



การประยุกต์ใช้ท่อนำแสงบนหลังคาทดแทนแสงประดิษฐ์เพื่อประหยัดพลังงานภายใน
อาคาร



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การประยุกต์ใช้ท่อนำแสงบนหลังคาทดแทนแสงประดิษฐ์เพื่อประหยัดพลังงานภายใน
อาคาร



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การประยุกต์ใช้ท่อนำแสงบนหลังคาทดแทนแสงประดิษฐ์เพื่อประหยัดพลังงาน

ภายในอาคาร "

ของ จิราพร มหาวัน

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถกร ทองทา)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สันต์ จันทร์สมศักดิ์)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกวียงศักดิ์ พรหมภักดี)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉันทนา พันธุ์เหล็ก)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย มณีวรรณ)

อนุมัติ

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.กรองกาญจน์ ชูทิพย์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การประยุกต์ใช้ท่อนำแสงบนหลังคาทดแทนแสงประดิษฐ์เพื่อประหยัดพลังงานภายในอาคาร
ผู้วิจัย	จิราพร มหาวัน
ประธานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถกร ทองทา
กรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สันต์ จันทร์สมศักดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ พรหมภักดี
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2564
คำสำคัญ	ท่อนำแสง ตัวประกอบแสงธรรมชาติ การส่งผ่านแสง ค่าการส่องสว่าง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาค่าการส่องสว่างแสง ประสิทธิภาพการส่งผ่านแสง การกระจายแสงบนพื้น และตัวประกอบแสงธรรมชาติ ของท่อนำแสงแนวตั้งซึ่งใช้วัสดุต่างชนิดกันเพื่อเพิ่มความสว่างในอาคาร และลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากแสงประดิษฐ์ โดยศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของท่อนำแสงแนวตั้งที่ทำจากวัสดุโลหะผสมอลูมิเนียม และท่อนำแสงแนวตั้งที่ทำจากวัสดุโลหะผสมสังกะสี ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 0.25 และ 0.30 เมตร และมีความยาว 0.50 1.00 และ 1.50 เมตร ตามลำดับ ที่ใช้ทดสอบการนำแสงสำหรับเพิ่มความสว่างภายในห้องทดลองขนาดความกว้าง 1.00 เมตร ความยาว 1.00 เมตร และความสูง 1.00 เมตร โดยใช้หลอดไฟ (LED) ขนาด 20 วัตต์ เป็นแหล่งกำเนิดแสง สำหรับการจำลองแสงในสภาวะควบคุมที่มุมตกกระทบ 0° 10° 20° 30° 40° 50° 60° 70° และ 80° ตามลำดับ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม และนำไปทดสอบภายใต้สภาพแวดล้อมอากาศจริง จากการศึกษาพบว่ามุมของแสงที่ตกกระทบภายในท่อนำแสงเพิ่มขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น จะมีผลต่อการส่งผ่านแสงเพิ่มขึ้น ขณะที่ความยาวของท่อนำแสงเพิ่มขึ้น จะมีผลต่อการส่งผ่านแสงลดลงที่บริเวณปลายท่อของท่อนำแสงอีกด้าน ส่วนท่อนำแสงชนิดโลหะผสมอลูมิเนียมมีการส่งผ่านแสงภายในท่อนำแสงดีกว่าท่อนำแสงชนิดโลหะผสมสังกะสี และวิธีซีในทุกรณี สำหรับเงื่อนไขที่ศึกษาภายใต้สภาพอากาศจริงพบว่า ค่าความส่องสว่างบนพื้นห้องทดสอบอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานการส่องสว่าง ในช่วงเวลา 9.00-15.00 น. ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 300 ถึง 750 ลักซ์ และมีค่า Daylight Factor ร้อยละ 1.5-2.5 ส่งผลทำให้ช่วงเวลาดังกล่าว สามารถประหยัดพลังงานจากระบบแสงประดิษฐ์ของอาคารได้



Title	APPLICATION OF SOLAR TUBE INTEGRATING WITH ROOFTOP TO REPLACE ARTIFICIAL LIGHT FOR BUILDING ENERGY SAVING.
Author	JIRAPHORN MAHAWAN
Advisor	Assistant Professor Dr. Atthakorn Thongtha
Co-Advisor	Assistant Professor Sant Chansomsak, Ph.D. Assistant Professor Kriangsak Prompak, Ph.D.
Academic Paper	M.S. Thesis in Applied Physics, Naresuan University, 2021
Keywords	Solar tube Daylight Factor light transmission Illuminance

ABSTRACT

This research studies the illuminance, light transmission efficiency, light distribution on the floor, and daylight factor of the vertical solar tubes integrating the building envelope. These tubes were made from different materials to investigate an increase of indoor illuminance and a reduction of energy demand from the artificial lighting. The vertical light tubes with diameters of 0.20 m, 0.25 m, and 0.30 m and lengths of 0.50 m, 1.00 m and 1.50 m were designed in a testing room model, with dimensions of 1 m x 1 m x 1 m. A 20-W light-emitting diode (LED) lamp was used as the light source for the lighting simulations, which was placed away from the top of the light tube. The incident elevation angle of the light source was changed between 0° and 80° for obtaining the optimal condition and testing the actual weather condition. According to the study, it was found that an increase of the incidence angle of light, an increase of the diameters of solar tube and a decrease of tube length affected to an increase of light transmission efficiency. The commercial aluminum alloy tube promotes greater light transmission and daylight factor when compared with the commercial zinc alloy tube and the Polyvinylchloride tube in each condition. In the actual weather, average illuminant values on the floor in the range of 300–750 lux and the 1.5% -2.5% daylight factor were observed between 9:00 a.m. and 3:00 p.m. This demonstrates to decrease the demand of energy

consumption in the artificial lighting of buildings.



ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถกร ทองทา ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาเป็นทีปรึกษา พร้อมทั้งให้คำแนะนำ ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมอัน ประกอบไปด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกรียงศักดิ์ พรหมภักดิ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สันต์ จันท์สมศักดิ์ ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการวิทยานิพนธ์อันประกอบไปด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย มณีวรรณ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉันทนา พันธุ์เหล็ก ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนแก้ไข ข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ และทรงคุณค่า ขอขอบพระคุณผู้เชี่ยวชาญทุกท่าน ที่กรุณาตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการ วิจัย ได้กรุณาช่วยปรับปรุง แก้ไขข้อบกพร่อง และให้คำแนะนำในการสร้างเครื่องมือให้ถูกต้องสมบูรณ์ ยิ่งขึ้น รวมทั้งบุคคลที่ผู้วิจัยได้อ้างอิงทางวิชาการตามที่ปรากฏในบรรณานุกรม เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบ ขอบพระคุณ บิดา มารดา ของผู้วิจัยที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา คุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงจะมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบและอุทิศแต่ผู้มีพระคุณทุก ๆ ท่าน ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาและปรับปรุงการใช้พลังงาน ทดแทนในประเทศและผู้ที่มีสนใจบ้างไม่มา

จิราพร มหาวัน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
ประกาศคุณูปการ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพ.....	ฑ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาของปัญหา.....	1
จุดมุ่งหมายของการศึกษา.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แสงอาทิตย์และส่วนประกอบของแสง.....	4
2.1.1 ทฤษฎีแสง (32).....	4
2.1.2 คุณสมบัติของแสง.....	5
2.1.3 แสงธรรมชาติ (33).....	10
2.2 ท่อนำแสง (34).....	11
2.3 คุณสมบัติของวัสดุ.....	12
2.3.1 คุณสมบัติอะลูมิเนียม (35).....	12
2.3.2 คุณสมบัติสังกะสี (36).....	16

2.3.3	คุณสมบัติพีวีซี (37).....	17
2.4	ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน (38).....	20
2.4.1	การถ่ายเทความร้อน	20
2.5	ทฤษฎีด้านสภาพท้องฟ้า (39).....	23
2.6	ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ในประเทศไทย [40]	24
2.7	รังสีแสงอาทิตย์ขณะภาวะอากาศแจ่มใส (41).....	25
2.7.1	รังสีตกกระทบบนพื้นราบแนวระดับ.....	25
2.7.2	รังสีตรงและรังสีกระจาย	30
2.8	ผลกระทบของบรรยากาศโลกต่อการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ (42)	30
2.8.1	บรรยากาศกับการดูดกลืนพลังงานการแผ่รังสี.....	30
2.9	เครื่องมือสำหรับวัดรังสีอาทิตย์ (43).....	32
2.9.1	เครื่องวัดรังสีรวม (pyranometer)	32
2.9.2	เครื่องวัดรังสีกระจาย.....	34
2.10	ค่าการส่องสว่างภายในอาคาร (44)	35
2.10.1	ทฤษฎีการส่องสว่าง (44).....	35
2.10.2	มาตรฐานแสงสว่าง (45).....	36
2.11	เครื่องวัดความเข้มแสง (46).....	39
2.12	หลอดไฟ LED (47).....	40
2.13	ความสูงของห้องหรืออาคาร (48).....	40
2.14	การกระจายของแสงจากแหล่งกำเนิดแบบจุด (49).....	42
2.15	ประสิทธิภาพการส่องสว่าง (50).....	43
2.16	องค์ประกอบแสงธรรมชาติ (Daylight Factor : DF) (51).....	43

2.17 เซนเซอร์วัดความส่องสว่างของแสง (52).....	44
2.17.1 คุณสมบัติทางเทคนิค.....	44
2.17.2 การออกแบบและสร้างเครื่องวัดความส่องสว่าง	44
2.18 การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ (53)	46
2.19 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	48
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	50
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	50
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	50
3.3 การออกแบบห้องทดสอบและท่อ	51
3.3.1 ห้องทดสอบศึกษาภายใต้สภาวะควบคุม	51
3.3.2 ห้องทดสอบภายใต้สภาวะแวดล้อมอากาศจริง	51
3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล	53
3.4.1 ศึกษาประสิทธิภาพของท่อนำแสงในสภาวะแวดล้อมจำลอง	53
3.4.2 ศึกษาประสิทธิภาพของท่อนำแสงในสภาวะอากาศจริง.....	55
3.4.3 ศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์	56
3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยสภาพอากาศจริง	57
3.6 ขั้นตอนการศึกษางานวิจัย	58
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	60
4.1 ค่าความสว่างเฉลี่ยบริเวณปลายท่อด้านบนและปลายท่อด้านล่างของท่อนำแสง แนวตั้ง	60
4.1.1 ค่าความส่องสว่างปลายท่อด้านบนของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียม Al 30,50 โลหะผสมสังกะสี Zn 30,50 และพีวีซี PVC 30,50.....	60

4.1.2	ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมและโลหะผสมสังกะสี ความยาว 0.50 เมตร Al 20,50 Al 25,50 Zn 20,50 Zn 25,50 ..	64
4.1.3	ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียม และโลหะผสมสังกะสี ความยาว1.00 เมตร Al 20,100 Al 25,100 Al 30,100 Zn 20,100 Zn 25,100 Zn 30,100.....	67
4.1.4	ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมและโลหะผสมสังกะสี ความยาว1.50 เมตร Al 20,150 Al 25,150 Al 30,150 Zn 20,150 Zn 25,150 Zn 30,150.....	72
4.2	ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียม และโลหะผสมสังกะสีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 0.25 0.30 เมตร และความยาว 0.50 1.00 1.50 เมตร.....	79
4.2.1	ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยของท่อนำแสงแนวตั้งที่ทำจากโลหะผสมอลูมิเนียม..	79
4.2.2	ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยของท่อนำแสงแนวตั้งที่ทำจากโลหะผสมสังกะสี.....	79
4.3	ประสิทธิภาพการส่องสว่างของท่อนำแสงแนวตั้ง.....	82
4.3.1	ท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 0.25 และ0.30 เมตร ความยาว 0.50 1.00 และ1.50 เมตร.....	82
4.3.2	ท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมสังกะสีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 0.25 และ0.30 เมตร และความยาว 0.50 1.00 และ 1.50 เมตร.....	85
4.4	ค่าความส่องสว่างบริเวณห้องทดสอบ.....	88
4.5	Daylight Factor (%).....	94
4.6	ผลการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์.....	95
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	99
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	99
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	100

บรรณานุกรม..... 101

ประวัติผู้วิจัย..... 108



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 แสดงค่าการนำความร้อนของโลหะชนิดต่าง ๆ(38)	21
ตาราง 2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสว่างในอาคารตามมาตรฐาน CIE ,IES หน่วยเป็น ลักซ์ (45).....	38
ตาราง 3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสว่างในโรงงานตามมาตรฐาน CIE และ IES (45).....	39
ตาราง 4 ระยะดิ่งที่เหมาะสมของห้องหรืออาคารในการทำกิจกรรมต่าง ๆ (48).....	41
ตาราง 5 ค่าองค์ประกอบแสงธรรมชาติที่เหมาะสมกับกิจกรรมต่าง ๆ (51).....	44
ตาราง 6 แสดงข้อหาสัญญาณของบอร์ด (52).....	46
ตาราง 7 ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยบริเวณด้านบนและปลายท่อด้านล่างของท่อนำแสงโลหะผสมอลูมิเนียม	77
ตาราง 8 ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยบริเวณด้านบนและปลายท่อด้านล่างของท่อนำแสงโลหะผสมสังกะสี	78
ตาราง 9 ราคาวัสดุที่ใช้ทำท่อนำแสง.....	96
ตาราง 10 ราคาวัสดุและจำนวนท่อที่จะนำไปติดตั้งกับห้องเก็บของ.....	96
ตาราง 11 ค่าจ้างเหมาทำท่อนำแสง และติดตั้งบนหลังคาห้อง.....	96
ตาราง 12 ค่าอุปกรณ์ วัสดุ และค่าจ้างในการทำท่อนำแสงและติดตั้งกับอาคาร	96
ตาราง 13 การคำนวณค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์.....	97
ตาราง 14 ระยะเวลาคืนทุน อัตราผลตอบแทนภายใน และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ	98

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงที่ตามองเห็น (32).....	5
ภาพ 2 กฎการสะท้อนของแสง (32).....	6
ภาพ 3 การสะท้อนของแสง (32).....	7
ภาพ 4 สเปกตรัมของแสงขาว (32).....	8
ภาพ 5 การสะท้อนกลับหมด (32).....	9
ภาพ 6 โครงสร้างของพลาสติก PVC.....	18
ภาพ 7 สภาพท้องฟ้าแบบ Overcast sky, Clear sky, Partly cloudy sky (39).....	24
ภาพ 8 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทย จัดทำในปี พ.ศ. 2542 (40).....	25
ภาพ 9 สมการของเวลาในรอบปี (41).....	26
ภาพ 10 มุมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณรังสีตกกระทบตั้งฉาก (ก) มองจากขั้วโลกใต้ แสดงมุมชั่วโมง (ผ่านกระดาษไม่จำเป็นต้องอยู่ในระนาบโคจรของโลก) (ข) แสดงส่วนสัมพันธ์ของมุมเส้นรุ้ง และมุมเดคลิเนชัน (41).....	28
ภาพ 11 มุมเซนนิทสุริยะ อัลติจูด และแอสซิมุม ที่สัมพันธ์กับพื้นที่ราบระดับบนพื้นโลก (41).....	28
ภาพ 12 สเปกตรัมสุริยะนอกชั้นบรรยากาศและที่ระดับพื้นดิน (42).....	31
ภาพ 13 เครื่องวัดรังสีรวมแบบโฟโตโวลตาอิกที่ผลิตโดยบริษัทคิปป์แอนด์โซเนนซ์ (43).....	32
ภาพ 14 กราฟของการตอบสนองต่อสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ของเครื่องวัดรังสีรวมแบบโฟโตโวลตาอิกที่ผลิตโดยบริษัทคิปป์แอนด์โซเนนซ์ ($R\lambda$ คือการตอบสนอง $I\lambda$ คือสเปกตรัมรังสีอาทิตย์และ λ เป็นความยาวคลื่น) (43).....	33
ภาพ 15 เครื่องวัดรังสีรวมแบบเทอร์โมไพล์ที่ผลิตโดยบริษัทคิปป์แอนด์โซเนนซ์ (43).....	33

ภาพ 16 กราฟแสดงการตอบสนองต่อสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ของเครื่องวัดรังสีรวมแบบเทอร์โมไฟล์ที่ผลิตโดยบริษัทคิปป์แอนด์โซเนนซ์ ($R\lambda$ คือการตอบสนอง $I\lambda$ คือสเปกตรัมรังสีอาทิตย์และ λ เป็นความยาวคลื่น) (43).....	34
ภาพ 17 เครื่องวัดรังสีกระจายแบบใช้วงแหวนบังรังสีตรงซึ่งผลิตโดยบริษัทคิปป์แอนด์โซเนนซ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากรซึ่งติดตั้งที่สถานีเชียงใหม่ (43).....	35
ภาพ 18 แหล่งกำเนิดแสงที่ส่องสว่างในแนวระนาบ (49).....	43
ภาพ 19 เซนเซอร์GY-30 (52).....	45
ภาพ 20 ห้องทดสอบภายใต้สภาวะควบคุม.....	51
ภาพ 21 ห้องทดสอบภายใต้สภาวะแวดล้อมจริง.....	52
ภาพ 22 ห้องทดสอบที่ติดตั้งท่อนำแสงแนวตั้ง.....	54
ภาพ 23 ตำแหน่งการบันทึกค่าความส่องสว่างของท่อนำแสงแนวตั้ง (ก) ด้านบน (ข) ด้านล่าง.....	54
ภาพ 24 ตำแหน่งการบันทึกค่าความส่องสว่างบริเวณพื้นห้อง.....	55
ภาพ 25 ห้องทดสอบสภาวะอากาศจริง.....	56
ภาพ 26 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองภายใต้สภาวะห้องควบคุม.....	58
ภาพ 27 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองภายใต้สภาวะอากาศจริง.....	59
ภาพ 28 การกระจายความส่องสว่างบริเวณปลายท่อด้านบนของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียม โลหะผสมสังกะสี และพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.30 เมตร ความยาว 0.50 เมตร.....	62
ภาพ 29 การกระจายความส่องสว่างบริเวณปลายท่อด้านล่างของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสม อลูมิเนียม โลหะผสมสังกะสี และพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.30 เมตร ความยาว 0.50 เมตร.....	63

ภาพ 38 ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยบริเวณด้านบนท่อและปลายท่อด้านล่างของท่อนำแสง
แนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียม (a) โลหะผสมอลูมิเนียม $D = 0.20$ m, $L = 0.50$ m (b) โลหะ
ผสมอลูมิเนียม $D = 0.25$ m, $L = 0.50$ m (c) โลหะผสมอลูมิเนียม $D = 0.30$ m, $L = 0.50$
m (d) โลหะผสมอลูมิเนียม $D = 0.20$ m, $L = 1.00$ m (e) โลหะผสมอลูมิเนียม $D = 0.25$ m,
 $L = 1.00$ m (f) โลหะผสมอลูมิเนียม $D = 0.30$ m, $L = 1.00$ m (g) โลหะผสมอลูมิเนียม D
 $= 0.20$ m, $L = 1.50$ m (h) โลหะผสมอลูมิเนียม $D = 0.25$ m, $L = 1.50$ m (i) โลหะผสม
อลูมิเนียม $D = 0.30$ m, $L = 1.50$ m.....80

ภาพ 39 ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยบริเวณด้านบนท่อและปลายท่อด้านล่างของท่อนำแสง
แนวตั้งโลหะผสมสังกะสี (a) โลหะผสมสังกะสี $D = 0.20$ m, $L = 0.50$ m (b) โลหะผสม
สังกะสี $D = 0.25$ m, $L = 0.50$ m (c) โลหะผสมสังกะสี $D = 0.30$ m, $L = 0.50$ m (d) โลหะ
ผสมสังกะสี $D = 0.20$ m, $L = 1.00$ m (e) โลหะผสมสังกะสี $D = 0.25$ m, $L = 1.00$ m (f)
โลหะผสมสังกะสี $D = 0.30$ m, $L = 1.00$ m (g) โลหะผสมสังกะสี $D = 0.20$ m, $L = 1.50$ m
(h) โลหะผสมสังกะสี $D = 0.25$ m, $L = 1.50$ m (i) โลหะผสมสังกะสี $D = 0.30$ m, $L = 1.50$
m.....81

ภาพ 40 ประสิทธิภาพการส่องสว่างของท่อนำแสงโลหะผสมอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง
0.20 0.25 และ 0.30 เมตร (a) ท่อนำแสงโลหะผสมอลูมิเนียมความยาว 0.50 เมตร (b)
ท่อนำแสงโลหะผสมอลูมิเนียมความยาว 1.00 เมตร (c) ท่อนำแสงโลหะผสมอลูมิเนียม
ความยาว 1.50 เมตร83

ภาพ 41 ประสิทธิภาพการส่องสว่างของท่อนำแสงโลหะผสมอลูมิเนียมความยาว 0.50
1.00 และ 1.50 เมตร (a) ท่อนำแสงโลหะผสมอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 เมตร (b)
ท่อนำแสงโลหะผสมอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 เมตร (c) ท่อนำแสงโลหะผสม
อลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร.....84

ภาพ 42 ประสิทธิภาพการส่องสว่างของท่อนำแสงโลหะผสมสังกะสีเส้นผ่านศูนย์กลาง
0.20 0.25 และ 0.30 เมตร (a) ท่อนำแสงโลหะผสมสังกะสีความยาว 0.50 เมตร (b) ท่อนำ
แสงโลหะผสมสังกะสีความยาว 1.00 เมตร (c) ท่อนำแสงโลหะผสมสังกะสีความยาว 1.50
เมตร.....86

ภาพ 43 ประสิทธิภาพการส่องสว่างของท่อนำแสงโลหะผสมสังกะสีความยาว 0.50 1.00 และ 1.50 เมตร (a) ท่อนำแสงโลหะผสมสังกะสีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 เมตร (b) ท่อนำแสงโลหะผสมสังกะสีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 เมตร (c) ท่อนำแสงโลหะผสมสังกะสีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร.....	87
ภาพ 44 ค่าความสว่างเฉลี่ยบริเวณพื้นห้องทดสอบที่ติดตั้งท่อนำแสงตั้งโลหะผสม อลูมิเนียมวันที่ 1 วันที่ 10 มีนาคม 2564.....	90
ภาพ 45 ค่าความสว่างเฉลี่ยบริเวณพื้นห้องทดสอบที่ติดตั้งท่อนำแสงตั้งโลหะผสม อลูมิเนียมวันที่ 2 วันที่ 11 มีนาคม 2564.....	91
ภาพ 46 ค่าความสว่างเฉลี่ยบริเวณพื้นห้องทดสอบที่ติดตั้งท่อนำแสงตั้งโลหะผสม อลูมิเนียมวันที่ 3 วันที่ 12 มีนาคม 2564.....	92
ภาพ 47 ค่าความสว่างเฉลี่ยบริเวณพื้นห้องทดสอบที่ติดตั้งท่อนำแสงแนวตั้งแบบ 3 มิติ	93
ภาพ 48 ค่าความสว่างเฉลี่ยบริเวณพื้นห้องทดสอบที่ติดตั้งท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสม อลูมิเนียมสภาวะอากาศจริงระยะเวลา 3 วัน.....	94
ภาพ 49 ค่า Daylight Factor ของวันที่ 10 - 12 มีนาคม 2564.....	95

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาของปัญหา

ประเทศไทยมีพื้นที่ตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรของโลกส่งผลให้มีลักษณะเป็นแบบร้อนชื้น รวมถึงพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศได้รับรังสีรวมของดวงอาทิตย์ค่อนข้างสูงมีค่าเฉลี่ยรายวันประมาณ 18.2 MJ/m²-day (1-3) โดยทั่วไปมีการใช้พลังงานในภาคอาคารถึงร้อยละ 50 จากการใช้พลังงานทั้งหมด ในส่วนนี้มีการใช้พลังงานกับระบบปรับอากาศร้อยละ 65 ระบบแสงสว่างประมาณร้อยละ 25 และอื่น ๆ อีกประมาณร้อยละ 10 ของการใช้พลังงานทั้งหมดในอาคาร เพื่อลดการใช้พลังงานจากระบบแสงสว่างในอาคารจึงมีการประยุกต์ใช้แสงธรรมชาติร่วมกรอบอาคาร (4-5) การใช้แสงสว่างที่ผ่านมาจากกระจกหน้าต่าง สามารถใช้ได้กับบางพื้นที่ในอาคารเท่านั้น ทำให้การประยุกต์ใช้ท่อนำแสงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการส่องสว่างภายในอาคาร มีการติดตั้งท่อนำแสงแนวตั้งภายในอาคาร (6) พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางท่อนำแสงเพิ่มขึ้น ค่าการส่องสว่างเฉลี่ยพื้นที่ใช้งานมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ขณะที่ความยาวท่อเพิ่มขึ้น ค่าการส่องสว่างเฉลี่ยพื้นที่ใช้งานมีค่าลดลง สำหรับท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ค่า aspect ratio ลดลง (7) อวีรุทธ์ ศรีสุธาพรธณ (8) และ วชิรินทร์ วิมานจตุรงค์ และคณะ (9) ได้ทำการศึกษาว่าปริมาณแสงภายนอกประสิทธิภาพการเพิ่มขึ้นเกิดจากมุมที่ตกกระทบที่มีขนาดเล็กและทำให้มีประสิทธิภาพการส่องสว่างมากขึ้น และสามารถประหยัดพลังงานได้ถึงประมาณร้อยละ 26 ต่อปี เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานจากแสงประดิษฐ์สำหรับการประยุกต์ใช้ท่อนำแสงธรรมชาติแนวนอน (10) สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าแสงสว่าง ภายในอาคารได้ถึง 0.13 kW/day และลดการใช้พลังงานจากแสงประดิษฐ์ได้ถึงร้อยละ 70 โดยการส่องสว่างและการกระจายแสงของท่อนำแสงจะขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มของแสงและมุมของดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบ ขณะที่แสงส่องสว่างเข้ามาภายในอาคาร ความร้อนจะเข้าสู่ภายในอาคารด้วยส่งผลต่อภาระการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ (11) มีการศึกษาหลาย ๆ งานวิจัย โดย Shao และ Riffat (12) ศึกษาโดยใช้ท่อนำแสงไประบายอากาศโดย Solar Heating การระบายความร้อนตามธรรมชาติมีการศึกษาโดยใช้ท่อนำแสง การศึกษาท่อนำแสงร่วมกับการระบายโดยวิธีธรรมชาติมีการศึกษาโดยวิธีธรรมชาติ ท่อนำแสงในแนวตั้งมีการศึกษาโดย Canziani และคณะ (13) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาในตอนกลางวันมีการศึกษาตัว tracking หรือ solar ray มีการปรับปรุงการส่องสว่างในพื้นที่ลึกได้และเพิ่มการส่องสว่างแบบสม่ำเสมอ (14) ท่อนำแสงถูก

นำมาใช้เพื่อการส่งผ่านแสงที่ระดับความส่องสว่างที่มีความสม่ำเสมอ ระดับการส่องสว่างที่มีผลต่อความสูงของอาคาร สามารถปรับปรุงโดยท่อนำแสงแนวตั้งหลาย ๆ ท่อ (15) Mohelnikova ได้ทำการศึกษาการประเมินประสิทธิภาพของท่อนำแสงอยู่ระหว่างร้อยละ 0.2 - 0.5 เมื่อท่อนำแสงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต่างกัน (16) นอกจากนี้ยังมีการใช้การส่งผ่านแสง DPF ของท่อนำแสงเพื่อกำหนดประสิทธิภาพการส่องสว่างซึ่งอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างแสงภายในและภายนอกทั้งหมด (17-19) ระบบแสงสว่างที่ดีควรมีค่า Daylight Factor (DF) ร้อยละ 1 - 2 สำหรับกิจกรรมที่ทำในที่อยู่อาศัยมีค่า Daylight Factor (DF) ร้อยละ 2 - 4 สำหรับกิจกรรมที่ทำในสำนักงานตามมาตรฐานของ CIE (20) Vasilakopoulou และคณะ (21) เส้นผ่านศูนย์กลางมีความสัมพันธ์กับค่าความส่องสว่างภายในเฉลี่ยของอาคาร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมีผลต่อค่าความส่องสว่างประสิทธิภาพของท่อนำแสงที่มีการศึกษาในเขตร้อนชื้นจากผลที่ศึกษาได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอาคารช่วยลดการใช้พลังงานได้ หลายประเทศมีการใช้ท่อนำแสงในสภาพอากาศกึ่งเขตร้อน (22-26) และมีการกระจายแสงที่สม่ำเสมอสามารถนำท่อนำแสงไปใช้ร่วมกับอาคารได้

ประเทศไทยมีการใช้แผ่นอลูมิเนียม และแผ่นสังกะสีกันอย่างแพร่หลายสามารถนำไปใช้งานในด้านการก่อสร้าง ด้านการขนส่ง ด้านบรรจุภัณฑ์ ในงานก่อสร้างนำไปใช้ในวัสดุผนังหลังคาและเป็นวัสดุที่นำไปสู่ด้านข้างอาคารหรือผนังอาคาร เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ทนต่อและป้องกันการกัดกร่อน ทนทานต่อสารเคมีมากกว่าแผ่นเหล็ก (27-31) เพื่อที่จะใช้ความส่องสว่างของอาคารผ่านท่อนำแสงในแนวตั้งให้แสงส่องผ่านเข้ามาใช้ภายในอาคาร ดังนั้นเพื่อลดการใช้พลังงานและประยุกต์แสงสว่างจากธรรมชาติมาใช้ร่วมกับอาคารเพื่อลดการใช้พลังงาน และนำแสงสว่างจากภายนอกเข้ามาใช้ภายในอาคาร งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาหาวัสดุทางเลือกเพื่อมาประยุกต์ใช้ทำท่อนำแสง เพื่อทดแทนการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบแสงสว่างโดยจะมีการออกแบบท่อนำแสงแนวตั้งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวที่แตกต่างกัน และจะมีการศึกษาประสิทธิภาพการส่องสว่างของแสงธรรมชาติ รวมถึงศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

จุดมุ่งหมายของการศึกษา

1. การออกแบบของท่อนำแสง และศึกษาประสิทธิภาพการนำแสงของท่อนำแสงเพื่อประยุกต์ใช้ในอาคาร
2. ศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการประยุกต์ใช้ท่อนำแสงร่วมกับห้องทดสอบ

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพของท่อนำแสงที่มีความยาว 0.5 m 1.0 m และ 1.5 m เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.2 m 0.25 m และ 0.3 m โดยเลือกใช้วัสดุ 3 ชนิด คือ อะลูมิเนียม สังกะสี และท่อ PVC เพื่อดูค่าประสิทธิภาพความส่องสว่างของชนิดวัสดุที่มีความยาวต่างกัน และที่เส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน โดยที่จะควบคุมปริมาณของแสงที่มูม 0 - 80 องศา วัดมูมของแสงที่ตกกระทบมูมต่าง ๆ
2. ศึกษาเฉพาะส่วนของท่อนำแสงในส่วนของการส่งผ่านแสงธรรมชาติ
3. สร้างห้องทดสอบขนาดความกว้าง 1 m x ความยาว 1 m x ความสูง 1.75 m เพื่อศึกษาค่าความส่องสว่างภายในห้องทดสอบขนาดจำลอง
4. นำไปทดสอบในสภาวะอากาศจริงโดยที่จะศึกษาจากเงื่อนไขที่เหมาะสมในเงื่อนไขที่ 2 พิจารณาจากขนาดที่มีความเหมาะสมเพื่อนำไปใช้งานในสภาพอากาศจริงเปรียบเทียบกับอาคารปกติ โดยที่จะทำการวัดค่าอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่ง
5. สร้างห้องทดสอบเพื่อนำไปทดสอบในสภาวะอากาศจริงขนาดความกว้าง 1 m x ความยาว 1 m x ความสูง 1.75 m เพื่อศึกษาค่าความส่องสว่างภายในห้องทดสอบสภาวะอากาศจริง
6. นำค่าความส่องสว่างไปใช้กับโรงจอดรถ โกดังเก็บของ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

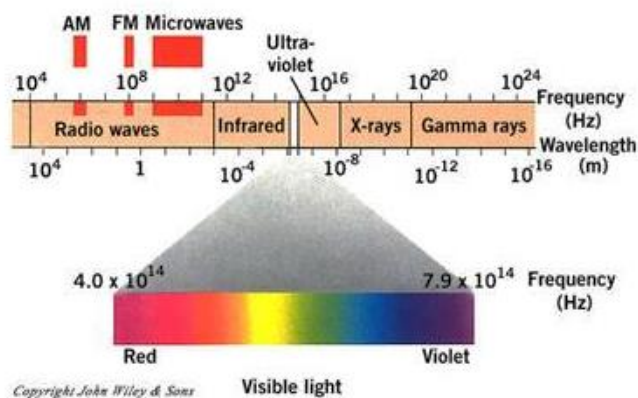
ในบทนี้จะกล่าวเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้แสงธรรมชาติร่วมกับท่อนำแสงเข้ามาใช้ภายในอาคารเพื่อให้เกิดการใช้ประโยชน์ความส่องสว่างภายในอาคารด้วยวิธีการที่เหมาะสม การนำแสงธรรมชาติมาใช้เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพการส่งผ่านของแสงจะต้องทำการลดความร้อนจากแสงธรรมชาติโดยตรงที่เข้ามาภายในอาคาร เพื่อประหยัดพลังงานของระบบไฟฟ้าส่องสว่างผ่านระบบท่อนำแสงธรรมชาติ จึงต้องศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

2.1 แสงอาทิตย์และส่วนประกอบของแสง

2.1.1 ทฤษฎีแสง (32)

แสง (light) เป็นการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในบางส่วนของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า หมายถึง แสงที่มองเห็นได้ซึ่งตามนุษย์มองเห็นได้ และทำให้เกิดสัมผัสการรับรู้ดังภาพ 1 แสงที่มองเห็นได้นิยามว่ามีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400 – 700 นาโนเมตร ระหว่างอินฟราเรด (ที่มีความยาวคลื่นมากกว่า และมีคลื่นกว้างกว่านี้) และอัลตราไวโอเล็ต (ที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า และมีคลื่นแคบกว่านี้) ความยาวคลื่นนี้หมายถึงความถี่ช่วงประมาณ 430 – 750 เทระเฮิรตซ์

แสงช่วงที่ตาสามารถมองเห็นมีค่าอยู่ระหว่าง 400 - 700 นาโนเมตร และมีความถี่อยู่ในช่วง 103 - 105 เฮิรตซ์ โดยแสงสีม่วงซึ่งมีความยาวคลื่นน้อยที่สุดหรือความถี่สูงสุด ส่วนแสงสีอื่น ๆ ให้สเปกตรัมของแสงในช่วงนี้ก็มีความยาวคลื่นสูงขึ้นตามลำดับจนถึงแสงสีแดงมีความยาวคลื่นมากที่สุดหรือมีความถี่ต่ำที่สุด ดังภาพ 2



ภาพ 1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงที่ตามองเห็น (32)

