโดยใช้เครื่องวัดค่าการรับรังสีรวมของแหล่งกำเนิดแสง (Spectroradiometer) MK305 ผลการศึกษาที่ได้จากเครื่องวัดยังประกอบด้วยภาพไดอะแกรมของความยาวคลื่นสีของแสง (Spectrum) โครมาติซิตีไดอะแกรม CIE-1931 ( $x, y$ ) CIE-1976 ( $u', v'$ ) และกราฟแท่งของค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสง ของแต่ละคุณสมบัติค่าสีของแสงทั้งหมด 12 ตำแหน่ง ยกเว้นค่าอุณหภูมิสีของแสงที่สามารถประมาณการอ่านด้วยการลากจุดตัดค่าบนแกนของกราฟโครมาติซิตีไดอะแกรม CIE-1931 ( $x, y$ ) หรือ CIE-1976 ( $u', v'$ ) โดยเทียบกับสีของแสงที่เกิดจากพื้นฐานกราฟการแปลงสีของเส้นการเผาไหม้วัตถุดำอุดมคติ (Black body) สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาการนำแหล่งกำเนิดแสงหลอดเอชเอ็มไอ ที่มีอุณหภูมิสีของแสงประมาณ 5600K ทดแทนแหล่งกำเนิดแสงหลอดแอลอีดี ที่มีอุณหภูมิสีของแสงประมาณ 6000K เทียบได้กับแสงธรรมชาติ คือแสงอาทิตย์ในช่วงเวลาเพียงวันที่ให้แสงสีขาวมีอุณหภูมิสีประมาณ 5500K มีอุณหภูมิสีของแสงสูงให้โทนสีเย็น ดังนั้น สังเกตว่าจุดตัดบนกราฟโครมาติซิตีไดอะแกรม ทั้ง 2 ประเภท โดยทั่วไปอยู่ในช่วงโทนสีเย็น ตัวอย่าง รูปที่ 4.5 ก กรณีโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ตำแหน่งกระจายแสงแคบ  $15^\circ$  ที่ระยะห่างโคมไฟถึงตัวแบบ คือ 1.5 เมตร เมื่อพิจารณาจุดตัดบนแกนของกราฟโครมาติซิตีไดอะแกรม CIE-1931 ( $x, y$ ) มีค่า  $x$  เท่ากับ 0.3233 และ ค่า  $y$  มีค่า 0.3081 เมื่อลากเส้นหาจุดตัดบนเส้นการเผาไหม้วัตถุดำอุดมคติที่ปรากฏบนกราฟ พบว่าอุณหภูมิสีของแสงอยู่บริเวณพื้นที่ให้โทนสีเย็น และเมื่อพิจารณาจุดตัดบนแกนของกราฟโครมาติซิตีไดอะแกรม CIE-1976 ( $u', v'$ ) มีค่า  $u'$  เท่ากับ 0.2137 และ ค่า  $v'$  มีค่า 0.4583 เมื่อลากจุดตัดบนกราฟจะพบว่าอุณหภูมิสีของแสงอยู่บริเวณพื้นที่ให้โทนสีเย็นเช่นกัน สอดคล้องกับภาพไดอะแกรมของความยาวคลื่นสีของแสง (Spectrum) อยู่ในช่วง 400 nm-700 nm ที่ประสาทตาของมนุษย์ที่รับรู้สีได้ และสามารถมองเห็นแยกแยะสีด้วยตา พบว่า มีค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 449 nm เป็นช่วงความยาวคลื่น 430-450 คราม (Indigo) หรือ 450-480 น้ำเงิน (Blue) นอกจากนี้ค่าอุณหภูมิสีของแสงยังพิจารณาความถูกต้องสีของแสงด้วยค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสง  $CRI$  มีค่าเท่ากับ 88 % และสังเกตว่ากราฟแท่งของค่าดัชนีความถูกต้องสีเฉพาะสีแดง เรียกว่า  $R_9$  มีค่า 68 % แสดงค่าดัชนีสีที่ปรากฏพิเศษ ที่บ่งบอกความสามารถในการตอบสนองต่อสีแดง สำหรับสีของแสงจากหลอดแอลอีดี โดยมากมีปัญหาในการส่องวัตถุสีแดงแล้วไม่สามารถเห็นสีแดงได้ชัดเจน และกรณีโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ดังรูปที่ 4.5 ข มีค่า  $x$  เท่ากับ 0.3333 และ ค่า  $y$  มีค่า 0.3261 และค่า  $u'$  เท่ากับ 0.2137 และ ค่า  $v'$  มีค่า 0.4583 พบว่าอุณหภูมิสีของแสงอยู่บริเวณพื้นที่ให้โทนสีเย็นและกึ่งร้อน ผสมกัน เช่นกัน และสอดคล้องกับภาพไดอะแกรมของความยาวคลื่นสีของแสงเท่ากับ 578 nm เป็นช่วงความยาวคลื่น 570-590 เหลือง (Yellow) ความถูกต้องสีของแสงด้วยค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสง  $CRI$  มีค่าเท่ากับ 74 % สังเกตว่ากราฟแท่งของค่าดัชนีความถูกต้องสีเฉพาะสีแดง เรียกว่า  $R_9$  มีค่า 1 % สำหรับการอ่านค่าจากเครื่องวัดค่าการรับรังสีรวมของแหล่งกำเนิดแสงตำแหน่งอื่น ๆ แสดงดังรูปที่ 4.5-4.10 สามารถอ่านค่าและอธิบายค่าได้ในลักษณะเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

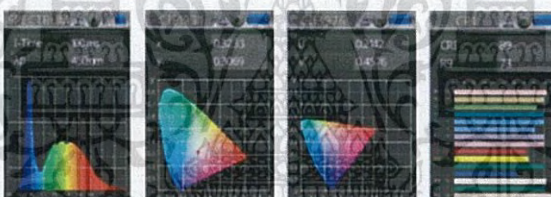


(ก)

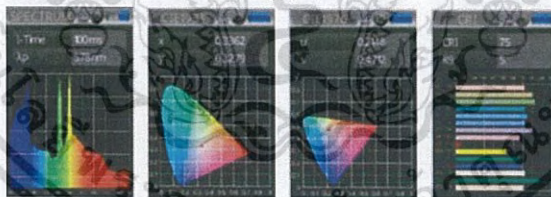


(ข)

รูปที่ 4.5 ตัวแปรการติดตั้ง T = 1.5 m, Beam Diameter = 0.4 m ของโคมไฟ HP-LED 104 W ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา (ก) และโคมไฟ HMI 200 W ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา (ข)



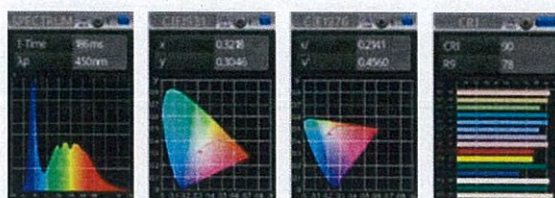
(ก)



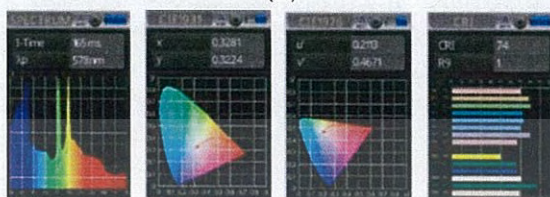
(ข)

รูปที่ 4.6 ตัวแปรการติดตั้ง T = 3.0 m, Beam Diameter = 0.8 m ของโคมไฟ HP-LED 104 W ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา (ก) และโคมไฟ HMI 200 W ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

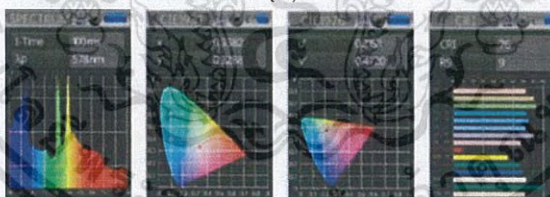


(ข)

รูปที่ 4.7 ตัวแปรการติดตั้ง  $T = 4.6$  m, Beam Diameter = 1.2 m ของโคมไฟ HP-LED 104 W ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา (ก) และโคมไฟ HMI 200 W ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา (ข)



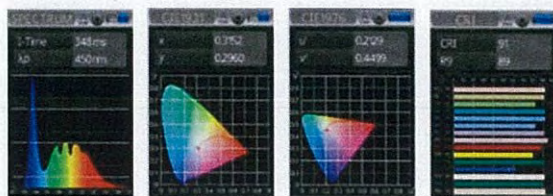
(ก)



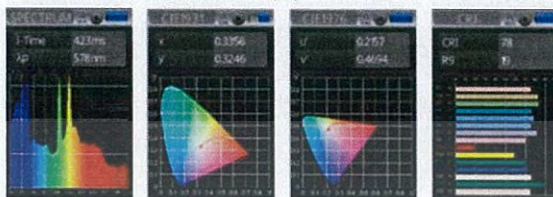
(ข)

รูปที่ 4.8 ตัวแปรการติดตั้ง  $T = 1.5$  m, Beam Diameter = 1.4 m ของโคมไฟ HP-LED 104 W ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา (ก) และโคมไฟ HMI 200 W ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

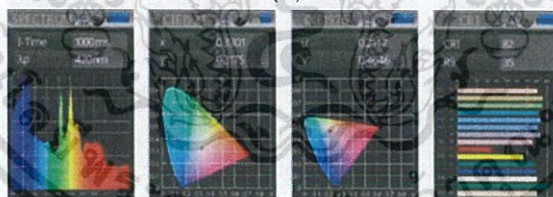


(ข)

รูปที่ 4.9 ตัวแปรการติดตั้ง  $T = 3.0$  m, Beam Diameter = 2.8 m ของโคมไฟ HP-LED 104 W ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา (ก) และโคมไฟ HMI 200 W ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.10 ตัวแปรการติดตั้ง  $T = 4.6$  m, Beam Diameter = 4.3 m ของโคมไฟ HP-LED 104 W ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา (ก) และโคมไฟ HMI 200 W ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา (ข)

4.2.2.2 วิเคราะห์ผลการวิจัยพื้นฐานค่าสีของแสง

จากผลของการศึกษาตัวแปรค่าสีของแสงของโคมไฟ ทั้ง 2 ประเภท จากการวัด 2 องศาการกระจายแสง ตลอดระยะห่างจากโคมไฟถึงตัวแบบ 3 ระยะทาง รวม 12 ตำแหน่ง ด้วยเครื่องวัดค่าการรับรู้สีรวมแหล่งกำเนิดแสง (Spectroradiometer) โดยยึดตามมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ ผลการวัดที่ได้จากเครื่องวัดของโคมไฟทั้ง 2 ประเภททุกตำแหน่งแสดงดังรูปที่ 4.5-4.10 และนำค่าที่ได้มาสรุปดังตารางที่ 4.2 จากผลการวัดของเครื่อง พอสรุปการวิเคราะห์ประกอบด้วย ความยาวคลื่นสีของแสง (Spectrum)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่า ความยาวคลื่นสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงหลอดแอลอีดีกำลังสูงมีค่าเฉลี่ยเทียบได้กับความยาว 450nm มีค่าอุณหภูมิสีของแสงประมาณ 6000K สำหรับหลอดเอชเอ็มไอ 200 W มีค่าเฉลี่ยที่ความยาวคลื่น 578nm เทียบได้กับอุณหภูมิสีของแสงประมาณ 5700K ที่อ้างอิงตามข้อมูลตารางที่ 2.5 สำหรับกราฟระบบแกน CIE-1931 ( $x, y$ ) พบว่าค่า  $x$  มีค่ามากกว่าค่า  $y$  เมื่อนำค่ามาพล็อตกราฟหาจุดตัดบนกราฟจะพบว่าค่าจุดดังกล่าวอยู่บริเวณพื้นที่แสงสีน้ำเงินอ่อน ใกล้กับจุดบริเวณพื้นที่แสงสีขาวคือ จุดที่ค่า  $x$  และค่า  $y$  มีค่า 0.3333 เท่ากัน และเมื่อพิจารณากราฟระบบแกน CIE-1976 ( $u', v'$ ) พบว่าค่า  $u'$  มีค่าน้อยกว่าค่า  $v'$  และเมื่อนำค่ามาพล็อตกราฟหาจุดตัดบนกราฟอยู่บริเวณพื้นที่แสงสีน้ำเงินอ่อน เช่นเดียวกับระบบ CIE-1931 ( $x, y$ ) หลังจากได้ค่า  $x$  และ  $y$  แทนลงในสมการที่ 2.30 และคำนวณต่อตามสมการที่ 2.31 ตามลำดับเพื่อหาค่าอุณหภูมิสีของแสง (Correlated Color Temperature:  $CCT, T_{cp}$ ) แสดงดังภาคผนวก ค.2 และสามารถนำค่า  $CCT$  ที่ได้ไปพิจารณาร่วมกับกราฟระบบแกน CIE-1931 ( $x, y$ ) หรือ CIE-1976 ( $u', v'$ ) สำหรับพื้นฐานค่าสีของแสงที่มีความสำคัญมากที่บ่งบอกถึงสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่นำมาส่องวัตถุที่ต้องการให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสีไม่ผิดเพี้ยน คือค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสง (Color Rendering Index,  $CRI$  หรือ  $R_a$ ) พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์  $CRI$  ที่ยอมรับมีค่าสูงกว่า 70 % ตามมาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 4487 (พ.ศ.2555) เรื่องกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมวิธีการวัดและระบุสมบัติสีที่ปรากฏของแหล่งกำเนิดแสง สำหรับโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูงพบว่าค่า  $CRI$  อยู่ระหว่าง 88%-91% เมื่อเทียบกับโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ ค่า  $CRI$  อยู่ระหว่าง 74%-80% นอกจากการพิจารณาค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสงเฉลี่ย  $CRI$  หรือ  $R_a$  นอกจากนี้ยังปรากฏกราฟแท่งที่แสดงอยู่ในรูปแสดงค่า  $R_9$  หมายถึงค่าดัชนีความถูกต้องเฉพาะสีที่ 9 แสดงค่าสีของแสงสีแดง มีค่า  $CCT$  เท่ากับ 3200K จากผลการวัดพบว่า  $R_9$  หลอดไฟแอลอีดีกำลังสูงมีค่าประมาณ 70% และสำหรับค่า  $R_9$  หลอดไฟเอชเอ็มไอ มีค่าน้อยกว่า 10 % หมายถึงมีความผิดเพี้ยนของสีแดง สำหรับการหาค่า  $CRI$  หรือ  $R_a$  สามารถทำได้ด้วยวิธีการคำนวณ ตามขั้นตอนการหาค่าที่ระบุตามมาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฯ ตัวอย่างคำนวณในภาคผนวก ค.3 หลักการคำนวณต้องมีการกำหนดแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง งานวิจัยนี้กำหนดใช้แหล่งกำเนิดแสงกลางวัน (Daylight 6500K) หรือเรียกว่า D65 เนื่องจากโคมไฟ หลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W และหลอดเอชเอ็มไอ 200 W จัดเป็นแหล่งกำเนิดแสงทดสอบจัดอยู่ในกลุ่มให้แสงกลางวันหรือให้ค่าอุณหภูมิสีของแสงประมาณ 6000K

#### 4.2.3 การกระจายแสงของโคม (Lighting Distributions)

##### 4.2.3.1 ผลการศึกษาการกระจายแสงของโคม

การวิจัยโคมไฟดังกล่าวทั้ง 2 ประเภท นำโคมไฟติดตั้งเข้ากับเครื่องวัดค่าการกระจายความเข้มแสงสว่าง (Gonio photometer) ประเภทอาศัยการหมุนของกระจก เปิดโคมไฟให้ทิศทางแสงส่องไปยังแผ่นกระจกที่หมุนตามแกนในแนวตั้ง (0 องศา ถึง -90 องศา) และแนวนอน (0 องศา ถึง 360 องศา) เพื่อให้แสงสะท้อนไปยังเครื่องวัดแสงสำหรับบันทึกข้อมูล IES File แสดงดังภาคผนวกที่ ก. จะได้ข้อมูลการกระจายแสงโคมไฟทั้ง 2 แกน และนำข้อมูลที่ได้ไปประมวลผลภายใต้โปรแกรม DIALux ตามขั้นตอนโปรแกรม เพื่อศึกษารูปแบบการกระจายแสงโคมไฟ ด้วยการกำหนดข้อมูลเบื้องต้น ได้แก่ สถิติโอ กว้าง 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมตร ยาว 9 เมตร สูง 4 เมตร ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัตถุที่เพดาน, ผนัง และพื้น เป็น 70%, 50% และ 20% ตามลำดับ พื้นที่จัดแสงอยู่สูงจากพื้น 0.75 เมตร ข้อมูลโคมไฟประเภทคอมแพคเฟอสเนลเลนส์ ได้แก่ หลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ของผลิตภัณฑ์ Litepanels Sola 6 และ หลอดเอชเอ็มไอ 200 W ของผลิตภัณฑ์ Arri

สำหรับลักษณะกราฟกระจายแสงไอโซอินเทนซิตี (Iso-Intensity curve) แสดงดังรูปที่ 4.11 ในลักษณะการกระจายแสงแคบ Spot 15 องศา พบว่าค่าความเข้มส่องสว่างสูงสุดของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W มีค่า 22,410 cd และโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W มีค่า 27,648 cd สำหรับรูปที่ 4.12 ในลักษณะการกระจายแสงกว้าง Flood 50 องศา พบว่าค่าความเข้มส่องสว่างต่ำสุดของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W มีค่า 4,446 cd และโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W มีค่า 5,051 cd



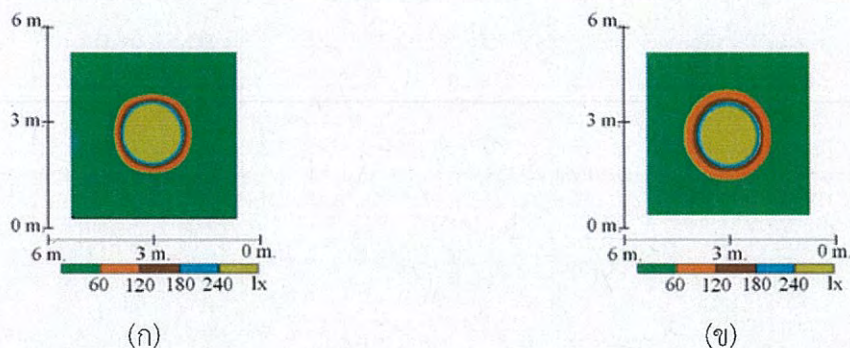
รูปที่ 4.11 การกระจายแสงของโคมแบบไอโซอินเทนซิตี ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา HP-LED 104 W (ก) และ HMI 200 W (ข)



รูปที่ 4.12 การกระจายแสงของโคมแบบไอโซอินเทนซิตี ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา HP-LED 104 W (ก) และ HMI 200 W (ข)

สำหรับไอโซลักซ์ (Iso-lux Curve) แสดงดังรูปที่ 4.13 ในลักษณะการกระจายแสงแคบ Spot 15° แสดงพื้นที่ความเข้มแสงโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W และโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ประมาณอ่านค่าได้ที่สเกลค่า 300 lux หรือเปอร์เซ็นต์สูงบนพื้นสี่เหลี่ยมวงกลมจุดกึ่งกลาง มีค่าประมาณ 9,000 lux สำหรับรูปที่ 4.12 ลักษณะการกระจายแสงกว้าง Flood 50° พื้นที่ความเข้มแสงของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W และโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ประมาณการอ่านค่าได้ที่สเกลค่า 300 lux หรือเปอร์เซ็นต์ต่ำบนพื้นสี่เหลี่ยมวงกลมจุดกึ่งกลาง มีค่าประมาณ 1,900 lux

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

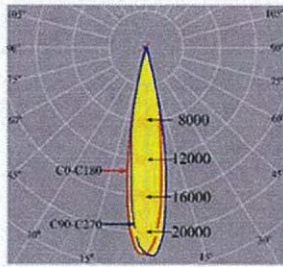


รูปที่ 4.13 การกระจายแสงของโคมแบบไอโซลักซ์ ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา HP-LED 104 W (ก) และ HMI 200 W (ข)

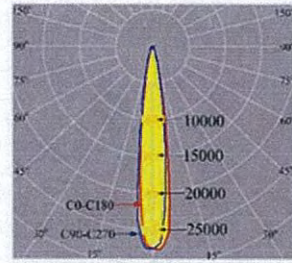


รูปที่ 4.14 การกระจายแสงของโคมแบบไอโซลักซ์ ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา HP-LED 104 W (ก) และ HMI 200 W (ข)

สำหรับโพลาร์เคิร์ฟ (Polar curve) แสดงดังรูปที่ 4.15 ในลักษณะการกระจายแสงแคบ Spot 15° แสดงในรูปทรงกรวยพิจารณาตามความเข้มแสงต่อฟลักซ์ส่องสว่าง (cd/klm) ตามทิศทางสมมาตรแนวนอน ประกอบด้วย 2 รูปทรงกรวย (0 องศา ถึง 180 องศา) และ (90 องศา ถึง 270 องศา) ของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W และโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ประมาณการอ่านค่าได้ที่ปลายสุดของกราฟทรงกรวยมีค่า 25,000 cd และ 27,000 cd ตามลำดับ สำหรับรูปที่ 4.16 การกระจายแสงกว้าง Flood 50 องศา โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W และโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ประมาณค่าได้ที่ปลายสุดของกราฟทรงกรวยมีค่า 4,500 cd และ 5,000 cd ตามลำดับ

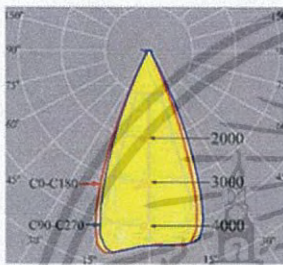


(ก)

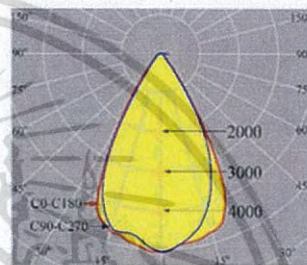


(ข)

รูปที่ 4.15 การกระจายแสงของโคมแบบโพลาร์เคิร์ฟ ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา HP-LED 104 W (ก) และ HMI 200 W (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.16 การกระจายแสงของโคมแบบโพลาร์เคิร์ฟ ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา HP-LED 104 W (ก) และ HMI 200 W (ข)

และจากการศึกษาข้างต้นได้แสดงลักษณะการกระจายแสงในรูปแบบความกว้างของลำแสง (Performance Cones หรือ Beam Spread) แสดงดังรูปที่ 4.17-4.18 สังเกตด้วยตาพบว่าความเข้มแสงโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ที่ตำแหน่งลักษณะการกระจายแสงแคบ และกว้าง ลักษณะการกระจายของแสงมีความเข้มแสงไม่มาก และโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W มีความเข้มแสงมากกว่า แต่การจัดแสงให้กับตัวบุคคล ผู้จัดแสงอาจไม่มีความจำเป็นที่ต้องให้เกิดความเข้มแสงปริมาณมาก เนื่องจากความเข้มแสงสว่างเกินไปสำหรับบันทึกภาพส่งผลให้ไม่เกิดมิติของภาพที่บันทึกและหากสังเกตที่ระยะต่างๆ ความเข้มแสงของโคมไฟทั้ง 2 ประเภท เพียงพอสำหรับการบันทึกภาพ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.17 การกระจายแสงของโคมไฟแบบโพลาร์เคิร์ฟ ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา HP-LED 104 W (ก) และ HMI 200 W (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.18 การกระจายแสงของโคมไฟแบบโพลาร์เคิร์ฟ ตำแหน่ง Beam Flood 50 องศา HP-LED 104 W (ก) และ HMI 200 W (ข)

#### 4.2.3.2 วิเคราะห์ผลการวิจัยการกระจายแสงของโคม

สำหรับงานวิจัยนี้ติดตั้งเครื่องวัดค่าการกระจายความเข้มส่องสว่าง (Gonio photometer) ประเภทอาศัยการหมุนของกระจก ระหว่างโคมไฟหลอดแอลอีดี 104 W และโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W เพื่อทดสอบการกระจายแสงของโคมไฟ แสดงผลในรูปแบบกราฟ ไอโซอินเทนซิตี (Iso-Intensity curve) ไอโซลักซ์ (Iso-lux Curve) และแบบโพลาร์เคิร์ฟ (Polor curve) แสดงดังรูปที่ 4.13-4.18 สามารถวิเคราะห์ผลโดยรวมพบว่าลักษณะลำแสงการกระจายแคบ Spot 15° และลักษณะของลำแสงการกระจายกว้าง Flood 50° ของโคมไฟทั้ง 2 ประเภท สำหรับการจัดแสงให้กับตัวบุคคล มีค่าความเข้มแสงไม่แตกต่างกัน พิจารณาได้จากค่า กราฟกระจายแสงไอโซอินเทนซิตี (Iso-Intensity curve) แสดงดังรูปที่ 4.11 ค่าความเข้มส่องสว่างสูงสุดของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W มีค่า 22,410 cd และโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W มีค่า 27,648 cd มีค่าในระดับที่ไม่แตกต่างกัน และในลักษณะการกระจายแสงกว้าง พบว่าค่าความเข้มส่องสว่างต่ำสุดของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W มีค่า 4,446 cd และโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W มีค่า 5,051 cd จึงสรุปว่าโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W อาจจะมีค่ามากกว่าโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ไม่มาก ทำให้สามารถนำมาใช้สำหรับการจัดแสงทดแทนกันได้ และคู่มือของโคมไฟโดยทั่วไปจะระบุคุณสมบัติต่างๆ เช่น ค่าความเข้มส่องสว่าง ในหน่วย Lux หรือ Foot candle ทุกช่วงระยะของลำแสง ในรูปแบบกราฟกระจายแสงโพลาร์เคิร์ฟ และยังพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุที่โคมไฟทั้ง 2 ประเภทสามารถนำมาทดแทนกันได้ เนื่องจากคุณสมบัติทางไฟฟ้า คือค่ากระแสไฟฟ้าสำหรับการจ่ายให้กับวงจรไฟฟ้าสำหรับให้หลอดไฟทำงานมีค่าใกล้เคียงกัน ทำงานโดยอาศัยการคายประจุภายในหลอดที่จะต้องใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ และค่ากระแสไฟฟ้า 1.7A เพื่อผลักดันอิเล็กตรอนให้ทำงานเกิดการแตกตัวเปล่งเป็นแสงออกมาจากภายในหลอดไฟ เมื่อเทียบกับหลอดไฟแอลอีดีกำลังสูง 104 W ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ค่าวงจรขั้วแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จาก 220 โวลต์ 1.6A ให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์ 0.5A จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านน้อย เนื่องจากจะต้องอาศัยการทำงานจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำแคโทดและแอโนดที่มีการจับตัวกัน และคายพลังงานออกมาในรูปแสงสว่างที่ใช้ค่ากระแสไฟฟ้าจำกัด

### 4.3 สมรรถนะทางไฟฟ้า (Electrical Performances)

#### 4.3.1 ผลการศึกษาปริมาณของระบบไฟฟ้า

การศึกษางานวิจัยระหว่างโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขั้วหลอดแอลอีดีกำลังสูง รุ่น 24VDA 5A และโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ที่ทำงานร่วมกับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ รุ่น L4.76115.0 ทั้ง 2 ประเภท สำหรับวัดค่าปริมาณทางไฟฟ้าเริ่มจากการเปิดให้โคมไฟแต่ละประเภททำงานให้แสงสว่างคงที่ด้วยระยะเวลาประมาณ 10 นาที ก่อนบันทึกค่าปริมาณต่างๆ ของระบบไฟฟ้า ด้วยระยะเวลาประมาณ 3 นาที ด้วย เครื่องวัด Chauvin Arnoux C.A. 8335 แสดงค่าต่างๆ ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาปริมาณทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางไฟฟ้า

โคมไฟ	ปริมาณทางไฟฟ้า						คุณภาพทางไฟฟ้า	
	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้าปรากฏ (VA)	กำลังไฟฟ้าจริง (W)	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (VAR)	PF	THD <sub>v</sub> (%)	THD <sub>i</sub> (%)
HP-LED 104 W	225.2	0.480	109.6	103.5	-36.2	0.94	2.2	30
HMI 200 W	224.3	1.763	393.1	214.6	-330	0.54	2.2	140

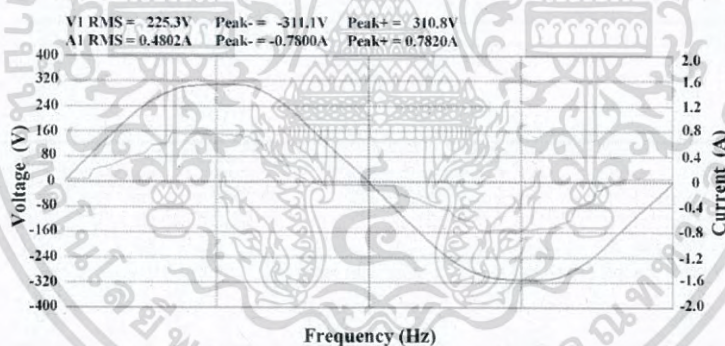
จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าของโคมไฟ 2 ประเภทไม่แตกต่างกัน มีค่าประมาณ 220V เนื่องจากระบบแรงดันไฟฟ้ามีความเสถียรภาพ สำหรับค่ากระแสไฟฟ้าพบว่าโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W มีค่ากระแสไฟฟ้ามากกว่าประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ และค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W มีค่า 109.6 VA แต่สำหรับโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W มีค่า 393.1 VA ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลรวมของค่ากำลังไฟฟ้าจริงจากการจ่ายให้วงจรขั้วและบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ และหลอดไฟ ในส่วนของกำลังไฟฟ้าจริง พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังงานของโคมไฟทั้ง 2 ประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

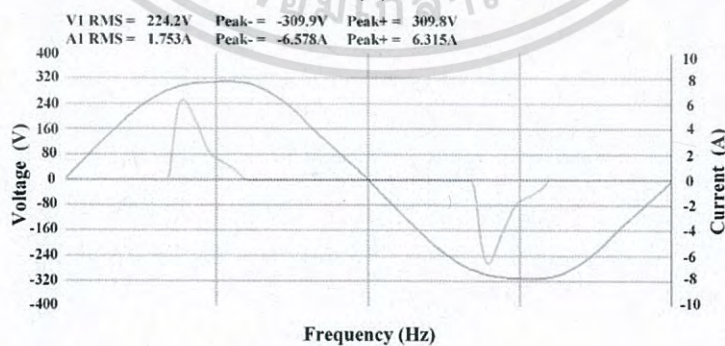
เป็นไปตามที่ระบุไว้สำหรับการนำมาทดแทนคือ 103.5 W และ 214.6 W สำหรับกำลังไฟฟารีแอกที่พบว่ามีค่ากำลังไฟฟ้าที่ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หรือกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W มีค่า-330 VAR มากกว่าโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ซึ่งมีค่า -36.2 VAR สุดท้ายตัวประกอบกำลัง (Power factor) โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ถือว่ามีประสิทธิภาพของโคมสูงมากเท่ากับ 0.94 ในขณะที่โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W มีค่าเพียง 0.54 ซึ่งอธิบายได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ และหลอดไฟเอชเอ็มไอ 200 W เกิดการความสูญเสียในการทำงานมาก ส่งผลให้มีค่าตัวประกอบกำลังต่ำ

### 4.3.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า

หลังจากติดตั้งเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าเพื่อบันทึกค่า ตัวประกอบกำลัง (Power factor) และกำลังไฟฟ้า (Power) 3 ประเภท ที่นำมาพิจารณาหาค่าคุณภาพไฟฟ้าประเภทความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวมในรูปของค่าแรงดัน และค่ากระแส (% THD<sub>v</sub>, % THD<sub>i</sub>) ตามช่วงระยะเวลาที่บันทึกได้ ประมาณ 3 นาที แสดงดังตารางที่ 4.3 และข้อมูลการบันทึกได้ตามภาคผนวก ข ผู้วิจัยได้นำข้อมูลของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวมของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า มาพล็อตกราฟเพื่อศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของคุณทางไฟฟ้าของโคมไฟทั้ง 2 ประเภทได้อย่างชัดเจนขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.19-4.21



(ก)

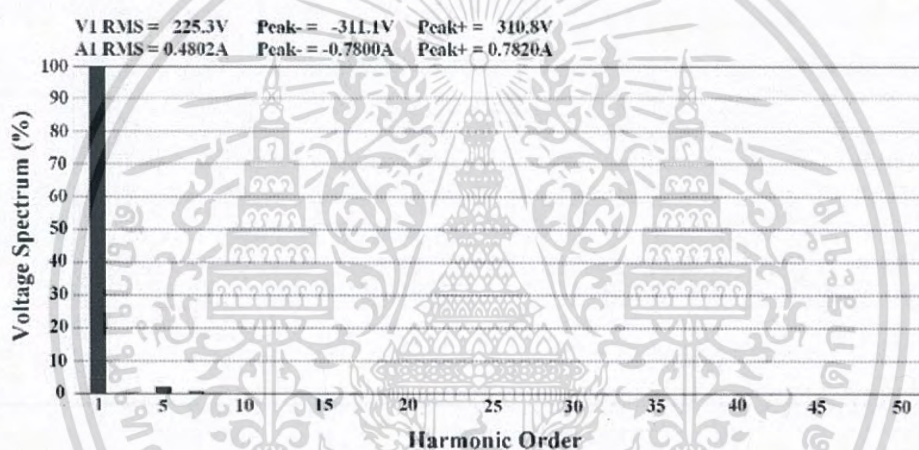


(ข)

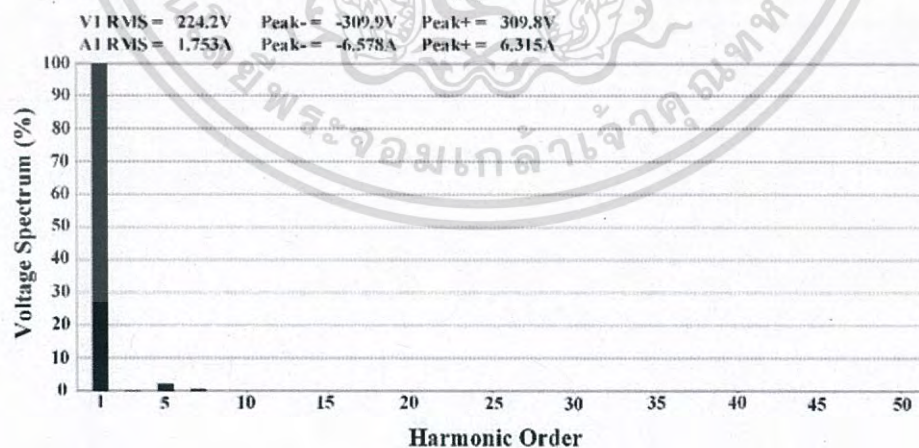
รูปที่ 4.19 รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าโดยการพล็อตกราฟของ HP-LED 104 W (ก) และ HMI 200 W (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.19 และค่าดังตารางที่ 4.3 ภายใต้อุปกรณ์ที่ระบบไม่มีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันหรือเป็นระบบที่มีแรงดันเป็นรูปคลื่นไซน์อย่างสมบูรณ์ ซึ่งนำไปก่อให้เกิดวงจรขับและบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ และหลอดไฟ ของโคมไฟทั้ง 2 ประเภท สังเกตจากโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 225.3 V และแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดมีค่า 310.8 V และแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยต่ำสุดมีค่า -311.1 V ในขณะที่โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย เท่ากับ 224.2 V และแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดมีค่า 309.8 V และแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยต่ำสุดมีค่า -309.9 V แต่เมื่อพิจารณารูปคลื่นไซน์ของกระแสไฟฟ้า พบว่าโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W มีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นมาก มีลักษณะเป็นรูปคลื่นแบบฟันปลา ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 1.753 A และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดมีค่า 6.315 A กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยต่ำสุดมีค่า -6.578 A สำหรับ โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W มีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นไม่มากยังคงมีทิศทางเป็นรูปทรงรูปคลื่นไซน์ ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 0.4802 A และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดมีค่า 0.7820 A กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยต่ำสุดมีค่า -0.7800 A



(ก)

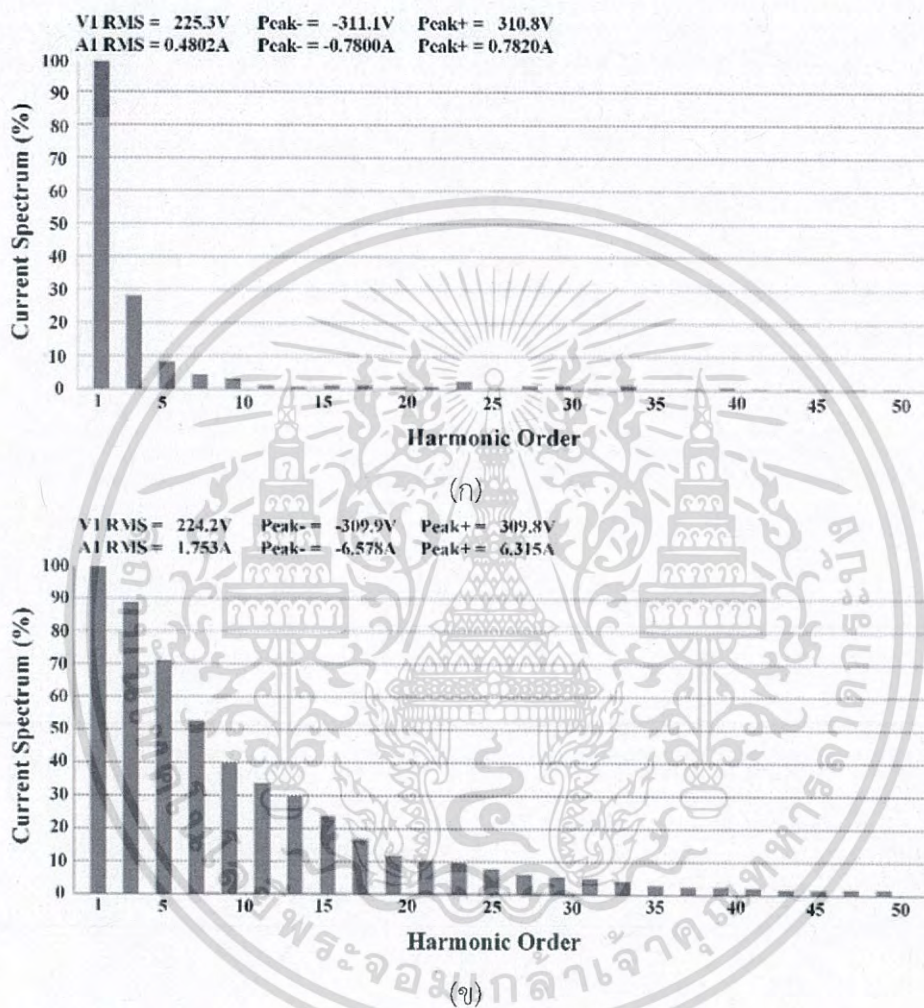


(ข)

รูปที่ 4.20 สเป็คตรัมของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า %THD<sub>v</sub> ของ HP-LED 104 W (ก) และ HMI 200 W (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.20 และค่าดังตารางที่ 4.3 แสดงความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวมในรูปของค่าแรงดันไฟฟ้า  $\% THD_v$  ของโคมไฟทั้ง 2 ประเภท พบว่าสเปกตรัมตลอดย่านความถี่ไม่เปลี่ยนแปลง สอดคล้องกับ รูปที่ 4.19 พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับโคมไฟทั้ง 2 มีลักษณะเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์มาก หมายความว่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น ( $\% THD_v$ ) เปอร์เซนต์ต่ำมาก ซึ่งมีค่า 2.2 %



รูปที่ 4.21 สเปกตรัมของสัญญาณกระแสไฟฟ้า  $\%THD_i$  ของ HP-LED 104 W (ก) และ HMI 200 W (ข)

จากรูปที่ 4.21 และค่าดังตารางที่ 4.3 แสดงความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวมในรูปของค่ากระแสไฟฟ้า  $\% THD_i$  ของโคมไฟทั้ง 2 ประเภท สำหรับโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W พบว่าสเปกตรัมตลอดย่านความถี่มีค่าการเปลี่ยนแปลงไม่มาก มีค่า  $\% THD_i$  เท่ากับ 30% และยังคงรักษารูปทรงของรูปคลื่นไซน์ ดังรูปที่ 4.21 แต่จะเริ่มเกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณในองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 ภายในสเปกตรัมจะสังเกตการกระจายของสเปกตรัมตลอดย่านความถี่ และจะเริ่มลดลงสู่สภาวะปกติใน ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 11 ลักษณะนี้เกิดขึ้นเนื่องจากผลของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และเริ่มคงที่ หมายความว่าการทำงานของโคมไฟเมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับวงจรขับเคลื่อนในช่วงเวลาอันสั้น และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าสู่สภาวะการทำงานปกติเร็วได้อย่างรวดเร็ว สังเกตได้จากเมื่อเปิดโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูงจะเริ่มสว่าง และจะสว่างคงที่ในช่วงเวลาอันสั้น และสำหรับโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W พบว่าสเปคตรัมตลอดย่านความถี่มีการเปลี่ยนแปลงมาก ดูได้จากค่า  $\% THD$  มีค่าสูงถึง 140% และสังเกตรูปทรงของรูปคลื่นไซน์เกิดการผิดเพี้ยนตลอดเวลา ดังรูปที่ 4.21 โดยเริ่มเปลี่ยนแปลงมาก และเกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณสเปคตรัมที่มีการกระจายตลอดย่านความถี่ เริ่มจากองค์ประกอบฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ที่มีค่า 90% ฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ที่มีค่า 90% ฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ที่มีค่า 70% ฮาร์โมนิกอันดับที่ 15 ที่มีประมาณค่า 25% และจะเริ่มลดลงสู่สภาวะปกติในฮาร์โมนิกอันดับที่ 35 ที่มีประมาณค่า 5% สาเหตุการเกิดขึ้นของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก และเริ่มคงที่ช้า เนื่องจากการทำงานของโคมไฟประเภทนี้หลอดต้องมีการปล่อยประจุความดันไอสูง ซึ่งส่งผลให้กำเนิดแสงโดยกระบวนการอาร์กภายในหลอดอาร์ก (Arc Tube) จึงต้องอาศัยวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์คุณภาพต่ำ ช่วยจุดชนวนหลอดเพื่อจ่ายแรงดันสูงเข้าตัวหลอด ทำให้เกิดช่วงเวลาการทำงานเริ่มต้นเป็นเวลานาน ก่อนเข้าสู่สภาวะการทำงานปกติ สังเกตได้จากเมื่อเปิดโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ในช่วงเวลาประมาณ 3-5 นาที แสงสว่างจากโคมไฟจะเริ่มสว่างแต่ยังไม่คงที่ จนถึงช่วงเวลาหนึ่งจะสว่างคงที่ นั่นหมายถึงสภาวะที่ฮาร์โมนิกอยู่ในอันดับเปอร์เซ็นต์ปกติ

#### 4.3.3 วิเคราะห์ผลการวิจัยปริมาณทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางไฟฟ้า

โคมไฟที่ใช้สำหรับในการศึกษางานวิจัยนี้ มีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้าประยุกต์ใช้เป็น ส่วนประกอบของวงจรขับ และบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับหลอดไฟเพื่อให้แสงสว่างได้ คงที่ นั่นคือการรักษาสภาวะการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไม่ให้เกิดความผิดเพี้ยนเนื่องจากฮาร์โมนิก (Harmonic Distortion) สังเกตได้จากโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ได้มีออกแบบวงจรขับหลอดแอลอีดี ให้มีค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกของกระแสต่ำมาก สำหรับค่าประกอบกำลัง (Power Factor) ของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ที่นำบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์คุณภาพต่ำมาใช้ เนื่องจากผู้ผลิตไม่ได้มีการพัฒนาการออกแบบ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ใหม่ขึ้นมาในช่วงหลายปีที่ผ่านมา และอีกเหตุผล คือการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้วงจรขับ และบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ขณะทำงาน (Irms และ Ipeak) ให้เกิดความเหมาะสม หากปริมาณของกระแสไฟฟ้ายิ่งน้อยเท่าใดความสูญเสียเนื่องจากความร้อนที่เกิดบนสายไฟยิ่งลดลง ท้ายสุดยังต้องคำนึงถึงการรักษาระดับแรงดันในรูปของสัญญาณไซน์ที่ป้อนให้คงที่มากที่สุด เพื่อลดผลกระทบจากสภาวะหรือปรากฏการณ์ที่อาจเกิดผิดปกติตัวแปรปริมาณทางไฟฟ้าที่กล่าวมาด้วย ดังนั้นหากเลือกใช้โคมไฟที่มีการตรวจสอบคุณภาพทางไฟฟ้า หรือการแก้ตัวประกอบกำลังของวงจรขับ และบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ให้มีค่าสูงจะส่งผลดีต่อโคมไฟทั้ง 2 ประเภท สำหรับการนำมาทดแทนกัน และช่วยให้การจัดแสงภายในสตูดิโอ เกิดความเสถียร ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลง เช่นกัน

## 4.4 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

### 4.4.1 ผลการศึกษาทางเศรษฐศาสตร์

สำหรับการลงทุนเปลี่ยนจากโคมไฟหลอดแอมโอมไอ 200 W เป็นโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W โดยพิจารณาการใช้เครื่องมือเศรษฐศาสตร์ ได้แก่ ช่วงเวลาคืนทุน (*PBP*) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (*NPV*) อัตราผลตอบแทนจากเงินลงทุน (*IRR*) อัตราส่วนของผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน (*B/C*) สำหรับการคำนวณค่าต่างๆ เริ่มจากการนำค่าสมมติฐาน และค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของหลอดไฟ และคุณลักษณะเฉพาะของโคมไฟทั้ง 2 ประเภท นำมาคำนวณหาหน่วยการใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดโครงการคือ 15 ปี จากนั้นคำนวณค่าไฟฟ้า และค่าใช้จ่ายตลอดโครงการ นำค่าที่ได้ดังกล่าวไปคำนวณ ผลประโยชน์สุทธิต่อปี และตลอดโครงการ เพื่อหาความสัมพันธ์สำหรับการทดแทนโคมไฟทั้ง 2 ประเภท ตามหลักเศรษฐศาสตร์ ได้ผลการศึกษาครั้งนี้ ช่วงเวลาคืนทุน ได้ระยะเวลา 7 ปี 7 เดือน มูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่า 60,491 บาท อัตราผลตอบแทนจากเงินลงทุน คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 9.70 และอัตราส่วนของผลประโยชน์ต่อเงินลงทุนมีค่า 1.82 โดยสรุปให้แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

รายละเอียด	โคมไฟ		ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ย	
	HMI 200 W	HP-LED 104 W		
พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	6 ชม. ต่อ วัน	1.32	0.62	0.70
	15 ปี	7,128	3,369	3,759
ค่าไฟฟ้า (บาท)	6 ชม. ต่อ วัน	4.62	2.18	2.44
	15 ปี	24,948	11,793	13,154
ค่าใช้จ่ายการลงทุนตลอดโครงการ (บาท)	15 ปี	160,812*	17,794**	143,018
ค่าใช้จ่ายการลงทุนต่อปี (บาท)	1 ปี	10,720	1,186	9,534

หมายเหตุ \*  $Ct_{\text{โคมไฟหลอดแอมโอมไอ 200 W}} = [(ค่าไฟฟ้า \times 15 \text{ ปี}) + (ค่าเปลี่ยนหลอดไฟ 2 \text{ หลอด ต่อปี} \times \text{จำนวนปีที่เปลี่ยนหลอดไฟ})]$

หมายเหตุ \*\*  $Ct_{\text{โคมไฟแอลอีดีกำลังสูง 104 W}} = [(ค่าไฟฟ้า \times 15 \text{ ปี}) + (ค่าอุปกรณ์วงจรขับหลอดแอลอีดีกำลังสูง 1 \text{ ชุด ต่อปี} \times \text{จำนวนปีที่เปลี่ยนอุปกรณ์วงจรขับหลอดแอลอีดีกำลังสูง})]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ทดแทน โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W		
เครื่องมือวิเคราะห์ เศรษฐศาสตร์	ช่วงเวลาคืนทุน ( <i>PBP</i> )	7.74 ปี
	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ ( <i>NPV</i> )	60,491 บาท
	อัตราผลตอบแทนจากเงินลงทุน ( <i>IRR</i> )	9.70 %
	อัตราส่วนของผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน ( <i>B/C</i> )	1.82 %

#### 4.4.2 วิเคราะห์ผลการวิจัยทางเศรษฐศาสตร์

จากผลการศึกษาพบว่าโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W สามารถนำมาทดแทนโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ได้ ตามค่าที่แสดงผลทางเศรษฐศาสตร์ แต่การวิเคราะห์ของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W จะสังเกตว่าค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (*NPV*) ค่อนข้างสูง สำหรับการเริ่มต้นโครงการ พบว่าจะขึ้นอยู่กับค่าตัวแปร อาทิเช่น ค่าอัตราดอกเบี้ย อัตราค่าไฟต่อหน่วย และค่าการประหยัดพลังงาน ตลอดโครงการ หากการลงทุนสำหรับการเปลี่ยนโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูงจะมีต้นทุนค่อนข้างสูง แต่หากพิจารณาตามหลักการเศรษฐศาสตร์จะสามารถได้ทุนคืนในช่วงเวลา ระยะเวลา 7 ปี 7 เดือน สำหรับ 15 ปี ของโครงการที่นำมาพิจารณา ต้องไม่ยาวนานกว่าอายุการใช้งานของโครงการที่มีความผกผันสำหรับการเริ่มลงทุนในการเปลี่ยนมาใช้ และสามารถนำมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ของโครงการที่มีค่าเป็นบวก คือมูลค่า 60,491 บาท และอัตราผลตอบแทนจากเงินลงทุนที่มีค่า 9.70 มาพิจารณาตามหลักการอัตราค่าที่เหมาะสมต่อการลงทุนคือ มากกว่าหรือเท่ากับ มากกว่าอัตราดอกเบี้ยของโครงการ ทำให้โครงการสำหรับงานวิจัยนี้เหมาะสมต่อการลงทุนทางเศรษฐศาสตร์

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สำหรับแนวทางการนำโคมไฟหลอดแอลอีดีมาทดแทนหลอดไฟประเภทต่างๆ ได้แก่ หลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ หรือหลอดไฟคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ ที่นำไปใช้กับโคมไฟภายในบ้าน หรือโคมไฟถนน เริ่มปรากฏให้เห็นแต่มีขนาดกำลังไฟไม่สูงมาก เมื่อเทียบกับโคมไฟที่ใช้สำหรับการจัดแสงในสตูดิโอ ปัจจุบันกำลังได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้น โดยนำโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูงทดแทนโคมไฟหลอดเซอเมไอที่มีขนาดกำลังไฟสูง สำหรับการวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาภายใต้มาตรฐานการทดสอบ IES LM-79 08 ว่าด้วยการประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ประเภทแหล่งกำเนิดแสงจากสารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วย สมรรถนะทางแสง การกระจายแสงของโคมไฟ สมรรถนะทางไฟฟ้า และด้านการวิเคราะห์ค่าทางเศรษฐศาสตร์ ได้สรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

### 5.1 สรุปผลการวิจัยของสมรรถนะทางแสง

#### 5.1.1 พื้นฐานทางแสง

ค่าฟลักซ์ส่องสว่าง (Luminous Flux) ของโคมไฟทั้ง 2 ประเภทมีค่าลูเมนใกล้เคียงกัน หมายถึงสามารถนำมาทดแทนแหล่งกำเนิดแสงซึ่งกันและกันได้ ค่าความเข้มส่องสว่าง (Luminous Intensity) ของโคมไฟทั้ง 2 ประเภทมีค่าแคนเดลาใกล้เคียงกันทุกระยะความห่างของโคมถึงตัวแบบ ในส่วนของความเข้มแสง (Illuminance or Illumination) ค่าลักษณะของโคมไฟหลอดเซอเมไอ 200 W มีค่ามากกว่าโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ไม่แตกต่างกันมากที่ทุกระยะห่างของโคมไฟถึงตัวแบบเช่นกัน และประสิทธิภาพการส่องสว่าง (Luminous Efficacy) จะสัมพันธ์กับค่าของฟลักซ์ส่องสว่าง ต่อ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของโคมได้ข้อสรุปว่าโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง มีประสิทธิภาพสูงกว่าโคมไฟหลอดเซอเมไอ ประมาณ 50 %

#### 5.1.2 พื้นฐานค่าสีของแสง

ค่า CIE โครมาติซิตีไดอะแกรม (CIE Chromaticity Diagram) แบ่งได้เป็นระบบแกน CIE-1931  $(x, y)$  ระบบแกน CIE-1976  $(u', v')$  หากนำค่าทั้ง 2 ระบบมาพล็อตหาจุดตัดบนกราฟจะสามารถประมาณค่าอุณหภูมิสีของแสง (Correlated Color Temperature:  $CCT, T_c$ ) ได้ พบว่าจากการตรวจวัดของงานวิจัยเพื่อหาค่าอุณหภูมิสีของแสงจะได้ค่าใกล้เคียงกับวิธีการพล็อตหาจุดตัดบนกราฟของ CIE โครมาติซิตีไดอะแกรม และค่าอุณหภูมิสีของแสงโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูงมีค่าประมาณ 6000K ในส่วนของโคมไฟหลอดเซอเมไอ มีค่าประมาณ 5600K สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์ดัชนีความถูกต้องสีของแสง (Color Rendering Index,  $CRI$  or  $R_a$ ) ผลการวัดพบว่า โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูงมีค่าสูงกว่าโคมไฟหลอดเซอเมไอ อธิบายได้ว่าสีของแสงโคมหลอดไฟแอลอีดีกำลังสูงที่ตกกระทบตัวแบบไม่ผิดเพี้ยนจากสีของวัตถุที่มองด้วยตาเปล่าเมื่อเทียบกับแสงโคมไฟเซอเมไอที่มีความผิดเพี้ยนมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.3 การกระจายแสงของโคม

สำหรับโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W และโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จัดเป็นประเภทโคมไฟสปอต (Spot Light) และได้กำหนดลักษณะการกระจายลำแสงรวม (Spot) 15 องศา และลักษณะลำแสงกระจายออก (Flood) 50 องศา เพื่อแสดงรูปการกระจายแสงของโคม แบบโพลาร์เคิร์ฟ (Polar curve) ไอโซลักซ์ (Iso-lux Curve) และ ไอโซอินเทนซิตี (Iso-Intensity curve) พบว่าลักษณะการกระจายแสงของโคมทั้ง 2 ประเภทมีลักษณะการกระจายแสงที่ใกล้เคียง สามารถนำไปวิเคราะห์ และออกแบบรูปร่าง วัสดุเพื่อการสะท้อนแสง สำหรับการกระจายแสงของโคมไฟให้ดีขึ้น โดยเฉพาะการศึกษางานวิจัยครั้งนี้ที่นำโคมไฟประเภทโคมไฟสปอต นำมาศึกษาพบว่ากราฟการกระจายแสงที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการพิจารณาสมรรถนะทางแสง และการกระจายแสงที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือรูปแบบโพลาร์เคิร์ฟ หรือลักษณะแบบ Performance Cones พบว่าปัจจุบันคู่มือผลิตภัณฑ์โคมไฟจะนิยมแสดงคุณสมบัติลักษณะการกระจายแสงของโคมไฟด้วยกราฟดังกล่าว นอกจากนี้สังเกตว่าค่าที่ปรากฏในรูปกราฟทั้ง 3 ประเภท ปรากฏบนกราฟที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าต่างๆ ของค่าพื้นฐานทางแสงที่ศึกษาในหัวข้อสมรรถนะทางแสงตามที่ได้กล่าวมา

### 5.2 สรุปผลการวิจัยของสมรรถนะทางไฟฟ้า

สำหรับสมรรถนะทางไฟฟ้าของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปริมาณทางไฟฟ้า และคุณภาพทางไฟฟ้า โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ที่ค่าตัวประกอบกำลัง 0.94 ขณะที่โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W มีค่าเท่ากับ 0.54 แสดงให้ทราบว่าคุณภาพของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูงมีความเสถียร ในการชั้บวงจรทางไฟฟ้าเพื่อความส่องสว่างมากที่สุด สำหรับความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวม ในรูปค่ากระแส (Total Harmonics Distortion voltage and current, % THD<sub>v</sub>) พบว่าโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมากถึง 140% เนื่องจากโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ ทำงานร่วมกับบัลลาสต์คุณภาพต่ำที่ทำงานด้วยหลักการชดลวด ส่วนโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูงทำงานร่วมกับวงจรขับประเภทอิเล็กทรอนิกส์

### 5.3 สรุปผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการลงทุนเปลี่ยนจากโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W เป็นโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W พบว่าหากมีการลงทุนเปลี่ยนการใช้โคมไฟดังกล่าวจะสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 7 ปี 7 เดือน ซึ่งเป็นช่วงเวลาเร็วกว่าที่ตั้งไว้ในโครงการของงานวิจัยนี้คือที่ระยะเวลา 15 ปี แต่ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ขึ้นอยู่กับบริหารจัดการให้มีต้นทุนของโคมไฟ และอุปกรณ์เสริม และควบคุมค่าใช้จ่ายให้ลดลง ทั้งนี้สรุปว่าหากทราบต้นทุนผันแปร ต้นทุนคงที่เป็นจำนวนเท่าใด และทราบจุดคุ้มทุนของผู้ประกอบการที่จะดำเนินโครงการสามารถจะวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ได้

#### 5.4 ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้สามารถนำแนวทางในการศึกษาไปใช้กับโคมไฟที่ใช้ในบ้าน อุตสาหกรรม หรือภาคคมนาคม หรือกรณีโคมไฟที่มีขนาดการใช้กำลังไฟฟ้าปริมาณมาก โดยเฉพาะแนวทางการเปลี่ยนมาใช้โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูงที่มักจะมีข้อคำถามว่าคุ้มค่าต่อการลงทุนหรือไม่ และสำหรับข้อเสียเปรียบของหลอดแอลอีดีกำลังสูงยังปรากฏอยู่ในทุกวันนี้คือราคาต้นทุนของชุดโคมหลอดไฟแอลอีดีกำลังสูงมีราคาแพง ซึ่งผู้ประกอบการใดที่ต้องการเปลี่ยนมาใช้จะต้องเผื่อเวลาสำหรับการคืนทุนเมื่อได้ลงทุนการเปลี่ยนมาใช้โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง แต่ข้อได้เปรียบของหลอดแอลอีดีกำลังสูงที่ไม่ควรมองข้ามคือการรักษาสภาพสิ่งแวดล้อม และการประหยัดพลังงานไฟฟ้า ที่จะช่วยลดปัญหาของภาวะโลกร้อน โดยผู้ศึกษาคาดการณ์ว่าจะมีการพัฒนารูปแบบของหลอดแอลอีดีกำลังสูงให้มีประสิทธิภาพใช้งานที่เพิ่มขึ้น และสามารถนำมาทดแทนโคมไฟจากแหล่งกำเนิดแสงแบบเก่าได้ดีขึ้นทั้งสมรรถนะทางแสง สมรรถนะทางไฟฟ้า และการกระจายแสงของโคมไฟ ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่มีระยะเวลาคืนทุนได้เร็วขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] BBC Television Centre. 2011. *Low Energy Lighting Guide for TV Productions*, London.
- [2] Y. K. Cheng, K. W. E. Cheng., “General Study for using LED to replace traditional lighting devices”, *International Conference on Power Electronics Systems and Applications*, 2<sup>nd</sup>, 2003. pp. 173-288.
- [3] Mulkey Steve. “Led Lighting”, *Broadcast Engineering*, 2011, vol.5, no.53, May, 2011, pp. 12-14.
- [4] Savitha G. Kini, Abhilash Prabhu. “Simulation Study on Controller Design for Color Mixed White Light LED Panel for Studio Lighting”, *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 7<sup>th</sup>, 2012, pp. 1582-1587.
- [5] S. Lewis Johnson, “Television Studio Lighting Equipment,” *Radio Section*, 1952, no.1327, 1952, pp. 113-114.
- [6] John Luff, “Energy-efficient lighting”, *Broadcast Engineering*, 2009, Jun, 2009.
- [7] B. Ackermann, V. Schulz, C. Martiny, A. Hilgers, X. Zhu. “Control of LEDs”, *IEEE Conference record of Industry Applications*, 41<sup>st</sup>, 2006, pp. 2608-2615.
- [8] Sohel Uddin, Hussain Shareef, Azah Mohamed, M A Hannan, Khodijah Mohamed, “LEDs as Energy Efficient Lighting Systems: A Detail Review”, *IEEE Student Conference on Research and Development*, 2011.
- [9] W. J. B. Heffernan, L. P. Frater, N. R. Watson, “LED Replacement for Fluorescent Tube Lighting”, *Power Engineering Conference*, 2007, pp. 1-6.
- [10] Subramanian Muthu, Frank J. P. Schuurmans, and Michael. D. Pashley, “Red, Green, and Blue LEDs for White Light Illumination”, *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, pp. 333-338.
- [11] Xiaohui Qu., “Development and Design of Light-emitting-diode (LED) Lighting Power Supplies”, Ph.D. Thesis of The Hong Kong Polytechnic University, 2009.
- [12] Kyle Cassidy, “Three – Point lighting 101”, Videomaker, 2010, Aug, 2010, pp.1-5.
- [13] Rana A. Jabbar, M. Al-Dabbagh, Azah Muhammad, R. H. Khawaja, M. Akmal and M. Rehan Arif, “Impact of Compact Fluorescent Lamp on Power Quality”, *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC-08)*, 2008. pp. 1-5.
- [14] Gerald Millerson, “The Technique of Lighting for Television and Film”, 3<sup>rd</sup> Edition, Great Britain: Focal Press, 1991.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [15] Brian Fitt and Joe Thornley, "Lighting Technology a Guide for the Entertainment Industry", Great Britain: Focal Press, 1997.
- [16] Harry C. Box, "The Gaffer's Handbook: film lighting practices, equipment and electrical distribution", 2<sup>nd</sup> Edition, Great Britain: Focal Press, 1997.
- [17] Sheng Liu and Xiaobing Luo, "LED Packaging for Lightings Applications Design, Manufacturing and Testing", Noida: Markono Print Media, 2011.
- [18] ลีลาวดี กำวรงค์ และหทัยพร พ่วงยิ่ง. การควบคุมการผสมสีของหลอดไดโอดเปล่งแสงกำลังสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 2551.
- [19] IES Lighting Handbook, New York, Illuminating Engineering Society of North America, New York, 1981.
- [20] Luminous Flux, Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Luminous\\_energy](http://en.wikipedia.org/wiki/Luminous_energy), July 26, 2013.
- [21] R. H. Simons and A. R. Bean, Lighting Engineering Applied Calculations, Cornwall: Architectural Press, 2001.
- [22] ศุภี บรรจงจิตร, วิศวกรรมการส่องสว่าง, กรุงเทพฯ: บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน). 2544.
- [23] How to Read Photometrics, California, Peachtree City: Cooper Lighting and IRIS Lighting.
- [24] วัฒนา ถาวร, การส่องสว่าง, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) จำกัด, 2543.
- [25] Fagerhult Group. Light measurement, Available: <http://www.support.fagerhult.com>, March 15, 2014.
- [26] Cooper Lighting Design Guide, Polar curve, Available: [http://www.cooper-ls.com/dg\\_ltgdesguide](http://www.cooper-ls.com/dg_ltgdesguide), March 18, 2014.
- [27] E. Csanyi, Iso-lux curve, Available: <http://www.electrical-engineering-portal.com/luminous>, March 16, 2014.
- [28] Institution of Lighting Engineers, The outdoor lighting guide, Available: <http://www.whsmith.co.uk/products.com>. March 16, 2014.
- [29] พรทวี พึ่งรัศมี และคณะ, สีและการเห็นสี, พิมพ์: 1/2551.
- [30] G. A. Klein, "Industrial Color Physics", New York, USA: Springer, 2010.
- [31] Roy S. Berns, "Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology", 3<sup>rd</sup> edition, New York, USA: John Wiley & Sons, 2000.
- [32] Douglas A. Kerr, P. E., "Color Temperature", Issue 4, November 8, 2005


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [33] Alan Bermingham, *Location Lighting for Television*, Edit, Great Britain: Focal Press, 2003.
- [34] ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีการวัดและระบุสี สมบัติสีที่ปรากฏของแหล่งกำเนิดแสง. 2556.
- [35] “Method for the assessment of the colorimetric properties of luminaires,” *The Television Lighting consistency Index*, 2012, Tech 3355, April, 2013, pp. 1-28
- [36] M. S. Rea and J. P. Freyssinier, “Recommendations for Specifying Color Properties of Light Sources for Retail Merchandising”, *Lighting Research Center*, vol. 8, Issue 2, March 2010, pp. 1-21.
- [37] ตฤณ แสงสุวรรณ, คุณภาพไฟฟ้า, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, พิมพ์ครั้งที่ 1, ตุลาคม 2556.
- [38] เอกชัย ชัยดี, การตรวจสอบคุณภาพไฟฟ้าและประสิทธิภาพของหลอดไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ในประเทศไทย, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร, ปีที่ 36, ฉบับที่ 2, เมษายน-มิถุนายน 2556.
- [39] ทิวา แก้วจันทร์านนท์, การวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้าโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องและเวฟเล็ตแพ็คเก็ตฟิลเตอร์แบบคี่ที่ได้รับการแก้ไข, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [40] ภัทรวิฑูร์ กิจวรวิฑูร์, ผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขนาดใหญ่ที่มีต่อคุณภาพไฟฟ้าในระบบสายส่งของ กฟภ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.
- [41] Rings, James L., Bedworth, David D. and Randhawa. Sabah U., “Engineering Economics”, 4<sup>th</sup> ed., Boca. New Jersey. Singapore: McGram-Hill, 1998.
- [42] R. Stephen A. Ross, Randolph W. Westerfield and Bradford D. Jordan, “Fundamentals of Corporate Finance Standard”, 10<sup>th</sup> ed., New York, USA: McGram-Hill Higher Education, 2012.
- [43] Tung Au and Thomas P. Au., “Engineering Economics for Capital Investment Analysis”, New Jersey, USA: Prentice-Hall, 1992.
- [44] Leland Blank, P. E. and Anthony Tarquin, P. E., “Basic of Engineering Economy”, New York, USA: McGram-Hill Higher Education, 2008.
- [45] Kreith, Frank J and West, Ronald E., “CRE handbook of energy efficiency”, Boca Raton, Fla. USA: CRC. Press, 1997.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [46] R. N. Helms and M. C. Belcher, "Lighting for Energy-efficient luminous environments", Boca, New Jersey, USA: CRC. Prentice-Hall, Engle Wood.
- [47] Solutions for Technicians, Electricity Cost Calculator, Available: <http://www.handy-math.com/electric.cgi>, May 3, 2015.
- [48] S. Debonnaire and A. Poole, "Cost-Benefit Analysis of Energy Efficient Technologies Available For Use in Roadway Lighting", Conservation Applied Research & Development (CARD) Program Final Report, December, 2012.
- [49] Energy and Sustainable. "Life Cycle Cost of Lighting System in Various Groups of End user in Thailand", Available: <http://www.ieeexplore.ieee.org>, June 18, 2015.
- [50] วสันต์ อดิษฐ์, การผลิตเทปโทรทัศน์เพื่อการศึกษาและฝึกอบรม, กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2533.
- [51] เอกสารประกอบการทดลองทางแสงชุดที่ 1, ห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยพลังงานและวิศวกรรมส่องสว่าง, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2013.
- [52] Chr. Schwanengel, "Comparison of techniques for measuring luminous intensity distribution overall and across segments leading in lighting & color sensing," [Online]. Available: [http://www.technoteam.de/e6009/.../LID\\_Measurements\\_eng.pdf](http://www.technoteam.de/e6009/.../LID_Measurements_eng.pdf), March 18, 2014.
- [53] ลีลาวดี กำวงษ์, คู่มือการออกแบบและคำนวณระบบไฟฟ้าแสงสว่างโดยใช้โปรแกรม DIALux, วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 2551.
- [54] Chauvin Arnoux C.A 8335 Manual, Chauvin Arnoux Ltd., Waldeck House: Waldeck Road, United Kingdom.



ภาคผนวก ก  
ข้อมูล IES File ของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W  
และโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**IES File โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ตำแหน่งการกระจายแสง Spot 15 องศา**

IESNA:LM-63-2002

HPLLED 104 W 15D

220.0v 0.491A 102.1w 0.95pf

[Test] 9-04-14

[Luminaire]

TILT=NONE

1 1000 1 37 25 1 2 1 1 0

1 1.0 102.1

0 2.5 5 7.5 10 12.5 15 17.5 20 22.5 25 27.5 30 32.5 35 37.5 40 42.5 45 47.5 50 52.5 55  
57.5 60 62.5 65 67.5 70 72.5 75 77.5 80 82.5 85 87.5 900 15 30 45 60 75 90 105 120 135 150 165 180 195 210 225 240 255 270 285 300 315  
330 345 36018416.6 16947.5 13659.4 8412.5 3900.2 1224.3 524.7 279.8 227.4 192.4 174.9 174.9 157.4  
139.9 139.9 104.9 87.4 87.4 87.4 70.0 70.0 70.0 70.0 70.0 70.0 52.5 52.5 35.0 35.0 35.0  
17.5 17.5 17.5 17.5 17.5 17.5 17.518416.6 16897.7 13255.8 7197.5 3072.3 1121.9 414.2 258.9 224.4 189.9 172.6 155.3 155.3  
138.1 120.8 103.6 86.3 86.3 86.3 69.0 69.0 69.0 69.0 69.0 69.0 51.8 34.5 51.8 34.5  
17.3 17.3 34.5 17.3 17.3 17.3 17.318416.6 17708.3 14650.4 9467.5 4958.3 1675.8 673.8 345.5 241.9 190.0 172.8 172.8 155.5  
138.2 138.2 120.9 86.4 86.4 86.4 86.4 69.1 69.1 69.1 69.1 69.1 69.1 51.8 51.8 51.8 34.6  
17.3 34.6 34.6 17.3 17.3 17.3 17.318416.6 17652.9 14910.4 9703.0 5085.8 2100.3 694.3 347.2 243.0 208.3 173.6 156.2 156.2  
138.9 121.5 104.1 86.8 69.4 69.4 69.4 69.4 69.4 69.4 69.4 69.4 52.1 69.4 52.1 34.7 34.7 34.7  
17.4 17.4 34.7 17.4 17.4 17.4 17.418416.6 18225.7 16108.1 12202.5 7533.3 3037.6 1145.6 486.0 260.4 208.3 173.6 173.6  
156.2 138.9 121.5 104.1 86.8 86.8 69.4 69.4 69.4 69.4 69.4 69.4 69.4 69.4 52.1 34.7 52.1 17.4  
17.4 34.7 17.4 17.4 17.4 17.4 17.4 17.418416.6 18312.3 15634.1 11060.4 5930.2 2417.3 782.6 382.6 243.5 191.3 173.9 156.5  
139.1 139.1 121.7 87.0 87.0 87.0 69.6 69.6 69.6 69.6 69.6 69.6 52.2 52.2 34.8 34.8 34.8  
34.8 17.4 17.4 17.4 17.4 17.4 17.4 17.418416.6 18589.9 16441.6 12058.3 6808.8 2650.7 987.5 433.1 277.2 225.2 190.6 173.3  
138.6 138.6 138.6 104.0 86.6 86.6 69.3 69.3 69.3 69.3 52.0 69.3 69.3 34.7 52.0 34.7 34.7  
17.3 17.3 17.3 17.3 17.3 17.3 17.3 0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18416.6 18502.2 14993.5 11519.0 5887.8 1574.7 787.3 359.4 239.6 205.4 171.2 154.0  
 154.0 136.9 119.8 102.7 85.6 85.6 68.5 68.5 68.5 68.5 68.5 68.5 68.5 68.5 51.3 34.2 17.1 17.1  
 17.1 17.1 17.1 17.1 17.1 17.1 17.1 17.1  
 18416.6 18811.4 17438.3 14160.0 8599.0 4325.2 1510.4 600.7 308.9 223.1 188.8 154.5  
 154.5 137.3 137.3 120.1 85.8 85.8 85.8 68.7 68.7 68.7 68.7 68.7 51.5 51.5 51.5 34.3 51.5  
 34.3 17.2 17.2 17.2 17.2 17.2 17.2 17.2  
 18416.6 18769.2 17291.8 13682.4 8024.8 3575.9 1292.7 470.1 251.8 201.5 167.9 151.1  
 134.3 134.3 117.5 100.7 83.9 83.9 83.9 67.2 67.2 67.2 67.2 67.2 67.2 50.4 50.4 50.4 16.8  
 16.8 33.6 33.6 16.8 16.8 16.8 16.8 16.8  
 18416.6 18535.2 16942.6 13028.9 8149.4 3676.6 1355.4 542.2 271.1 220.3 186.4 152.5  
 152.5 135.5 135.5 101.7 84.7 84.7 84.7 84.7 67.8 84.7 67.8 67.8 67.8 67.8 67.8 33.9 33.9  
 33.9 33.9 33.9 16.9 16.9 16.9 16.9 16.9  
 18416.6 18246.0 15958.8 11333.3 6093.4 2423.7 785.1 375.5 239.0 204.8 170.7 170.7  
 136.5 136.5 102.4 102.4 85.3 85.3 85.3 85.3 68.3 68.3 68.3 68.3 68.3 51.2 51.2 51.2 51.2  
 34.1 17.1 34.1 17.1 17.1 17.1 17.1 17.1  
 18416.6 18246.3 15810.0 11516.8 6218.4 2385.1 834.8 391.8 255.6 102.2 187.4 153.3  
 136.3 119.3 102.2 85.2 85.2 85.2 68.1 68.1 68.1 68.1 68.1 68.1 68.1 51.1 68.1 34.1 34.1  
 17.0 17.0 34.1 17.0 17.0 17.0 17.0  
 18416.6 17667.7 15267.8 9821.1 4851.0 1821.2 612.8 323.4 238.3 204.3 170.2 153.2 136.2  
 136.2 102.1 85.1 85.1 85.1 85.1 85.1 68.1 68.1 68.1 68.1 68.1 68.1 34.0 34.0 34.0 34.0  
 17.0 17.0 17.0 17.0 17.0 0.0  
 18416.6 17803.9 14842.2 10757.2 5974.3 2400.0 868.1 391.5 255.3 204.3 170.2 153.2  
 136.2 136.2 136.2 102.1 85.1 85.1 85.1 68.1 85.1 68.1 68.1 68.1 68.1 51.1 68.1 34.0 34.0  
 17.0 34.0 17.0 17.0 17.0 17.0 0.0  
 18416.6 17290.1 14047.2 9285.1 4557.2 1706.8 614.5 324.3 221.9 187.8 170.7 170.7 136.5  
 136.5 119.5 102.4 85.3 85.3 85.3 85.3 68.3 68.3 68.3 68.3 68.3 51.2 51.2 51.2 34.1 17.1  
 17.1 17.1 17.1 17.1 17.1 0.0 17.1  
 18416.6 17193.4 13999.4 8936.5 4553.2 1970.8 645.6 322.8 237.9 186.9 186.9 152.9 152.9  
 135.9 118.9 84.9 84.9 84.9 84.9 84.9 84.9 68.0 68.0 68.0 68.0 68.0 51.0 51.0 34.0 34.0 17.0  
 17.0 17.0 17.0 17.0 17.0 17.0  
 18416.6 17029.0 12951.6 7657.9 3409.2 1079.3 462.6 274.1 205.6 171.3 171.3 154.2 154.2  
 137.1 119.9 85.7 85.7 85.7 85.7 68.5 68.5 68.5 68.5 68.5 68.5 51.4 51.4 34.3 34.3 34.3 34.3  
 17.1 17.1 17.1 0.0 17.1 17.1

18416.6 17264.5 13481.5 7961.6 3576.7 1238.1 515.9 292.3 223.5 189.2 172.0 172.0 137.6  
 137.6 103.2 86.0 86.0 86.0 86.0 68.8 68.8 68.8 68.8 68.8 68.8 51.6 51.6 51.6 34.4 34.4 34.4  
 17.2 17.2 17.2 17.2 17.2 17.2  
 18416.6 16494.0 12294.6 7049.6 2630.9 944.4 421.6 253.0 219.2 185.5 168.7 151.8 134.9  
 134.9 118.1 101.2 84.3 84.3 84.3 67.5 67.5 67.5 67.5 67.5 67.5 50.6 50.6 33.7 33.7 16.9  
 33.7 16.9 16.9 16.9 16.9 0.0 0.0  
 18416.6 17264.5 13017.2 8460.3 4058.2 1496.0 567.5 292.3 223.5 206.3 172.0 172.0 154.8  
 137.6 120.4 103.2 86.0 86.0 86.0 86.0 86.0 68.8 68.8 68.8 68.8 68.8 68.8 51.6 51.6 34.4  
 34.4 17.2 17.2 17.2 17.2 17.2 17.2  
 18416.6 16863.0 12952.7 8064.9 3840.4 1448.9 523.7 296.8 226.9 174.6 174.6 174.6 157.1  
 139.7 122.2 104.7 87.3 87.3 69.8 87.3 87.3 87.3 69.8 69.8 69.8 52.4 52.4 34.9 52.4 34.9  
 34.9 17.5 17.5 17.5 17.5 17.5 17.5  
 18416.6 17392.5 14320.2 9390.6 4860.2 2100.3 677.0 347.2 243.0 190.9 173.6 173.6 156.2  
 138.9 121.5 104.1 86.8 86.8 86.8 86.8 86.8 69.4 69.4 69.4 69.4 52.1 52.1 52.1 34.7  
 17.4 17.4 17.4 17.4 17.4 17.4 17.4  
 18416.6 17406.1 14357.0 8642.1 3990.0 1428.7 557.6 278.8 226.5 191.7 174.2 174.2 156.8  
 139.4 122.0 104.5 87.1 87.1 87.1 87.1 69.7 87.1 69.7 69.7 69.7 52.3 52.3 34.8 34.8 34.8  
 17.4 34.8 17.4 17.4 17.4 0.0 17.4  
 18416.6 17911.4 14635.7 10262.4 5279.3 1846.9 679.5 331.0 226.5 191.7 174.2 156.8  
 156.8 156.8 139.4 122.0 87.1 87.1 87.1 69.7 69.7 69.7 69.7 69.7 69.7 52.3 52.3 34.8 52.3  
 34.8 34.8 17.4 17.4 17.4 17.4 0.0 0.0

**IES File โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ตำแหน่งการกระจายแสง Spot 15 องศา**

IESNA:LM-63-2002

HMI 200 W 15D

220v 1.543a 204.3w 0.61pf

[Test] 9-04-14

[Luminaire]

TILT=NONE

1 1000 1 37 25 1 2 1 1 0

1 1.0 204.3

0 2.5 5 7.5 10 12.5 15 17.5 20 22.5 25 27.5 30 32.5 35 37.5 40 42.5 45 47.5 50 52.5 55  
57.5 60 62.5 65 67.5 70 72.5 75 77.5 80 82.5 85 87.5 900 15 30 45 60 75 90 105 120 135 150 165 180 195 210 225 240 255 270 285 300 315  
330 345 360

27650.1 27717.5 25308.0 15602.7 8475.3 4414.6 2476.9 1482.8 977.3 724.5 522.3 387.5

337.0 303.3 286.4 286.4 286.4 269.6 252.7 219.0 185.3 151.6 134.8 134.8 134.8 117.9

101.1 84.2 84.2 84.2 67.4 50.5 33.7 16.8 16.8 16.8 16.8

27650.1 27380.7 22716.2 12747.4 6786.2 3637.3 1970.2 1246.1 791.4 538.9 404.1 336.8

303.1 269.4 286.3 286.3 269.4 269.4 235.8 218.9 185.2 151.6 134.7 134.7 134.7 117.9 84.2

84.2 84.2 84.2 67.4 50.5 50.5 16.8 16.8 16.8 16.8

27650.1 27212.6 22752.9 14220.6 6984.1 3921.2 2255.1 1312.7 841.5 538.5 387.1 319.8

286.1 252.4 235.6 235.6 218.8 201.9 201.9 168.3 151.5 134.6 134.6 117.8 117.8 101.0 84.1

84.1 84.1 84.1 67.3 50.5 50.5 33.7 16.8 16.8 16.8

27650.1 26589.9 20767.1 11662.5 5789.2 3231.2 1918.5 1144.4 740.5 504.9 353.4 286.1

235.6 218.8 201.9 185.1 168.3 168.3 151.5 134.6 134.6 134.6 117.8 101.0 84.1 84.1 84.1

84.1 84.1 67.3 50.5 50.5 16.8 16.8 16.8 16.8 16.8

27650.1 26742.5 21078.0 11698.8 6521.7 3916.4 2151.5 1378.3 840.4 537.9 369.8 268.9

218.5 184.9 168.1 151.3 134.5 134.5 134.5 117.7 117.7 100.9 100.9 84.0 84.0 84.0 84.0

84.0 67.2 67.2 50.4 33.6 16.8 16.8 16.8 16.8 16.8

27650.1 26487.5 19275.9 9958.1 5998.4 3302.5 2173.6 1381.7 775.1 471.8 303.3 235.9

185.3 168.5 151.6 134.8 134.8 117.9 117.9 101.1 84.2 84.2 84.2 84.2 84.2 84.2 84.2 67.4

67.4 67.4 33.7 16.8 16.8 16.8 16.8 16.8 16.8

27650.1 26743.6 19407.1 12154.6 7235.7 4046.0 2602.2 1712.4 990.5 604.4 352.6 251.8

201.5 167.9 167.9 151.1 134.3 134.3 117.5 100.7 100.7 83.9 83.9 83.9 83.9 83.9 83.9 67.2

67.2 50.4 50.4 33.6 16.8 16.8 16.8 16.8 16.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

27650.1 25863.0 19017.9 10638.6 6187.6 3574.3 2141.2 1247.6 775.6 505.8 320.3 236.0  
 202.3 168.6 151.7 134.9 134.9 118.0 118.0 101.2 101.2 101.2 84.3 84.3 84.3 84.3 84.3 67.4  
 67.4 67.4 50.6 33.7 16.9 16.9 16.9 16.9 16.9  
 27650.1 26234.8 19545.5 12889.9 6958.9 4060.7 2173.6 1314.3 825.6 539.2 370.7 286.4  
 219.0 202.2 168.5 151.6 134.8 134.8 134.8 117.9 117.9 101.1 101.1 84.2 84.2 84.2 84.2  
 67.4 67.4 67.4 67.4 50.5 33.7 33.7 16.8 16.8 16.8  
 27650.1 25771.8 18664.7 11066.8 6210.3 3096.7 1793.7 1116.8 727.6 507.7 372.3 287.7  
 253.8 220.0 203.1 203.1 186.1 169.2 152.3 135.4 135.4 135.4 118.5 118.5 101.5 84.6 84.6  
 84.6 84.6 67.7 67.7 67.7 50.8 33.8 16.9 16.9 16.9  
 27650.1 26348.8 19689.7 12540.6 6337.9 3684.4 1977.4 1233.8 862.0 608.4 439.4 371.8  
 304.2 270.4 253.5 236.6 236.6 219.7 202.8 185.9 169.0 152.1 135.2 135.2 118.3 118.3  
 118.3 84.5 84.5 84.5 67.6 67.6 50.7 33.8 16.9 16.9 16.9  
 27650.1 26192.2 18309.1 10307.4 5679.2 3170.2 1830.9 1203.7 830.7 593.4 457.7 373.0  
 339.1 322.1 305.2 305.2 322.1 322.1 305.2 271.2 237.3 186.5 169.5 152.6 135.6 135.6  
 118.7 101.7 101.7 84.8 84.8 67.8 50.9 17.0 17.0 17.0 17.0  
 27650.1 26920.7 19439.9 11670.7 6089.8 3562.3 2188.3 1357.1 983.9 729.4 542.8 441.0  
 390.2 356.2 322.3 339.3 373.2 390.2 373.2 305.3 254.4 220.5 169.6 152.7 135.7 135.7  
 135.7 118.7 84.8 84.8 67.9 67.9 33.9 17.0 17.0 17.0 17.0  
 27650.1 26288.1 19205.3 10828.5 5499.4 3183.9 1992.0 1259.9 936.4 664.0 544.8 425.6  
 340.5 289.4 255.4 221.3 204.3 187.3 170.3 170.3 153.2 136.2 136.2 136.2 119.2 119.2  
 102.2 85.1 85.1 85.1 68.1 68.1 51.1 34.1 17.0 17.0 17.0  
 27650.1 26661.4 20183.6 12069.2 6852.9 3767.4 2250.2 1431.9 903.5 647.8 477.3 375.0  
 306.8 255.7 221.6 187.5 170.5 153.4 136.4 136.4 136.4 136.4 119.3 119.3 102.3 85.2 85.2  
 85.2 85.2 85.2 68.2 68.2 51.1 34.1 17.0 17.0 17.0  
 27650.1 26858.7 20681.7 11786.2 6125.4 3544.4 2099.1 1204.4 791.5 550.6 412.9 344.1  
 292.5 240.9 206.5 172.1 172.1 137.6 137.6 137.6 137.6 120.4 120.4 120.4 103.2 103.2 86.0  
 86.0 86.0 86.0 68.8 68.8 34.4 34.4 17.2 17.2 17.2  
 27650.1 27359.4 23956.6 13560.0 7831.6 4377.5 2582.0 1504.8 923.4 615.6 427.5 342.0  
 273.6 239.4 222.3 222.3 205.2 205.2 188.1 171.0 136.8 136.8 119.7 119.7 102.6 85.5 85.5  
 85.5 68.4 85.5 68.4 51.3 51.3 34.2 34.2 17.1 17.1  
 27650.1 27184.0 25370.0 13970.0 7000.0 4283.0 2468.0 1990.0 857.0 650.0 433.1 352.6  
 252.2 250.8 240.5 226.3 216.3 201.2 195.2 191.1 190.1 189.0 187.0 185.8 120.8 119.7  
 103.7 90.7 70.5 50.4 60.5 55.3 51.3 50.1 44.1 39.1 12.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

27650.1 27512.7 23562.7 12365.3 6938.3 4138.9 2387.2 1580.0 1047.6 652.6 446.5 326.3  
 240.4 188.9 171.7 137.4 137.4 137.4 120.2 120.2 120.2 103.0 103.0 103.0 85.9 85.9 85.9  
 68.7 68.7 51.5 17.2 17.2 17.2 17.2 17.2 17.2 17.2 17.2  
 27650.1 27377.4 22655.4 12682.9 6273.3 3596.9 2335.4 1466.0 971.7 613.7 409.1 289.8  
 238.7 187.5 170.5 153.4 136.4 136.4 136.4 119.3 119.3 102.3 102.3 85.2 85.2 85.2 85.2  
 85.2 85.2 68.2 51.1 51.1 17.0 17.0 17.0 17.0 17.0  
 27650.1 28111.5 26590.6 18114.4 8886.3 4767.9 2751.3 1589.3 991.2 632.3 410.1 307.6  
 239.2 222.2 205.1 205.1 205.1 205.1 170.9 153.8 136.7 136.7 119.6 102.5 102.5 85.4 85.4  
 85.4 85.4 68.4 68.4 51.3 51.3 17.1 17.1 17.1 17.1  
 27650.1 27938.9 25629.0 14011.9 7540.9 3736.5 2207.9 1290.8 764.3 526.5 373.7 271.7  
 237.8 203.8 186.8 169.8 152.9 135.9 135.9 135.9 118.9 118.9 118.9 101.9 101.9 84.9 84.9  
 84.9 84.9 67.9 67.9 34.0 34.0 17.0 17.0 17.0  
 27650.1 28075.5 26220.8 17372.8 9715.8 5291.8 2807.6 1650.5 1020.9 629.6 442.4 340.3  
 255.2 221.2 187.2 153.1 136.1 136.1 136.1 136.1 136.1 119.1 119.1 102.1 85.1 85.1  
 85.1 68.1 68.1 51.0 51.0 34.0 17.0 17.0 17.0  
 27650.1 27989.8 24745.9 14147.8 7439.0 3889.4 2140.0 1273.8 917.1 628.4 458.6 339.7  
 271.7 237.8 203.8 169.8 169.8 152.9 135.9 135.9 135.9 135.9 118.9 118.9 118.9 101.9 84.9  
 84.9 67.9 67.9 51.0 34.0 34.0 17.0 17.0 17.0 17.0  
 27650.1 27852.7 25523.2 16390.9 8254.5 4659.0 2650.2 1569.9 1063.5 759.6 540.2 422.0  
 337.6 287.0 287.0 270.1 270.1 253.2 236.3 219.4 185.7 151.9 135.0 135.0 135.0 118.2  
 101.3 84.4 84.4 84.4 67.5 50.6 33.8 33.8 16.9 16.9 16.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4448.9 4465.8 4465.8 4499.6 4567.3 4567.3 4448.9 4076.7 3315.5 2385.1 1471.7 676.6  
 321.4 152.2 118.4 101.5 84.6 84.6 84.6 67.7 67.7 67.7 67.7 50.7 67.7 84.6 84.6 67.7 67.7  
 33.8 33.8 33.8 16.9 16.9 16.9 16.9 16.9  
 4448.9 4432.1 4432.1 4482.4 4516.0 4583.2 4499.2 4180.3 3559.1 2702.9 1746.0 856.2  
 402.9 201.5 117.5 100.7 83.9 83.9 67.2 67.2 67.2 67.2 50.4 67.2 67.2 67.2 83.9 67.2 67.2  
 33.6 33.6 16.8 16.8 16.8 16.8 16.8 16.8  
 4448.9 4431.7 4431.7 4534.8 4586.3 4620.6 4517.6 4053.8 3315.2 2318.9 1288.3 652.7  
 274.8 137.4 120.2 85.9 85.9 85.9 68.7 68.7 68.7 68.7 68.7 68.7 68.7 85.9 85.9 68.7 51.5  
 51.5 17.2 34.4 17.2 17.2 17.2 17.2 17.2  
 4448.9 4466.0 4483.1 4534.4 4620.0 4671.3 4620.0 4294.9 3661.8 2566.7 1591.3 718.7  
 325.1 171.1 119.8 85.6 85.6 68.4 68.4 68.4 68.4 68.4 68.4 68.4 68.4 68.4 85.6 68.4  
 51.3 34.2 34.2 17.1 17.1 17.1 17.1 17.1  
 4448.9 4483.5 4500.8 4587.4 4639.3 4656.6 4500.8 4033.4 3219.8 2042.7 1090.6 432.8  
 207.7 138.5 103.9 86.6 69.2 69.2 69.2 69.2 69.2 69.2 69.2 69.2 69.2 86.6 69.2 69.2 69.2  
 51.9 34.6 17.3 17.3 17.3 17.3 17.3 17.3  
 4448.9 4466.2 4535.8 4587.9 4674.8 4726.9 4570.5 4031.8 3215.0 2154.9 1077.5 486.6  
 225.9 139.0 104.3 86.9 86.9 69.5 69.5 69.5 69.5 69.5 69.5 69.5 86.9 86.9 86.9 52.1 17.4  
 17.4 17.4 17.4 17.4 17.4 17.4 17.4 17.4  
 4448.9 4500.0 4534.1 4636.4 4670.5 4602.3 4244.3 3460.2 2471.6 1568.2 784.1 340.9  
 153.4 119.3 102.3 85.2 85.2 68.2 68.2 68.2 68.2 68.2 68.2 68.2 85.2 68.2 51.1 51.1  
 34.1 34.1 17.0 17.0 17.0 17.0 17.0 17.0  
 4448.9 4483.1 4551.5 4654.2 4671.3 4671.3 4483.1 3952.6 3114.2 1950.7 1078.0 444.9  
 222.4 136.9 85.6 85.6 85.6 85.6 85.6 85.6 68.4 68.4 68.4 68.4 68.4 85.6 85.6 68.4 51.3 34.2  
 17.1 17.1 17.1 17.1 17.1 17.1 0.0  
 4448.9 4517.6 4586.3 4603.5 4723.7 4655.0 4294.3 3710.3 2765.5 1631.8 858.9 395.1  
 171.8 137.4 85.9 85.9 85.9 85.9 68.7 68.7 68.7 68.7 68.7 68.7 68.7 85.9 85.9 68.7 51.5 34.4  
 34.4 34.4 17.2 17.2 17.2 17.2 17.2  
 4448.9 4483.1 4568.6 4654.2 4705.5 4671.3 4380.4 3747.3 2840.4 1711.1 924.0 427.8  
 188.2 136.9 102.7 85.6 85.6 68.4 85.6 68.4 68.4 68.4 68.4 68.4 85.6 85.6 85.6 68.4 51.3  
 34.2 34.2 17.1 17.1 17.1 17.1 17.1 17.1  
 4448.9 4465.8 4550.4 4618.0 4668.8 4584.2 4127.5 3383.2 2419.0 1454.8 642.8 304.5  
 169.2 118.4 101.5 84.6 84.6 84.6 67.7 67.7 67.7 67.7 67.7 67.7 84.6 84.6 84.6 67.7 33.8  
 33.8 16.9 16.9 16.9 16.9 16.9 0.0 0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4448.9 4465.7 4533.1 4600.5 4684.8 4617.4 4330.9 3623.1 2696.3 1685.2 808.9 370.7  
 168.5 134.8 101.1 84.3 84.3 67.4 67.4 67.4 67.4 67.4 50.6 67.4 67.4 67.4 67.4 16.9 16.9  
 33.7 16.9 16.9 16.9 16.9 16.9 16.9 16.9  
 4448.9 4500.0 4602.3 4653.4 4721.6 4619.3 4090.9 3409.1 2181.8 1363.6 613.6 255.7  
 153.4 119.3 85.2 85.2 85.2 68.2 68.2 68.2 68.2 68.2 68.2 68.2 68.2 85.2 68.2 51.1 51.1 17.0  
 17.0 17.0 17.0 17.0 17.0 17.0 0.0  
 4448.9 4483.4 4552.3 4586.8 4690.3 4604.1 4310.9 3793.6 2741.7 1741.6 931.2 396.6  
 189.7 120.7 103.5 86.2 86.2 86.2 69.0 69.0 69.0 69.0 69.0 69.0 69.0 86.2 86.2 69.0 51.7  
 51.7 34.5 17.2 17.2 17.2 17.2 17.2 17.2  
 4448.9 4448.9 4516.3 4583.7 4617.4 4566.8 4162.4 3505.2 2595.2 1415.5 674.1 286.5  
 151.7 118.0 84.3 84.3 67.4 67.4 67.4 67.4 67.4 67.4 67.4 67.4 67.4 67.4 84.3 67.4 50.6 33.7  
 16.9 16.9 16.9 16.9 16.9 16.9 16.9  
 4448.9 4448.9 4482.6 4550.0 4583.7 4583.7 4330.9 3842.2 2864.8 1887.4 960.6 438.1  
 202.2 134.8 84.3 84.3 84.3 67.4 67.4 67.4 67.4 67.4 67.4 67.4 84.3 84.3 84.3 67.4 67.4 50.6  
 16.9 16.9 16.9 16.9 16.9 16.9 16.9  
 4448.9 4448.9 4482.6 4533.1 4583.7 4550.0 4246.6 3673.7 2780.5 1668.3 876.3 370.7  
 168.5 118.0 84.3 84.3 67.4 67.4 67.4 67.4 67.4 67.4 67.4 67.4 67.4 67.4 67.4 67.4 33.7 33.7  
 16.9 16.9 16.9 16.9 16.9 16.9 16.9  
 4448.9 4448.9 4448.9 4499.4 4566.8 4550.0 4381.5 3875.9 3100.7 2140.2 1129.1 556.1  
 252.8 134.8 118.0 84.3 84.3 84.3 84.3 67.4 67.4 67.4 67.4 67.4 67.4 84.3 84.3 67.4 16.9  
 33.7 16.9 16.9 16.9 16.9 16.9 16.9 16.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**IES File โคมไฟหลอดเซอเมไอ 200 W ตำแหน่งการกระจายแสง Flood 50 องศา**

IESNA:LM-63-2002

HMI 200 W 50D

220v 1.513A 202.7w 0.6pf

[Test] 9-04-14

[Luminaire]

TILT=NONE

1 1000 1 37 25 1 2 1 1 0

1 1.0 202.7

0 2.5 5 7.5 10 12.5 15 17.5 20 22.5 25 27.5 30 32.5 35 37.5 40 42.5 45 47.5 50 52.5 55  
57.5 60 62.5 65 67.5 70 72.5 75 77.5 80 82.5 85 87.5 900 15 30 45 60 75 90 105 120 135 150 165 180 195 210 225 240 255 270 285 300 315  
330 345 3605053.2 5036.4 4901.6 4868.0 4851.1 4817.4 4733.2 4699.5 4581.6 4278.4 3840.5 3116.2  
2274.0 1566.5 977.0 623.2 421.1 269.5 252.7 219.0 185.3 151.6 134.8 117.9 117.9 84.2  
84.2 84.2 84.2 67.4 50.5 16.8 16.8 16.8 16.8 16.8 16.85053.2 4985.9 4834.3 4733.2 4699.5 4665.8 4564.8 4430.0 4211.0 3975.2 3537.3 2829.8  
1987.6 1179.1 791.7 471.6 320.0 252.7 219.0 185.3 151.6 134.8 134.8 117.9 117.9 101.1  
84.2 101.1 117.9 117.9 67.4 50.5 50.5 16.8 16.8 16.8 16.85053.2 5036.4 4834.3 4682.7 4632.1 4581.6 4463.7 4295.3 4076.3 3789.9 3419.4 2728.8  
1970.8 1297.0 808.5 539.0 303.2 219.0 168.4 151.6 134.8 134.8 134.8 117.9 101.1 84.2  
84.2 84.2 84.2 101.1 84.2 67.4 50.5 16.8 16.8 16.8 16.85053.2 5002.7 4750.0 4632.1 4581.6 4497.4 4362.6 4143.7 3823.6 3486.7 2998.3 2408.7  
1718.1 1145.4 673.8 404.3 252.7 185.3 134.8 134.8 134.8 134.8 117.9 101.1 84.2 84.2 84.2  
84.2 101.1 117.9 84.2 67.4 33.7 16.8 16.8 16.8 16.85053.2 5019.6 4817.4 4649.0 4564.8 4480.5 4345.8 4059.4 3705.7 3250.9 2813.0 2341.3  
1684.4 1128.6 741.1 421.1 252.7 168.4 134.8 117.9 117.9 101.1 101.1 84.2 84.2 84.2 84.2  
84.2 84.2 101.1 84.2 50.5 33.7 16.8 16.8 16.8 16.85053.2 4985.9 4834.3 4649.0 4547.9 4446.9 4211.0 3857.3 3503.6 3116.2 2779.3 2257.1  
1701.3 1094.9 623.2 387.4 235.8 151.6 134.8 117.9 117.9 84.2 84.2 84.2 84.2 84.2 84.2  
84.2 84.2 101.1 67.4 33.7 16.8 16.8 16.8 16.8 16.85053.2 5019.7 4902.1 4801.4 4667.1 4516.0 4281.0 4029.2 3710.2 3324.1 2971.5 2535.0  
1964.2 1359.8 772.3 470.1 285.4 167.9 134.3 134.3 117.5 117.5 100.7 83.9 83.9 83.9 67.2  
67.2 50.4 33.6 33.6 16.8 16.8 16.8 33.6 16.8 16.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5053.2 5019.7 4969.3 4868.6 4700.7 4482.4 4281.0 4012.4 3727.0 3240.1 2870.8 2535.0  
 1997.8 1192.0 688.3 386.1 218.2 151.1 134.3 117.5 117.5 100.7 83.9 83.9 83.9 83.9 83.9  
 83.9 83.9 83.9 83.9 50.4 16.8 16.8 16.8 16.8 16.8  
 5053.2 5036.5 5036.5 4918.9 4818.2 4667.1 4448.9 4197.0 3911.6 3508.7 3189.8 2736.5  
 2048.2 1292.7 738.7 419.7 251.8 167.9 134.3 134.3 117.5 134.3 117.5 100.7 83.9 83.9 83.9  
 83.9 83.9 100.7 83.9 67.2 33.6 16.8 16.8 16.8 16.8  
 5053.2 5070.1 5087.0 4968.7 4850.4 4749.0 4613.8 4394.1 4073.0 3853.3 3582.9 2923.8  
 2028.1 1183.0 709.8 422.5 253.5 185.9 152.1 135.2 135.2 135.2 118.3 101.4 101.4 84.5  
 84.5 84.5 84.5 101.4 84.5 50.7 33.8 16.9 16.9 16.9 16.9  
 5053.2 5053.2 5070.1 4951.8 4867.3 4816.6 4732.1 4495.5 4123.7 3870.2 3532.2 2991.4  
 2112.6 1453.4 963.3 591.5 388.7 270.4 219.7 185.9 152.1 135.2 135.2 135.2 118.3 101.4  
 84.5 84.5 84.5 101.4 84.5 67.6 50.7 33.8 16.9 16.9 16.9  
 5053.2 5070.2 5053.2 4951.5 4883.7 4798.9 4595.4 4408.9 4307.1 4052.8 3594.9 2882.7  
 2017.9 1407.4 983.5 627.4 423.9 305.2 254.4 220.4 186.5 152.6 135.7 135.7 118.7 84.8  
 84.8 84.8 84.8 118.7 84.8 67.8 50.9 17.0 17.0 17.0 17.0  
 5053.2 5053.2 4985.4 4900.6 4866.7 4731.1 4731.1 4612.4 4493.7 4290.2 3662.8 2967.5  
 2221.4 1594.0 1153.1 780.0 508.7 339.1 254.4 237.4 186.5 152.6 135.7 135.7 118.7 101.7  
 84.8 84.8 84.8 67.8 50.9 33.9 17.0 17.0 17.0 17.0 17.0  
 5053.2 5036.2 4934.1 4866.1 4815.0 4781.0 4730.0 4610.9 4457.7 4202.5 3590.0 2824.4  
 2024.7 1463.2 1003.8 612.5 391.3 238.2 187.2 153.1 136.1 136.1 119.1 119.1 119.1 102.1  
 85.1 85.1 85.1 119.1 85.1 51.0 51.0 17.0 17.0 17.0 17.0  
 5053.2 5002.2 4917.1 4849.1 4849.1 4883.1 4849.1 4644.9 4389.7 4100.4 3556.0 2960.5  
 2313.9 1718.4 1157.0 697.6 391.3 255.2 170.1 136.1 136.1 136.1 119.1 119.1 102.1 102.1  
 85.1 85.1 85.1 85.1 85.1 68.1 34.0 34.0 17.0 17.0 17.0  
 5053.2 5001.7 4881.4 4847.0 4950.1 5036.1 4950.1 4726.7 4451.7 4004.8 3386.0 2561.0  
 1959.4 1461.0 996.9 584.4 275.0 206.3 154.7 137.5 137.5 120.3 103.1 85.9 85.9 85.9 85.9  
 85.9 85.9 120.3 85.9 68.8 51.6 17.2 17.2 17.2 17.2  
 5053.2 5018.9 4898.6 4778.2 4795.4 4915.7 4950.1 4847.0 4554.8 3987.6 3472.0 3007.9  
 2320.4 1736.0 1168.8 756.3 446.9 275.0 206.3 137.5 137.5 137.5 120.3 103.1 103.1 85.9  
 85.9 85.9 85.9 85.9 85.9 85.9 51.6 34.4 17.2 17.2 17.2  
 5053.2 5001.9 4847.7 4744.9 4762.0 4796.3 4744.9 4539.4 4128.2 3614.4 3220.4 2689.4  
 2004.2 1267.6 856.5 599.5 325.5 222.7 171.3 137.0 119.9 119.9 119.9 85.6 85.6 85.6 85.6  
 68.5 85.6 85.6 85.6 51.4 34.3 34.3 17.1 17.1 17.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5053.2 4985.2 4849.1 4695.9 4644.9 4661.9 4661.9 4491.8 4236.6 3913.3 3470.9 2875.4  
 2024.7 1259.1 833.7 544.5 357.3 238.2 170.1 136.1 119.1 119.1 102.1 85.1 85.1 85.1 85.1  
 85.1 68.1 68.1 51.0 34.0 17.0 34.0 17.0 17.0 17.0 17.0  
 5053.2 4985.0 4848.4 4728.9 4660.6 4677.7 4643.5 4506.9 4233.8 3909.4 3294.9 2782.7  
 1860.8 1314.5 853.6 546.3 324.4 239.0 153.6 136.6 136.6 119.5 102.4 85.4 85.4 85.4 85.4  
 85.4 85.4 102.4 85.4 68.3 51.2 17.1 34.1 17.1 17.1  
 5053.2 5019.1 4916.7 4831.3 4797.2 4848.4 4882.5 4780.1 4575.2 4250.9 3789.9 3192.4  
 2390.0 1570.6 1041.4 699.9 409.7 273.1 187.8 153.6 136.6 136.6 119.5 119.5 102.4 85.4  
 85.4 85.4 85.4 85.4 119.5 68.3 51.2 34.1 17.1 17.1 17.1  
 5053.2 5036.1 4984.7 4933.3 5036.1 5156.0 5121.8 5019.0 4796.3 4470.8 3922.7 3134.7  
 2363.9 1524.5 993.5 565.3 325.5 205.6 154.2 137.0 137.0 119.9 119.9 119.9 85.6 85.6 85.6  
 85.6 85.6 119.9 85.6 51.4 34.3 17.1 17.1 17.1 17.1  
 5053.2 5036.2 4968.2 4985.2 5138.3 5223.4 5172.3 5019.2 4815.0 4508.8 4066.4 3453.9  
 2620.2 1786.5 1071.9 663.6 391.3 238.2 170.1 136.1 136.1 136.1 136.1 119.1 102.1 102.1  
 85.1 85.1 85.1 119.1 119.1 68.1 68.1 51.0 17.0 17.0 17.0  
 5053.2 5036.3 4968.5 5002.4 5138.0 5138.0 5002.4 4866.7 4714.1 4442.8 3883.2 3289.7  
 2458.8 1577.0 1000.5 593.5 339.1 237.4 169.6 135.7 135.7 135.7 135.7 118.7 101.7 101.7  
 84.8 84.8 101.7 118.7 84.8 67.8 33.9 17.0 17.0 17.0 17.0  
 5053.2 5053.2 4968.7 4968.7 5019.4 4985.6 4918.0 4867.3 4698.3 4444.8 4005.4 3447.7  
 2552.0 1774.6 1166.1 726.7 456.3 304.2 253.5 219.7 185.9 169.0 135.2 135.2 118.3 118.3  
 84.5 84.5 84.5 67.6 50.7 50.7 16.9 16.9 16.9 16.9 16.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข  
ข้อมูล ปริมาณทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางไฟฟ้า ของโคมไฟ  
หลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W และโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ  
200 W จากเครื่องวัด Chauvin Arnoux C.A. 8335

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W

C.A 8335	Serial number	213933
Date Started	Time Started	
18/12/2556	15:48:07.269	
Connection Type: Single-Phase	MN93A Probe	Reactive values (var) calculation: With Harmonics
	5 A	

ข้อมูลตัวประกอบกำลัง (Power factor) และ กำลังไฟฟ้า (Power) 3 ประเภท



ข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกสรวมในรูปของค่าแรงดันและค่ากระแส (% THD<sub>v</sub>, % THD<sub>i</sub>)

Harmonic	V1			A1			VA1h		
	%	RMS	phase	%	RMS	phase	%	RMS	phase
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	100	225.1	0	100	0.461	0	100	103.771	-10
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0.1	0.225	105	28	0.13	159	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1.8	4.052	-163	7.3	0.03365	-166	0.1	0.10377	-7
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0.4	0.9	-64	4	0.01844	-112	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0.2	0.45	-70	3.1	0.01429	79	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0.3	0.675	-15	1	0.00461	-34	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0.9	0.00415	-6	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0.1	0.225	135	1.5	0.00692	-20	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Harmonic	V1			A1			VA1h		
	%	RMS	phase	%	RMS	phase	%	RMS	phase
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0.1	0.225	97	0.9	0.00415	-156	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0.3	0.00138	-105	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0.6	0.00277	180	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	2.1	0.00968	86	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0.2	0.00092	-68	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	1	0.00461	-111	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	1.3	0.00599	-14	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0.3	0.00138	-152	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	1.1	0.00507	152	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0.1	0.00046	-51	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0.4	0.00184	40	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0.4	0.00184	36	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0.2	0.00092	-96	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0.3	0.00138	-64	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0.4	0.00184	-170	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0.5	0.00231	132	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0.4	0.00184	-49	0	0	0
50	0	0	0	0.1	0.00046	-37	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