2.1.2 คุณสมบัติของแสง

คุณสมบัติของแสง แสงมีคุณสมบัติเป็นทั้งคลื่นและอนุภาค แสงจะมีคุณสมบัติที่สำคัญ 4 ข้อได้แก่

- 1) เดินทางเป็นเส้นตรง (Rectilinear propagation)
- 2) การหักเห (Refraction)
- 3) การสะท้อน (Reflection)
- 4) การกระจาย (Dispersion)

การเดินทางแสงเป็นเส้นตรงในตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเห (refractive index ; n) ของแสงเท่ากัน แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรงโดยค่าดัชนีการหักเหของแสง หรือ ค่า n สามารถหาได้จาก

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

โดยที่ n คือ ดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางนั้น ๆ

c คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ

v คือ ความเร็วแสงในตัวกลางนั้น ๆ

การหักเหเมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งแสงบางส่วนสะท้อนกลับไปในตัวกลางเดิม ส่วนแสงที่เหลือจะหักเหเข้าไปในตัวกลางใหม่ ในการหักเหความถี่ของแสงก่อนและหลังการหักเหเท่าเดิมเสมอ แต่แสงจะมีความเร็วลดลงเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลาง ดังนั้นเราจึงเราจึงทราบได้ว่าความยาวคลื่นจะต้องเปลี่ยนไปเป็นสัดส่วนกับความเร็ว ส่วนทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงนั้นส่วนมากแล้วจะเปลี่ยนเมื่อเทียบกับทิศทางเดิม ยกเว้นกรณีเดียว คือ กรณีที่มุมตกกระทบเป็นศูนย์

สมการที่ใช้ในการอธิบายเรื่องการหักเหของแสงคือกฎของสเนลล์ ดังนี้

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} \quad (2)$$

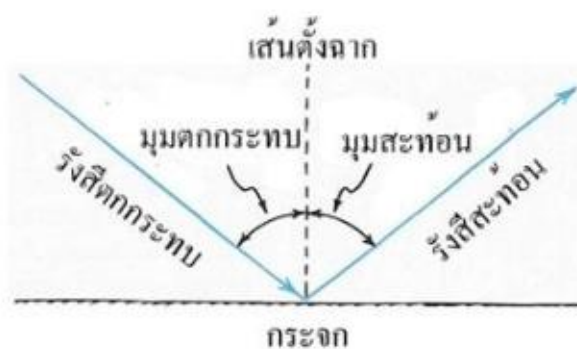
โดยที่ n_1 คือ ดัชนีหักเหของตัวกลาง 1

n_2 คือ ดัชนีหักเหของตัวกลาง 2

θ_1 คือ มุมตกกระทบ

θ_2 คือ มุมหักเห

การสะท้อน



ภาพ 2 กฎการสะท้อนของแสง (32)

เมื่อแสงเดินทางไปเจอขอบเขตระหว่างตัวกลางสองตัวกลางแสงบางส่วนสะท้อนกลับและบางส่วนก็จะเคลื่อนที่ต่อไปบนตัวกลางถัดไป โดยกฎการสะท้อนของแสงดังนี้

1. เส้นปกติ รังสีตกกระทบ และรังสีสะท้อนอยู่ในระนาบเดียวกัน

2. มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน

เส้นตั้งฉาก คือ เส้นที่ลากขึ้นมาตั้งฉากกับผิวการสะท้อนนั่นเอง ส่วนมุมตกกระทบกับมุมสะท้อนนั้น เวลาวัดมุมให้วัดเทียบกับเส้นปกติเท่านั้นแสดงดังภาพ 2

การสะท้อนของแสงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1. การสะท้อนแบบปกติ (Regular reflection) จะเกิดขึ้นเมื่อแสงตกกระทบกับวัตถุที่มีผิวเรียบมัน

2. การสะท้อนแบบกระจาย (Diffuse reflection) จะเกิดขึ้นเมื่อแสงตกกระทบวัตถุที่มีผิว

ขรุขระ

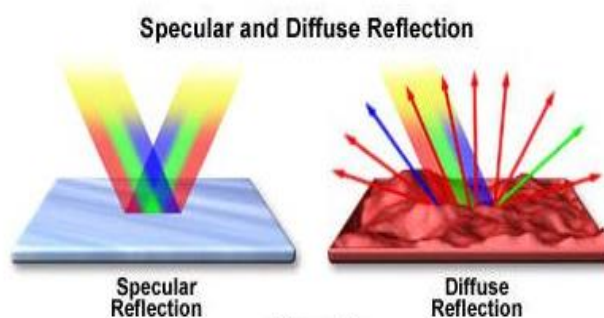


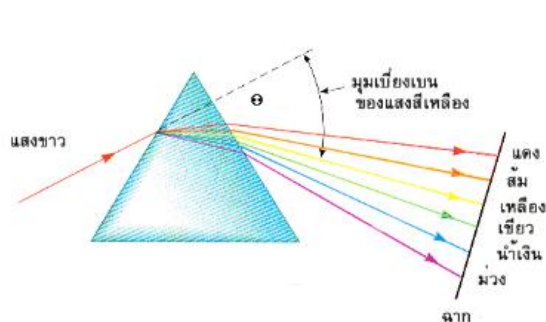
Figure 3

ภาพ 3 การสะท้อนของแสง (32)

โดยการสะท้อนของแสงไม่ว่าจะเป็นแบบใดก็ตามจะต้องเป็นไปตามกฎการสะท้อนของแสงที่ว่า " มุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ "

การกระจายแสงที่เราเห็นในธรรมชาติทุก ๆ วันเป็นแสงอาทิตย์ และแสงจากหลอดไฟเป็นแสงขาว (white light) โดยแสงขาวที่ประกอบด้วยแสงสีต่าง ๆ ได้แก่ ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด แดง เมื่อผ่านแสงเข้าไปในตัวกลางที่ยอมให้แสงผ่านได้ เช่น แก้ว หรือน้ำ จะเกิดการหัก

ของแสงขึ้น ทั้งนี้สารชนิดเดียวกันจะมีดัชนีหักเหของแสงขึ้นอยู่กับแสงสีต่าง ๆ ไม่เท่ากัน ดังนั้นเมื่อแสงผ่านเข้าไปในอุปกรณ์ เช่น ปริซึม (Prism) ซึ่งก็จะเห็นแสงกระจายออกเป็นสีต่าง ๆ และเรียกแสงที่การกระจายออกมาจากแสงขาวว่า สเปกตรัมของแสงขาว

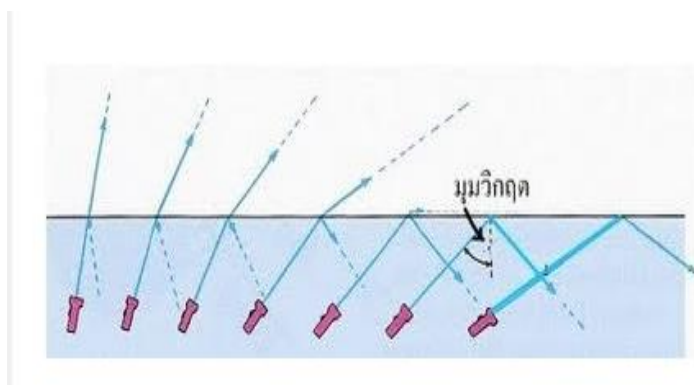


ภาพ 4 สเปกตรัมของแสงขาว (32)

จากภาพ 4 เมื่อฉากรับแสงขาวผ่านปริซึม และทำให้แสงขาวนั้นกระจายออกเป็นสีต่างมุมในภาพ 4 เรียกว่า “ มุมเบี่ยงเบน ” สังเกตได้ว่ามุมของแสงสีแดงจะมีค่าน้อยที่สุด และมุมเบี่ยงเบนของสีม่วงมีค่ามากที่สุด

การสะท้อนกลับหมด

การสะท้อนกลับหมดเป็นกรณีพิเศษหนึ่งที่แสงเดินทางจากตัวกลางหมายเลข 1 ที่มีดัชนีหักเหมากไปตัวกลาง 2 ที่มีดัชนีหักเหน้อย แสงจะเบนออกจากเส้นปกติ แต่ถ้ามันเบนออกไปมากจนเกิดกรณีว่ามุมหักเหเป็นมุมฉาก เราจะเรียกมุมตกกระทบที่ทำให้มุมหักเหเป็นมุมฉากว่า มุมวิกฤต (θ_c) แสดงดังภาพ 5



ภาพ 5 การสะท้อนกลับหมด (32)

จากนั้นถ้าแสงตกกระทบด้วยมุมที่มากกว่ามุมวิกฤตแล้วจะเกิด “ การสะท้อนกลับหมด ” นั่นคือแสงทั้งหมดเกิดการสะท้อนกลับหมด และไม่เกิดการหักเห

ลักษณะการสะท้อนของแสง (32)

การสะท้อนของแสงสามารถแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ ดังนี้

1. การสะท้อนปกติ คือการสะท้อนของแสงที่รังสีตกกระทบ รังสีสะท้อน และเส้นปกติ หรือเส้นแนวฉากอยู่บนระนาบเดียวกัน สามารถเกิดและให้ผลเหมือนกันบนวัตถุที่มีพื้นผิวเรียบ ทั้งลักษณะผิวราบและผิวโค้ง ตัวอย่างเช่น บนพื้นผิวกระจกเงา และพื้นผิวโลหะต่าง ๆ โดยที่การสะท้อนปกตินี้ มุมตกกระทบนั้นจะมีค่าเท่ากับมุมสะท้อนเสมอ

2. การสะท้อนกระจาย เกิดขึ้นกับการสะท้อนของแสงลงบนวัตถุที่มีพื้นผิวขรุขระ ตัวอย่างเช่น ไม้ กระดาษ หรือวัตถุทึบแสงอื่น ๆ ก็เกิดการสะท้อนแสงในรูปแบบเดียวกัน ซึ่งด้วยพื้นผิวของวัตถุที่ไม่เรียบและหยาบนี้จึงทำให้แสงที่สะท้อนนั้นกระจายออกไปในหลายทิศทาง เรียกการสะท้อนดังกล่าวว่า การสะท้อนกระจาย หากพิจารณาพื้นผิวเป็นบริเวณเล็ก ๆ จะพบว่าพื้นผิวขรุขระนั้นประกอบขึ้นจากพื้นผิวเรียบจำนวนมากที่ทำมุมเป็นองศาต่าง ๆ กัน โดยที่มุมตกกระทบจะมีค่าเท่ากับมุมสะท้อนบริเวณตำแหน่งที่แสงตกกระทบเสมอ

3. การสะท้อนกลับหมด คือการที่แสงวิ่งจากตัวกลางโปร่งแสงไปยังตัวกลางโปร่งใสสามารถอธิบายให้เข้าใจง่ายจากตัวอย่างของการที่แสงวิ่งจากแก้วไปยังอากาศ หากแสงบางส่วนสะท้อนกลับและบางส่วนทะลุจากแก้วออกไปยังอากาศ คือการที่แสงทำมุมตกกระทบมีค่าน้อยกว่า

42 องศา แต่ถ้ามุมที่ตกกระทบมีค่าเท่ากับ 42 องศา แสงทั้งหมดจะสะท้อนกลับคืนสู่แก้วโดยที่ไม่ออกไปยังอากาศเลย เรียกการสะท้อนลักษณะนี้ว่า การสะท้อนกลับหมด รอยต่อระหว่างตัวกลางคือ แก้วกับอากาศนั้นให้การตกกระทบที่ทำให้แสงสะท้อนกลับหมด ซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางที่ต่างกันไป อีกตัวอย่างคือการมองผ่านแผ่นกรองแสงสีต่างๆกัน ทำให้เห็นปรากฏการณ์ของแสงในหลายรูปแบบ เช่น แผ่นกรองแสงสีแดง ยอมให้เพียงแสงสีแดงทะลุผ่าน จึงสะท้อนออกมาให้เห็นเป็นสีแดง แผ่นกรองแสงสีเหลืองซึ่งเป็นสีทุติยภูมิ ที่เกิดจากการรวมกันของแสงสีแดงและสีเขียว จะสะท้อนและยอมให้แสงสีแดงและสีเขียวทะลุผ่าน การมองผ่านแผ่นกรองแสงสีต่าง ๆ เพื่อดูวัตถุใดๆ จะเห็นสีวัตถุที่ต่างไปจากการมองวัตถุแบบปกติในแสงขาว

สรุปแล้วในการสะท้อนของแสงกับผิววัตถุ กรณีที่วัตถุมีพื้นผิวเรียบจะให้แสงสะท้อนออกมาเป็นระเบียบ ได้ภาพที่ชัดเจน แต่หากวัตถุมีพื้นผิวขรุขระ จะให้แสงสะท้อนกระจัดกระจาย ได้ภาพที่ไม่ชัดเจน

การสะท้อนของแสงนั้นเกิดขึ้นได้บริเวณทุกผิวสัมผัสระหว่างตัวกลางสองชนิด โดยที่ดัชนีการหักเหแสงของผิวสัมผัสทั้งสองชนิดนั้นต้องมีค่าไม่เท่ากัน เช่น การสะท้อนของแสงบนกระจกเงาคือการสะท้อนของแสงบริเวณผิวสัมผัสของแก้วกับโลหะที่ฉาบไว้ ส่วนการสะท้อนบนผิวน้ำ คือการสะท้อนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสของน้ำกับอากาศ ปกติแล้วแสงสะท้อนส่วนหนึ่งจะเกิดการสะท้อนกลับไปยังผิวสัมผัสของวัตถุ ส่วนที่เหลือนั้นจะเกิดการหักเหของแสงไปยังตัวกลางอื่น ๆ

2.1.3 แสงธรรมชาติ (33)

แสง เป็นพลังงานรูปหนึ่งที่เราสัมผัสได้ด้วยสายตาแสงช่วยให้เรามองเห็นสิ่งต่าง ๆ ได้

แหล่งกำเนิดแสง หมายถึง สิ่งที่ทำให้เกิดแสงได้ โดยแยกได้ 3 ประเภท ดังนี้

1. แสงที่เกิดจากธรรมชาติ เช่น ดวงอาทิตย์ ดวงดาวบางดวง ฟ้ามุข ฟ้ามืด แสงจากดวงอาทิตย์ถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ใหญ่ที่สุด
2. แสงจากสัตว์ สัตว์บางชนิดจะมีแสงในตัวเอง เช่น หิ่งห้อย แมงดาเรือง
3. แสงที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้น เช่น แสงจากไฟฉาย เทียนไข หลอดไฟฟ้า แสงที่เกิดจากการลุกไหม้

การเดินทางของแสง

แสงเดินทางจากแหล่งกำเนิดด้วยความเร็วมากโดยเดินทางได้ 186,000 ไมล์ต่อวินาที หรือ 300,000 กิโลเมตรต่อวินาที แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรง และเดินทางผ่านสุญญากาศได้ เช่น แสงจากดวงอาทิตย์เดินทางมายังโลกของเรา โดยผ่านสุญญากาศ ผ่านอากาศมายังโลกของเราใช้เวลา 8 นาที ซึ่งดวงอาทิตย์อยู่ห่างจากโลกของเราถึง 93 ล้านไมล์

ตัวกลางของแสง หมายถึง วัตถุที่ขวางทางเดินของแสง โดยแบ่งเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. ตัวกลางโปร่งใส หมายถึง ตัวกลางที่ยอมให้แสงผ่านไปได้หมด เช่น น้ำใส พลาสติกใส กระจกใส อากาศ แก้วใส
2. ตัวกลางโปร่งแสง หมายถึง ตัวกลางที่แสงผ่านไปได้ดี แต่ผ่านได้ไม่หมด เช่น น้ำขุ่น กระจกฝ้า หรือหมอกควัน เป็นต้น
3. ตัวกลางทึบแสง หมายถึง ตัวกลางที่แสงผ่านไม่ได้เลย เช่น สังกะสี กระจกเงา เป็นต้น

การหักเหของแสง

แสงเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางอย่างเดียวยังจะเดินทางเป็นเส้นตรง แต่เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางอย่างหนึ่งไปยังตัวกลางอีกอย่างหนึ่งที่มีความหนาแน่นต่างกันจะเกิดการหักเหของแสง เช่น แสงเดินทางจากน้ำผ่านอากาศ หรือจากอากาศผ่านไปยังน้ำจะเกิดการหักเหตรงรอยต่อ

2.2 ท่อนำแสง (34)

ท่อนำแสงธรรมชาติเป็นอีกทางเลือกนำแสงจากธรรมชาติเข้ามาใช้งานภายในอาคาร โดยจะมีส่วนรับแสงจะทำหน้าที่รวมแสงจากภายนอกเข้าสู่ภายในอาคารเพื่อมาทดแทนแสงประดิษฐ์ภายในอาคาร ท่อนำแสงจะแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ท่อนำแสงแนวตั้ง (Vertical Light Pipes) เป็นการนำแสงธรรมชาติเข้าสู่อาคารจากส่วนบนของอาคารหรือหลังคาของอาคารเป็นการนำแสงธรรมชาติเข้าทางด้านข้างของอาคารหรือทางผนังอาคารโดยทั้ง 2 ประเภทมีหลักการในการทำงานที่เหมือนกัน ซึ่งท่อนำแสงจะมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน ได้แก่

1. ส่วนรวมแสง (Top Dome) เป็นอุปกรณ์สำหรับรับแสงธรรมชาติเข้าสู่ท่อนำแสง วัสดุที่ใช้คือ โพลีคาร์บอเนตที่สามารถป้องกันรังสียูวี จากดวงอาทิตย์มีความหนาอยู่ที่ 4 มิลลิเมตร โดยจะแบ่งเป็น 2 ประเภทหลักคือโดมแบบธรรมดา (Sun Light Dome) และโดมแบบติดตามการเคลื่อนที่

ของดวงอาทิตย์ (Sun Tracked Light Dome) เพื่อที่จะให้ได้คุณภาพของแสงที่มีความเสถียรต่อการใช้งานมากขึ้น

2. ส่วนท่อนำพาแสง (Sun Pipe) ทำหน้าที่นำแสงธรรมชาติเข้าสู่ตัวอาคารในลักษณะกระจายแสงจากส่วนรวมแสงบนหลังคาถึงส่วนปลายท่อเพื่อใช้งานภายในอาคาร โดยวัสดุจะเป็นท่ออลูมิเนียมคุณภาพสูงมีความมั่นคงเป็นพิเศษเคลือบด้วย Silver-Plus ซึ่งมี 2 ประเภท คือ ท่อนำอลูมิเนียม (Rigid Tube) และแบบท่อยืดหดได้ (Flexi Tube)

3. ส่วนกระจายแสง (Diffuser) ทำหน้าที่กระจายแสงไปยังจุดต่าง ๆ ภายในอาคารอีกด้วย ป้องกัน การเกิดแสงตรง ซึ่งมีหลายรูปแบบสามารถเลือกรูปแบบแผ่นกระจายแสงตามความเหมาะสมของพื้นที่การใช้นั้น ๆ

2.3 คุณสมบัติของวัสดุ

2.3.1 คุณสมบัติอะลูมิเนียม (35)

อะลูมิเนียม (Aluminum) ถือเป็นโลหะที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์มากทั้งในภาคอุตสาหกรรม และภาคครัวเรือน สำหรับภาคอุตสาหกรรมใช้ในการผลิตอะลูมิเนียมผสม และผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียม ส่วนภาคครัวเรือนมีใช้มากในการก่อสร้างตกแต่งบ้านทดแทนไม้ และเหล็ก เนื่องจากเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติคงทนต่อการหัก ความร้อน การกัดกร่อน น้ำหนักเบา และมีความสามารถในการสะท้อนแสง และความร้อนได้ดี มักใช้ในงานก่อสร้าง งานตกแต่ง เช่น การทำประตู หน้าต่าง ฝ้า รวากัน และโครงสร้างต่าง ๆ

อะลูมิเนียมมีจุดหลอมละลายที่ 660 องศาเซลเซียส เป็นโลหะที่มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบา รับภาระน้ำหนักได้สูง สามารถขึ้นรูปได้ง่าย ไม่เสียดรอยร้าว และการแตกหัก ไม่เป็นสนิม ทนต่อการกัดกร่อน และไม่เป็นพิษต่อมนุษย์ โดยเฉพาะการนำมาผสมกับโลหะอื่น ๆ แล้วจะทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ เพิ่มมากขึ้น เช่น จุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมผสมจะอยู่ที่ 1140 - 1205 องศาเซลเซียส จึงนิยมนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ รวมถึงวัสดุหรือภาชนะที่เกี่ยวข้องกับอาหาร นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติทางเคมีของอะลูมิเนียมในลักษณะต่าง ๆ ได้แก่

1. เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจะทำให้เกิดชั้นฟิล์มบาง ๆ เรียกว่า อะลูมิเนียมออกไซด์ เคลือบบนชั้นผิวอะลูมิเนียมป้องกันการเกิดปฏิกิริยาอื่น ๆ ได้ดี

2. การทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนจะทำให้เกิดไนเตรตที่อุณหภูมิสูง
3. ไม่ทำปฏิกิริยากับกำมะถัน
4. เมื่อทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน ไฮโดรเจนจะแทรกซึมเข้าสู่ชั้นในของอลูมิเนียม จึงจำเป็นต้องกำจัดออก
5. สามารถทนต่อกรดอนินทรีย์เข้มข้นได้ปานกลาง
6. ทนต่อปฏิกิริยาของต่างได้เล็กน้อย สามารถละลายได้ในสภาวะที่เป็นด่างเข้มข้น
7. เกิดปฏิกิริยากับเกลือได้ ทำให้เกิดการกัดกร่อน

การผลิตอะลูมิเนียม อะลูมิเนียมถูกผลิตเริ่มต้นจากอุตสาหกรรมต้นน้ำในเมืองแร่ผลิตแร่บอกไซต์ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนแข็ง อัดตัวแน่น มีสีเหลืองออกสีน้ำตาลจนถึงน้ำตาลแดง แต่อาจพบในลักษณะสีอื่น เช่น สีขาว สีน้ำตาล ซึ่งมีการผลิตในต่างประเทศด้วยการนำแร่บอกไซต์มาหลอมจนได้อะลูมินาบริสุทธิ์ และนำอะลูมินาเข้าหลอมเป็นแท่งจนได้แท่งอลูมิเนียมบริสุทธิ์กลายเป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ สำหรับเศษอะลูมิเนียมเก่าสามารถนำมาหลอมเป็นแท่งอะลูมิเนียมนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบใหม่ได้

การผลิตอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ด้วยการแยกสกัดออกจากอลูมินาจะใช้กระบวนการถลุงด้วยไฟฟ้าในเตาหลอมไฟฟ้าขนาดใหญ่ โดยโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์จะแยกตัวออกจากอลูมินาลงสู่ด้านล่างของเตาหลอม และไหลออกจากเตาหลอมด้วยวิธีการกักน้ำ

ชนิดของอลูมิเนียม แบ่งตามการผลิต

1. อลูมิเนียมบริสุทธิ์ เป็นอลูมิเนียมที่ได้จากการถลุงแร่หรือการหลอมให้มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.00 และมีธาตุอื่นเจือปนเพียงร้อยละ 1 เท่านั้น เป็นอลูมิเนียมที่มีความเหนียวสูงสามารถขึ้นรูปได้ดี
2. อลูมิเนียมผสม เป็นอลูมิเนียมที่ได้จากการหลอมร่วมกับโลหะชนิดอื่นตั้งแต่ 1 ชนิดขึ้นไป ได้แก่ ทองแดง แมกนีเซียม แมงกานีส โครเมียม ซิลิกอน นิกเกิล ดีบุก สังกะสี เป็นต้น เพื่อเป็นโลหะผสมให้มีคุณสมบัติทนต่อแรงดึงสูง

ชนิดของอลูมิเนียม แบ่งตามเกรดอลูมิเนียม

การแบ่งเกรดอลูมิเนียม มีการแบ่งเกรดจากสมาคมอลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกา โดยใช้หลักเกณฑ์ของส่วนผสมเป็นเกณฑ์ด้วยเลข 4 หลัก สำหรับใช้แทนเป็นสัญลักษณ์เกรดอลูมิเนียมขึ้นรูป

2.3.1.1 สัญลักษณ์แสดงกลุ่มอลูมิเนียมขึ้นรูป

1xxx หมายถึง อลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99.00

2xxx หมายถึง ทองแดง (Copper, Cu)

3xxx หมายถึง แมงกานีส (Manganese, Mn)

4xxx หมายถึง ซิลิกอน (Silicon, Si)

5xxx หมายถึง แมกนีเซียม (Magnesium, Mg)

6xxx หมายถึง แมกนีเซียม (Magnesium, Mg) และซิลิกอน (Silicon, Si)

7xxx หมายถึง สังกะสี (Zinc, Zn)

8xxx หมายถึง ธาตุอื่น ๆ เช่น นิกเกิล (Nickel, Ni), ไททาเนียม (Titanium, Ti), โครเมียม (Chromium, Cr), บิสมัท (Bismuth, Bi) และตะกั่ว (Lead, Pb)

9xxx หมายถึง ยังไม่มีใช้

หลักที่หนึ่ง เป็นสัญลักษณ์ที่สำคัญที่สุดในการแสดงหมวดหมู่ของโลหะผสมใน 8 กลุ่ม ดังรายละเอียดในขั้นต้น เช่น 1xxx แทนหมวดโลหะอลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99.00 โดยน้ำหนัก

หลักที่สอง เป็นตัวเลขที่ใช้กำกับโลหะอลูมิเนียมที่มีการผสมโลหะอื่นให้มีปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น 2024 ที่ประกอบด้วย 4.5Cu, 1.5Mg, 0.5Si และ 0.1Cr เมื่อเปลี่ยนเป็น 2218

จะประกอบด้วย 4.0Cu, 2.0Ni, 1.5Mg และ 0.2Si ซึ่งเป็นการผสม Ni แทน Cr

หลักที่สาม และสี่ เป็นตัวเลขที่แสดงชนิดย่อยของโลหะผสมที่เป็นชนิดเดียวกัน แต่แสดงส่วนผสมที่แตกต่างกัน เช่น 8 ที่ประกอบด้วย 4.4Cu, 0.8Si, 0.8Mn และ 0.4Mg เมื่อเปลี่ยนเป็น 2017 จะประกอบด้วย 4.0Cu, 0.8Si, 0.5Mn และ 0.1Cr

อลูมิเนียมบริสุทธิ์ (มากกว่าร้อยละ 99.00) เป็นอลูมิเนียมทางการค้ามักพบในช่วงความบริสุทธิ์ที่ร้อยละ 99.30 - 99.70 เหมาะสำหรับนำมาใช้งานในด้านตัวนำไฟฟ้า และแผ่นสะท้อนแสง เป็นต้น

อลูมิเนียมผสมทองแดง (2xxx) เป็นอลูมิเนียมที่ผสมทองแดง โดยพบว่า ทองแดงสามารถละลายได้ในอลูมิเนียมสูงสุดที่ร้อยละ 5.65 ที่อุณหภูมิ 548 องศาเซลเซียส และจะละลายได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จนเหลือประมาณร้อยละ 0.5 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านความร้อน

อลูมิเนียมผสมแมงกานีส (3xxx) เป็นอลูมิเนียมที่ผสมแร่แมงกานีส โดยหากเพิ่มแร่แมงกานีสที่ร้อยละ 1.2 จะทำให้เป็นโลหะผสมที่มีความแข็งแรงพอควร เหมาะสำหรับใช้งานในด้านโครงสร้างต่าง ๆ

อลูมิเนียมผสมซิลิกอน (4xxx) มักพบเป็นอลูมิเนียมที่ผสมด้วยซิลิกอนพร้อมกับแร่อื่น ๆ แต่มีอัตราส่วนน้อยกว่า เช่น ซิลิกอนร้อยละ 11.00 – 13.5 ทองแดงร้อยละ 0.5 – 1.3 สังกะสีร้อยละ 0.5 เหล็กร้อยละ 1 แมกนีเซียมร้อยละ 0.8 -1.3 และนิกเกิลร้อยละ 0.5 – 1.3 เหมาะสำหรับประยุกต์ใช้งานประเภทที่ทนความร้อน เช่น กระจบอสูบลูกสูบ ก้านสูบ ห้องเครื่อง เป็นต้น

อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (5xxx) เป็นอลูมิเนียมที่ผสมแร่แมกนีเซียม แต่พบน้อยมากในอัตราส่วนผสมของแมกนีเซียมมาก ๆ ส่วนมากมักใช้ผสมร่วมกับแร่อื่น ๆ เนื่องจากมีความสามารถในการละลาย และหลอมรวมกับอลูมิเนียมได้ไม่ดี หากใช้เป็นส่วนผสมมากจะทำให้วัสดุแข็ง และเปราะหักง่าย

อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมกับซิลิกอน (6xxx) มักเป็นอลูมิเนียมผสมที่มีสัดส่วนของแมกนีเซียม และซิลิกอนในอัตราส่วนน้อย โดยทั่วไปผสมแมกนีเซียมร้อยละ 0.6 – 1.2 ซิลิกอนร้อยละ 0.4 – 1.3 นอกจากนี้ อาจมีการผสมโครเมียมหรือทองแดงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงด้วย

อลูมิเนียมผสมสังกะสี (7xxx) มักเป็นอลูมิเนียมผสมที่มีสัดส่วนของสังกะสีหรืออาจผสมแร่อื่น ๆ ร่วมด้วยเล็กน้อย เช่น แมกนีเซียม กลุ่มอลูมิเนียมนี้มักประยุกต์ใช้ในด้านความทนทาน แข็งแรงสูง เช่น ยานอวกาศ โครงสร้างขนาดใหญ่ เป็นต้น

อลูมิเนียมผสมแร่อื่น ๆ (8xxx) เป็นอลูมิเนียมผสมที่ใช้แร่ผสมชนิดอื่นนอกเหนือจากข้างต้น เช่น นิกเกิล, ไททาเนียม, โครเมียม, บิสมัท และตะกั่ว

2.3.1.2 ประโยชน์อลูมิเนียม

1. ด้านการก่อสร้าง ใช้เป็นโครงสร้าง และวัสดุตกแต่งในงานต่าง ๆ โครงสร้างเสา กอบประตู หน้าต่าง รั้ว ราวกัน บันได เนื่องจากมีคุณสมบัติคงทน น้ำหนักเบา และอื่น ๆ ซึ่งสามารถ ทดแทนไม้ และเหล็กได้เป็นอย่างดี

2. ด้านการขนส่ง ใช้เป็นวัสดุโครงสร้างในอุตสาหกรรมรถยนต์ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ไม่เป็นสนิม มีอายุการใช้งานมากกว่าวัสดุอื่น ๆ และสามารถรับแรงกด แรงกระแทกได้มาก จึงนิยมนำมาใช้เป็นชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องบิน รถไฟ และยานพาหนะอื่น ๆ

3. ด้านบรรจุภัณฑ์ อลูมิเนียมนิยมนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหาร และเป็นภาชนะสำหรับประกอบอาหาร เช่น ฟอยล์ครอบอาหาร กระจ่างบรรจุอาหาร จาน ชาม หม้อ กระทะ เป็นต้น เนื่องจากเป็นโลหะที่ไม่ทำปฏิกิริยากับอาหารหรือสารเคมีอื่นง่าย ไม่เกิดสนิม และทนต่อความร้อน การกักความร้อนได้ดี

4. อุตสาหกรรมไฟฟ้า ใช้อลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ สายไฟฟ้า เนื่องจากเป็นสื่อนำไฟฟ้าได้ดี มีน้ำหนักเบา มีความคงทน และ ไม่เกิดสนิม

2.3.2 คุณสมบัติสังกะสี (36)

สังกะสีเป็นโลหะที่มีการผลิตและนำมาใช้ประโยชน์เมื่อประมาณ 600 ปีมาแล้ว โดย ช่วงแรกจะมีการใช้มากในแถบประเทศอินเดียและจีน โดยมีการผลิตเครื่องใช้ที่ทำจากโลหะสังกะสี ผสม และนำสังกะสีออกไซด์มาผสมถ่านหินเพื่อใช้ทำเครื่องขึ้นดินเผา สำหรับกระบวนการผลิตโลหะ สังกะสีที่เป็น ต้นแบบของเทคโนโลยีการถลุงสังกะสีในปัจจุบันถูกคิดค้นในปี 1738 โดยวิลเลียม แชม เปียน ทำให้มีการใช้สังกะสีอย่างแพร่หลาย และถือเป็นโลหะที่มีปริมาณการใช้มากที่สุดเป็นอันดับสี่ ในปัจจุบัน รองจากเหล็ก

คุณสมบัติทั่วไปของสังกะสี

คุณสมบัติทางฟิสิกส์

- น้ำหนักอะตอม	65.41
- ระบบผลึก	Hexagonal

- ความหนาแน่น (ที่ 20 °C)	7.14 g.cm ³
- จุดหลอมเหลว	420 °C
- จุดเดือด	907 °C
- ความต้านทานไฟฟ้า(ที่ 20 °C)	59.0 nQ.m
- สัมประสิทธิ์การขยายตัว (ที่, 20 °C)	30.2 im.m X.K

คุณสมบัติเชิงกล

Youngs modulus	108 GPa
Shear modulus	43 GPa
Brinell hardness	412 MPa

การผลิตโลหะสังกะสีจากแร่

แร่สังกะสีสำคัญที่นำมาใช้ในการถลุงโลหะสังกะสี ได้แก่ สังกะสีซัลไฟด์ (ZnS) หรือ Sphalerite ซึ่งเป็นแร่ที่พบในหลายประเทศ เช่น อเมริกา เม็กซิโก เปรู โบลิเวีย แคนาดา และ ออสเตรเลีย นอกจากนี้ยังมีแร่สังกะสีในรูปอื่น ๆ เช่น สังกะสีคาร์บอเนต (ZnCO₃) หรือ Smithsonite สังกะสีออกไซด์ (ZnO) หรือ Zincite และแร่สังกะสีซิลิเกต (Zn₂SiO₄) ที่เรียกว่า Willemite โดยแหล่งแร่สังกะสีที่สำคัญอื่น ๆ ได้แก่ จีน อินเดีย พม่า เวียดนาม ไอร์แลนด์ รัสเซีย คาซัคสถาน และซาอุดี เป็นต้น สำหรับแหล่งแร่สังกะสีของประเทศไทยที่ใหญ่ที่สุด คือ เหมืองแม่สอดที่จังหวัดตาก ซึ่งมีแร่สังกะสีซิลิเกตที่มีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 50 แต่บางครั้งก็จะมีพบปะปนอยู่กับหินปูนและความเข้มข้นไม่สูงนัก (ความเข้มข้นร้อยละ 2-12) จึงอาจต้องนำไปแต่งแร่ให้มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น โดยใช้วิธีการบดแร่ให้มีขนาดเล็ก และนำไปแต่งแร่โดยวิธีการลอยแร่

2.3.3 คุณสมบัติพีวีซี (37)