Time	V (HP-LED 104 W) (V)	A (HP-LED 104 W) (A)
15:48:07.269	4.639525084	0.048160653
15:48:07.269078	11.65276068	0.047509833
15:48:07.269156	19.20547593	0.046859013
15:48:07.269234	26.65029525	0.046859013
15:48:07.269313	34.2030105	0.047509833
15:48:07.269391	42.07941355	0.048160653
15:48:07.269469	49.74002474	0.048811472
15:48:07.269547	57.18484406	0.049462292
15:48:07.269625	65.06124711	0.048811472
15:48:07.269703	72.61396236	0.048811472
15:48:07.269781	80.27457355	0.049462292
15:48:07.26986	88.25887253	0.112591796
15:48:07.269938	95.91948372	0.17702294
15:48:07.270016	103.472199	0.195896709
15:48:07.270094	111.348602	0.232342608
15:48:07.270172	118.3618376	0.231040969
15:48:07.27025	125.5908651	0.22908851
15:48:07.270328	132.8198925	0.241454083
15:48:07.270407	139.941024	0.254470476
15:48:07.270485	147.0621556	0.263581951
15:48:07.270563	154.399079	0.274645884
15:48:07.270641	161.4123146	0.292868834
15:48:07.270719	168.641342	0.307837686
15:48:07.270797	175.6545776	0.323457357
15:48:07.270875	182.8836051	0.342981946
15:48:07.270954	190.1126325	0.361204895
15:48:07.271032	197.0179722	0.374872108
15:48:07.27111	204.1391037	0.386586861
15:48:07.271188	210.3970678	0.398301614
15:48:07.271266	216.9787196	0.411318007
15:48:07.271344	223.2366837	0.42303276

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time	V (HP-LED 104 W) (V)	A (HP-LED 104 W) (A)
15:48:07.271422	229.2788559	0.432795055
15:48:07.271501	234.8894444	0.443208169
15:48:07.271579	240.1763451	0.450367185
15:48:07.271657	245.5711417	0.496575379
15:48:07.271735	250.1027708	0.539529474
15:48:07.271813	254.526504	0.544736031
15:48:07.271891	258.8423413	0.562308161
15:48:07.271969	263.2660745	0.569467177
15:48:07.272047	267.1503281	0.577277013
15:48:07.272126	271.0345817	0.594198323
15:48:07.272204	275.3504189	0.607214716
15:48:07.272282	279.1267766	0.616326191
15:48:07.27236	282.4715505	0.627390125
15:48:07.272438	286.355804	0.68791635
15:48:07.272516	289.9163698	0.755601592
15:48:07.272594	293.2611437	0.766665526
15:48:07.272673	295.7427501	0.782285197
15:48:07.272751	298.1164606	0.791396672
15:48:07.272829	300.2743793	0.790745852
15:48:07.272907	302.1086101	0.784237656
15:48:07.272985	303.6191532	0.780983558
15:48:07.273063	305.0218003	0.780983558
15:48:07.273141	306.4244474	0.779681918
15:48:07.27322	307.5034067	0.778380279
15:48:07.273298	308.9060539	0.781634377
15:48:07.273376	309.4455335	0.780332738
15:48:07.273454	309.9850132	0.778380279
15:48:07.273532	310.308701	0.775777
15:48:07.27361	310.8481806	0.773173722
15:48:07.273688	311.1718684	0.771872083
15:48:07.273767	311.2797644	0.775777
15:48:07.273845	311.7113481	0.779681918

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time	V (HP-LED 104 W) (V)	A (HP-LED 104 W) (A)
15:48:07.273923	311.7113481	0.769919624
15:48:07.274001	311.4955562	0.754950772
15:48:07.274079	311.2797644	0.752347494
15:48:07.274157	311.1718684	0.757554051
15:48:07.274235	310.8481806	0.75820487
15:48:07.274314	310.6323888	0.760157329
15:48:07.274392	310.7402847	0.760157329
15:48:07.27447	310.308701	0.747140937
15:48:07.274548	309.9850132	0.745188478
15:48:07.274626	309.4455335	0.746490117
15:48:07.274704	309.2297417	0.738680282
15:48:07.274782	308.2586783	0.728917987
15:48:07.274861	306.6402393	0.722409791
15:48:07.274939	305.2375922	0.715250775
15:48:07.275017	303.0796735	0.701583563
15:48:07.275095	300.9217549	0.677503236
15:48:07.275173	298.3322525	0.658629467
15:48:07.275251	295.958542	0.650819631
15:48:07.275329	292.6137681	0.640406517
15:48:07.275408	289.592682	0.624136026
15:48:07.275486	286.1400122	0.604611437
15:48:07.275564	282.6873423	0.570117997
15:48:07.275642	279.0188806	0.491368822
15:48:07.27572	274.9188352	0.417175384
15:48:07.275798	271.1424776	0.397650795
15:48:07.275876	266.9345362	0.396999975
15:48:07.275955	261.9713234	0.381380304
15:48:07.276033	257.4396942	0.357950797
15:48:07.276111	252.4764813	0.339727848
15:48:07.276189	246.7579969	0.322155717
15:48:07.276267	241.5789922	0.302631129
15:48:07.276345	235.53682	0.225183592

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time	V (HP-LED 104 W) (V)	A (HP-LED 104 W) (A)
15:48:07.276423	229.7104396	0.162704908
15:48:07.276502	223.4524756	0.164657367
15:48:07.27658	217.4103034	0.133418024
15:48:07.276658	210.2891718	0.111940977
15:48:07.276736	203.70752	0.100877043
15:48:07.276814	196.9100762	0.085257372
15:48:07.276892	189.6810488	0.065081963
15:48:07.27697	182.0204376	0.044906555
15:48:07.277048	174.1440346	0.018873769
15:48:07.277127	166.4834234	-0.008460655
15:48:07.277205	158.9307081	-0.026683605
15:48:07.277283	150.9464091	-0.041001637
15:48:07.277361	142.7463183	-0.048811472
15:48:07.277439	134.6541234	-0.049462292
15:48:07.277517	126.9935122	-0.047509833
15:48:07.277595	119.2250051	-0.045557374
15:48:07.277674	112.7512491	-0.043604915
15:48:07.277752	105.9538054	-0.042303276
15:48:07.27783	99.48004948	-0.041652456
15:48:07.277908	93.22208541	-0.041001637
15:48:07.277986	86.96412134	-0.041001637
15:48:07.278064	80.59826134	-0.041652456
15:48:07.278142	73.80081762	-0.042303276
15:48:07.278221	67.21916575	-0.042954096
15:48:07.278299	60.42172203	-0.042954096
15:48:07.278377	53.19269457	-0.043604915
15:48:07.278455	45.96366711	-0.043604915
15:48:07.278533	38.62674372	-0.043604915
15:48:07.278611	31.39771627	-0.043604915
15:48:07.278689	24.06079288	-0.042954096
15:48:07.278768	17.37124508	-0.043604915
15:48:07.278846	9.818529829	-0.043604915

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time	V (HP-LED 104 W) (V)	A (HP-LED 104 W) (A)
15:48:07.278924	2.48160644	-0.043604915
15:48:07.279002	-4.747421016	-0.043604915
15:48:07.27908	-12.08434441	-0.044255735
15:48:07.279158	-19.63705966	-0.043604915
15:48:07.279236	-26.86608711	-0.044255735
15:48:07.279315	-34.63459423	-0.044906555
15:48:07.279393	-42.51099728	-0.045557374
15:48:07.279471	-50.38740033	-0.045557374
15:48:07.279549	-57.94011558	-0.044906555
15:48:07.279627	-65.7086227	-0.044255735
15:48:07.279705	-73.58502575	-0.044906555
15:48:07.279783	-81.4614288	-0.044255735
15:48:07.279862	-88.90624812	-0.115195075
15:48:07.27994	-96.67475524	-0.180277038
15:48:07.280018	-104.2274705	-0.190039332
15:48:07.280096	-111.5643939	-0.227786871
15:48:07.280174	-118.6855254	-0.227136051
15:48:07.280252	-125.9145529	-0.223231134
15:48:07.28033	-132.8198925	-0.234295067
15:48:07.280409	-140.1568159	-0.249914738
15:48:07.280487	-147.4937393	-0.262931131
15:48:07.280565	-154.9385586	-0.274645884
15:48:07.280643	-161.4123146	-0.290916375
15:48:07.280721	-168.9650298	-0.308488505
15:48:07.280799	-176.3019532	-0.322806537
15:48:07.280877	-183.4230847	-0.340378667
15:48:07.280956	-190.6521122	-0.357299978
15:48:07.281034	-197.6653478	-0.369665551
15:48:07.281112	-204.4627915	-0.384634402
15:48:07.28119	-210.7207556	-0.396349155
15:48:07.281268	-217.6260952	-0.408714728
15:48:07.281346	-223.6682674	-0.419778662

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time	V (HP-LED 104 W) (V)	A (HP-LED 104 W) (A)
15:48:07.281424	-229.4946478	-0.429540957
15:48:07.281503	-235.3210281	-0.439303251
15:48:07.281581	-240.6079288	-0.446462267
15:48:07.281659	-245.7869335	-0.464034397
15:48:07.281737	-250.2106667	-0.513496689
15:48:07.281815	-254.9580878	-0.558403244
15:48:07.281893	-259.273925	-0.566863899
15:48:07.281971	-263.2660745	-0.568816358
15:48:07.282049	-267.6898078	-0.579229472
15:48:07.282128	-271.7898532	-0.592245864
15:48:07.282206	-275.7820027	-0.597452422
15:48:07.282284	-279.2346725	-0.610468814
15:48:07.282362	-283.1189261	-0.614373732
15:48:07.28244	-286.7873878	-0.660581926
15:48:07.282518	-289.8084739	-0.743236019
15:48:07.282596	-292.82956	-0.778380279
15:48:07.282675	-296.3901257	-0.769919624
15:48:07.282753	-298.4401484	-0.760157329
15:48:07.282831	-300.9217549	-0.778380279
15:48:07.282909	-302.324402	-0.774475361
15:48:07.282987	-303.942841	-0.783586836
15:48:07.283065	-305.3454881	-0.787491754
15:48:07.283143	-306.6402393	-0.775777
15:48:07.283222	-307.9349905	-0.774475361
15:48:07.2833	-308.9060539	-0.779031099
15:48:07.283378	-309.7692213	-0.77707864
15:48:07.283456	-310.308701	-0.775126181
15:48:07.283534	-310.6323888	-0.77642782
15:48:07.283612	-311.1718684	-0.773173722
15:48:07.28369	-311.6034522	-0.775777
15:48:07.283769	-311.92714	-0.779031099
15:48:07.283847	-311.92714	-0.773824542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time	V (HP-LED 104 W) (V)	A (HP-LED 104 W) (A)
15:48:07.283925	-311.7113481	-0.766665526
15:48:07.284003	-311.92714	-0.760157329
15:48:07.284081	-311.7113481	-0.753649133
15:48:07.284159	-311.2797644	-0.751045855
15:48:07.284237	-311.1718684	-0.748442576
15:48:07.284316	-311.2797644	-0.749093396
15:48:07.284394	-311.2797644	-0.750395035
15:48:07.284472	-310.5244928	-0.751045855
15:48:07.28455	-310.4165969	-0.747791756
15:48:07.284628	-309.7692213	-0.739981921
15:48:07.284706	-309.3376376	-0.738680282
15:48:07.284784	-308.5823661	-0.725663889
15:48:07.284863	-307.1797189	-0.711996677
15:48:07.284941	-305.7770718	-0.708742578
15:48:07.285019	-303.7270491	-0.695726186
15:48:07.285097	-301.4612345	-0.685963891
15:48:07.285175	-298.8717322	-0.669042581
15:48:07.285253	-296.0664379	-0.644311435
15:48:07.285331	-293.3690396	-0.63519996
15:48:07.28541	-290.1321617	-0.618929469
15:48:07.285488	-286.6794918	-0.594849143
15:48:07.285566	-283.0110301	-0.567514718
15:48:07.285644	-279.3425684	-0.49462292
15:48:07.285722	-275.6741067	-0.427588498
15:48:07.2858	-271.5740613	-0.408714728
15:48:07.285878	-267.36612	-0.395047516
15:48:07.285957	-262.6186989	-0.372919649
15:48:07.286035	-257.6554861	-0.351442601
15:48:07.286113	-252.8001691	-0.331267192
15:48:07.286191	-247.4053725	-0.313695062
15:48:07.286269	-242.0105759	-0.295472113
15:48:07.286347	-236.0762996	-0.214770478

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time	V (HP-LED 104 W) (V)	A (HP-LED 104 W) (A)
15:48:07.286425	-230.0341274	-0.151640974
15:48:07.286504	-223.6682674	-0.162054088
15:48:07.286582	-216.9787196	-0.139926221
15:48:07.28666	-210.7207556	-0.111290157
15:48:07.286738	-204.1391037	-0.089813109
15:48:07.286816	-197.0179722	-0.071590159
15:48:07.286894	-189.6810488	-0.05271639
15:48:07.286972	-182.1283335	-0.031890162
15:48:07.28705	-174.3598264	-0.013667212
15:48:07.287129	-166.3755274	0.005857377
15:48:07.287207	-158.7149162	0.022778687
15:48:07.287285	-150.8385132	0.039699998
15:48:07.287363	-142.5305264	0.049462292
15:48:07.287441	-134.5462274	0.051414751
15:48:07.287519	-127.1014081	0.050763931
15:48:07.287597	-119.6565888	0.050763931
15:48:07.287676	-112.6433532	0.049462292
15:48:07.287754	-105.9538054	0.047509833
15:48:07.287832	-99.58794541	0.044906555
15:48:07.28791	-93.22208541	0.042954096
15:48:07.287988	-87.07201728	0.042303276
15:48:07.288066	-80.49036541	0.042303276
15:48:07.288144	-74.12450541	0.043604915
15:48:07.288223	-67.00337389	0.044906555
15:48:07.288301	-60.09803423	0.045557374
15:48:07.288379	-53.3005905	0.046208194
15:48:07.288457	-45.85577118	0.046208194
15:48:07.288535	-38.84253559	0.047509833
15:48:07.288613	-31.61350813	0.048160653
15:48:07.288691	-24.27658474	0.047509833
15:48:07.28877	-17.04755729	0.046859013
15:48:07.288848	-9.818529829	0.046859013
15:48:07.288926	-2.373710508	0.047509833

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W

C.A 8335	Serial number	213933
Date Started	Time Started	
18/12/2556	15:15:00.073	
Connection Type: Single-Phase	MN93A Probe	Reactive values (var) calculation: With Harmonics
	5 A	

ข้อมูลตัวประกอบกำลัง (Power factor) และ กำลังไฟฟ้า (Power) 3 ประเภท



ข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกสร่วมในรูปของค่าแรงดัน และค่ากระแส (% THD<sub>v</sub>, % THD<sub>i</sub>)

Harmonic	V1			A1			VA1h		
	%	RMS	phase	%	RMS	phase	%	RMS	phase
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	100	224.1	0	100	1	0	100	224.1	-14
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0.2	0.448	82	0.89	0.89	173	-0.2	-0.448	-105
4	0	0	0	0.1	0	-86	0	0	0
5	2.1	4.706	-154	0.71	0.71	-8	-1.5	-3.362	-160
6	0	0	0	0.1	0	37	0	0	0
7	0.6	1.345	-38	0.53	0.53	177	-0.3	-0.672	131
8	0	0	0	0.2	0	176	0	0	0
9	0.1	0.224	-44	0.4	0.4	11	0	0	0
10	0	0	0	0.2	0	-27	0	0	0
11	0.1	0.224	-4	0.34	0.34	-153	0	0	0
12	0	0	0	0.3	0	133	0	0	0
13	0.1	0.224	151	0.3	0.3	38	0	0	0
14	0	0	0	0.3	0	-60	0	0	0
15	0.1	0.224	-130	0.24	0.24	-134	0	0	0
16	0	0	0	0.3	0	114	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Harmonic	V1			A1			VA1h		
	%	RMS	phase	%	RMS	phase	%	RMS	phase
17	0	0	0	17	0.17	58	0	0	0
18	0	0	0	0.2	0	-63	0	0	0
19	0	0	0	12	0.12	-97	0	0	0
20	0	0	0	0.2	0	122	0	0	0
21	0	0	0	10	0.1	112	0	0	0
22	0	0	0	0.2	0	-48	0	0	0
23	0	0	0	9.5	0.1	-50	0	0	0
24	0	0	0	0.2	0	139	0	0	0
25	0	0	0	7.8	0.08	145	0	0	0
26	0	0	0	0.2	0	-37	0	0	0
27	0	0	0	6	0.06	-12	0	0	0
28	0	0	0	0.2	0	138	0	0	0
29	0	0	0	5.2	0.05	-166	0	0	0
30	0	0	0	0.2	0	-45	0	0	0
31	0	0	0	4.8	0.05	33	0	0	0
32	0	0	0	0.1	0	131	0	0	0
33	0	0	0	3.9	0.04	-132	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	2.7	0.03	72	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	2.2	0.02	-71	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	2.3	0.02	136	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	2.1	0.02	-27	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	1.6	0.02	178	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	1.5	0.02	33	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0	0	0	1.7	0.02	-124	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	1.6	0.02	69	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

Time	V (HMI 200 W) (V)	A (HMI 200 W) (A)
15:15:00.073	3.45266983	0.057922947
15:15:00.073078	11.43696881	0.057922947
15:15:00.073156	19.09758	0.057922947
15:15:00.073234	26.65029525	0.057272128
15:15:00.073312	34.63459423	0.057922947
15:15:00.07339	42.51099728	0.058573767
15:15:00.073468	50.06371254	0.057922947
15:15:00.073546	57.72432372	0.057272128
15:15:00.073625	65.49283084	0.057922947
15:15:00.073703	73.15344202	0.057922947
15:15:00.073781	80.92194914	0.057922947
15:15:00.073859	88.69045626	0.058573767
15:15:00.073937	96.56685931	0.057922947
15:15:00.074015	104.5511583	0.057272128
15:15:00.074093	111.9959776	0.057922947
15:15:00.074171	119.1171091	0.057272128
15:15:00.074249	126.5619285	0.057272128
15:15:00.074327	133.4672681	0.056621308
15:15:00.074405	140.5883996	0.055970488
15:15:00.074483	147.7095312	0.055970488
15:15:00.074561	154.6148708	0.055970488
15:15:00.074639	161.6281064	0.055970488
15:15:00.074717	168.9650298	0.056621308
15:15:00.074795	175.9782654	0.055970488
15:15:00.074874	183.4230847	0.056621308
15:15:00.074952	190.1126325	0.056621308
15:15:00.07503	197.233764	0.055970488
15:15:00.075108	203.9233118	0.055319669
15:15:00.075186	209.965484	0.054668849
15:15:00.075264	216.2234481	0.054018029
15:15:00.075342	222.1577244	0.05336721

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time	V (HMI 200 W) (V)	A (HMI 200 W) (A)
15:15:00.07542	228.1998966	0.05271639
15:15:00.075498	233.8104851	0.052065571
15:15:00.075576	239.4210735	0.052065571
15:15:00.075654	244.6000783	0.050763931
15:15:00.075732	249.6711871	0.050763931
15:15:00.07581	254.4186081	0.050113112
15:15:00.075888	258.7344454	0.048811472
15:15:00.075966	263.3739705	0.047509833
15:15:00.076044	267.36612	0.046859013
15:15:00.076123	271.4661654	0.047509833
15:15:00.076201	275.5662108	0.047509833
15:15:00.076279	279.6662562	0.047509833
15:15:00.076357	281.9320708	0.05271639
15:15:00.076435	284.4136772	0.67099504
15:15:00.076513	287.1110756	2.199119534
15:15:00.076591	290.2400576	3.889298117
15:15:00.076669	292.5058722	5.178571806
15:15:00.076747	294.9874786	5.960206183
15:15:00.076825	297.3611891	6.288219277
15:15:00.076903	298.9796281	6.314902882
15:15:00.076981	300.705963	6.156753712
15:15:00.077059	302.2165061	5.854122583
15:15:00.077137	303.5112572	5.441502937
15:15:00.077215	305.0218003	5.021724275
15:15:00.077293	305.8849678	4.617565284
15:15:00.077372	306.3165515	4.169801378
15:15:00.07745	307.071823	3.677781736
15:15:00.077528	307.1797189	3.17730144
15:15:00.077606	307.6113027	2.734093271
15:15:00.077684	308.3665742	2.380698211
15:15:00.077762	308.2586783	2.108004786
15:15:00.07784	308.5823661	1.90559988

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time	V (HMI 200 W) (V)	A (HMI 200 W) (A)
15:15:00.077918	308.9060539	1.763070381
15:15:00.077996	309.1218457	1.649176946
15:15:00.078074	309.3376376	1.537886789
15:15:00.078152	309.7692213	1.42919991
15:15:00.07823	309.5534294	1.322465491
15:15:00.078308	309.6613254	1.213127793
15:15:00.078386	309.5534294	1.099885177
15:15:00.078464	309.4455335	0.982737643
15:15:00.078542	309.6613254	0.857780274
15:15:00.078621	309.0139498	0.714599955
15:15:00.078699	308.690262	0.536275376
15:15:00.078777	308.3665742	0.328663914
15:15:00.078855	307.071823	0.104781961
15:15:00.078933	305.6691759	-0.018873769
15:15:00.079011	304.4823206	-0.03579508
15:15:00.079089	302.2165061	-0.037096719
15:15:00.079167	299.8427956	-0.039699998
15:15:00.079245	297.3611891	-0.041001637
15:15:00.079323	294.1243111	-0.041652456
15:15:00.079401	290.8874332	-0.041001637
15:15:00.079479	287.2189715	-0.040350817
15:15:00.079557	283.7663017	-0.041652456
15:15:00.079635	280.2057359	-0.042954096
15:15:00.079713	275.9977945	-0.044906555
15:15:00.079791	271.8977491	-0.046208194
15:15:00.07987	267.36612	-0.046859013
15:15:00.079948	262.1871152	-0.047509833
15:15:00.080026	257.0081105	-0.046859013
15:15:00.080104	251.8291057	-0.046208194
15:15:00.080182	246.1106213	-0.046208194
15:15:00.08026	240.5000328	-0.048160653
15:15:00.080338	234.1341728	-0.049462292

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time	V (HMI 200 W) (V)	A (HMI 200 W) (A)
15:15:00.080416	227.9841047	-0.051414751
15:15:00.080494	221.7261406	-0.052065571
15:15:00.080572	214.6050091	-0.052065571
15:15:00.08065	208.1312532	-0.051414751
15:15:00.080728	200.9022257	-0.052065571
15:15:00.080806	192.486343	-0.05271639
15:15:00.080884	184.7178359	-0.054018029
15:15:00.080962	177.0572247	-0.054018029
15:15:00.08104	169.1808217	-0.054668849
15:15:00.081119	161.7360023	-0.055970488
15:15:00.081197	154.399079	-0.055319669
15:15:00.081275	147.4937393	-0.054018029
15:15:00.081353	140.5883996	-0.05271639
15:15:00.081431	134.1146437	-0.050763931
15:15:00.081509	127.209304	-0.049462292
15:15:00.081587	120.7355481	-0.050113112
15:15:00.081665	114.1538963	-0.050113112
15:15:00.081743	107.4643485	-0.051414751
15:15:00.081821	100.7748007	-0.05336721
15:15:00.081899	93.869461	-0.05271639
15:15:00.081977	87.17991321	-0.05336721
15:15:00.082055	80.49036541	-0.05271639
15:15:00.082133	73.58502575	-0.052065571
15:15:00.082211	66.46389423	-0.052065571
15:15:00.082289	59.88224236	-0.051414751
15:15:00.082368	52.76111084	-0.052065571
15:15:00.082446	46.28735491	-0.05271639
15:15:00.082524	39.16622338	-0.052065571
15:15:00.082602	32.47667559	-0.052065571
15:15:00.08268	25.35554406	-0.052065571
15:15:00.082758	18.7738922	-0.052065571
15:15:00.082836	11.43696881	-0.05271639

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time	V (HMI 200 W) (V)	A (HMI 200 W) (A)
15:15:00.082914	4.207941355	-0.054018029
15:15:00.082992	-3.668461694	-0.05336721
15:15:00.08307	-11.32907288	-0.054018029
15:15:00.083148	-18.98968407	-0.054668849
15:15:00.083226	-27.08187898	-0.054668849
15:15:00.083304	-35.06617796	-0.054668849
15:15:00.083382	-43.26626881	-0.054668849
15:15:00.08346	-50.38740033	-0.054018029
15:15:00.083538	-58.15590745	-0.054018029
15:15:00.083617	-66.0323105	-0.05336721
15:15:00.083695	-73.80081762	-0.054018029
15:15:00.083773	-81.24563694	-0.054018029
15:15:00.083851	-89.12203999	-0.054668849
15:15:00.083929	-97.10633897	-0.054018029
15:15:00.084007	-104.4432624	-0.05336721
15:15:00.084085	-112.2117695	-0.05271639
15:15:00.084163	-119.5486929	-0.05271639
15:15:00.084241	-126.9935122	-0.052065571
15:15:00.084319	-134.1146437	-0.052065571
15:15:00.084397	-141.0199834	-0.052065571
15:15:00.084475	-148.3569068	-0.051414751
15:15:00.084553	-155.1543505	-0.051414751
15:15:00.084631	-161.8438983	-0.052065571
15:15:00.084709	-169.2887176	-0.051414751
15:15:00.084787	-176.1940573	-0.051414751
15:15:00.084866	-183.6388766	-0.051414751
15:15:00.084944	-190.5442162	-0.051414751
15:15:00.085022	-197.9890356	-0.052065571
15:15:00.0851	-204.3548956	-0.050763931
15:15:00.085178	-211.0444434	-0.050113112
15:15:00.085256	-216.8708237	-0.049462292
15:15:00.085334	-223.0208918	-0.048160653

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time	V (HMI 200 W) (V)	A (HMI 200 W) (A)
15:15:00.085412	-228.8472722	-0.046859013
15:15:00.08549	-233.918381	-0.046208194
15:15:00.085568	-239.0973857	-0.045557374
15:15:00.085646	-244.6000783	-0.045557374
15:15:00.085724	-249.5632912	-0.044906555
15:15:00.085802	-254.8501918	-0.045557374
15:15:00.08588	-259.8134047	-0.044906555
15:15:00.085958	-263.9134501	-0.043604915
15:15:00.086036	-268.6608711	-0.042954096
15:15:00.086115	-272.7609166	-0.042303276
15:15:00.086193	-275.8898986	-0.042303276
15:15:00.086271	-279.8820481	-0.041652456
15:15:00.086349	-282.0399667	-0.046208194
15:15:00.086427	-284.4136772	-0.559054063
15:15:00.086505	-287.2189715	-1.966776926
15:15:00.086583	-289.7005779	-3.659558787
15:15:00.086661	-293.0453518	-5.068583288
15:15:00.086739	-295.3111664	-6.035050441
15:15:00.086817	-297.576981	-6.488671724
15:15:00.086895	-299.6270037	-6.577834013
15:15:00.086973	-301.1375467	-6.413176647
15:15:00.087051	-302.5401939	-6.000557
15:15:00.087129	-303.942841	-5.472742279
15:15:00.087207	-305.1296962	-4.974214442
15:15:00.087285	-305.8849678	-4.547927583
15:15:00.087364	-306.9639271	-4.132704659
15:15:00.087442	-307.1797189	-3.699258784
15:15:00.08752	-307.8270945	-3.234573567
15:15:00.087598	-308.1507823	-2.790714579
15:15:00.087676	-308.0428864	-2.410635914
15:15:00.087754	-308.4744701	-2.077416263
15:15:00.087832	-309.1218457	-1.815135952

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time	V (HMI 200 W) (V)	A (HMI 200 W) (A)
15:15:00.08791	-308.7981579	-1.653081863
15:15:00.087988	-309.3376376	-1.546998264
15:15:00.088066	-309.5534294	-1.461090072
15:15:00.088144	-309.4455335	-1.379737618
15:15:00.088222	-309.8771172	-1.293829427
15:15:00.0883	-309.6613254	-1.19946058
15:15:00.088378	-309.7692213	-1.082963866
15:15:00.088456	-309.5534294	-0.962562235
15:15:00.088534	-309.4455335	-0.837604865
15:15:00.088613	-309.2297417	-0.698329464
15:15:00.088691	-308.9060539	-0.543434392
15:15:00.088769	-308.4744701	-0.343632765
15:15:00.088847	-307.3955108	-0.122354091
15:15:00.088925	-305.9928637	0.009762294
15:15:00.089003	-304.3744247	0.040350817
15:15:00.089081	-302.2165061	0.042303276
15:15:00.089159	-300.2743793	0.044255735
15:15:00.089237	-297.3611891	0.045557374
15:15:00.089315	-294.6637908	0.046208194
15:15:00.089393	-291.3190169	0.044906555
15:15:00.089471	-287.5426593	0.044906555
15:15:00.089549	-284.1978854	0.046208194
15:15:00.089627	-280.3136318	0.046859013
15:15:00.089705	-276.1056905	0.048160653
15:15:00.089783	-271.8977491	0.050763931
15:15:00.089862	-267.36612	0.051414751
15:15:00.08994	-262.1871152	0.051414751
15:15:00.090018	-257.3317983	0.050763931
15:15:00.090096	-252.2606895	0.050113112
15:15:00.090174	-246.542205	0.051414751
15:15:00.090252	-240.7158247	0.052065571
15:15:00.09033	-234.4578606	0.054018029

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time	V (HMI 200 W) (V)	A (HMI 200 W) (A)
15:15:00.090408	-228.1998966	0.056621308
15:15:00.090486	-221.2945569	0.057922947
15:15:00.090564	-214.3892173	0.057272128
15:15:00.090642	-207.5917735	0.057922947
15:15:00.09072	-200.470642	0.057272128
15:15:00.090798	-192.9179268	0.056621308
15:15:00.090876	-185.1494196	0.057922947
15:15:00.090954	-177.3809125	0.058573767
15:15:00.091032	-169.2887176	0.058573767
15:15:00.091111	-161.8438983	0.059224586
15:15:00.091189	-154.399079	0.060526226
15:15:00.091267	-147.0621556	0.059875406
15:15:00.091345	-140.2647118	0.058573767
15:15:00.091423	-133.575164	0.05970488
15:15:00.091501	-126.8856163	0.054668849
15:15:00.091579	-120.7355481	0.054018029
15:15:00.091657	-114.2617922	0.05336721
15:15:00.091735	-107.4643485	0.054668849
15:15:00.091813	-100.9905925	0.056621308
15:15:00.091891	-94.08525287	0.057272128
15:15:00.091969	-87.39570507	0.057272128
15:15:00.092047	-80.49036541	0.056621308
15:15:00.092125	-73.36923389	0.055970488
15:15:00.092203	-66.78758202	0.055970488
15:15:00.092281	-60.31382609	0.055319669
15:15:00.09236	-53.19269457	0.055319669
15:15:00.092438	-46.71893864	0.054668849
15:15:00.092516	-39.81359898	0.055319669
15:15:00.092594	-32.69246745	0.055970488
15:15:00.092672	-25.78712779	0.056621308
15:15:00.09275	-18.66599627	0.055970488
15:15:00.092828	-11.22117695	0.056621308
15:15:00.092906	-4.100045423	0.056621308

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- ค.1 การคำนวณค่าพื้นฐานของแสง
- ค.2 การคำนวณค่าอุณหภูมิสีของแสงเทียบเคียง
- ค.3 การคำนวณค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การคำนวณค่าพื้นฐานของแสง

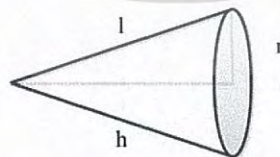
งานวิจัยนี้ศึกษาคำนวณค่าสมรรถนะทางแสงที่ประกอบด้วย ฟลักซ์ส่องสว่าง (Luminous Flux) หน่วย ลูเมน (lm) ความเข้มส่องสว่าง (Luminous Intensity) หน่วย แคนเดลา (cd) ความเข้มแสง (Illuminance or Illumination) หน่วย ลักซ์ (lx) และ ค่าประสิทธิภาพการส่องสว่าง (Luminous Efficacy) หน่วย ลูเมนต่อวัตต์ (lm/W) ระหว่างโคมไฟหลอดเซอเมไอ 200 W และ หลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ภายใต้การตั้งค่าหมวดควบคุมทิศทางแสงของโคมประเภท ลักษณะการกระจายแสง Spot 15 องศา และ Flood 50 องศา กำหนดระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 1.5, 3.0, 4.6 เมตร ตามลำดับ ความสูงของโคมไฟจากระดับพื้นของสตูดิโอมีค่าระยะ 1.7 เมตร จากการตั้งค่ากระจายแสง Spot ที่ 15 องศา และกำหนดระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคล 3 ระยะ ทำให้เกิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแสงที่กระจายออกมีค่า 0.4, 0.8, 1.2 เมตร ตามลำดับ ในส่วนของการกระจายแสง Flood ที่ 50 องศา จะเกิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงแสงมีค่า 1.4, 2.8, 4.3 เมตร ตามลำดับ การคำนวณหาสมรรถนะทางแสง ภายใต้ทฤษฎีการส่องสว่างสามารถสรุปการคำนวณดังต่อไปนี้

การคำนวณหาค่าความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงของโคมทั้ง 2 ประเภทสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$E = \frac{\phi}{A_c} \quad (1)$$

เมื่อ  $E$  คือ ความเข้มแสง (Illuminance or Illumination) หน่วย lx  
 $\phi$  คือ ฟลักซ์ส่องสว่าง (Luminous Flux) หน่วย lm  
 $A_c$  คือ พื้นที่ผิวของทรงกรวย  $A_{surface\ of\ cone}$  หน่วย  $m^2$

สำหรับการคำนวณหาพื้นที่ผิวของความเข้มแสงจากลักษณะการกระจายแสงของโคมไฟทั้ง 2 มีลักษณะรูปทรงกรวย แสดงดังรูปที่ 1 สามารถคำนวณหาค่าได้ดังสมการที่ 2



รูปที่ 1 พื้นที่ผิวทรงกรวยของการกระจายแสงของโคมไฟทั้ง 2 ประเภท

$$A_c = \pi R^2 + \pi Rl \quad (2)$$

- เมื่อ  $R$  คือ รัศมีของวงกระจายแสงของโคมไฟที่ตกกระทบลงพื้นที่ให้ความสว่างหรือตัวแบบ หน่วย m
- $l$  คือ ระยะทางจากแหล่งกำเนิดแสงในทิศทางเอียงไปยังพื้นที่ให้ความสว่างหรือตัวแบบ หน่วย m
- $h$  คือ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงของโคมไฟถึงตำแหน่งตัวแบบบุคคลในทิศทางตรง หน่วย m สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$l = \sqrt{h^2 + r^2} \quad (3)$$

ดังนั้น การหาค่า ฟลักซ์ส่องสว่าง การกระจายแสงโคมไฟทั้ง 2 ประเภท สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$\phi = E \times [(\pi R^2) + (\pi Rl)] \quad (4)$$

การคำนวณความเข้มส่องสว่างของแหล่งกำเนิดแสงของโคมไฟทั้ง 2 ประเภท ที่ตกกระทบลงพื้นที่ให้ความสว่างหรือตัวแบบคำนวณได้ดังสมการที่ 5

$$I = E \times d^2 \quad (5)$$

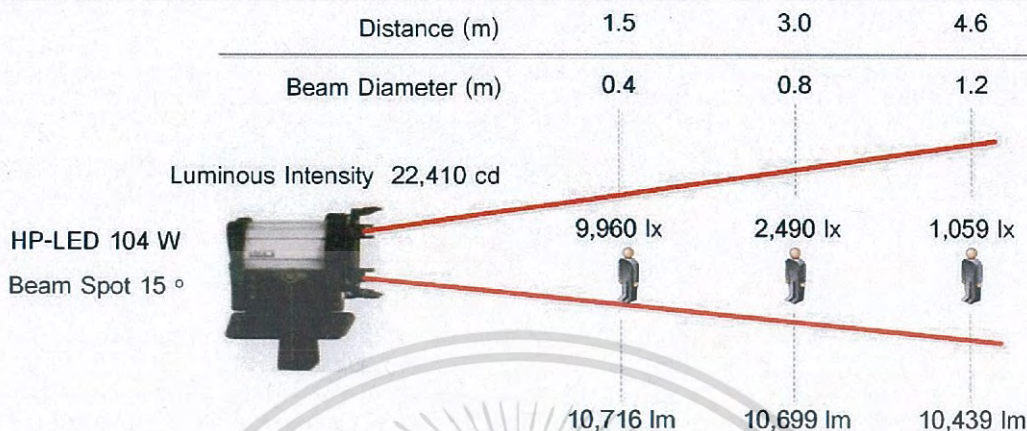
- เมื่อ  $I$  คือ ความเข้มส่องสว่าง (Luminous Intensity) หน่วย cd
- $d$  คือ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงของโคมไฟถึงตำแหน่งตัวแบบบุคคลในทิศทางตรง หรือ ระยะเดียวกับตัวแปร  $h$  หน่วย m

การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการส่องสว่าง (Luminous Efficacy) เป็นการพิจารณาระหว่างค่าฟลักซ์ส่องสว่างที่ติดต่อหน่วยการใช้กำลังไฟฟ้าของโคมไฟแต่ละประเภท สามารถคำนวณหาค่าได้ดังสมการที่ 6

$$\text{Luminous Efficacy} = \frac{\phi}{P} \quad (6)$$

- เมื่อ  $P$  คือ กำลังของหลอดไฟที่ติดตั้งภายในโคมไฟ (Active Power) หน่วย W

การคำนวณ โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ตำแหน่งการกระจายแสง Spot 15 องศา



รูปที่ 2 โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ตำแหน่ง Beam Spot 15°

### กรณีตำแหน่งที่ 1

กำหนดให้ - โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W หมวดควบคุมการกระจายแสง Spot 15 องศา

- ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 1.5 เมตร
- เส้นผ่านศูนย์กลางของวงแสงที่ระยะ 1.5 เมตร มีค่า 0.4 เมตร
- ค่าความเข้มแสง เป็นค่าที่นำมาจากคู่มือของโคมไฟ (Photometric Data) หลอดแอลอีดี

กำลังสูง 104 W ของผลิตภัณฑ์ Lite Panel ที่ตำแหน่งดังกล่าวมีค่า 9960 lx

### วิธีการคำนวณ

คำนวณหาค่าความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W โดยเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาพื้นที่ผิวของทรงกรวย  $A_c$  และคำนวณหาค่า  $l$  ระยะทางจากแหล่งกำเนิดแสงในทิศทางเอียงไปยังพื้นที่ให้ความสว่างหรือตัวแบบ แทนค่าลงในสมการที่ 3

$$l = \sqrt{1.5^2 + 0.2^2}$$

$$= 1.513 \text{ m}$$

แล้ว นำค่าต่างๆ แทนค่าลงในสมการที่ 4 เพื่อคำนวณหาค่าฟลักซ์ส่องสว่าง

$$\Phi = 9,960 \times (\pi(0.2^2) + (\pi \times 0.2 \times 1.513))$$

$$= 10,716 \text{ lm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้สามารถคำนวณหาค่าความเข้มส่องสว่าง แทนค่าลงในสมการที่ 5

$$\begin{aligned} I &= 9,960 \times 1.5^2 \\ &= 22,410 \text{ cd} \end{aligned}$$

สำหรับประสิทธิภาพการส่องสว่างของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ณ ตำแหน่งนี้ ค่ากำลังไฟฟ้าของโคมที่วัดได้จาก เครื่องวัดคุณภาพทางไฟฟ้า Chauvin Arnoux C.A. 8335 มีค่า 103.5 W และนำค่าฟลักซ์ส่องสว่างแทนค่าลงในสมการที่ 6

$$\begin{aligned} \text{Luminous Efficacy} &= \frac{10,716}{103.5} \\ &= 103.53 \text{ \%} \end{aligned}$$

## กรณีตำแหน่งที่ 2

กำหนดให้ -โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W หมดควบคุมการกระจายแสง Spot 15 องศา  
-ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 3.0 เมตร  
-เส้นผ่านศูนย์กลางของวงแสงที่ระยะ 3.0 เมตร มีค่า 0.8 เมตร

## วิธีการคำนวณ

คำนวณหาค่าความเข้มแสงของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ของผลิตภัณฑ์ Lite Panel โดยนำค่าความเข้มส่องสว่าง จากกรณีตำแหน่งที่ 1 ที่คำนวณได้ มีค่า 22,410 cd นำมาแทนค่าลงในสมการที่ 5 แทนการนำค่าจาก คู่มือของโคมไฟ (Photometric Data) สำหรับเริ่มต้นในการคำนวณ

$$\begin{aligned} E &= \frac{22,410}{3^2} \\ &= 2,490 \text{ lx} \end{aligned}$$

คำนวณหาระยะทางจากแหล่งกำเนิดแสง  $I$  ในทิศทางเอียงไปยังพื้นที่ให้ความสว่างหรือตัวแบบ แทนค่าลงในสมการที่ 3

$$\begin{aligned} l &= \sqrt{3.0^2 + 0.4^2} \\ &= 3.02 \text{ m} \end{aligned}$$

แล้วนำค่าต่างๆ แทนค่าลงในสมการที่ 4 เพื่อคำนวณหาค่าฟลักซ์ส่องสว่าง

$$\begin{aligned} \varnothing &= 2,490 \times (\pi(0.4^2) + (\pi \times 0.4 \times 3.02)) \\ &= 10,699 \text{ lm} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับประสิทธิภาพการส่องสว่างของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ณ ตำแหน่งนี้ ค่ากำลังไฟฟ้าของโคมที่วัดได้จาก เครื่องวัดคุณภาพทางไฟฟ้า Chauvin Arnoux C.A. 8335 มีค่า 103.5 W และนำค่าฟลักซ์ส่องสว่างแทนค่าลงในสมการที่ 6

$$\begin{aligned} \text{Luminous Efficacy} &= \frac{10,699}{103.5} \\ &= 103.37 \% \end{aligned}$$

### กรณีตำแหน่งที่ 3

กำหนดให้ -โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W หมวดควบคุมการกระจายแสง Spot 15 องศา  
-ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 4.6 เมตร  
-เส้นผ่านศูนย์กลางของวงแสงที่ระยะ 4.6 เมตร มีค่า 1.2 เมตร

### วิธีการคำนวณ

คำนวณหาค่าความเข้มแสงของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ของผลิตภัณฑ์ Lite Panel โดยนำค่าความเข้มส่องสว่าง จากกรณีตำแหน่งที่ 1 มีค่า 22,410 cd นำมาแทนค่าลงในสมการที่ 5 แทนการนำค่าจาก คู่มือของโคมไฟ (Photometric Data) มาเริ่มต้นในการคำนวณ

$$\begin{aligned} E &= \frac{22,410}{4.6^2} \\ &= 1.059 \text{ lx} \end{aligned}$$

คำนวณค่าระยะทางจากแหล่งกำเนิดแสง / ในทิศทางเอียงไปยังพื้นที่ให้ความสว่างหรือตัวแบบแทนค่าลงในสมการที่ 3

$$\begin{aligned} l &= \sqrt{4.6^2 + 0.6^2} \\ &= 4.63 \text{ m} \end{aligned}$$

แล้วนำค่าต่างๆ แทนค่าลงในสมการที่ 4 เพื่อคำนวณหาค่าฟลักซ์ส่องสว่าง

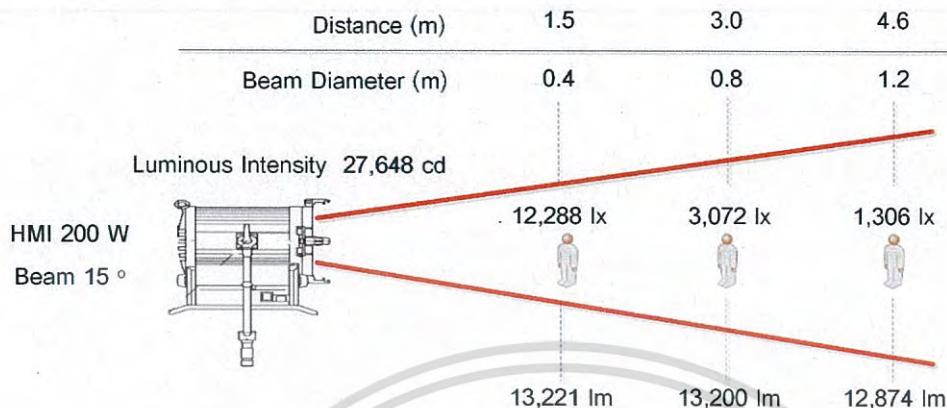
$$\begin{aligned} \Phi &= 1.059 \times (\pi(0.6^2) + (\pi \times 0.6 \times 4.63)) \\ &= 10,439 \text{ lm} \end{aligned}$$

สำหรับประสิทธิภาพการส่องสว่างของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ณ ตำแหน่งนี้ ค่ากำลังไฟฟ้าของโคมที่วัดได้จาก เครื่องวัดคุณภาพทางไฟฟ้า Chauvin Arnoux C.A. 8335 มีค่า 103.5 W และนำค่าฟลักซ์ส่องสว่างแทนค่าลงในสมการที่ 6

$$\begin{aligned} \text{Luminous Efficacy} &= \frac{10,439}{103.5} \\ &= 100.85 \% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ- โคมไฟหลอดเซอเอ็มไอ 200 W ตำแหน่งการกระจายแสง Spot 15 องศา



รูปที่ 3 โคมไฟหลอดเซอเอ็มไอ 200 W ตำแหน่ง Beam Spot 15°

กรณีตำแหน่งที่ 1

- กำหนดให้ -โคมไฟหลอดเซอเอ็มไอ 200 W หมวดควบคุมการกระจายแสง Spot 15 องศา
- ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 1.5 เมตร
- เส้นผ่านศูนย์กลางของวงแสงที่ระยะ 1.5 เมตร มีค่า 0.4 เมตร
- ค่าความเข้มแสง เป็นค่าที่นำมาจากคู่มือโคมไฟ (Photometric Data) ของหลอดเซอเอ็มไอ 200 W ของผลิตภัณฑ์ Arri ที่ตำแหน่งดังกล่าวมีค่า 12288 lx

วิธีการคำนวณ

คำนวณหาค่าความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงของโคมไฟหลอดเซอเอ็มไอ 200 W ของผลิตภัณฑ์ Arri โดยเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาพื้นที่ผิวของทรงกรวย  $A_c$  และคำนวณหา  $l$  ระยะทางจากแหล่งกำเนิดแสงในทิศทางเอียงไปยังพื้นที่ให้ความสว่างหรือตัวแบบ แทนค่าลงในสมการที่ 3

$$l = \sqrt{1.5^2 + 0.2^2}$$

$$= 1.513 \text{ m}$$

แล้ว นำค่าต่างๆ แทนค่าลงในสมการที่ 4 เพื่อคำนวณหาค่าฟลักซ์ส่องสว่าง

$$\Phi = 12,288 \times (\pi(0.2^2) + (\pi \times 0.2 \times 1.513))$$

$$= 13,221 \text{ lm}$$

นอกจากนี้สามารถคำนวณหาค่าความเข้มส่องสว่าง แทนค่าลงในสมการที่ 5

$$\begin{aligned} I &= 12,288 \times 1.5^2 \\ &= 27,648 \text{ cd} \end{aligned}$$

สำหรับประสิทธิภาพการส่องสว่างของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ณ ตำแหน่งนี้ ค่ากำลังไฟฟ้าของโคมที่วัดได้จาก เครื่องวัดคุณภาพทางไฟฟ้า Chauvin Arnoux C.A. 8335 มีค่า 214.6 W และนำค่าฟลักซ์ส่องสว่างแทนค่าลงในสมการที่ 6

$$\begin{aligned} \text{Luminous Efficacy} &= \frac{13,221}{214.6} \\ &= 61.6 \% \end{aligned}$$

## กรณีตำแหน่งที่ 2

กำหนดให้ –โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W หมวดควบคุมการกระจายแสง Spot 15 องศา  
 -ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 3.0 เมตร  
 -เส้นผ่านศูนย์กลางของวงแสงที่ระยะ 3.0 เมตร มีค่า 0.8 เมตร

## วิธีการคำนวณ

คำนวณหาค่าความเข้มแสงของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ของผลิตภัณฑ์ Arri โดยนำค่าความเข้มส่องสว่าง จากกรณีตำแหน่งที่ 1 ที่คำนวณได้ มีค่า 27,648 cd นำมาแทนค่าลงในสมการที่ 5 แทนการนำค่าจาก คู่มือของโคมไฟ (Photometric Data) สำหรับเริ่มต้นในการคำนวณ

$$\begin{aligned} E &= \frac{27,648}{3^2} \\ &= 3,072 \text{ lx} \end{aligned}$$

คำนวณค่าระยะทางจากแหล่งกำเนิดแสง  $I$  ในทิศทางเอียงไปยังพื้นที่ให้ความสว่างหรือตัวแบบ แทนค่าลงในสมการที่ 3

$$\begin{aligned} l &= \sqrt{3.0^2 + 0.4^2} \\ &= 3.02 \text{ m} \end{aligned}$$

แล้วนำค่าต่างๆ แทนค่าลงในสมการที่ 4 เพื่อคำนวณหาค่าฟลักซ์ส่องสว่าง

$$\begin{aligned} \Phi &= 3,072 \times (\pi(0.4^2) + (\pi \times 0.4 \times 3.02)) \\ &= 13,200 \text{ lm} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับประสิทธิภาพการส่องสว่างของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ณ ตำแหน่งนี้ ค่ากำลังไฟฟ้าของโคมที่วัดได้จาก เครื่องวัดคุณภาพทางไฟฟ้า Chauvin Arnoux C.A. 8335 มีค่า 214.6 W และนำค่าฟลักซ์ส่องสว่างแทนค่าลงในสมการที่ 6

$$\begin{aligned} \text{Luminous Efficacy} &= \frac{13,200}{214.6} \\ &= 61.5 \% \end{aligned}$$

### กรณีตำแหน่งที่ 3

กำหนดให้ –โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W หมวดควบคุมการกระจายแสง Spot 15 องศา

-ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 4.6 เมตร

-เส้นผ่านศูนย์กลางของวงแสงที่ระยะ 4.6 เมตร มีค่า 1.2 เมตร

### วิธีการคำนวณ

คำนวณหาค่าความเข้มแสงของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ของผลิตภัณฑ์ Arri โดยนำค่าความเข้มส่องสว่าง จากกรณีตำแหน่งที่ 1 มีค่า 27,648 cd นำมาแทนค่าลงในสมการที่ 5 แทนการนำค่าจาก คู่มือของโคมไฟ (Photometric Data) มาเริ่มต้นในการคำนวณ

$$\begin{aligned} E &= \frac{27,648}{4.6^2} \\ &= 1,306 \text{ lx} \end{aligned}$$

คำนวณค่าระยะทางจากแหล่งกำเนิดแสง  $l$  ในทิศทางเอียงไปยังพื้นที่ให้ความสว่างหรือตัวแบบ แทนค่าลงในสมการที่ 3

$$\begin{aligned} l &= \sqrt{4.6^2 + 0.6^2} \\ &= 4.63 \text{ m} \end{aligned}$$

แล้วนำค่าต่างๆ แทนค่าลงในสมการที่ 4 เพื่อคำนวณหาค่าฟลักซ์ส่องสว่าง

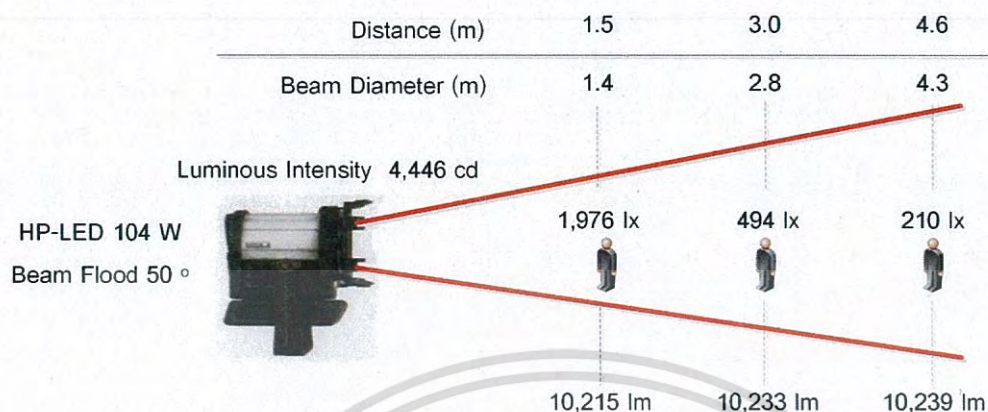
$$\begin{aligned} \Phi &= 1,306 \times (\pi(0.6^2) + (\pi \times 0.6 \times 4.63)) \\ &= 12,874 \text{ lm} \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพการส่องสว่างโคมไฟเอชเอ็มไอ 200 W ณ ตำแหน่งนี้ ค่ากำลังไฟฟ้าโคมไฟที่วัดได้จาก เครื่องวัดคุณภาพทางไฟฟ้า Chauvin Arnoux C.A. 8335 มีค่า 214.6 W นำค่าฟลักซ์ส่องสว่างแทนค่าลงในสมการที่ 6

$$\begin{aligned} \text{Luminous Efficacy} &= \frac{12,874}{214.6} \\ &= 60 \% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ- โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ตำแหน่งการกระจายแสง Flood 50 องศา



รูปที่ 4 โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ตำแหน่ง Beam Flood 50°

### กรณีตำแหน่งที่ 1

กำหนดให้ -โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W หมดควบคุมการกระจายแสง Flood 50 องศา

-ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 1.5 เมตร

-เส้นผ่านศูนย์กลางของวงแสงที่ระยะ 1.5 เมตร มีค่า 1.4 เมตร

-ค่าความเข้มแสง เป็นค่าที่นำมาจากคู่มือของโคมไฟ (Photometric Data) ของหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ของผลิตภัณฑ์ Lite Panel ที่ตำแหน่งดังกล่าวมีค่า 1,976 lx

### วิธีการคำนวณ

คำนวณหาค่าความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W โดยเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาค่าพื้นที่ผิวของทรงกรวย  $A_c$  และคำนวณหาค่า  $r$  ระยะทางจากแหล่งกำเนิดแสงในทิศทางเอียงไปยังพื้นที่ให้ความสว่างหรือตัวแบบ แทนค่าลงในสมการที่ 3

$$r = \sqrt{1.5^2 + 1.7^2}$$

$$= 1.65 \text{ m}$$

แล้ว นำค่าต่างๆ แทนค่าลงในสมการที่ 4 เพื่อคำนวณหาค่าฟลักซ์ส่องสว่าง

$$\Phi = 1,976 \times (\pi(0.7^2) + (\pi \times 0.7 \times 1.65))$$

$$= 10,215 \text{ lm}$$

นอกจากนี้สามารถคำนวณหาค่าความเข้มส่องสว่าง แทนค่าลงในสมการที่ 5

$$I = 1,976 \times 1.5^2$$

$$= 4,446 \text{ cd}$$

สำหรับประสิทธิภาพการส่องสว่างของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ณ ตำแหน่งนี้ ค่ากำลังไฟฟ้าของโคมที่วัดได้จาก เครื่องวัดคุณภาพทางไฟฟ้า Chauvin Arnoux C.A. 8335 มีค่า 103.5 W และนำค่าฟลักซ์ส่องสว่างแทนค่าลงในสมการที่ 6

$$\text{Luminous Efficacy} = \frac{10,215}{103.5}$$

$$= 98.69 \%$$

## กรณีตำแหน่งที่ 2

กำหนดให้ -โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ควบคุมการกระจายแสง Flood 50 องศา

-ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 3.0 เมตร

-เส้นผ่านศูนย์กลางของวงแสงที่ระยะ 3.0 เมตร มีค่า 2.8 เมตร

## วิธีการคำนวณ

คำนวณหาค่าความเข้มแสงของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ของผลิตภัณฑ์ Lite Panel โดยนำค่าความเข้มส่องสว่าง จากกรณีตำแหน่งที่ 1 ที่คำนวณได้ มีค่า 4,446 cd นำมาแทนค่าลงในสมการที่ 5 แทนการนำค่าจาก คู่มือของโคมไฟ (Photometric Data) สำหรับเริ่มต้นในการคำนวณ

$$E = \frac{4,446}{3^2}$$

$$= 494 \text{ lx}$$

คำนวณค่าระยะทางจากแหล่งกำเนิดแสง  $l$  ในทิศทางเอียงไปยังพื้นที่ให้ความสว่างหรือตัวแบบ แทนค่าลงในสมการที่ 3

$$l = \sqrt{3.0^2 + 1.4^2}$$

$$= 3.31 \text{ m}$$

แล้วนำค่าต่างๆ แทนค่าลงในสมการที่ 4 เพื่อคำนวณหาค่าฟลักซ์ส่องสว่าง

$$\Phi = 494 \times (\pi(1.4^2) + (\pi \times 0.4 \times 3.31))$$

$$= 10,233 \text{ lm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับประสิทธิภาพการส่องสว่างของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ณ ตำแหน่งนี้ ค่ากำลังไฟฟ้าของโคมที่วัดได้จาก เครื่องวัดคุณภาพทางไฟฟ้า Chauvin Arnoux C.A. 8335 มีค่า 103.5 W และนำค่าฟลักซ์ส่องสว่างแทนค่าลงในสมการที่ 6

$$\begin{aligned} \text{Luminous Efficacy} &= \frac{10,233}{103.5} \\ &= 98.69 \% \end{aligned}$$

### กรณีตำแหน่งที่ 3

กำหนดให้ -โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W หมวดควบคุมการกระจายแสง Flood 50 องศา  
-ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 4.6 เมตร  
-เส้นผ่านศูนย์กลางของวงแสงที่ระยะ 4.6 เมตร มีค่า 4.3 เมตร

### วิธีการคำนวณ

คำนวณหาค่าความเข้มแสงของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ของผลิตภัณฑ์ Lite Panel โดยนำค่าความเข้มส่องสว่าง จากกรณีตำแหน่งที่ 1 มีค่า 4,446 cd นำมาแทนค่าลงในสมการที่ 5 แทนการนำค่าจาก คู่มือของโคมไฟ (Photometric Data) มาเริ่มต้นในการคำนวณ

$$\begin{aligned} E &= \frac{4,446}{4.6^2} \\ &= 210 \text{ lx} \end{aligned}$$

คำนวณค่าระยะทางจากแหล่งกำเนิดแสง  $I$  ในทิศทางเอียงไปยังพื้นที่ให้ความสว่างหรือตัวแบบแทนค่าลงในสมการที่ 3

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{4.6^2 + 2.15^2} \\ &= 5.07 \text{ m} \end{aligned}$$

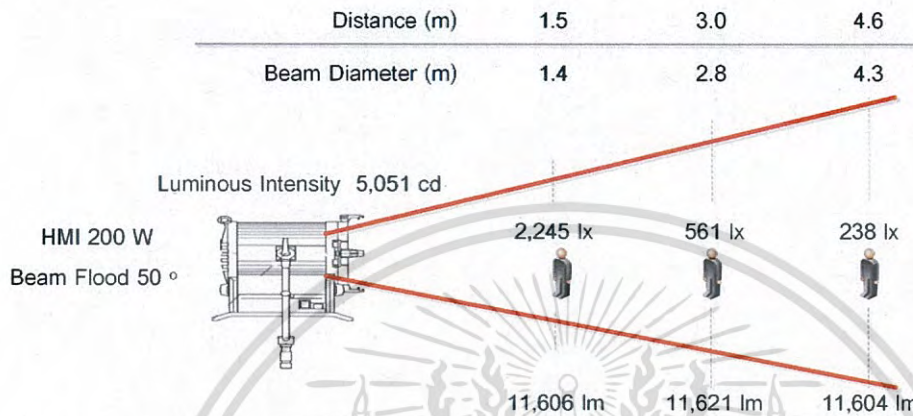
แล้วนำค่าต่างๆ แทนค่าลงในสมการที่ 4 เพื่อคำนวณหาค่าฟลักซ์ส่องสว่าง

$$\begin{aligned} \Phi &= 210 \times (\pi(2.15^2) + (\pi \times 2.15 \times 5.07)) \\ &= 10,239 \text{ lm} \end{aligned}$$

สำหรับประสิทธิภาพการส่องสว่างของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ณ ตำแหน่งนี้ ค่ากำลังไฟฟ้าของโคมที่วัดได้จาก เครื่องวัดคุณภาพทางไฟฟ้า Chauvin Arnoux C.A. 8335 มีค่า 103.5 W และนำค่าฟลักซ์ส่องสว่างแทนค่าลงในสมการที่ 6

$$\begin{aligned} \text{Luminous Efficacy} &= \frac{10,239}{103.5} \\ &= 98.92 \% \end{aligned}$$

การคำนวณ - โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ตำแหน่งการกระจายแสง Flood 50 องศา



รูปที่ 5 โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ตำแหน่ง Beam Flood 50°

กรณีตำแหน่งที่ 1

กำหนดให้ -โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W หมวดควบคุมการกระจายแสง Flood 50 องศา

- ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 1.5 เมตร
- เส้นผ่านศูนย์กลางของวงแสงที่ระยะ 1.5 เมตร มีค่า 1.4 เมตร
- ค่าความเข้มแสงเป็นค่าที่นำมาจากคู่มือของโคมไฟ (Photometric Data) ของหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ของผลิตภัณฑ์ Arri ที่ตำแหน่งดังกล่าวมีค่า 2,245 lx

วิธีการคำนวณ

คำนวณหาค่าความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ของผลิตภัณฑ์ Arri โดยเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาค่าพื้นที่ผิวของทรงกรวย 4. และคำนวณหาค่า l ระยะทางจากแหล่งกำเนิดแสงในทิศทางเอียงไปยังพื้นที่ให้ความสว่างหรือตัวแบบ แทนค่าลงในสมการที่ 3

$$\begin{aligned} l &= \sqrt{1.5^2 + 1.7^2} \\ &= 1.65 \text{ m} \end{aligned}$$

แล้ว นำค่าต่างๆ แทนค่าลงในสมการที่ 4 เพื่อคำนวณหาค่าฟลักซ์ส่องสว่าง

$$\begin{aligned} \Phi &= 2,245 \times (\pi(0.7^2) + (\pi \times 0.7 \times 1.65)) \\ &= 11,606 \text{ lm} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้สามารถคำนวณหาค่าความเข้มส่องสว่าง แทนค่าลงในสมการที่ 5

$$I = 2,245 \times 1.5^2$$

$$= 5,051 \text{ cd}$$

สำหรับประสิทธิภาพการส่องสว่างของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ณ ตำแหน่งนี้ ค่ากำลังไฟฟ้าของโคมที่วัดได้จาก เครื่องวัดคุณภาพทางไฟฟ้า Chauvin Arnoux C.A. 8335 มีค่า 214.6 W และนำค่าฟลักซ์ส่องสว่างแทนค่าลงในสมการที่ 6

$$\text{Luminous Efficacy} = \frac{11,606}{214.6}$$

$$= 54.08 \%$$

### กรณีตำแหน่งที่ 2

กำหนดให้ –โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W หมวดควบคุมการกระจายแสง Flood 50 องศา

-ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 3.0 เมตร

-เส้นผ่านศูนย์กลางของวงแสงที่ระยะ 3.0 เมตร มีค่า 2.8 เมตร

### วิธีการคำนวณ

คำนวณหาค่าความเข้มแสงของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ของผลิตภัณฑ์ Arri โดยนำค่าความเข้มส่องสว่าง จากกรณีตำแหน่งที่ 1 ที่คำนวณได้ มีค่า 5,051 cd นำมาแทนค่าลงในสมการที่ 5 แทนการนำค่าจาก คู่มือของโคมไฟ (Photometric Data) สำหรับเริ่มต้นในการคำนวณ

$$E = \frac{5,051}{3^2}$$

$$= 561 \text{ lx}$$

คำนวณค่าระยะทางจากแหล่งกำเนิดแสง / ในทิศทางเอียงไปยังพื้นที่ให้ความสว่างหรือตัวแบบ แทนค่าลงในสมการที่ 3

$$l = \sqrt{3.0^2 + 1.4^2}$$

$$= 3.31 \text{ m}$$

แล้วนำค่าต่างๆ แทนค่าลงในสมการที่ 4 เพื่อคำนวณหาค่าฟลักซ์ส่องสว่าง

$$\Phi = 561 \times (\pi(1.4^2) + (\pi \times 1.4 \times 3.31))$$

$$= 11,621 \text{ lm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับประสิทธิภาพการส่องสว่างของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ณ ตำแหน่งนี้ ค่ากำลังไฟฟ้าของโคมที่วัดได้จาก เครื่องวัดคุณภาพทางไฟฟ้า Chauvin Arnoux C.A. 8335 มีค่า 214.6 W และนำค่าลักซ์ส่องสว่างแทนค่าลงในสมการที่ 6

$$\begin{aligned} \text{Luminous Efficacy} &= \frac{11,621}{214.6} \\ &= 54.16 \% \end{aligned}$$

### กรณีตำแหน่งที่ 3

กำหนดให้ –โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W หมวดควบคุมการกระจายแสง Flood 50 องศา

-ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 4.6 เมตร

-เส้นผ่านศูนย์กลางของวงแสงที่ระยะ 4.6 เมตร มีค่า 4.3 เมตร

### วิธีการคำนวณ

คำนวณหาค่าความเข้มแสงของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ของผลิตภัณฑ์ Arri โดยนำค่าความเข้มส่องสว่างจากกรณีตำแหน่งที่ 1 มีค่า 5,051 cd นำมาแทนค่าลงในสมการที่ 5 แทนการนำค่าจาก คู่มือของโคมไฟ (Photometric Data) มาเริ่มต้นในการคำนวณ

$$\begin{aligned} E &= \frac{5,051}{4.6^2} \\ &= 238 \text{ lx} \end{aligned}$$

คำนวณหาระยะทางจากแหล่งกำเนิดแสง  $I$  ในทิศทางเอียงไปยังพื้นที่ให้ความสว่างหรือตัวแบบแทนค่าลงในสมการที่ 3

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{4.6^2 + 2.15^2} \\ &= 5.07 \text{ m} \end{aligned}$$

แล้วนำค่าต่างๆ แทนค่าลงในสมการที่ 4 เพื่อคำนวณหาค่าลักซ์ส่องสว่าง

$$\begin{aligned} \phi &= 238 \times (\pi (2.15^2) + (\pi \times 2.15 \times 5.07)) \\ &= 11,604 \text{ lm} \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพการส่องสว่างโคมไฟเอชเอ็มไอ 200 W ณ ตำแหน่งนี้ ค่ากำลังไฟฟ้าโคมไฟที่วัดได้จาก เครื่องวัดคุณภาพทางไฟฟ้า Chauvin Arnoux C.A. 8335 มีค่า 214.6 W นำค่าลักซ์ส่องสว่างแทนค่าลงในสมการที่ 6

$$\begin{aligned} \text{Luminous Efficacy} &= \frac{11,604}{214.6} \\ &= 54.07 \% \end{aligned}$$

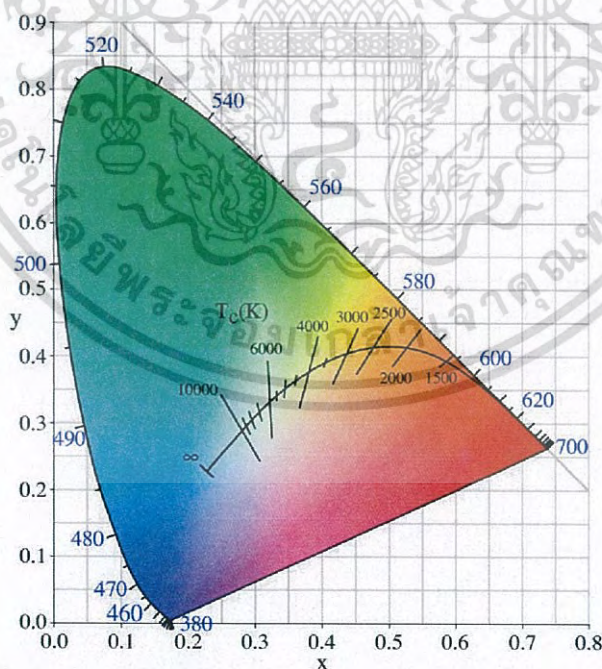
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การคำนวณอุณหภูมิสีของแสงเทียบเคียง

อุณหภูมิสีของแสงเทียบเคียง (Correlated Color Temperature:  $CCT, T_{cp}$ ) มีหน่วยวัด “เคลวิน” (Kelvin: K) การหาค่าอุณหภูมิสีของแสงสามารถคำนวณหาค่าได้โดยใช้สูตรของ McCamy ที่เริ่มต้นจากการนำค่า CIE-1931  $(x, y)$  ดังรูปที่ 1 หรือนำค่าจากเครื่องวัดค่าการรับรังสีรวมของแหล่งกำเนิดแสง (Spectroradiometer) ของ MK350 นำมาแทนค่าลงในสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ นอกจากนี้เครื่องวัดค่าความรับรังสีรวมยังสามารถวัดค่า อุณหภูมิสีของแสงเทียบเคียง ได้เช่นกัน สำหรับการหาค่าอุณหภูมิสีของแสงเทียบเคียงระหว่างโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W และ หลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ภายใต้งานติดตั้งควบคุมการกระจายแสง Spot 15 องศา และ Flood 50 องศา กำหนดระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 1.5, 3.0, 4.6 เมตร ตามลำดับ แสดงการคำนวณต่อไปนี้

$$n = \frac{(x - 0.3320)}{(0.1858 - y)} \quad (1)$$

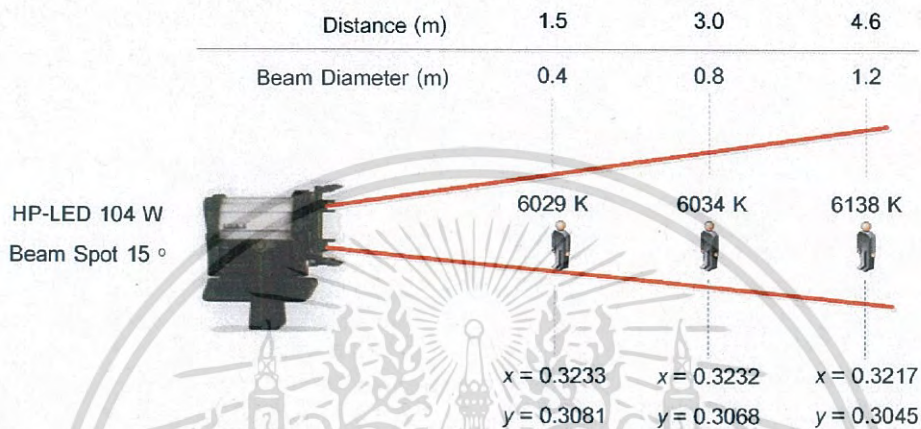
$$CCT = 449n^3 + 3525n^2 + 6823.3n + 5520.33 \quad (2)$$



รูปที่ 1 The CIE-1931 Chromaticity Coordinates  $(x, y)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ- โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ตำแหน่งกระจายแสง Spot 15 องศา ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ตำแหน่ง Beam Spot 15 องศา

#### กรณีตำแหน่งที่ 1

กำหนดให้ - โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ควบคุมการกระจายแสง Spot 15 องศา

- ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 1.5 เมตร

- ค่า The CIE-1931 Chromaticity Coordinates  $(x, y)$  ของหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W

ของผลิตภัณฑ์ Lite Panel ที่ตำแหน่งดังกล่าว  $x = 0.3233$  และ  $y = 0.3081$

#### วิธีการคำนวณ

คำนวณหาอุณหภูมิสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W โดยเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาค่า  $n$  (McCamy)

แทนค่าลงในสมการที่ 1

$$n = \frac{(0.3233 - 0.3320)}{(0.1858 - 0.3281)} = 0.07201$$

นำค่า  $n$  แทนค่าลงในสมการที่ 2

$$\begin{aligned}
 CCT &= 449 \times (0.07201)^3 + 3525 \times (0.07201)^2 + 6823.3 \times (0.07201) + 5520.33 \\
 &= 0.1676 + 18.2786 + 491.324 + 5520 \\
 &= 6029 \text{ K}
 \end{aligned}$$

### กรณีตำแหน่งที่ 2

กำหนดให้ - โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W หมวดควบคุมการกระจายแสง Spot 15 องศา  
 - ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 3.0 เมตร  
 - ค่า The CIE-1931 Chromaticity Coordinates  $(x, y)$  ของหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ของผลิตภัณฑ์ Lite Panel ที่ตำแหน่งดังกล่าว  $x = 0.3232$  และ  $y = 0.3068$

### วิธีการคำนวณ

คำนวณหาอุณหภูมิสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W โดยเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาค่า  $n$  (McCamy) แทนค่าลงในสมการที่ 1

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{(0.3232 - 0.3320)}{(0.1858 - 0.3068)} \\
 &= 0.07272
 \end{aligned}$$

นำค่า  $n$  แทนค่าลงในสมการที่ 2

$$\begin{aligned}
 CCT &= 449 \times (0.07272)^3 + 3525 \times (0.07272)^2 + 6823.3 \times (0.07272) + 5520.33 \\
 &= 0.1726 + 18.6408 + 496.190 + 5520 \\
 &= 6034 \text{ K}
 \end{aligned}$$

### กรณีตำแหน่งที่ 3

กำหนดให้ - โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W หมวดควบคุมการกระจายแสง Spot 15 องศา  
 - ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 4.6 เมตร  
 - ค่า CIE-1931 Chromaticity Coordinates  $(x, y)$  ของหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ของผลิตภัณฑ์ Lite Panel ที่ตำแหน่งดังกล่าว  $x = 0.3217$  และ  $y = 0.3045$

### วิธีการคำนวณ

คำนวณหาอุณหภูมิสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W โดยเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาค่า  $n$  (McCamy) แทนค่าลงในสมการที่ 1

$$n = \frac{(0.3217 - 0.3320)}{(0.1858 - 0.3045)}$$

$$= 0.08677$$

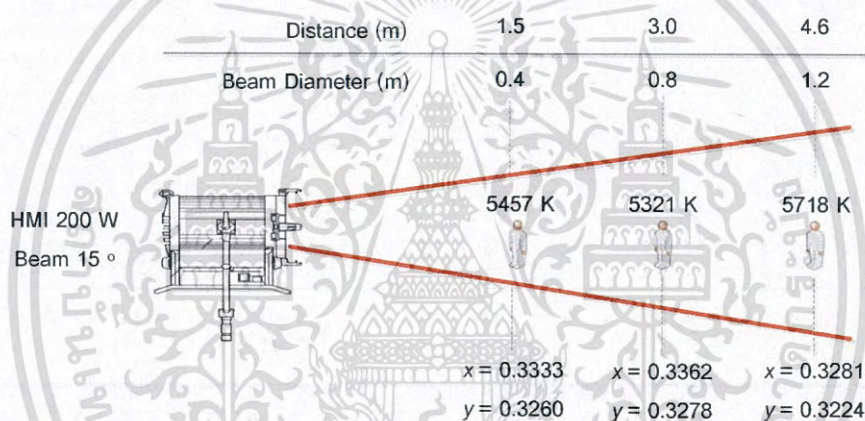
นำค่า  $n$  แทนค่าลงในสมการที่ 2

$$CCT = 449 \times (0.08677)^3 + 3525 \times (0.08677)^2 + 6823.3 \times (0.08677) + 5520.33$$

$$= 0.2933 + 26.5398 + 592.0577 + 5520$$

$$= 6138 \text{ K}$$

การคำนวณ- โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ตำแหน่งกระจายแสง Spot 15 องศา ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ตำแหน่ง Beam Spot 15°

### กรณีตำแหน่งที่ 1

กำหนดให้ - โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W หมวดควบคุมการกระจายแสง Spot 15 องศา

- ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 1.5 เมตร

- ค่า The CIE-1931 Chromaticity Coordinates  $(x, y)$  ของหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ของผลิตภัณฑ์ Lite Panel ที่ตำแหน่งดังกล่าว  $x = 0.3333$  และ  $y = 0.3260$

### วิธีการคำนวณ

คำนวณหาอุณหภูมิสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W โดยเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาค่า  $n$  (McCamy)

แทนค่าลงในสมการที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n = \frac{(0.3333 - 0.3320)}{(0.1858 - 0.3060)}$$

$$= -0.00927$$

นำค่า  $n$  แทนค่าลงในสมการที่ 2

$$CCT = 449 \times (-0.00927)^3 + 3525 \times (-0.00927)^2 + 6823.3 \times (-0.00927) + 5520.33$$

$$= -0.0003.5767 + 0.3029 + 63.2519 + 5520.33$$

$$= 5457 \text{ K}$$

### กรณีตำแหน่งที่ 2

กำหนดให้ – โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W หมวตควบคุมการกระจายแสง Spot 15 องศา

- ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 3.0 เมตร

- ค่า The CIE-1931 Chromaticity Coordinates  $(x,y)$  ของหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ของผลิตภัณฑ์ Lite Panel ที่ตำแหน่งดังกล่าว  $x = 0.3362$  และ  $y = 0.3278$

### วิธีการคำนวณ

คำนวณหาอุณหภูมิสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W โดยเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาค่า  $n$  (McCamy)

แทนค่าลงในสมการที่ 1

$$n = \frac{(0.3362 - 0.3320)}{(0.1858 - 0.3278)}$$

$$= -0.02957$$

นำค่า  $n$  แทนค่าลงในสมการที่ 2

$$CCT = 449 \times (-0.02957)^3 + 3525 \times (-0.02957)^2 + 6823.3 \times (-0.02957) + 5520.33$$

$$= -0.0000258 + 3.0822 + 201.7649 + 5520.33$$

$$= 5321 \text{ K}$$

### กรณีตำแหน่งที่ 3

กำหนดให้ – โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W หมวตควบคุมการกระจายแสง Spot 15 องศา

- ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 4.6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่า The CIE-1931 Chromaticity Coordinates  $(x, y)$  ของหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ของผลิตภัณฑ์ Lite Panel ที่ตำแหน่งดังกล่าว  $x = 0.3281$  และ  $y = 0.3224$

### วิธีการคำนวณ

คำนวณหาอุณหภูมิสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W โดยเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาค่า  $n$  (McCamy)

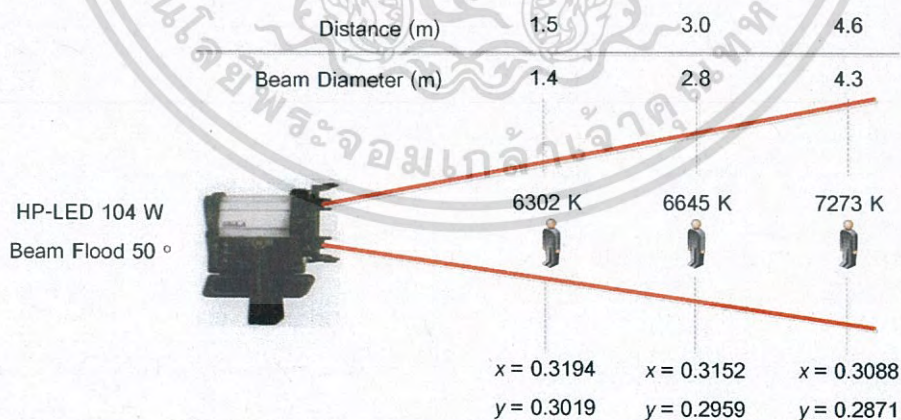
แทนค่าลงในสมการที่ 1

$$n = \frac{(0.3281 - 0.3320)}{(0.1858 - 0.3224)} = 0.02855$$

นำค่า  $n$  แทนค่าลงในสมการที่ 2

$$\begin{aligned} CCT &= 449 \times (0.02855)^3 + 3525 \times (0.02855)^2 + 6823.3 \times (0.02855) + 5520.33 \\ &= 0.01048 + 2.87927 + 195.009 + 5520.33 \\ &= 5718 \text{ K} \end{aligned}$$

การคำนวณ- โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ตำแหน่งกระจายแสง Flood 50 องศา ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ตำแหน่ง Beam Flood 50°

### กรณีตำแหน่งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ - โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ควบคุมการกระจายแสง Flood 50 องศา  
 - ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 1.5 เมตร  
 - ค่า The CIE-1931 Chromaticity Coordinates  $(x, y)$  ของหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ของผลิตภัณฑ์ Lite Panel ที่ตำแหน่งดังกล่าว  $x = 0.3194$  และ  $y = 0.3019$

### วิธีการคำนวณ

คำนวณหาอุณหภูมิสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W โดยเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาค่า  $n$  (McCamy) แทนค่าลงในสมการที่ 1

$$n = \frac{(0.3194 - 0.3320)}{(0.1858 - 0.3019)}$$

$$= 0.10852$$

นำค่า  $n$  แทนค่าลงในสมการที่ 2

$$CCT = 449 \times (0.10852)^3 + 3525 \times (0.10852)^2 + 6823.3 \times (0.10852) + 5520.33$$

$$= 0.5738 + 41.512 + 740.464 + 5520.33$$

$$= 6302 \text{ K}$$

### กรณีตำแหน่งที่ 2

กำหนดให้ - โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ควบคุมการกระจายแสง Flood 50 องศา  
 - ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 3.0 เมตร  
 - ค่า CIE-1931 Chromaticity Coordinates  $(x, y)$  ของหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ของผลิตภัณฑ์ Lite Panel ที่ตำแหน่งดังกล่าว  $x = 0.3152$  และ  $y = 0.2959$

### วิธีการคำนวณ

คำนวณหาอุณหภูมิสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W โดยเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาค่า  $n$  (McCamy) แทนค่าลงในสมการที่ 1

$$n = \frac{(0.3152 - 0.3320)}{(0.1858 - 0.2959)}$$

$$= 0.15258$$

นำค่า  $n$  แทนค่าลงในสมการที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 CCT &= 449 \times (0.15258)^3 + 3525 \times (0.15258)^2 + 6823.3 \times (0.15258) + 5520.33 \\
 &= 1.5949 + 82.0643 + 1041.099 + 5520.33 \\
 &= 6645 \text{ K}
 \end{aligned}$$

### กรณีตำแหน่งที่ 3

กำหนดให้ - โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W หมวดควบคุมการกระจายแสง Flood 50 องศา  
 - ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 4.6 เมตร  
 - ค่า CIE-1931 Chromaticity Coordinates  $(x, y)$  ของหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ของผลิตภัณฑ์ Lite Panel ที่ตำแหน่งดังกล่าว  $x = 0.3088$  และ  $y = 0.2871$

### วิธีการคำนวณ

คำนวณหาอุณหภูมิสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W โดยเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาค่า  $n$  (McCamy)

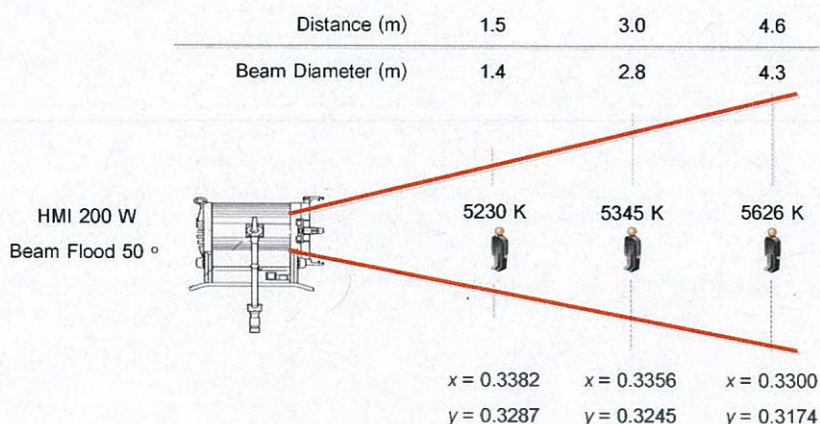
แทนค่าลงในสมการที่ 1

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{(0.3088 - 0.3320)}{(0.1858 - 0.2871)} \\
 &= 0.22902
 \end{aligned}$$

นำค่า  $n$  แทนค่าลงในสมการที่ 2

$$\begin{aligned}
 CCT &= 449 \times (0.22902)^3 + 3525 \times (0.22902)^2 + 6823.3 \times (0.22902) + 5520.33 \\
 &= 5.3934 + 184.8868 + 1562.672 + 5520.33 \\
 &= 7273 \text{ K}
 \end{aligned}$$

การคำนวณ- โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ตำแหน่งกระจายแสง Flood 50 องศา ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ตำแหน่ง Beam Flood 50°

### กรณีตำแหน่งที่ 1

กำหนดให้ – โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ควบคุมการกระจายแสง Flood 50 องศา  
 - ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 1.5 เมตร  
 - ค่า The CIE-1931 Chromaticity Coordinates  $(x, y)$  ของหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ของผลิตภัณฑ์ Lite Panel ที่ตำแหน่งดังกล่าว  $x = 0.3382$  และ  $y = 0.3287$

### วิธีการคำนวณ

คำนวณหาอุณหภูมิสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W โดยเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาค่า  $n$  (McCamy)

แทนค่าลงในสมการที่ 1

$$n = \frac{(0.3382 - 0.3320)}{(0.1858 - 0.3287)}$$

$$= -0.04338$$

นำค่า  $n$  แทนค่าลงในสมการที่ 2

$$CCT = 449 \times (-0.04338)^3 + 3525 \times (-0.04338)^2 + 6823.3 \times (-0.04338) + 5520.33$$

$$= -0.03665 + 6.6334 - 296.042 + 5520.33$$

$$= 5230 \text{ K}$$

### กรณีตำแหน่งที่ 2

กำหนดให้ – โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ควบคุมการกระจายแสง Flood 50 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 3.0 เมตร
- ค่า The CIE-1931 Chromaticity Coordinates  $(x, y)$  ของหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ของผลิตภัณฑ์ Lite Panel ที่ตำแหน่งดังกล่าว  $x = 0.3356$  และ  $y = 0.3245$

### วิธีการคำนวณ

คำนวณหาอุณหภูมิสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W โดยเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาค่า  $n$  (McCamy)

แทนค่าลงในสมการที่ 1

$$n = \frac{(0.3356 - 0.3320)}{(0.1858 - 0.3245)}$$

$$= -0.02595$$

นำค่า  $n$  แทนค่าลงในสมการที่ 2

$$CCT = 449 \times (-0.02595)^3 + 3525 \times (-0.02595)^2 + 6823.3 \times (-0.02595) + 5520.33$$

$$= -0.007846 + 2.3737 - 177.064 + 5520.33$$

$$= 5345 \text{ K}$$

### กรณีตำแหน่งที่ 3

- กำหนดให้ – โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W หมวตควบคุมการกระจายแสง Flood 50 องศา
- ระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 4.6 เมตร
  - ค่า The CIE-1931 Chromaticity Coordinates  $(x, y)$  ของหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ของผลิตภัณฑ์ Lite Panel ที่ตำแหน่งดังกล่าว  $x = 0.3300$  และ  $y = 0.3174$

### วิธีการคำนวณ

คำนวณหาอุณหภูมิสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W โดยเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาค่า  $n$  (McCamy)

แทนค่าลงในสมการที่ 1

$$n = \frac{(0.3300 - 0.3320)}{(0.1858 - 0.3174)}$$

$$= 0.01519$$

นำค่า  $n$  แทนค่าลงในสมการที่ 2

$$\begin{aligned}
 CCT &= 449 \times (0.01519)^3 + 3525 \times (0.01519)^2 + 6823.3 \times (0.01519) + 5520.33 \\
 &= 0.01048 + 2.87927 + 195.009 + 5520.33 \\
 &= 5624 \text{ K}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 1 ค่าอุณหภูมิจากแสงเทียบเคียงจากการคำนวณและการวัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

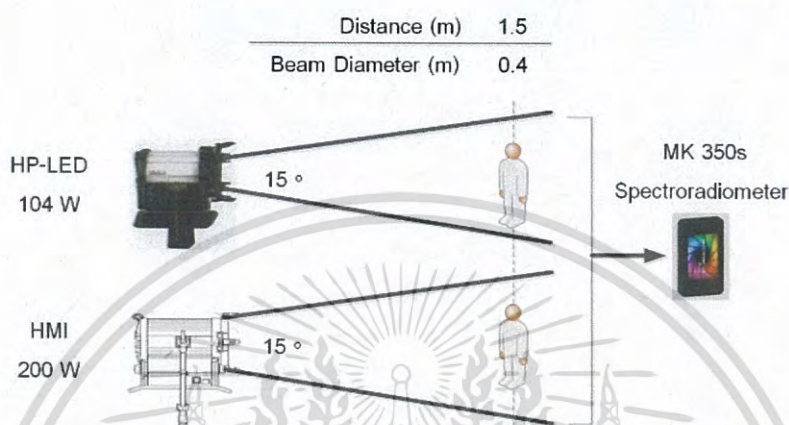
## ค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสง

Type of Luminaires	Throw (m)	Beam Dia. (m)	Chromaticity Coordinates 1931 CIE (Measure by MK350)		MaCamy Formula	Correlated Color Temperature (CCT) (K)	
			$x$	$y$	$n = \frac{(x-0.3320)}{(0.1858-y)}$	Calculating by $CCT = 449n^3 + 3525n^2 + 6823.3n + 5520.33$	Measure by MK350
HP-LED 104 W Beam Spot (15°)	1.5	0.4	0.3232	0.3081	0.07201	6029	6023
	3.0	0.8	0.3232	0.3068	0.07272	6034	6030
	4.6	1.2	0.3217	0.3045	0.08677	6138	6135
HMI 200 W Beam Spot (15°)	1.5	0.4	0.3333	0.3260	-0.00927	5457	5450
	3.0	0.8	0.3362	0.3278	-0.02957	5321	5312
	4.6	1.2	0.3281	0.3224	0.02855	5718	5713
HP-LED 104 W Beam Flood (50°)	1.5	1.4	0.3194	0.3019	0.10852	6302	6306
	3.0	2.8	0.3152	0.2959	0.15258	6644	6657
	4.6	4.3	0.3088	0.2871	0.22902	7273	7292
HMI 200 W Beam Flood (50°)	1.5	1.4	0.3382	0.3287	-0.04338	5230	5219
	3.0	2.8	0.3356	0.3245	-0.02595	5345	5333
	4.6	4.3	0.3300	0.3174	0.01519	5624	5615

ค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสง (Color Rendering Index: *CRI*) มีหน่วยวัดเป็นจำนวนเปอร์เซ็นต์ แสดงความถูกต้องสีของแหล่งกำเนิดแสงที่นำมาทดสอบโดยเทียบกับสีของแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเปรียบเทียบสีของแสงจากโคมไฟแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ หรือเรียกว่าแหล่งกำเนิดแสงทดสอบของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W และโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W เพื่อศึกษาว่าสามารถนำมาทดแทนคุณสมบัติสีของแสงที่ได้จากหลอดไส้เทียบเคียงกันได้หรือไม่ ผลลัพธ์การวิจัยนี้สามารถหาค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสง ด้วยวิธีการวัดโดยใช้จากเครื่องวัดค่าความรับรังสีรวมของแหล่งกำเนิดแสง (Spectroradiometer) รุ่น MK350 ที่กำหนดการตั้งค่าหมวดควบคุมการกระจายแสง Spot 15 องศา และ Flood 50 องศา กำหนดระยะห่างระหว่างโคมไฟถึงตำแหน่งของตัว

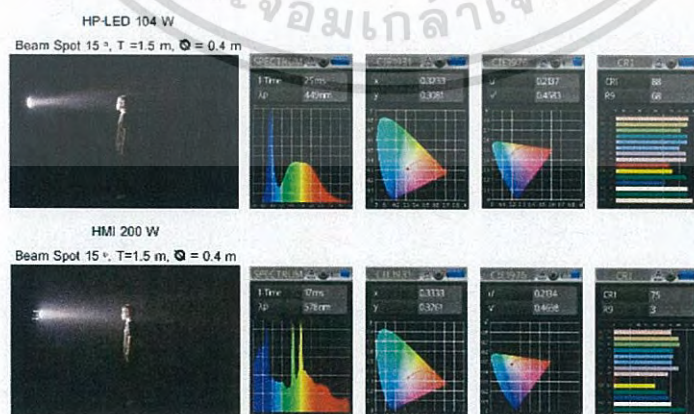
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบบุคคลที่ระยะ 1.5, 3.0, 4.6 เมตร ตามลำดับ สำหรับขั้นตอนวิธีการคำนวณครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกแนวทางแสดงวิธีการคำนวณเพียงหมวดควบคุมการกระจายแสง Spot 15 องศา ของระยะห่างของโคมไฟถึงตำแหน่งของตัวแบบบุคคลที่ระยะ 1.5 เมตร ระหว่าง โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W และโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W และหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ตำแหน่ง Beam Spot 15°

ขั้นตอนที่ 1 สำหรับการคำนวณเริ่มต้นจากการนำค่าปริมาณความเข้มแสงเชิงสเปกตรัม (Spectral Irradiance,  $SPD_{\lambda}$ ) เป็นค่าแสดงกำลังความหนาแน่นของแสงตลอดความยาวคลื่นต่างๆ ที่ตกกระทบลงบนพื้นที่รับแสงคิดเป็นวัตต์ต่อตารางเมตรต่อเมตร ( $W.m^{-3}$ ) ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดค่าความรับรังสีรวมของแหล่งกำเนิดแสง (Spectroradiometer) รุ่น MK350 ของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W และโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ก่อนการวัดค่าต้องเปิดโคมไฟให้ทำงานโดยให้แสงสว่างจากหลอดไฟคงที่ประมาณ 10 นาที ผลการวัดพื้นฐานค่าสีของแสง (Basic Colorimetric Terms) แสดงดังรูปที่ 2 และปริมาณความเข้มแสงเชิงสเปกตรัมโคมทั้ง 2 ประเภทแสดงดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2



รูปที่ 2 ผลการวัดค่าผ่านเครื่องวัดค่าความรับรังสีรวมของ โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## และหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ตำแหน่ง Beam Spot 15°

จากรูปที่ 2 พบว่าพื้นฐานค่าสีของแสงของโคมไฟทั้ง 2 ประเภท ที่ได้จากการวัดประกอบด้วย กราฟแสดงปริมาณความเข้มแสงเชิงสเปกตรัม (Spectrum Irradiance) ความยาวคลื่นสีของแสงจาก แหล่งกำเนิดแสงหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W มีค่าเฉลี่ยเทียบได้กับความยาว 449 nm มีค่าอุณหภูมิสีของแสงประมาณ 6023K ที่ ระบบแกน CIE-1931 ( $x, y$ ) พบว่าค่า  $x$  มีค่า 0.3233 และ ค่า  $y$  มีค่า 0.3081 และ ระบบแกน CIE-1976 ( $u', v'$ ) พบว่า  $u'$  มีค่า 0.2173 และค่า  $v'$  มีค่า 0.4583 สำหรับ หลอดเอชเอ็มไอ 200 W มีค่าเฉลี่ยที่ความยาวคลื่น 578nm เทียบได้กับอุณหภูมิสีของแสงประมาณ 5450K และในส่วนของระบบแกน CIE-1931 ( $x, y$ ) พบว่า  $x$  มีค่า 0.3333 และ  $y$  มีค่า 0.3260 และ ระบบแกน CIE-1976 ( $u', v'$ ) พบว่า  $u'$  มีค่า 0.2134 และ  $v'$  มีค่า 0.4698 สำหรับค่าดัชนีความถูกต้อง สีของแสงโคมไฟที่ได้จากการวัดของหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W มีค่า 88% เมื่อเทียบกับโคมไฟหลอด เอชเอ็มไอ 200 W มีค่า 75% สรุปได้ดังตารางที่ 1 เพื่อนำค่าคุณสมบัติสีของแสงดังกล่าว ไปใช้ในการ คำนวณหาค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสงโคมไฟทั้ง 2 ประเภท

ตารางที่ 1 พื้นฐานค่าสีของแสงของโคมทั้ง 2 ประเภท ตำแหน่ง Beam Spot 15°

Luminaire			Chromaticity Coordinates				CRI (Ra) (%)
Beam Degree	Throw (m)	Beam Diameter (m)	CIE-1931		CIE-1976		
			$x$	$y$	$u'$	$v'$	
15°	1.5	0.4					
HP-LED 104 W			0.3233	0.3081	0.2137	0.4583	88
HMI 200 W			0.3333	0.3260	0.2134	0.4698	75

สำหรับเครื่องวัดค่าความรับรังสีรวมของแหล่งกำเนิดแสง (Spectroradiometer) รุ่น MK350 สามารถนำค่าปริมาณความเข้มแสงเชิงสเปกตรัมของโคมทั้ง 2 ประเภท แสดงผลในรูปของตัวเลขเพื่อนำไปคำนวณค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสง แสดงดังตารางที่ 2

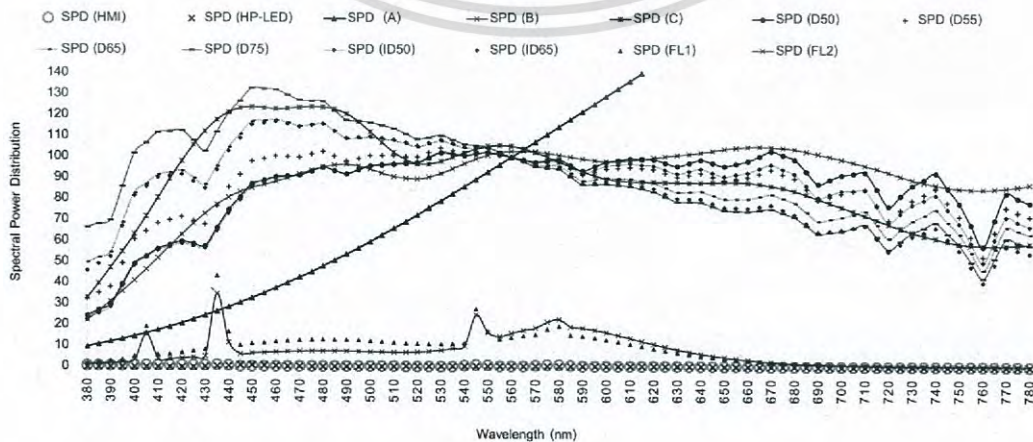
ตารางที่ 2 ปริมาณความเข้มแสงเชิงสเปกตรัมของโคมทั้ง 2 ประเภท ตำแหน่ง Beam Spot 15°

$\lambda$ (nm)	HP-LED $SPD_{(\lambda)}$	HMI $SPD_{(\lambda)}$	$\lambda$ (nm)	HP-LED $SPD_{(\lambda)}$	HMI $SPD_{(\lambda)}$	$\lambda$ (nm)	HP-LED $SPD_{(\lambda)}$	HMI $SPD_{(\lambda)}$	$\lambda$ (nm)	HP-LED $SPD_{(\lambda)}$	HMI $SPD_{(\lambda)}$
380	0.0081	0.5118	480	0.1853	0.3300	580	0.4249	0.9525	680	0.1355	0.2887
385	0.0068	0.5441	485	0.1671	0.3280	585	0.4276	0.5856	685	0.1222	0.2824
390	0.0061	0.5789	490	0.1641	0.3230	590	0.4266	0.4506	690	0.1101	0.2633
395	0.0056	0.6428	495	0.1804	0.3230	595	0.4240	0.4530	695	0.0988	0.2424
400	0.005	0.6912	500	0.2046	0.3289	600	0.4194	0.4407	700	0.0871	0.2225
405	0.0054	0.7030	505	0.2419	0.3265	605	0.4118	0.4146	705	0.0779	0.1931
410	0.0086	0.6929	510	0.2763	0.3065	610	0.4032	0.3980	710	0.0669	0.1686

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

415	0.0176	0.6872	515	0.3146	0.2786	615	0.3906	0.3848	715	0.0601	0.1568
420	0.0334	0.7940	520	0.3495	0.2521	620	0.3777	0.3757	720	0.0510	0.1551
425	0.0805	0.7135	525	0.3738	0.2560	625	0.3655	0.3615	725	0.0454	0.1513
430	0.1593	0.6835	530	0.3980	0.2680	630	0.3486	0.3384	730	0.0398	0.1451
435	0.3416	0.9380	535	0.4121	0.2796	635	0.3292	0.3135	735	0.0354	0.1404
440	0.5949	0.8393	540	0.4220	0.5686	640	0.3085	0.3129	740	0.0311	0.1422
445	0.9139	0.3766	545	0.4270	0.9596	645	0.2868	0.3076	745	0.0282	0.1365
450	0.9926	0.3528	550	0.4312	0.8643	650	0.2647	0.2991	750	0.0249	0.1413
455	0.8710	0.3704	555	0.4356	0.3855	655	0.2423	0.3045	755	0.0229	0.1495
460	0.6368	0.3836	560	0.4345	0.3552	660	0.2191	0.3079	760	0.0205	0.1592
465	0.4754	0.3555	565	0.4333	0.3981	665	0.1956	0.3023	765	0.0202	0.1568
470	0.3242	0.3369	570	0.4301	0.5795	670	0.1736	0.2971	770	0.0184	0.1520
475	0.2391	0.3381	575	0.4267	0.9162	675	0.1538	0.2821	775	0.0161	0.1340
									780	0.0000	0.0000

ขั้นตอนที่ 2 สำหรับการคำนวณหาค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสงโคไฟทั้ง 2 ประเภท ที่เรียกว่า แหล่งกำเนิดแสงที่นำมาทดสอบโดยเทียบกับสีของแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงตามมาตรฐาน CIE ของ แหล่งกำเนิดแสง ที่ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง A (2856K), B (4874), C (6774), D50 (5000), D55 (5500), D65 (6500), D75 (7500), ID50 (5096), ID65 (6600), FL1 (6430) และ FL2 (4230) โดยมีค่า ปริมาณความเข้มแสงเชิงสเปกตรัมของโคไฟแต่ละประเภท ตามมาตรฐาน CIE แหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง สามารถพิจารณาในรูปแบบกราฟเส้น พร้อมแหล่งกำเนิดแสงทดสอบของหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W และหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ดังรูปที่ 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### รูปที่ 3 ปริมาณความเข้มแสงเชิงสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงและ ทดสอบ

สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงตามมาตรฐาน CIE ประเภทแหล่งกำเนิดแสงกลางวัน D65 (DayLighting) ที่มีค่าอุณหภูมิสีของแสงตอนกลางวันประมาณ 6503.68K เมื่อพิจารณาเบื้องต้นแล้วมีค่าอุณหภูมิสีของแสงใกล้เคียงแหล่งกำเนิดแสงทดสอบของหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ประมาณ 6039.63K และหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ประมาณ 5480.76K ถือว่าอยู่ในกลุ่มอุณหภูมิสีของแสงตอนกลางวัน

**ขั้นตอนที่ 3** คำนวณหาค่าคุณสมบัติสีของแสงของอุณหภูมิสีจาก แหล่งกำเนิดแสงทดสอบของหลอดเอชเอ็มไอ 200 W หลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W และแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงมาตรฐาน CIE ประเภทแหล่งกำเนิดแสงกลางวัน D65 (DayLighting)

**ขั้นตอนที่ 3.1** กรณีแหล่งกำเนิดแสงทดสอบของหลอดเอชเอ็มไอ 200 W

การคำนวณค่าไตรสติมูลัส CIE-1931  $X, Y, Z$  โดยใช้ค่าองศาการมองเห็น 2 องศา (Color Matching Function  $\bar{x}_{(\lambda)}, \bar{y}_{(\lambda)}, \bar{z}_{(\lambda)}$ ) จากแหล่งกำเนิดแสงหลอดเอชเอ็มไอ 200 W และนำค่าที่แสดงในตารางที่ 3 ไปคำนวณหาค่าไตรสติมูลัส ตามสมการที่ 1-4

นำค่าปริมาณความเข้มแสงเชิงสเปกตรัม ตามตารางที่ 3 คำนวณตามสมการที่ 1-4 ให้เริ่มคำนวณหาค่า ตัวแปร  $k$  คือ ค่ากำหนดความสว่างจากค่า CIE-1931 ไตรสติมูลัสของค่า  $Y$

$$k = \frac{100.000}{\int_{380nm}^{780nm} SPD_{(\lambda)} \bar{y}_{(\lambda)} d_{(\lambda)}} = \frac{100}{\sum_{380nm}^{780nm} SPD_{(\lambda)} \bar{y}_{(\lambda)}} \quad (1)$$

$$= \frac{100}{10.2402}$$

$$= 9.7654$$

ตารางที่ 3 ค่าปริมาณความเข้มแสงเชิงสเปกตรัมของหลอดเอชเอ็มไอ 200 W

Wave Length (nm)	SPD (HMI)	CIE 2° Colour Matching Functions			SPD × $\bar{x}$	SPD × $\bar{y}$	SPD × $\bar{z}$
		$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$			
380	0.5118	0.0014	0.0000	0.0065	0.0007	0.0000	0.0033
385	0.5441	0.0022	0.0001	0.0105	0.0012	0.0000	0.0057
390	0.5789	0.0042	0.0001	0.0201	0.0025	0.0001	0.0116
395	0.6428	0.0077	0.0002	0.0362	0.0049	0.0001	0.0233
400	0.6912	0.0143	0.0004	0.0679	0.0099	0.0003	0.0469
405	0.7030	0.0232	0.0006	0.1102	0.0163	0.0004	0.0775
410	0.6929	0.0435	0.0012	0.2074	0.0301	0.0008	0.1437

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

415	0.6872	0.0776	0.0022	0.3713	0.0533	0.0015	0.2552
420	0.7940	0.1344	0.0040	0.6456	0.1067	0.0032	0.5126
425	0.7135	0.2148	0.0073	1.0391	0.1532	0.0052	0.7414
430	0.6835	0.2839	0.0116	1.3856	0.1940	0.0079	0.9470
435	0.9380	0.3285	0.0168	1.6230	0.3081	0.0158	1.5223
440	0.8393	0.3483	0.0230	1.7471	0.2923	0.0193	1.4663
445	0.3766	0.3481	0.0298	1.7826	0.1311	0.0112	0.6713
450	0.3528	0.3362	0.0380	1.7721	0.1186	0.0134	0.6252
455	0.3704	0.3187	0.0480	1.7441	0.1181	0.0178	0.6460
460	0.3836	0.2908	0.0600	1.6692	0.1116	0.0230	0.6403
465	0.3555	0.2511	0.0739	1.5281	0.0893	0.0263	0.5432
470	0.3369	0.1954	0.0910	1.2876	0.0658	0.0306	0.4338
475	0.3381	0.1421	0.1126	1.0419	0.0480	0.0381	0.3523
480	0.3300	0.0956	0.1390	0.8130	0.0316	0.0459	0.2683
485	0.3280	0.0580	0.1693	0.6162	0.0190	0.0555	0.2021
490	0.3230	0.0320	0.2080	0.4652	0.0103	0.0672	0.1502
495	0.3230	0.0147	0.2586	0.3533	0.0047	0.0835	0.1141
500	0.3289	0.0049	0.3230	0.2720	0.0016	0.1062	0.0894
505	0.3265	0.0024	0.4073	0.2123	0.0008	0.1330	0.0693
510	0.3065	0.0093	0.5030	0.1582	0.0029	0.1542	0.0485
515	0.2786	0.0291	0.6082	0.1117	0.0081	0.1694	0.0311
520	0.2521	0.0633	0.7100	0.0782	0.0160	0.1790	0.0197
525	0.2560	0.1096	0.7932	0.0573	0.0281	0.2031	0.0147
530	0.2680	0.1655	0.8620	0.0422	0.0444	0.2310	0.0113

ตารางที่ 3 (ต่อ) ค่าปริมาณความเข้มแสงเชิงสเปกตรัมของโคมหลอดเอชเอ็มไอ 200 W

Wave Length (nm)	SPD (HMI)	CIE 2° Colour Matching Functions			SPD × $\bar{x}$	SPD × $\bar{y}$	SPD × $\bar{z}$
		$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$			
535	0.2796	0.2257	0.9149	0.0298	0.0631	0.2558	0.0083
540	0.5686	0.2904	0.9540	0.0203	0.1651	0.5424	0.0115
545	0.9596	0.3597	0.9803	0.0134	0.3452	0.9407	0.0129
550	0.8643	0.4334	0.9950	0.0087	0.3746	0.8599	0.0076
555	0.3855	0.5121	1.0000	0.0057	0.1974	0.3855	0.0022
560	0.3552	0.5945	0.9950	0.0039	0.2111	0.3534	0.0014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

565	0.3981	0.6784	0.9786	0.0027	0.2701	0.3896	0.0011
570	0.5795	0.7621	0.9520	0.0021	0.4416	0.5517	0.0012
575	0.9162	0.8425	0.9154	0.0018	0.7719	0.8387	0.0016
580	0.9525	0.9163	0.8700	0.0017	0.8728	0.8287	0.0016
585	0.5856	0.9786	0.8163	0.0014	0.5731	0.4780	0.0008
590	0.4506	1.0263	0.7570	0.0011	0.4625	0.3411	0.0005
595	0.4530	1.0567	0.6949	0.0010	0.4787	0.3148	0.0005
600	0.4407	1.0622	0.6310	0.0008	0.4681	0.2781	0.0004
605	0.4146	1.0456	0.5668	0.0006	0.4335	0.2350	0.0002
610	0.3980	1.0026	0.5030	0.0003	0.3990	0.2002	0.0001
615	0.3848	0.9384	0.4412	0.0002	0.3611	0.1698	0.0001
620	0.3757	0.8544	0.3810	0.0002	0.3210	0.1431	0.0001
625	0.3615	0.7514	0.3210	0.0001	0.2716	0.1160	0.0000
630	0.3384	0.6424	0.2650	0.0000	0.2174	0.0897	0.0000
635	0.3135	0.5419	0.2170	0.0000	0.1699	0.0680	0.0000
640	0.3129	0.4479	0.1750	0.0000	0.1401	0.0548	0.0000
645	0.3076	0.3608	0.1382	0.0000	0.1110	0.0425	0.0000
650	0.2991	0.2835	0.1070	0.0000	0.0848	0.0320	0.0000
655	0.3045	0.2187	0.0816	0.0000	0.0666	0.0248	0.0000
660	0.3079	0.1649	0.0610	0.0000	0.0508	0.0188	0.0000
665	0.3023	0.1212	0.0446	0.0000	0.0366	0.0135	0.0000
670	0.2971	0.0874	0.0320	0.0000	0.0260	0.0095	0.0000
675	0.2821	0.0636	0.0232	0.0000	0.0179	0.0065	0.0000
680	0.2887	0.0468	0.0170	0.0000	0.0135	0.0049	0.0000
685	0.2824	0.0329	0.0119	0.0000	0.0093	0.0034	0.0000