PVC หมายถึง พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride) ซึ่งเป็นพลาสติกที่สามารถเปลี่ยนคุณสมบัติได้ด้วยการเติมสารเคมี โดยทั่วไปแล้ว PVC มีความนิยมใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์น้อยกว่ากลุ่มอุตสาหกรรมอื่น เนื่องจาก PVC ประกอบไปด้วยสารเคมีปรุ่่งแต่งจึงทำให้เกิดการตกค้างของสารเคมีในบรรจุภัณฑ์ แต่ก็มีบรรจุภัณฑ์บางชนิดผลิตจาก PVC สามารถนำมาใช้ได้โดย

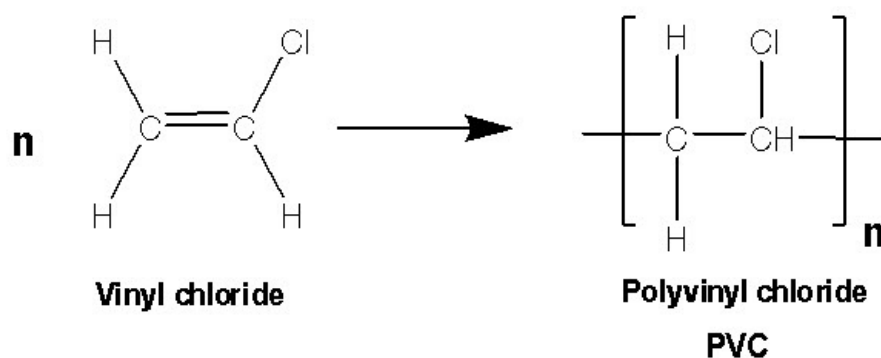
ไม่มีสารเคมีตกค้าง เช่น ฟิล์มยืดสำหรับห่อเนื้อสัตว์และผลไม้สด ภาตบรรจุอาหารแห้ง ภาตหรือกล่องบรรจุอาหารสด และขวดบรรจุน้ำมันพืช เป็นต้น

ในประเทศทางฝั่งยุโรปและอเมริกา พีวีซี บางครั้งถูกเรียกว่า "ไวนิล" ไวนิล มักจะนำไปใช้พุดกับพลาสติกที่ต้องการความยืดหยุ่นสูง เช่น การทำพื้น และ ผนังเทียม พีวีซีเป็นThermoplastic ที่ประกอบด้วยคลอรีนร้อยละ 57 ซึ่งเป็นผลผลิตจากเกลืออุตสาหกรรม และร้อยละ 43 มาจากคาร์บอนซึ่งสกัดมาจากน้ำมันและก๊าซ เมื่อเทียบปริมาณน้ำมันและก๊าซธรรมชาติในการผลิตพลาสติกแต่ละชนิดพีวีซีเป็นพลาสติกที่ใช้ทรัพยากรธรรมชาติน้อยกว่าพลาสติกประเภท PE, PP, PET และ PS พีวีซียังมีคุณสมบัติทนไฟและดับไฟได้จากคุณสมบัติของสารประกอบคลอรีน

โครงสร้างของพลาสติก PVC

PVC, PE, PP และ PS เป็นพลาสติกที่ใช้งานได้ทั่วไป ส่วนประกอบและโครงสร้างของโมเลกุลของพลาสติกจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติการใช้งานพลาสติกแต่ละชนิด

โครงสร้างโมเลกุลของพลาสติก PVCซึ่งมีคลอรีนเป็นส่วนประกอบ มีรูปร่างไม่แน่นอน อะตอมของคลอรีนจะอยู่ติดกับโครงสร้างเนื้อพลาสติก ถึงแม้ว่าพลาสติกหลายชนิดจะถูกนำไปใช้แทนกันได้ในชีวิตประจำวัน แต่พีวีซีมีคุณสมบัติเฉพาะตัวในด้านประสิทธิภาพและการใช้งานที่แตกต่างเมื่อเทียบกับพลาสติกอื่นที่โครงสร้างมีแต่คาร์บอนและไฮโดรเจน



ภาพ 6 โครงสร้างของพลาสติก PVC

พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride : PVC) เป็นพอลิเมอร์ที่สำคัญที่สุดในกลุ่มไวนิลด้วยกัน มักเรียกกันทั่วไปว่า พีวีซี เนื้อพีวีซีมีลักษณะขุ่นทึบแต่ก็สามารถผลิตออกมาให้มีสีส่นได้ทุกสีเป็นฉนวนไฟฟ้าอย่างดี ตัวมันเองเป็นสารที่ทำให้ไฟดับจึงไม่ติดไฟ มีลักษณะทั้งที่เป็นของแข็งคง

รูปและอ่อนนุ่มเหนียว เรซินมีทั้งที่เป็นเม็ดแข็งหรืออ่อนนุ่ม และเป็นผงจึงสามารถนำไปใช้งานได้
อย่างกว้างขวาง

สมบัติทั่วไป

- มีความแข็งแรงดี ทนทานต่อสภาวะอากาศและสิ่งแวดล้อมปกติ
- ต้านทานต่อสารเคมีและน้ำ
- เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี
- สามารถผสมสีและแต่งสีได้อย่างไม่จำกัด
- สามารถเติมสารเติมแต่งต่าง ๆ เพื่อปรุงแต่งสมบัติของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่แข็ง และคง
ตัว จนถึงอ่อนนุ่ม และยืดหยุ่นมาก ๆ
- มีสมบัติอื่น ๆ กว้างขวางและสามารถสลายตัวเอง

ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิไวนิลคลอไรด์

ผลิตภัณฑ์ทั่วไป ได้แก่ หนังเทียมซึ่งมีความอ่อนนุ่มกว่าหนังแท้สำหรับหุ้มเบาะเก้าอี้ หรือปู
โต๊ะ เคลือบกระดาษและผ้ากระเป๋าลือของสตรี กระเป๋าเดินทาง กระเป๋าใส่สตางค์ รองเท้า เข็มขัด
หุ้มสายไฟฟ้า สายเคเบิล หุ้มด้ามเครื่องมือ หุ้มลวดเหล็ก ท่อน้ำ ท่อร้อยสายไฟฟ้า อ่างน้ำ ประตู
หน้าต่าง วอลล์สติ๊กเกอร์ (Wall Stickers)

โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly Ethylene Terephthalate, PET)

คุณสมบัติทั่วไป

- PET ทนแรงกระแทก
- ไม่เปราะแตกง่าย
- สามารถทำให้ใสมาก มองเห็นสิ่งที่บรรจุอยู่ภายใน
- ป้องกันการแพร่ผ่านของก๊าซได้เป็นอย่างดี
- กันน้ำ ไม่ซึมน้ำ
- นำกลับมารีไซเคิลได้

2.4 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน (38)

2.4.1 การถ่ายเทความร้อน

หลักการถ่ายเทความร้อน คือ การที่ความร้อนเคลื่อนที่จากจุด ๆ หนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้ 3 วิธีด้วยกัน คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี การเคลื่อนที่ของความร้อนทั้ง 3 วิธีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้น แต่กลไกในการที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนแต่ละวิธีแตกต่างกัน

การนำความร้อน (Conduction heat transfer) คือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำภายในตัวกลางเดียวกัน หรือเป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างตัวกลางที่ติดกัน แต่มีอุณหภูมิต่างกัน ในการนำความร้อนความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของสาร โดยที่โมเลกุลไม่เคลื่อนที่ การนำความร้อนจะเกิดได้ดีในตัวกลางที่เป็นของแข็ง การนำความร้อนต่อพื้นที่ต่อหน่วยเวลาในสถานะคงตัวคำนวณได้จากกฎฟูเรียร์ (Fourier's law)

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

โดย k คือ สภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity) $W/(m \cdot K)$
 A คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)
 $\frac{\partial T}{\partial x}$ คือ ผลต่างของอุณหภูมิเทียบกับความยาว (Gradient temperature) $^{\circ}C$

ถ้าความร้อนสามารถเคลื่อนที่ผ่านเนื้อวัสดุได้อย่างรวดเร็ว เราเรียกว่าวัสดุนี้มีคุณสมบัติในการนำความร้อน (Thermal conductivity) วัสดุที่มีระดับในการนำความร้อนที่สูงความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวมันเองอย่างรวดเร็ว ข้อดีก็คือสามารถเลือกวัสดุนำไปใช้ในการระบายความร้อน แต่ถ้าต้องการกักเก็บความร้อนเอาไว้ก็ให้เลือกว่าวัสดุที่มีการนำความร้อนที่น้อย วัสดุโลหะที่มีค่าการนำความร้อนสามารถดูได้จากฉีดยา! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง

การพาความร้อน (Convection heat transfer) คือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งและของไหล ของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้ หรือพาความร้อนออกจากผิวของของแข็ง กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาได้นั้น เกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงานและการเคลื่อนที่ของการไหล การพายังแบ่งออกเป็น 2 ชนิด การพาตามธรรมชาติ (Natural convection) และการพาโดยการบังคับ (Forced convection) อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนคำนวณได้จากสมการ 4 ซึ่งเขียนได้ดังนี้คือ

$$q = hA\Delta T \quad (4)$$

โดย q คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดการถ่ายโอนเนื่องจากการพา (W)
 h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m² K)
 A คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m²)
 ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ (°C หรือ K)

ตาราง 1 แสดงค่าการนำความร้อนของโลหะชนิดต่าง ๆ(38)

วัสดุ	การนำความร้อน W/(mK)
เงิน (Silver)	427
ทองแดง (Copper)	398
ทอง (Gold)	315
อลูมิเนียม (Aluminum)	237
สังกะสี (Zinc)	121
เหล็ก (Iron)	80.3
ตะกั่ว (Lead)	35.2

การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural or free convection) คือการเคลื่อนที่ของความ ร้อน ระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลไม่ถูกทำให้เคลื่อนไหวโดยกลไก ภายนอก วัตถุซึ่งมีผิวเรียบอยู่ในของไหลซึ่งอยู่หนึ่งถ้าอุณหภูมิของผิวสูงกว่าอุณหภูมิของของไหล ความร้อนจะเริ่มเคลื่อนที่มายังของไหลที่ติดกับผนัง ทำให้ความหนาแน่นของของไหลที่อยู่ติดผนัง ต่ำลงซึ่งทำให้เกิดแรงผลักดันให้ของไหลลอยตัวขึ้น ของไหลที่อยู่ต่ำกว่าก็จะเคลื่อนเข้ามาแทนที่ และทำให้เกิดการหมุนเวียนของของไหลเมื่อพิจารณาจะเห็นว่า อัตราการเคลื่อนที่ของความ ร้อนใน กรณีนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณต่าง ๆ หลายปริมาณ เช่น คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหล ขนาดและลักษณะ ของของแข็ง อุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างของไหลและพื้นผิว นอกจากนี้ สมบัติการขยายตัว ของสารซึ่งมีผลต่อแรงลอยตัวของสารก็ยังมีผลต่อการถ่ายเทความร้อน ถ้าจะหาสมการมาใช้ คำนวณหาสมบัติการพาความร้อนโดยวิธีการวิเคราะห์เป็นสิ่งที่ยาก และทำได้ในกรณีง่าย ๆ บาง กรณีเท่านั้น สมการที่ใช้สำหรับคำนวณหาสมบัติการพาความร้อน สำหรับการพาตามธรรมชาติ ส่วนมากแล้วได้จากการวิเคราะห์เชิงมิติ

การพาโดยการบังคับ (Forced convection) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อของไหลมีความเร็วอยู่แล้วด้วย กลไกภายนอก เช่น พัดลมหรือสูบน้ำ เมื่อของไหลมีความเร็ว เราจะต้องทราบกลไกในการเคลื่อนที่ ของของไหลก่อน โดยปกติเราจะแบ่งการไหลของของไหลเป็นสองแบบ คือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ในการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งของไหล ไหลเป็นชั้น ๆ ขนานกับความเร็วยังถ่ายเทจากผิวของของแข็ง โดยการนำ และถ่ายเทต่อ ๆ กันไปใน ของไหลโดยการนำผ่านชั้นของของไหล ในกรณีของการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งของไหลเคลื่อนที่อย่างไม่มี ระเบียบ มีการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหลด้วยการเคลื่อนที่ของความ ร้อนส่วนใหญ่ จะ เกิดจากอนุภาคของของไหลที่ได้รับความร้อนมาแล้วเคลื่อนที่นำความร้อนไปยังที่อื่น ดังนั้น ยิ่งการ ไหลแบบปั่นป่วนมากเท่าใด การเคลื่อนที่ของความ ร้อนจะยิ่งมากขึ้น

การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) คือ การที่พลังงานถูกปล่อยออกมาจากวัตถุที่มีอุณหภูมิ แนนอน โดยวัตถุนั้นอาจจะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ก็ได้ พลังงานของสนาม การแผ่รังสีการถ่ายเทโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือเรียกว่า โฟตอน (Photons) ในขณะที่ การถ่ายเทพลังงานโดยการนำความร้อน และการพาความร้อนจะต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเท

ความร้อนแต่การถ่ายเทโดยการแผ่รังสีไม่ต้องอาศัยตัวกลางใด ๆ และจะเกิดการถ่ายเทได้ดีในสภาวะที่เป็นสุญญากาศ การแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุทั่วไป จะเขียนสมการได้ดังนี้ [50]

$$q = \sigma \epsilon A T^4 \quad (5)$$

โดย	q	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี (W)
	σ	คือ	ค่าคงที่ของสตีฟานโบลซ์แมน (W/m ² K ⁴)
	ϵ	คือ	ค่าการแผ่รังสี (Emissivity)
	A	คือ	พื้นที่ผิวของตัวแผ่รังสีความร้อน (m ²)
	T	คือ	อุณหภูมิของผิวที่แผ่รังสีความร้อน (K)

2.5 ทฤษฎีด้านสภาพท้องฟ้า (39)

สภาพท้องฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของดวงอาทิตย์ และสภาพอากาศที่มีเมฆปกคลุมรวมทั้งปริมาณฝุ่น คิวบิก ไออน้ำ มีผลต่อความส่องสว่างของแสงธรรมชาติที่แตกต่างกันออกไปตามช่วงเวลา และฤดูกาล ซึ่งสามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะ ดังภาพ 7 โดยมีเกณฑ์ในการแยกประเภทของสภาพท้องฟ้าดังนี้คือ

1.สภาพท้องฟ้าแบบมีเมฆมาก (Overcast sky) เป็นสภาพท้องฟ้าไม่สามารถมองเห็นแหล่งกำเนิดแสงหรือดวงอาทิตย์ โดยมีปริมาณเมฆปกคลุมมากกว่าร้อยละ 70 ขึ้นไป

2.สภาพท้องฟ้าโปร่ง (Clear sky) เป็นสภาพท้องฟ้าโปร่งแบบมีเมฆ ปกคลุมไม่เกินร้อยละ 30 หรือท้องฟ้าที่ไม่มีเมฆปกคลุม

3.สภาพท้องฟ้าแบบมีเมฆบางส่วน (Partly cloudy sky) เป็นสภาพท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมร้อยละ 30 ถึง 70 มีความแปรปรวนของระดับความส่องสว่างสูง



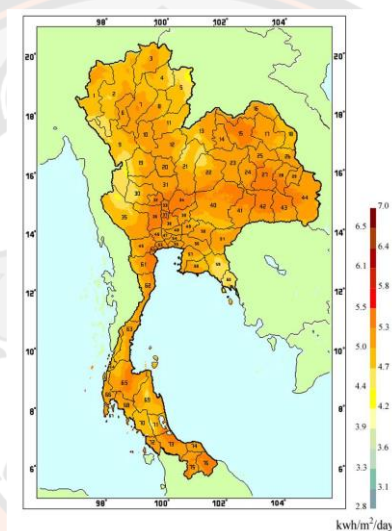
ภาพ 7 สภาพท้องฟ้าแบบ Overcast sky, Clear sky, Partly cloudy sky (39)

2.6 ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ในประเทศไทย [40]

โดยทั่วไปศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของพื้นที่แห่งหนึ่งจะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบในพื้นที่นั้น การศึกษาเพื่อทราบปริมาณรังสีอาทิตย์บนพื้นโลกซึ่งจะใช้เป็นแนวทางการส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งนำเสนอในรูปแบบที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับประเทศไทยมีแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน) จัดทำขึ้นในปี พ.ศ. 2542 โดยมหาวิทยาลัยศิลปากรดัดภาพ 8 แสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายปี ในแต่ละเดือนนั้นการกระจายของความเข้มรังสีอาทิตย์ตามบริเวณต่าง ๆ ของประเทศได้รับอิทธิพลสำคัญจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศได้รับรังสีอาทิตย์สูงสุดระหว่างเดือนเมษายน และพฤษภาคม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 5.54 ถึง 6.65 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร-วัน

บริเวณที่รับรังสีแสงอาทิตย์สูงสุดเฉลี่ยทั้งปีอยู่ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือโดยครอบคลุมบางส่วนของจังหวัดนครราชสีมา บุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ ร้อยเอ็ด ยโสธร อุบลราชธานี และอุดรธานี และบางส่วนของภาคกลางที่จังหวัดสุพรรณบุรี ชัยนาท อัญญา และลพบุรี โดยได้รับรังสีอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี 5.26 ถึง 5.54 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร-วัน พื้นที่ดังกล่าวคิดเป็นร้อยละ 14.3 ของพื้นที่ทั้งหมดของประเทศ นอกจากนี้ยังพบว่าร้อยละ 50.2 ของพื้นที่ทั้งหมดรับรังสีอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี เท่ากับ 4.99 ถึง 5.26 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร-วัน จากการคำนวณรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศ มีค่าเท่ากับ 5.04 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร-วัน แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง

ปี พ.ศ. 2543 ได้มีการพัฒนาเครือข่ายสถานีวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ มีทั้งหมด 37 สถานีทั่วประเทศ เพื่อให้ประเทศไทยมีข้อมูลความเข้มรังสีที่ละเอียดและถูกต้อง สามารถนำไปใช้เพื่อประโยชน์ด้านการวิจัย พัฒนาและการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างมีประสิทธิภาพ ปัจจุบันสามารถทราบข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งข้อมูลจากการตรวจวัดจากสถานีระหว่างปี พ.ศ. 2545 - 2550 และข้อมูลดาวเทียมเป็นข้อมูลเฉลี่ยรายเดือนของจังหวัด และอำเภอระหว่างปี พ.ศ. 2536 - 2541 [40]



ภาพ 8 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทย จัดทำในปี พ.ศ. 2542 (40)

หมายเหตุ: หน่วย: กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร-วัน

2.7 รังสีแสงอาทิตย์ขณะภาวะอากาศแจ่มใส (41)

2.7.1 รังสีตกกระทบบนพื้นราบแนวระดับ

การพิจารณาพลักษณ์ของรังสีตกกระทบบนพื้นราบเวลาของวันเป็นตัวแปรที่สำคัญ ดวงอาทิตย์ตอนเที่ยงวันเหนือศีรษะ เวลาสุริยคติปรากฏ (apparent solar time, AST) จะเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แต่เวลาที่ท้องถิ่น (local clock time, LCT) จะต่างออกไป หรือสังเกตความแตกต่างระหว่างเวลาทั้งสองคือเวลาสุริยคติเป็นเวลาที่วัดด้วยนาฬิกาแดด ส่วนเวลาที่ท้องถิ่นคือเวลาที่ดูจากนาฬิกา การใช้เวลาสุริยคติสำหรับการคำนวณทั้งหลาย แต่เวลาที่ใช้ข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์เป็น

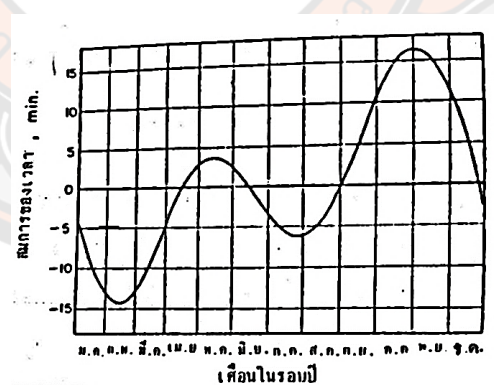
เวลาท้องถิ่นอ่านจากนาฬิกา ดังนั้นก่อนจะนำไปใช้ในการคำนวณจะต้องเปลี่ยนเวลาท้องถิ่นเป็นเวลาสุริยะ

$$AST = LCT \pm TZ_W^E \pm \lambda \frac{E}{W} + EQT/60 \quad (6)$$

Tz คือ เขตเวลา (time zone) เป็นตัวเลขกำหนดเขต ค่า Tz หาได้จากการเอาค่าเส้นแวง (หน่วยองศา) ณ บริเวณที่ตั้งหารด้วย 15 ผลลัพธ์เป็นเบอร์เขตถ้าเศษน้อยกว่า 7.5° และ (ผลลัพธ์ +1) จะเป็นเบอร์เขตถ้าเศษมากกว่า 7.5° (+Tz สำหรับเส้นแวงตะวันตก และ -Tz สำหรับเส้นแวงตะวันออก)

λ เป็นเวลาที่ตำแหน่งเส้นแวงของที่ตั้ง หาได้จากการเอาเส้นแวง(หน่วยองศา) ณ จุดที่ตั้งหารด้วย 15 (+ λ สำหรับเส้นแวงตะวันออกและ - λ สำหรับเส้นแวงตะวันตก)

EQT เป็นสมการของเวลา (equation of time) หน่วยนาทีย เป็นค่าที่ใช้แก้ไขเวลาเนื่องจากความไม่เที่ยงตรงของวงโคจรของโลก ดังภาพ 9



ภาพ 9 สมการของเวลาในรอบปี (41)

การใช้เวลาสุริยะในการหาอัลติจูดสุริยะ (solar altitude) และมุมแอสซิมุท (azimuth angle) ของดวงอาทิตย์ จากภาพ 10 - 11 แสดงมุมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

มุมชั่วโมง (hour angle) เป็นมุมตำแหน่งของสถานที่ตั้งเบนไปจากดวงอาทิตย์เที่ยงวัน (solar noon) เนื่องจากการหมุนรอบตัวเองของโลก อาจแสดงค่า เป็นองศาโดยการคูณผลต่างของเวลาในขณะนั้นเป็นชั่วโมงกับเวลาเที่ยง (12) ด้วย $360/24$

$$\omega \text{ (องศา)} = -15(12 - t) \quad (7)$$

ω เป็นลบในช่วงเช้าก่อนเที่ยง และ ω เป็นบวกในตอนบ่าย

มุมเซนิท θ_z (zenith angle) และอัลติจูด α (solar altitude) θ_z เป็นมุมระหว่างแนวตั้งเหนือศีรษะจากเซนทริกกระทำกับแนวรังสีตกกระทบจากดวงอาทิตย์ ณ จุดที่ตั้งบนพื้นราบแนวระดับ ส่วน α เป็นมุมประกอบ 90° ของ θ_z ($\alpha = 90^\circ - \theta_z$)

$$\cos\theta_z = \sin\alpha = \cos\phi\cos\delta\cos\omega + \sin\phi\sin\delta \quad (8)$$

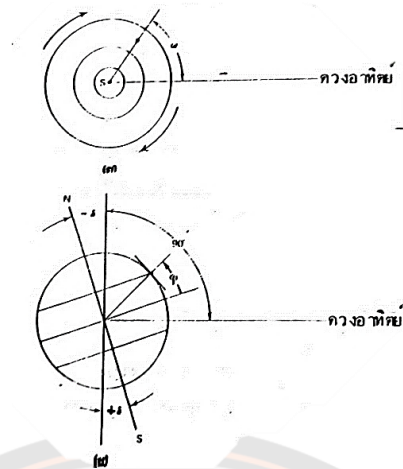
แอสซิมูทสูริยะ ϕ (solar azimuth) เป็นมุมที่วัดระหว่างระนาบแนวตั้งของรังสีตกกระทบกระทำกับแนวทิศใต้ (แนวทิศเหนือสำหรับซีกโลกใต้) ของระนาบเมริเดียน ณ ตำแหน่งที่ตั้งบนพื้นราบแนวระดับ หน่วยเป็นองศา

$$\sin\phi = \frac{\cos\delta\sin\omega}{\cos\alpha} \quad (9)$$

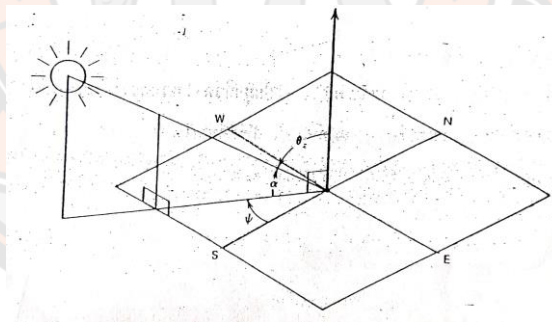
ค่า ϕ เป็นลบในช่วงเช้าและบวกในช่วงบ่าย

หมายเหตุ: ค่า ϕ ที่คำนวณได้ 2 ค่า คือ ϕ หรือ $\pm(180^\circ - |\phi|)$ เพราะ $\sin\phi = \sin(180^\circ - \phi)$

ถ้า ϕ เป็นมุมแหลม



ภาพ 10 มุมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณรังสีตกกระทบตั้งฉาก (ก) มองจากขั้วโลกได้แสดงมุมชั่วโมง (แผ่นกระดาษไม่จำเป็นต้องอยู่ในระนาบโคจรของโลก) (ข) แสดงส่วนสัมพันธ์ของมุมเส้นรุ้ง และมุมเดคลิเนชัน (41)



ภาพ 11 มุมเซนิทสุริยะ อัลติจูด และแอสซิมุมุท ที่สัมพันธ์กับพื้นที่ราบระดับบนพื้นโลก (41)

การเลือกค่า φ ที่ถูกต้องให้พิจารณาดังนี้

$|\psi| \geq 90^\circ$ เมื่ออัลติจูดสุริยะที่คำนวณจากสมการ 7 น้อยกว่าอัลติจูดสุริยะเมื่อมุมแอสซิซของดวงอาทิตย์เป็น $\pm 90^\circ$ ในสมการ 9

$$\sin\alpha = \frac{\sin\delta}{\sin\phi} \quad (10)$$

$|\sin\alpha| > 1$ ในเขตทรอปิก (tropic zone) คือ $|\phi| < |\delta|$ ดวงอาทิตย์จะอยู่ในบริเวณทิศเหนือหรือใต้ของท้องฟ้าตลอดทั้งวัน

มุมชั่วโมงดวงอาทิตย์ขึ้นและตก ω_s หาจากสมการ 7 เมื่อ $\alpha=0$

$$\cos\omega_s = -\tan\phi \tan\delta \quad (11)$$

ω_s เป็นลบสำหรับดวงอาทิตย์ขึ้น

ω_s เป็นบวกเมื่อดวงอาทิตย์ตก $\cos\omega_s > 1$ ในเขตอาร์คติกเมื่อไม่มีดวงอาทิตย์ขึ้นหรือตก

สำหรับ ω_s หน่วยเป็นชั่วโมงต่างจากเวลาเที่ยง

$$\omega_s = \pm \frac{24}{360} \times \arccos(-\tan\phi \tan\delta) \quad (12)$$

ดังนั้น $AST = (12.00 + \omega_s)$ ชั่วโมง

นำไปคำนวณหา LCT ของดวงอาทิตย์ขึ้นและตก

ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รวม(global irradiance) (W/m^2) บนพื้นที่ราบแนวระดับเป็นผลรวมของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รังสีตรง (direct or beam irradiance) กับรังสีกระจาย(diffuse irradiance)

$$H_{\text{global}} = H_{\text{beam}} + H_{\text{diffuse}}$$

$$H_{\text{global}} = I_{\text{BN}} + C I_{\text{BN}} \quad (13)$$

I_{BN} คือ เป็นความหนาแน่นกำลังงาน (power density), (W/m^2) หรือฟลักซ์สุริยะ (solar flux) วัดตั้งฉากกับแนวรังสีตรงบนพื้นโลก (เมื่อรังสีผ่านชั้นบรรยากาศลงมาความแรงจะลดลงเป็นลำดับ) เนื่องจากดัชนีการลดทอน (attenuation index) หรือ ส.ป.ส. การทำลาย (extinction coefficient) พารามิเตอร์ C เป็นค่าเฉลี่ยในรอบเดือนของอัตราส่วนระหว่าง H_{diffuse} กับ I_{BN} เมื่อสภาวะอากาศแจ่มใส ณ สถานที่นั้น ๆ

2.7.2 รังสีตรงและรังสีกระจาย

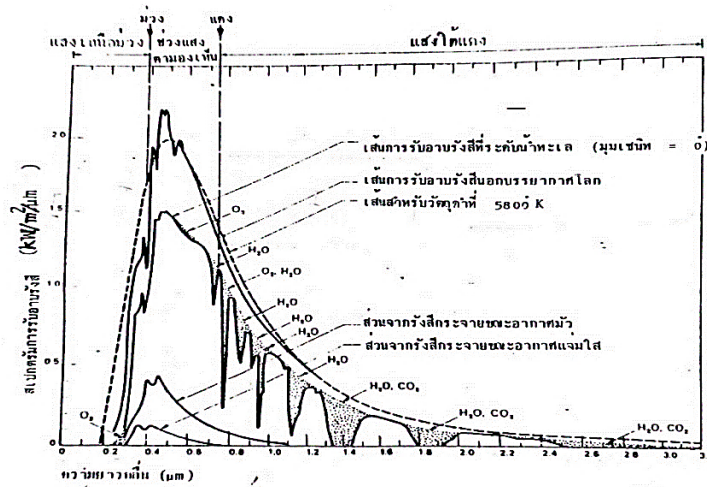
ผลกระทบของบรรยากาศที่มีผลต่อการแผ่รังสีแสงอาทิตย์มายังโลก ทำให้รังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวโลกประกอบด้วยรังสี 2 ส่วน คือ

1. รังสีตรง (beam or direct radiation) รังสีส่วนนี้เป็นรังสีที่พื้นโลกได้รับโดยตรงจากดวงอาทิตย์มีทิศทางแน่นอน มีการเปลี่ยนมุมตกกระทบบนพื้นที่ต่าง ๆ บนโลก บางครั้งเรียกว่ารังสีตรงว่าเป็นรังสีช่วงคลื่นสั้นรังสีตรงเหมาะกับการใช้งานสำหรับอุปกรณ์รวมแสง
2. รังสีกระจาย (diffuse or scattering radiation) ส่วนที่ได้จากการสะท้อนและการกระเจิงของรังสีแสงอาทิตย์เมื่อผ่านชั้นบรรยากาศ บางครั้งเรียกรังสีนี้ว่ารังสีช่วงคลื่นยาว ผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจายเรียกว่า รังสีรวม (total or global radiation) เวลาอากาศโปร่งจะมีส่วนของรังสีกระจายเพียงร้อยละ 5 - 10 จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีเมฆบังแสงอาทิตย์ การกระจายของค่ารังสีรวมเฉลี่ยรายวัน ณ บริเวณส่วนต่าง ๆ ของโลกที่เวลาต่าง ๆ

2.8 ผลกระทบของบรรยากาศโลกต่อการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ (42)

2.8.1 บรรยากาศกับการดูดกลืนพลังงานการแผ่รังสี

รังสีแสงอาทิตย์เมื่อผ่านชั้นบรรยากาศโลกจะถูกดูดกลืน เนื่องจากองค์ประกอบต่าง ๆ จากกราฟสเปกตรัมสุริยะในบรรยากาศโลก ดังภาพ 12 จะเห็นความเข้มแสงอาทิตย์ที่บางช่วงคลื่นดังนี้



ภาพ 12 สเปกตรัมสุริยชนอกชั้นบรรยากาศและที่ระดับพื้นดิน (42)

1. ช่วงอุลตราไวโอเลต (ultraviolet) ความยาวคลื่นต่ำกว่า $0.3 \mu\text{m}$ พลังงานของแสงจะถูกดูดกลืนโดย O_2 , N_2 , O_3 ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ (ionosphere) โดยเฉพาะ O_3 สามารถดูดกลืนรังสีอุลตราไวโอเลตได้มากทำให้แสงที่ตกกระทบผิวโลกเกือบจะไม่มีพลังงานแสงในช่วงอุลตราไวโอเลตเหลืออยู่
2. ช่วงคลื่นที่ตามองเห็นได้ (visible) ความยาวคลื่น 0.4 ถึง $0.75 \mu\text{m}$ แสงถูกดูดกลืนด้วยโมเลกุลของ O_2 , O_3 และน้ำบางส่วน
3. ช่วงรังสีอินฟราเรดความยาวคลื่นมากกว่า $0.8 \mu\text{m}$ แสงถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของน้ำ และ CO_2 การดูดกลืนอยู่ในชั้นบรรยากาศใกล้ผิวโลกและทำให้เกิดความร้อนในชั้นบรรยากาศ

ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง $8.0 - 12.0 \mu\text{m}$ บรรยากาศจะโปร่งแสงเรียกช่วงนี้ว่า หน้าต่างของบรรยากาศ (atmospheric window) ที่ความยาวคลื่นสูงกว่านี้แสงอาทิตย์จะถูกดูดกลืนโดยน้ำและ CO_2 เกือบหมด

นอกจากนี้แสงยังถูกสะท้อนและกระเจิง (scattering) โดยฝุ่นละอองในอากาศ คิวบิกและก้อนเมฆ ที่มีขนาดโมเลกุลใกล้เคียงหรือโตกว่าความยาวคลื่น การกระเจิงโดยโมเลกุลอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นรังสีจะเป็นไปตามทฤษฎีของราเลย์ (Rayleigh)

2.9 เครื่องมือสำหรับวัดรังสีอาทิตย์ (43)

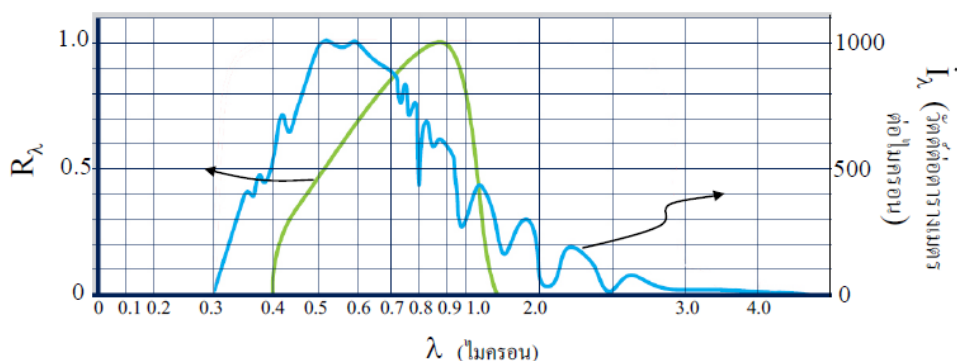
2.9.1 เครื่องวัดรังสีรวม (pyranometer)