ตารางที่ 3 (ต่อ) ค่าปริมาณความเข้มแสงเชิงสเปกตรัมของโคมหลอดเอชเอ็มไอ 200 W

Wave Length (nm)	SPD (HMI)	CIE 2° Colour Matching Functions			SPD × $\bar{x}$	SPD × $\bar{y}$	SPD × $\bar{z}$
		$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$			
690	0.2633	0.0227	0.0082	0.0000	0.0060	0.0022	0.0000
695	0.2424	0.0158	0.0057	0.0000	0.0038	0.0014	0.0000
700	0.2225	0.0114	0.0041	0.0000	0.0025	0.0009	0.0000
705	0.1931	0.0081	0.0029	0.0000	0.0016	0.0006	0.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

710	0.1686	0.0058	0.0021	0.0000	0.0010	0.0004	0.0000
715	0.1568	0.0041	0.0015	0.0000	0.0006	0.0002	0.0000
720	0.1551	0.0029	0.0010	0.0000	0.0004	0.0002	0.0000
725	0.1513	0.0020	0.0007	0.0000	0.0003	0.0001	0.0000
730	0.1451	0.0014	0.0005	0.0000	0.0002	0.0001	0.0000
735	0.1404	0.0010	0.0004	0.0000	0.0001	0.0001	0.0000
740	0.1422	0.0007	0.0002	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000
745	0.1365	0.0005	0.0002	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000
750	0.1413	0.0003	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
755	0.1495	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
760	0.1592	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
765	0.1568	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
770	0.1520	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
775	0.1340	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
780	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$\sum_{380nm}^{780nm}$					10.4655	10.2402	10.7399

ดังนั้น ค่าไตรสตีมูลส์ตามแนวแกน X ของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W

$$\begin{aligned}
 X &= k \times \sum_{380nm}^{780nm} SPD \times \bar{x} \\
 &= 9.7654 \times 10.4655 \\
 &= 102.2001
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

ดังนั้น ค่าไตรสตีมูลส์ตามแนวแกน Y ของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W

$$\begin{aligned}
 Y &= k \times \sum_{380nm}^{780nm} SPD \times \bar{y} \\
 &= 9.7654 \times 10.2402 \\
 &= 100.0000
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

ดังนั้น ค่าไตรสตีมูลส์ตามแนวแกน Z ของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 Z &= k \times \sum_{380nm}^{780nm} SPD \times \bar{z} \\
 &= 9.7654 \times 10.7399 \\
 &= 104.8793
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

จากนั้นคำนวณค่า CIE-1931 Chromaticity Coordinates  $(x, y)$  โดยใช้ค่าไตรสติมูลัส ตามแนวแกน XYZ ของแหล่งกำเนิดแสง ที่ได้จากสมการที่ 2-4 นำไปแทนค่าในสมการที่ 5-6

ดังนั้น ค่าโครมาติซิตีตามแนวแกน  $x$  ของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{X}{(X+Y+Z)} \\
 &= \frac{102.2001}{(102.2001+100.0000+104.8793)} \\
 &= 0.3328
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

ดังนั้น ค่าโครมาติซิตีตามแนวแกน  $y$  ของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W

$$\begin{aligned}
 y &= \frac{Y}{(X+Y+Z)} \\
 &= \frac{100.0000}{(102.2001+100.0000+104.8793)} \\
 &= 0.3256
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

การคำนวณค่า CIE-1976 Chromaticity Coordinates ( $u', v'$ ) โดยใช้ค่าโครมาติซิตีตามแนวแกน  $x, y$  ของแหล่งกำเนิดแสงที่หาได้จากสมการที่ 5-6 มาค่าไปแทนในสมการที่ 7-8

ดังนั้น ค่าโครมาติซิตีตามแนวแกน  $u'$  ของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W

$$\begin{aligned} u' &= \frac{4x}{(-2x+12y+3)} & (7) \\ &= \frac{(4 \times 0.3328)}{(-(2 \times 0.3328) + (12 \times 0.3256) + 3)} \\ &= 0.2133 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าโครมาติซิตีตามแนวแกน  $v'$  ของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W

$$\begin{aligned} v' &= \frac{9y}{(-2x+12y+3)} & (8) \\ &= \frac{(9 \times 0.3256)}{(-(2 \times 0.3328) + (12 \times 0.3256) + 3)} \\ &= 0.4695 \end{aligned}$$

เมื่อได้ค่าโครมาติซิตีตามแนวแกน  $x, y$  สามารถคำนวณหาอุณหภูมิสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W โดยเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาค่า  $n$  (McCamy) นำค่าที่ได้ไปแทนในสมการที่ 1 ดังภาคผนวก ข.1

ดังนั้น ค่าอุณหภูมิสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงทดสอบของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W

$$\begin{aligned} n &= \frac{(0.3328 - 0.3320)}{(0.1858 - 0.3256)} \\ &= -0.0058 \end{aligned}$$

จากนั้นนำค่า  $n$  แทนค่าลงในสมการที่ 2 ภาคผนวก ข.2

$$\begin{aligned} CCT &= 449n^3 + 3525n^2 + 6823.3n + 5520.33 \\ &= 449 \times (-0.0058)^3 + 3525 \times (-0.0058)^2 + 6823.3 \times (-0.0058) + 5520.33 \\ &= 5480.77K \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ขั้นตอนที่ 3.2** กรณีแหล่งกำเนิดแสงทดสอบของหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W

การคำนวณค่าไตรสติมูลัส CIE-1931  $X, Y, Z$  โดยใช้ค่าองศาการมองเห็น 2 องศา (Color Matching Function  $\bar{x}_{(\lambda)}, \bar{y}_{(\lambda)}, \bar{z}_{(\lambda)}$ ) ของแหล่งกำเนิดแสงหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W และนำค่าที่แสดงในตารางที่ 4 ไปคำนวณหาค่าไตรสติมูลัส ตามสมการที่ 1-4

**ตารางที่ 4** ค่าปริมาณความเข้มแสงเชิงสเปกตรัมของโคมหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W

Wave Length (nm)	SPD (HP-LED)	CIE 2° Colour Matching Functions			SPD × $\bar{x}$	SPD × $\bar{y}$	SPD × $\bar{z}$
		$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$			
380	0.0082	0.0014	0.0000	0.0065	0.0000	0.0000	0.0001
385	0.0068	0.0022	0.0001	0.0105	0.0000	0.0000	0.0001
390	0.0062	0.0042	0.0001	0.0201	0.0000	0.0000	0.0001
395	0.0057	0.0077	0.0002	0.0362	0.0000	0.0000	0.0002
400	0.0052	0.0143	0.0004	0.0679	0.0001	0.0000	0.0004
405	0.0055	0.0232	0.0006	0.1102	0.0001	0.0000	0.0006
410	0.0087	0.0435	0.0012	0.2074	0.0004	0.0000	0.0018
415	0.0176	0.0776	0.0022	0.3713	0.0014	0.0000	0.0065
420	0.0335	0.1344	0.0040	0.6456	0.0045	0.0001	0.0216
425	0.0805	0.2148	0.0073	1.0391	0.0173	0.0006	0.0837
430	0.1593	0.2839	0.0116	1.3856	0.0452	0.0018	0.2208
435	0.3416	0.3285	0.0168	1.6230	0.1122	0.0058	0.5544
440	0.5949	0.3483	0.0230	1.7471	0.2072	0.0137	1.0394
445	0.9139	0.3481	0.0298	1.7826	0.3181	0.0272	1.6291
450	0.9927	0.3362	0.0380	1.7721	0.3337	0.0377	1.7591
455	0.8710	0.3187	0.0480	1.7441	0.2776	0.0418	1.5192
460	0.6368	0.2908	0.0600	1.6692	0.1852	0.0382	1.0630
465	0.4755	0.2511	0.0739	1.5281	0.1194	0.0351	0.7266
470	0.3243	0.1954	0.0910	1.2876	0.0634	0.0295	0.4176
475	0.2391	0.1421	0.1126	1.0419	0.0340	0.0269	0.2491
480	0.1854	0.0956	0.1390	0.8130	0.0177	0.0258	0.1507
485	0.1671	0.0580	0.1693	0.6162	0.0097	0.0283	0.1030
490	0.1641	0.0320	0.2080	0.4652	0.0053	0.0341	0.0763
495	0.1804	0.0147	0.2586	0.3533	0.0027	0.0467	0.0637
500	0.2046	0.0049	0.3230	0.2720	0.0010	0.0661	0.0557
505	0.2420	0.0024	0.4073	0.2123	0.0006	0.0985	0.0514

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 (ต่อ) ค่าปริมาณความเข้มแสงเชิงสเปกตรัมของโคมหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W

Wave Length (nm)	SPD (HP-LED)	CIE 2° Colour Matching Functions			SPD × $\bar{x}$	SPD × $\bar{y}$	SPD × $\bar{z}$
		$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$			
510	0.2764	0.0093	0.5030	0.1582	0.0026	0.1390	0.0437
515	0.3147	0.0291	0.6082	0.1117	0.0092	0.1914	0.0351
520	0.3496	0.0633	0.7100	0.0782	0.0221	0.2482	0.0274
525	0.3738	0.1096	0.7932	0.0573	0.0410	0.2965	0.0214
530	0.3980	0.1655	0.8620	0.0422	0.0659	0.3431	0.0168
535	0.4121	0.2257	0.9149	0.0298	0.0930	0.3770	0.0123
540	0.4220	0.2904	0.9540	0.0203	0.1226	0.4026	0.0086
545	0.4270	0.3597	0.9803	0.0134	0.1536	0.4186	0.0057
550	0.4312	0.4334	0.9950	0.0087	0.1869	0.4290	0.0038
555	0.4357	0.5121	1.0000	0.0057	0.2231	0.4357	0.0025
560	0.4345	0.5945	0.9950	0.0039	0.2583	0.4324	0.0017
565	0.4334	0.6784	0.9786	0.0027	0.2940	0.4241	0.0012
570	0.4302	0.7621	0.9520	0.0021	0.3278	0.4095	0.0009
575	0.4267	0.8425	0.9154	0.0018	0.3595	0.3906	0.0008
580	0.4249	0.9163	0.8700	0.0017	0.3893	0.3697	0.0007
585	0.4277	0.9786	0.8163	0.0014	0.4185	0.3491	0.0006
590	0.4267	1.0263	0.7570	0.0011	0.4379	0.3230	0.0005
595	0.4241	1.0567	0.6949	0.0010	0.4481	0.2947	0.0004
600	0.4195	1.0622	0.6310	0.0008	0.4455	0.2647	0.0003
605	0.4118	1.0456	0.5668	0.0006	0.4306	0.2334	0.0002
610	0.4032	1.0026	0.5030	0.0003	0.4043	0.2028	0.0001
615	0.3906	0.9384	0.4412	0.0002	0.3666	0.1723	0.0001
620	0.3778	0.8544	0.3810	0.0002	0.3228	0.1439	0.0001
625	0.3656	0.7514	0.3210	0.0001	0.2747	0.1173	0.0000
630	0.3487	0.6424	0.2650	0.0000	0.2240	0.0924	0.0000
635	0.3293	0.5419	0.2170	0.0000	0.1784	0.0715	0.0000
640	0.3085	0.4479	0.1750	0.0000	0.1382	0.0540	0.0000
645	0.2868	0.3608	0.1382	0.0000	0.1035	0.0396	0.0000
650	0.2647	0.2835	0.1070	0.0000	0.0750	0.0283	0.0000
655	0.2423	0.2187	0.0816	0.0000	0.0530	0.0198	0.0000
660	0.2192	0.1649	0.0610	0.0000	0.0361	0.0134	0.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 (ต่อ) ค่าปริมาณความเข้มแสงเชิงสเปกตรัมของโคมหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W

Wave Length (nm)	SPD (HP-LED)	CIE 2° Colour Matching Functions			SPD × $\bar{x}$	SPD × $\bar{y}$	SPD × $\bar{z}$
		$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$			
665	0.1957	0.1212	0.0446	0.0000	0.0237	0.0087	0.0000
670	0.1736	0.0874	0.0320	0.0000	0.0152	0.0056	0.0000
675	0.1539	0.0636	0.0232	0.0000	0.0098	0.0036	0.0000
680	0.1356	0.0468	0.0170	0.0000	0.0063	0.0023	0.0000
685	0.1223	0.0329	0.0119	0.0000	0.0040	0.0015	0.0000
690	0.1101	0.0227	0.0082	0.0000	0.0025	0.0009	0.0000
695	0.0988	0.0158	0.0057	0.0000	0.0016	0.0006	0.0000
700	0.0871	0.0114	0.0041	0.0000	0.0010	0.0004	0.0000
705	0.0779	0.0081	0.0029	0.0000	0.0006	0.0002	0.0000
710	0.0670	0.0058	0.0021	0.0000	0.0004	0.0001	0.0000
715	0.0602	0.0041	0.0015	0.0000	0.0002	0.0001	0.0000
720	0.0510	0.0029	0.0010	0.0000	0.0001	0.0001	0.0000
725	0.0455	0.0020	0.0007	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000
730	0.0399	0.0014	0.0005	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000
735	0.0355	0.0010	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
740	0.0312	0.0007	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
745	0.0282	0.0005	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
750	0.0249	0.0003	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
755	0.0229	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
760	0.0205	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
765	0.0202	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
770	0.0184	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
775	0.0162	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
780	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$\sum_{380nm}^{780nm}$					8.7287	8.3099	9.9791

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่าปริมาณความเข้มแสงเชิงสเปกตรัม ตามตารางที่ 4 คำนวณตามสมการที่ 1-4 ให้เริ่ม คำนวณหาค่า ตัวแปร  $k$  คือ ค่ากำหนดความสว่างจากค่า CIE-1931 ไตรสติมูลัสของค่า  $Y$

$$\begin{aligned} k &= \frac{100.000}{\int_{380nm}^{780nm} SPD_{(\lambda)} \bar{y}_{(\lambda)} d_{(\lambda)}} = \frac{100}{\sum_{380nm}^{780nm} SPD_{(\lambda)} \bar{y}_{(\lambda)}} \\ &= \frac{100}{8.3099} \\ &= 12.0339 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าไตรสติมูลัสตามแนวแกน  $X$  ของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W

$$\begin{aligned} X &= k \times \sum_{380nm}^{780nm} SPD \times \bar{x} \\ &= 12.0339 \times 8.7287 \\ &= 105.0397 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าไตรสติมูลัสตามแนวแกน  $Y$  ของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W

$$\begin{aligned} Y &= k \times \sum_{380nm}^{780nm} SPD \times \bar{y} \\ &= 12.0339 \times 8.3099 \\ &= 100.0000 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าไตรสติมูลัสตามแนวแกน  $Z$  ของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W

$$\begin{aligned} Z &= k \times \sum_{380nm}^{780nm} SPD \times \bar{z} \\ &= 12.0339 \times 9.9791 \\ &= 120.0869 \end{aligned}$$

จากนั้นคำนวณค่า CIE-1931 Chromaticity Coordinates  $(x, y)$  โดยใช้ค่าไตรสตีมูลัส ตามแนวแกน  $XYZ$  ของแหล่งกำเนิดแสง ที่ได้จากสมการที่ 2-4 นำไปแทนค่าในสมการที่ 5-6

ดังนั้น ค่าโครมาติซิตีตามแนวแกน  $x$  ของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{(X+Y+Z)} \\ &= \frac{105.0397}{(105.0397+100.0000+120.0869)} \\ &= 0.3231 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าโครมาติซิตีตามแนวแกน  $y$  ของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W

$$\begin{aligned} y &= \frac{Y}{(X+Y+Z)} \\ &= \frac{100.0000}{(105.0397+100.0000+120.0869)} \\ &= 0.3076 \end{aligned}$$

การคำนวณค่า CIE-1976 Chromaticity Coordinates  $(u', v')$  โดยใช้ค่าโครมาติซิตีตามแนวแกน  $x, y$  ของแหล่งกำเนิดแสงที่ได้จากสมการที่ 5-6 มาค่าไปแทนในสมการที่ 7-8

ดังนั้น ค่าโครมาติซิตีตามแนวแกน  $u'$  ของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W

$$\begin{aligned} u' &= \frac{4x}{(-2x+12y+3)} \\ &= \frac{(4 \times 0.3231)}{(-(2 \times 0.3231) + (12 \times 0.3076) + 3)} \\ &= 0.2138 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าโครมาติซิตีตามแนวแกน  $v'$  ของโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W

$$\begin{aligned} v' &= \frac{9y}{(-2x+12y+3)} \\ &= \frac{(9 \times 0.3076)}{(-(2 \times 0.3231) + (12 \times 0.3076) + 3)} \\ &= 0.4579 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้ค่าโครมาติซิตีตามแนวแกน  $x, y$  สามารถคำนวณหาอุณหภูมิสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงโคมไพหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W โดยเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาค่า  $n$  (McCamy) นำค่าที่ได้ไปแทนในสมการที่ 1 ดังภาคผนวก ข.1

ดังนั้น ค่าอุณหภูมิสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงทดสอบของหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W

$$\begin{aligned} n &= \frac{(0.3231 - 0.3320)}{(0.1858 - 0.3076)} \\ &= 0.0733 \end{aligned}$$

จากนั้นนำค่า  $n$  แทนค่าลงในสมการที่ 2 ภาคผนวก ข.2

$$\begin{aligned} CCT &= 449n^3 + 3525n^2 + 6823.3n + 5520.33 \\ &= 449 \times (0.0733)^3 + 3525 \times (0.0733)^2 + 6823.3 \times (0.0733) + 5520.33 \\ &= 6039.64 \text{ K} \end{aligned}$$

**ขั้นตอนที่ 3.3** กรณีแหล่งกำเนิดอ้างอิงตามมาตรฐาน CIE ประเภทแหล่งกำเนิดแสงกลางวัน D65 (DayLighting)

การคำนวณค่าไตรสติมูลัส CIE-1931  $X, Y, Z$  โดยใช้ค่าองค์การมองที่ 2 องศา (Color Matching Function  $\bar{x}_{(2)}, \bar{y}_{(2)}, \bar{z}_{(2)}$ ) ของแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงแสงกลางวัน D65 (DayLighting) และนำค่าที่แสดงในตารางที่ 4 คำนวณหาค่าไตรสติมูลัส ตามสมการที่ 1-4

ตารางที่ 5 ค่าปริมาณความเข้มแสงเชิงสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงแสงกลางวัน D65

Wave Length (nm)	SPD (D65)	CIE 2° Colour Matching Functions			SPD × $\bar{x}$	SPD × $\bar{y}$	SPD × $\bar{z}$
		$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$			
380	49.98	0.0014	0.0000	0.0065	0.0684	0.0019	0.3224
385	52.31	0.0022	0.0001	0.0105	0.1170	0.0033	0.5519
390	54.65	0.0042	0.0001	0.0201	0.2319	0.0066	1.0957
395	68.7	0.0077	0.0002	0.0362	0.5256	0.0149	2.4876
400	82.75	0.0143	0.0004	0.0679	1.1842	0.0328	5.6146
405	87.12	0.0232	0.0006	0.1102	2.0203	0.0558	9.6006
410	91.49	0.0435	0.0012	0.2074	3.9807	0.1107	18.9750
415	92.46	0.0776	0.0022	0.3713	7.1777	0.2016	34.3304
420	93.43	0.1344	0.0040	0.6456	12.5551	0.3737	60.3184
425	90.06	0.2148	0.0073	1.0391	19.3422	0.6574	93.5769
430	86.68	0.2839	0.0116	1.3856	24.6085	1.0055	120.1038
435	95.77	0.3285	0.0168	1.6230	31.4604	1.6128	155.4309
440	104.86	0.3483	0.0230	1.7471	36.5206	2.4118	183.1967
445	110.94	0.3481	0.0298	1.7826	38.6138	3.3060	197.7616
450	117.01	0.3362	0.0380	1.7721	39.3388	4.4464	207.3546
455	117.41	0.3187	0.0480	1.7441	37.4186	5.6357	204.7748
460	117.81	0.2908	0.0600	1.6692	34.2591	7.0686	196.6485
465	116.34	0.2511	0.0739	1.5281	29.2130	8.5975	177.7792
470	114.86	0.1954	0.0910	1.2876	22.4390	10.4500	147.8983
475	115.39	0.1421	0.1126	1.0419	16.3969	12.9929	120.2248
480	115.92	0.0956	0.1390	0.8130	11.0866	16.1152	94.2372
485	112.37	0.0580	0.1693	0.6162	6.5118	19.0242	69.2424
490	108.81	0.0320	0.2080	0.4652	3.4830	22.6347	50.6162
495	109.08	0.0147	0.2586	0.3533	1.6035	28.2081	38.5380
500	109.35	0.0049	0.3230	0.2720	0.5358	35.3201	29.7432
505	108.58	0.0024	0.4073	0.2123	0.2606	44.2246	23.0515
510	107.8	0.0093	0.5030	0.1582	1.0025	54.2234	17.0540
515	106.3	0.0291	0.6082	0.1117	3.0933	64.6517	11.8737
520	104.79	0.0633	0.7100	0.0782	6.6301	74.4009	8.1998
525	106.24	0.1096	0.7932	0.0573	11.6439	84.2696	6.0822
530	107.69	0.1655	0.8620	0.0422	17.8227	92.8288	4.5402

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 (ต่อ) ค่าปริมาณความเข้มแสงเชิงสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงแสงกลางวัน D65

Wave Length (nm)	SPD (D65)	CIE 2° Colour Matching Functions			SPD × $\bar{x}$	SPD × $\bar{y}$	SPD × $\bar{z}$
		$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$			
535	106.05	0.2257	0.9149	0.0298	23.9408	97.0199	3.1645
540	104.41	0.2904	0.9540	0.0203	30.3207	99.6071	2.1195
545	104.23	0.3597	0.9803	0.0134	37.4915	102.1767	1.3967
550	104.05	0.4334	0.9950	0.0087	45.1005	103.5246	0.9104
555	102.02	0.5121	1.0000	0.0057	52.2394	102.0200	0.5866
560	100	0.5945	0.9950	0.0039	59.4500	99.5000	0.3900
565	98.17	0.6784	0.9786	0.0027	66.5985	96.0692	0.2700
570	96.33	0.7621	0.9520	0.0021	73.4131	91.7062	0.2023
575	96.06	0.8425	0.9154	0.0018	80.9306	87.9333	0.1729
580	95.79	0.9163	0.8700	0.0017	87.7724	83.3373	0.1581
585	92.24	0.9786	0.8163	0.0014	90.2661	75.2955	0.1291
590	88.69	1.0263	0.7570	0.0011	91.0225	67.1383	0.0976
595	89.35	1.0567	0.6949	0.0010	94.4161	62.0893	0.0894
600	90.01	1.0622	0.6310	0.0008	95.6086	56.7963	0.0720
605	89.8	1.0456	0.5668	0.0006	93.8949	50.8986	0.0539
610	89.6	1.0026	0.5030	0.0003	89.8330	45.0688	0.0305
615	88.65	0.9384	0.4412	0.0002	83.1892	39.1124	0.0213
620	87.7	0.8544	0.3810	0.0002	74.9353	33.4137	0.0167
625	85.49	0.7514	0.3210	0.0001	64.2372	27.4423	0.0085
630	83.29	0.6424	0.2650	0.0000	53.5055	22.0719	0.0042
635	83.49	0.5419	0.2170	0.0000	45.2432	18.1173	0.0025
640	83.7	0.4479	0.1750	0.0000	37.4892	14.6475	0.0017
645	81.86	0.3608	0.1382	0.0000	29.5351	11.3131	0.0008
650	80.03	0.2835	0.1070	0.0000	22.6885	8.5632	0.0000
655	80.12	0.2187	0.0816	0.0000	17.5222	6.5378	0.0000
660	80.21	0.1649	0.0610	0.0000	13.2266	4.8928	0.0000
665	81.25	0.1212	0.0446	0.0000	9.8475	3.6221	0.0000
670	82.28	0.0874	0.0320	0.0000	7.1913	2.6330	0.0000
675	80.28	0.0636	0.0232	0.0000	5.1058	1.8625	0.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 (ต่อ) ค่าปริมาณความเข้มแสงเชิงสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงแสงกลางวัน D65

Wave Length (nm)	SPD (D65)	CIE 2° Colour Matching Functions			SPD × $\bar{x}$	SPD × $\bar{y}$	SPD × $\bar{z}$
		$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$			
680	78.28	0.0468	0.0170	0.0000	3.6612	1.3308	0.0000
685	74.00	0.0329	0.0119	0.0000	2.4346	0.8821	0.0000
690	69.72	0.0227	0.0082	0.0000	1.5826	0.5724	0.0000
695	70.67	0.0158	0.0057	0.0000	1.1194	0.4044	0.0000
700	71.61	0.0114	0.0041	0.0000	0.8134	0.2937	0.0000
705	72.98	0.0081	0.0029	0.0000	0.5919	0.2138	0.0000
710	74.35	0.0058	0.0021	0.0000	0.4305	0.1555	0.0000
715	67.98	0.0041	0.0015	0.0000	0.2792	0.1009	0.0000
720	61.6	0.0029	0.0010	0.0000	0.1786	0.0645	0.0000
725	65.74	0.0020	0.0007	0.0000	0.1347	0.0486	0.0000
730	69.89	0.0014	0.0005	0.0000	0.1006	0.0363	0.0000
735	72.49	0.0010	0.0004	0.0000	0.0725	0.0262	0.0000
740	75.09	0.0007	0.0002	0.0000	0.0518	0.0187	0.0000
745	69.34	0.0005	0.0002	0.0000	0.0330	0.0119	0.0000
750	63.59	0.0003	0.0001	0.0000	0.0211	0.0076	0.0000
755	55.01	0.0002	0.0001	0.0000	0.0129	0.0047	0.0000
760	46.42	0.0002	0.0001	0.0000	0.0077	0.0028	0.0000
765	56.61	0.0001	0.0000	0.0000	0.0066	0.0024	0.0000
770	66.81	0.0001	0.0000	0.0000	0.0056	0.0020	0.0000
775	65.09	0.0001	0.0000	0.0000	0.0038	0.0014	0.0000
780	63.38	0.0000	0.0000	0.0000	0.0026	0.0010	0.0000
$\sum_{380nm}^{780nm}$					2008.705	2113.47	2301.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่าปริมาณความเข้มแสงเชิงสเปกตรัม ตามตารางที่ 5 คำนวณตามสมการที่ 1-4 ให้เริ่ม คำนวณหาค่า ตัวแปร  $k$  คือ ค่ากำหนดความสว่างจากค่า CIE-1931 ไตรสติมูล์ของค่า  $Y$

$$\begin{aligned} k &= \frac{100.000}{\int_{380nm}^{780nm} SPD_{(\lambda)} \bar{y}_{(\lambda)} d_{(\lambda)}} = \frac{100}{\sum_{380nm}^{780nm} SPD_{(\lambda)} \bar{y}_{(\lambda)}} \\ &= \frac{100}{2113.4792} \\ &= 0.0473 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าไตรสติมูล์ตามแนวแกน  $X$  ของโคมไฟแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงแสงกลางวัน D65

$$\begin{aligned} X &= k \times \sum_{380nm}^{780nm} SPD \times \bar{x} \\ &= 0.0473 \times 2008.7052 \\ &= 95.0425 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าไตรสติมูล์ตามแนวแกน  $Y$  ของโคมไฟแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงแสงกลางวัน D65

$$\begin{aligned} Y &= k \times \sum_{380nm}^{780nm} SPD \times \bar{y} \\ &= 0.0473 \times 2113.4792 \\ &= 100.0000 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าไตรสติมูล์ตามแนวแกน  $Z$  ของโคมไฟแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงแสงกลางวัน D65

$$\begin{aligned} Z &= k \times \sum_{380nm}^{780nm} SPD \times \bar{z} \\ &= 0.0473 \times 2301.1242 \\ &= 108.8785 \end{aligned}$$

จากนั้นคำนวณค่า CIE-1931 Chromaticity Coordinates  $(x, y)$  โดยใช้ค่าไตรสติมูล์ ตามแนวแกน  $XYZ$  ของแหล่งกำเนิดแสง ที่ได้จากสมการที่ 2-4 นำไปแทนค่าในสมการที่ 5-6

ดังนั้น ค่าโครมาติซิตีตามแนวแกน  $x$  ของโคมไฟแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงแสงกลางวัน D65

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{(X+Y+Z)} \\ &= \frac{95.0426}{(95.0426+100.0000+108.8785)} \\ &= 0.3127 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าโครมาติซิตีตามแนวแกน  $y$  ของโคมไฟแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงแสงกลางวัน D65

$$\begin{aligned} y &= \frac{Y}{(X+Y+Z)} \\ &= \frac{100.0000}{(95.0426+100.0000+108.8785)} \\ &= 0.3290 \end{aligned}$$

การคำนวณค่า CIE-1976 Chromaticity Coordinates ( $u', v'$ ) โดยใช้ค่าโครมาติซิตีตามแนวแกน  $x, y$  ของแหล่งกำเนิดแสงที่หาได้จากสมการที่ 5-6 มาค่าไปแทนในสมการที่ 7-8

ดังนั้น ค่าโครมาติซิตีตามแนวแกน  $u'$  ของโคมไฟแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงแสงกลางวัน D65

$$\begin{aligned} u' &= \frac{4x}{(-2x+12y+3)} \\ &= \frac{(4 \times 0.3127)}{(-(2 \times 0.3127) + (12 \times 0.3290) + 3)} \\ &= 0.1978 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าโครมาติซิตีตามแนวแกน  $v'$  ของโคมไฟแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงแสงกลางวัน D65

$$\begin{aligned} v' &= \frac{9y}{(-2x+12y+3)} \\ &= \frac{(9 \times 0.3290)}{(-(2 \times 0.3127) + (12 \times 0.3290) + 3)} \\ &= 0.4683 \end{aligned}$$

เมื่อได้ค่าโครมาติซิตีตามแนวแกน  $x, y$  สามารถคำนวณหาอุณหภูมิสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงโคมไฟอ้างอิงแสงกลางวัน D65 โดยเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาค่า  $n$  (McCamy) นำค่าที่ได้ไปแทนในสมการที่ 1 ดังภาคผนวก ข.1

ดังนั้น ค่าอุณหภูมิสีของแสงแหล่งกำเนิดแสงทดสอบของโคมไฟแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงแสงกลางวัน D65

$$n = \frac{(0.3231 - 0.3320)}{(0.1858 - 0.3290)}$$

$$= 0.1346$$

จากนั้นนำค่า  $n$  แทนค่าลงในสมการที่ 2 ภาคผนวก ข.2

$$CCT = 449n^3 + 3525n^2 + 6823.3n + 5520.33$$

$$= 449 \times (0.1346)^3 + 3525 \times (0.1346)^2 + 6823.3 \times (0.1346) + 5520.33$$

$$= 6503.68 \text{ K}$$

จากการคำนวณคุณสมบัติสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงทดสอบของหลอดเอชเอ็มไอ 200 W หลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W และแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงมาตรฐาน CIE ประเภทแหล่งกำเนิดแสงกลางวัน D65 (DayLighting) สามารถสรุปค่าต่างๆ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 คุณสมบัติสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงทดสอบ และแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง

Lighting Source	Colorimetric Terms								
	CIE-1931 XYZ Tristimulus			CIE-1931 (x,y)		CIE-1976 (u',v')		McCamy	CCT
	X	Y	Z	x	y	u'	v'	n	(K)
<b>Daylight 6500 (D65)</b>	95.0426	100	108.8785	0.3127	0.3290	0.1978	0.4683	0.1346	6503.6
<b>HP-LED 104 W</b>	105.0397	100	120.0869	0.3231	0.3076	0.2138	0.4579	0.0733	6039.6
<b>HMI 200 W</b>	102.2001	100	104.8793	0.3328	0.3256	0.2133	0.4695	-0.0058	5480.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ขั้นตอนที่ 4** คำนวณหาค่า CIE-1976 Chromaticity Coordinates ( $u',v'$ ) ของค่าสีแสงทดสอบ จากตัวอย่างเฉพาะสีทดสอบ ( $R_i$ ) ทั้งหมด 8 สี (The Eight test color samples) ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 4.1 กรณีแหล่งกำเนิดแสงทดสอบหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงแสงกลางวัน D65

ขั้นตอนที่ 4.1.1 คำนวณค่าคุณสมบัติสีของแสงโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ร่วมกับตัวอย่างเฉพาะสีทดสอบ ( $R_i$ ) ทั้งหมด 8 สี

**ตารางที่ 7** คุณสมบัติสีของแสงโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ร่วมกับตัวอย่างสีทดสอบ ( $R_i$ )

Test Colour	X	Y	Z	x	y	uk,i	vk,i
1 (7.5R6/4)	34.8692	30.5759	24.0184	0.3898	0.3418	0.2466	0.4866
2 (5Y6/4)	29.6069	29.8271	13.7981	0.4043	0.4073	0.2284	0.5178
3 (5GY6/8)	26.4786	31.8278	8.8906	0.3940	0.4736	0.1996	0.5399
4 (2.5G6/6)	22.3097	28.6007	18.2503	0.3226	0.4135	0.1763	0.5086
5 (10BG6/4)	27.0849	29.6989	37.5713	0.2871	0.3148	0.1851	0.4567
6 (5PB6/8)	29.9001	27.8275	55.6091	0.2638	0.2455	0.1947	0.4078
7 (2.5P6/8)	35.0138	28.5066	53.5645	0.2990	0.2435	0.2247	0.4116
8 (10P6/8)	38.6373	30.5878	45.7024	0.3362	0.2661	0.2436	0.4338
<b>HMI</b>	<b>102.2001</b>	<b>100.0000</b>	<b>104.8793</b>	<b>0.3328</b>	<b>0.3256</b>	<b>0.2133</b>	<b>0.4695</b>

**ตารางที่ 8** คุณสมบัติสีของแสงแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงกลางวัน D65 ร่วมกับตัวอย่างสีทดสอบ ( $R_i$ )

Test Colour	X	Y	Z	x	y	uk,i	vk,i
1 (7.5R6/4)	32.9919	29.7833	24.5124	0.3780	0.3412	0.2385	0.4845
2 (5Y6/4)	27.4819	28.8916	14.9100	0.3855	0.4053	0.2174	0.5143
3 (5GY6/8)	23.9131	30.4386	9.8985	0.3722	0.4738	0.1875	0.5370
4 (2.5G6/6)	20.4311	29.4867	21.2505	0.2871	0.4143	0.1552	0.5041
5 (10BG6/4)	24.9851	30.8442	40.3519	0.2598	0.3207	0.1642	0.4560
6 (5PB6/8)	28.2071	29.7847	57.8185	0.2436	0.2572	0.1740	0.4134
7 (2.5P6/8)	33.3218	29.3708	53.1498	0.2876	0.2535	0.2105	0.4174
8 (10P6/8)	37.6253	31.3369	45.3705	0.3291	0.2741	0.2338	0.4381
<b>D65</b>	<b>95.0426</b>	<b>100.0000</b>	<b>108.8785</b>	<b>0.3127</b>	<b>0.3290</b>	<b>0.1978</b>	<b>0.4683</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 4.1.2 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $c$  และ  $d$  ในสมการที่ 9 และ 10 คำนวณได้จากการนำแหล่งกำเนิดแสงทดสอบ หลอดเอชเอ็มไอ 200 W คำนวณหาค่า  $u_k, v_k$  ที่ให้ค่า  $c_k, d_k$  ร่วมกับตัวอย่างเฉพาะสีทดสอบอ้างอิง D65 ( $R_k$ ) ทั้งหมด 8 สี

สมมติคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์  $c$  และ  $d$  ในตำแหน่งสีทดสอบที่ 1 (7.5R6/4) ของแสงโคมไฟ หลอดเอชเอ็มไอ 200 W โดยการนำค่า ( $u_k, v_k$ ) ในตารางที่ 7 แทนค่าในสมการที่ (9)

$$\begin{aligned} c &= \frac{1}{(v')} (4 - u' - 10v') \\ &= \frac{1}{(0.4866)} (4 - 0.2466 - (10 \times 0.4866)) \\ &= -2.2860 \end{aligned} \quad (9)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} d &= \frac{1}{(v')} (1.708v' + 0.404 - 1.481u') \\ &= \frac{1}{(0.4866)} ((1.708 \times 0.4866) + 0.404 - (1.481 \times 0.2466)) \\ &= 1.7877 \end{aligned} \quad (10)$$

ตารางที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์  $c$  และ  $d$  ของแหล่งกำเนิดแสงทดสอบ หลอดเอชเอ็มไอ 200 W

Test Colour	Test Source		Reference Source	
	HMI		D65	
	$c_k$	$d_k$	$c_r$	$d_r$
1 (7.5R6/4)	-2.2860	1.7877	-2.2360	1.8128
2 (5Y6/4)	-2.7165	1.8348	-2.6452	1.8674
3 (5GY6/8)	-2.9609	1.9087	-2.8997	1.9433
4 (2.5G6/6)	-2.4825	1.9888	-2.3724	2.0534
5 (10BG6/4)	-1.6466	1.9923	-1.5890	2.0607
6 (5PB6/8)	-0.6689	1.9914	-0.7450	2.0619
7 (2.5P6/8)	-0.8280	1.8810	-0.9205	1.9292
8 (10P6/8)	-1.3411	1.8078	-1.4029	1.8399
HMI Source	-1.9349	1.8957	-1.8816	1.9450

ขั้นตอนที่ 4.1.3 คำนวณการปรับค่าให้ใกล้เคียงมากที่สุด จึงได้เป็นค่า CIE-1976 ( $u'_{k,i}, v'_{k,i}$ ) ของแต่ละตัวอย่างสีทดสอบ  $i = 1$  ถึง 8 สามารถหาค่าได้ดังสมการที่ (11) และ (12)

$$u'_{k,i} = \frac{10.872 + 0.404 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - 4 \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}}{16.518 + 1.481 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}} \quad (11)$$

$$= \frac{10.872 + 0.404 \left( \frac{-1.8816}{-1.9349} \right) \times (-2.2860) - 4 \left( \frac{1.9450}{1.8957} \right) \times 1.7877}{16.518 + 1.481 \left( \frac{-1.8816}{-1.9349} \right) \times (-2.2860) - \left( \frac{1.9450}{1.8957} \right) \times 1.7877}$$

$$= 0.2466$$

และ

$$v'_{k,i} = \frac{5.520}{16.518 + 1.481 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}} \quad (12)$$

$$= \frac{5.520}{16.518 + 1.481 \left( \frac{-1.8816}{-1.9349} \right) \times (-2.2860) - \left( \frac{1.9450}{1.8957} \right) \times 1.7877}$$

$$= 0.4866$$

ตารางที่ 10 ค่า CIE-1976 Chromaticity Coordinates ( $u', v'$ ) ของแสงทดสอบหลอดเอชเอ็มไอ 200 W จากตัวอย่างเฉพาสีทดสอบ ( $R$ ) ทั้งหมด 8 สี

Test Colour	Test Source		Reference Source	
	HMI		D65	
	$(u'_{k,i})$	$(v'_{k,i})$	$(u'_{k,i})$	$(v'_{k,i})$
1 (7.5R6/4)	0.2466	0.4866	0.2385	0.4845
2 (5Y6/4)	0.2284	0.5178	0.2174	0.5143
3 (5GY6/8)	0.1996	0.5399	0.1875	0.5370
4 (2.5G6/6)	0.1763	0.5086	0.1552	0.5041
5 (10BG6/4)	0.1851	0.4567	0.1642	0.4560
6 (5PB6/8)	0.1947	0.4078	0.1740	0.4134
7 (2.5P6/8)	0.2247	0.4116	0.2105	0.4174
8 (10P6/8)	0.2436	0.4338	0.2338	0.4381
HMI Source	0.2133	0.4695	0.1978	0.4683

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 4.1.4 แปลงค่าโคออร์เนตปริภูมิสีกลสมำเสมอ CIE-1964 ( $W_i^*, U_i^*, V_i^*$ ) ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทดสอบหลอดเอชเอ็มไอ 200 W และแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง D65 โดยนำค่า  $Y$  ในตารางที่ 7 คุณสมบัติสีของแสงโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W ร่วมกับตัวอย่างสีทดสอบ ใช้สมการที่ (13)-(15)

$$\begin{aligned} W_i^* &= 25(Y_i)^{\frac{1}{3}} - 17 \\ &= 25(30.5759)^{\frac{1}{3}} - 17 \\ &= 61.1747 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} U_i^* &= 13(W_i^*)(u_i' - u') \\ &= 13((61.1747) \times (0.2466 - 0.2133)) \\ &= 26.4825 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} V_i^* &= 13(W_i^*)(v_i' - v') \\ &= 13((61.1747) \times (0.4866 - 0.4695)) \\ &= 13.5528 \end{aligned} \tag{15}$$

ตารางที่ 11 ค่า โคออร์เนตปริภูมิสีกลสมำเสมอ CIE-1964 ( $W_i^*, U_i^*, V_i^*$ ) ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทดสอบ หลอดเอชเอ็มไอ 200 W และแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง D65 จากตัวอย่างเฉพาะสีทดสอบ ( $R_i$ ) ทั้งหมด 8 สี

Test Colour	Test Source			Reference Source		
	HMI			D65		
	$(W_{k,i}^*)$	$(U_{k,i}^*)$	$(V_{k,i}^*)$	$(W_{r,i}^*)$	$(U_{r,i}^*)$	$(V_{r,i}^*)$
1 (7.5R6/4)	61.1747	26.5207	13.5528	60.4933	31.9966	12.6883
2 (5Y6/4)	60.5313	11.9423	38.0082	59.7121	15.2097	35.6786
3 (5GY6/8)	62.2274	-11.0365	56.9268	61.0575	-8.2135	54.4619
4 (2.5G6/6)	59.4538	-28.5449	30.2308	60.2352	-33.3627	27.9723
5 (10BG6/4)	60.4201	-22.1202	-10.0832	61.4027	-26.8582	-9.8128
6 (5PB6/8)	58.7585	-14.1495	-47.1464	60.4945	-18.7411	-43.2069
7 (2.5P6/8)	59.3698	8.8212	-44.6975	60.1339	9.8663	-39.8421
8 (10P6/8)	61.1849	24.0888	-28.3926	61.8180	28.8834	-24.3179
HMI Source	99.0397	0.0000	0.0000	99.0397	0.0000	0.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 4.1.5 คำนวณค่าผลลัพธ์การเลื่อนตำแหน่งสี  $\Delta E_i$  เป็นขั้นตอนการหาค่าความแตกต่างระหว่างสีที่สามารถรับรู้ได้จากตัวอย่างสีทดสอบ  $i$  จากแหล่งกำเนิดแสงทดสอบ  $k$  และตัวอย่างสีทดสอบเดียวกันที่ได้รับแสงจากชุดแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง  $r$  ที่แสดงค่าในตารางที่ 11 สามารถคำนวณได้ดังสมการ (16)

$$\begin{aligned} \Delta E_i &= \left\{ \sqrt{(U_{r,i}^* - U_{k,i}^*)^2 + (V_{r,i}^* - V_{k,i}^*)^2 + (W_{r,i}^* - W_{k,i}^*)^2} \right\} \\ &= \left\{ \sqrt{(31.9966 - 26.5207)^2 + (12.6883 - 13.5528)^2 + (60.4933 - 61.1747)^2} \right\} \\ &= 5.5854 \end{aligned} \quad (16)$$

ขั้นตอนที่ 4.1.6 ดัชนีความถูกต้องสีของแสงเฉพาะสี  $R_i (i=1,2,3...15)$  ที่มีพื้นฐานจากค่า  $\Delta E_i$  นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าดัชนีความถูกต้องสีทดสอบสีใดสีหนึ่งเฉพาะสีที่ต้องการหาแสดงดังสมการที่ (17)

$$\begin{aligned} R_i &= 100 - 4.6\Delta E_i \\ &= 100 - (4.6 \times 5.5854) \\ &= 74.31 \end{aligned} \quad (17)$$

ขั้นตอนที่ 4.1.7 ดัชนีความถูกต้องสีของแสงทั่วไป  $R_a$  หาจากค่าเฉลี่ยเลขคณิตของดัชนีความถูกต้องสีของแสงเฉพาะสี  $R_i$  สำหรับ CIE 1974 พิจารณาเพียง 8 ค่าของสีตัวอย่างทดสอบที่ 1 ถึง 8 ดังสมการที่ (18)

$$\begin{aligned} R_a &= \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \\ &= \frac{1}{8} (74.31 + 81.16 + 81.94 + 75.26 + 77.71 + 71.05 + 76.89 + 70.91) \\ &= 76.15 \end{aligned} \quad (18)$$

จากการคำนวณค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสงเฉพาะสี ของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ดัชนีความถูกต้องสีของแสงเฉพาะสี  $R_i$  ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทดสอบหลอดเอชเอ็มไอ 200 W จากตัวอย่างเฉพาะสีทดสอบ ( $R_i$ ) ทั้งหมด 8 สี

Test Colour	Test Source		
	HMI		
	$\Delta E_i$	$R_i$	%
1 (7.5R6/4)	5.5854	$R_1$	74.31
2 (5Y6/4)	4.0956	$R_2$	81.16
3 (5GY6/8)	3.9259	$R_3$	81.94
4 (2.5G6/6)	5.3780	$R_4$	75.26
5 (10BG6/4)	4.8465	$R_5$	77.71
6 (5PB6/8)	6.2942	$R_6$	71.05
7 (2.5P6/8)	5.0250	$R_7$	76.89
8 (10P6/8)	6.3240	$R_8$	70.91
HMI Source		$R_a$	76.15

ขั้นตอนที่ 4.2 กรณีแหล่งกำเนิดแสงทดสอบของหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง D65

ขั้นตอนที่ 4.2.1 คำนวณค่าคุณสมบัติสีของแสงโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ร่วมกับตัวอย่างเฉพาะสีทดสอบ ( $R_i$ ) ทั้งหมด 8 สี

ตารางที่ 13 คุณสมบัติสีของแสงโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ร่วมกับตัวอย่างสีทดสอบ ( $R_i$ )

Test Colour	X	Y	Z	x	y	uk,i	vk,i
1 (7.5R6/4)	36.2020	30.6013	26.9132	0.3863	0.3265	0.2514	0.4782
2 (5Y6/4)	30.1677	29.5943	15.9062	0.3987	0.3911	0.2313	0.5104
3 (5GY6/8)	26.1944	31.1353	10.0063	0.3890	0.4624	0.2002	0.5355
4 (2.5G6/6)	22.4404	28.6327	21.6625	0.3085	0.3937	0.1736	0.4985
5 (10BG6/4)	27.8002	29.8443	44.1208	0.2732	0.2933	0.1829	0.4419
6 (5PB6/8)	31.5441	28.4393	65.2121	0.2520	0.2272	0.1930	0.3915
7 (2.5P6/8)	36.7671	29.0660	60.2474	0.2916	0.2305	0.2250	0.4003
8 (10P6/8)	40.8379	31.2886	51.1331	0.3313	0.2538	0.2462	0.4244
HP-LED	105.0397	100.0000	120.0869	0.3231	0.3076	0.2138	0.4579

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 4.2.2 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $c$  และ  $d$  ในสมการที่ 9 และ 10 คำนวณได้จากการนำแหล่งกำเนิดแสงทดสอบ หลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W คำนวณหาค่า  $u_k, v_k$  ที่ให้ค่า  $c_k, d_k$  ร่วมกับตัวอย่างเฉพาะสีทดสอบอ้างอิง D65 ( $R_k$ ) ทั้งหมด 8 สี

สมมติค่านวณหาค่าสัมประสิทธิ์  $c$  และ  $d$  ในตำแหน่งสีทดสอบที่ 1 (7.5R6/4) ของแสงโคมไฟ หลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W โดยการนำค่า ( $u_{k1}, v_{k1}$ ) ในตารางที่ 13 แทนค่าในสมการที่ (9-10)

$$\begin{aligned} c &= \frac{1}{(v')} (4 - u' - 10v') \\ &= \frac{1}{(0.4782)} (4 - 0.2514 - (10 \times 0.4782)) \\ &= -2.1607 \end{aligned}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} d &= \frac{1}{(v')} (1.708v' + 0.404 - 1.481u') \\ &= \frac{1}{(0.4782)} ((1.708 \times 0.4782) + 0.404 - (1.481 \times 0.2514)) \\ &= 1.7742 \end{aligned}$$

ตารางที่ 14 ค่าสัมประสิทธิ์  $c$  และ  $d$  ของแหล่งกำเนิดแสงทดสอบ หลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W

Test Colour	Test Source		Reference Source	
	HP-LED		D65	
	c	d	c	d
1 (7.5R6/4)	-2.1607	1.7742	-2.2360	1.8128
2 (5Y6/4)	-2.6167	1.8285	-2.6452	1.8674
3 (5GY6/8)	-2.9048	1.9086	-2.8997	1.9433
4 (2.5G6/6)	-2.3246	2.0025	-2.3724	2.0534
5 (10BG6/4)	-1.3622	2.0091	-1.5890	2.0607
6 (5PB6/8)	-0.2760	2.0098	-0.7450	2.0619
7 (2.5P6/8)	-0.5696	1.8846	-0.9205	1.9292
8 (10P6/8)	-1.1543	1.8009	-1.4029	1.8399
HP-LED Source	-1.7322	1.8988	-1.8816	1.9450

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 4.2.3 คำนวณการปรับค่าให้ใกล้เคียงที่สุด จึงได้เป็นค่า CIE-1976  $(u'_{k,i}, v'_{k,i})$  ของแต่ละตัวอย่างสีทดสอบ  $i = 1$  ถึง 8 สามารถหาค่าได้ดังสมการที่ (11) และ (12)

$$u'_{k,i} = \frac{10.872 + 0.404 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - 4 \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}}{16.518 + 1.481 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}}$$

$$= \frac{10.872 + 0.404 \left( \frac{-1.8816}{-1.7322} \right) \times (-2.1607) - 4 \left( \frac{1.9450}{1.8957} \right) \times 1.7742}{16.518 + 1.481 \left( \frac{-1.8816}{-1.7322} \right) \times (-2.1607) - \left( \frac{1.9450}{1.8988} \right) \times 1.7742}$$

$$= 0.2514$$

และ

$$v'_{k,i} = \frac{5.520}{16.518 + 1.481 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}}$$

$$= \frac{5.520}{16.518 + 1.481 \left( \frac{-1.8816}{-1.7322} \right) \times (-2.1607) - \left( \frac{1.9450}{1.8988} \right) \times 1.7742}$$

$$= 0.4782$$

ตารางที่ 15 ค่า CIE-1976 Chromaticity Coordinates  $(u', v')$  ของแสงทดสอบหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W จากตัวอย่างเฉพาะสีทดสอบ  $(R_i)$  ทั้งหมด 8 สี

Test Colour	Test Source		Reference Source	
	HP-LED		D65	
	$(u'_{k,i})$	$(v'_{k,i})$	$(u'_{k,i})$	$(v'_{k,i})$
1 (7.5R6/4)	0.2514	0.4782	0.2385	0.4845
2 (5Y6/4)	0.2313	0.5104	0.2174	0.5143
3 (5GY6/8)	0.2002	0.5355	0.1875	0.5370
4 (2.5G6/6)	0.1736	0.4985	0.1552	0.5041
5 (10BG6/4)	0.1829	0.4419	0.1642	0.4560
6 (5PB6/8)	0.1930	0.3915	0.1740	0.4134
7 (2.5P6/8)	0.2250	0.4003	0.2105	0.4174
8 (10P6/8)	0.2462	0.4244	0.2338	0.4381
HP-LED Source	0.2138	0.4579	0.1978	0.4683

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 4.2.4 แปลงค่าโคออร์เนตปริภูมิสีกลสม้าเสมอ CIE-1964  $(W^*_i, U^*_i, V^*_i)$  ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทดสอบหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W และแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงอ้างอิง D65 โดยนำค่า  $Y$  ในตารางที่ 13 คุณสมบัติสีของแสงคอมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ร่วมกับตัวอย่างสีทดสอบ ใช้สมการที่ (13) ถึง (15)

$$\begin{aligned} W^*_i &= 25(Y_i)^{\frac{1}{3}} - 17 \\ &= 25(30.6013)^{\frac{1}{3}} - 17 \\ &= 61.1963 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U^*_i &= 13(W^*_i)(u_i - u') \\ &= 13((61.1963) \times (0.2514 - 0.2138)) \\ &= 29.9378 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V^*_i &= 13(W^*_i)(v_i - v') \\ &= 13((61.1963) \times (0.4788 - 0.4579)) \\ &= 16.0959 \end{aligned}$$

ตารางที่ 16 ค่า โคออร์เนตปริภูมิสีกลสม้าเสมอ CIE-1964  $(W^*_i, U^*_i, V^*_i)$  ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทดสอบ หลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W และแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง D65 จากตัวอย่างเฉพาะสีทดสอบ ( $R_i$ ) ทั้งหมด 8 สี

Test Colour	Test Source			Reference Source		
	HP-LED			D65		
	$(W^*_{k,i})$	$(U^*_{k,i})$	$(V^*_{k,i})$	$(W^*_{r,i})$	$(U^*_{r,i})$	$(V^*_{r,i})$
1 (7.5R6/4)	61.1963	29.9378	16.0959	60.4933	31.9966	12.6883
2 (5Y6/4)	60.3290	13.7014	41.1714	59.7121	15.2097	35.6786
3 (5GY6/8)	61.6486	-10.8530	62.1872	61.0575	-8.2135	54.4619
4 (2.5G6/6)	59.4823	-31.0400	31.3754	60.2352	-33.3627	27.9723
5 (10BG6/4)	60.5462	-24.2743	-12.6294	61.4027	-26.8582	-9.8128
6 (5PB6/8)	59.3097	-16.0302	-51.2276	60.4945	-18.7411	-43.2069
7 (2.5P6/8)	59.8662	8.7622	-44.8650	60.1339	9.8663	-39.8421
8 (10P6/8)	61.7775	26.0072	-26.9646	61.8180	28.8834	-24.3179
HP-LED Source	99.0397	0.0000	0.0000	99.0397	0.0000	0.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 4.2.5 คำนวณค่าผลลัพธ์การเลื่อนตำแหน่งสี  $\Delta E_i$  เป็นขั้นตอนการหาค่าความแตกต่างระหว่างสีที่สามารถรับรู้ได้จากตัวอย่างสีทดสอบ  $i$  จากแหล่งกำเนิดแสงทดสอบ  $k$  และตัวอย่างสีทดสอบเดียวกันที่ได้รับแสงจากชุดแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง  $r$  ที่แสดงค่าในตารางที่ 15 สามารถคำนวณได้ดังสมการ 16

$$\begin{aligned} \Delta E_i &= \left\{ \sqrt{(U_{r,i}^* - U_{k,i}^*)^2 + (V_{r,i}^* - V_{k,i}^*)^2 + (W_{r,i}^* - W_{k,i}^*)^2} \right\} \\ &= \left\{ \sqrt{(31.9966 - 29.9378)^2 + (12.6883 - 16.0959)^2 + (60.4933 - 61.1963)^2} \right\} \\ &= 4.0428 \end{aligned} \quad (16)$$