เครื่องวัดรังสีรวมแบบโฟโตโวลตาอิก (photovoltaic pyranometer) เนื่องจากสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพีเอ็น (P-N junction) จะเกิดศักย์ไฟฟ้าเมื่อมีรังสีอาทิตย์ตกกระทบ ดังนั้นจึงได้มีการนำสารดังกล่าวมาใช้เป็นเซนเซอร์ของเครื่องวัดรังสีรวม (ภาพ 13) โดยเครื่องวัดจะประกอบด้วยตัวรับรังสีที่เป็นแผ่นกระจายรังสีด้านบนและมีสารกึ่งตัวนำอยู่ด้านล่าง เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบแผ่นดังกล่าวรังสีอาทิตย์จะถูกกระจายผ่านลงมาถึงบนสารกึ่งตัวนำ และเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นค่ากระแสที่ได้สามารถแปลงให้เป็นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์โดยอาศัยการสอบเทียบกับเครื่องวัดรังสีอาทิตย์มาตรฐาน เนื่องจากการเกิดกระแสไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนี้เป็นไปตามหลักการโฟโตโวลตาอิก ดังนั้นเราจึงเรียกเครื่องวัดรังสีรวมแบบนี้ว่าเป็นแบบโฟโตโวลตาอิก (43)



ภาพ 13 เครื่องวัดรังสีรวมแบบโฟโตโวลตาอิกที่ผลิตโดยบริษัทคิปป์แอนด์โซนเนส (43)

โดยทั่วไปเครื่องวัดรังสีรวมแบบโฟโตโวลตาอิกจะมีการตอบสนองต่อรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ในช่วงประมาณ 0.4 - 1.1 ไมครอน (ภาพ 14) ซึ่งแคบกว่าช่วงความยาวคลื่นของสเปกตรัมรังสีรวม ทำให้ไม่สามารถวัดรังสีอาทิตย์ได้ครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นกว้าง (0.3 - 3.0 ไมครอน) นอกจากนี้การตอบสนองของเครื่องวัดต่อรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ มีค่าไม่เท่ากันทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดอย่างไรก็ตามเครื่องวัดนี้มีราคาไม่แพง (43)



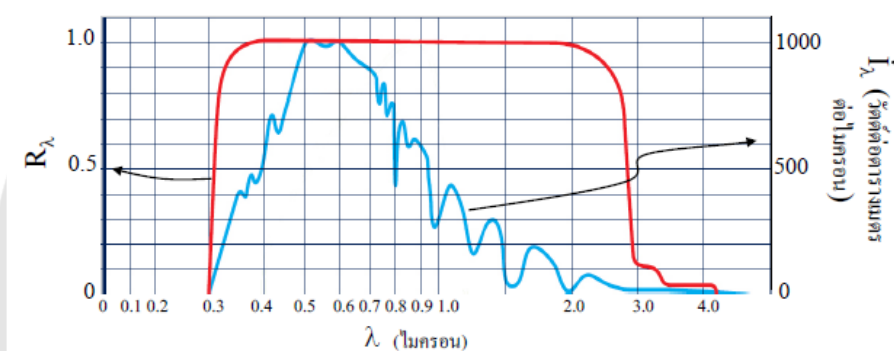
ภาพ 14 กราฟของการตอบสนองต่อสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ของเครื่องวัดรังสีรวมแบบโฟโตโวลตาอิกที่ผลิตโดยบริษัทคิปป์แอนด์โซเนนซ์ (R_{λ} คือการตอบสนอง I_{λ} คือสเปกตรัมรังสีอาทิตย์และ λ เป็นความยาวคลื่น) (43)

เครื่องวัดรังสีรวมแบบเทอร์โมไพล์ (thermopile pyranometer) เครื่องวัดรังสีอาทิตย์แบบนี้จะมีตัวรับรังสีที่ทำด้วยเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) จำนวนมากที่ต่อกันแบบอนุกรมซึ่งเรียกว่าเทอร์โมไพล์ (thermopile) โดยมีแผ่นรับรังสีสีดำปิดด้านบน เพื่อไม่ให้รังสีอาทิตย์ตกกระทบเทอร์โมไพล์โดยตรง และมีโดมแก้วครอบด้านบน เพื่อป้องกันตัวรับรังสีจากฝนหรือสิ่งสกปรก เครื่องวัดรังสีรวมแบบนี้โดยทั่วไปจะมีลักษณะตามภาพ 15 (43)



ภาพ 15 เครื่องวัดรังสีรวมแบบเทอร์โมไพล์ที่ผลิตโดยบริษัทคิปป์แอนด์โซเนนซ์ (43)

เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบแผ่นรับรังสี แผ่นดังกล่าวจะถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นไปยังเทอร์โมไพล์ ทำให้เทอร์โมไพล์มีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วของเทอร์โมไพล์ค่าของศักย์ไฟฟ้าง่ายดังกล่าวสามารถนำมาคำนวณเป็นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ได้โดยการสอบเทียบกับเครื่องวัดรังสีอาทิตย์มาตรฐาน ข้อดีของเครื่องวัดรังสีรวมแบบเทอร์โมไพล์ คือ สามารถตอบสนองต่อสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ส่วนใหญ่ในช่วง 0.3-3.0 ไมครอนได้เท่ากัน(ภาพ 16) นอกจากนี้ยังสามารถทำงานโดยไม่ขึ้นกับสภาพแวดล้อมมากนัก และมีความละเอียดถูกต้องในการวัดค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามเครื่องวัดแบบนี้มีราคาแพง (43)



ภาพ 16 กราฟแสดงการตอบสนองต่อสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ของเครื่องวัดรังสีรวมแบบเทอร์โมไพล์ที่ผลิตโดยบริษัทคิปป์แอนด์โซเนนซ์ (R_λ คือการตอบสนอง I_λ คือสเปกตรัมรังสีอาทิตย์และ λ เป็นความยาวคลื่น) (43)

2.9.2 เครื่องวัดรังสีกระจาย

เครื่องวัดรังสีกระจายประกอบด้วยเครื่องวัดรังสีรวมที่ติดตั้งอุปกรณ์บังรังสีตรง อุปกรณ์ดังกล่าวอาจเป็นวงแหวนหรือลูกบอลก็ได้ กรณีที่เป็นวงแหวน (ภาพ 17) เราจะต้องปรับระนาบของวงแหวนให้อยู่ในระนาบของทางเดินของดวงอาทิตย์ทุก 1 - 2 วัน เพื่อไม่ให้รังสีตรงตกกระทบแผ่นรับรังสีของเครื่องวัดตลอดทั้งวัน เนื่องจากวงแหวนจะบังรังสีกระจายจากท้องฟ้าด้วย ดังนั้นจึงต้องคำนวณแก้ค่าที่วัดได้ เพื่อชดเชยค่ารังสีกระจายที่ถูกบังโดยวงแหวน โดยใช้ตารางแก้ค่าที่บริษัทผู้ผลิตเครื่องวัดจัดเตรียมมาให้ (43)



ภาพ 17 เครื่องวัดรังสีกระจายแบบใช้วงแหวนบังรังสีตรงซึ่งผลิตโดยบริษัทคิปปี้แอนด์โซเนนซ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากรซึ่งติดตั้งที่สถานีเชียงใหม่ (43)

2.10 ค่าการส่องสว่างภายในอาคาร (44)

2.10.1 ทฤษฎีการส่องสว่าง (44)

ฟลักซ์การส่องสว่าง (Luminous Flux) เป็นปริมาณแสงทั้งหมดที่ส่องออกจากแหล่งกำเนิดแสง เช่น หลอดไฟ มีหน่วยเป็น ลูเมน (lumen; lm)

ความเข้มการส่องสว่าง (Luminous Intensity: I) เป็นความเข้มของแสงที่ส่องออกมาจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง มักใช้แสดงความเข้มของแสงที่มุมต่าง ๆ ของโคมไฟ มีหน่วยเป็น แคนเดลา (Candela; cd)

ความส่องสว่าง (Illuminance: E) เป็นปริมาณแสงที่ตกกระทบบนพื้นผิวต่อพื้นที่ อาจเรียกได้ว่า ระดับความสว่าง (Lighting Illuminance level) เพื่อบอกว่าพื้นที่นั้น ๆ ได้รับแสงสว่างมากน้อยเพียงใด มีหน่วยเป็น ลูเมน ต่อ ตร.ม. (lm/m²) หรือ lx (lux) (หน่วย ลูเมน ต่อ ตร.ฟุต หรือ ฟุตแคน-เคิล (Footcandle) มีค่าเทียบเท่ากับ 10.76 lx) ค่าที่เหมาะสมสำหรับแต่ละพื้นที่ ได้มีมาตรฐานแนะนำไว้ในเอกสาร TIEA-GD 003

$$\text{ความส่องสว่าง} = \frac{\text{ปริมาณแสง(ลูเมน)}}{\text{พื้นที่(m}^2\text{)}} \quad (14)$$

ความสว่าง (Luminance : L) เป็นปริมาณแสงที่สะท้อนออกมาจากพื้นผิวใด ๆ ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งต่อพื้นที่ ซึ่งอาจเรียกว่าความจ้า (Brightness) ซึ่งมีปริมาณแสงที่เท่ากัน เมื่อตกกระทบลงมา

บนวัตถุที่มีสีต่างกันจะมีปริมาณแสงสะท้อนกลับต่างกัน ทำให้เห็นมีความสว่างต่างกัน เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัตถุต่างกัน มีหน่วยเป็นแคนเดลาต่อตารางเมตร (cd/m^2) เรานิยมใช้ค่าความสว่างในการออกแบบไฟถนนเพื่อให้เกิดความปลอดภัย และออกแบบแสงสว่างของห้องที่มีการใช้จอภาพคอมพิวเตอร์เพื่อลดแสงบาดตา

2.10.2 มาตรฐานแสงสว่าง (45)

ตามประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่อง หลักเกณฑ์วิธีดำเนินการตรวจวัดและวิเคราะห์สภาวะการทำงานเกี่ยวกับระดับความร้อน แสงสว่าง หรือเสียงภายในสถานประกอบกิจการระยะเวลา และประเภทกิจการที่ต้องดำเนินการ ได้กำหนดให้นายจ้างจัดให้มีการตรวจวัดและวิเคราะห์สภาวะการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง หรือเสียงภายในสถานประกอบกิจการในสภาวะที่เป็นจริงของสภาพการทำงานอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง

กรณีที่มีการปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงเครื่องจักร อุปกรณ์ กระบวนการผลิต วิธีการทำงาน หรือการดำเนินการใด ๆ ที่อาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับความร้อน แสงสว่าง หรือการดำเนินการใด ๆ ที่อาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับความร้อน แสงสว่าง หรือเสียงให้นายจ้างดำเนินการจัดให้มีการตรวจวัดและวิเคราะห์สภาวะการทำงานฯ เพิ่มเติมภายใน 90 วัน นับจากวันที่มีการปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลง

ให้ตรวจวัดความเข้มของแสงสว่างในสถานประกอบกิจการทุกประเภทกิจการ โดยให้ตรวจวัด " บริเวณพื้นที่ทั่วไป " บริเวณพื้นที่ใช้ประโยชน์ ในกระบวนการผลิตที่ลูกจ้างทำงาน และบริเวณที่ลูกจ้างต้องทำงานโดยใช้สายตามองเฉพาะจุดหรือต้องใช้สายตาอยู่กับที่ในการทำงาน ในสภาพการทำงานปกติและในช่วงเวลาที่มีแสงสว่างตามธรรมชาติน้อยที่สุด การตรวจวัดความเข้มแสงสว่างภายในอาคาร วิธีการตรวจวัดโดยทั่วไปมี 2 วิธี คือ วัดที่จุดทำงาน และวัดแบบค่าเฉลี่ยของพื้นที่ทั่วไป

1. การวัดแบบจุด (Spot Measurement)

เป็นการตรวจวัดความเข้มแสงสว่างบริเวณที่ลูกจ้างต้องทำงานโดยใช้สายตาเฉพาะจุดหรือต้องใช้สายตาอยู่กับที่ในการทำงาน ตรวจวัดในจุด ที่สายตาระทบขึ้นงานหรือจุดที่ทำงานของคนงาน (Point of Work) โดยวางเครื่องวัดแสงในแนวระนาบเดียวกับชิ้นงาน หรือพื้นผิวที่สายตา ตกกระทบ แล้วอ่านค่าที่อ่านได้นำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานตามกฎหมายกระทรวง

2. การวัดแสงเฉลี่ยแบบพื้นที่ทั่วไป (Area Measurement)

เป็นการตรวจวัดความเข้มแสงสว่างในบริเวณพื้นที่ทั่วไปภายในสถานประกอบกิจการ เช่น ทางเดิน และบริเวณพื้นที่ใช้ประโยชน์ในกระบวนการ การผลิตที่ลูกจ้างทำงานการตรวจวัดแบบนี้สามารถทำได้สองวิธี คือ

1. แบ่งพื้นที่ทั้งหมดออกเป็น 2×2 ตารางเมตร โดยถือเซลล์รับแสงในแนวระนาบสูงจากพื้น 30 นิ้ว (75 เซนติเมตร) แล้วอ่านค่า (ในขณะที่วัดนั้นต้องมีให้เงาของผู้วัดบังแสงสว่าง) นำค่าที่วัดได้มาหาค่าเฉลี่ย

2. หากการติดตั้งไฟฟ้ามี่ลักษณะที่แน่นอนซ้ำ ๆ กัน สามารถวัดแสงในจุดที่เป็นตัวแทนของพื้นที่ที่มีแสงตกกระทบในลักษณะเดียวกัน ตามวิธีการวัดแสงและการคำนวณค่าเฉลี่ย ของ IES Lighting Handbook 1981 (Reference Volume) หรือเทียบเท่า

1.1.1 ความส่องสว่าง (อิลูมินานซ์) หมายถึง ปริมาณแสงที่กระทบลงบนวัตถุต่อพื้นที่ มีหน่วยเป็นลูเมนต่อตารางเมตร หรือ ลักซ์ (ถ้าหน่วยเป็น ลูเมนต่อตารางฟุต ความส่องสว่างหน่วยเป็น ฟุตแคนเดิล)

1.1.2 ความสว่าง (ลูมินานซ์) หมายถึง ปริมาณแสงที่สะท้อนออกมาจากวัตถุต่อพื้นที่ มีหน่วยเป็น แคนเดลาต่อตารางเมตร ปริมาณแสงที่เท่ากันเมื่อตกกระทบลงมาบนวัตถุที่มีสีต่างกัน จะมีปริมาณแสงสะท้อนกลับต่างกัน นั่นคือ ลูมินานซ์ต่างกัน สาเหตุที่ต่างกันก็เนื่องมาจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุต่างกัน

ตาราง 2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสว่างในอาคารตามมาตรฐาน CIE ,IES หน่วยเป็น ลักซ์ (45)

พื้นที่ต่าง ๆ	CIE	IES
ห้องประชุม	300-500-750	200-300-500
ห้องเขียนแบบ	500-750-1000	500-750-1000
ห้องทำงานทั่วไป	300-500-750	200-300-500
ห้องคอมพิวเตอร์	300-500-750	200-300-500
ห้องสมุด	300-500-750	200-300-500
ร้านค้าในอาคารพาณิชย์	500-750	500-750-1000
เคาน์เตอร์	200-300-500	200-300-500
ห้องเก็บของ	100-150-200	100-150-200
ห้องลอบบี้หรือบริเวณต้อนรับ	100-150-200	100-150-200
ห้องน้ำ	100-150-200	100-150-200
ทางเดิน	50-100-150	100-150-200
บันได	100-150-200	100-150-200
ลิฟท์	100-150-200	100-150-200

ตาราง 3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสว่างในโรงงานตามมาตรฐาน CIE และ IES (45)

พื้นที่ต่าง ๆ	CIE	IES
งานทั่วไป/Ex. warehouse / งานประกอบทั่วไป	150-200-300	200-300-500
งานหยาบ / Ex..งานประกอบชิ้นส่วนทั่ว ๆ ไป	200-300-500	500-750-1000
งานละเอียดปานกลาง / Ex.งานประกอบชิ้นส่วนขนาดเล็ก	300-500-750	1000-1500-2000
งานละเอียด / Ex.งานประกอบ ชิ้นส่วนขนาดเล็กมาก	500-750-1000	2000-3000-5000
งานละเอียดมาก/Ex.งานประกอบชิ้นส่วนขนาดพิเศษ	1000-1500-2000	5000-7500-10000

2.11 เครื่องวัดความเข้มแสง (46)

เครื่องวัดความเข้มแสง (Lux Meter) เป็นเครื่องมือวัดความหนาแน่นของแสง โดยการแปลงจากพลังงานของแสงไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าแบบอนาล็อกและประมวลผลเป็นค่าความสว่างและแสดงผลในรูปแบบข้อมูลดิจิทัลโดยมีหน่วยเป็นลักซ์ (lux)

เครื่องวัดความเข้มแสงสามารถตรวจวัดได้หลากหลาย เช่น การตรวจวัดแสงเพื่อการถ่ายภาพ การวัดความเข้มแสงภายในอาคารเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของแสงสว่างในแต่ละพื้นที่ และสามารถจัดหาความสว่างที่เหมาะสมให้กับพื้นที่และการทำงานที่แตกต่างกัน สำหรับการท่าโครงการ นักเรียนสามารถนำอุปกรณ์ดังกล่าวมาช่วยในการวิจัย เช่น การวิจัยอุปกรณ์ที่สร้างความเข้มแสงที่ส่งผลต่อพืช การพัฒนาอุปกรณ์ที่มีความเข้มแสงที่เหมาะสมในสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ หรือการวัดประเมินประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ได้พัฒนา

เครื่องมือวัดแสงมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนคือ

1. เซลล์รับแสงทำด้วยแก้วหรือพลาสติกด้านในเคลือบด้วยสารซิลิคอนทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าค่าความเข้มแสงสว่างมากพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมากตามไปเป็นสัดส่วนเซลล์รับแสงอาทิตย์ออกแบบให้โค้งงอเล็กน้อยเพื่อให้แสงจากทิศทางต่าง ๆ ตกกระทบในมุม 90 องศาใกล้เคียงที่สุดได้รอบด้าน
2. ส่วนมิเตอร์ ส่วนนี้จะรับพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากเซลล์รับแสงและแสดงค่าบนหน้าจอบนจอเป็นความเข้มแสงสว่าง

2.12 หลอดไฟ LED (47)

หลอด LED คือ สารกึ่งตัวนำไฟฟ้าที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน แล้วปล่อยแสงสว่างออกมาได้ทันที ทั้งนี้หลอด LED ที่เราค้นดาจะเป็นหลอดไฟขนาดเล็กหลากสีเช่น สีแดง สีน้ำเงิน เป็นต้น เนื่องจากขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาใช้ แต่ต่อมาได้มีการปรับแก้ด้วยการนำหลอด LED สีน้ำเงินไปเคลือบเรืองแสงสีเหลือง จึงทำให้แสงจากหลอด LED ส่องออกมาเป็นสีขาว และสามารถใช้เป็นหลอดไฟส่องสว่างได้หลากหลายรูปแบบมากขึ้น ประหยัดพลังงาน เพราะให้แสงสว่างมาก แต่ใช้ไฟฟ้าน้อยลงกว่าหลอดไส้ทั่วไปร้อยละ 80 - 90

หลอด LED เหมาะสำหรับหลอดไฟที่ต้องการให้เปิดปิดบ่อยครั้ง เนื่องจากสามารถเปิดปิดบ่อย ๆ โดยไม่มีปัญหาแต่อย่างใด และเมื่อเปิดหลอดไฟจะให้ความสว่างโดยทันทีนับว่าแตกต่างจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่หากเปิดปิดบ่อยครั้งจะเสีง่าย หรือ หลอด HID ซึ่งเมื่อเปิดสวิตช์แล้วจะใช้เวลาช่วงหนึ่งกว่าจะให้แสงสว่างออกมาแม้ปัจจุบันมีการนำ LED ไปใช้ในอุปกรณ์ต่าง ๆ มากมาย แต่กลับยังไม่ได้นำมาใช้แพร่หลาย เพื่อให้แสงสว่างภายในบ้าน เนื่องจากมีข้อจำกัดสำคัญ คือ ยังไม่สามารถผลิต LED ที่เปล่งแสงสีขาวโดยแท้จริงได้ โดยปัจจุบันมี 2 วิธี ที่นำมาใช้เพื่อผลิต LED ที่เปล่งแสงสีขาวโดยทางอ้อม

วิธีแรก นับเป็นวิธีการที่นิยมใช้มากที่สุดและง่ายที่สุด คิดค้นโดยบริษัท Nichia เมื่อปี 2539 คือ การเคลือบ LED สีน้ำเงินด้วยสารเรืองแสงสีเหลือง อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของวิธีการนี้ คือ ก่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานทำให้ประสิทธิภาพในการให้แสงสว่างลดลง

วิธีที่สอง นับเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงกว่า คือ การนำแสงสีแดง เขียว และน้ำเงินมาผสมกันให้พอเหมาะเพื่อให้เป็นสีขาวซึ่งมีข้อดี คือ นอกจากผสมกันเป็นสีขาวแล้วยังสามารถผสมสีออกมาเป็นสีต่าง ๆ ได้ตามต้องการ อย่างไรก็ตามข้อเสียของวิธีการนี้ คือ มีความยุ่งยาก และมีค่าใช้จ่ายสูงในการบำรุงรักษาเนื่องจากจะต้องมีหลอด LED จำนวนมาก

2.13 ความสูงของห้องหรืออาคาร (48)

กฎกระทรวง ฉบับที่ 55 (พ.ศ. 2543) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 ส่วนที่ 2 พื้นที่ภายในอาคาร ข้อที่ 22 ห้องหรือส่วนของอาคารที่ใช้ในการทำกิจกรรมต่าง ๆ ต้องมีระยะตั้งไม่น้อยกว่าตามที่กำหนดไว้ดังต่อไปนี้

ตาราง 4 ระยะดิ่งที่เหมาะสมของห้องหรืออาคารในการทำกิจกรรมต่าง ๆ (48)

ประเภทการใช้อาคาร	ระยะดิ่ง (เมตร)
1 ห้องที่ใช้เป็นที่พักอาศัย บ้านแถว ห้องพักโรงแรม ห้องเรียน นักเรียน อนุบาล ครุฑสำหรับอาคารอยู่อาศัย ห้องพักคนไข้ ช่องทางเดินในอาคาร	2.60
2 ห้องที่ใช้เป็นสำนักงาน ห้องเรียน ห้องอาหาร ห้องโถง ภัตตาคาร โรงงาน	3.00
3 ห้องขายสินค้า ห้องประชุม ห้องคนไข้รวม คลังสินค้า โรงครัว ตลาด และอื่น ๆ ที่คล้ายกัน	3.50
4 ห้องแถว ตึกแถว	
4.1 ชั้นล่าง	3.50
4.2 ตั้งแต่ชั้น 2 ขึ้นไป	3.00
5 ระเบียง	2.20

ระยะดิ่งตามวรรคหนึ่งให้วัดจากพื้นถึงพื้น ในกรณีของชั้นใต้หลังคาให้วัดจากพื้นถึงยอดฝาหรือยอดผนังอาคาร และในกรณีของห้องหรือส่วนของอาคารที่อยู่ภายในโครงสร้างของหลังคาให้วัดจากพื้นถึงยอดฝาหรือยอดผนังของห้องหรือส่วนของอาคารดังกล่าวที่ไม่ใช่โครงสร้างหลังคา

ห้องในอาคารซึ่งมีระยะดิ่งระหว่างพื้นถึงพื้นอีกชั้นหนึ่งตั้งแต่ 5 เมตรขึ้นไป จะทำพื้นชั้นลอยในห้องนั้นก็ได้ โดยพื้นชั้นลอยดังกล่าวนั้นต้องมีเนื้อที่ไม่เกินร้อยละ 20 ของเนื้อที่ห้อง ระยะดิ่งระหว่างพื้นชั้นลอยถึงพื้นอีกชั้นหนึ่งต้องไม่น้อยกว่า 2.40 เมตร และระยะดิ่งระหว่างพื้นห้องถึงพื้นชั้นลอยต้องไม่น้อยกว่า 2.40 เมตร ด้วย

ห้องน้ำ ห้องส้วม ต้องมีระยะดิ่งระหว่างพื้นถึงเพดานไม่น้อยกว่า 2 เมตร

2.14 การกระจายของแสงจากแหล่งกำเนิดแบบจุด (49)

ความสว่างบนพื้นผิวใด ๆ สามารถคำนวณหาค่าได้ จากสมการที่ 15

$$E = \frac{I_0}{V^2} \quad (15)$$

E คือ ค่าความสว่าง (ลูเมน/ตารางเมตร , ลักซ์)

I_0 คือ ความเข้มของการส่องสว่าง (แคนเดลลา)

V คือ ระยะจากแหล่งกำเนิดแสงวัดมาตั้งฉากกับพื้นที่ (เมตร)

จากภาพ 18 ความสว่างที่จุด P มีระยะห่างจากจุดกำเนิดถึงจุด P เท่ากับ มุมระหว่างเส้นที่ตั้งฉากกับแสงกับเส้นจากจุดกำเนิดถึงจุด P ทำให้ได้สมการที่ 16

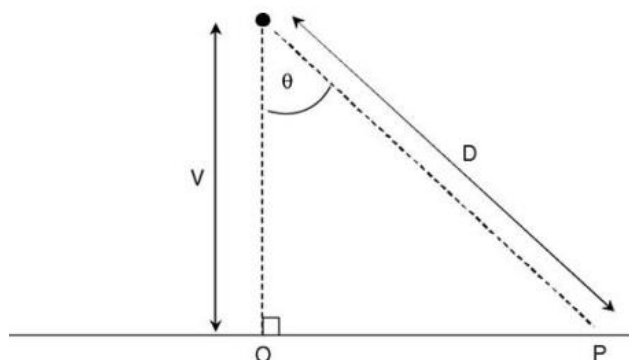
$$E = \frac{I_0 \cos \theta}{D^2} \quad (16)$$

E คือ ค่าความสว่าง (ลูเมน/ตารางเมตร , ลักซ์)

I_0 คือ ความเข้มของการส่องสว่าง (แคนเดลลา)

θ คือ มุมจากแหล่งกำเนิดแสงกับจุด P

D^2 คือ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงถึงจุด P



ภาพ 18 แหล่งกำเนิดแสงที่ส่องสว่างในแนวระนาบ (49)

2.15 ประสิทธิภาพการส่องสว่าง (50)

ประสิทธิภาพการส่องสว่างของท่อ นำแสงหาได้จากอัตราส่วนของปริมาณของแสงบริเวณด้านล่างและบริเวณด้านบนของท่อ นำแสง แสดงในสมการที่ 17

$$\text{Efficiency} = \frac{E_b}{E_t} \quad (17)$$

E_b คือ ค่าความส่องสว่างบริเวณปลายท่อด้านล่างของท่อ นำแสง (ลักซ์)

E_t คือ ค่าความส่องสว่างบริเวณปากท่อด้านบนของท่อ นำแสง (ลักซ์)

2.16 องค์ประกอบแสงธรรมชาติ (Daylight Factor : DF) (51)

เป็นวิธีการคิดองค์ประกอบแสงธรรมชาติ สำหรับการให้แสงสว่างด้านข้างที่แสดง ค่าเปอร์เซ็นต์ โดยการคำนวณค่าความสว่างภายนอกจะพิจารณาเฉพาะแสงในแนวราบในสภาพท้องฟ้าที่มีเมฆปกคลุมมากเพราะมีค่าที่แน่นอนสำหรับการคำนวณองค์ประกอบแสงธรรมชาติ คำนวณได้จากสมการ 18

$$DF = \frac{E_{in}}{E_{ex}} \times 100 \quad (18)$$

E_{in} คือ ค่าความส่องสว่างภายในอาคาร (ลักซ์)

E_{ex} คือ ค่าความส่องสว่างภายนอกอาคาร (ลักซ์)

ตาราง 5 ค่าองค์ประกอบแสงธรรมชาติที่เหมาะสมกับกิจกรรมต่าง ๆ (51)

การใช้งานพื้นที่	ค่า DF (ร้อยละ)
การอ่านหนังสือและการใช้งานปกติในช่วงเวลาหนึ่ง	1.5 - 2.0
การอ่านหนังสือ หรือการทำงานที่ต้องใช้สายตาในที่หนึ่ง ๆ ในช่วงเวลานาน ๆ หรืองานที่ต้องมีอุปกรณ์เสริมที่ไม่อันตรายมาก	2.0 - 5.0
งานที่ต้องการความละเอียดสูง และมีอันตรายมาก ๆ	5.0 - 8.0

หมายเหตุ. จาก Stein and Reynolds, 2000 : p.200

2.17 เซนเซอร์วัดความส่องสว่างของแสง (52)

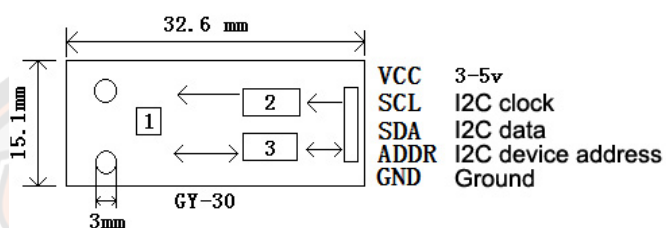
2.17.1 คุณสมบัติทางเทคนิค

- ใช้ไอซี BH1750FVI ของบริษัท ROHM SEMICONDUCTOR
- สามารถวัดความเข้มแสงได้ตั้ง แต่ 1-65535 lx ความละเอียด 16 บิต
- ใช้ไฟเลี้ยง 3V-5V
- ใช้การเชื่อมต่อแบบ I2C ความถี่สูงสุด 400 kHz
- มีขา ADD สำหรับเลือก Address ของบอร์ดได้ 2 ค่า
- เชื่อมต่อสัญญาณโดยตรงกับไมโครคอนโทรลเลอร์ระบบไฟ 3.3 V และระบบไฟ 5 V ได้ทันทีโดยไม่ต้องผ่านวงจรปรับระดับแรงดัน

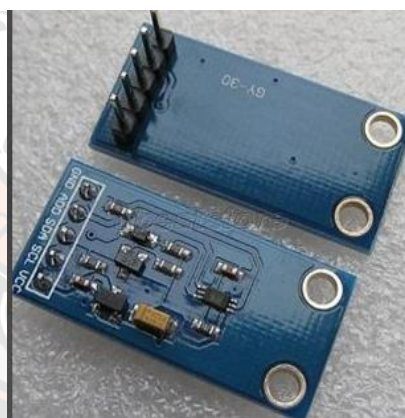
2.17.2 การออกแบบและสร้างเครื่องวัดความส่องสว่าง

เครื่องวัดความส่องสว่าง (Lux Meter) คือเครื่องวัดที่ใช้วัดความสว่างของแสง ในรูปของความเข้มแห่งการส่องสว่าง (Luminous intensity) จะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนหัววัด และส่วนประมวลผลในส่วนของหัววัดจะใช้โมดูล GY-30 (Ambient Light Sensor) เป็นตัว

ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแสงภายในจะประกอบไปด้วยไอซี BH1750FVI เป็นสารกึ่งตัวนำใช้โฟโตไดโอดเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าทำให้เกิดการแสดงผลที่ถูกต้องและแม่นยำสามารถตอบสนองต่อสเปกตรัมใกล้เคียงกับการตรวจวัดแสงจากสายตามนุษย์มีความเร็วในการตรวจจับแสงได้สูง และแสดงผลออกมาในรูปแบบดิจิตอลแล้วส่งข้อมูลไปประมวลผลจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Arduino MEGA 2560



- 1 BH1750FVI
- 2 Low-power 3.3V regulator (3-5V compatible)
- 3 Level conversion



ภาพ 19 เซนเซอร์GY-30 (52)

ตาราง 6 แสดงชื่อขาสัญญาณของบอร์ด (52)

Pin No.	ชื่อขาสัญญาณ	คำอธิบาย
1	GND	ขากราวด์
2	ADD	ขาสำหรับเลือก Address ของบอร์ด LOW=0x23 , HIGH =0x5C
3	SDA	ขาสัญญาณ SDA ของการเชื่อมต่อแบบ I2C
4	SCL	ขาสัญญาณ SCL ของการเชื่อมต่อแบบ I2C
5	VCC	ขาไฟเลี้ยงช่วงแรงดันที่ใช้ 3V-5V

2.18 การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ (53)

ในการประเมินมาตรการการอนุรักษ์พลังงานที่มีการลงทุน มีความจำเป็นต้องใช้วิธีการทางการเงินเพื่อประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ที่จะได้จากการที่จะลงทุน เพื่อเป็นแนวทางในการจัดลำดับความสำคัญของมาตรการอนุรักษ์พลังงาน และใช้งบประมาณและทรัพยากรที่มีอยู่จำกัดอย่างคุ้มค่า วิธีการทางการเงินที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์เพื่อประเมินผลตอบแทนของมาตรการ ได้แก่

- 1) การคำนวณระยะเวลาคืนทุนอย่างง่าย (Simple payback period)
- 2) การคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net present value)
- 3) การหาอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return)

1. ระยะเวลาในการคืนทุน (Pay Back Period, PBP) หมายถึง ระยะเวลาของกระแสเงินสดรับ ที่คาดว่าจะได้รับในขนาดเท่ากับเงินลงทุนเริ่มแรก

คำนวณจาก

$$PBP = \frac{A_0}{A_s} \quad (20)$$

โดยที่ A_0 = เงินลงทุนเริ่มแรก (ปี)
 A_S = กระแสเงินสดสุทธิที่คาดว่าจะได้รับต่อปี

2. ผลตอบแทนสุทธิ (Net Present Value, NPV) หมายถึง เป็นผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับสุทธิตลอดอายุของโครงการกับเงินลงทุนเริ่มแรก ณ อัตราผลตอบแทนที่ต้องการหรือต้นทุนของเงินทุน ของโครงการ

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) = มูลค่าปัจจุบันของเงินสดรับ - มูลค่าปัจจุบันของเงินสดจ่าย

กำหนดให้

คำนวณจาก

$$NPV = -A_0 + A_0 \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (21)$$

โดยที่ A_0 = เงินลงทุนเริ่มแรก (ปี)
 A_S = กระแสเงินสดสุทธิที่คาดว่าจะได้รับต่อปี
 i = ระยะเวลาที่ได้รับผลตอบแทนเริ่มตั้งแต่ปีที่ 1 จนถึงปีที่ n
 n = อายุโครงการ

3. อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return, IRR) หมายถึง การคำนวณหาอัตราคิดลด ที่มีผลทำให้มูลค่าปัจจุบันของเงินสด ที่ได้รับในอนาคตเท่ากับเงินลงทุนที่จ่ายในปัจจุบัน