ขั้นตอนที่ 4.2.6 ดัชนีความถูกต้องสีของแสงเฉพาะสี  $R_i (i=1,2,3...15)$  ที่มีพื้นฐานจากค่า  $\Delta E_i$  ซึ่งได้มาจากสมการที่ (2.46) จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าดัชนีความถูกต้องสีทดสอบสีใดสีหนึ่งเฉพาะสีที่ต้องการหาแสดงดังสมการที่ 17

$$\begin{aligned} R_i &= 100 - 4.6\Delta E_i \\ &= 100 - (4.6 \times 4.0428) \\ &= 81.40 \end{aligned} \quad (17)$$

ขั้นตอนที่ 4.2.7 ดัชนีความถูกต้องสีของแสงทั่วไป  $R_a$  หาจากค่าเฉลี่ยเลขคณิตของดัชนีความถูกต้องสีของแสงเฉพาะสี  $R_i$  สำหรับ CIE 1974 พิจารณาเพียง 8 ค่าของสีตัวอย่างทดสอบที่ 1 ถึง 8 ดังสมการที่ 18

$$\begin{aligned} R_a &= \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \\ &= \frac{1}{8} (81.40 + 73.64 + 62.35 + 80.73 + 81.98 + 60.67 + 76.31 + 82.02) \\ &= 74.89 \end{aligned} \quad (18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณหาค่าดัชนีความถูกต้องสีของแสงเฉพาะสี ของโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ค่า ดัชนีความถูกต้องสีของแสงเฉพาะสี  $R_i$  ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทดสอบหลอดแอลอีดี กำลังสูง 104 W จากตัวอย่างเฉพาะสีทดสอบ ( $R_i$ ) ทั้งหมด 8 สี

Test Colour	Test Source		
	HP-LED		
	$\Delta E_i$	$R_i$	%
1 (7.5R6/4)	4.0428	$R_1$	81.40
2 (5Y6/4)	5.7294	$R_2$	73.64
3 (5GY6/8)	8.1851	$R_3$	62.35
4 (2.5G6/6)	4.1884	$R_4$	80.73
5 (10BG6/4)	3.9171	$R_5$	81.98
6 (5PB6/8)	8.5489	$R_6$	60.67
7 (2.5P6/8)	5.1498	$R_7$	76.31
8 (10P6/8)	3.9088	$R_8$	82.02
HP-LED Source		$R_a$	74.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง  
การคำนวณค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การคำนวณค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาแนวทางการเปลี่ยนโคมไฟหลอดเซอเอ็มไอ 200 W เป็นหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W สำหรับนำมาใช้ในการจัดแสงภายในสตูดิโอ โดยผู้วิจัยได้วิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ของการลงทุนในเชิงเศรษฐศาสตร์ประกอบด้วย การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่านอมระยะเวลาคืนทุน (PBP) ผลตอบแทนสำหรับการลงทุนโดยวิธีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) และอัตราส่วนของผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน (B/C) โดยกำหนดให้มีอายุโครงการทั้งหมด 15 ปี กำหนดอัตราคิดลดเท่ากับ 0.8 ได้ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางที่ 1 และใช้สมมติฐานสำหรับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ที่แสดงดังตารางที่ 1 ต่อไปนี้

ตารางที่ 1 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

เศรษฐศาสตร์ วิศวกรรม	ช่วงเวลาคืนทุน (PBP)	7.74
	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)	60491
	อัตราผลตอบแทนจากเงินลงทุน (IRR)	9.70
	อัตราส่วนของผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน (B/C)	1.82

ขั้นตอนการศึกษาการคำนวณมูลค่าการลงทุนโครงการเปลี่ยนโคมไฟหลอดเซอเอ็มไอ 200 W เป็นหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) การคำนวณค่าไฟฟ้าตลอดโครงการ กำหนดให้มีชั่วโมงการใช้พลังงานไฟฟ้า 6 ชั่วโมงต่อวัน กำหนดให้ใช้งานตลอด 30 วัน สามารถคำนวณดังต่อไปนี้

#### กรณีโคมไฟหลอดเซอเอ็มไอ 200 W

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้า โคมไฟหลอดเซอเอ็มไอ 200 W} &= \frac{\text{กำลังไฟฟ้า (โคมไฟ+บาลาสต์)}}{1000} \\ &= \frac{200+20}{1000} \\ &= 0.220 \quad \text{kW/h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{พลังงานไฟฟ้า โคมไฟหลอดเซอเอ็มไอ 200 W} &= \text{กำลังไฟฟ้า (โคมไฟหลอดเซอเอ็มไอ 200 W)} \times \text{พลังงานไฟฟ้า 15 ปี} \\ &= (0.220 \text{ kW/h} \times 6 \text{ ชั่วโมง} \times 30 \text{ วัน} \times 12 \text{ เดือน} \times 15 \text{ ปี}) \\ &= 7,128 \quad \text{kW} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าไฟฟ้า โคมไฟหลอดเซรามิก 200 W 15 ปี = พลังงานไฟฟ้า (โคมไฟหลอดเซรามิก 200 W) 15 ปี × ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย

$$= 7,128 \text{ kW} \times 3.5 \quad \text{บาท}$$

$$= 24,948 \quad \text{บาท}$$

ค่าไฟฟ้า โคมไฟหลอดเซรามิก 200 W ต่อปี = ค่าไฟฟ้า (โคมไฟหลอดเซรามิก 200 W) 1 ปี

$$= \frac{24,948}{15}$$

$$= 1,663.2 \quad \text{บาท}$$

กรณีโคมไฟแอลอีดีกำลังสูง 104 W

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้า โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W} &= \frac{\text{กำลังไฟฟ้า (โคมไฟ)}}{1000} \\ &= \frac{104}{1000} \\ &= 0.104 \quad \text{kW/h} \end{aligned}$$

พลังงานไฟฟ้า โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W = กำลังไฟฟ้า (โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W) × พลังงานไฟฟ้า 15 ปี

$$= (0.104 \text{ kW/h} \times 6 \text{ ชั่วโมง} \times 30 \text{ วัน} \times 12 \text{ เดือน} \times 15 \text{ ปี})$$

$$= 3,369 \quad \text{kW}$$

ค่าไฟฟ้า โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W 15 ปี = ค่าไฟฟ้า (โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W) 15 ปี × ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย

$$= 3,369 \text{ kW} \times 3.5 \quad \text{บาท}$$

$$= 11,793 \quad \text{บาท}$$

ค่าไฟฟ้า โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W ต่อปี = ค่าไฟฟ้า (โคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W) / 15 ปี

$$= \frac{11,793}{15}$$

$$= 786.2 \quad \text{บาท}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นโครงการสำหรับการลงทุนเปลี่ยนหลอดไฟ

### 2.1) โคมไฟหลอดไฟเอชเอ็มไอ 200 W ประกอบด้วย

-ค่าลงทุนสำหรับการซื้อชุดโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ พร้อมหลอดไฟขนาด 200 W และบัลลาสต์ขนาด 20W มีมูลค่าการลงทุนปีเริ่มต้น รวม 81,600 บาท

-ค่าหลอดไฟเอชเอ็มไอ 200 W ที่ใช้ร่วมกับโคมไฟ โดยคุณสมบัติอายุการใช้งานของโคมไฟประมาณ 2,000 ชั่วโมง ประมาณเวลาการใช้งานเป็นจำนวน 1 ปี ที่ต้องดำเนินการเปลี่ยนหลอดจำนวน 2 หลอด ค่าหลอดไฟเอชเอ็มไอ 200 W มีมูลค่า 4,528 บาท ต่อ 1 หลอด รวมราคาเปลี่ยนหลอดไปคิดเป็นต่อปี มีมูลค่า 9,057 บาทต่อปี

### 2.2) โคมไฟหลอดไฟแอลอีดี 104 W ประกอบด้วย

-ค่าลงทุนสำหรับการซื้อชุดโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง พร้อมหลอดไฟ และอุปกรณ์ขั้ววงจรหลอดแอลอีดีกำลังสูงมีมูลค่าการลงทุนปีเริ่มต้น รวม 73,790 บาท

-ค่าอุปกรณ์วงจรขั้วหลอดแอลอีดีกำลังสูง 100W ที่ใช้ร่วมกับโคมไฟ โดยคุณสมบัติอายุการใช้งานของอุปกรณ์วงจรขั้วหลอดแอลอีดีกำลังสูง มีอายุประมาณ 4 ปี ที่จะต้องดำเนินการเปลี่ยน มีมูลค่า 2,000 บาท

## 3) คำนวณค่าการลงทุนโครงการสำหรับเปลี่ยนโคมไฟ

### กรณีโคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W

#### 3.1) คำนวณหาค่าการลงทุนค่าใช้จ่ายตลอดโครงการ (Cost Total, Ct)

$$\begin{aligned} \text{Ct โคมไฟหลอดเอชเอ็มไอ 200 W} &= [(\text{ค่าไฟฟ้า} \times 15 \text{ ปี} + (\text{ค่าหลอดไฟ 2 หลอด} \times \text{จำนวนปีที่เปลี่ยนหลอดไฟ})) \\ &= [(1,663.2 \times 15) + (4,528 \times 2) \times 15] \\ &= 160,788 \text{ บาท} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 3.2) \text{ คำนวณหาค่าการลงทุนค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อปี} &= \frac{160,788}{15} \\ &= 10,719 \text{ บาท} \end{aligned}$$

### กรณีโคมไฟหลอดแอลอีดีกำลังสูง 104 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.3) คำนวณหาค่าการลงทุนค่าใช้จ่ายตลอดโครงการ (Cost Total, Ct)

$$\begin{aligned} \text{Ct โคมไฟแอลอีดีกำลังสูง 104 W} &= [(\text{ค่าไฟฟ้า} \times 15 \text{ ปี}) + (\text{ค่าอุปกรณ์วงจรขับหลอดแอลอีดีกำลังสูง} \times \\ &\quad \text{จำนวนปีที่เปลี่ยนอุปกรณ์วงจรขับหลอดแอลอีดีกำลังสูง})] \\ &= [(786.2 \times 15) + (2,000 \times 3)] \\ &= 17,793 \quad \text{บาท} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 3.4) \text{ คำนวณหาค่าการลงทุนค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อปี} &= \frac{17,795}{15} \\ &= 1,186 \quad \text{บาท} \end{aligned}$$

ดังนั้น ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี = ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยโคมไฟ HMI - HP-LED

$$\begin{aligned} \text{ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี} &= 10,719 - 1,186 \\ &= 9,535 \quad \text{บาท} \end{aligned}$$

4) ตัวอย่างการคำนวณอัตราคิดลดของอัตราดอกเบี้ยตามระยะเวลา (Single Payments, Compound Amount)  $i_n$  ของการลงทุนโครงการสำหรับการลงทุนเปลี่ยนหลอดไฟ

4.1) อัตราคิดลดของอัตราดอกเบี้ยตามระยะเวลา ปีที่ 1

$$\begin{aligned} i_n &= (1+i_0)^n \\ i_1 &= (1+0.008)^1 \\ &= 1.008 \end{aligned}$$

4.2) อัตราคิดลดของอัตราดอกเบี้ยตามระยะเวลา ปีที่ 15

$$\begin{aligned} i_n &= (1+i_0)^n \\ i_{15} &= (1+0.008)^{15} \\ &= 1.127 \end{aligned}$$

5) ตัวอย่างการคำนวณมูลค่าเงิน ณ ปัจจุบันตามระยะเวลาของการลงทุนโครงการสำหรับการลงทุนเปลี่ยนหลอดไฟ

5.1) มูลค่าเงิน ณ ปัจจุบันตามระยะเวลา ปีที่ 1

$$PV = \frac{\text{ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี}}{\text{อัตราคิดลดตามระยะเวลา}}$$

$$PV = \frac{9,535}{1.008}$$

$$= 9,459 \text{ บาท}$$

5.2) มูลค่าเงิน ณ ปัจจุบัน ตามระยะเวลา ปีที่ 15

$$PV = \frac{\text{ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี}}{\text{อัตราคิดลดตามระยะเวลา}}$$

$$PV = \frac{9,535}{1.127}$$

$$= 8,460 \text{ บาท}$$

ตารางที่ 2 ค่าพื้นฐานทางเศรษฐศาสตร์โครงการเปลี่ยนโคมไฟ HMI 200 W เป็น HP-LED 104 W

ประเภทของเงิน	ปีที่ (n)	กระแสเงินสดของโครงการ (บาท)	อัตราผลตอบแทน (i)	อัตราคิดลดตามระยะเวลา	มูลค่า ณ ปัจจุบัน
Cast Flow Out	0	มูลค่าปัจจุบันรวมของเงิน	-	-	-73,790
Cast Flow In	1	ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี	0.008	1.008	9,459
	2	ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี	0.008	1.016	9,384
	3	ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี	0.008	1.024	9,309
	4	ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี	0.008	1.032	9,235
	5	ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี	0.008	1.041	9,162
	6	ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี	0.008	1.049	9,089
	7	ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี	0.008	1.057	9,017
	8	ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี	0.008	1.066	8,946
	9	ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี	0.008	1.074	8,875
	10	ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี	0.008	1.083	8,804
	11	ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี	0.008	1.092	8,734
	12	ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี	0.008	1.100	8,665
	13	ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี	0.008	1.109	8,596
	14	ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี	0.008	1.118	8,528
	15	ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี	0.008	1.127	8,460
		ผลรวมประโยชน์สุทธิเฉลี่ย			134,271.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณช่วงเวลาคืนทุน (Payback Period; *PBP*) โดยทั่วไปช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดำเนินโครงการ คือ 5-8 ปี สามารถคำนวณหาค่าได้ ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ช่วงเวลาคืนทุน (PBP)} &= \frac{\text{การลงทุนเริ่มต้นของชุดคอมพิวเตอร์กำลังสูง}}{\text{ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี}} \\ &= \frac{73,790}{9,535} \\ &= 7.74 \quad \text{ปี} \end{aligned}$$

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; *NPV*) โดยทั่วไปค่าที่ได้ควรเป็น บวก หมายถึงจะคุ้มค่าต่อการลงทุน สามารถคำนวณหาค่าได้ ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น มูลค่าปัจจุบัน (NPV)} &= \text{ผลรวมผลประโยชน์สุทธิต่อปี ณ มูลค่าปัจจุบัน} - \text{ค่าใช้จ่ายเริ่มต้น} \\ &= [(9,459+9,384+9,309+9,235+9,162+9,089+9,017+8,946+ \\ &\quad 8,875+8,804+8,734+8,665+8,596+8,528+8,460)-73,790] \\ &= 134,271-73,790 \\ &= 60,491 \quad \text{บาท} \end{aligned}$$

อัตราผลตอบแทนจากเงินลงทุน (Internal Rate of Return; *IRR*) อัตราค่าที่เหมาะสมต่อการลงทุนคือ มากกว่าหรือเท่ากับ 10 % สามารถคำนวณหาค่าได้ดังต่อไปนี้

- *IRR* เป็น อัตราดอกเบี้ยที่ทำให้

$$\begin{aligned} \text{ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี} &= \text{มูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุนจ่าย หรือ} \\ &NPV = 0 \end{aligned}$$

- วิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error) โดยการสมมติค่า  $k$  ขึ้นมา 1 ค่า แล้วแทนค่า  $k$  เพื่อหาค่า  $NPV$  เมื่อใดได้ค่า  $NPV = 0$  จะได้ว่าค่า  $k$  นั้นคือค่า  $IRR$

- หาก  $NPV$  มีค่ามากกว่า 0 หรือเป็น บวก ต้องลองต่อไป โดยเพิ่มค่า  $k$  ให้สูงขึ้น จนกระทั่งได้  $NPV$  เข้าใกล้ 0

- หาก  $NPV$  มีค่าน้อยกว่า 0 หรือเป็น ลบ ต้องลองต่อไป โดยลดค่า  $k$  ให้ต่ำลง จนกระทั่งได้  $NPV$  เข้าใกล้ 0

ดังนั้น สำหรับงานวิจัยนี้พบว่า กระแสเงินสดรับของโครงการ กรณีผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี (*PVCI*) มีลักษณะเป็น เงินงวด (Annuity) หรือ มีค่าเท่ากันทุกปี และกรณีค่ากระแสเงินสด มูลค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันรวมของเงินลงทุนจ่าย (PVCO) แสดงดังตารางที่ 2 ทำให้การคำนวณ IRR ทำได้ง่าย สะดวก และรวดเร็วมากขึ้นดังต่อไปนี้

หาค่า  $k$  ที่ทำให้  $PVCI = PVCO$

$$9,535(PVIFA k\%,15) = 73,790$$

$$PVIFA k\%15 = \frac{73,790}{9,535}$$

$$= 7.7388$$

เปิดตารางอัตราดอกเบี้ย (Discrete Cash Flow: Compound Interest Factors) ปีที่ ( $n$ ) เท่ากับ 15 และดูค่าระบบจ่ายเป็นอนุกรมแบบค่าเงินต้นทุนปัจจุบัน (Uniform Series Payments, Present Worth ( $P/A$ )) ในตารางให้ได้ค่าใกล้เคียง 7.7388 จะได้ค่า  $k$  ประมาณ ดังต่อไปนี้

กรณีที่  $k$  อัตราดอกเบี้ย 9% ระยะเวลา 15 ปี มีค่าเงินต้นทุนปัจจุบัน 8.0607

กรณีที่  $k$  อัตราดอกเบี้ย 10% ระยะเวลา 15 ปี มีค่าเงินต้นทุนปัจจุบัน 7.6061

คำนวณหาค่าอัตราดอกเบี้ยที่แท้จริง จากข้อมูลอัตราดอกเบี้ยที่เปิดจากตารางของ 9% และ 10% โดยใช้เทคนิคประมาณค่าในช่วง (Interpolation) ดังต่อไปนี้

หาค่าส่วนต่าง อัตราดอกเบี้ย ค่าเงินต้นทุนปัจจุบัน

9% 8.0607

x 7.7388

10% 7.6061

จับส่วนต่างนำมาเข้าสมการที่เท่ากัน

$$\frac{9-x}{9-10} = \frac{8.0607-7.7388}{8.0607-7.6061}$$

$$\frac{9-x}{-1} = \frac{0.3219}{0.4546}$$

$$9-x = -0.70809$$

$$-1 = 0.4546$$

$$\frac{9-x}{-1} = 0.70809$$

$$-1$$

$$9-x = -0.70809$$

$$x = 9.708 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นอัตราดอกเบี้ยของโครงการนี้มีค่า 9.708 % ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณโดยเข้าสู่สูตร *IRR* บนโปรแกรม Excel เช่นกัน

อัตราส่วนของผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน (Benefit Cost Ratio; *B/C*) เรียกว่า ดัชนีชี้กำไร อัตราค่าเหมาะสมต่อการลงทุนคือ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 % สามารถคำนวณได้ดังสมการที่

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ดัชนีชี้กำไร (B/C)} &= \frac{\text{ผลรวมประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี (PVCI)}}{\text{มูลค่าปัจจุบันรวมของเงินลงทุนจ่าย (PVCO)}} \\ &= \frac{134,271.87}{73,790} \\ &= 1.82 \end{aligned}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก จ**  
**บทความทางวิชาการ**

- จ.1 “Performance Comparison between High Power Light-Emitting Diode (HP-LED) and Hydrargyrum Medium-Arc Iodide (HMI) in Studio Lighting System”, Annual Conference on Engineering & Information Technology 2014 (ACEAIT 2014), Tokyo Japan, 28-30 March 2014
- จ.2 “Lighting Distribution Comparison between High Power Light-Emitting Diode (HP-LED) and Hydrargyrum Medium-Arc Iodide (HMI) in Studio Lighting System”, International Congress on Engineering and Information 2014 (ICEAI 2014), Beijing China, 22-24 May 2014
- จ.3 “Reference Illuminant Selection Study between High Power LED and HMI Luminaries in Studio Lighting Application for CRI Calculations”, Annual Conference on Engineering & Information Technology 2015 (ACEAIT 2015), Osaka Japan, 28-30 March 2014
- จ.4 “Engineering Economic Analysis between High Power LED and Hydrargyrum Medium-Arc Iodide Luminaries In Studio Lighting Application”, The 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2015), Pattaya, 25-28 Oct 2015
- จ.5 “Optical and Electrical Performance Comparisons between High Power LED and HMI Studio Lighting including the Engineering Economics analysis”, Journal of the Chinese Institute of Engineers (JCIE) vol. 40, NO 4, 318–328, published online: 16 Apr 2017.

# Conference Proceedings



**ACEAIT**

Annual Conference on Engineering and Information Technology

**ISFAS**

International Symposium on Fundamental and Applied Sciences

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ACEAIT-3081**  
**Performance Comparison between High Power Light-Emitting Diode (HP-LED) and Hydrargyrum Medium-Arc Iodide (HMI) in Studio Lighting System**

**Chow Chompoo-Inwai<sup>a</sup> and Jirasak Prechaveerakul<sup>a\*</sup>**

<sup>a</sup>Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, THAILAND, 10520

\*Corresponding Author: [jirasaod@hotmail.com](mailto:jirasaod@hotmail.com), [chompoo@gmail.com](mailto:chompoo@gmail.com)

**Abstract**

High power light-emitting diode (HP-LED) lamps and luminaires have become more and more popular to use as replacements for the traditional Hydrargyrum medium-arc iodide (HMI) lamps and luminaires in many modern designs of studio lighting systems. This paper presents the intensive performance comparison results of the two commercially-used lighting in studio luminaires. The first one is the traditional and old-fashioned HMI luminaires that has long been used in studio lighting design for quite sometimes. The latter is the newly-and-rapid-growth HP-LED luminaires used in the same application. Including in this paper is the basis and advanced analysis between the differences and the likes in studio lighting calculation methodology and design. The next step is to set up the experiment in the actual studio environment. All of the measuring devices and test configuration were set according to both lighting in studio and Illuminating Engineering Society of North America Standard (IESNA). The performance comparisons shown in this paper comprise of three major parts: (1) the lighting distribution parameters i.e. total luminous flux (lumen), color temperature (K), illuminance (Lux), luminous intensity (Candela) and lighting beam spread (Spot/Flood in degree), (2) the principle electrical characteristic (Volt: V, Current: I, Real Power: P, Reactive Power: Q, Apparent Power: S and Power Factor) and (3) the power quality parameters (%THDi, %THDv). The test configurations and intensive experimental results are thoroughly elaborated in this article. In conclusion, it can clearly be seen from the experimental and analysis results that the HP-LED luminaires has a very high potential to be used as replacements for the old-fashioned HMI luminaires in all aspects. The HP-LED one yields the comparable luminous flux and intensity to the HMI luminaires. The HP-LED one has better control for the lighting output beam-spread and color temperature. The HP-LED one consumes significantly less power compared to the HMI one. The HP-LED one also has better tendency to have a better power quality.

Keywords: Performance comparisons, Illuminance, Power quality, High Power Light-Emitting Diode(HP-LED), Hydrargyrum Medium-Arc Iodide (HMI)

## I. Introduction

Over the past years, mass media have used a vast amount of electricity, especially in studio-lighting-relevant applications and utilizations. These media include entertainment industries such as television and film. Their extended and continuous productions consume a lot of electrical energy in lighting for background, stage, and actors. Natural light is simply insufficient for this specific purpose. That is why lighting in studios is so important in this sense. Nowadays, a studio lighting system (SLS) in Thailand mainly utilizes the traditional Hydrargyrum Medium-Arc Iodide (HMI) lamp/luminaire for both indoor and outdoor applications. In today's studio lighting systems, High Power Light-Emitting Diode (HP-LED) lamp/luminaire is becoming more and more popular to be used as a replacement for the traditional and quite-old-fashioned HMI ones. For instance, an HP-LED luminaire which consumed around 100 watt of electricity has been reputed to put out the same amount of light as the traditional compact HMI luminaire does, which consumed around 200 watt. The HP-LED luminaire also has a very high potential to be very energy-efficient, more durable, dimmable, and temperature-control.

## II. Related Definitions and Theories

### 2.1 Basic Illuminance Calculating Comparisons [1]

The illuminance ( $E$ :  $Lux$ ) is a measure of photometric flux per unit area, or visible flux density. In other words, illuminance is a measure of the light falling on a working plane as shown in Fig.1. Illuminance can be measured in the unit of either  $Lux$  ( $lumen/m^2$ ) or  $Foot-candles$  ( $lumen/ft^2$ ). In general engineering design, the illuminance can simply be calculated using Equation (1).

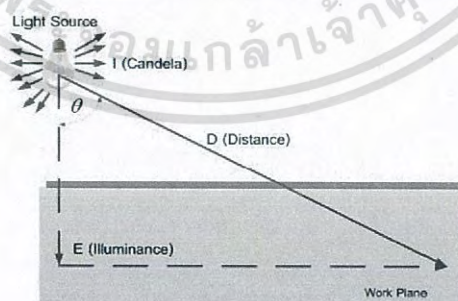


Fig.1 The fundamental of illuminance computation method in engineering

$$E = \frac{I \times \cos\theta}{D^2} \quad (1)$$

Where  $I$  is the amount of visible power per unit solid angle, measured in Candelas (Cd or lm/sr),  $\theta$  is angle between the light axis of the light beam and the vertical axis of the work plan,  $D$  is distance between point of the light to work plan in meter (m). Therefore, the illuminance of the lighting for each point can be computed based on the aforementioned figure and equation in studio lighting system. Most measurements assume that the light is directly on vertical axis from the source, the incident illuminance level will then be calculated as  $E = I/D^2$ . This principle is a general uses for illumination engineering design in many illumination applications.

Apart from that, Studio-lighting-designed engineers apply another rule for lighting calculation called *Studio-Lighting-the-Subject* rule. The example shown in Fig.2 clearly elaborates the *Studio-Lighting-the-Subject* idea and concept. It can be seen that the angle of incidence (cosine law) also affects the light level, where  $T$  is the distance between the light source to a working plan in meter (m),  $d$  is the horizontal distance in meter (m),  $H$  is the height of the luminaire above the floor level in meter (m) and  $Y$  is the subject height in meter (m) [2]. Equations (2) and (3) represent how to compute the illuminance of the interested area in studio lighting calculation. Equation (4) is the final formulation for the studio lighting calculation.

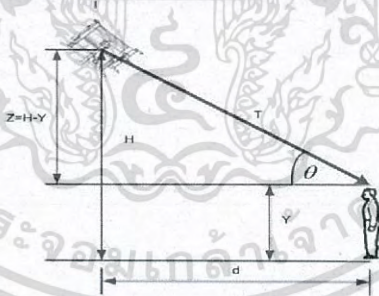


Fig.2 *Studio-Lighting-the-Subject* principle

$$\text{Throw } (T) = \sqrt{d^2 + (H - Y)^2} \text{ and } \cos\theta = \frac{d}{T} \quad (2)$$

Incident light level is given by

$$\frac{I \text{ (Candela)}}{\text{Throw}^2} \times \frac{\text{distance } (d)}{\text{Throw } (T)} = \frac{I \cdot d}{T^3} \quad (3)$$

It can then be rewritten as

$$E = \frac{I \times d}{T^3} \quad (4)$$

From the experiments and analysis, we found out that the two methods: Equation (1) and Equation (4) yield the same results for illuminance computation.

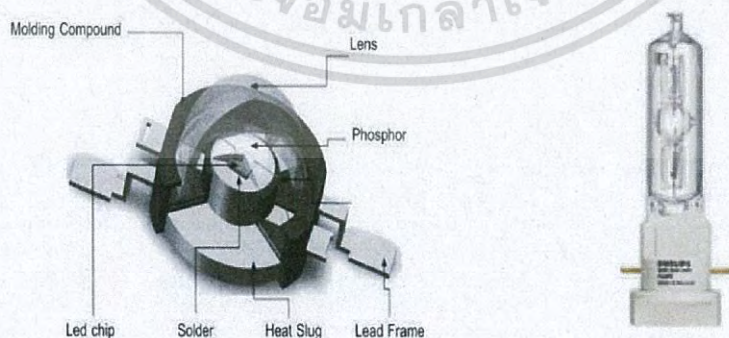
## 2.2 Power Quality[3-5]

The IEEE-1159 Standard defines power quality as the concept of powering and grounding sensitive electronic equipment in a manner suitable for the equipment. This paper is focusing on the influencing power quality factor caused by the HP-LED and the HMI in terms of Power factor (PF) and Percentage of Total Harmonics Distortion (THD) in current and voltage. Power factor (PF) is defined as the ratio between the real power (P: watt) and the apparent power (S: VA), and can be expressed either as a decimal value or as a percentage. The total harmonics distortion (%THD) is a commonly used power quality index to quantify the distortion of a waveform. It is also defined as the relative signal energy present at non fundamental frequencies [5]. It can be derived as shown in Equation (5).

$$\%THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n V_i^2}}{V_1} \times 100 \quad \text{and} \quad \%THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_i^2}}{I_1} \times 100, \quad \text{where } i = 2, 3, 4, \dots, n \quad (5)$$

## 2.3 High Power Light Emitting Diode (HP-LED) [6]

HP-LED are energy efficient light sources for the new generation illumination system design. The basic composition structures of HP-LED usually includes molding compound, lens, phosphor, gold wire, led chip, solder, heat slug and lead frame. Figure 3(a) illustrates the cross-section structure of modern HP-LED package.



- (a) Cross-section structure of modern HP-LED package      (b) Hydrargyrum medium-arc iodide (HMI)

Fig.3 Examples of the light sources mentioned in this paper

#### 2.4 Hydrargyrum Medium-Arc Iodide (HMI) [7-8]

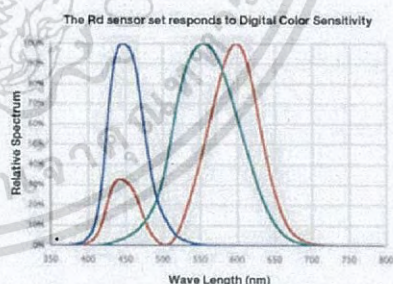
The first HMI lamp was initially and commercially developed by OSRAM™ in the late 1960s. An HMI lamp shown in Fig.3(b) uses mercury vapors mixed with metal halides in a quartz-glass envelope, with tungsten electrodes of medium-arc separation. HMI lamp bulbs usually need magnetic or electronic ballasts to help in starting/operating process. Multi-kilowatt HMI luminaires have been widely used in the film industry and for large-screen slide projection design because of their high illuminance lighting output, efficiency, high color rendering index (CRI) and good daylight-balanced output.

#### 2.5 The Illuminance and color temperature measuring device [9]

In this research, the Sekonic Prodigy Color C-500 shown in Fig. 4(a) has been mainly used in most of the experiments mentioned later in the next section in this paper. For Illuminance measurement, the brightness of continuous light sources is displayed in LUX (lx) or Foot-Candle (FC). Illuminance measurement is especially useful for cinematography, videography, theatrical and other applications. For Color Temperature (Kelvin), the color temperature can be measured for human visual response in Digital Mode or the spectral response e.g. shown in Fig. 4(b).



(a) Sekonic Prodigy Color C-500



(b) Digital mode color compatibility

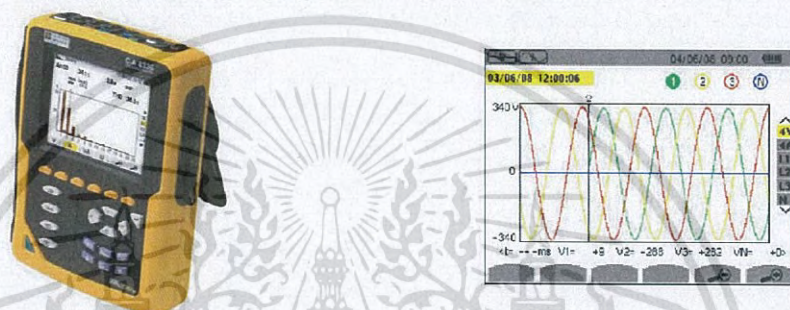
Fig.4 Illuminance measuring device mainly used in this research

#### 2.6 Power Quality Analyzer used in this paper [10]

In this research the power quality analyzer: Chauvin Arnoux, model: C.A. 8335 (shown in Fig.5) is used to make measurements and analysis of all the electric power quality parameters. The C.A. 8335 is a three-phase analyzer for AC&DC 1000 V<sub>RMS</sub> category

III or 600 V<sub>RMS</sub> category IV (according to IEC 61010-1). It can provide an instant image of the main characteristics of an interested system. The uncertainty of the CA 8335 is better than 1%. In addition, it provides great flexibility with a choice of different sensors to measure from hundreds of milliamps to several kilo amps.

It is perfect fit for measuring the continuous values of *voltages* and *currents* (neutral included), *Active*, *Reactive* and *Apparent power* by phase and cumulative. It is also capable of measuring the current and voltage harmonics distortion up to 50<sup>th</sup> order.



(a) Chauvin Arnoux C.A. 8335

(b) A sample display of measuring

Fig.5 Power quality analyzer: Chauvin Arnoux C.A. 8335

## 2.7 Fresnel Luminaires for studio lighting of interested in this research

Fresnel types of luminaires are the workhorses of stage lighting and the most common luminaire (light) used on stage and in studio. They are called a 'Fresnel' because they use a 'Fresnel' lens recognized by the characteristic 'stepped' molding on one face and the texturing on the other, named after its designer, *Augustin Fresnel*. This Fresnel lens produces a very even light that is soft at the edges and tends to project a soft shadow. Because the edge of the light is soft, it is not absolutely precise and will blend easily with the edges of other Fresnel to give smooth stage coverage. The beam is a cone of light so the size of your lit area increases as the throw distance from the Fresnel to that area increases. However, the beam angle of this light cone can be altered by a focus knob that changes the distance between the lamp and the lens. As the lamp (with its reflector) is moved towards the lens, the beam becomes wider, and as it moves away from the lens, the beam becomes narrower. The examples of the Fresnel types of luminaires for studio lighting system are shown in Fig.6(a) and 6(b). The example of the beam specification of such luminaires is also shown in Fig.6(c).

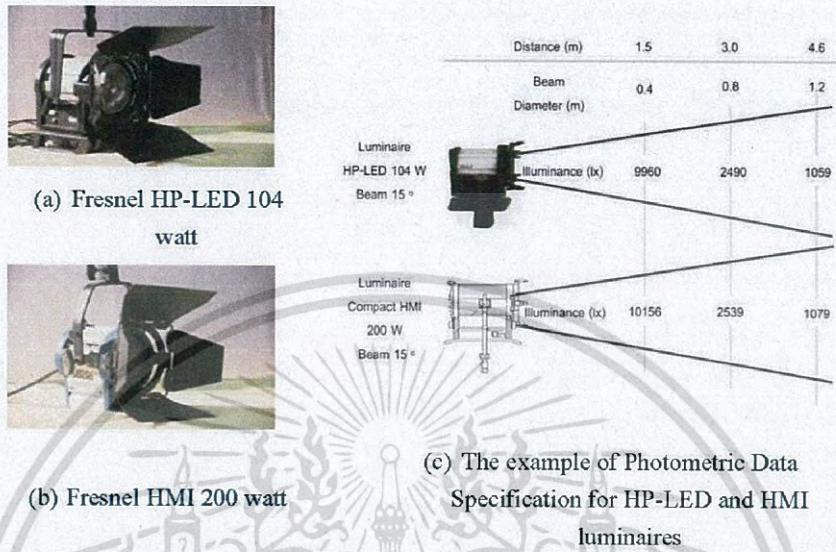


Fig.6 Fresnel HP-LED and HMI luminaires and their specifications used in this research

**III. Test Set up and Configurations**

**3.1 Test configurations for lighting distribution parameters**

This test was set up in the real photographing studio; the dimension of the studio under the tested is 9x8x11 (WxLxH) meters. The nature of interior of this kind of studio is that it has to be decorated with all black materials, walls and textures. There should be zero to none natural light from the Sun penetrating into this studio. In this set up, both luminaires (HP-LED and HMI) were hung at the height of 2.8 meter above the tested working plane (aiming at the face of the model in this set up, see Fig.7. The distance between the light sources and the model were set up at 1.5, 3.0 and 4.6 meters, respectively as exactly in the data specification shown in Fig.7. Illuminance measurements were manually carried out using Sekonic Prodigy Color C-500 illuminance meter. Figure 7 illustrates how this test configuration was done.

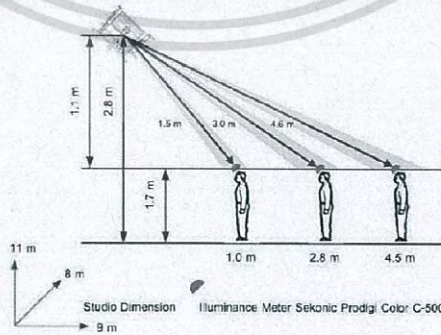


Fig.7 Test configurations for lighting distribution parameters

### 3.2 Test configurations for electrical and power quality parameters

This experiment set up as shown in Fig.8. The electrical loads in this case are the commercial HP-LED104 watt and the compact HMI 200 watt luminaires. The reference measuring unit is the Chauvin Arnoux C.A. 8335 power quality analyzer. Before the data measuring process, both luminaires were ignited to operate at their maximum rated power for half an hour. The incoming power source comes from the normal outlet but through the voltage stabilizer for more reliable data.

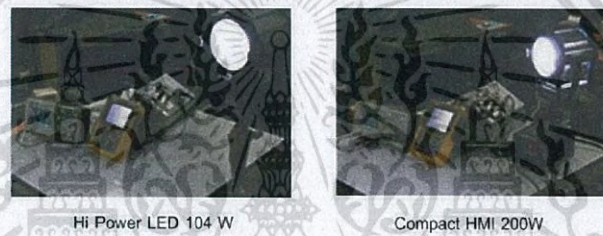


Fig.8 Test configurations for electrical and power quality parameters

## IV. Experimental Results

### 4.1 Experimental Results for beam measuring and Lighting parameters

This experiment set up is as described in section 3.1. The aperture of both HP-LED and compact HMI luminaires were set to be a Spot mode ( $15^\circ$ ). The experimental results of comparisons can be illustrated in Fig.9 and in Table I.

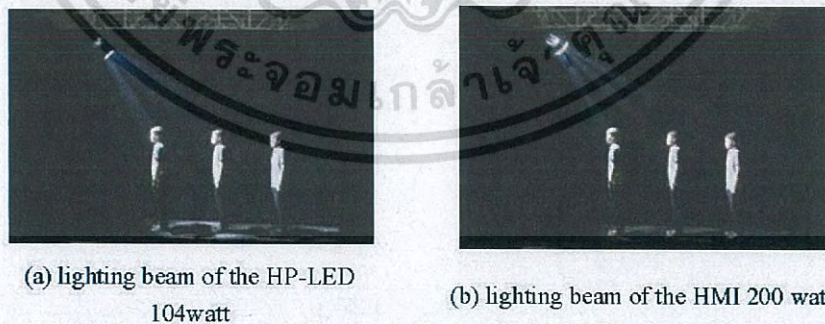


Fig.9 Beam lighting of both luminaires in this experimental set ups

Table I Experimental Comparison Results of lighting distribution parameters between specification data versus measuring data

Type	Throw (m)	Angle of measuring area to the light source	Luminous Flux (lm)		Color Temperature (K)		Illuminance (lux)		Luminous Intensity (cd)		Efficacy (lm/watt)
			Spec.	Measurement	Spec.	Measurement	Spec.	Measurement	Spec.	Measurement	
HP-LED 104	1.5	perpend	10,70	10,38	5,300	5,330	9,960	9,650	22,41	21,71	99.83
	3.0	perpend	10,70	10,57	5,300	5,380	2,490	2,460	22,41	22,14	101.6
	4.6	perpend	10,70	10,84	5,300	5,370	1,059	1,100	22,41	23,27	104.2
HMI 200 W	1.5	perpend	10,93	10,74	5,200	5,230	10,15	9,988	22,85	22,47	53.73
	3.0	perpend	10,93	10,74	5,200	5,270	2,539	2,500	22,85	22,50	53.71
	4.6	perpend	10,93	10,84	5,200	5,240	1,079	1,100	22,85	23,27	54.21

It can be seen from the experimental results in Fig.9 that although; we had set both luminaires in spot mode at 15°, the beam of both luminaires are quite different. The lighting beam of the HP-LED has diffusing manner. On the other hand, the traditional compact HMI beam is quite narrow and more focus. The results from *Table I* illustrate that the two luminaires (from specification and from the experiment in the laboratory) have almost identical lighting distributions in terms of luminous flux (lm), color temperature (K), illuminance (lux) and luminous intensity (cd). One interesting point that should be mentioned here is that the HP-LED consumed significantly less power. This directly affects each luminaire efficacy (lm/watt) as can be seen from the last column of *Table I*.

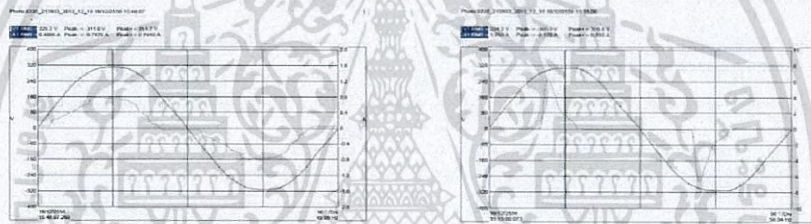
#### 4.2 Experimental Results for Electrical characteristics and Power quality

After the test set up mentioned in Section 3.2, the experimental results are shown in *Table II* and *Fig.10-12*. *Table II* presents the numerical results in terms of both electrical and power quality parameters from the experiments. *Fig.10* illustrates the voltage and current waveforms of both HP-LED versus the compact HMI. *Fig.11* shows the spectrum analysis of voltage harmonics distortion waveforms. *Fig.12* presents the spectrum analysis of current harmonics distortion waveforms.

Table II The Experimental Results of Electrical Power and Power Quality Parameters

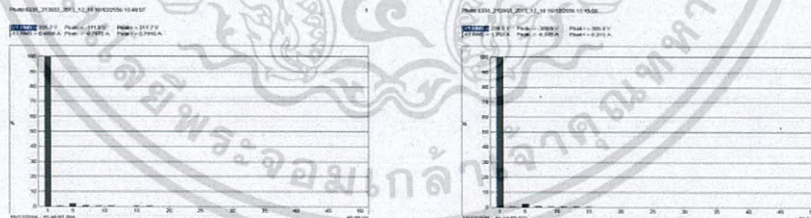
Luminaire	Electrical Characteristics						Power Quality Parameters	
	Voltage (V)	Current (A)	Apparent Power (VA)	Real Power (Watt)	Reactive Power (VAR)	PF	THD <sub>v</sub> (%)	THD <sub>i</sub> (%)
HP-LED	225.2*	0.480*	109.6*	103.5*	-36.2*	0.944*	2.2*	30*
Compact HMI	224.3*	1.763*	393.7*	214.6*	-330*	0.545*	2.2*	140*

\*Actual real-time measuring data recorded from Chauvin Arnoux C.A. 8335 power analyzer shown in Fig.5



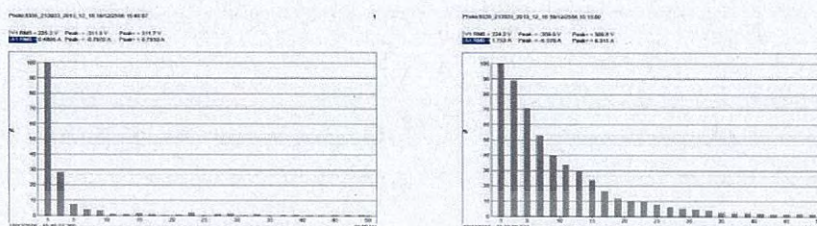
(a): HP-LED 104 W (b): Compact HMI 200 W

Fig.10 Voltage and Current waveform



(a): HP-LED 104 W (b): Compact HMI 200 W

Fig.11 Voltage Harmonics Distortion Spectrum (THD<sub>v</sub>)



(a): HP-LED 104 W

(b): Compact HMI 200 W

Fig.12 Current Harmonics Distortion Spectrum ( $THD_i$ )

The experimental results clearly illustrate that in terms of the electrical characteristics, the more-modern HP-LED luminaires consumed approximately half of a power required by the traditional compact HMI luminaires. The HP-LED also yield power factor much closer to unity than the compact HMI one. In term of the power quality parameters, the HP-LED luminaire yields the similar result as the compact HMI one for percentage of  $THD_v$ . In dissimilar, the HP-LED one shows much less percentage of  $THD_i$  than the compact HMI one. For this aspect only, the utility grid would be much more appreciate when the HP-LED one will be used more and more in any system.

### V. Conclusion

This paper presented the performance comparisons between HP-LED and compact HMI mainly in studio lighting application. Three key experimental results clearly illustrated that (1) for lighting parameters i.e. total luminous flux, color temperature, illuminance, luminous intensity and lighting beam spread, both HP-LED and compact HMI are comparable and replaceable, (2) for electrical characteristics, the HP-LED outperformed the compact HMI by far and (3) for power quality aspect; the HP-LED power factor is very close to unity, the HP-LED also contributes much less percentages of current harmonics distortion ( $THD_i$ ) to the utility system. It can be simply concluded here that the more-modern HP-LED tends to have a bright future for studio lighting in the near future to come.

### Acknowledgment

The authors would like to thank all the Energy System and Illumination Engineering Research Center (ESIRC) team members of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) for providing a big help and valuable suggestions and recommendations in this research. The Faculty of Mass Communication of Technology Rajamangala University of Technology Thanyaburi for sponsorship and strong support

this work. The DseThailandCo.,Ltd and Lek Lighting Equipment Co.,Ltdfor most of the equipment support.

#### References

- [1] J.R. Coaton and A.M. Marsden, *Lamps and Lighting*, 4<sup>th</sup> Edition, New York: Routledge, 2011.
- [2] Brian Fitt and Joe Thornley, *Lighting Technology a Guide For The Entertainment Industry*, 2<sup>nd</sup> Edition, Great Britain: Focal Press, 2002.
- [3] C. Sankaran, *Power quality*, Florida: CRC Press, 2002.
- [4] Rana A. Jabbar, M. Al-Dabbagh, Azah Muhammad, R. H. Khawaja, M. Akmal and M. RehanArif. "Impact of Compact Fluorescent Lamp on Power Quality," *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC-08)*, pp.1-5, 2008.
- [5] IEEE 1159-2009 Std., "IEEE recommended practice for monitoring electric power quality".
- [6] Sheng Liu and Xiaobing Luo, *LED Packaging For Lightings Applications*, Fusionopolis, SGP: John Wiley & Sons (Asia), 2011.
- [7] J. Jackman, *Lighting For Digital Video and Television*, 3<sup>rd</sup> Edition, Chennai, CHN: Focal Press, 2010.
- [8] Sally Debonnaire and Adrian Poole, "TV Low Energy Lighting Guide for TV Productions", British Broadcasting Corporation (BBC) Tech. Report, Sept. 2011.
- [9] *Sekonic Operating Manual: Prodigy Color C-500R/C-500*, Tokyo, 2007.
- [10] *Power & Quality Analyzer: C.A 8335*, Chauvin Arnoux Group, Maidenhead, 2011.

# Conference Proceedings



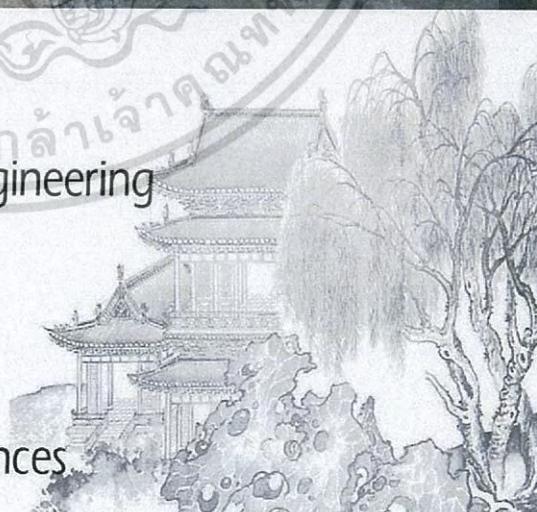
北京 Beijing, China 2014

## ICEAI

International Congress on Engineering  
and Information

## ISEANS

International Symposium on  
Engineering and Natural Sciences



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ICEAI-596

**u.3 Lighting Distributions Comparison between High Power Light-Emitting Diode (HP-LED) and Hydrargyrum Medium-Arc Iodide (HMI) in Studio Lighting System**

Jirasak Prechaveerakul

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

[jirasaod@hotmail.com](mailto:jirasaod@hotmail.com)

Chow Chompoo-Inwai

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

[chompoo@gmail.com](mailto:chompoo@gmail.com)

**ABSTRACT**

This paper presents the experimental comparison results of the two commercially-used luminaires in studio lighting at two beam spreads which are Spot 15 degree and Flood 50 degree. The first one is the traditional and old-fashioned Hydrargyrum medium-arc iodide (HMI) luminaire with electromagnetic ballast that has long been used in studio lighting design for quite sometimes. The latter is the newly-and-rapid-growth High power light-emitting diode (HP-LED) luminaire with electronic driver used in the same application. The experimental comparisons comprise of three major parts which are the most important key factors in studio lighting system design : (1) Basic lighting parameters i.e. total luminous flux (Lumen), illuminance (Lux), luminous intensity (Candela), and lighting beam spread (Spot/Flood in degree) experimented by goniophotometer, (2) Lighting Distributions i.e. Iso-intensity curve, Iso-lux curve and Polar curve, (3) The electrical and power quality characteristics (Volt: V, Current: I, Real Power: P, Reactive Power: Q, Apparent Power: S and Power Factor and Power Quality parameters %THDi, %THDv) measured by power quality analyzer. In conclusion, it can clearly be seen from the experimental and analysis results that the HP-LED luminaire has a very high potential to be used as replacements for the old-fashioned HMI luminaire in all aspects. The HP-LED one yields the comparable luminous flux and intensity to the HMI luminaire. The HP-LED has better control for the lighting output beam-spread. The HP-LED consumes significantly less power compared to the HMI. The HP-LED also has better tendency to have a better power quality.

**Keywords:** Basic lighting parameters, Lighting distributions, Electrical characteristics, High Power Light-Emitting Diode (HP-LED), Hydrargyrum Medium-Arc iodide (HMI)

## I. INTRODUCTION

Over the past years, mass media have used a vast amount of electricity, especially in studio-lighting-relevant applications and utilizations. These media include entertainment industries such as television and film. Their extended and continuous productions consume a lot of electrical energy in lighting for background, stage, and actors. Natural light is simply insufficient for this specific purpose. That is why lighting in studios is so important in this sense. Nowadays, a studio lighting system (SLS) in Thailand mainly utilizes the traditional Hydrargyrum Medium-Arc Iodide (HMI) lamp/luminaire for both indoor and outdoor applications. In today's studio lighting systems, High Power Light-Emitting Diode (HP-LED) lamp/luminaire is becoming more and more popular to be used as a replacement for the traditional and quite-old-fashioned HMI ones. For instance, an HP-LED luminaire which consumed around 100 watt of electricity has been reputed to put out the same amount of light as the traditional compact HMI luminaire does, which consumed around 200 watt. The HP-LED luminaire also has a very high potential to be very energy-efficient, more durable, dimmable, and temperature-control. [1]

## II. RELATED DEFINITIONS AND THEORIES

### 2.1 Basic Lighting distributions [2]

The luminaire's lighting distribution can be measured on several C-planes around the luminaire, at any resolution of interval. First measurement plane ( $C = 0^\circ$ ) is across the lamps' longitudinal axis, and can be seen in fig 1.  $\gamma$ -angles several angles are measured, at least every 5 degree. Fig.1 show the diagram contains the illuminances directly under the luminaire. The distance from the luminaire is stated on the vertical axis and the horizontal distance from the luminaire's centre, on the horizontal axis. The illuminance at each co-ordinate on the horizontal plane is stated in lux (lx) at each intersection.

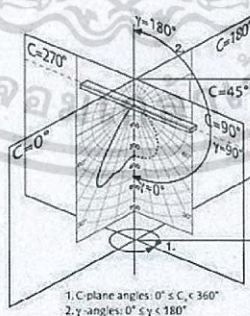


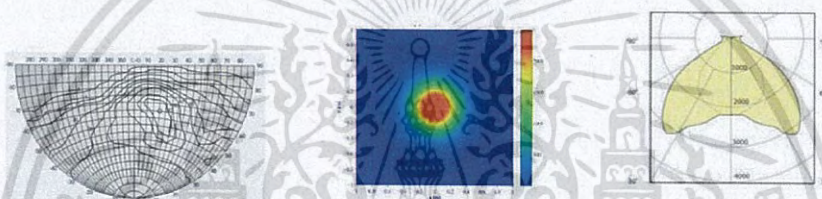
Fig.1 The Fundamental of Luminaire's Light Distribution [2]

2.1.1 Iso-intensity curve [3] or Iso-candela curve show in fig.2 (a).

The curve traced on a sphere that has its centre at the centre of the light source, joining all the points corresponding to those directions in which the luminous intensity is the same, or a plane projection of that curve.

**2.1.2 Iso-Lux curve [4]** or Iso-Foot candle curve show in fig.2 (b) manufacturers of lighting fixtures often show the isolux curves on their catalogues for typical horizontal planes. The effective luxes are obtained by multiplying the indicated luxes by the thousands of lumens installed.

**2.1.3 Polar curve [5]** The diagram illustrates the distribution of luminous intensity, in candelas, for the transverse (solid line) and axial (dashed line) planes of the luminaire. The Fig.2 (c) show curve provides a visual guide to the type of distribution expected from the luminaire e.g. wide narrow direct indirect etc. in addition to intensity.



**Fig.2 (a)** Iso-intensity curve [4]

**(b)** Iso-lux curve [6]

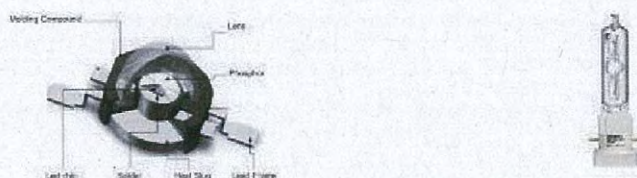
**(c)** Polar curve [5]

## 2.2 High Power Light Emitting Diode (HP-LED) [7]

HP-LED are energy efficient light sources for the new generation illumination system design. The basic structures of HP-LED usually includes molding compound, lens, phosphor, gold wire, led chip, solder, heat slug and lead frame. Figure 3 (a)

## 2.3 Hydrargyrum Medium-Arc Iodide (HMI) [8-9]

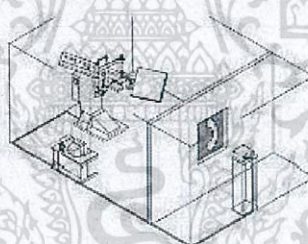
An HMI lamp shown in Fig.3 (b) uses mercury vapors mixed with metal halides in a quartz-glass envelope, with tungsten electrodes of medium-arc separation. HMI lamp bulbs usually need magnetic ballasts to help in starting process. It have been widely used in the large-screen slide projection design because of their high illuminance lighting output and good daylight-balanced output.