มูลค่าปัจจุบันของเงินสดรับ = มูลค่าปัจจุบันของเงินสดจ่าย

ดังนั้น มูลค่าปัจจุบันของเงินสดรับ - มูลค่าปัจจุบันของเงินสดจ่าย = 0

คำนวณจาก $NPV = 0$

$$0 = -A_0 + A_0 \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (22)$$

2.19 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัชรินทร์ วิมานจตุรงค์ (54) ได้ทำการศึกษาความเหมาะสมและความคุ้มค่าของการติดตั้งระบบท่อนำแสงแนวตั้งภายในห้างค้าปลีกขนาดใหญ่ในประเทศไทย เพื่อลดภาระการใช้พลังงานในระบบไฟฟ้าส่องสว่าง โดยศึกษาความส่องสว่างเฉลี่ย Daylight Factor และปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ประหยัดได้จากการลดการใช้ไฟฟ้า จากการศึกษามีการใช้การคำนวณด้วยสูตรสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าความส่องสว่างเฉลี่ยที่ได้จากท่อนำแสงแนวตั้ง และเปรียบเทียบกับมาตรฐานความส่องสว่างของสมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย จากผลการทดลองพบว่าแสงภายนอกที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้แสงเข้าสู่ท่อนำแสงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบของแสงภายนอกตกกระทบตั้งฉากกับท่อนำแสง (θ) ยิ่งมุมมีขนาดเล็กจะทำให้มีประสิทธิภาพในการนำพาแสงเข้าสู่ภายในอาคารมีค่ามากขึ้น ขนาดหน้าตัดท่อนำแสง (d) ที่เพิ่มขึ้นในระยะความยาวท่อ (l) และการติดตั้งที่ระยะเท่ากัน ทำให้ได้ปริมาณแสงเข้าสู่ภายในอาคารมากขึ้น ผลการทดลองท่อนำแสงแนวตั้งที่เหมาะสมคือ ขนาดหน้าตัดท่อนำแสง 0.35 0.46 0.53 เมตร ติดตั้งในความยาวท่อ 1.00 เมตร และขนาดหน้าตัดท่อนำแสง 1.00 เมตร ติดตั้งความยาวท่อที่ 6.00 เมตร การติดตั้งท่อนำแสงในขนาดหน้าตัดท่อที่แคบเป็นจำนวนมากจะมีประสิทธิภาพการส่องสว่างที่มากกว่าขนาดหน้าตัดท่อที่กว้างแต่จำนวนที่น้อยกว่า เนื่องจากท่อนำแสงที่สั้นจะทำให้เกิดจำนวนครั้งในการสะท้อนแสงภายในท่อน้อยจึงลดการสูญเสียปริมาณแสงภายในท่อ ทำให้ได้ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยที่มากขึ้น ในขณะเดียวกันท่อนำแสงที่ยาวทำให้ลดระยะห่างระหว่างปลายท่อกับพื้นที่ทำงาน (Mounting Height) ลงส่งผลให้ความส่องสว่างเฉลี่ยมากขึ้น ในด้านการประหยัดพลังงานเมื่อติดตั้งท่อนำแสงควบคู่กับแสงประดิษฐ์สามารถลดค่าใช้จ่ายไฟฟ้าส่องสว่างได้ร้อยละ 26.47 ต่อปี

ศิวดล อุปพงษ์ และคณะ (55) มีการศึกษาการนำแสงธรรมชาติมาใช้ในอาคารผ่านท่อนำแสงแนวตั้ง ได้ผลการศึกษาจากการใช้โปรแกรม DIA Lux 4.9 ในการคำนวณปริมาณแสงสว่างในตำแหน่ง ที่ระนาบพื้นที่ใช้งาน (Workplane) และที่ระนาบพื้นห้อง โดยใช้ท่อนำแสงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 เมตร 0.80 เมตร และ 1.00 เมตร และความยาวท่อนำแสง 0.50 - 6.00 เมตร ทุกระยะ 0.50 เมตร และขนาดท่อนำแสงเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 เมตร ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน CIE

นำเสนอแผนภาพการคำนวณปริมาณความสว่างเฉลี่ยของความยาวท่อตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ท่อขนาดต่าง ๆ และแผนภาพค่า Daylight Factor (DF) ที่ระนาบพื้นที่ใช้งาน (Workplane) และที่ ระนาบพื้นห้อง พร้อมสมการความสัมพันธ์และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (R^2) สามารถนำไปใช้ งานได้ง่ายซึ่งค่าที่ได้จากคำนวณจากโปรแกรม DIALux ที่พัฒนาโดยบริษัทต่างชาติ สูตรที่ใช้คำนวณ จึงใช้สูตรมาตรฐานสากล และตัวโปรแกรมเป็นโปรแกรมที่สามารถนำไปใช้ได้ทั่วโลก ผลที่ได้จึงเป็นค่า มาตรฐานซึ่งในความเป็นจริงค่าที่คำนวณได้อาจน้อยกว่าความเป็นจริง เนื่องจากประเทศไทยเป็น ประเทศที่อยู่ในเขตโซนมีแสงธรรมชาติที่เพียงพอ และมีปริมาณแสงสว่างสูง

การใช้แสงธรรมชาติซึ่งเป็นพลังงานทดแทนจากธรรมชาติจึงเป็นทางเลือกที่ช่วยในด้านการ ประหยัดพลังงานโดยในงานวิจัยนี้ นศมา เพ็ญภักตร์ และคณะ (56) ศึกษาเกี่ยวกับท่อนำแสง แนวตั้ง ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีในการนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ภายในอาคาร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา รูปแบบและขนาดของท่อนำแสงแนวตั้งที่มีความเหมาะสม และมีจุดมุ่งหมาย เพื่อเสนอแนะแนวทาง ในการออกแบบท่อนำแสงแนวตั้งที่เหมาะสมสำหรับอาคารประเภทซูเปอร์สโตร์ จากการทดลองและ ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาประสิทธิภาพของท่อนำแสงแนวตั้งตามตัวแปรที่ได้กำหนดไว้สามารถ สรุปลงได้ดังนี้ ท่อนำแสงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.90 เมตร มีประสิทธิภาพในการนำแสงสว่างเข้า สู่อาคารได้สูงที่สุด ค่า aspect ratio ที่มีประสิทธิภาพในการนำแสงสว่างเข้าสู่อาคารได้สูงที่สุดมีค่าที่ 2 ระยะความสูงจากระดับใช้งานถึงปลายท่อนำแสงที่วัดค่าความส่องสว่างได้มากที่สุดคือ ที่ระยะ ความสูงจากระดับใช้งานถึงปลายท่อนำแสงแนวตั้ง 3 เมตร และมีช่วงเวลาที่มียค่า Daylight Factor ที่ เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ร้อยละ 66.66 - 88.88 และจากการศึกษาตัวแปรทั้งหมดแสงสว่างมี ขอบเขตพื้นที่ที่มีความเหมาะสมเฉลี่ยที่เส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกินกว่า 6.00 เมตร โดยงานวิจัยชิ้นนี้จะ เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบท่อนำแสงแนวตั้งที่เหมาะสมกับซูเปอร์สโตร์ที่มีขนาดและความสูง ฝ้าเพดานที่แตกต่างกัน

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงภายในของท่อนำแสงแนวตั้งที่ใช้วัสดุต่างชนิดกัน ในสภาวะแวดล้อมควบคุมจำลอง และสภาวะแวดล้อมอากาศจริง โดยจะศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพต่อการส่งผ่านแสงของท่อนำแสงแนวตั้งที่ทำจากโลหะผสมอลูมิเนียม ท่อนำแสงแนวตั้งที่ทำจากโลหะผสมสังกะสี และท่อนำแสงแนวตั้งที่ทำจากวัสดุพีวีซี (สีฟ้า)

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบห้องทดสอบและท่อนำแสงแนวตั้ง พร้อมกับติดตั้งท่อนำแสงแนวตั้งกับห้องทดสอบ
3. ทดสอบท่อนำแสงแนวตั้งในทุก ๆ มุมของการรับแสงที่กำหนด (มุม 0° – 80°) โดยใช้หลอดไฟ LED ขนาด 20 วัตต์เป็นแหล่งกำเนิดแสง
4. วิเคราะห์ผลการทดลอง
5. สรุปผลการทดลองและจัดทำรูปเล่มฉบับสมบูรณ์

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

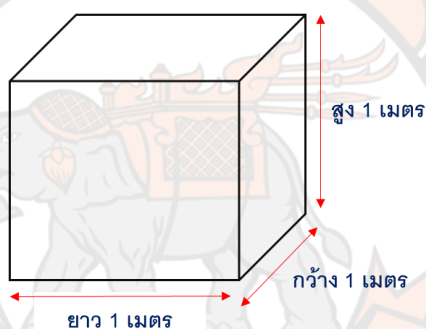
1. เครื่องมือวัดแสง Lux meter
2. หลอดไฟ LED ขนาด 20 วัตต์
3. เครื่องวงกลม
4. แผ่นโลหะผสมอลูมิเนียม
5. แผ่นโลหะผสมสังกะสี
6. ท่อ PVC (สีฟ้า)
7. สายเทอร์โมคัปเปิล
8. เครื่องวัดความเร็วลม
9. เครื่องวัดความเข้มแสง
10. Sensor GY-30
11. สายซีลล์ 4 คอร์

12. Data logger
13. บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3

3.3 การออกแบบห้องทดสอบและท่อ

3.3.1 ห้องทดสอบศึกษาภายใต้สภาวะควบคุม

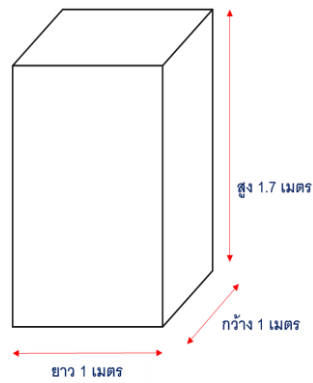
ลักษณะของโครงสร้างห้องทดสอบขนาดความกว้าง 1 เมตร x ความยาว 1 เมตร x ความสูง 1 เมตร และผนังใช้ไม้อัดขนาด 4 มิลลิเมตร แสดงดังภาพ 20 โดยจะติดตั้งหลอดไฟ LED ขนาด 20 W เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยจะติดตั้งท่อนำแสงที่บริเวณด้านบนของหลังคาเพื่อรับแสงที่มาจากแหล่งกำเนิดแสงใช้ Lux meter ในการเก็บค่าความส่องสว่างทั้งหมด 5 ตำแหน่ง เพื่อบันทึกข้อมูลเก็บค่าความส่องสว่างแต่ละตำแหน่ง



ภาพ 20 ห้องทดสอบภายใต้สภาวะควบคุม

3.3.2 ห้องทดสอบภายใต้สภาวะแวดล้อมอากาศจริง

ลักษณะของโครงสร้างห้องทดสอบขนาดความกว้าง 1 เมตร x ความยาว 1 เมตร x ความสูง 1.7 เมตร และผนังใช้ไม้อัดขนาด 4 มิลลิเมตร แสดงดังภาพ 21 โดยจะติดตั้งท่อนำแสงที่บริเวณด้านบนของหลังคา เพื่อรับแสงที่มาจากดวงอาทิตย์ตลอดทั้งวันติดตั้งสายซิลล์ 5 คอร์ ทั้งหมด 5 ตำแหน่ง ต่อเข้ากับวงจรวัดความส่องสว่าง GY-30 ขนาด 5 V เพื่อบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ เก็บค่าความส่องสว่างแต่ละตำแหน่งทุก ๆ 5 นาที



ภาพ 21 ห้องทดสอบภายใต้สภาวะแวดล้อมจริง

การออกแบบท่อนำแสงแนวตั้ง

1. ประเภทของท่อนำแสงแนวตั้ง
 - ท่อนำแสงโลหะผสมอลูมิเนียม
 - ท่อนำแสงโลหะผสมสังกะสี
 - ท่อนำแสงพีวีซี
2. ขนาดของท่อนำแสงแนวตั้ง

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

- 0.20 เมตร
- 0.25 เมตร
- 0.30 เมตร

ความยาว

- 0.50 เมตร
- 1.00 เมตร
- 1.50 เมตร

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

3.4.1 ศึกษาประสิทธิภาพของท่อนำแสงในสภาวะแวดล้อมจำลอง

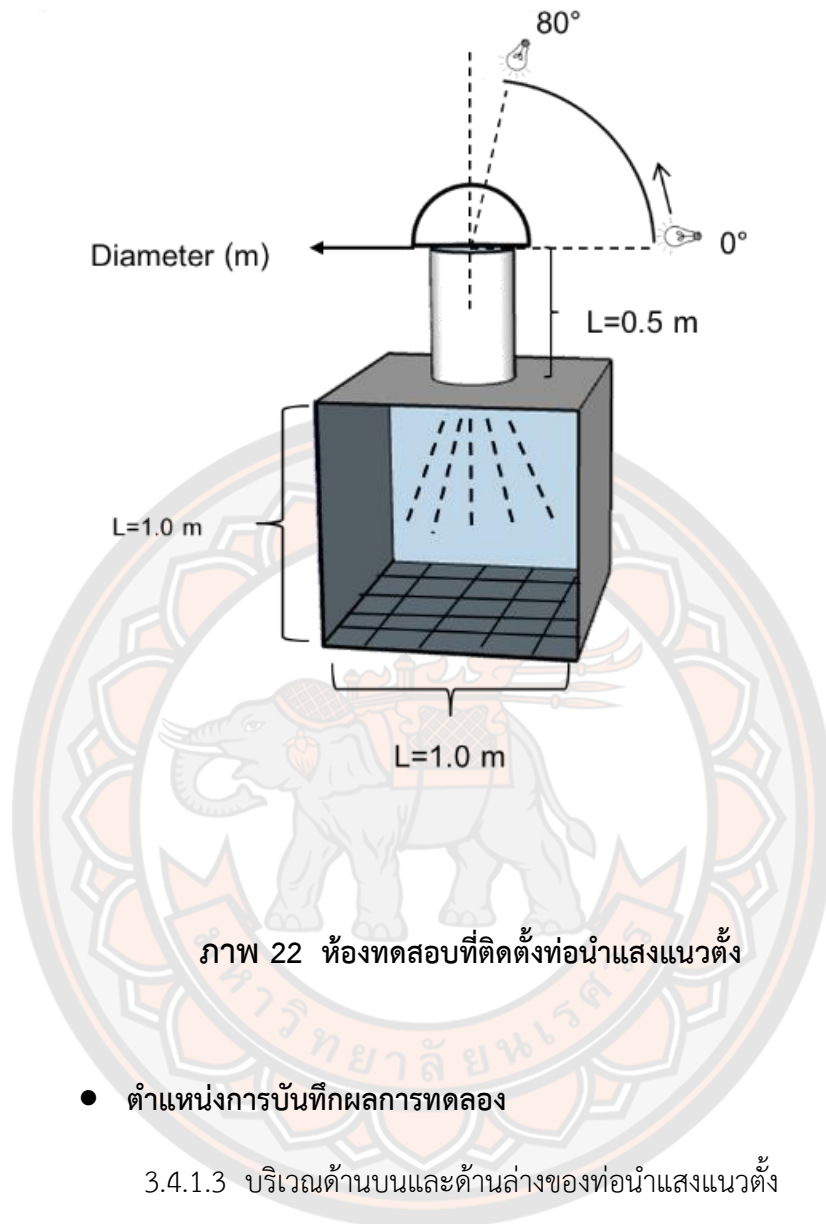
ออกแบบห้องทดสอบขนาดความกว้าง 1 เมตร ความยาว 1 เมตร และความสูง 1 เมตร ติดตั้งท่อนำแสงไว้บริเวณด้านบนของห้องทดสอบโดยท่อนำแสงแนวตั้งทำจากวัสดุที่แตกต่างกันระหว่างโลหะผสมอลูมิเนียมกับโลหะผสมสังกะสีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 0.25 และ 0.30 เมตร ที่มีความยาว 0.5 1.0 และ 1.5 เมตร และท่อนำแสงแนวตั้งวัสดุที่ทำจากพีวีซี (สีฟ้า) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร ที่มีความยาว 0.50 เมตร โดยใช้หลอดไฟ LED 20 วัตต์ จำนวน 1 หลอด เป็นแหล่งกำเนิดแสงแทนแสงสว่างจากดวงอาทิตย์ โดยทดสอบมุมเงยที่ 0° ถึง 80° เพิ่มขึ้นครั้งละ 10 ° แสดงในภาพ 22 ใช้เครื่องวัดแสง (Lux meter) ในการบันทึกผลค่าการทดลอง โดยจะบันทึกผลการทดลองบริเวณปากท่อและบริเวณปลายท่อนำแสงแนวตั้งโดยในแต่ละบริเวณจะบันทึกทั้งหมด 9 ตำแหน่งดังแสดงในภาพ 23 จากนั้นบันทึกผลการทดลองที่พื้นห้องทดสอบจำนวน 16 ตำแหน่งดังแสดงในภาพ 24 แล้วนำค่าความส่องสว่างที่ได้ไปวิเคราะห์ แล้วนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการส่องสว่าง และค่า Daylight Factor แสดงดังภาพ 22

การทำการทดลอง

- การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

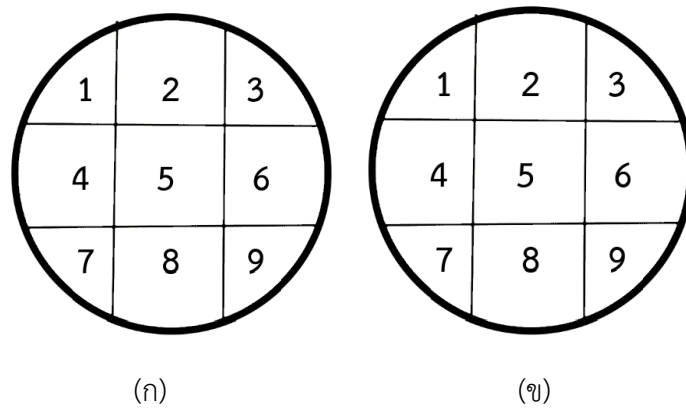
3.4.1.1 ติดตั้งท่อนำแสงแนวตั้งกับห้องทดสอบ

3.4.1.2 ติดตั้งหลอดไฟกับขาตั้งพร้อมเครื่องวงกลมเพื่อบอกมุมที่หลอดไฟกระทำกับท่อนำแสงแนวตั้ง



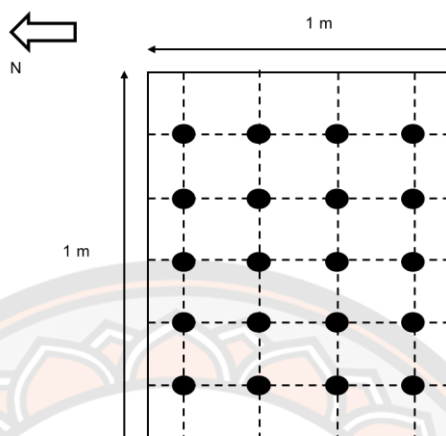
- ตำแหน่งการบันทึกผลการทดลอง

3.4.1.3 บริเวณด้านบนและด้านล่างของท่อนำแสงแนวตั้ง



ภาพ 23 ตำแหน่งการบันทึกค่าความส่องสว่างของท่อนำแสงแนวตั้ง (ก) ด้านบน (ข) ด้านล่าง

3.4.1.4 บริเวณพื้นที่ห้องทดสอบ



ภาพ 24 ตำแหน่งการบันทึกค่าความส่องสว่างบริเวณพื้นที่ห้อง

- มุมที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้จำลองตำแหน่งของแสง โดยมุมมองที่มองลงมาจากด้านบน โดยมุมเงยตั้งแต่ 0° ถึง 80° เพิ่มขึ้นครั้งละ 10° แสดงดังภาพ 22

3.4.2 ศึกษาประสิทธิภาพของท่อนำแสงในสภาวะอากาศจริง

ออกแบบห้องทดสอบขนาดความกว้าง 1 เมตร ความยาว 1 เมตร และความสูง 1.7 เมตร ติดตั้งท่อนำแสงไว้บริเวณด้านบนของห้องทดสอบโดยท่อนำแสงแนวตั้งจากวัสดุโลหะผสมอลูมิเนียมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร ความยาว 0.50 เมตร โดยแหล่งกำเนิดแสงสว่างมาจากดวงอาทิตย์ ใช้เครื่องวัดแสง (Lux meter) ในการบันทึกผลการทดลอง โดยจะบันทึกผลการทดลองบริเวณปากท่อและปลายท่อนำแสงแนวตั้งโดยในแต่ละบริเวณจะบันทึกทั้งหมด 5 ตำแหน่ง จากนั้นบันทึกผลการทดลองที่พื้นที่ห้องทดสอบจำนวน 16 ตำแหน่งดังแสดงในภาพ 25 แล้วนำค่าความส่องสว่างที่บันทึกผลได้ไปวิเคราะห์แล้วนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการส่องสว่าง และค่า Daylight Factor



ภาพ 25 ห้องทดสอบสภาวะอากาศจริง

3.4.3 ศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์

1. ระยะเวลาในการคืนทุน (Pay Back Period, PBP)

$$PBP = \frac{A_0}{A_S}$$

2. ผลตอบแทนสุทธิ (Net Present Value, NPV)

$$NPV = -A_0 + A_0 \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right]$$

3. อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return, IRR)

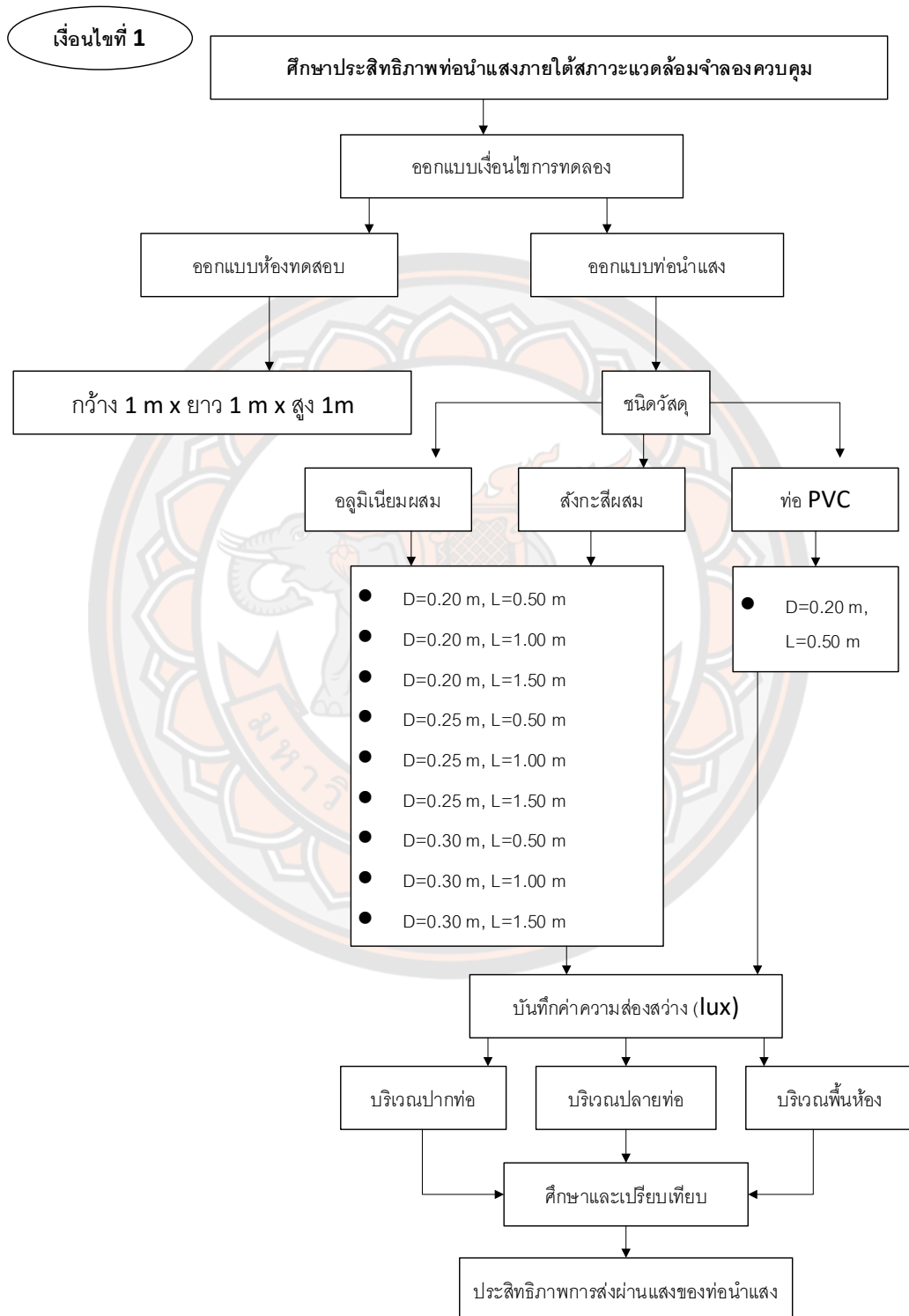
$$0 = -A_0 + A_0 \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right]$$

3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยสภาพอากาศจริง

งานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของท่อนำแสงแนวตั้งภายใต้เงื่อนไขการทดลองทั้ง 2 แบบ โดยแบบที่ 1 ศึกษาประสิทธิภาพของท่อนำแสงในสภาวะแวดล้อมจำลองแสดงดังภาพที่ 26 และแบบที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพของท่อนำแสงในสภาวะอากาศจริงแสดงดังภาพที่ 27 เริ่มจากศึกษาประสิทธิภาพของท่อนำแสงในสภาวะแวดล้อมจำลอง เปรียบเทียบประสิทธิภาพของท่อนำแสงแนวตั้งที่ใช้วัสดุต่างกันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 0.25 และ 0.30 เมตร ที่ความยาว 0.50 1.00 และ 1.50 เมตร ติดตั้งบริเวณด้านบนของห้องทดสอบขนาดความกว้าง 1 เมตร ความยาว 1 เมตร และความสูง 1 เมตร ซึ่งท่อนำแสงแนวตั้งทั้งสองชนิดจะทดสอบกับแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดไฟ LED 20 วัตต์ จำนวน 1 หลอด ที่จำลองแทนแสงจากดวงอาทิตย์ โดยจะเปลี่ยนมุมที่หลอดไฟกระทำกับท่อนำแสง ได้แก่ มุมเงยตั้งแต่ 0° ถึง 80° เพิ่มขึ้นครั้งละ 10° บันทึกค่าความส่องสว่างของท่อนำแสงด้วยเครื่องลักซ์มิเตอร์รุ่น Digicon LX-70 บริเวณด้านบน บริเวณด้านล่างของท่อนำแสงแนวตั้งและพื้นของห้องทดสอบ แล้วนำประสิทธิภาพการส่องสว่างของท่อนำแสงแนวตั้งทั้งสองชนิดมาเปรียบเทียบกัน ต่อมาทำการทดลองศึกษาประสิทธิภาพของท่อนำแสงในสภาวะอากาศจริง ศึกษาประสิทธิภาพของท่อนำแสงแนวตั้งที่ทำจากโลหะผสมอลูมิเนียมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร และความยาว 0.50 เมตร ติดตั้งบริเวณด้านบนของห้องทดสอบขนาดความกว้าง 1 เมตร ความยาว 1 เมตร และความสูง 1.7 เมตร ซึ่งท่อนำแสงแนวตั้งรับแสงจากดวงอาทิตย์ตลอดทั้งวัน บันทึกค่าความส่องสว่างของท่อนำแสงด้วยวงจรถนเซเซอร์ GY-30 ขนาด 5 V บริเวณด้านบน บริเวณด้านล่างของท่อนำแสงแนวตั้งและพื้นของห้องทดสอบ แล้วนำประสิทธิภาพการส่องสว่างของท่อนำแสงแนวตั้งมาเปรียบเทียบหาค่าร้อยละ Daylight Factor ศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์

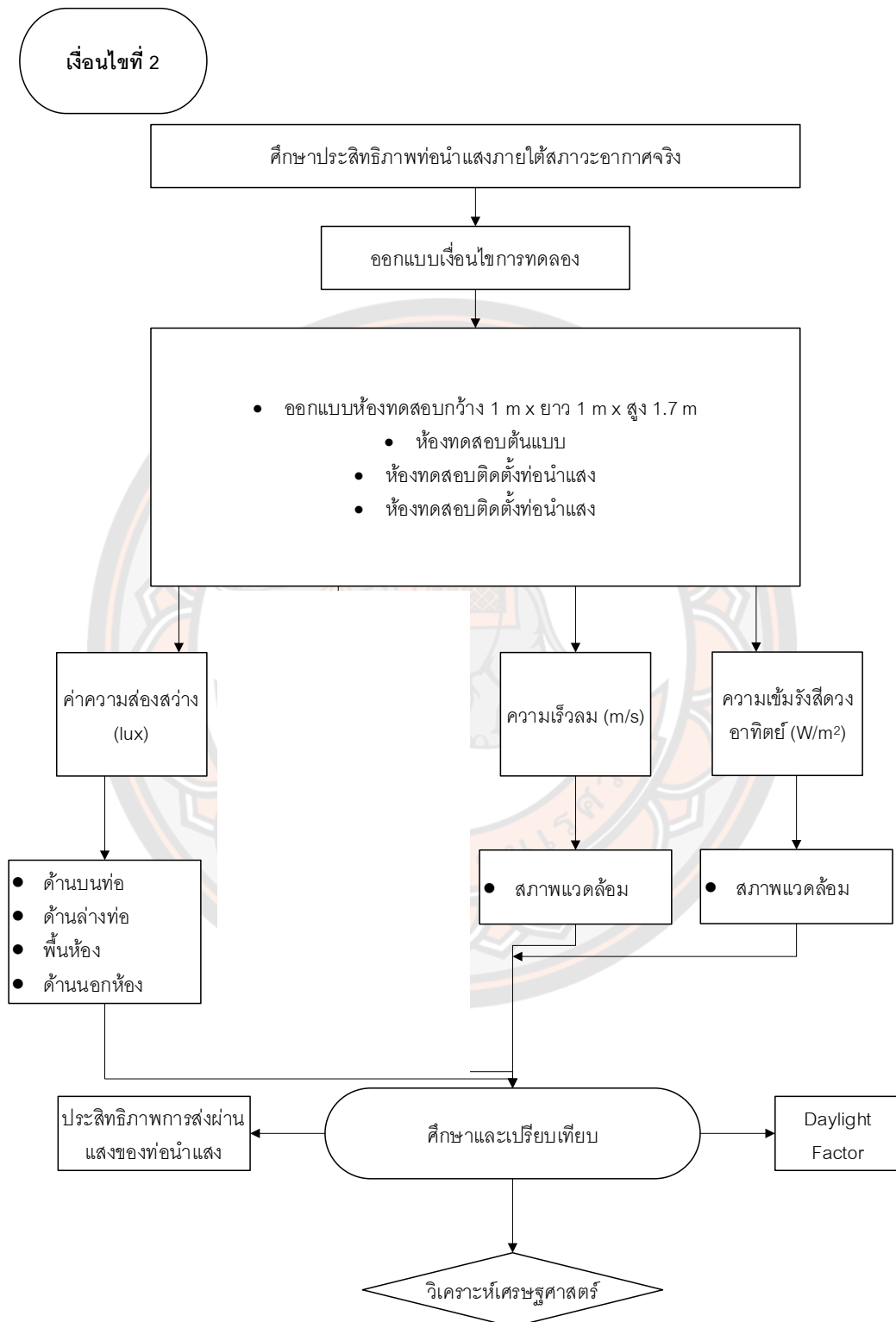
3.6 ขั้นตอนการศึกษางานวิจัย

ศึกษาประสิทธิภาพของท่อนำแสงในสภาวะแวดล้อมจำลอง



ภาพ 26 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองภายใต้สภาวะห้องควบคุม

ศึกษาประสิทธิภาพของท่อนำแสงในสภาวะอากาศจริง



ภาพ 27 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองภายใต้สภาวะอากาศจริง

บทที่ 4

ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการออกแบบท่อนำแสงแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 0.25 และ 0.30 เมตร ขนาดท่อนมีความยาว 0.50 1.00 และ 1.50 เมตร โดยใช้วัสดุต่างชนิดกัน ได้แก่ โลหะผสมอลูมิเนียม โลหะผสมสังกะสี และวัสดุพีวีซี สำหรับวัสดุพีวีซี (ชนิดสีฟ้า) จะใช้ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร และความยาว 0.50 เมตร เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการส่งผ่านของแสงภายในของท่อนำแสงแนวตั้ง โดยการศึกษาออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยเริ่มจากการติดตั้งท่อนำแสงไว้บริเวณด้านบนของห้องทดสอบที่มีความยาว 1.00 เมตร ความกว้าง 1.00 เมตร และความสูง 1.70 เมตร โดยใช้หลอดไฟ LED ขนาด 20 วัตต์ จำนวน 1 หลอด เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดแสงจำลองโดยจะทำการศึกษาทั้ง 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 ศึกษาประสิทธิภาพของท่อนำแสงแนวตั้งภายใต้สภาวะแวดล้อมควบคุม กรณีที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพของท่อนำแสงแนวตั้งภายใต้สภาวะแวดล้อมอากาศจริง ซึ่งได้ผลการวิจัย ดังนี้

ศึกษาประสิทธิภาพของท่อนำแสงแนวตั้งภายใต้สภาวะแวดล้อมควบคุม

4.1 ค่าความสว่างเฉลี่ยบริเวณปลายท่อด้านบนและปลายท่อด้านล่างของท่อนำแสงแนวตั้ง

4.1.1 ค่าความส่องสว่างปลายท่อด้านบนของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียม Al 30,50 โลหะผสมสังกะสี Zn 30,50 และพีวีซี PVC 30,50

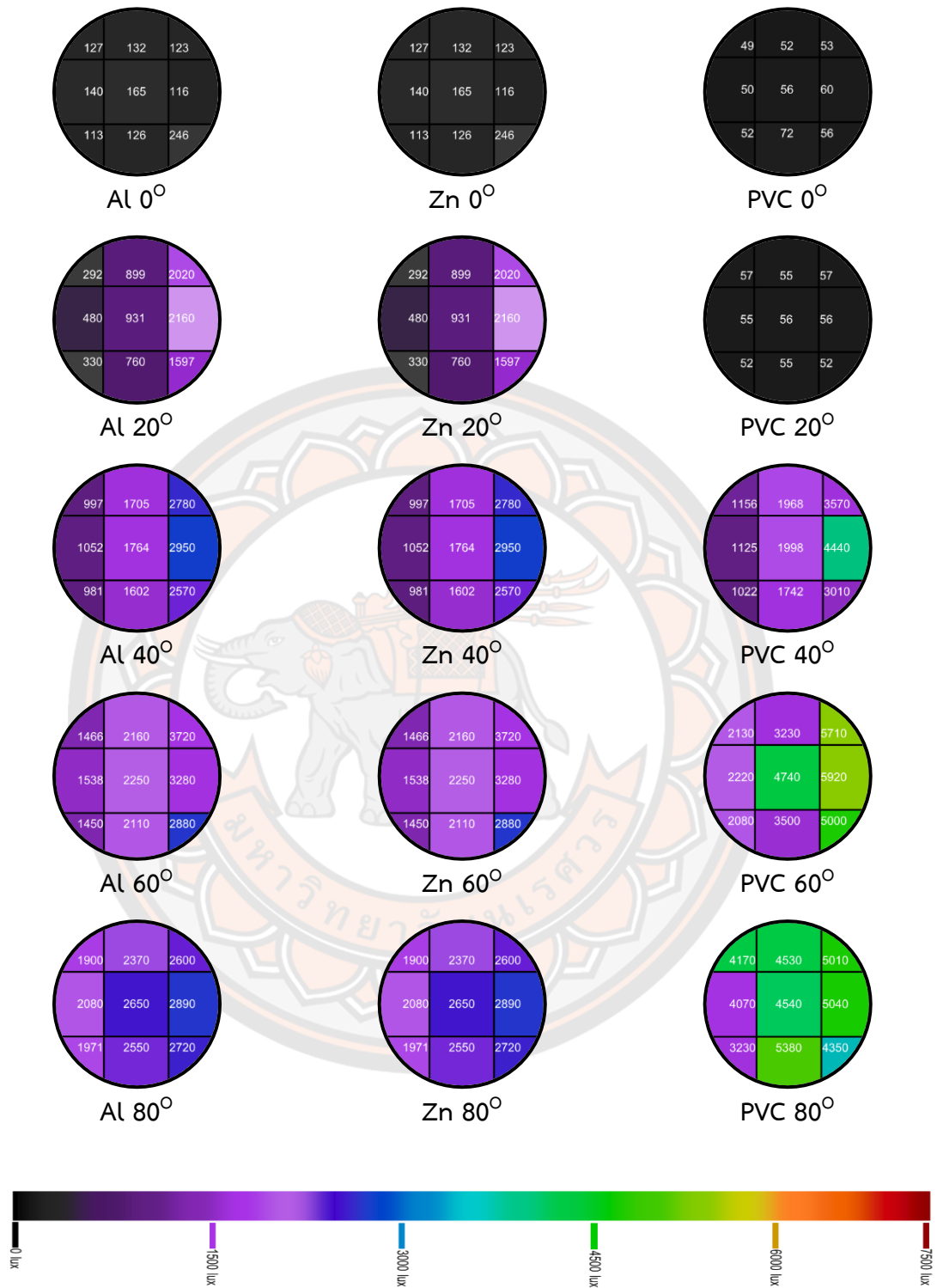
ภาพ 28 - 29 แสดงลักษณะการกระจายความส่องสว่างที่ตำแหน่งต่าง ๆ บริเวณปลายท่อด้านบนและปลายท่อด้านล่างของท่อนำแสงชนิดโลหะผสมอลูมิเนียม โลหะผสมสังกะสี และพีวีซี มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร ที่ความยาว 0.50 เมตร มีการทดลองควบคุมมุมตกกระทบตั้งแต่ 0° - 80° จากการศึกษาเมื่อพิจารณาในระบบ 2 มิติ พบว่าที่ตำแหน่งปลายด้านบนของท่อนำแสง จากการศึกษาพิจารณาต่อโลหะผสมอลูมิเนียมที่ตำแหน่งปลายท่อด้านบนที่มุมตกกระทบของแสง 0° ค่าการกระจายตัวความส่องสว่างในแต่ละจุดมีค่าสม่ำเสมอ และเมื่อมุมเพิ่มขึ้นจาก 0° - 20° ขณะที่มุมตกกระทบของแสงเพิ่มขึ้นจาก 20° - 80° พบว่าลักษณะการกระจายของแสงในแต่ละจุดไม่สม่ำเสมอดังแสดงในภาพที่ 28 บริเวณปลายท่อด้านบนที่มุมแสงตกกระทบ 0°

อยู่ในช่วง 113 - 246 ลักซ์ เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นค่าความสว่าง ณ ตำแหน่งบริเวณเดียวกันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อนำค่าแต่ละจุดมาหาค่าเฉลี่ยพบว่าค่าความสว่างบริเวณปลายท่อด้านบนมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมุมตกกระทบของแสงเพิ่มขึ้น

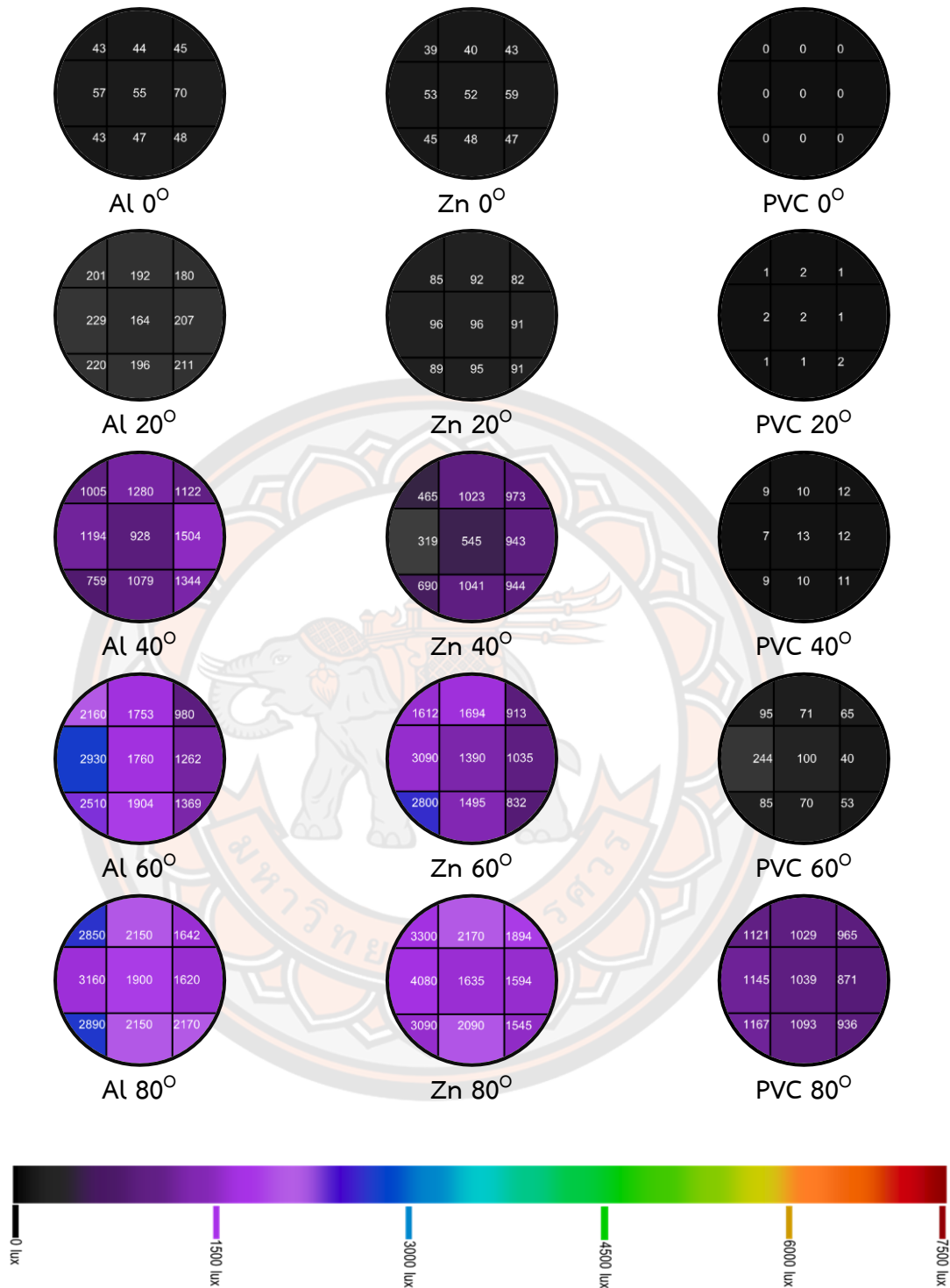
สำหรับกรณีของโลหะผสมสังกะสีและพีวีซี พบว่าลักษณะการกระจายตัวของแสงมีลักษณะคล้ายกับลักษณะการกระจายตัวของโลหะผสมอลูมิเนียมค่าเฉลี่ยของโลหะผสมสังกะสีมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 113 - 246 ลักซ์ ที่มุมตกกระทบ 0° เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นจาก 0° - 80° สำหรับกรณีของพีวีซีมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 49 - 72 ลักซ์

พิจารณาโลหะผสมอลูมิเนียมที่มุมตกกระทบ 0° - 80° ที่ตำแหน่งปลายท่อด้านล่าง ณ ตำแหน่งเดียวกันที่มุม 0° - 30° ค่าความส่องสว่างมีการกระจายสม่ำเสมอ การกระจายแสงเริ่มไม่สม่ำเสมอเมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นแสดงดังภาพ 29 ค่าความส่องสว่างที่มุม 0° อยู่ในช่วง 43 - 70 ลักซ์ เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มค่าความส่องสว่างเพิ่มขึ้น ณ ตำแหน่งเดียวกันของมุม ต่อมาพิจารณาโลหะผสมสังกะสีที่มุมตกกระทบ 0° - 80° ที่ตำแหน่งปลายท่อด้านล่าง ณ ตำแหน่งเดียวกันที่มุม 0° ค่าความส่องสว่างมีการกระจายสม่ำเสมอ เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นการกระจายแสงไม่สม่ำเสมอแสดงดังภาพ 29 เมื่อพิจารณาค่าความส่องสว่างที่มุม 0° อยู่ในช่วง 39 - 59 ลักซ์ และพิจารณาพีวีซีที่มุมตกกระทบ 0° - 80° ที่ตำแหน่งปลายท่อด้านล่าง ณ ตำแหน่งเดียวกันที่มุม 0° - 20° ค่าความส่องสว่างมีการกระจายสม่ำเสมอ เมื่อพิจารณาค่าความส่องสว่างที่มุม 0° อยู่ในช่วง 0 ลักซ์ เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มค่าความส่องสว่างเพิ่มขึ้นซึ่งมีลักษณะแนวโน้มเพิ่มขึ้นคล้ายกับโลหะผสมอลูมิเนียมและโลหะผสมสังกะสีแสดงดังภาพ 29

จากการศึกษาค่าความส่องสว่างทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ โลหะผสมอลูมิเนียม โลหะผสมสังกะสี และพีวีซีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร และความยาว 0.50 เมตร พบว่าที่มุมตกกระทบเดียวกันวัสดุพีวีซีมีค่าเฉลี่ยการส่องสว่างน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับมุมตกกระทบเดียวกัน ดังนั้นวัสดุทางเลือกที่จะนำมาศึกษาต่อจึงเลือกเพียงแค่ 2 ชนิด ได้แก่ โลหะผสมอลูมิเนียม โลหะผสมสังกะสี แต่ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร และความยาว 0.50 เมตร เพื่อศึกษาส่วนต่อไปดังนี้



ภาพ 28 การกระจายความส่องสว่างบริเวณปลายท่อด้านบนของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสม อลูมิเนียม โลหะผสมสังกะสี และพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.30 เมตร ความยาว 0.50 เมตร

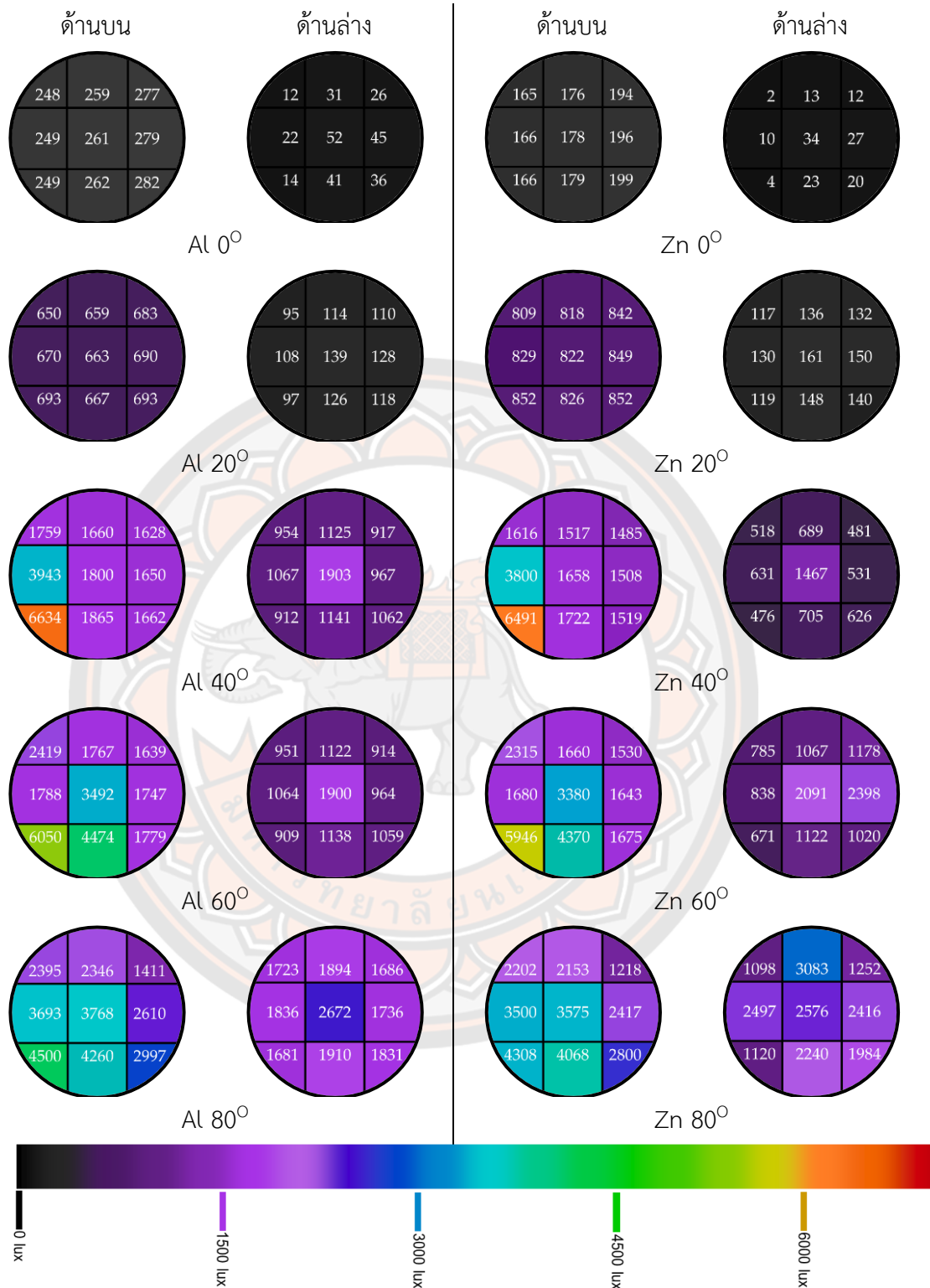


ภาพ 29 การกระจายความส่องสว่างบริเวณปลายท่อด้านล่างของท่อ นำแสงแนวตั้งโลหะผสม อลูมิเนียม โลหะผสมสังกะสี และพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.30 เมตร ความยาว 0.50 เมตร

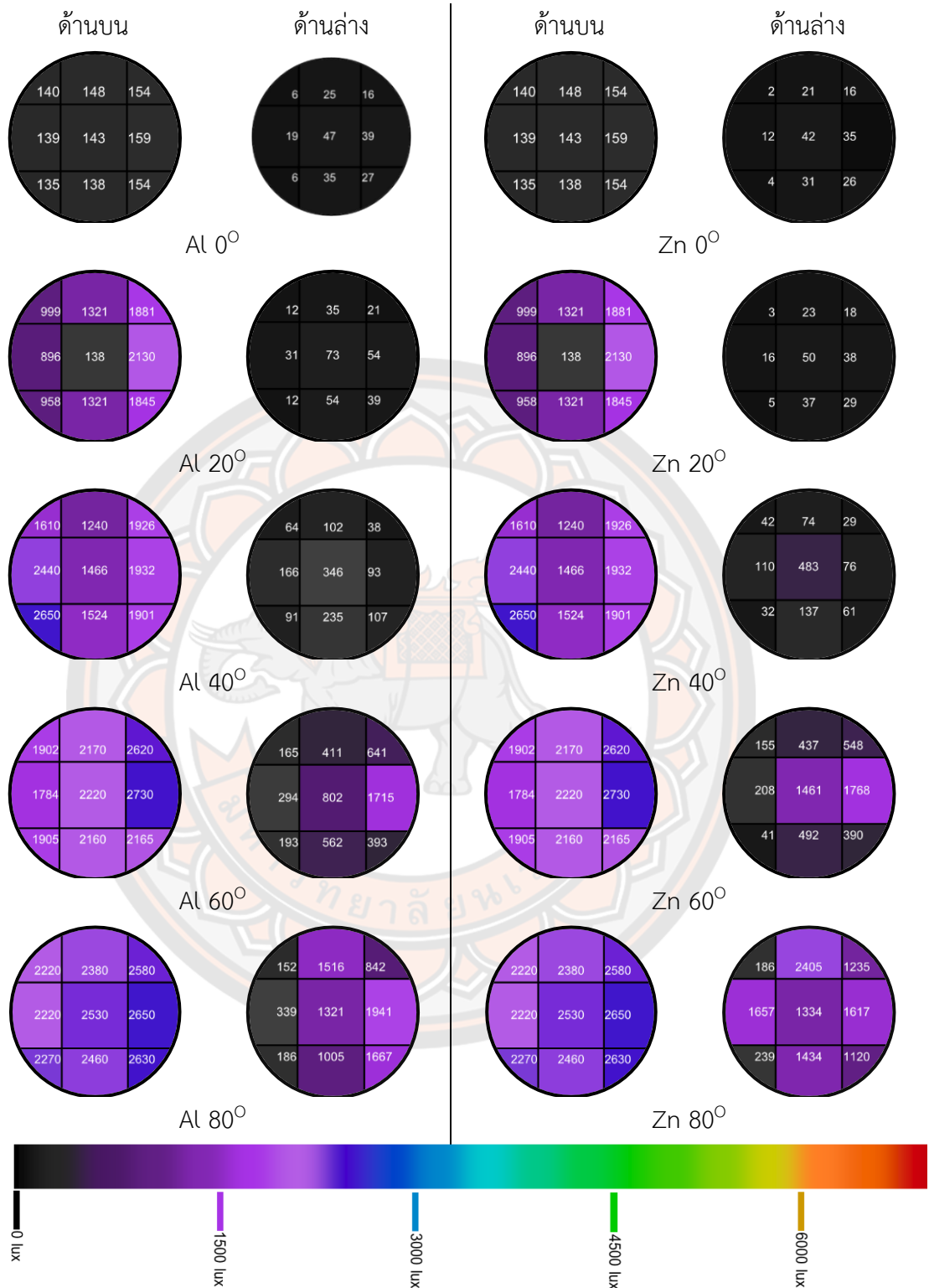
4.1.2 ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมและโลหะผสมสังกะสี ความยาว 0.50 เมตร Al 20,50 Al 25,50 Zn 20,50 Zn 25,50

พิจารณาภาพ 30 – 31 แสดงลักษณะการกระจายความส่องสว่างที่ตำแหน่งต่าง ๆ บริเวณปลายท่อด้านบนและปลายท่อด้านล่างของท่อนำแสงชนิดโลหะผสมอลูมิเนียม และโลหะผสมสังกะสี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.20, 0.25 เมตร ที่ความยาว 0.50 เมตร มีการทดลองควบคุมมุมตกกระทบตั้งแต่ 0° - 80° พบว่าที่ตำแหน่งปลายด้านบนของท่อนำแสง จากการศึกษาค้นคว้าพิจารณาท่อโลหะผสมอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.20 เมตร ที่ตำแหน่งปลายท่อด้านบนที่มุมตกกระทบของแสง 0° ค่าการกระจายตัวความส่องสว่างในแต่ละจุดมีค่าสม่ำเสมอ เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นจาก 0° – 20° ในขณะที่มุมตกกระทบของแสงเพิ่มขึ้นจาก 20° – 80° พบว่าลักษณะการกระจายของแสงในแต่ละจุดมีความไม่สม่ำเสมอดังแสดงในภาพ 30 ที่ตำแหน่งบริเวณปลายท่อค่าความส่องสว่างที่มุมแสงตกกระทบที่มุม 0° อยู่ในช่วง 248 – 282 ลักซ์ ต่อมาพิจารณาโลหะผสมสังกะสีที่มุมตกกระทบ 0° - 80° ที่ตำแหน่งปลายท่อด้านบน ณ ตำแหน่งเดียวกันที่มุม 0° ค่าความส่องสว่างมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นการกระจายแสงไม่สม่ำเสมอแสดงดังภาพ 30 เมื่อพิจารณาค่าความส่องสว่างที่มุม 0° มีค่าความส่องสว่างอยู่ในช่วง 165 – 199 ลักซ์ เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นค่าความส่องสว่าง ณ ตำแหน่งบริเวณเดียวกันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อนำค่าแต่ละจุดมาหาค่าเฉลี่ยพบว่าค่าความส่องสว่างบริเวณปลายท่อด้านบนมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมุมตกกระทบของแสงเพิ่มขึ้น

พิจารณาโลหะผสมอลูมิเนียมที่มุมตกกระทบ 0° - 80° ที่ตำแหน่งปลายท่อด้านล่าง ณ ตำแหน่งเดียวกันที่มุม 0° - 20° ค่าความส่องสว่างมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ การกระจายแสงเริ่มมีความไม่สม่ำเสมอเมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นแสดงดังภาพ 30 ค่าความส่องสว่างที่มุม 0° อยู่ในช่วง 12 – 52 ลักซ์ เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มค่าความส่องสว่างเพิ่มขึ้น ณ ตำแหน่งเดียวกันของมุม ต่อมาพิจารณาโลหะผสมสังกะสีที่มุมตกกระทบ 0° - 80° ที่ตำแหน่งปลายท่อด้านล่าง ณ ตำแหน่งเดียวกันที่มุม 0° ค่าความส่องสว่างมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นการกระจายแสงไม่สม่ำเสมอแสดงดังภาพ 30 เมื่อพิจารณาค่าความส่องสว่างที่มุม 0° อยู่ในช่วง 39 – 59 ลักซ์ เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มค่าความส่องสว่างเพิ่มขึ้นซึ่งมีลักษณะแนวโน้มเพิ่มขึ้นคล้ายกับโลหะผสมอลูมิเนียมและโลหะผสมสังกะสีแสดงดังภาพ 30 -31



ภาพ 30 การกระจายความส่องสว่างบริเวณปลายท่อด้านบนและปลายท่อด้านล่างของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมและโลหะผสมสังกะสี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.20 เมตร ความยาว 0.50 เมตร



ภาพ 31 การกระจายความส่องสว่างบริเวณด้านบนและด้านล่างของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสม อลูมิเนียม และโลหะผสมสังกะสี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.25 เมตร ความยาว 0.50 เมตร

4.1.3 ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียม และโลหะผสมสังกะสี

ความยาว 1.00 เมตร Al 20,100 Al 25,100 Al 30,100 Zn 20,100

Zn 25,100 Zn 30,100

พิจารณาท่อนำแสงเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20, 0.25, 0.30 เมตร ที่ความยาว 1.00 เมตร โดยใช้วัสดุต่างชนิดกัน ได้แก่ โลหะผสมอลูมิเนียม และโลหะผสมสังกะสีที่มุมแสงตกกระทบ 0° - 80° จากการศึกษาค่าความส่องสว่างในแนวระนาบ 2 มิติ ศึกษาลักษณะการกระจายความส่องสว่างของแสงที่ตำแหน่งบริเวณปลายท่อด้านบนและปลายท่อด้านล่างของท่อนำแสงแสดงดังภาพ 32

- 34

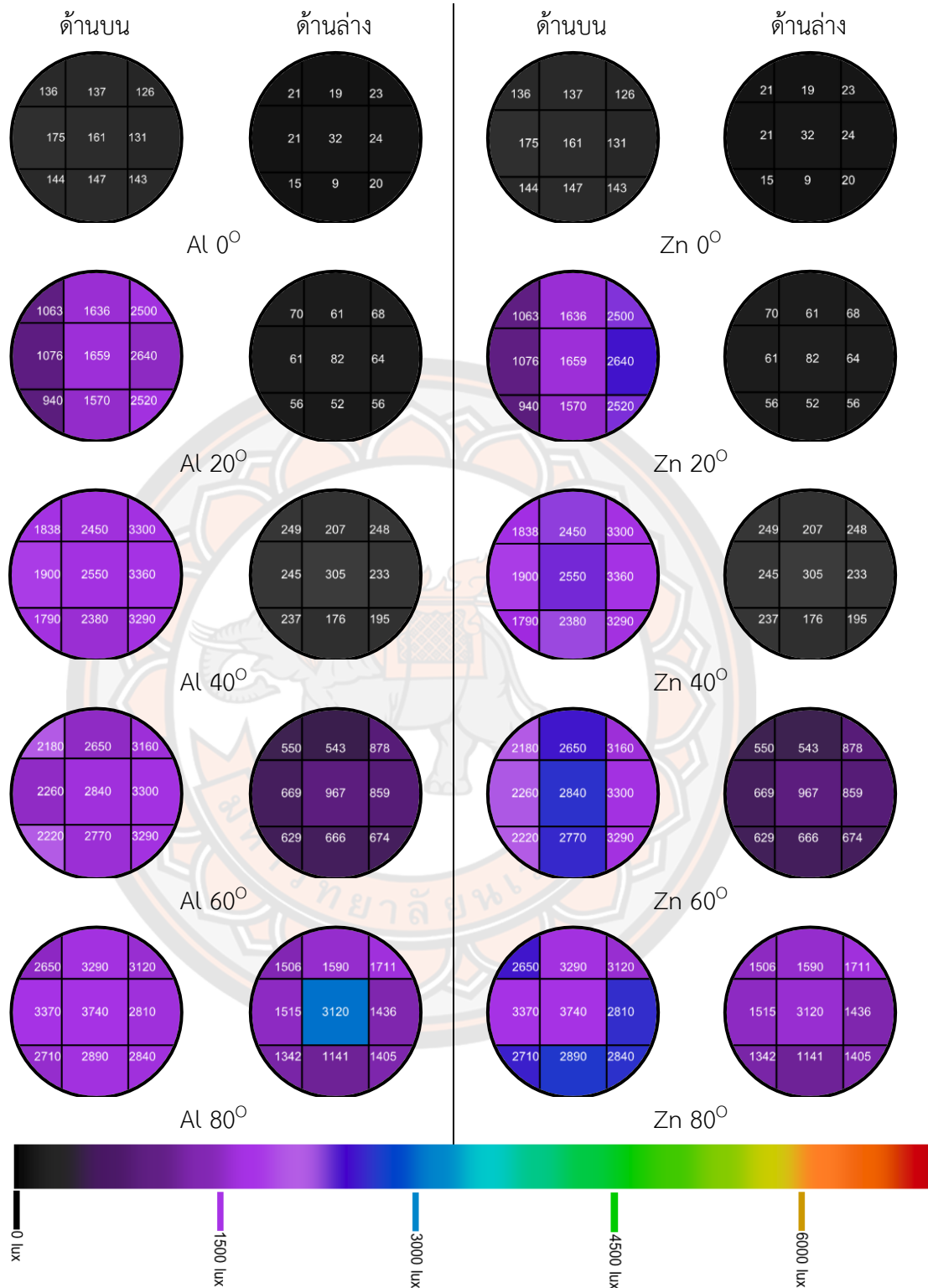
จากภาพ 32 แสดงลักษณะการกระจายความส่องสว่างที่ตำแหน่งต่าง ๆ บริเวณปลายท่อด้านบนและปลายท่อด้านล่างของท่อนำแสงชนิดโลหะผสมอลูมิเนียม และโลหะผสมสังกะสี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 เมตร ที่ความยาว 1.00 เมตร มีการทดลองควบคุมมุมตกกระทบตั้งแต่มุม 0° - 80° จากการศึกษาเลือกพิจารณาท่อนำแสงโลหะผสมอลูมิเนียมพบว่าที่ตำแหน่งปลายท่อด้านบนที่มุมตกกระทบของแสง 0° ค่าการกระจายตัวความส่องสว่างในแต่ละจุดมีค่าสม่ำเสมอ และเมื่อมุมเพิ่มขึ้นจาก 0° - 20° ขณะที่มุมตกกระทบของแสงเพิ่มขึ้นจาก 20° - 80° พบว่าลักษณะการกระจายของแสงในแต่ละจุดมีความไม่สม่ำเสมอดังแสดงในภาพที่ 32 บริเวณปลายท่อค่าความส่องสว่างที่มุมแสงตกกระทบ 0° อยู่ในช่วง 131- 175 ลักซ์ ต่อมาพิจารณาโลหะผสมสังกะสีที่มุมตกกระทบ 0° - 80° ที่ตำแหน่งปลายท่อด้านบน ณ ตำแหน่งเดียวกันที่มุม 0° ค่าความส่องสว่างมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นการกระจายแสงไม่สม่ำเสมอแสดงดังภาพ 32 เมื่อพิจารณาค่าความส่องสว่างที่มุม 0° มีค่าความส่องสว่างอยู่ในช่วง 131 - 1161 ลักซ์ เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นค่าความส่องสว่าง ณ ตำแหน่งบริเวณเดียวกันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อนำค่าแต่ละจุดมาหาค่าเฉลี่ยพบว่าค่าความส่องสว่างบริเวณปลายท่อด้านบนมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมุมตกกระทบของแสงเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำแสงจาก 0.20 เมตร โดยเพิ่มเป็น 0.25 0.30 เมตร ที่ความยาว 1.00 เมตรดังภาพ 33 - 34 พบว่าค่าความส่องสว่างมีลักษณะแนวโน้มเพิ่มขึ้นคล้ายกับโลหะผสมอลูมิเนียมและโลหะผสมสังกะสีแสดงดังภาพ 32

ต่อมาพิจารณาโลหะผสมอลูมิเนียมที่มุมตกกระทบ 0° - 80° ที่ตำแหน่งปลายท่อด้านล่าง ณ ตำแหน่งเดียวกันที่มุม 0° - 20° ค่าความส่องสว่างมีการกระจายสม่ำเสมอ การกระจายแสงเริ่มมีความไม่สม่ำเสมอเมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นแสดงดังภาพ 32 ค่าความส่องสว่างที่มุม 0° อยู่ในช่วง 9 - 32 ลักซ์ เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มค่าความส่องสว่างเพิ่มขึ้น ณ ตำแหน่ง

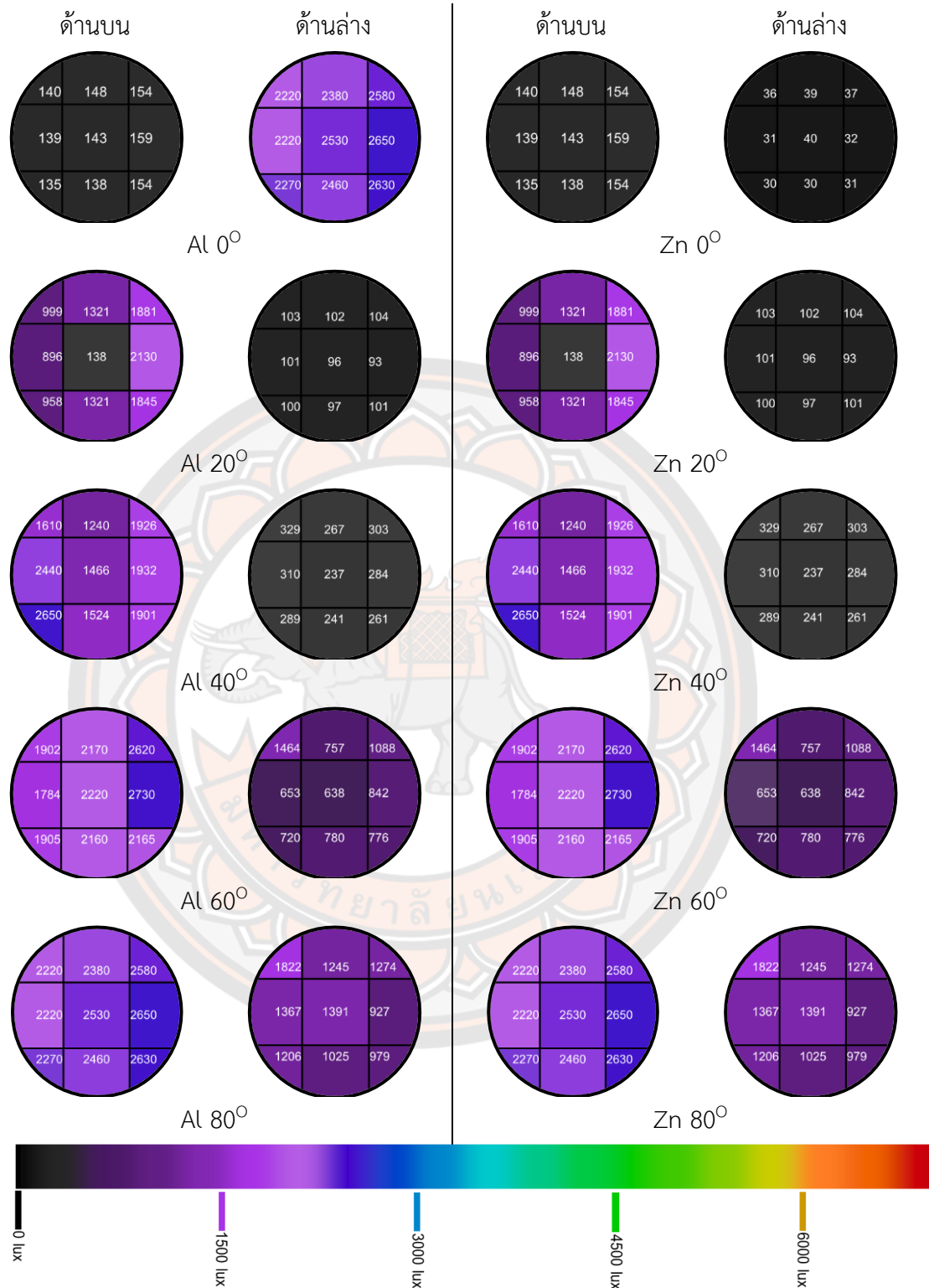
เดียวกันของมุม ต่อมาพิจารณาโลหะผสมสังกะสีที่มุมตกกระทบ 0° - 80° ที่ตำแหน่งปลายท่อ ด้านล่าง ณ ตำแหน่งเดียวกันที่มุม 0° ค่าความส่องสว่างมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นการกระจายแสงไม่สม่ำเสมอแสดงดังภาพ 32 เมื่อพิจารณาค่าความส่องสว่างที่มุม 0° อยู่ในช่วง 9 - 24 ลักซ์ เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มค่าความส่องสว่างเพิ่มขึ้นซึ่งมีลักษณะแนวโน้มเพิ่มขึ้น คล้ายกับโลหะผสมอลูมิเนียมและโลหะผสมสังกะสีแสดงดังภาพ 32

จากภาพ 33 - 34 พบว่าลักษณะการกระจายความส่องสว่างที่ตำแหน่งต่าง ๆ มีลักษณะคล้ายกับการกระจายความส่องสว่างของเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.20 เมตร ดังที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มค่าความส่องสว่างจะเพิ่มขึ้นซึ่งมีลักษณะแนวโน้มเพิ่มขึ้นคล้ายกับโลหะผสมอลูมิเนียมและโลหะผสมสังกะสีแสดงดังภาพ 32 - 34 เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นแต่ความยาวยังคงเดิมพบว่าค่าการกระจายตัวของความส่องสว่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้น