**Fig.3 (a)** Cross-section structure of modern (HP-LED) **(b)** Hydrargyrum medium-arc iodide (HMI)

#### 2.4 The Goniophotometer with mirror arrangement used in this paper [10]

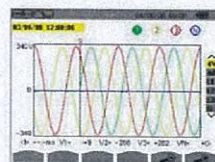
This goniometer basically consists of a rotatable lamp holder, a rotating mirror and a photometer. The measurement procedure is to guide the lamp with constant orientation but on a radius round the rotating mirror, which directs the light towards the photometer head. The centre of the mirror is at the pivotal point. The spectral modification produced by the mirror is compensated for by a special adjustment of the photometer head to the spectral luminous efficiency curve of the human eye. Information about a fixture's light distribution is also generally available in IES file format that can be experimented by goniophotometer show in Fig 4.



**Fig.4** The Basically consists of the Goniophotometer with Mirror Arrangement

#### 2.5 Power Quality Analyzer used in this paper [11,12]

The IEEE-1159 Standard defines power quality as the concept of powering and grounding sensitive electronic equipment in a manner suitable for the equipment. This paper is focusing on the influencing power quality factor caused by the HP-LED and the HMI in terms of *Power factor (PF)* and the real power ( $P$ : watt) and the apparent power ( $S$ : VA) and *Percentage of Total Harmonics Distortion (THD)* in current and voltage. The total harmonics distortion (%THD) is a commonly used power quality index to quantify the distortion of a waveform. It is also defined as the relative signal energy present at non fundamental frequencies. In this paper used Chauvin Arnoux, model: C.A. 8335 ( in Fig.5) measuring and analysis of all the electric power quality parameters.



(a) Chauvin Arnoux C.A. 8335

(b) A sample display of measuring

Fig.5 Power quality analyzer: Chauvin Arnoux C.A. 8335

### 2.6 Fresnel Luminaires for studio lighting of interested in this research

Fresnel types of luminaires (in Fig.6 (a) and (b)) are the workhorses of stage lighting and the most common luminaire (light) used on stage and in studio. They are called a 'Fresnel' because they use a 'Fresnel' lens recognized by the characteristic 'stepped' molding on one face and the texturing on the other. This Fresnel lens produces a very even light that is soft at the edges and tends to project a soft shadow. The beam is a cone of light so the size of your lit area increases as the throw distance from the Fresnel to that area increases. However, the beam angle of this light cone can be altered by a focus knob that changes the distance between the lamp and the lens.



(a) Fresnel HP-LED 104 W

(b) Fresnel HMI 200 W

Fig.6 Fresnel HP-LED and HMI luminaires used in this research

## III. TEST SET UP AND CONFIGURATIONS

### 3.1 Test configurations for Basic lighting and lighting distributions parameters

This experiment set up as shown in Fig.4. The goniophotometer system is operated in the illumination laboratory which was decorated with all black floor, walls ceiling. In this set up, both luminaires (HP-LED and HMI) were hung at the height of 1.2 meter above the mirror and the distance diagonal between the photometer and the goniophotometer centre is approximately 8 meter. Both luminaires were measured luminous intensity (candela) at two beam spreads which are Spot 15 degree and Flood 50 degree in several angular distribution,  $\alpha$  planes and  $\gamma$  planes.

### 3.2 Test configurations for electrical and power quality parameters

This experiment set up as shown in Fig.7. The electrical loads in this case are the commercial HP-LED 104 watt and the compact HMI 200 watt luminaires. The reference measuring unit

is the Chauvin Arnoux C.A. 8335 power quality analyzer. Before the data measuring process, both luminaires were ignited to operate at their maximum rated power for half an hour. The incoming power source comes from the normal outlet but through the voltage stabilizer for more reliable data.



Fig.7 Test configurations for electrical and power quality parameters

#### IV. EXPERIMENTAL RESULTS

##### 4.1 Experimental Results Basic lighting parameters

This experiment set up is as described in section 3.1. The aperture of both HP-LED and compact HMI luminaires were set to be a Spot mode ( $15^\circ$ ) and Flood mode ( $50^\circ$ ). The experimental results of comparisons can be illustrated in Fig.8 and in Table I.

The lighting beam of the HP-LED has diffusing manner. On the other hand, the traditional compact HMI beam is quite narrow and more focus. The results from Table I illustrate that the two luminaires have almost identical lighting distributions in terms of luminous flux (lm), illuminance (lux) and luminous intensity (cd). One interesting point that should be mentioned here is that the HP-LED consumed significantly less power. This directly affects each luminaire efficacy (lm/watt) as can be seen from at Table I.

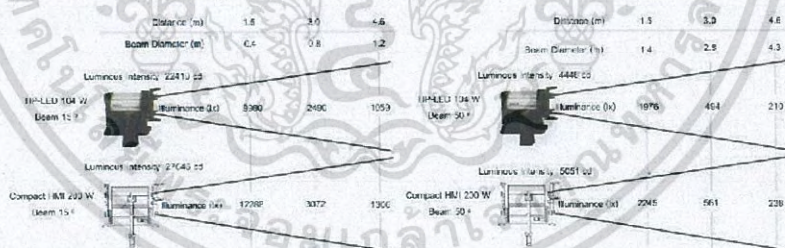


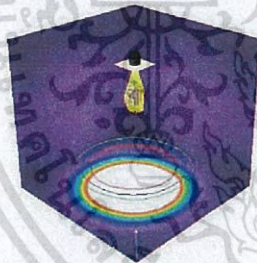
Fig.8 The Photometric Data for HP-LED and HMI luminaires by Experimental

**Table I** Experimental Basic Lighting Parameters Measurement

Type of Luminaires	Throw (m)	Beam Diameter (m)	Luminous Flux (lm)	Illuminance (lux)	Luminous Intensity (cd)	Real Power (watt)	Efficacy (lm/watt)
HP-LE	1.5	0.4	10,757	3,070	33,170	103.5	103.5
	3.0	0.8	10,700	3,070	33,170	103.5	103.5
	4.5	1.2	10,430	3,070	33,100	103.5	100.0
HMI	1.5	0.4	13,333	3,073	37,110	103.5	137.5
	3.0	0.8	13,300	3,073	37,110	103.5	137.5
	4.5	1.2	13,051	3,073	37,031	103.5	134.2
HP-LE	1.5	1.1	10,757	1,077	1,117	311.6	17.7
	3.0	2.0	10,330	1,011	1,117	311.6	17.7
	4.5	2.7	10,330	1,117	1,117	311.6	17.7
HMI	1.5	1.1	13,333	3,315	5,073	311.6	51.0
	3.0	2.0	13,333	3,315	5,040	311.6	51.0
	4.5	2.7	13,001	3,315	5,037	311.6	51.0

#### 4.2 Experimental Results Lighting Distribution Curves

This experiment results set up by the goniophotometer as shown in Fig 4. The aperture of both HP-LED and compact HMI luminaires were set to be a Spot mode (15°) and Flood mode (50°). The experimental results lighting distribution curves i.e. Iso-intensity curve, Iso-lux curve and Polar curve of comparisons can be illustrated in Fig.9 – Fig.12 respectively. The three curves of both luminaires are quite different. The lighting distributions show value of candela and lux of the HP-LED has narrow diffusing manner. On the other hand, the compact HMI is wide area and more focus.

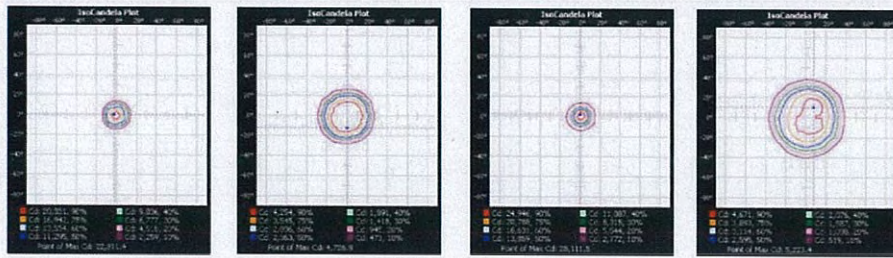


(a) Fresnel HP-LED 104 watt



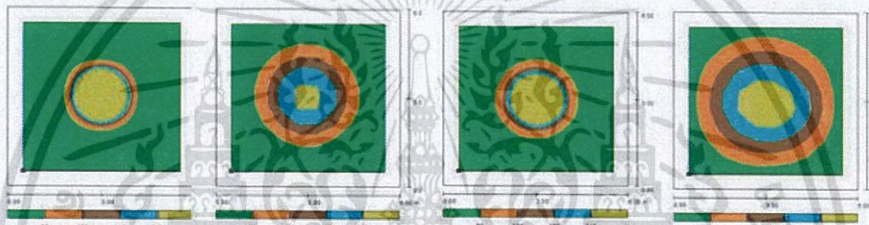
(b) Fresnel HMI 200 watt

Fig.9 The Example Results 3D Lighting Distribution Curves 2 luminaires Beam Flood 50°



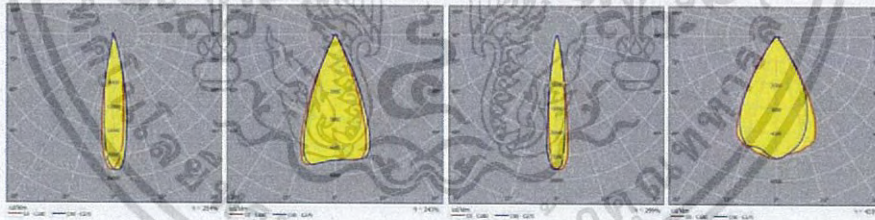
(a) Spot 15° (b) Flood 50° (c) Spot 15° (d) Flood 50°  
 Beam Fresnel HP-LED 104 watt Beam Fresnel HMI 200 watt

Fig.10 Iso-intensity Curve by Goniophotometer



(a) Spot 15° (b) Flood 50° (c) Spot 15° (d) Flood 50°  
 Beam Fresnel HP-LED 104 watt Beam Fresnel HMI 200 watt

Fig.11 Iso-lux Curve by Goniophotometer



(a) Spot 15° (b) Flood 50° (c) Spot 15° (d) Flood 50°  
 Beam Fresnel HP-LED 104 watt Beam Fresnel HMI 200 watt

Fig.12 Polar Curve by Goniophotometer

**4.3 Experimental Results for Electrical Power and Power quality Parameters**

After the test set up mentioned in Section 3.2, the experimental results are shown in Table II. The experimental results clearly illustrate that in terms of the electrical characteristics, the more-modern HP-LED luminaires consumed approximately half of a power required by the

traditional compact HMI luminaires. The HP-LED also yield power factor much closer to unity than the compact HMI one. In term of the power quality parameters, the HP-LED luminaire yields the similar result as the compact HMI one for percentage of  $THD_v$ . In dissimilar, the HP-LED one shows much less percentage of  $THD_i$  than the compact HMI one. For this aspect only, the utility grid would be much more appreciate when the HP-LED one will be used more and more in any system.

**Table II** The Experimental Results of Electrical Power and Power Quality Parameters

Type of Luminaires	Electrical Characteristics						Power Quality Parameters	
	Voltage (V)	Current (A)	Appar ent Power (VA)	Real Power (Watt)	Reacti ve Power (VAR)	PF	$THD_v$ (%)	$THD_i$ (%)
HP-LED 104 W	225.2*	0.480*	109.6*	103.5*	-36.2*	0.94*	2.2*	30*
HMI 200 W	224.3*	1.763*	393.1*	214.6*	-330*	0.54*	2.2*	140*

\*Actual real-time measuring data recorded from Chauvin Arnoux C.A. 8335 power analyzer shown in Fig. 7

#### V. CONCLUSION

This paper presented the lighting distribution comparisons between HP-LED and compact HMI mainly in studio lighting application. Three key experimental results clearly illustrated that (1) for basic lighting parameters i.e. total luminous flux, illuminance, luminous intensity, and lighting beam spread both HP-LED and compact HMI are comparable and replaceable, (2) Lighting Distributions i.e. Iso-intensity curve, Iso-lux curve and Polar curve of HP-LED and compact HMI by Dialux program simulation with the same conditions were proven to be a big help in designing studio lighting system, (3) for electrical characteristics, the HP-LED outperformed the compact HMI by far and power quality aspect; the HP-LED power factor is very close to unity, the HP-LED also contributes much less percentages of current harmonics distortion ( $THD_i$ ) to the utility system. It can be simply concluded here that the more-modern HP-LED tends to have a bright future for studio lighting in the near future to come. Three key experimental comparisons comprise of three major parts which are the most important key factors in studio lighting design.


#### ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank all the Energy System and Illumination Engineering Research Center (ESIRC) team members of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) for providing a big help and valuable suggestions and

recommendations in this research. The Faculty of Mass Communication of Technology Rajamangala University of Technology Thanyaburi for sponsorship this work. The DseThailand Co.,Ltd and Gear Head Co.,Ltd for most of the equipment support.

#### REFERENCES

- [1] C. Chompoo-Inwai, J. Prechaveerakul, "Performance Comparison between High Power Light-Emitting Diode (HP-LED) and Hydrargyrum Medium-Arc Iodide (HMI) in Studio Lighting System," in *Proc. Annual Conference on Engineering & Information Technology-ACEAIT'2014.*, pp.396-407, Mar.28-30, 2014.
- [2] Fagerhult Group, "Light measurement," <http://www.support.fagerhult.com>, Mar.15, 2014.
- [3] Institution of Lighting Engineers, "The outdoor lighting guide," <http://www.whsmith.co.uk/products.com>, Mar.16, 2014.
- [4] E. Csanyi, "Iso-lux curve," <http://www.electrical-engineering-portal.com/luminous>, Mar.16, 2014.
- [5] Cooper Lighting Design Guide, "Polar curve," [http://www.cooper-ls.com/dg\\_ltgdesguide](http://www.cooper-ls.com/dg_ltgdesguide), Mar.18, 2014.
- [6] Khatod Optical Solutions for Power LED Lighting, "Iso-lux curve," [http://www.khatod.com/Khatod/view\\_news.aspx](http://www.khatod.com/Khatod/view_news.aspx), Mar.20, 2014.
- [7] Sheng Liu and Xiaobing Luo, *LED Packaging For Lightings Applications*, Fusionopolis, SGP: John Wiley & Sons (Asia), 2011.
- [8] J. Jackman, *Lighting For Digital Video and Television*, 3<sup>rd</sup> Edition, Chennai, CHN: Focal Press, 2010.
- [9] Sally Debonnaire and Adrian Poole, "TV Low Energy Lighting Guide for TV Productions", British Broadcasting Corporation (BBC) Tech. Report, Sept. 2011.
- [10] Chr. Schwanengel, "Comparison of techniques for measuring luminous intensity distribution overall and across segments leading in lighting & color sensing," [http://www.technoteam.de/e6009/.../LID\\_Measurements\\_eng.pdf](http://www.technoteam.de/e6009/.../LID_Measurements_eng.pdf), Mar.18, 2014.
- [11] IEEE 1159-2009 Std., "IEEE recommended practice for monitoring electric power quality".
- [12] *Power & Quality Analyzer: C.A 8335*, Chauvin Arnoux Group, Maidenhead, 2011.



Conference Proceedings  
March 2015

**ACEAIT**

Annual Conference on  
Engineering and Information Technology

**ISFAS**

International Symposium on  
Fundamental and Applied Sciences

**OSAKA  
JAPAN**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ACEAIT-3754****Reference Illuminant Selection Study between High Power LED and HMI Luminaires in Studio Lighting Application for CRI Calculations****Jirasak Prechaveerakul<sup>^</sup>**

Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,  
Ladkrabang, Bangkok, THAILAND, 10520

\*E-mail:[jirasakaod@hotmail.com](mailto:jirasakaod@hotmail.com)**Chow Chompoo-Inwai**

Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,  
Ladkrabang, Bangkok, THAILAND, 10520

E-mail:[chompooe@gmail.com](mailto:chompooe@gmail.com)**ABSTRACT**

Over the past years, mass media have used a vast amount of electricity, especially in studio lighting applications. Today, trends of using High-Power Light-Emitting-Diode (HP-LED) luminaires as replacements for the traditional Hydrargyrum Medium-Arc Iodide (HMI) luminaires significantly grow. The key advantages of HP-LED over the traditional HMI one are energy saving, comparable luminous flux and light intensity. Another main factor is that the HP-LED also yield superior Color Rendering Index (CRI) to the HMI one. Generally, it is not trivia to compute or determine the CRI factor from just one time measuring unit/device. There are quite complicated processes behind the scene. This article will focus on explaining, discussing, experimenting and analyzing such a complicate issue: CRI. The experimental set up in this paper was done in the actual studio with the dimension of 9×8×11 meters (Width×Length×Height). Both luminaires of interests were hung 1.7 meter above the floor. The actual model was standing in different position from the test sources. The Fresnel-Type HP-LED and HMI were used as two different test sources. The mode of operations between the two had been set in spot mode (15 degrees). Then the experiment starts from measuring and extracting the Spectral Power Distribution (SPD) from both test sources. This research article proposes the comparisons of CRI calculations between HP-LED and HMI studio light sources using different reference illuminant according to CIE standard. Various CIE standard illuminants references were chosen i.e., illuminant A, B, C, D50, D55, D65, D75, ID50, ID65, FL1 and FL2. The experimental and research results illustrate that the accuracy of the CRI calculations compared to the actual CRI index measured from the certified measuring unit is distinctively depending on the reference illuminant selections. The experimental results are also thoroughly discussed later in this paper. The final conclusion is that the reference

illuminant D65 is the most applicable to be used as a reference for this circumstance for both of the aforementioned test sources.

Keyword: Color Rendering Index (CRI), Reference Illuminant, HP-LED and HMI Luminaries, Studio Lighting Application

## I. Introduction

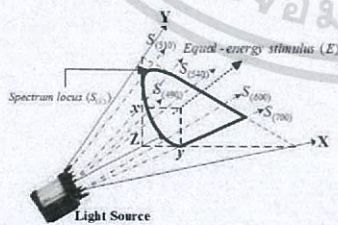
In today's studio lighting application, High Power Light-Emitting Diode (HP-LED) lamps/luminaires are becoming more and more popular to be used as a replacement for the traditional and quite-old-fashioned HMI ones due to their huge advantages in energy saving and comparable luminous flux [1]. One unique property which is very important in studio lighting application and rarely found or mentioned in today's research is the color accuracy of the object seen by human being when the luminous flux from any light source projected on that object. There is one good indicator/tool according to CIE standard to extract the level of color accuracy called Color Rendering Index (CRI). This research elaborates basic principles in details of how to compute the CRI index from the experiment in a real-world studio. This paper also presents experimental comparison results of both HP-LED and HMI ones. Another interesting issue presented here in this paper is to compare the effects when using different CIE illuminant references to determine the CRI index of any specific luminaire. The final conclusion from this paper will be beneficial for a new generation researchers to use the results from this research as references.

## II. Related Definitions and Theories

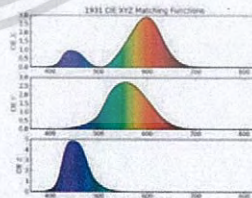
### 2.1 Basic Colorimetric Terms

#### 2.1.1 The CIE-1931 XYZ Tristimulus Values

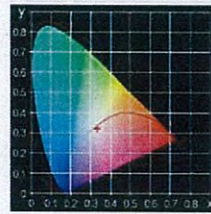
The CIE-1931 XYZ Tristimulus values are the amount of the three primary colors stimuli required to give by additive mixture color matching with the color stimulus considered as shown in Fig. 1(a) and Fig. 1(b) [2].



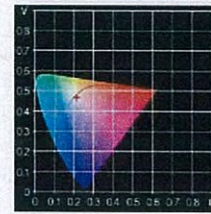
(a) Tristimulus space based on CIE-1931



(b) The CIE-1931 XYZ Tristimulus



(c) The CIE-1931 (x,y)



(d) The CIE-1976 (u',v')

Fig.1 Basic Colorimetric Terms.

The CIE-1931 XYZ Tristimulus values can be computed by summation in CIE-XYZ trichromatic system as defined by equation (1), (2) and (3).

$$X = k \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} SPD_{(\lambda)} \bar{x}_{(\lambda)} d_{(\lambda)} \quad (1)$$

$$Y = k \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} SPD_{(\lambda)} \bar{y}_{(\lambda)} d_{(\lambda)} \quad (2)$$

$$Z = k \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} SPD_{(\lambda)} \bar{z}_{(\lambda)} d_{(\lambda)} \quad (3)$$

where  $X, Y, Z$  are the Tristimulus values in CIE XYZ trichromatic system,  $SPD_{(\lambda)}$  is the color stimulus function of the light seen by the observer or spectral power distribution of the light stimulus,  $\bar{x}_{(\lambda)}, \bar{y}_{(\lambda)}, \bar{z}_{(\lambda)}$  are the color matching functions (CMF) of CIE-1931 2° table standard observers,  $k$  factor is a normalizing constant and depends on the chosen illuminant reference, the spectral power distribution of light source and wavelength interval [3]. The  $Y$ -Tristimulus value in the CIE-1931 system becomes the luminance factor of the color stimulus, measured in term of luminous flux per unit and solid angle per unit area [4]. The factors  $k$  is selected such that the Tristimulus value  $Y$  yields a value of a hundred for a perfect reflecting object equal to one for all  $\lambda$  Equation (2) therefor, it leads to equation (4)

$$k = \frac{100.000}{\int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} SPD_{(\lambda)} \bar{y}_{(\lambda)} d_{(\lambda)}} \quad (4)$$

## 2.1.2 The Chromaticity Coordinates

### 2.1.2.1 The CIE-1931 (x, y) [5].

The CIE-1931 XYZ Tristimulus values, as three variables, can be thought of as a three-dimensional space in which each axis is a primary, a two dimensional map of color is obtained, called the chromaticity diagram. Because of three variables are transformed into two variables. The chromaticity coordinates  $x, y$  and  $z$  are obtained by taking the ratios of the

Tristimulus values to their sum  $X+Y+Z$  and because the sum of the chromaticity coordinates is one. The CIE-1931  $(x, y)$  are mathematically defined by Equation (5) and (6), see also Fig. 1(c).

$$x = \frac{X}{(X+Y+Z)} \quad (5)$$

$$y = \frac{Y}{(X+Y+Z)} \quad (6)$$

### 2.1.2.2 The CIE-1976 $(u', v')$ [5].

In considering how to transform the CIE-1931 XYZ Tristimulus values space to improve its perceptual uniformity, it is advantageous to consider separately two kinds of transformations such as the CIE-1931  $(x, y)$  and the CIE-1976  $(u', v')$ . The CIE-1976  $(u', v')$  is mostly used to plot correlated color temperature and compute the CRI. The CIE-1976  $(u', v')$  are given by Equation (7-10), see also Fig. 1(d).

$$u' = \frac{4x}{(-2x+12y+3)} \text{ or } \frac{4X}{(X+15Y+3Z)} \quad (7)$$

$$v' = \frac{9y}{(-2x+12y+3)} \text{ or } \frac{9Y}{(X+15Y+3Z)} \quad (8)$$

and the reverse transformation is

$$x = \frac{27u'}{(18u'-48v'+36)} \quad (9)$$

$$y = \frac{12v'}{(18u'-48v'+36)} \quad (10)$$

### 2.1.3 Correlated Color Temperature (CCT; $T_{cp}$ )

Temperature, usually expressed in kelvin (K), of a blackbody radiator that most closely resembles the color of a stimulus of equal brightness [5]. For example, some fluorescent lamps have a CCT of 6000K or more, but their actual temperature is not nearly high. The value of CCT signifies only that such a lamp radiates light having a color most resembling that of a blackbody radiator to an absolute temperature of 6000K [3]. The CCT can be obtained. Alternatively, McCamy proposes the following formula for a direct calculation method for obtaining CCT from the CIE-1931  $(x, y)$ , see equations (11) and (12).

$$n = \frac{(x - 0.3320)}{(0.1858y)} \quad (11)$$

$$CCT = 449n^3 + 3525n^2 + 6823.3n + 5520.33 \quad (12)$$

## 2.2 CIE Reference Illuminants

Light sources used for illumination in daily life include natural light sources such as the sun and artificial light sources such as incandescent and fluorescent lamps [3]. There are even more artificial light sources with a variety of spectral power distributions (SPD). The relative SPD of the illuminating light plays an important role in color measurement and for visual matching of pairs of samples. In other words, even for the same object color, various Tristimulus values can be obtained depending on the type of illuminant. As a result, the SPD of light generally is only a set of numbers used for calculations. The CIE has recommended the use of certain SPD named “CIE Standard Illuminants” or “CIE Reference Illuminants”. For example, Reference illuminant D65 (6500K) for average daylighting, alternatively the use of D50 (5000K), D55 (5500K) and D75 (7500K) are also permitted, Reference illuminant A (2856K, as incandescent light for any rooms), Reference illuminant F1-F12 for different types of fluorescent lamps (as for now, the F2 (4230K), F7 (6500K) and F11 (4000K) are more popular to be chosen than others). It should be noted here that the Reference illuminants should be capable of being prepared as standard sources for computing CRI [13].

## 2.3 The test sources mentioned in this paper [6]

Any test source can be characterized by its SPD. A Planckian radiation has no color at the color temperature of absolute zero Kelvin -- that is, it looks black because it absorbs all light that falls on its surface. If a Planckian radiation is heated, it becomes luminous, with a radiance and color that depend on temperature. It looks warm at 3200K and it looks cool at about 6500K.

### 2.3.1 High Power Light Emitting Diode (HP-LED) [7]

HP-LED is energy efficient light source for the new generation illumination system design. The basic composition structures of HP-LED usually includes molding compound, lens, phosphor, gold wire, led chip, solder, heat slug and lead frame. Fig. 2(a) and Fig. 2(b) illustrate the cross-section structure of a general-modern HP-LED package and HP-LED Fresnel-type luminaire, respectively.

### 2.3.2 Hydrargyrum Medium-Arc Iodide (HMI) [8]

An HMI lamp shown in Fig. 2(c) uses mercury vapors mixed with metal halides in a quartz-glass envelope, with tungsten electrodes of medium-arc separation. HMI lamp bulbs usually need magnetic or electronic ballasts to help in starting/operating process. Multi-kilowatt HMI luminaires have been widely used in the film industry and for large-screen

slide projection design because of their high illuminance lighting output, efficiency, high CRI and good daylight-balanced output. Fig. 2(d) shows the example of HMI Fresnel-type luminaire.

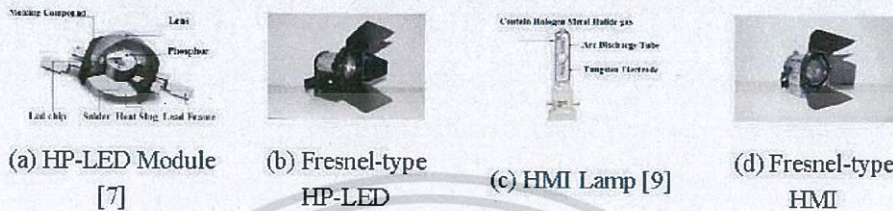


Fig.2 Test sources mentioned in this research

#### 2.4 CIE Color Rendering Index (CRI or $R_a$ )

Color rendering indices include a general color rendering index ( $R_a$ ) and special color rendering indices ( $R_{i=1..15}$ ) for each of the matching test colors [3]. The CRI is the effect of the source has on the color appearance of objects in comparison with their appearance under a reference source. The CRI is based on a color shift method, because it evaluates for a number of test objects, the average colorimetric shift in a color space. The following steps [4], [10] elaborate details of the CRI calculation process as follows:

Step 1 Calculation of test source  $CCT_k$

Calculate the CIE-1931  $(x, y)$  from the  $SPD_{(k, \lambda)}$  of the test source and then obtain the  $CCT_k$  of a test source from the CIE-1931  $(x, y)$  using equation (12).

Step 2 Selection of reference illuminant and Calculation spectral power distribution of reference illuminant ( $SPD_{(r, \lambda)}$ )

Step 2.1 If the CCT of test source is less than 5000K, reference illuminant is a Planckian radiation of the same CCT and can be calculated as

$$SPD_{r, \lambda} = 100 \left( \frac{560}{\lambda} \right)^5 \left( \frac{e^{\left( \frac{1.435 \times 10^7}{560T} \right)} - 1}{e^{\left( \frac{1.435 \times 10^7}{\lambda T} \right)} - 1} \right) \quad (13)$$

where the test source and reference illuminant are sub index  $k$  and  $r$  respectively,  $\lambda$  is each wavelength in the range of interest and  $T$  is the CCT of the test source.

Step 2.2 If the CCT of test source is equal to or greater than 5000K, reference illuminant is a mathematically defined phase of daylight of the same CCT. The method for calculating the  $SPD_{(r, \lambda)}$  begins with determining the chromaticity coordinates  $(x_D, y_D)$  of the illuminant daylight

$$\text{For } T < 7000K; x_D = -4.6070 \left( \frac{10^3}{T} \right)^3 + 2.9678 \left( \frac{10^3}{T} \right)^2 + 0.09911 \left( \frac{10^3}{T} \right) + 0.244063 \quad (14)$$

$$\text{For } T \geq 7000K; x_D = -2.0064 \left( \frac{10^3}{T} \right)^3 + 1.9018 \left( \frac{10^3}{T} \right)^2 + 0.24748 \left( \frac{10^3}{T} \right) + 0.237040 \quad (15)$$

$$y_D = -3.0000D^2 + 2.8700D - 0. \quad (16)$$

Then, the  $SPD_{(\lambda)}$  of the daylight reference illuminant is given by

$$SPD_{(\lambda)} = S_{0,\lambda} + M_1 S_{1,\lambda} + M_2 S_{2,\lambda} \quad (17)$$

Where  $S_{0,\lambda}$ ,  $S_{1,\lambda}$  and  $S_{2,\lambda}$  are functions of wavelength and are given in CIE Publication 15: 2004 "Colorimetry" [10].  $M_1$  and  $M_2$  are multiplication factors determined as follows

$$M_1 = \frac{-1.3515 - 1.7703x_D + 5.9114y_D}{0.0241 + 0.2562x_D - 0.7341y_D} \quad (18)$$

$$M_2 = \frac{0.0300 - 31.4424x_D + 30.0717y_D}{0.0241 + 0.2562x_D - 0.7341y_D} \quad (19)$$

Step 3 Determine the CIE-1976 ( $u'$ ,  $v'$ ) values for each of the eight test color samples ( $R_i$ ) for both the test source and reference illuminant [11]

Step 3.1 Derive the CIE-1931  $XYZ$  Tristimulus values for each of the 8 test color samples for  $i=1$  to 8 using the equations (1)-(3) and each table spectral radiance factor of test color samples ( $R_i$ )

Step 3.2 Transform the CIE-1931  $XYZ$  Tristimulus values obtained in Step 3.1 into the CIE-1976 ( $u'$ ,  $v'$ ) under the test source and reference illuminant using equations (7) and (8)

Step 4 In general, the CIE-1976 ( $u'$ ,  $v'$ ) of test source do not match the reference illuminant. To account for this adaptive color shift, the CIE-1976 ( $u'$ ,  $v'$ ) value under the test source and the CIE-1976 ( $u_{k,i}$ ,  $v_{k,i}$ ) value for each test color samples under the test source are corrected by equations (20) and (21)

$$u'_{k,i} = \frac{10.872 + 0.404 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - 4 \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}}{16.518 + 1.481 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}} \quad (20)$$

$$v'_{k,i} = \frac{5.520}{16.518 + 1.481 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}} \quad (21)$$

where  $c$  and  $d$  are coefficients computed from the CIE-1976 ( $u', v'$ ) for both test source and the reference illuminant using equations (22) and (23)

$$c = \frac{1}{(v')} (4 - u' - 10v') \quad (22)$$

$$d = \frac{1}{(v')} (1.708v' + 0.404 - 1.481u') \quad (23)$$

Step 5 Determine the CIE-1964 uniform color space ( $W^*_i, U^*_i, V^*_i$ ) values for each test color sample when illuminated by the test source and the reference illuminant

$$W^*_i = 25(Y_i)^{\frac{1}{3}} - 17 \quad (24)$$

$$U^*_i = 13(W^*_i)(u_i - u') \quad (25)$$

$$V^*_i = 13(W^*_i)(v_i - v') \quad (26)$$

Step 6 Calculate the color differences  $\Delta E_i$  according to the CIE-1964 uniform color space are obtained from these values in accordance with equation (27)

$$\Delta E_i = \left\{ \sqrt{(U^*_{r,i} - U^*_{k,i})^2 + (V^*_{r,i} - V^*_{k,i})^2 + (W^*_{r,i} - W^*_{k,i})^2} \right\} \quad (27)$$

Step 7 Calculate the special color rendering index ( $R_i$ ) using equation (28)

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i \quad (28)$$

Step 8 Calculate the general color rendering index ( $R_a$ ) which is an average value of the special color rendering indices for test colors 1-8, and is obtained by

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (29)$$

## 2.5 Spectroradiometer [5]

Spectroradiometer colorimetric instrumentation is designed to automatically provide the Tristimulus values and chromaticity coordinates of a given color stimulus without making use of an actual human eye as a measuring component of the instrument. In practice, the measurement of a spectral radiance or irradiance involves the comparison of the test source with reference illuminant of known spectral radiant power distribution (see Fig.3).

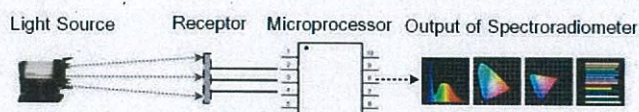


Fig.3 Principle of Spectroradiometer

### III. Test Set up and Experimental Results

#### 3.1 Test configurations for Colorimetric terms

The experimental set up in this paper was done in the actual studio with the dimension of  $9 \times 8 \times 11$  meters (Width  $\times$  Length  $\times$  Height). The interior nature of this studio is that it has to be decorated with all black materials, walls and textures. There should be zero to none natural light from the Sun penetrating into this studio. Both luminaires of interests were hung at 1.7 meter above the floor. The distance between the test sources and the model were set up at 1.5 meter. The mode of operations between the two had been set in spot mode (15 degrees). Then the experiment starts from measuring and extracting the Spectral Power Distribution (SPD) from both test sources. Colorimetric terms measurements were manually carried out using MK350s Spectroradiometer. Figure 4(a) illustrates how this test configuration was done. Before starting every experiment, warming up time of operations for both test sources were controlled to at constant 5 minutes. The positions of measuring points were set at the nose top of the man under the test. The initial parameters from the measuring are the spectral irradiance,  $SPD(\lambda)$ , the CIE-1931 ( $x, y$ ), the CIE-1976 ( $u', v'$ ) and CRI. Then repeat the same process for another luminaires under the test.

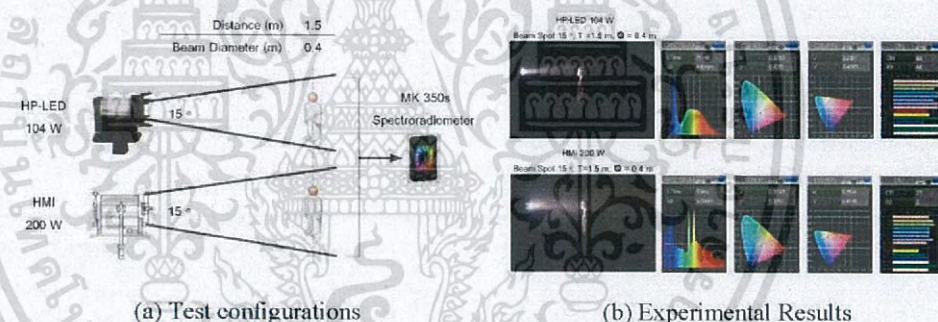


Fig.4 Test configurations and Experimental Results.

#### 3.2 Experimental Results from measuring by Spectroradiometer

The experimental comparison results can be seen in Fig. 4(b), Table I and Table II.

Table I Results colorimetric terms of HP-LED 104 W and HMI 200 W by the Spectroradiometer

Luminaire			Illuminance (lux)	Correlated Color Temperature (K)	Chromaticity Coordinates				CRI (Ra) (%)
Beam Degree	Throw (m)	Beam Diameter (m)			CIE-1931		CIE-1976		
15°	1.5	0.4			x	y	u'	v'	
HP-LED 104 W			9245	6023	0.3233	0.3081	0.2137	0.4583	88
HMI 200 W			10343	5450	0.3333	0.2134	0.2134	0.4698	75

Table II Spectral Irradiance at Beam Spot 15°, Throw 1.5 m, Beam Diameter 0.4 m

$\lambda$ (nm)	HP-LED $SPD_{(\lambda)}$	HMI $SPD_{(\lambda)}$	$\lambda$ (nm)	HP-LED $SPD_{(\lambda)}$	HMI $SPD_{(\lambda)}$	$\lambda$ (nm)	HP-LED $SPD_{(\lambda)}$	HMI $SPD_{(\lambda)}$	$\lambda$ (nm)	HP-LED $SPD_{(\lambda)}$	HMI $SPD_{(\lambda)}$
380	0.008188	0.5118	480	0.185352	0.3300	580	0.424906	0.9525	680	0.135594	0.2687
385	0.006805	0.5441	485	0.167136	0.3280	585	0.427680	0.9356	685	0.122281	0.2624
390	0.006176	0.5789	490	0.164104	0.3250	590	0.426669	0.4306	690	0.110117	0.2633
395	0.005654	0.6428	495	0.180422	0.3230	595	0.424066	0.4530	695	0.098847	0.2424
400	0.00523	0.6922	500	0.204602	0.3289	600	0.419459	0.4407	700	0.087118	0.2223
405	0.005486	0.7050	505	0.241952	0.3265	605	0.411801	0.4146	705	0.077940	0.1931
410	0.006650	0.6929	510	0.276356	0.3065	610	0.403225	0.3980	710	0.066977	0.1668
415	0.017609	0.6872	515	0.314662	0.2786	615	0.390614	0.3848	715	0.060190	0.1568
420	0.033486	0.7940	520	0.349586	0.2521	620	0.377790	0.3757	720	0.051049	0.1531
425	0.080516	0.7135	525	0.373834	0.2560	625	0.365561	0.3615	725	0.045489	0.1513
430	0.159329	0.6835	530	0.398028	0.2680	630	0.348690	0.3384	730	0.039865	0.1451
435	0.341609	0.9380	535	0.412114	0.2796	635	0.329271	0.3135	735	0.035473	0.1404
440	0.594940	0.8393	540	0.422041	0.3086	640	0.308502	0.3129	740	0.031159	0.1422
445	0.913913	0.3766	545	0.427031	0.9596	645	0.286845	0.3076	745	0.028217	0.1365
450	0.992683	0.3328	550	0.431201	0.8643	650	0.264713	0.2991	750	0.024902	0.1413
455	0.871028	0.3704	555	0.435661	0.3833	655	0.242345	0.3045	755	0.022936	0.1493
460	0.636840	0.3836	560	0.434545	0.3552	660	0.219177	0.3079	760	0.020520	0.1592
465	0.479476	0.3555	565	0.433875	0.3981	665	0.195698	0.3023	765	0.020211	0.1568
470	0.324277	0.3369	570	0.430182	0.3795	670	0.173644	0.2978	770	0.018411	0.1520
475	0.239115	0.3381	575	0.426722	0.9169	675	0.153867	0.2821	775	0.016176	0.1540
									780	0.000000	0.0000

### 3.3 CRI Calculation Comparisons Results

#### 3.3.1 The principle

This article proposes the comparisons of  $R_a$  calculations between HP-LED and HMI studio light sources using different reference illuminant according to CIE standard. Various CIE standard illuminants references were chosen i.e., illuminant A, B, C, D50, D55, D65, D75, ID50, ID65, FL1 and FL2. In order to do the calculation process as mentioned in section 2.4, we have to know the spectral irradiance  $SPD_{(\lambda)}$  of both CIE reference illuminant and test sources. The  $SPD_{(\lambda)}$  of test sources can be seen from Table II and the  $SPD_{(\lambda)}$  of all reference illuminant can be acquired from [12]. Figure 5 illustrates all the relevant  $SPD_{(\lambda)}$  in graphics.

#### 3.3.2 The Computation Process

Table III below shows the colorimeter terms from calculation steps mentioned in 2.4. We then get the CCT of HP-LED equal to 6039.63K and CCT of HMI equal to 5480.76K which results in choosing the reference illuminant in Daylighting group (D65 = 6503.68K). The key concept to compute the correct CRI is that when the CIE-1976 ( $u', v'$ ) of the test sources do not match the reference illuminant, we have to do the adaptive color shifting method by transforming those values into CIE-1976 ( $u_{\lambda}, v_{\lambda}$ ), then the same calculation process continued. The calculation results from these steps can be seen in Table IV.

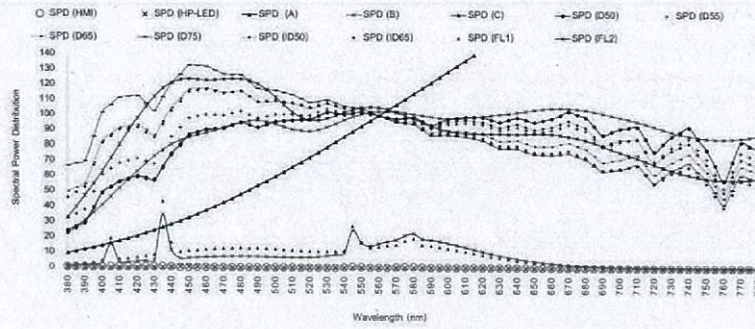


Fig.5  $SPD(\lambda)$  of the Test Sources and Reference Illuminants

Table III Colorimeter terms calculations between CIE Reference Illuminant (D65) and Test Sources

Reference Illuminant and Test sources	Colorimetric Terms								
	CIE-1931 XYZ Tristimulus			CIE-1931 (x,y)		CIE-1976 ( $u',v'$ )		McCamy	CCT
	X	Y	Z	x	y	$u'$	$v'$	n	(K)
Daylight 6500 (D65)	95.0426	100.00	108.8785	0.3127	0.3290	0.1978	0.4683	0.1346	6503.68
HP-LED 104 W	105.0397	100.00	120.0869	0.3231	0.3076	0.2138	0.4579	0.0733	6039.63
HMI 200 W	102.2001	100.00	104.8793	0.3328	0.3256	0.2133	0.4695	-0.0058	5480.76

Table IV CRI/Ra calculations steps between Reference Illuminant (D65) and Test Sources

Source	Colorimetrics	Test Color Samples							
		1 (7.5R6/4)	2 (5Y6/4)	3 (5GY6/8)	4 (2.5G6/6)	5 (10BG6/4)	6 (5PB6/8)	7 (2.5P6/8)	8 (10P6/8)
Reference Illuminant (D65)	X	32.9919	27.4819	23.9131	20.4311	24.9851	28.2071	33.3218	37.6253
	Y	29.7833	28.8916	30.4386	29.4867	30.8442	29.7847	29.3708	31.3369
	Z	24.5124	14.9100	9.8685	21.2505	40.3519	57.8185	53.1498	45.3705
	x	0.3780	0.3855	0.3722	0.2871	0.2598	0.2436	0.2876	0.3291
	y	0.3412	0.4053	0.4738	0.4143	0.3207	0.2572	0.2535	0.2741
	$u_{r,i}$	0.2385	0.2174	0.1875	0.1552	0.1642	0.1740	0.2105	0.2338
	$v_{r,i}$	0.4845	0.5143	0.5370	0.5041	0.4560	0.4134	0.4174	0.4381
	$c_{r,i}$	-2.2360	-0.6452	-2.8997	-2.3724	-1.5890	-0.7450	-0.9205	-1.4029
	$d_{r,i}$	1.8128	1.8674	1.9433	2.0534	2.0607	2.0619	1.9292	1.8399
	$W^*_{r,i}$	60.4933	59.7121	61.0575	60.2352	61.4027	60.4945	60.1339	61.8180
$U^*_{r,i}$	31.9966	15.2097	-8.2135	-33.3627	-26.8582	-18.7411	9.8663	28.8834	
$V^*_{r,i}$	12.6883	35.6786	54.4619	27.9723	-9.8128	-43.2069	-39.8421	-24.3179	
Test Source (HP-LED)	X	32.2020	30.1677	26.1944	22.4404	27.8002	31.5441	36.7671	40.8379
	Y	30.6013	29.5943	31.1353	28.6327	29.8443	28.4393	29.0660	31.2885

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	$Z$	26.9132	15.9062	10.0063	21.6625	44.1208	65.2121	60.2474	51.1331
	$x$	0.3863	0.3987	0.3890	0.3085	0.2732	0.2520	0.2916	0.3313
	$y$	0.3265	0.3911	0.4624	0.3937	0.2933	0.2272	0.2305	0.2538
	$u_{ki}$	0.2514	0.2313	0.2002	0.1736	0.1829	0.1930	0.2250	0.2462
	$v_{ki}$	0.4782	0.5104	0.5355	0.4985	0.4419	0.3915	0.4003	0.4244
	$c_{ki}$	-2.1607	-2.6167	-2.9048	-2.3246	-1.3622	-0.2760	-0.5696	-1.1543
	$d_{ki}$	1.7742	1.8285	1.9086	2.0025	2.0091	2.0098	1.8846	1.8009
	$W_{ki}^*$	61.1963	60.3290	61.6486	59.4823	60.5462	59.3097	59.8662	61.7775
	$U_{ki}^*$	29.9378	13.7014	-10.8530	-31.0400	-24.2743	-16.0302	8.7622	26.0072
	$V_{ki}^*$	16.0959	41.1714	62.1872	31.3754	-12.6294	-51.2276	-44.8650	-26.9646
	$\Delta E_i$	4.0428	5.7294	8.1851	4.1884	3.9171	8.5489	5.1498	3.9088
	$R_i$ (%)	81.40	73.64	62.35	80.73	81.93	60.67	76.31	82.02
	$R_a$ (%)	74.89							
Test Source (HMI)	$X$	34.8692	29.6069	26.4786	22.3097	27.0849	29.9001	35.0138	38.6373
	$Y$	30.5759	29.8271	31.8278	28.6007	29.6989	27.8275	28.5066	30.5878
	$Z$	24.0184	13.7981	8.8906	18.2503	37.5713	55.6091	53.5645	45.7024
	$x$	0.3898	0.4043	0.3940	0.3226	0.2871	0.2638	0.2990	0.3362
	$y$	0.3418	0.4073	0.4736	0.4135	0.3148	0.2455	0.2435	0.2661
	$u_{ki}$	0.2466	0.2284	0.1996	0.1763	0.1851	0.1947	0.2247	0.2436
	$v_{ki}$	0.4866	0.5178	0.5399	0.5086	0.4567	0.4078	0.4116	0.4338
	$c_{ki}$	-2.2860	-2.7165	-2.9609	-2.4825	-1.6466	-0.6689	-0.8280	-1.3411
	$d_{ki}$	1.7877	1.8348	1.9087	1.9888	1.9923	1.9914	1.8810	1.8078
	$W_{ki}^*$	61.1747	60.5313	62.2274	59.4538	60.4201	58.7585	59.3698	61.1849
	$U_{ki}^*$	26.5207	11.9423	-11.0365	-28.5449	-22.1202	-14.1495	8.8212	24.0888
	$V_{ki}^*$	13.5528	38.0082	56.9268	30.2308	-10.0832	-47.1464	-44.6975	-28.3926
		$\Delta E_i$	5.5854	4.0956	3.9259	5.3780	4.8465	6.2942	5.0250
	$R_i$ (%)	74.31	81.16	81.94	75.26	77.71	71.05	76.89	70.91
	$R_a$ (%)	76.15							

### 3.3.3 The Comparison Results

The same methodology as in 3.3.2 were applied with all others CIE reference illuminant as described in Fig. 5. The comparison results are shown in Table V and Fig 6. From the experimental and calculation results, it is obvious that the perfect reference illuminant to be used is the reference illuminant D65 which yield the CRI of the HP-LED at 74.89% and for the HMI at 76.15%. The calculation results are very much like those CRI read from the certified Spectroradiometer at 88% and 75%, respectively.

The Reference Illuminant D65 were chosen because it represents daylight at approximately 6500K and the SPD of D65 was measured in several laboratories over a long period of time and

should be used to describe the color of any test source when illuminated by daylight. Another interesting point is that why we didn't choose other reference illuminant for this experiment because the Reference Illuminant C corresponds to the SPD of daylight with a color temperature of about 6800 K. It is defined only from 320 nm. The UV content of illuminant C do not correspond with that of daylight. Illuminant C is replaced by Illuminant D65 and should not be used anymore. Illuminant D50, D55, D75 and (Indoor Indirect Daylight) ID 50, ID 65 the SPD of these standard illuminants are measure in the same manner as that of standard illuminants should be used only if necessary. Example in the United States D75 is used in many color matching boots. Illuminant FL1 and FL2 generally will be used as references for the SPD group of fluorescent lamps. Finally, Illuminant A is SPD of Planckian radiation with a color temperature of 2856K. It is similar to that of a tungsten lamp. [13].

Table V Calculation Results of the CRI(Ra) from various Reference Illuminants

Reference (r)		Test (k)		Ra (%)	Reference (r)		Test (k)		Ra (%)
CIE Illuminant	CCT (K)	Test Source	CCT (K)		CIE Illuminant	CCT (K)	Test Source	CCT (K)	
A	2857.13	HP-LED	6039.64	-12.77	D75	7496.89	HP-LED	6039.64	36.41
		HMI	5480.77	-15.26			HMI	5480.77	32.00
B	4879.12	HP-LED	6039.64	49.46	ID50	5095.97	HP-LED	6039.64	46.70
		HMI	5480.77	52.06			HMI	5480.77	50.06
C	6770.56	HP-LED	6039.64	82.84	ID65	6602.96	HP-LED	6039.64	75.08
		HMI	5480.77	80.00			HMI	5480.77	76.97
D50	5002.04	HP-LED	6039.64	10.90	FL1	6430.44	HP-LED	6039.64	74.97
		HMI	5480.77	9.70			HMI	5480.77	88.14
D55	5502.16	HP-LED	6039.64	57.49	FL2	4229.88	HP-LED	6039.64	46.05
		HMI	5480.77	60.19			HMI	5480.77	57.35
D65	6503.68	HP-LED	6039.64	74.89	Measuring By		HP-LED	6023.00	
		HMI	5480.77	76.15					
							Spectroradiometer		
							HMI	5450.00	

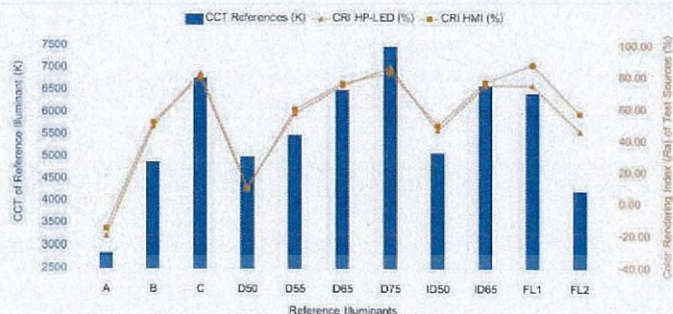


Fig.6 CRI Calculation Results between Reference Illuminants and Test Sources

#### IV. Conclusion

This research presents the comparisons of CRI calculations between test sources such as HP-LED and HMI studio light sources using different reference illuminant according to CIE standard i.e., A, B, C, D50, D55, D65, D75, ID50, ID65, FL1 and FL2. The experimental results illustrate that the accuracy of the CRI calculations compared to the actual CRI index measured by the Spectroradiometer is distinctively depending on the reference illuminant selections. The final conclusion is that the reference illuminant D65 is the most applicable to be used as a reference in this circumstance for both of the aforementioned test sources. The main reason can simply be noted here that the CIE Reference illuminant D65's color temperature is equal to 6500K which is very close to the natural light source (the sun light). Consequently, such a reference illuminant (D65) is a perfect choice in CRI calculation for both test sources in this research.

#### Acknowledgment

The authors would like to thank all the Energy System and Illumination Engineering Research Center (ESIRC) team members of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) for providing a big help and valuable suggestions and recommendations in this research. The Faculty of Mass Communication of Technology Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT). Finally, Shell Centennial Education Fund, Shell Companies in Thailand for sponsorship and strong support this work. The Dse.Thailand Co.,Ltd. and Lek Lighting Equipment Co.,Ltd. for equipment support.

#### References

- [1] J. Prechaveerakul and C. Chompoo-Inwai, "Lighting Distributions Comparison between High Power Light-Emitting Diode (HP-LED) and Hydrargyrum Medium-Arc Iodide (HMI) in Studio Lighting System," in *Proc. ICEAI 2014*, pp. 179-188.
- [2] G. A. Klein, *Industrial Color Physics*. New York, USA: Springer, 2010.
- [3] N. Ohta and A. R. Robertson, *Colorimetry Fundamentals and Applications*. West

- Sussex, U.K.: John Wiley & Sons, 2005.
- [4] G. Wyszecki and W. S. Stiles, *Color Science Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, 2nd ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 2000.
- [5] Roy S. Berns, *Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology*, 3rd ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 2000.
- [6] D. Malacara, *Color Vision and Colorimetry Theory and Applications*. Washington, USA: SPIE.Press, 2002.
- [7] S. Liu and X. Luo, *LED Packaging for Lighting Applications*. Chemical Industry Press, 2011.
- [8] J. Jackman, *Lighting for Digital Video and Television*, 3rd ed. Focal Press, 2010.
- [9] S. Debonnaire and A. Poole, "Low Energy lighting Guide for TV Productions," B.B.C. Corporation Guide, Sep. 2011.
- [10] "Method for the assessment of the colorimetric properties of luminaires," *The Television Lighting consistency Index 2012.*, Tech 3355, pp. 1-28 Apr. 2013.
- [11] M. S. Rea and J. P. Freyssinier, "Recommendations for Specifying Color Properties of Light Sources for Retail Merchandising," *Lighting Research Center.*, vol. 8, Issue 2, pp. 1-21 Mar. 2010.
- [12] R. W. G. Hunt and M. R. Pointer, *Measuring Colour*, 4th ed. Kingston-upon-Thames, U.K.: Wiley-Blackwell, 2011.
- [13] A. Berger-Schunn, *Practical color measurement a primer for the beginner, a reminder for the expert*. New York, USA: John Wiley & Sons, 1994.