ภาพ 32 การกระจายความส่องสว่างบริเวณด้านบนและด้านล่างของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสม อลูมิเนียม และโลหะผสมสังกะสี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.20 เมตร ความยาว 1.00 เมตร



ภาพ 33 การกระจายความส่องสว่างบริเวณด้านบนและด้านล่างของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียม และโลหะผสมสังกะสี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.25 เมตร ความยาว 1.00 เมตร



ภาพ 34 การกระจายความส่องสว่างบริเวณด้านบนและด้านล่างของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียม และโลหะผสมสังกะสี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.30 เมตร ความยาว 1.00 เมตร

4.1.4 ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยของท่อनाแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมและโลหะผสมสังกะสี

ความยาว 1.50 เมตร Al 20,150 Al 25,150 Al 30,150 Zn 20,150 Zn 25,150 Zn 30,150

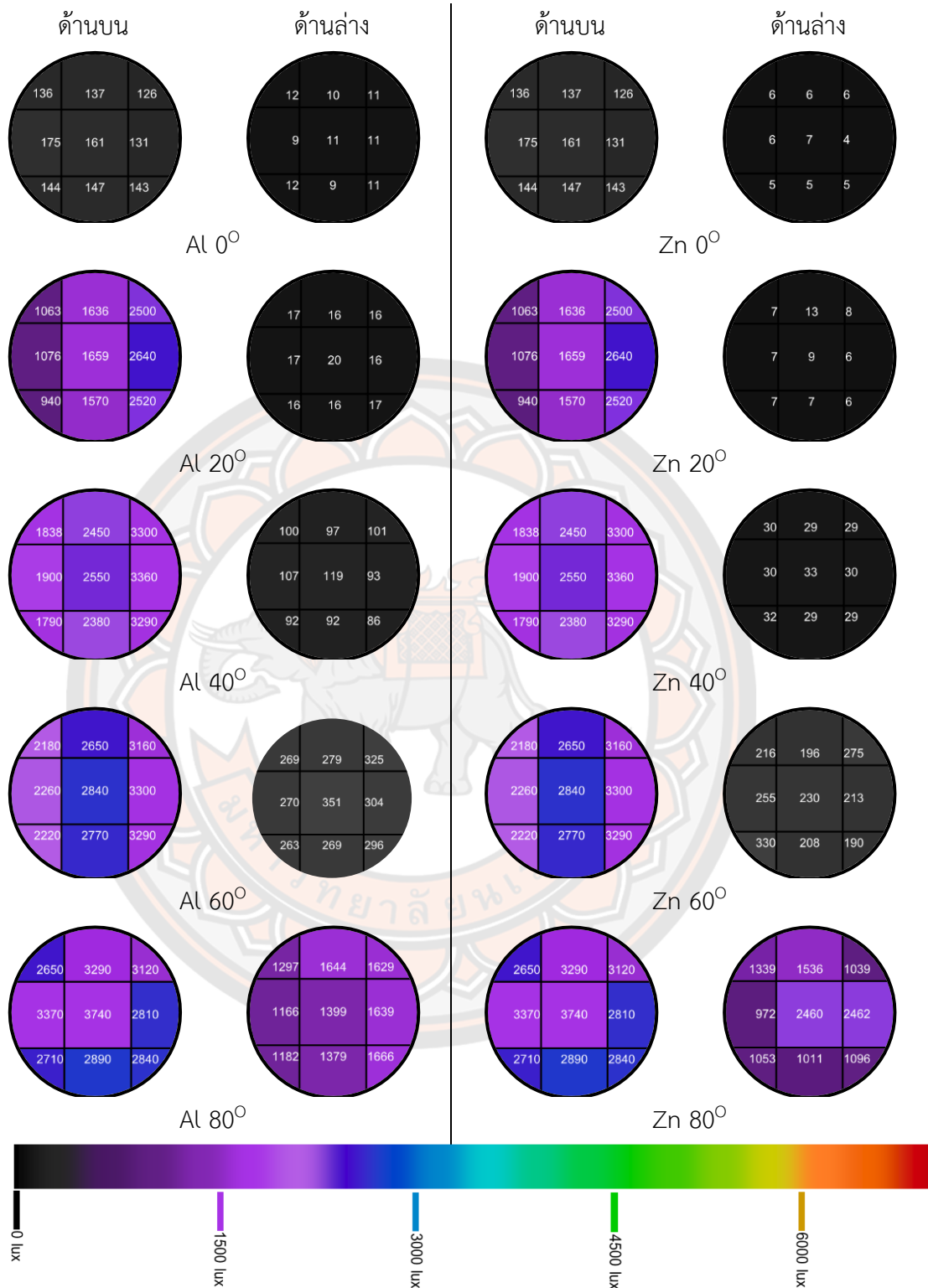
ศึกษาท่อनाแสงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.20, 0.25, 0.30 เมตร ความยาว 1.50 เมตร โดยใช้วัสดุต่างชนิดกัน ได้แก่ โลหะผสมอลูมิเนียม และโลหะผสมสังกะสี โดยพิจารณาที่มุมแสงตกกระทบ $0^\circ - 80^\circ$ จากการศึกษาค่าความส่องสว่างในแนวระนาบ 2 มิติ มีการศึกษาลักษณะการกระจายความส่องสว่างของแสงที่ตำแหน่งบริเวณปลายท่อด้านบนและปลายท่อด้านล่างของท่อनाแสงแสดงดังภาพ 35 – 37

จากภาพ 35 แสดงลักษณะการกระจายความส่องสว่างที่ตำแหน่งต่าง ๆ บริเวณปลายท่อด้านบนและปลายท่อด้านล่างของท่อनाแสงชนิดโลหะผสมอลูมิเนียม และโลหะผสมสังกะสี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 เมตร ที่ความยาว 1.50 เมตร มีการทดลองควบคุมมุมตกกระทบ ตั้งแต่ $0^\circ - 80^\circ$ จากการศึกษาเลือกพิจารณาท่อनाแสงโลหะผสมอลูมิเนียมพบว่าที่ตำแหน่งปลายท่อด้านบนที่มุมตกกระทบของแสง 0° ค่าการกระจายตัวความส่องสว่างในแต่ละจุดมีค่าสม่ำเสมอ และเมื่อมุมเพิ่มขึ้นจาก $0^\circ - 30^\circ$ ขณะที่มุมตกกระทบของแสงเพิ่มขึ้นจาก $30^\circ - 80^\circ$ พบว่าลักษณะการกระจายของแสงในแต่ละจุดมีความไม่สม่ำเสมอดังแสดงในภาพที่ 35 บริเวณปลายท่อค่าความส่องสว่างที่มุมแสงตกกระทบ 0° อยู่ในช่วง 131- 175 ลักซ์ ต่อมาพิจารณาโลหะผสมสังกะสีที่มุมตกกระทบ $0^\circ - 80^\circ$ ที่ตำแหน่งปลายท่อด้านบน ณ ตำแหน่งเดียวกันที่มุม 0° ค่าความส่องสว่างมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นการกระจายแสงไม่สม่ำเสมอแสดงดังภาพ 32 เมื่อพิจารณาค่าความส่องสว่างที่มุม 0° มีค่าความส่องสว่างอยู่ในช่วง 121 – 147 ลักซ์ เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นค่าความส่องสว่าง ณ ตำแหน่งบริเวณเดียวกันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อนำค่าแต่ละจุดมาหาค่าเฉลี่ยพบว่าค่าความส่องสว่างบริเวณปลายท่อด้านบนมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมุมตกกระทบของแสงเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อनाแสงจาก 0.20 เมตร โดยเพิ่มเป็น 0.25 0.30 เมตร ที่ความยาว 1.50 เมตรดังภาพ 36 - 37 พบว่าค่าความส่องสว่างมีลักษณะแนวโน้มเพิ่มขึ้นคล้ายกับโลหะผสมอลูมิเนียมและโลหะผสมสังกะสีแสดงดังภาพ 35 ต่อมาพิจารณาโลหะผสมอลูมิเนียมที่มุมตกกระทบ $0^\circ - 80^\circ$ ที่ตำแหน่งปลายท่อด้านล่าง ณ ตำแหน่งเดียวกันที่มุม $0^\circ - 30^\circ$ ค่าความส่องสว่างมีการกระจายสม่ำเสมอ การกระจายแสงเริ่มมีความไม่สม่ำเสมอเมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นแสดงดังภาพ 32 ค่าความส่องสว่างที่มุม 0° อยู่ในช่วง 9 – 12 ลักซ์ เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มค่าความส่องสว่างเพิ่มขึ้น ณ ตำแหน่งเดียวกันของมุม ต่อมาพิจารณาโลหะผสมสังกะสีที่

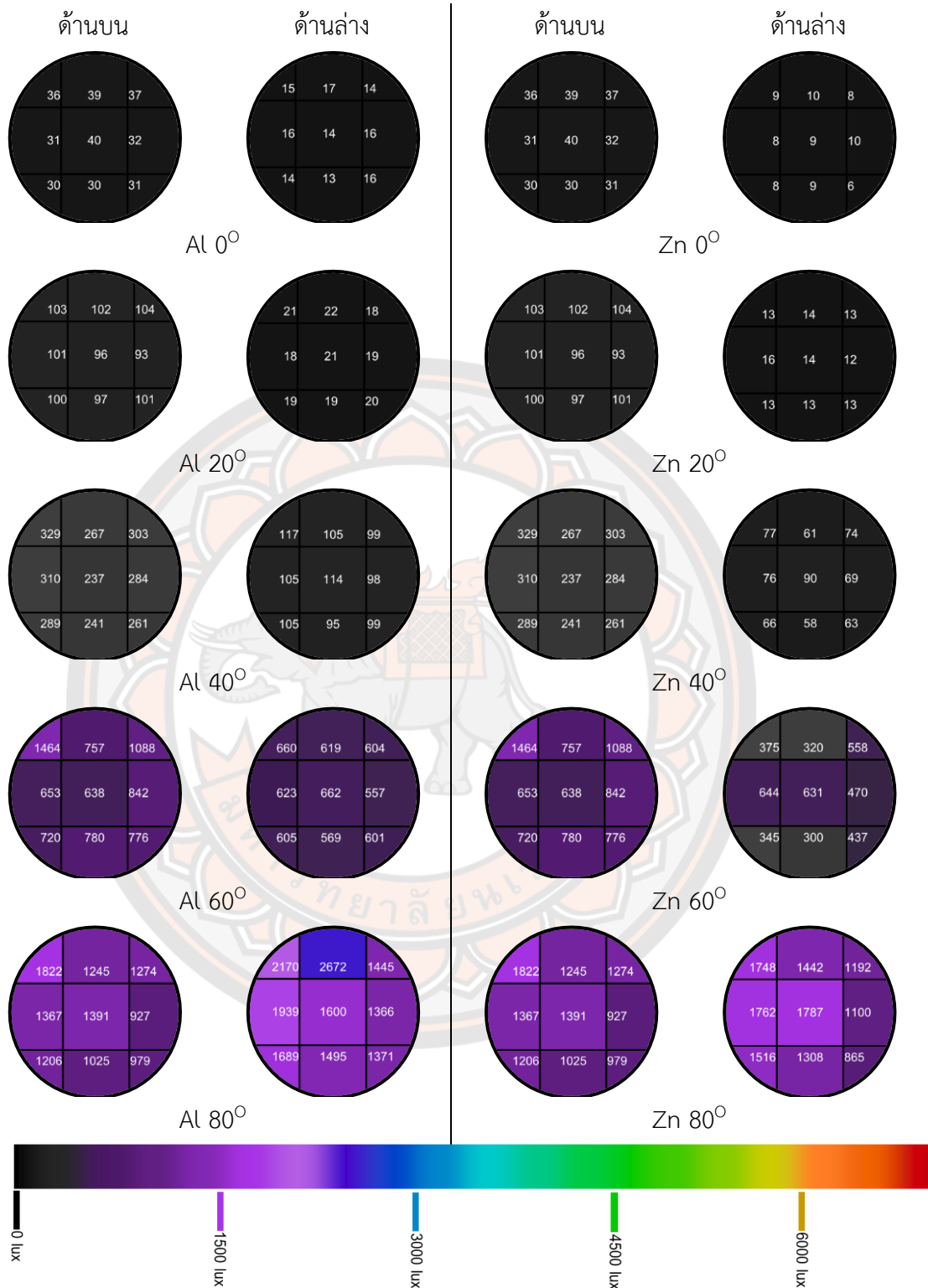
มุมตกกระทบ 0° - 80° ที่ตำแหน่งปลายท่อด้านล่าง ณ ตำแหน่งเดียวกันที่มุม 0° ค่าความส่องสว่างมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นการกระจายแสงไม่สม่ำเสมอแสดงดังภาพ 32 เมื่อพิจารณาค่าความส่องสว่างที่มุม 0° อยู่ในช่วง 4 – 7 ลักซ์

จากภาพ 36 - 37 แสดงลักษณะการกระจายความส่องสว่างที่ตำแหน่งต่าง ๆ มีลักษณะคล้ายกับการกระจายความส่องสว่างของเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.20 เมตร ดังภาพ 35 พบว่าเมื่อมุมตกกระทบเพิ่มค่าความส่องสว่างจะเพิ่มขึ้นซึ่งมีลักษณะแนวโน้มเพิ่มขึ้นคล้ายกับโลหะผสมอลูมิเนียมและโลหะผสมสังกะสีแสดงดังภาพ 35 แต่เมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางค่าการกระจายตัวของความส่องสว่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ

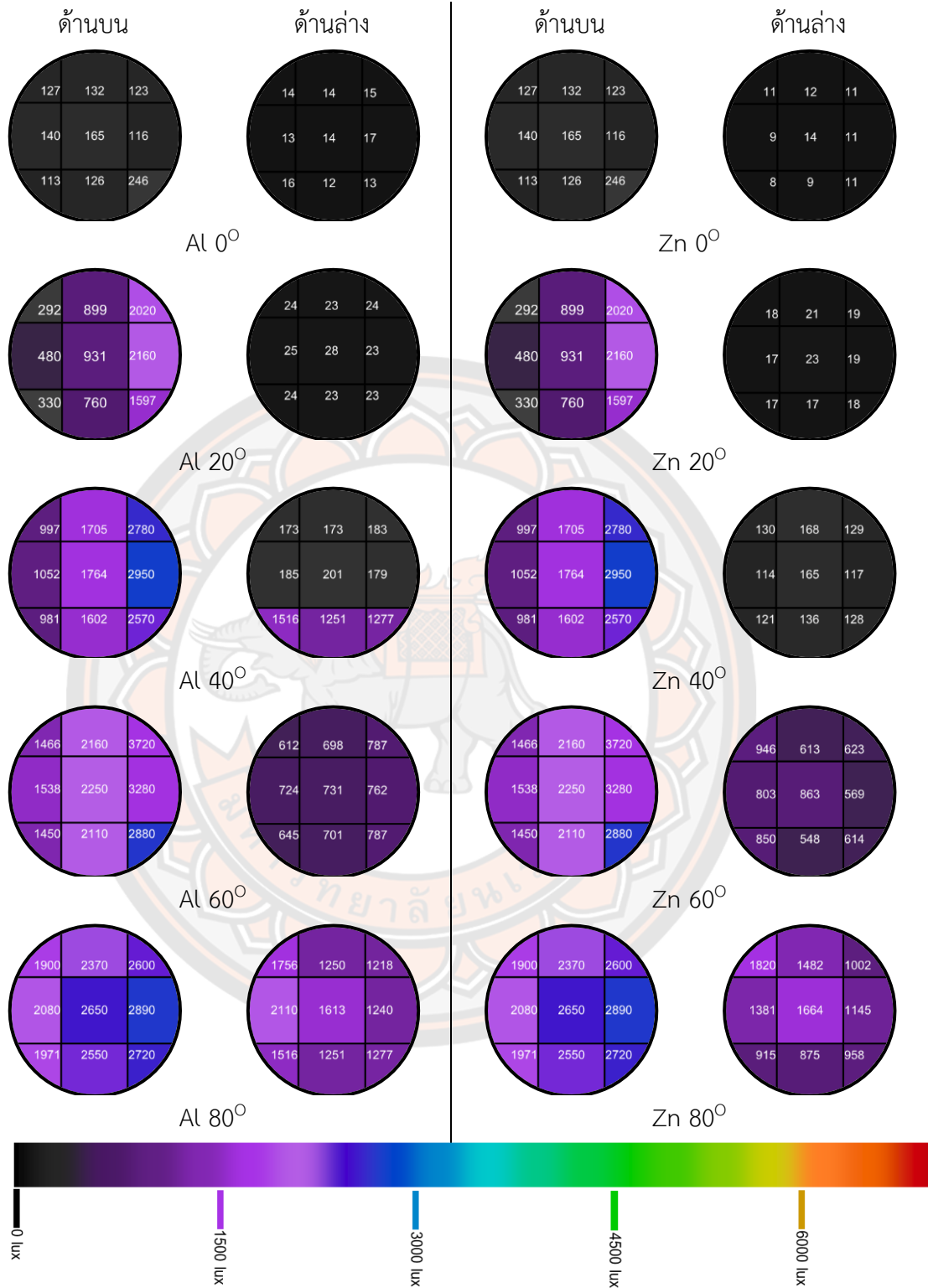
ดังนั้นขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางมีผลต่อค่าการกระจายตัวความส่องสว่างของท่อนำแสงของโลหะผสมอลูมิเนียม และโลหะผสมสังกะสี จะเห็นว่าจากภาพ 28 - 37 เมื่อขนาดเส้นกลางศูนย์กลางเพิ่ม และมุมตกกระทบเพิ่มค่าความส่องสว่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งมีลักษณะเพิ่มขึ้นคล้ายกับโลหะผสมอลูมิเนียมและโลหะผสมสังกะสี



ภาพ 35 การกระจายความส่องสว่างบริเวณด้านบนและด้านล่างของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียม และโลหะผสมสังกะสี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.20 เมตร ความยาว 1.50 เมตร



ภาพ 36 การกระจายความส่องสว่างบริเวณด้านบนและด้านล่างของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสม อลูมิเนียม และโลหะผสมสังกะสี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.25 เมตร ความยาว 1.50 เมตร



ภาพ 37 การกระจายความส่องสว่างบริเวณด้านบนและด้านล่างของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียม และโลหะผสมสังกะสี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.30 เมตร ความยาว 1.50 เมตร

ตาราง 7 ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยบริเวณด้านบนและปลายท่อด้านข้างของท่อนำแสงโลหะผสมอลูมิเนียม

บริเวณ	ด้านบน												ด้านข้าง												
	L = 0.50 m				L = 1.00 m				L = 1.50 m				L = 0.50 m			L = 1.00 m			L = 1.50 m						
	0.20	0.25	0.30		0.20	0.25	0.30		0.20	0.25	0.30		0.20	0.25	0.30		0.20	0.25	0.30		0.20	0.25	0.30		
ความยาว																									
∅ (เมตร)																									
มุม(องศา)																									
0	243	262	220	143	146	143	143	143	143	146	143	143	143	146	143	143	22	31	40	20	34	20	11	15	14
10	460	421	360	640	697	640	640	640	640	697	640	640	640	697	640	640	48	54	80	32	55	32	11	15	16
20	580	1228	718	1734	1277	1734	1734	1734	1734	1277	1734	1734	1734	1277	1734	83	335	230	63	100	63	17	20	24	
30	1203	1970	1708	2206	1803	2206	2206	2206	2206	1803	2206	2206	2206	1803	2206	246	614	602	125	169	125	35	33	63	
40	1833	2386	2524	2540	1854	2540	2540	2540	2540	1854	2540	2540	2540	1854	2540	434	928	1135	233	280	233	99	104	181	
50	2341	2610	2914	2651	2119	2651	2651	2651	2651	2119	2651	2651	2651	2119	2651	752	1237	1504	407	544	407	258	266	383	
60	2504	2796	3157	2741	2184	2741	2741	2741	2741	2184	2741	2741	2741	2184	2741	991	1554	1848	715	858	715	292	611	716	
70	2813	3070	3391	3200	2369	3200	3200	3200	3200	2369	3200	3200	3200	2369	3200	1438	1952	2312	1150	1050	1150	683	1046	1114	
80	3022	3142	3549	3047	2438	3047	3047	3047	3047	2438	3047	3047	3047	2438	3047	1702	2304	2591	1641	1248	1641	1445	1750	1470	

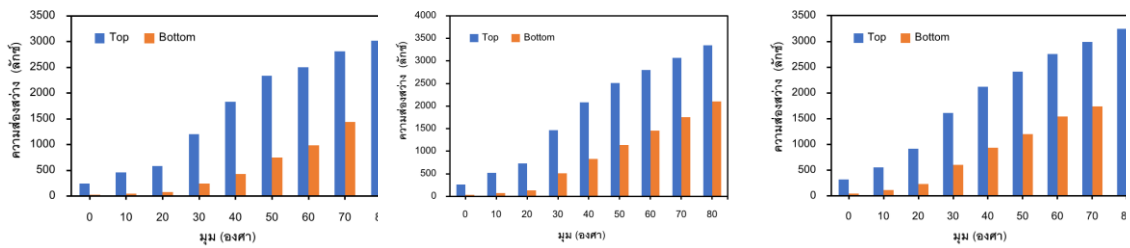
4.2 ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียม และโลหะผสมสังกะสีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 0.25 0.30 เมตร และความยาว 0.50 1.00 1.50 เมตร

4.2.1 ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยของท่อนำแสงแนวตั้งที่ทำจากโลหะผสมอลูมิเนียม

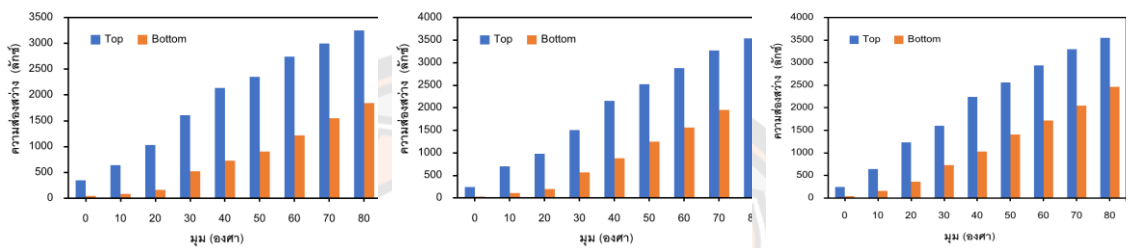
จากผลการทดลองดังแสดงในตาราง 4.1 นำค่าความส่องสว่างในแต่ละมุม(องศา) แนวตั้งมาเปรียบเทียบกัน พิจารณาท่อนำแสงที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.20 เมตร ความยาว 0.50 เมตร ที่มุม 0° มีค่าความส่องสว่างบริเวณปลายท่อด้านบนมีค่าความส่องสว่าง 243 ลักซ์ เมื่อมุมตกกระทบมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความส่องสว่างบริเวณปลายท่อด้านบนและปลายท่อด้านล่างของท่อ นำแสงก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นดังภาพ 38 (a) ในขณะที่เงื่อนไขเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.25 และ 0.30 เมตร และที่ความยาว 1.00 และ 1.50 เมตร ก็มีลักษณะแนวโน้มคล้ายกับท่อนำแสงที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.20 เมตร ความยาว 0.50 เมตร ดังแสดงในภาพ 38 พบว่า ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยของมุมเงยที่ 80° มีค่าความส่องสว่างมากที่สุด เนื่องจากมุมเงยที่ 80° ทิศทางของแสงตั้งฉากกับปากท่อด้านบนของท่อ นำแสงทำให้รับปริมาณของแสงที่เข้าภายในท่อส่วนใหญ่เป็นปริมาณแสงตรงทำให้มีค่าความส่องสว่างมากที่สุดทำให้ค่าความส่องสว่างมีค่ามากที่สุด

4.2.2 ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยของท่อนำแสงแนวตั้งที่ทำจากโลหะผสมสังกะสี

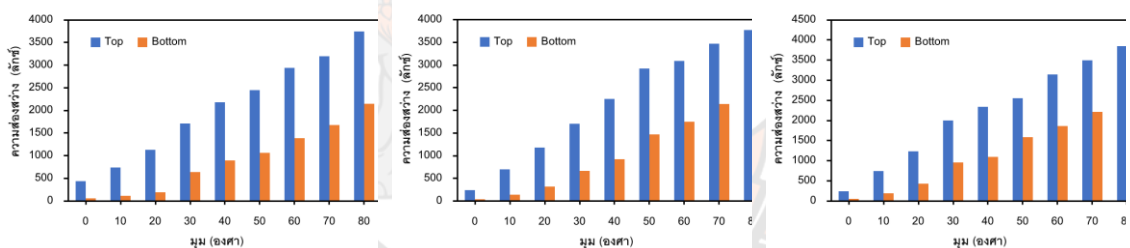
จากผลการทดลองดังแสดงในตาราง 4.2 นำค่าความส่องสว่างในแต่ละมุม(องศา)แนวตั้งมาเปรียบเทียบกัน เลือกพิจารณาท่อนำแสงที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.20 เมตร ความยาว 0.50 เมตร ที่มุมตกกระทบ 0° บริเวณปลายท่อด้านบนมีค่าความส่องสว่าง 200 ลักซ์ เมื่อมุมตกกระทบมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความส่องสว่างบริเวณปลายท่อด้านบนและปลายท่อด้านล่างของท่อ นำแสงก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นดังภาพ 39 (a) เนื่องจากมุม(องศา)ตกกระทบเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีบริเวณพื้นที่ที่รับแสงทำให้ทิศทางของแสงตั้งฉากกับปากท่อด้านบนของท่อ นำแสงรับปริมาณของแสงที่เข้าภายในท่อส่วนใหญ่เป็นปริมาณแสงตรงทำให้มีค่าความส่องสว่างมากที่สุดทำให้ค่าความส่องสว่างมีค่ามากที่สุด หลังจากนั้นพิจารณาที่เงื่อนไขที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.25 และ 0.30 เมตร และที่ความยาว 1.00 และ 1.50 เมตร พบว่ามีลักษณะแนวโน้มคล้ายกับท่อนำแสงที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.20 เมตร ความยาว 0.50 เมตร ดังแสดงในภาพ 39



(a) $D = 0.20 \text{ m}$, $L = 0.50 \text{ m}$ (b) $D = 0.25 \text{ m}$, $L = 0.50 \text{ m}$ (c) $D = 0.30 \text{ m}$, $L = 0.50 \text{ m}$

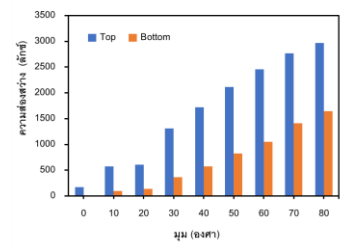
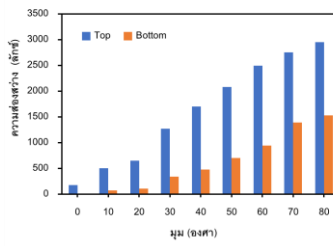
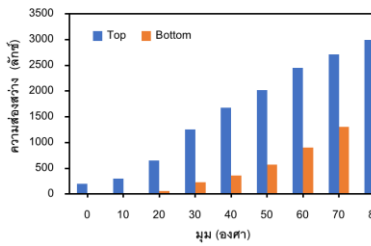


(d) $D = 0.20 \text{ m}$, $L = 1.00 \text{ m}$ (e) $D = 0.25 \text{ m}$, $L = 1.00 \text{ m}$ (f) $D = 0.30 \text{ m}$, $L = 1.00 \text{ m}$

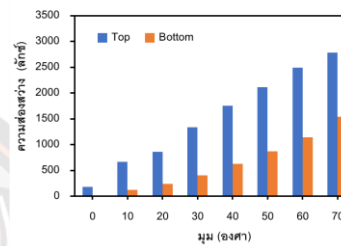
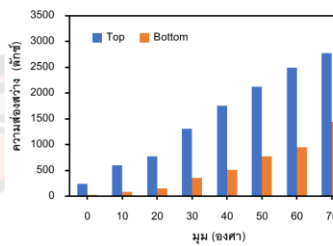
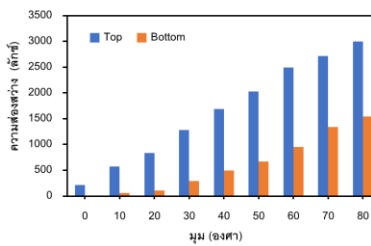


(g) $D = 0.20 \text{ m}$, $L = 1.50 \text{ m}$ (h) $D = 0.25 \text{ m}$, $L = 1.50 \text{ m}$ (i) $D = 0.30 \text{ m}$, $L = 1.50 \text{ m}$

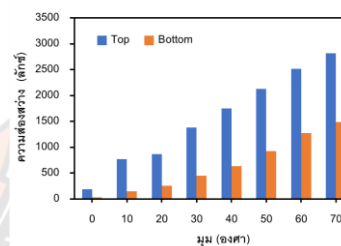
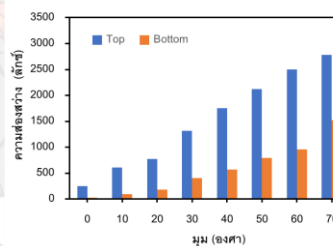
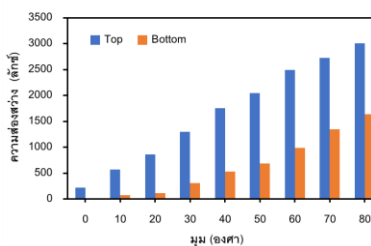
ภาพ 38 ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยบริเวณด้านบนท่อและปลายท่อด้านล่างของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียม (a) โลหะผสมอลูมิเนียม $D = 0.20 \text{ m}$, $L = 0.50 \text{ m}$ (b) โลหะผสมอลูมิเนียม $D = 0.25 \text{ m}$, $L = 0.50 \text{ m}$ (c) โลหะผสมอลูมิเนียม $D = 0.30 \text{ m}$, $L = 0.50 \text{ m}$ (d) โลหะผสมอลูมิเนียม $D = 0.20 \text{ m}$, $L = 1.00 \text{ m}$ (e) โลหะผสมอลูมิเนียม $D = 0.25 \text{ m}$, $L = 1.00 \text{ m}$ (f) โลหะผสมอลูมิเนียม $D = 0.30 \text{ m}$, $L = 1.00 \text{ m}$ (g) โลหะผสมอลูมิเนียม $D = 0.20 \text{ m}$, $L = 1.50 \text{ m}$ (h) โลหะผสมอลูมิเนียม $D = 0.25 \text{ m}$, $L = 1.50 \text{ m}$ (i) โลหะผสมอลูมิเนียม $D = 0.30 \text{ m}$, $L = 1.50 \text{ m}$



(a) $D = 0.20 \text{ m}$, $L = 0.50 \text{ m}$ (b) $D = 0.25 \text{ m}$, $L = 0.50 \text{ m}$ (c) $D = 0.30 \text{ m}$, $L = 0.50 \text{ m}$



(d) $D = 0.20 \text{ m}$, $L = 1.00 \text{ m}$ (e) $D = 0.25 \text{ m}$, $L = 1.00 \text{ m}$ (f) $D = 0.30 \text{ m}$, $L = 1.00 \text{ m}$



(g) $D = 0.20 \text{ m}$, $L = 1.50 \text{ m}$ (h) $D = 0.25 \text{ m}$, $L = 1.50 \text{ m}$ (i) $D = 0.30 \text{ m}$, $L = 1.50 \text{ m}$

ภาพ 39 ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยบริเวณด้านบนท่อและปลายท่อด้านล่างของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมสังกะสี (a) โลหะผสมสังกะสี $D = 0.20 \text{ m}$, $L = 0.50 \text{ m}$ (b) โลหะผสมสังกะสี $D = 0.25 \text{ m}$, $L = 0.50 \text{ m}$ (c) โลหะผสมสังกะสี $D = 0.30 \text{ m}$, $L = 0.50 \text{ m}$ (d) โลหะผสมสังกะสี $D = 0.20 \text{ m}$, $L = 1.00 \text{ m}$ (e) โลหะผสมสังกะสี $D = 0.25 \text{ m}$, $L = 1.00 \text{ m}$ (f) โลหะผสมสังกะสี $D = 0.30 \text{ m}$, $L = 1.00 \text{ m}$ (g) โลหะผสมสังกะสี $D = 0.20 \text{ m}$, $L = 1.50 \text{ m}$ (h) โลหะผสมสังกะสี $D = 0.25 \text{ m}$, $L = 1.50 \text{ m}$ (i) โลหะผสมสังกะสี $D = 0.30 \text{ m}$, $L = 1.50 \text{ m}$

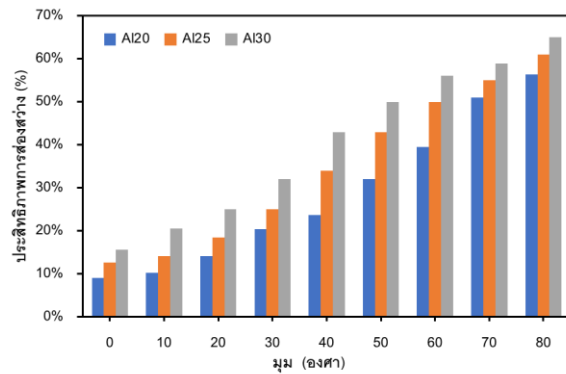
4.3 ประสิทธิภาพการส่องสว่างของท่อนำแสงแนวตั้ง

นำผลการทดลองของค่าความส่องสว่างเฉลี่ยบริเวณปลายท่อด้านบนและบริเวณปลายท่อด้านล่างของท่อนำแสงแนวตั้งทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ โลหะผสมอลูมิเนียม และโลหะผสมสังกะสี มาหาประสิทธิภาพการส่องสว่างของท่อนำแสงแนวตั้งแต่ละชนิด ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการส่องสว่างของท่อนำแสง

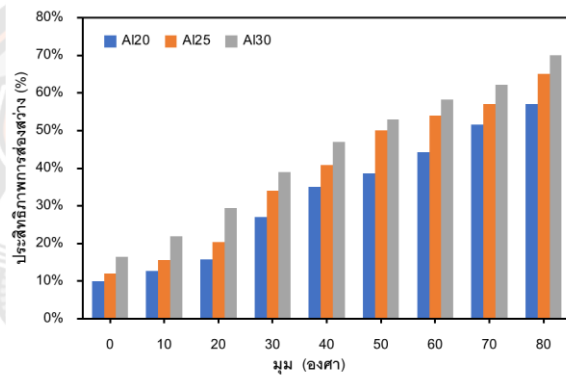
4.3.1 ท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 0.25 และ 0.30 เมตร ความยาว 0.50 1.00 และ 1.50 เมตร