The 18th International Conference on Electrical Machines and Systems  
Pattaya City, Thailand  
25-28 October 2015

[Home](#) | [Keynote Speakers](#) | [Technical Sessions](#) | [Authors' Index](#) | [Search](#)



Authors' Index

A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z |

Paper Code	Title
------------	-------



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Engineering Economic Analysis between High Power LED and Hydrargyrum Medium-Arc Iodide Luminaries In Studio Lighting Application

Jirasak Prechaveerakul<sup>a</sup> and Chow Chompoo-Inwai<sup>a</sup>

E-mail:jirasaod@hotmail.com, chompoo@gmail.com

<sup>a</sup>Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,  
Ladkrabang, Bangkok, THAILAND, 10520

**Abstract**-High Power Light Emitting Diode (HP-LED) luminaire is a rapidly evolving technology used for studio lighting application and replacement for the traditional Hydrargyrum Medium-Arc Iodide (HMI) luminaires which have significantly grown because of reducing energy consumption and also their efforts to reduce overall cost. In this research, an engineering economic analysis was made. Results indicated that the payback period (PBP) for the replacement of HP-LED luminaires was around seven years and seven months, which was shorter than the project life of fifteen years. The net present value (NPV) from the investment was about 60,491 baht with an internal rate of return (IRR) of 9.70 % and the benefit cost ratio (B/C ratio) was 1.82. In conclusion, the study found that the HP-LED luminaire replacement for HMI luminaire was identified as economically feasible.

**Keyword**- Engineering Economic, Luminaries, High Power Light Emitting Diode, Hydrargyrum Medium-Arc Iodide, Studio Lighting Application.

### I. INTRODUCTION

Over the past years mass media have used a vast amount of electricity, especially in studio-lighting-relevant applications and utilizations. These media include entertainment industries such as television and film. Their extended and continuous productions consume much electrical energy in lighting for background, stage, and actors. Natural light is simply insufficient for this specific purpose. That is why lighting in studios is so important in this sense. One of the real shocks to studio lighting application (SLA) owners and operators is just how much their older lighting equipment really costs them on an annual basis. Older lights not only draw tremendous amounts of electrical power just to illuminate, but also create a massive amount of heat that has to be removed by energy-sapping, expensive air conditioning. Their energy use and maintenance cost add up to substantial ongoing operating costs [1]. Nowadays, a SLA in Thailand mainly utilizes the traditional Hydrargyrum Medium-Arc Iodide (HMI) lamp/luminaire for both indoor and outdoor applications. In today's studio lighting systems, High Power Light-Emitting Diode (HP-LED) lamp/luminaire is becoming more and more popular to be used as a replacement for the quite-old-fashioned HMI one. According to the data in table 1, studios in Thailand have started to use the HP-LED lamps instead of HMI lamp. The researcher collected the data of electric energy for both types of lamp setting up in the studios. For lighting, it was found that the lamp has electric power per lamp of 50-100 W and lamp setting of each type was at 10-20 lamps per studio. Thereby, the setting-up electric power value was at 1000 W and number of working hour was totally starting at six hours per day per studio.

TABLE I  
CASE STUDIES EXAMPLES OF STUDIOS IN THAILAND

Detail Studio	Studio	MCOT	CH 7	TPBS
	Dimension (m) W×L×H	15×35×6	20×30×10	20×20×8
TV Program	News	News	Variety	
HMI	Total installed Real Power (W)	3000	2000	1200
	Operate hr/(day)	7	6	6
HP-LED	Total installed Real Power (W)	1500	600	500
	Operate hr/(day)	8	8	6

In this paper, therefore, the focus on study was the analysis of the basic elements of the costs and benefits of investing between HP-LED and HMI Luminaries in SLA.

### I. RELATED DEFINITIONS AND THEORIES

#### A. Lighting Energy Consumption

The amount of energy consumed for lighting in given SLA, and thus the potential for energy conservation, depends on a variety of factors: the lighting level, the number of hours per year that the lighting equipment is in use, type of equipment used, and the design of the SLA [2].

##### A.1 True Power

The goal of good lighting design is to save energy and, at the same time, to maintain visual performance and productivity. The current emphasis in energy conservation is on the reduction of power (fewer lamps) by reducing lighting levels. This approach leads to design techniques based on watts per square foot or power design techniques [3]. True Power is measured with a wattmeter and defined as in equation (1)

$$P = E \times I \times \cos \theta \quad (1)$$

where

$P$  is true Power (Watt: W),

$E$  is voltage (Volt: v),

$I$  is Current (Ampere: A),

$\cos \theta$  is Power Factor.

##### A.2 Lighting Energy

The goal is energy conservation. Lighting energy is the product of true power used by a luminaire and the amount of time that the luminaire is in use. Lighting energy is measured with a watt-hour meter. To reduce energy consumption by the lighting system, the illuminating engineering must go beyond simple lighting design and studying the control of the SLA. [3].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Lighting Energy} = \text{truepower} \times \text{time} \quad (2)$$

### A.3 Lighting Energy Cost (LEC)

This calculator calculates the cost of electricity in running electrical appliances and equipment. The required values are as given in equation (3). The true power rating (Watt) is usually given in the name plate of appliances. The energy rate (Bath/kWh) can be found in the electricity bill. This calculator is useful for estimating lighting energy cost and also for making sense of your electricity bill. There are also gadgets out there that can be attached to your electrical appliance and give you a running total of usage time. The formula shows in equation (3) [4].

$$\text{LEC} = \frac{\text{True Power} \times \text{Operating hrs. per year} \times \text{Cost per kWh}}{1000} \quad (3)$$

$$= \text{kwh} \times \text{Operating hrs. per year} \times \text{Electricity Tariff rate}$$

### B. Engineering Economic Terms

Four methods are standard in the economic analysis of courses of action with regard to investment: payback period (PBP), net present value (NPV), internal rate of return (IRR) and benefit cost ratio (B/C ratio) [5].

Theoretically, the payback period is an extremely simple method used to obtain a rough estimate of the time (years or months) that an investment will take to pay for itself. The formula shows in equation (4) [6].

$$\text{PBP} = \frac{\text{Required Investment}}{\text{Annual Receipts - Annual Disbursements}}$$

$$= \frac{\text{Total Investment}}{\text{Annual Energy Cost Saving}} \quad (4)$$

While the net present value of the project is the sum of the present value of net cash flow in each year, or the difference between the present value of net cash flow of the project with the current value of the investment and the formula shows in equation (5) [7].

$$\text{NPV} = \text{Energy Cost Savings} - \text{Total Investment}$$

$$= \sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+i)^t} - \left[ \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} + C_0 \right] \quad (5)$$

And the internal rate of return is an indirect measure of profit or net benefit because it indicates the percentage rate rather than the size of the profit at the end of the investment period. The IRR measure by itself does not indicate whether or not a proposed project is worthwhile. The formula shows in equation (6) [8].

$$\text{IRR} = \text{Energy Cost Savings} - \text{Total Investment} = 0$$

$$= \sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} - \left[ \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} + C_0 \right] = 0 \quad (6)$$

Finally the benefit cost ratio, a fundamental analysis method for public sector projects, was developed to introduce more objectivity into public sector economics. All cost and benefit estimates must be converted to a common equivalent monetary unit at the discount rate (interest rate). The B/C ratio is then calculated using one of these relations: [9].

$$\text{B/C ratio} = \frac{\text{Energy Cost Savings}}{\text{Total Investment}}$$

$$= \frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} + C_0} \quad (7)$$

...If one needs to make a decision guideline for HP-LED luminaire investment, these recommending guidelines may be considered. The recommending PBP time should be ranged between 5-8 years with the current incentive mechanism of "Fixed adder". Normally, the NPV is a method to consider the value of all cash inflow and outflow. It makes a profit or loss. Therefore, if the NPV is positive, choose the project. And if the NPV is negative, reject the project. Next, if the project IRR is greater than the cost of project, or one can find that project  $\text{IRR} > 10\%$ , choose the project [10]. Finally, if the B/C ratio  $\geq 1.0$ , accept the project as economically acceptable for the estimates and discount rate applied. And if  $\text{B/C} \leq 1.0$ , the project is not economically acceptable.

The equation (4)-(7) is defined that

$B_t$  is the returns per year ( $t = 1, 2, 3, \dots, n$ ),

$C_t$  is the costs per year ( $t = 1, 2, 3, \dots, n$ ),

$C_0$  is the costs of first year,

$i$  is the discount rate by given ( $r = \text{IRR}$ ).

### C Luminaires in this research

#### C.1 High Power Light Emitting Diode (HP-LED) [11]

HP-LED is energy efficient light source for the new generation illumination system design. The basic composition structures of HP-LED usually includes molding compound, lens, phosphor, gold wire, led chip, solder, heat slug and lead frame. Fig. 1(a) and Fig. 1(b) illustrate the cross-section structure of a general-modern HP-LED package, driver HP-LED and HP-LED Fresnel-type luminaire, respectively.

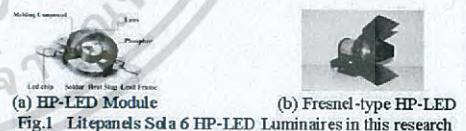


Fig.1 Litepanels Sola 6 HP-LED Luminaires in this research

#### C.2 Hydrargyrum Medium-Arc Iodide (HMI)

An HMI lamp shown in Fig. 2(a) uses mercury vapors mixed with metal halides in a quartz-glass envelope, with tungsten electrodes of medium-arc separation. HMI lamp bulbs usually need magnetic or electronic ballasts to help in starting/operating process. Multi-kilowatt HMI luminaires have been widely used in the film industry and for large-screen slide projection design because of their high illuminance lighting output, efficiency, high CRI and good daylight-balanced output. Fig. 2(b) shows the example of HMI Fresnel-type luminaire [11].

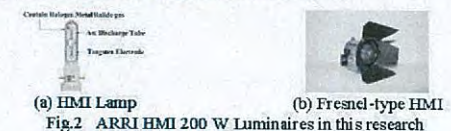


Fig.2 ARRI HMI 200 W Luminaires in this research

### D. Hypothesis Methodology Terms

#### D.1 Initial Cost of one Luminaire

Initial luminaire purchase pricing was obtained from manufacturers' representatives in the distributor. Pricing was affected by efficacy, order quantity, and length of supply chain all of which complicate the comparison of prices between multiple applications. Finally, each luminaire was different, the pricing was normalized per Watt consumed [12]. For this research, the researcher used the lamp in the details of C subject which the price of each type shown in the table II included the 7% Vat of Thailand.

#### D.2 Cost of one lamp

The most simplistic economic analysis consists of a rule such as comparison of initial cost and the cheapest. However, sometimes the lumens and lamp life are needed to be considered of lamp application as well as cost of lamp of each brand including the value added vat which was shown in the table II. In this research, the HMI 200 W OSRAM SEGZY was used. [3].

#### D.3 Lamp Life

Lamp manufacturers publish rated life for their lamps in their literature. Rated lamp life is an average. If a lamp has a rated life of 20,000 hours, then at 20,000 hours of operation one-half of a large group of lamps are expected to fail [13].

#### D.4 Time Project

The project age was used to calculate NPV value because the long project age affected the future money value decreased. A project could be considered the project age from appliance and machine economic age (10-15 years), and factory and buildings (30-40 years), which practically the project age would be specified as same as the economic application of its capital assets.

#### D.5 Operating Hours per Year (opering.hr/yr)

The lamp life alone has little practical meaning for the lighting designer. The important consideration is how long the lamp will be in service for the particular application. Working hours are on 24h/day, 365 days/yr. 8760 h/yr. The formula shows in equation (8) [3].

$$\text{oper.hr / yr} = \frac{\text{wk}}{\text{yr}} \times \frac{\text{days}}{\text{wk}} \times \frac{\text{hr}}{\text{day}} = \frac{\text{hr}}{\text{yr}} \quad (8)$$

#### D.6 Electricity Tariff Rate

Assume that the electricity Tariff rate of various end users be as the electricity tariff structure study. Current Ft (Bath) and VAT at 7% are included in the electricity tariff rate. The tariff rates in this research are shown in Table II [14].

#### D.7 Interest Rate

An interest rate is the rate at which interest is paid by borrowers (debtors) for the use of money that they borrow from lenders (creditors). Specifically, the interest rate is a percentage of principal paid in a certain number of times per period for all periods during the total term of the loan or credit [15].

### III. RESEARCH METHODOLOGY

This research illustrated economic value analysis of replacing HP-LED luminaire 104 W with HMI luminaire 200 W. The economic value analysis in terms of the payback period (PBP), the net present value (NPV), the internal rate of return (IRR) and the benefit cost ratio (B/C ratio). The assumption in engineering economic comprised with real power, price and hypothesis methodology of luminaries lamp HMI and driver HP-LED and tariff rate. Finally, hypothesis methodology shown in Table II will be substituted in engineering economic formulae.

TABLE II  
THE DATA FOR CALCULATE ENGINEERING ECONOMIC

Description	Luminaries		
	HMI	HP-LED	
Real Power (Watt)	Lamp	200	104
	Ballast HMI	20	-
	Luminaries	81600	73790
Price (Bath)	Cost of Lamp HMI	4528	-
	Driver HP-LED	-	2000
	Electricity Tariff Rate	3.5	3.5
	Lifetime (hrs)	2000	30000
Hypothesis Methodology	Operating hr/(day)	6	6
	Time Project (yr)	15	15
	Interest (%)	0.8	0.8

### IV. RESULTS AND DISCUSSION

The engineering economic analytical result of this research is presented in Table III. The net present value (NPV) from the investment was about 60,491 baht with an internal rate of return (IRR) of 9.70 % and the benefit cost ratio (B/C ratio) was 1.82. In conclusion, the study found that the HP-LED luminaire replacement with HMI luminaire was identified as economically feasible. Thus, the sensibility analysis of HP-LED luminaire indicated that the factor with the highest sensitivity to NPV is interest, tariff rate and energy cost saving, while price of both luminaries and accessories has the lowest sensitivity.

TABLE III  
THE RESULTS OF ENGINEERING ECONOMIC

Description		Luminaries		
		HMI	HP-LED	HP-LED Replacement HMI
Power	/6 hr	1.32	0.62	0.70
Energy	/15yr	7128	3369	3759
Cost	/6 hr	4.62	2.18	2.44
Electrical	/15yr	24948	11793	13154
Total				
Cost Save	/15yr	160812	17794	143018
Cost Save	/yr	10720	1186	9534
Engineering Economic	PBP			7.74
	NPV			60491
	IRR			9.70
	B/C ratio			1.82

## V. CONCLUSION

According to the research, when compared to the base case HP-LED luminaire for Studio Lighting Application while at the present the cost of investment for HP-LED luminaire starts above the HMI luminaire slightly, vice versa, it has a shorter payback period of 7.74 years. As HP-LED luminaire is long lasting bulbs, and has low power consumption, there is an interest to invest for sign lighting more due to the recent technological startup in Studio Lighting Application Thailand. Finally, the analysis shows that the factor with the most influent effect on the Engineering Economic Electricity is the Tariff Rate, while the following factors are the cost of lamp, ballast HMI and driver HP-LED, and the reverse lifetime and operating hours.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank all the Energy System and Illumination Engineering Research Center (ESIRC) team members of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL) for providing a big help and valuable suggestions and recommendations in this research, the Faculty of Mass Communication of Technology Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT). Next, thank Shell Centennial Education Fund, Shell Companies in Thailand for sponsorship and strong support this work. Finally, the authors would like to thank the Mass Communication Organization of Thailand (MCOT), Bangkok Broadcasting & TV Co., Ltd. (BBTV Ch 7) and Thai Public Broadcasting Service (TPBS) television station for the energy consumption data.

## REFERENCE

- [1] Litepanels, "Litepanels Broadcast Studio Lighting," <http://www.litepanels.com>, Mar.25, 2015.
- [2] Kreith, Frank J and West, Ronald E. *CRE handbook of energy efficiency*, Boca Raton, Fla. USA: CRC. Press, 1997.
- [3] R.N. Helms and M.C. Belcher. *Lighting for Energy-efficient luminous environments*, Boca. New Jersey. USA: CRC. Prentice-Hall, Engle Wood Cliffs, 1980.
- [4] Solutions for Technicians, "Electricity Cost Calculator," <http://www.handymath.com/electric.cgi>, May.3, 2015.
- [5] Steiner, H.M. *Engineering Economic Principles*, 2<sup>nd</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill, 1996.
- [6] Rings, James L, Bedworth, David D and Randhawa, Sabah U. *Engineering Economics*, 4<sup>th</sup> ed. Boca. New Jersey. Singapore: McGraw-Hill, 1998.
- [7] R. Stephen A. Ross, Randolph W. Westerfield, and Bradford D. Jordan. *Fundamentals of Corporate Finance Standard*, 10<sup>th</sup> ed. New York USA: McGraw-Hill Higher Education, 2012.
- [8] Tung Au and Thomas P. Au, *Engineering Economics for Capital Investment Analysis*, New Jersey. USA: Prentice-Hall, 1992.
- [9] Leland Blank, P.E. and Anthony Tarquin, P.E. *Basic of Engineering Economy*, New York. USA: McGraw-Hill Higher Education, 2008.
- [10] S. Jitchobjai, C Wannoi, W. Tangsrianukul, and Ch. Chompoo-Inwai, "A Technology and Financial Indices Study to Achieve an Appropriate Range of Incentive Mechanism for Solar Emeryg Promotion in Thailand," in *Proc. ICEE 2014*, pp. 241-246.
- [11] J. Prechaveerakul and C. Chompoo-Inwai, "Reference Illuminant Selection Study between High Power LED and HMI Luminaries in Studio Lighting Application for CRI Calculations," in *Proc. ACEAIT 2015*, pp. 396-407.
- [12] S. Debonnaire and A. Poole, "Cost-Benefit Analysis of Energy Efficient Technologies Available For Use in Roadway Lighting ", Conservation Applied Research & Development (CARD) Program Final Report, Dec. 2012.
- [13] C. Dilouie. *The Lighting Management Handbook*, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [14] Energy and Sustainable, "Life Cycle Cost of Lighting System in Various Groups of End user in Thailand". <http://www.ieeeexplor.ieee.org>, Jun.18, 2015.
- [15] Interest\_rate, "http://www.wikipedia.org/wiki/interest\_rate Jun.25, 2015.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## Optical and electrical performance comparisons between high power LED and HMI studio lighting including the engineering economics analysis

Jirasak Prechaveerakul & Chow Chompoo-Inwai

To cite this article: Jirasak Prechaveerakul & Chow Chompoo-Inwai (2017) Optical and electrical performance comparisons between high power LED and HMI studio lighting including the engineering economics analysis, Journal of the Chinese Institute of Engineers, 40:4, 318-328, DOI: 10.1080/02533839.2017.1308274

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/02533839.2017.1308274>

Published online: 16 Apr 2017.

Submit your article to this journal [↗](#)

Article views: 10

View related articles [↗](#)

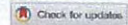
View Crossmark data [↗](#)

Full Terms & Conditions of access and use can be found at  
<http://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=tcie20>

Download by: [203.158.248.22]

Date: 13 June 2017, At: 20:09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## Optical and electrical performance comparisons between high power LED and HMI studio lighting including the engineering economics analysis

Jirasak Prechaveerakul and Chow Chompoo-Inwai

Faculty of Engineering, Department of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

### ABSTRACT

A superior alternative to the conventional hydrargyrum medium-arc iodide (HMI) luminaires, high power light emitting diode (HP-LED) luminaires are increasingly being utilized in numerous modern lighting designs and applications. Specifically, this research is concerned with the comparative optical and electrical performance and engineering economic analysis of Fresnel-type HMI and HP-LED luminaires for studio lighting applications in the experiments conducted in a real studio environment. The findings revealed that, optically, the Correlated color temperature, luminous flux, luminous intensity and illuminance of the experimental HP-LED and HMI luminaires were comparable. The Color rendering index of the HP-LED was higher and its beam/spread output was more controllable. In the electrical aspect, the results showed that the HP-LED luminaire required significantly less power while producing lower %THD, and %THD, vis-à-vis the HMI counterpart. The payback period for the replacement of HP-LED luminaires was around 7 years and 7 months, which was shorter than the project life of 15 years. The commercial prospect of HP-LED luminaires is thus brighter as an excellent substitute for the conventional HMI luminaires in myriad applications, particularly in studio lighting for photography, cinematography, and broadcasting.

### ARTICLE HISTORY

Received 6 March 2016  
 Accepted 14 March 2017

### KEYWORDS

Optical performance;  
 electrical performance;  
 engineering economics;  
 high power LED; HMI studio  
 lighting

### 1. Introduction

In the television and movie industries, large amounts of electricity are of vital importance in TV program and movie production, where studio lighting accounts for the lion's share of electricity consumption. Moreover, alongside the recent rapid growth of both industries, the rise in the electricity demand is inevitable.

At present, a majority of production studios in Thailand rely almost exclusively on conventional hydrargyrum medium-arc iodide (HMI) lamps/luminaires for both indoor and outdoor lighting applications. With the advent of solid-state lighting technology, high power light-emitting diodes (HP-LED) have emerged with the prospect of becoming a more efficient, more durable and environmentally friendlier alternative light source to the existing HMI technology (Rodrigues et al. 2011; Yeh and Huang (2008)). In Kini and Prabhu (2012), multi-colored LEDs were deployed to generate white and multicolor lighting for studio lighting applications (SLA) in place of conventional light sources whose color temperatures were altered by attaching different dichroic filters to the front of the light sources. For HP-LED, the photometric measurements can be carried out with an integrating sphere using a spectroradiometer (SR) which is capable of measuring the colors of curved surfaces or integrating sphere area as in Lee, Yu, and Lim (2010). The spectral radiant flux distribution of a light source encompasses total chromaticity coordinates, correlated color temperature (CCT; T<sub>cp</sub>), color rendering index (CRI; Ra),

luminous flux, luminous intensity and illuminance as in Optical Measurement Guidelines (Lumileds 2015).

The rest of this research paper is organized as follows: Section 2 deals with definitions and theories about optical and electrical performances and engineering economics. In addition, it discusses the instruments, and the experimental parameters of the paper's experiments as well as reference and test source luminaires. Section 3 details the experimental configurations and research methodology, while Section 4 details the optical and electrical performances and engineering economics of the experimental luminaires. The concluding remarks are provided in Section 5.

### 2. Related definitions and theories

#### 2.1. Optical performances

##### 2.1.1. Basic lighting parameters

**2.1.1.1. Luminous flux.** It is the luminous flux emitted into a unit solid angle from a point source of one candela. Strictly speaking, the element of time should be introduced, in which case the definition becomes luminous flux, per second, emitted into a unit solid angle from a point source of one candela as in Bermingham (2003).

**2.1.1.2. Luminous intensity.** It is measured by making a visual comparison with a known standard. Originally this was

CONTACT Jirasak Prechaveerakul [chompoo@gmail.com](mailto:chompoo@gmail.com)

© 2017 The Chinese Institute of Engineers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

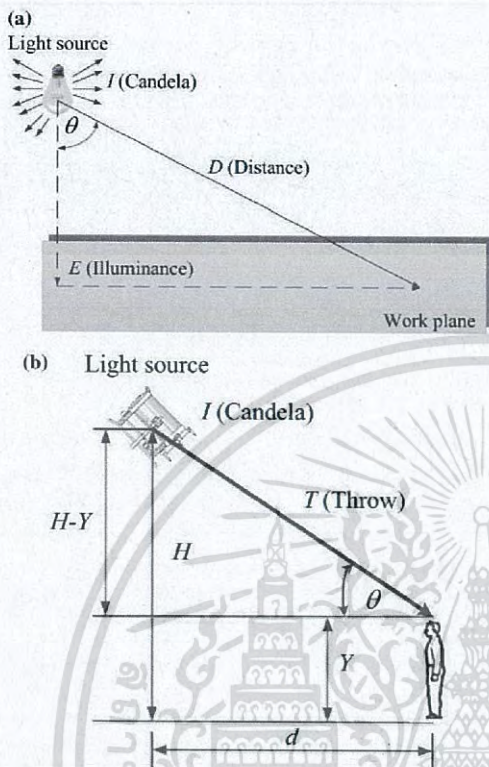


Figure 1. The utilization of the illuminance method to studio lighting. (a) The fundamental of illuminance computation method. (b) The studio lighting to subject principle.

a standard candle, and the term candlepower evolved as a measurement of luminous intensity, e.g. 15,000 candlepower for a 1 kW Fresnel spotlight in flood mode as in Bermingham (2003).

**2.1.1.3. Illuminance.** It is a measure of photometric flux per unit area. In other words (Cayless 1996), it is a measure of the light falling on a working plane, as illustrated in Figure 1(a). The measurement of illuminance can be expressed by the unit of either Lux or Foot-candles. In general engineering design, illuminance can be calculated using Equation (1).

$$E = \frac{I \times \text{Cos}\theta}{D^2} \tag{1}$$

In addition, another studio lighting principle, or the Studio-Lighting-to-Subject principle, is adopted by illumination design engineers (Figure 1(b)). Equation (2) is the simplified formula for the calculation of studio lighting illuminance (E). Both Equations (1) and (2) produce identical calculation results for illuminance as in Fitt and Thornley (2001).

$$E = \frac{I \times d}{T^3} \tag{2}$$

**2.1.2. Colorimetry terms**

**2.1.2.1. The CIE-1931 XYZ tristimulus value.** The tristimulus values of a color stimulus by CIE (1987) are the amounts of the three reference color stimuli, in a given trichromatic system, required to match the color of the stimulus under consideration. The determination of the CIE-1931 XYZ tristimulus values requires their corresponding values of visual matching, spectral power data measurement, and normalization constant (k) as in Hunt and Pointer (2011). Since the wavelength interval  $d_{(\lambda)}$  for the summation is common for both the numerator and denominator, it can be omitted from the computation as in Ohta and Robertson (2005). The CIE-1931 XYZ tristimulus values are defined by Equations (3)–(5).

$$X = k \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \text{SPD}_{(\lambda)} \bar{x}_{(\lambda)} d_{(\lambda)} \tag{3}$$

$$Y = k \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \text{SPD}_{(\lambda)} \bar{y}_{(\lambda)} d_{(\lambda)} \tag{4}$$

$$Z = k \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \text{SPD}_{(\lambda)} \bar{z}_{(\lambda)} d_{(\lambda)} \tag{5}$$

where X,Y,Z are the tristimulus values in the CIE-XYZ trichromatic system.  $\text{SPD}_{(\lambda)}$  is the spectral power distribution of light stimulus; in other words, the color stimulus function of the light seen by an observer.  $\bar{x}_{(\lambda)}, \bar{y}_{(\lambda)}, \bar{z}_{(\lambda)}$  are the color matching functions (CMF) of Table 1931 CIE 2° standard observers as in Ohta and Robertson (2005). k is a normalizing constant and depends on the chosen illuminant reference, the spectral power distribution of the light source, and the wavelength interval as in Baniya (2012) and Klein (2010). The standard color value (Y) is a measure of the lightness of a color. In the calculation of normalization constant (k), Y would be 100,000 for every illuminant. Equation (4) thus leads to Equation (6).

$$k = \frac{100,000}{\int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \text{SPD}_{(\lambda)} \bar{y}_{(\lambda)} d_{(\lambda)}} \tag{6}$$

**2.1.2.2. The CIE-1931 chromaticity coordinates (x, y).** The CIE-1931 tristimulus values (variables) X, Y, and Z could be thought of as a three-dimensional space in which each axis is a primary. By performing two sequential projections, the three variables are transformed into two variables and a two-dimensional color map (i.e. the chromaticity diagram). Chromaticities should correlate to some extent to a stimulus hue and chroma. The chromaticity coordinates x, y, and z are determined from the ratios of their respective tristimulus values to their sum (i.e. X + Y + Z), where the sum of the chromaticity coordinates is 1. The CIE-1931 xy chromaticity coordinates (x, y) are mathematically

defined by Equations (7) and (8) as in Berns (2000) and Berger-Schunn (1994).

$$x = \frac{X}{(X + Y + Z)}, \quad (7)$$

$$y = \frac{Y}{(X + Y + Z)}. \quad (8)$$

**2.1.2.3. The CIE-1976 chromaticity coordinates ( $u', v'$ ).** The CIE-1976 ( $u', v'$ ) is for calculation of CRI, in which the CIE-1931 XYZ tristimulus values are converted into new chromaticity coordinates  $u'$  and  $v'$  according to Equations (9) and (10).

$$u' = \frac{4x}{(-2x + 12y + 3)} \text{ or } \frac{4X}{(X + 15Y + 3Z)}, \quad (9)$$

$$v' = \frac{9y}{(-2x + 12y + 3)} \text{ or } \frac{9Y}{(X + 15Y + 3Z)}. \quad (10)$$

**2.1.2.4. Correlated color temperature (CCT;  $T_{cp}$ ).** For studio light sources without a light-producing heated element, their color temperatures could be characterized by CCT, measured in kelvins. In addition, CCT is applicable to the studio light sources that could not be modeled by planckian radiation. CCT is defined as the temperature of a planckian radiation whose chromaticity point is closest to the chromaticity point of the non-planckian radiation light source. The determination of CCT is sequentially carried out using Equations (7)–(8) for  $x$  and  $y$  prior to substituting in McCamy's Equation of (11) to subsequently derive Equation (12) as in Smith (2009).

$$n = \frac{(x - 0.3320)}{(0.1858 - y)}, \quad (11)$$

$$\text{CCT} = 449n^3 + 3525n^2 + 6823.3n + 5520.33. \quad (12)$$

**2.1.2.5. Color rendering index (CRI;  $R_i$ ).** The CRI of a light source refers to its effect on the color appearance and CCT of objects in relation to their appearance under a reference illuminant. CRI is closely related to CCT and is based on the color-shift method by Wyszecki and Stiles (2000). Calculate the special CRI ( $R_i$ ) using Equation (13). Calculate the general CRI ( $R_a$ ) which is an average value of the special color rendering indices for test colors 1–8, by Lynn, Mohanty, and Wittkopf (2012) and is obtained by Equation (14).

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i, \quad (13)$$

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i. \quad (14)$$

### 2.1.3. Basic lighting distributions

**2.1.3.1. Iso-intensity curve.** The curve traced on a sphere that has its center at the center of the light source, joining all the points corresponding to those directions in which the luminous

intensity is the same, or a plane projection of that curve as in the Institution of Lighting Engineers (2005).

**2.1.3.2. Iso-lux curve.** The iso-lux curves on their catalogs for typical horizontal planes. The effective luxes are obtained by multiplying the indicated luxes by the thousands of lumens installed as in the Institution of Lighting Engineers (2005).

**2.1.3.3. Polar curve.** The diagram illustrates the distribution of luminous intensity, in candelas, for the transverse (solid line) and axial (dashed line) planes of the luminaire. The polar curves show curve provides a visual guide to the type of distribution expected from the luminaire e.g. wide, narrow, direct, indirect (or other properties) in addition to intensity as in the Institution of Lighting Engineers (2005).

## 2.2. Electrical performance

The IEEE-1159 Standard defines power quality as the concept of powering and grounding sensitive electronic equipment in a manner suitable for the equipment. This paper is focusing on the influencing power quality factor caused by the HP-LED and the HMI in terms of *Power factor* (PF) and *Percentage of Total Harmonic Distortion* (THD) in voltage ( $v$ ) and current ( $i$ ). *Power factor* (PF) is defined as the ratio between the real power ( $P$ : watt) and the apparent power ( $S$ : VA), and can be expressed either as a decimal value or as a percentage. The total harmonics distortion (%THD) is a commonly used power quality index to quantify the distortion of a waveform. It is also defined as the relative signal energy present at non fundamental frequencies as in Jabbar et al. (2008). It can be derived as shown in Equation (15).

$$\%THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n V_i^2}}{V_1} \times 100 \text{ and } \%THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_i^2}}{I_1} \times 100. \quad (15)$$

## 2.3. Engineering economic terms

Three methods are standard in the economic analysis of courses of action with regard to investment: payback period (PBP), net present value (NPV), and internal rate of return (IRR) as in Steiner and Steiner (1996). Theoretically, the PBP is an extremely simple method used to obtain a rough estimate of the time (years or months) that an investment will take to pay for itself. The formula is shown in Equation (16) as in Riggs, Bedworth, and Randhawa (1996).

$$\begin{aligned} \text{PBP} &= \frac{\text{Required Investment}}{(\text{Annual Receipts} - \text{Annual Disbursements})} \\ &= \frac{\text{Total Investment}}{\text{Annual Energy Cost Saving}} \end{aligned} \quad (16)$$

The NPV of the project is the sum of the present value of net cash flow in each year, or the difference between the present value of net cash flow of the project and the current value of the investment and the formula is shown in Equation (17) as in Ross, Westerfield, and Jordan (2012).

NPV = Energy Cost Savings – Total Investment

$$= \sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+i)^t} - \left[ \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} + C_0 \right]. \quad (17)$$

The IRR is an indirect measure of profit or net benefit because it indicates the percentage rate rather than the size of the profit at the end of the investment period. The IRR measure by itself does not indicate whether or not a proposed project is worthwhile as in Au and Au (1991). The formula is shown in Equation (18).

IRR = Energy Cost Savings – Total Investment = 0

$$= \sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} - \left[ \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} + C_0 \right] = 0. \quad (18)$$

#### 2.4. The experimental light sources

In general, according to Malacara (2002), any light source can be characterized by its SPD. At the color temperature of absolute zero Kelvin, a planckian radiator displays no color. In other words, the appearance is dark black as all light that falls on its surface is completely absorbed. If heated, a planckian radiator becomes luminous, with a radiance and temperature-dependent color.

##### 2.4.1. High power light emitting diode

An HP-LED is an energy-efficient light source that is suited to the modern illumination system design. The main part of a modern HP-LED consists of molding compound, lens, phosphor,

gold wire, led chip, solder, heat slug and lead frame per Liu and Luo (2011), as shown in Figures 2(a) and (b). These Figures illustrate an HP-LED Fresnel-type luminaire.

##### 2.4.2. Hydrargyrum medium-arc iodide

Figure 2(c) illustrates an HMI in which mercury vapors are mixed with metal halides inside a quartz-glass envelope with tungsten electrodes of medium-arc separation. Typically, HMI lamp bulbs require electronic ballasts to aid with the starting/operating process as in Jackman (2010). Multi-kilowatt HMI luminaires have been widely used in the film industry and in large-screen displays. (Figure 2(d)) This is a photo image of an experimental HMI Fresnel-type luminaire.

#### 2.5. The instruments in this research

##### 2.5.1. Spectroradiometer

A spectroradiometer measures the spectrum in narrow wavelength increments and the bandwidth of a light source. According to the CIE, the spectral distribution of light reflected from a surface is subject to two quantities: the spectral reflectance or radiance of the surface; and the spectral power of the source that illuminates the surface as in Berns (2000). The typical outputs of spectroradiometric systems consist of the spectral power distributions and chromaticity, i.e. CIE-1931 ( $x, y$ ), CIE-1976 ( $u', v'$ ), CCT (K), and CRI (%) per Wyszecki and Stiles (2000). This illustrates the operating principle of a caption for Figure 3 spectroradiometer. (Figure 3)

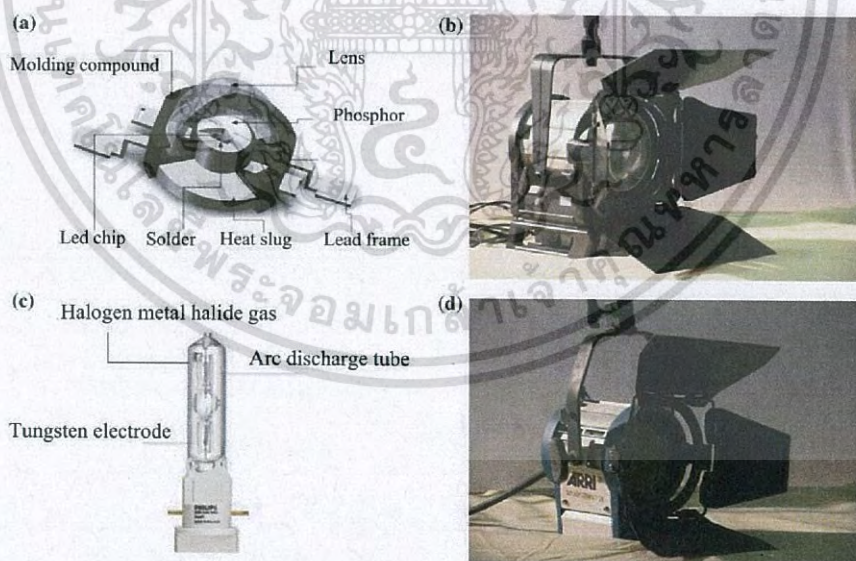


Figure 2. Light sources mentioned in this research. (a) HP-LED module, (b) Fresnel-type HP-LED, (c) HMI lamp, and (d) Fresnel-type HMI.

**Table 3.** The measurements of experimental basic lighting parameters.

Measuring point	Luminaire			Luminous flux (lm)	Luminous intensity (cd)	Illuminance (Lux)	Efficacy (lm/W)
	Beam (°)	T (m)	z (m)				
1	HP-LED 104W 15°	1.5	0.4	10,716	22,410	9,960	103.53
2	HMI 200W 15°	1.5	0.4	13,221	27,648	12,228	61.60
3	HP-LED 104W 15°	3.0	0.8	10,699	22,410	2,490	103.37
4	HMI 200W 15°	3.0	0.8	13,200	27,648	3,072	61.50
5	HP-LED 104W 15°	4.6	1.2	10,439	22,408	1,059	100.85
6	HMI 200W 15°	4.6	1.2	12,874	27,634	1,306	60.00
7	HP-LED 104W 50°	1.5	1.4	10,215	4,446	1,976	98.69
8	HMI 200W 50°	1.5	1.4	11,606	5,051	2,245	54.08
9	HP-LED 104W 50°	3.0	2.8	10,233	4,446	494	98.86
10	HMI 200W 50°	3.0	2.8	11,621	5,049	561	54.16
11	HP-LED 104W 50°	4.6	4.3	10,239	4,443	210	98.92
12	HMI 200W 50°	4.6	4.3	11,604	5,036	238	54.07

between HP-LED and HMI with regard to the iso-intensity, iso-lux and polar curves.

**4.1.3. Beam of the experimental luminaires**

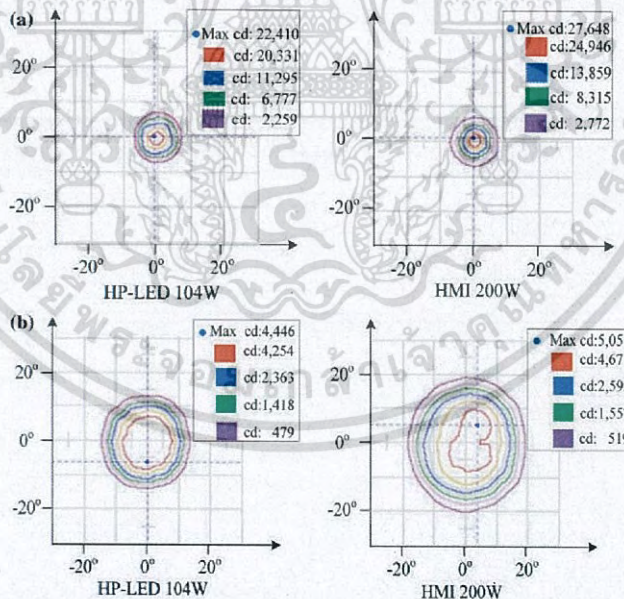
In Figure 12(a) and (b) in which the beams of the two experimental luminaires respectively were of spot (15°) and flood modes (50°), it was observed that under both modes the beam of HP-LED 104 W was narrower and more focused, while that of the HMI 200 W was more diffuse.

**4.2. Electrical performance**

Based on the IES's LM-79-08 standard, the power consumption of the experimental HP-LED luminaire was roughly half that of the HMI counterpart. In addition, the power factor of the HP-LED was much closer to unity compared to the HMI's. With regard to the power quality parameters, a similarity in the percentage of THD<sub>v</sub> was observed between the experimental HP-LED and HMI luminaires, while the percentage of THD<sub>i</sub> of the HP-LED was much lower than the HMI's. Thus, significantly greater power savings and lower operating costs could be realized if a greater number of HP-LED luminaires were adopted to substitute the conventional HMI luminaires. Table 4 compares the electrical characteristics and power quality parameters of the experimental luminaires.

**4.3. Engineering economic result**

The engineering economic analytical result of this research is presented in Table 5. The PBP for the replacement of HP-LED luminaires was around seven years and seven months, which was shorter than the project life of 15 years. The NPV from the investment was about 60,491 baht with an IRR of 9.70%. Thus, the sensibility analysis of HP-LED luminaire indicated that the factors with the highest sensitivity to NPV are interest, tariff rate and energy cost saving, while price of both luminaires and accessories have the lowest sensitivity.



**Figure 9.** Iso-intensity curves of the experimental luminaires under two beam modes. (a) Beam spot 15°, and (b) beam flood 50°.

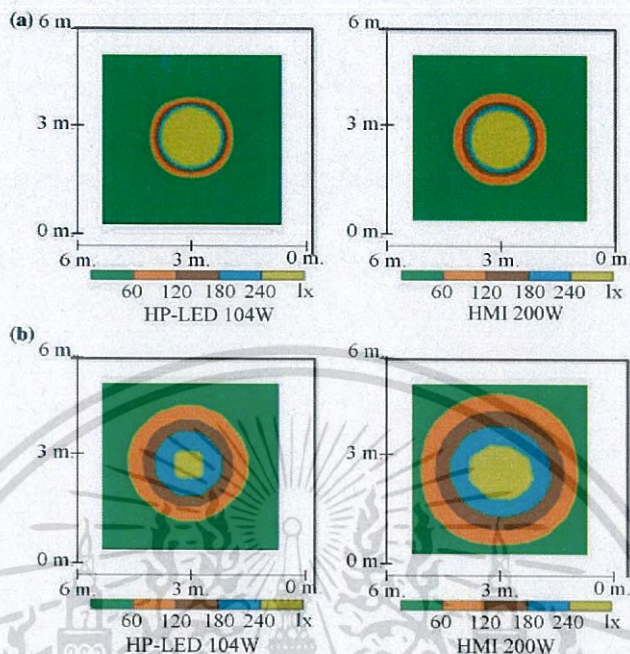


Figure 10. Iso-lux curves of the experimental luminaires under two beam modes. (a) Beam spot 15°, and (b) beam flood 50°.

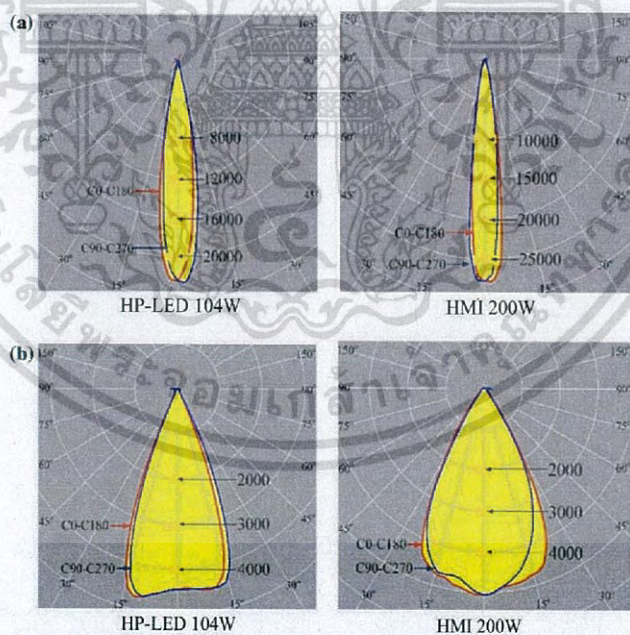


Figure 11. Polar curves of the experimental luminaires under two beam modes. (a) Beam spot 15°, and (b) beam flood 50°.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

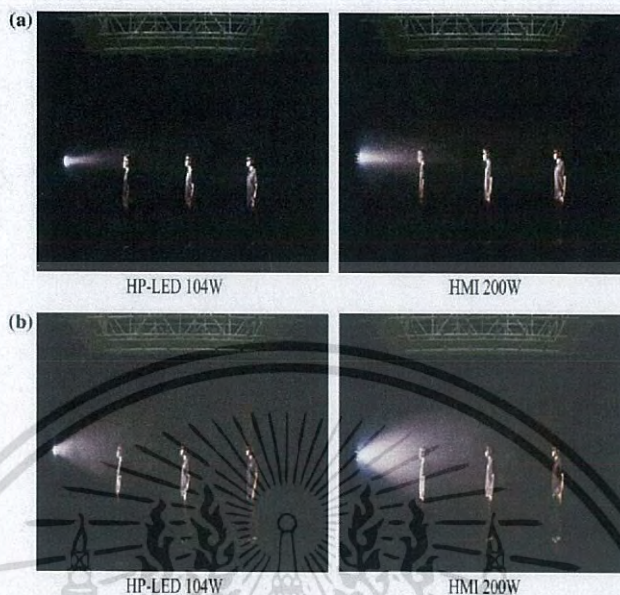


Figure 12. Beams of the experimental luminaires at the 12 measuring points. (a) Beam spot 15°, and (b) beam flood 50°.

Table 4. Comparison of the electrical measurements of both experimental luminaires.

Types of luminaire	Electrical characteristics					Power quality parameters			
	Voltage (V)	Current (A)	Real power (Watt)	Reactive power (Var)	Apparent power (VA)	PF	THDv (%)	THDi (%)	
HP-LED 104 W	225.2	0.480	103.5	-36.2	109.6	0.94	2.2	30	
HMI 200 W	224.3	1.763	214.6	-330	393.1	0.54	2.2	140	

Table 5. The results of engineering economic evaluation.

Description	Luminaries			
	HMI 200 W	HP-LED 104 W	HP-LED replacement	HMI
Power /6 h	1.32	0.62		0.70
energy /15 yr	7128	3369		3759
Cost /6 h	4.62	2.18		2.44
electrical /15 yr	24,948	11,793		13,154
Total cost /15 yr	160,812	17,794		143,018
Cost save /yr	10,720	1186		9534
Engineering economic			PBP	7.74
			NPV	60,491
			IRR	9.70

## 5. Conclusion

In this research, the experiments were carried out with HP-LED 104 W and HMI 200 W luminaires in a real studio setting to investigate and compare their optical and electrical performances. In the optical aspect, both experimental light sources were tested for illuminance (Lux), CCT (K) and CRI (%). The findings indicated that, in addition to the higher CRI, the illuminance and CCT of HP-LED were closely similar to those belonging to the HMI

counterpart and thus could be a good substitute for the latter. Furthermore, their beams and light distribution curves of polar type were slightly different, in which the beam of HP-LED 104 W was narrower and more focused while that of the conventional HMI 200 W was more diffuse. In the electrical performance aspect, the power consumption, power factor, percentage of THD, and efficacy (lm/watt) of HP-LED 104 W individually declined by 50% on average vis-à-vis the 200 W HMI. The engineering economic study found that the HP-LED luminaire replacement for HMI luminaire was identified as economically feasible. Taken together, it is technically viable and economically sensible to switch to HP-LED luminaires for studio lighting applications despite a slightly more complex installation of HP-LED lights.

## Nomenclature

CCT	correlated color temperature (K)
CRI	color rendering index (%)
$D$	distance between points of the light to work plan (m)
$d$	horizontal distance between of the light to work plan (m)

<i>E</i>	illuminance of luminaire (Lux)
<i>H</i>	height of the luminaire above the floor level (m)
<i>I</i>	luminous intensity of luminaire (cd)
IRR	internal rate of return (%)
<i>k</i>	normalization constant of light
NPV	net present value (baht)
<i>n</i>	McCamy's formula
<i>P</i>	real power (Watt)
PBP	payback period (year)
PF	power factor
<i>Q</i>	reactive power (Var)
<i>S</i>	apparent power (VA)
<i>T</i>	distance between the light sources to a working plan (m)
%THD <sub>v</sub> , %THD <sub>i</sub>	percentage of Total harmonic distortion in voltage and current
<i>u', v'</i>	CIE-1976 chromaticity coordinates
<i>X, Y, Z</i>	tristimulus values in the CIE-XYZ trichromatic system
<i>x, y</i>	CIE-1931 chromaticity coordinates
<i>Y</i>	lightness of a color
$\phi$	luminous flux of luminaire (lm)
$\theta$	angle between the light axis of the light beam and the vertical axis of the work plan
$\phi$	beam diameter (m)

### Acknowledgment

The authors are deeply indebted to King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL)'s Energy System and Illumination Engineering Research Center (ESIRC) and to Technology Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT)'s Faculty of Mass Communication for valuable assistance and suggestions. Sincere appreciation also goes to Shell Thailand for a financial sponsorship under the Shell Centennial Education Fund; and to DSE Co., Ltd. (Thailand) and Lek Lighting Equipment Co., Ltd. for instrument support.


### Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

### Funding

This work was partially supported by the Shell Centennial Educational Fund; KMUTL; and RMUTT.

### ORCID

Chow Chompooinwai  <http://orcid.org/0000-0002-4411-2640>

### References

- Au, T., and T. P. Au. 1991. *Engineering Economics for Capital Investment Analysis*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Baniya, R. R. 2012. "Study of Various Metrics Evaluating Color Quality of Light Sources." Master dissertation, Aalto University.

- Berger-Schunn, A. 1994. *Practical Color Measurement: A Primer for the Beginner, A Reminder for the Expert*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Birmingham, A. 2003. *Location Lighting for Television*. Oxford: Focal Press.
- Berns, R. S. 2000. *Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology*. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Cayless, M. A. 1996. *Lamps and Lighting*. 4th ed. Translated and edited by J. R. Coaton and A. M. Marsten. London: Routledge.
- CIE (International Commission on Illumination). 1987. *International Lighting Vocabulary*. Vienna: CIE.
- Dunham, R. E. 2016. *Stage Lighting: Fundamentals and Applications*. 2nd ed. London: Routledge.
- Fitt, B., and J. Thornley. 2001. *Lighting Technology: A Guide for the Entertainment Industry*. Oxford: Focal Press.
- Hunt, R. W. G., and M. R. Pointer. 2011. *Measuring Colour*. 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell.
- Institution of Lighting Engineers. 2005. *Outdoor Lighting Guide*. 1st ed. London: Routledge.
- Jabbar, R. A., M. Al-Dabbagh, A. Muhammad, R. H. Khawaja, M. Akmal, and M. R. Arif. 2008. "Impact of Compact Fluorescent Lamp on Power Quality." In *Proceedings of IEEE Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC-08)*, Sydney, Australia, 14–17 December 2008: 1–5. New York: IEEE.
- Jackman, J. 2010. *Lighting for Digital Video and Television*. 3rd ed. Oxford: Focal Press.
- Kini, S. G., and A. Prabhu. 2012. "Simulation Study on Controller Design for Color Mixed White Light LED Panel for Studio Lighting." In *Proceedings of IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Singapore, 18–20 July 2012: 1582–1587. New York: IEEE.
- Klein, G. A. 2010. *Industrial Color Physics*. Berlin: Springer.
- Lee, Y. K., B. Yu, and H. N. Lim. 2010. "Lightness, Chroma, and Hue Distributions of a Shade Guide as Measured by a Spectroradiometer." *The Journal of Prosthetic Dentistry* 104 (3): 173–181. doi: 10.1016/S0022-3913(10)60116-3.
- Liu, S., and X. Luo. 2011. *LED Packaging for Lighting Applications*. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell.
- Lumileds. 2015. *Optical Measurement Guidelines High-power LEDs and Solid State Lighting Products*. San Jose, CA: Lumileds.
- Lynn, N., L. Mohanty, and S. Wittkopf. 2012. "Color Rendering Properties of Semi-transparent Thin-film PV Modules." *Building and Environment* 54: 148–158. doi:10.1016/j.buildenv.2012.02.010.
- Malacara, D. 2002. *Color Vision and Colorimetry: Theory and Applications*. 2nd ed. Bellingham, WA: SPIE.
- Ohta, N., and A. Robertson. 2005. *Colorimetry: Fundamentals and Applications*. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell.
- Riggs, J. L., D. D. Bedworth, and S. U. Randhawa. 1996. *Engineering Economics*. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education.
- Rodrigues, C. R. B. S., P. S. Almeida, G. M. Soares, J. M. Jorge, D. P. Pinto, and H. A. C. Braga. 2011. "An Experimental Comparison between Different Technologies Arising for Public Lighting: LED Luminaires Replacing High Pressure Sodium Lamps." In *Proceeding of IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Gdansk, Poland, 27–30 June 2011: 141–146. New York: IEEE.
- Ross, S., R. Westerfield, and B. Jordan. 2012. *Fundamentals of Corporate Finance Standard*. 10th ed. New York: McGraw-Hill Education.
- Smith, J. 2009. "Calculating Color Temperature and Illuminance Using the TAOS TCS3414CS Digital Color Sensor." *Intelligent Opto Sensor Designer's Notebook* 25: 1–7.
- Steiner, H. M., and H. Steiner. 1996. *Engineering Economic Principles*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill.
- Wyszecki, G., and W. S. Stiles. 2000. *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*. 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Yeh, M. K., and Y. L. Huang. 2008. "Thermal Analysis and Optimal Design of Lamp Type Light-emitting Diodes." *Journal of the Chinese Institute of Engineers* 31 (2): 271–278. doi:10.1080/02533839.2008.9671380.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายจรัสศักดิ์ ปรีชาวีรกุล
วัน เดือน ปีเกิด	8 ธันวาคม 2516
ที่อยู่	81/37 หมู่ 2 ต.คลองหก อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120
ประวัติการศึกษา	2544 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
สถานที่ทำงาน	คณะเทคโนโลยีสื่อสารมวลชน สาขาเทคโนโลยีทางภาพและเสียง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ความชำนาญเฉพาะด้าน	การจัดแสงภายในและภายนอกสตูดิโอสำหรับการผลิตรายการโทรทัศน์ และภาพยนตร์

### ผลงานทางวิชาการ

1. J. Prechaveerakul and C. Chompoo-Inwai, "Performance Comparison between High Power Light-Emitting Diode (HP-LED) and Hydrargyrum Medium-Arc Iodide (HMI) in Studio Lighting System", Annual Conference on Engineering & Information Technology 2014 (ACEAIT 2014), Tokyo Japan, 28-30 March 2014.
2. J. Prechaveerakul and C. Chompoo-Inwai, "Lighting Distribution Comparison between High Power Light-Emitting Diode (HP-LED) and Hydrargyrum Medium-Arc Iodide (HMI) in Studio Lighting System", International Congress on Engineering and Information 2014 (ICEAI 2014), Beijing China, 22-24 May 2014.
3. J. Prechaveerakul and C. Chompoo-Inwai, "Reference Illuminant Selection Study between High Power LED and HMI Luminaries in Studio Lighting Application for CRI Calculations," in Proc. ACEAIT 2015, pp. 396-407.
4. J. Prechaveerakul and C. Chompoo-Inwai, "Engineering Economic Analysis between High Power LED and Hydrargyrum Medium-Arc Iodide Luminaries in Studio Lighting Application," in Proc. ICEMS2015, pp. 1-4.
5. J. Prechaveerakul and C. Chompoo-Inwai, Optical and Electrical Performance Comparisons between High Power LED and HMI Studio Lighting including the Engineering Economics analysis", Journal of the Chinese Institute of Engineers (JCIE), vol. 40, Issue 04, May, 2017, pp. 318-328.