ภาพ 40 แสดงประสิทธิภาพการส่องสว่างของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 0.25 0.30 เมตร และความยาว 0.50 1.00 และ 1.50 เมตร ศึกษาตั้งแต่มุมตกกระทบ 0° - 80° พิจารณาภาพ 40 (a) ประสิทธิภาพค่าการส่องสว่างของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 0.25 และ 0.30 เมตร ความยาว 0.50 เมตร ที่มุม 0° ประสิทธิภาพการส่องสว่างมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 9 - 16 เมื่อพิจารณาที่มุมตกกระทบตั้งแต่ 10° - 80° ประสิทธิภาพการส่องสว่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้น จากภาพ 40 (b), 40 (c) ประสิทธิภาพการส่องสว่างของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 0.25 0.30 เมตร และความยาว 1.00 และ 1.50 เมตร ประสิทธิภาพการส่องสว่างมีลักษณะเพิ่มขึ้น เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการส่องสว่างมีลักษณะคล้ายกับภาพ 40 (a)

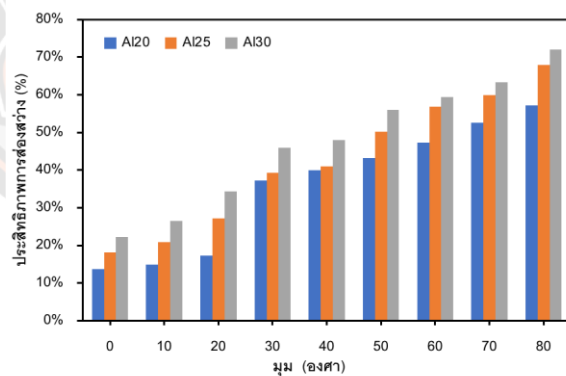
ภาพ 41 แสดงประสิทธิภาพการส่องสว่างของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 0.25 0.30 เมตร และความยาว 0.50 1.00 และ 1.50 เมตร ศึกษาตั้งแต่มุมตกกระทบ 0° - 80° พิจารณาภาพ 41 (a) ประสิทธิภาพค่าการส่องสว่างของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 เมตร ความยาว 0.50 1.00 1.50 เมตร ที่มุม 0° ประสิทธิภาพการส่องสว่างมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 9 - 14 เมื่อพิจารณาที่มุมตกกระทบตั้งแต่ 10° - 80° ประสิทธิภาพการส่องสว่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้น จากภาพ 41 (b), 41 (c) ประสิทธิภาพการส่องสว่างของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 เมตร และความยาว 0.50 1.00 และ 1.50 เมตร ประสิทธิภาพการส่องสว่างมีลักษณะเพิ่มขึ้น เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการส่องสว่างมีลักษณะคล้ายกับภาพ 41 (a)



(a)

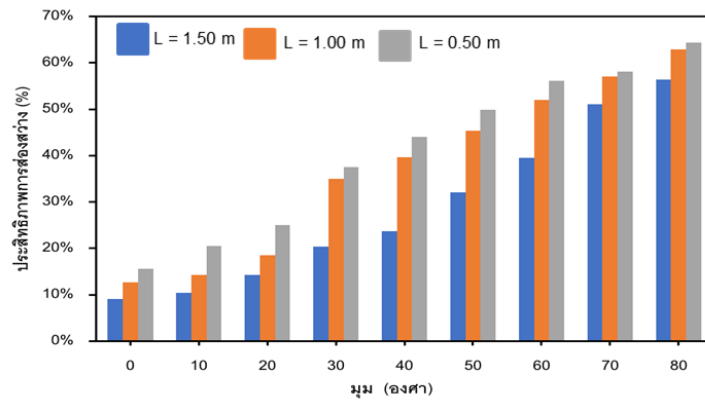


(b)

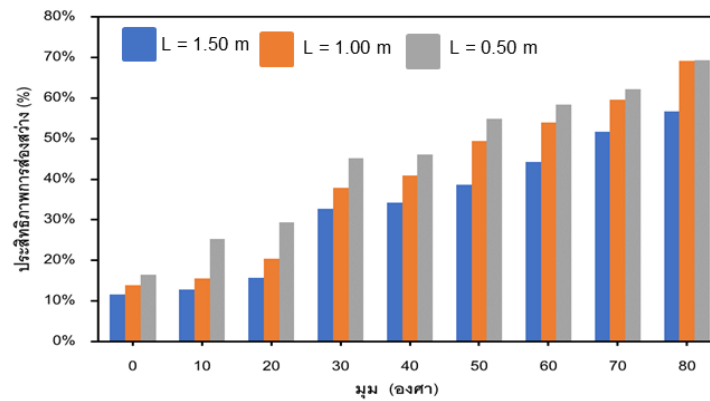


(c)

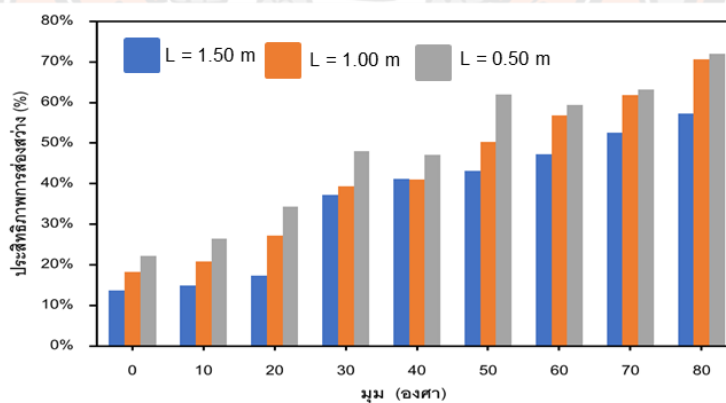
ภาพ 40 ประสิทธิภาพการส่องสว่างของท่อนำแสงโลหะผสมอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 0.25 และ 0.30 เมตร (a) ท่อนำแสงโลหะผสมอลูมิเนียมความยาว 0.50 เมตร (b) ท่อนำแสงโลหะผสมอลูมิเนียมความยาว 1.00 เมตร (c) ท่อนำแสงโลหะผสมอลูมิเนียมความยาว 1.50 เมตร



(a)



(b)



(c)

ภาพ 41 ประสิทธิภาพการส่องสว่างของท่อส่งโลหะผสมอลูมิเนียมความยาว 0.50 1.00 และ 1.50 เมตร (a) ท่อส่งโลหะผสมอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 เมตร (b) ท่อส่งโลหะผสมอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 เมตร (c) ท่อส่งโลหะผสมอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร

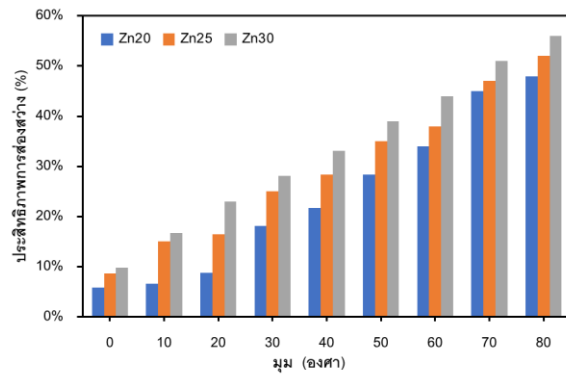
4.3.2 ท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมสังกะสีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 0.25 และ 0.30 เมตร และ ความยาว 0.50 1.00 และ 1.50 เมตร

ท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมสังกะสีที่เงื่อนไขต่าง ๆ จะพบว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำแสงจาก 0.20 - 0.30 เมตร ที่ความยาว 0.50 - 1.50 เมตร มีประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงของท่อนำแสงที่มุมตกกระทบตั้งแต่ 0° - 80° พบว่าประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงของท่อนำแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพ 42 - 43

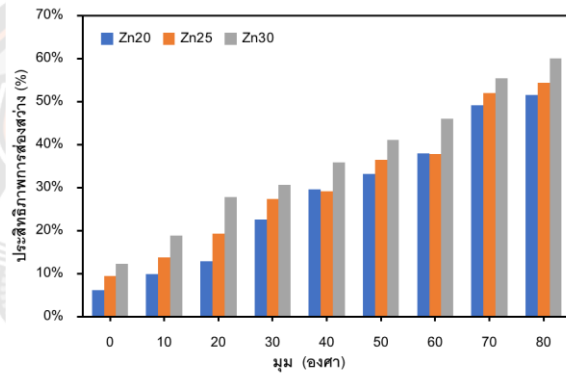
ภาพ 42 (a) แสดงประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมสังกะสีที่ความยาว 0.50 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกันที่ 0.20 0.25 และ 0.30 เมตร เมื่อพิจารณาที่มุมตกกระทบ 0° ประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงสว่างของท่อนำแสงมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 6 - 10 ในลักษณะเดียวกันเมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นจาก 10° - 80° ประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากมุมตกกระทบเพิ่ม ถ้าพิจารณาที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพของการส่งผ่านแสงผ่านท่อนำแสงก็จะเพิ่มขึ้นตามลำดับดังแสดงในภาพ 42

ภาพ 43 แสดงประสิทธิภาพการส่องสว่างของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 0.25 0.30 เมตร และความยาว 0.50 1.00 และ 1.50 เมตร ศึกษาตั้งแต่มุมตกกระทบ 0° - 80° พิจารณาภาพ 43 (a) ประสิทธิภาพค่าการส่องสว่างของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 เมตร ความยาว 0.50 1.00 1.50 เมตร ที่มุม 0° ประสิทธิภาพการส่องสว่างมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 6 - 8 เมื่อพิจารณาที่มุมตกกระทบตั้งแต่ 10° - 80° ประสิทธิภาพการส่องสว่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้น จากภาพ 43 (b), 43 (c) ประสิทธิภาพการส่องสว่างของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 เมตร และความยาว 0.50 1.00 และ 1.50 เมตร ประสิทธิภาพการส่องสว่างมีลักษณะเพิ่มขึ้น เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการส่องสว่างมีลักษณะคล้ายกับภาพ 43 (a)

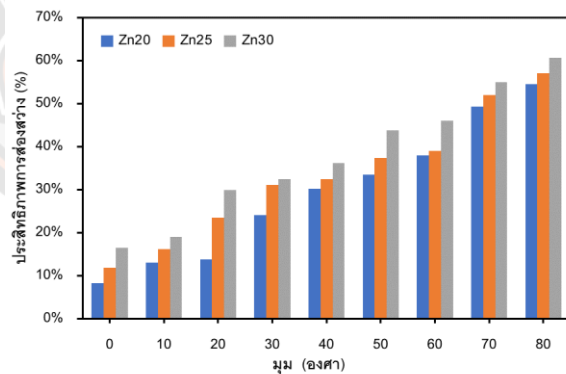
สำหรับการเลือกพิจารณาประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงของท่อนำแสงวัสดุต่างชนิดกันในทุก ๆ เงื่อนไข พบว่าเมื่อมุมตกกระทบเปลี่ยนโดยมีมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0° - 80° ส่งผ่านให้ค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความยาวของท่อนำแสงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงของท่อนำแสงมีแนวโน้มลดลง



(a)

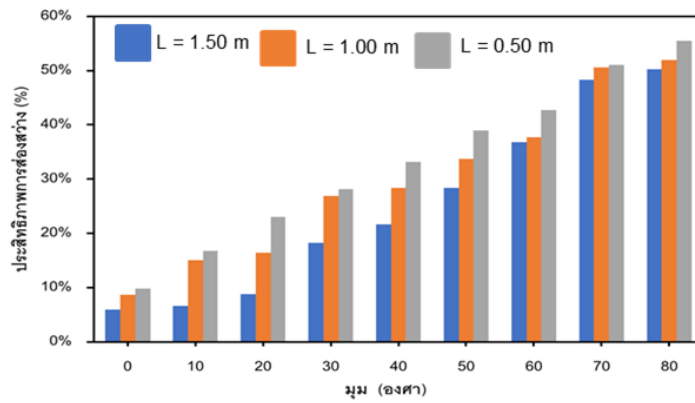


(b)

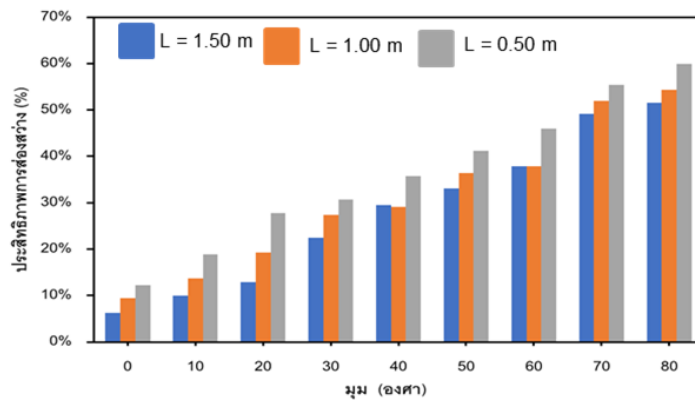


(c)

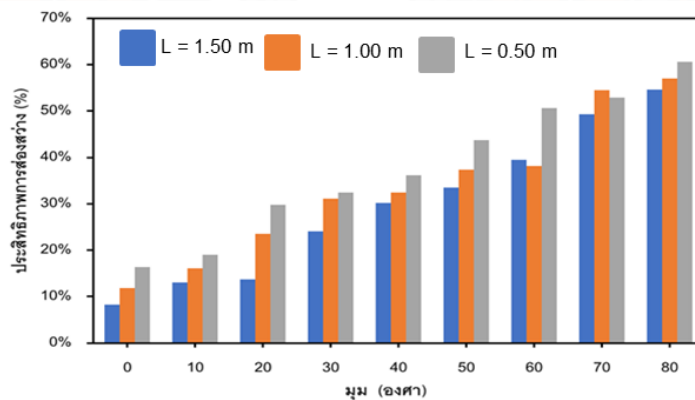
ภาพ 42 ประสิทธิภาพการส่องสว่างของท่อนำแสงโลหะผสมสังกะสีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 0.25 และ 0.30 เมตร (a) ท่อนำแสงโลหะผสมสังกะสีความยาว 0.50 เมตร (b) ท่อนำแสงโลหะผสมสังกะสีความยาว 1.00 เมตร (c) ท่อนำแสงโลหะผสมสังกะสีความยาว 1.50 เมตร



(a)



(b)



(c)

ภาพ 43 ประสิทธิภาพการส่องสว่างของท่อนำแสงโลหะผสมสังกะสีความยาว 0.50 1.00 และ 1.50 เมตร (a) ท่อนำแสงโลหะผสมสังกะสีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 เมตร (b) ท่อนำแสงโลหะผสมสังกะสีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 เมตร (c) ท่อนำแสงโลหะผสมสังกะสีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร

จากผลการทดลองข้างต้นได้แสดงให้เห็นว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มสูงขึ้นของโลหะผสมอลูมิเนียมและท่อनाแสงโลหะผสมสังกะสีส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงของท่อनाแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งจะเห็นได้ว่าเกี่ยวข้องกับการสูญเสียความเข้มของแสงมีผลทำให้การส่องสว่างที่น้อยลงซึ่งเกิดขึ้นจากการลดลงของจำนวนการสะท้อนในพื้นที่ผิวท่อनाแสงด้านในของท่อनाแสง

เมื่อเปรียบเทียบท่อनाแสงโลหะผสมอลูมิเนียมและท่อनाแสงโลหะผสมสังกะสีที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน ความยาวเท่ากัน พบว่าประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงโดยเฉลี่ยของท่อनाแสงโลหะผสมอลูมิเนียมมีค่าสูงกว่าท่อनाแสงโลหะผสมสังกะสีในแต่ละมุมแสงที่ตกกระทบ ความยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อनाแสงดังแสดงในภาพ 40 – 43 พบว่าประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงโดยเฉลี่ยของท่อनाแสงโลหะผสมอลูมิเนียมสามารถส่งผ่านแสงของการส่องสว่างได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับท่อनाแสงโลหะผสมสังกะสีในทุกสภาวะ ดังนั้นท่อनाแสงโลหะผสมอลูมิเนียมแสดงค่าการสะท้อนแสงได้สูงกว่าท่อनाแสงโลหะผสมสังกะสี

ศึกษาค่าความส่องสว่างภายในห้องทดสอบสภาวะอากาศจริง

การทดลองจะมีการติดตั้งห้องทดสอบทั้งหมด 2 ห้อง โดยจะติดตั้งห้องทดสอบเป็นห้องอ้างอิงซึ่งจะไม่มีติดตั้งท่อनाแสงแนวตั้งภายในห้อง ส่วนอีกห้องจะมีการติดตั้งท่อनाแสงแนวตั้งร่วมกับห้องทดสอบ ทำการบันทึกค่าความส่องสว่างภายในห้องทดสอบที่มีติดตั้งท่อनाแสง โดยบันทึกผลตั้งแต่เวลา 06.00 น. – 18.00 น. บันทึกผลทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 3 วัน

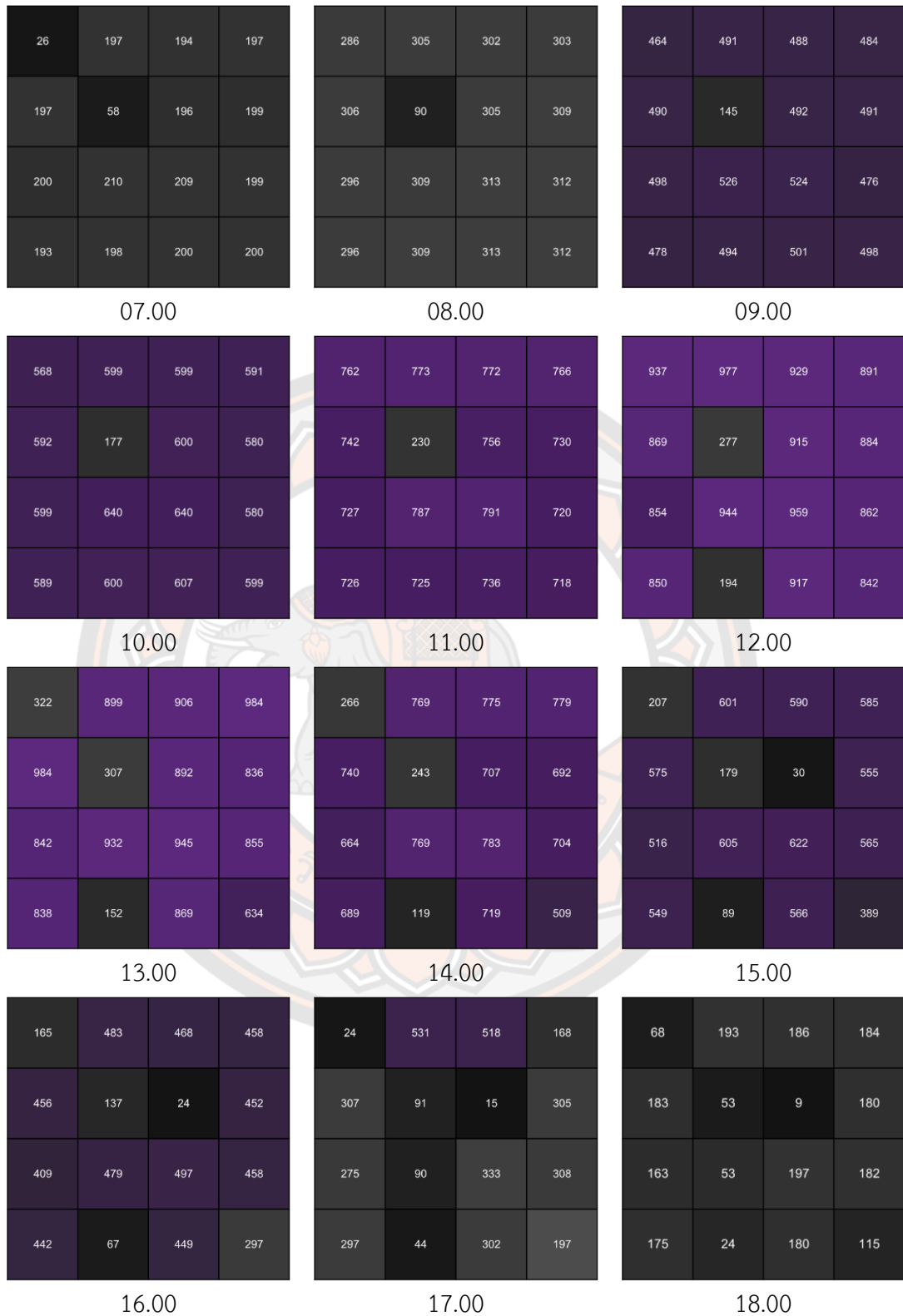
4.4 ค่าความส่องสว่างบริเวณห้องทดสอบ

ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยบริเวณพื้นห้องทดสอบที่มีการติดตั้งท่อनाแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมโดยบันทึกค่าความส่องสว่างทั้งหมด 16 ตำแหน่ง ดังแสดงในภาพ 44 - 46 จากนั้นหาค่าความส่องสว่างเฉลี่ยบริเวณพื้นห้องทดสอบในแต่ละช่วงเวลา และบันทึกค่าความส่องสว่างบริเวณพื้นห้องทดสอบที่ติดตั้งท่อनाแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียม พบว่าค่าความส่องสว่างเฉลี่ยบริเวณพื้นมีการกระจายแสงที่ไม่สม่ำเสมอ

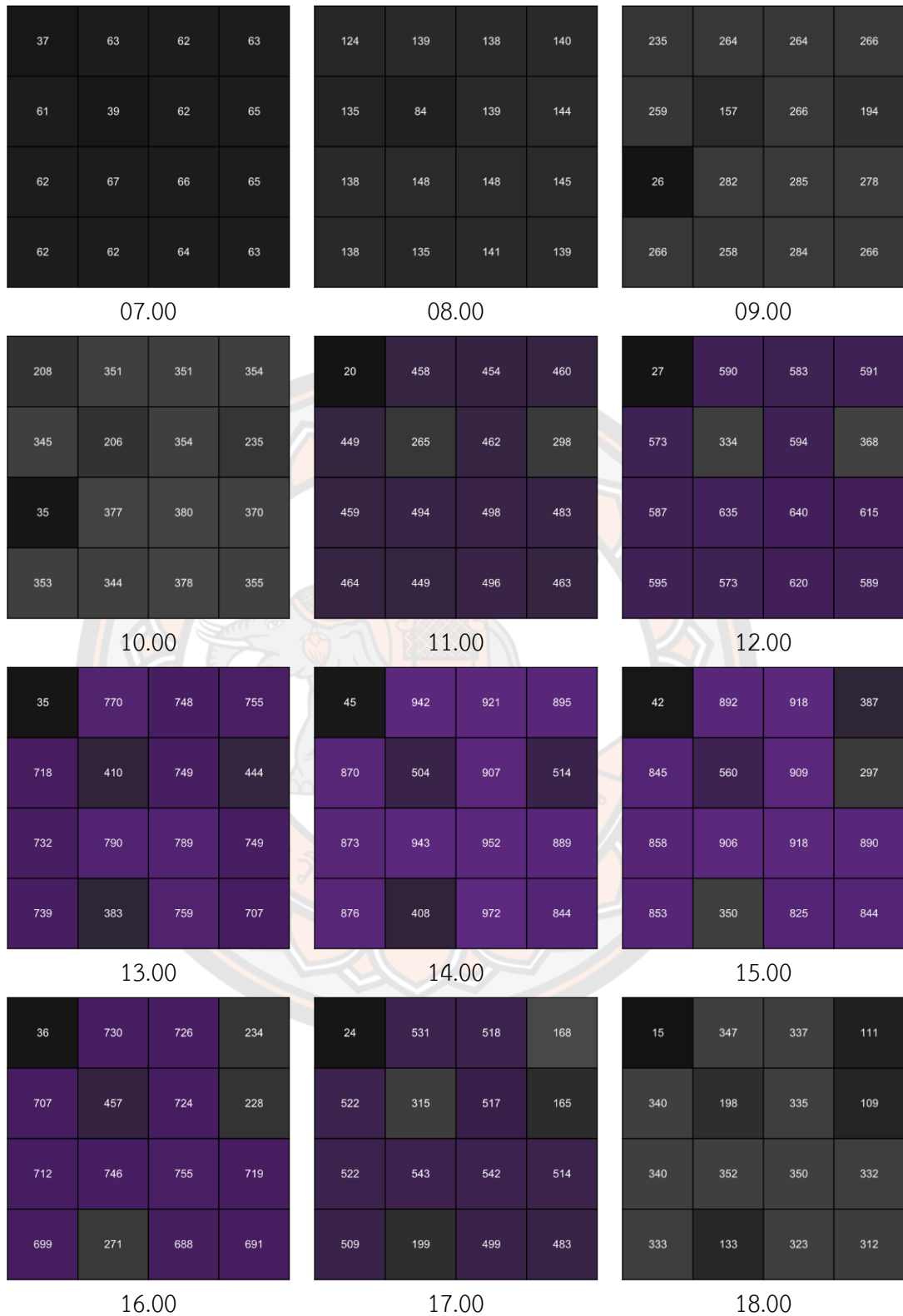
จากผลการทดลองดังแสดงในภาพ 44 พบว่าค่าความส่องสว่างเฉลี่ยบริเวณพื้นห้องทดสอบช่วงเวลา 07.00 - 12.00 น. มีค่าความส่องสว่างเฉลี่ยเพิ่มขึ้น จนกระทั่งช่วงเที่ยงวันมีค่าความส่องสว่างเฉลี่ยที่ประมาณ 834 ลักซ์ จะพบค่าความส่องสว่างเฉลี่ยสูงสุด หลังจากนั้นค่าความส่องสว่างเฉลี่ยจะมีค่าลดลง

ตามลำดับ และค่าความสว่างเฉลี่ยตลอดทั้งวันอยู่ที่ 457 ลักซ์ ซึ่งที่เวลาช่วง 09.00 - 12.00 น. มีค่าความส่องสว่างใกล้เคียงกัน และค่าความสว่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามมุมเงยที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพ 44 ซึ่งค่าความสว่างของพื้นที่ห้องทดสอบติดตั้งท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมมีค่าลดลงซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของค่าความส่องสว่างบริเวณปลายท่อด้านล่างของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียม

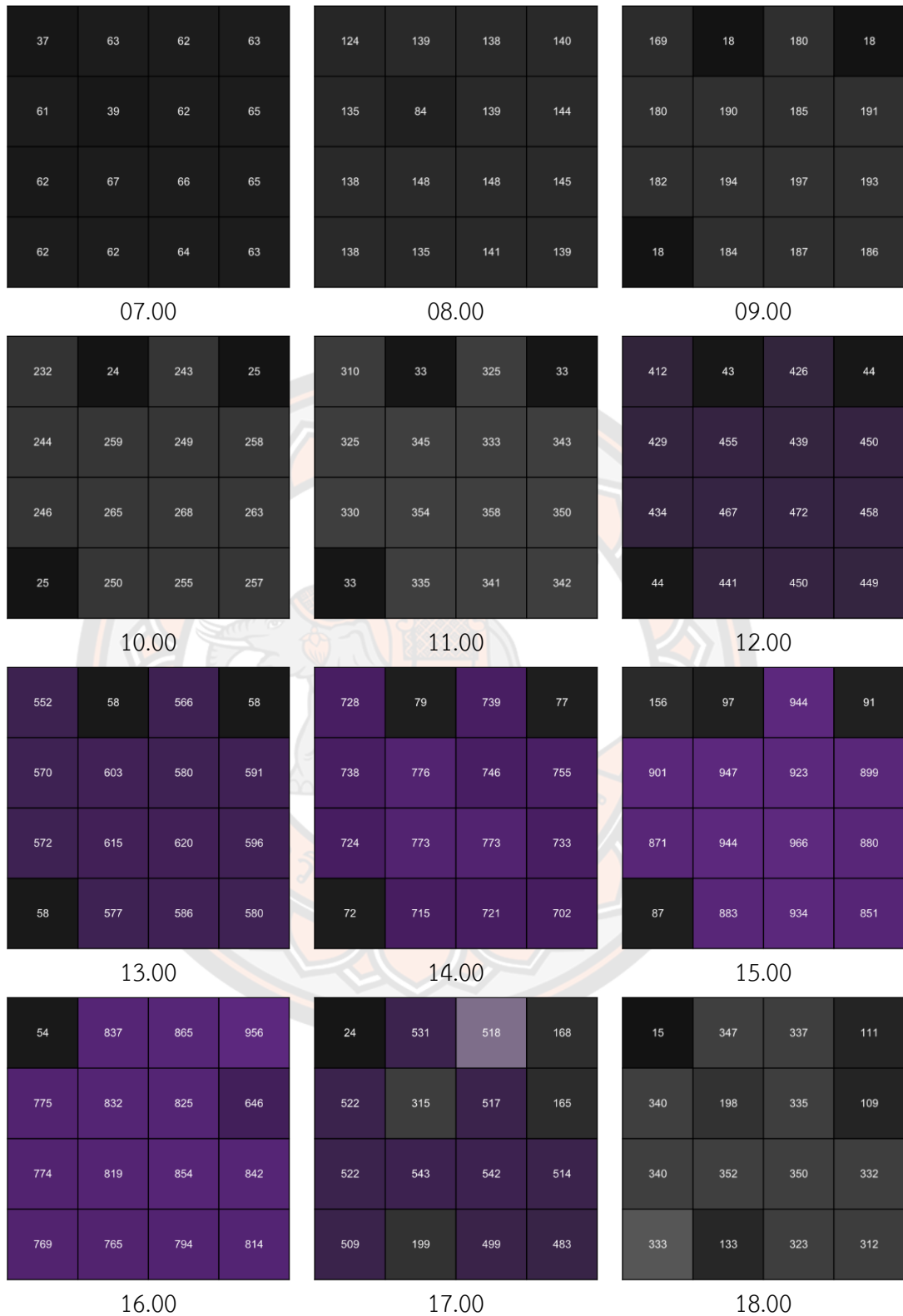
การกระจายความส่องสว่างบนพื้นที่ห้องทดสอบของท่อนำแสงโลหะผสมอลูมิเนียมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร และความสูง 0.50 เมตร แสดงในภาพ 44 - 46 ณ ช่วงเวลา 07.00 - 08.00 มีการกระจายความส่องสว่างของท่อนำแสงมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ เมื่อเวลาผ่านไปการกระจายความส่องสว่างเฉลี่ยของท่อนำแสงโลหะผสมอลูมิเนียมอยู่ระหว่าง 412 - 422 ลักซ์ ณ ช่วงเวลา 11.00 น. เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นการกระจายค่าความส่องสว่างบนพื้นจะมีการกระจายแสงแบบไม่สม่ำเสมอดังแสดงในภาพ 44 - 46 เมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นค่าความส่องสว่างจะเพิ่มขึ้นตามแต่ละตำแหน่งจะได้รับแสงดังแสดงในภาพ 44 - 46



ภาพ 44 ค่าความสว่างเฉลี่ยบริเวณพื้นห้องทดสอบที่ติดตั้งท่อนำแสงตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมวันที่ 1 วันที่ 10 มีนาคม 2564

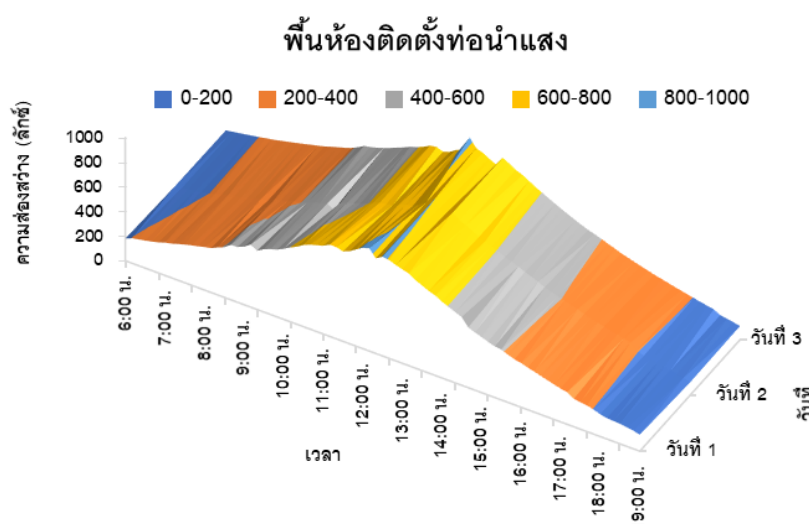


ภาพ 45 ค่าความสว่างเฉลี่ยบริเวณพื้นห้องทดสอบที่ติดตั้งท่อนำแสงตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมวันที่ 2 วันที่ 11 มีนาคม 2564

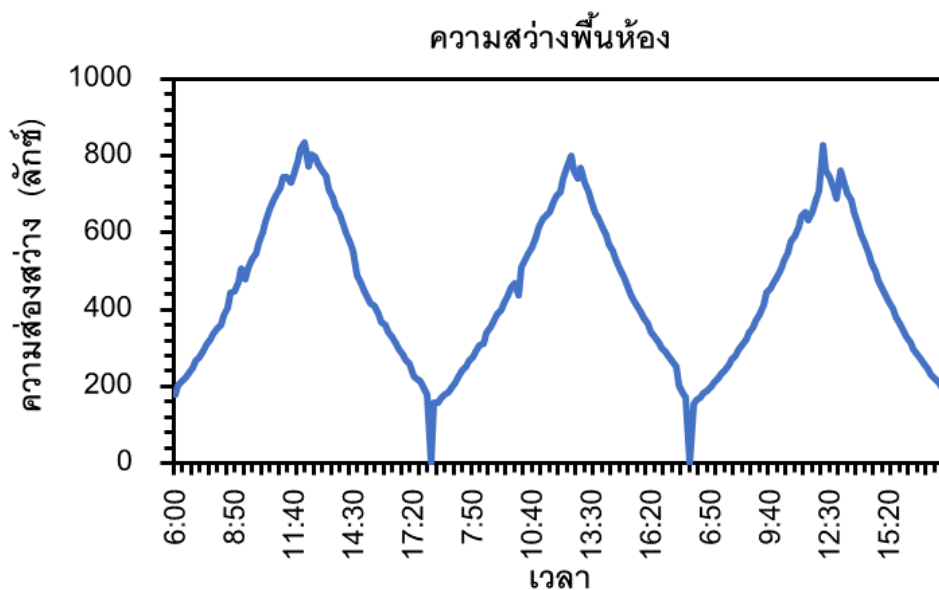


ภาพ 46 ค่าความสว่างเฉลี่ยบริเวณพื้นห้องทดสอบที่ติดตั้งท่อนำแสงตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมวันที่ 3 วันที่ 12 มีนาคม 2564

จากผลการทดลองดังแสดงในภาพ 46 แสดงค่าความสว่างเฉลี่ยบริเวณพื้นห้องทดสอบ พบว่าค่าความสว่างเฉลี่ยบริเวณพื้นห้องทดสอบที่เวลา 12.00 น. มีค่าความสว่างมากที่สุด และค่าความสว่างที่เวลา 12.00 - 18.00 น. มีค่าความสว่างลดลงตามลำดับ ซึ่งที่เวลา 12.00 - 14.00 น. มีค่าความส่องสว่างใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะบริเวณด้านบนของท่อนำแสงแนวตั้งที่เวลา 12.00 น. มีค่าความส่องสว่างสูงสุดประมาณ 834 ลักซ์ และค่าความสว่างมีแนวโน้มลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพ 46 จากผลการทดลองพบว่าค่าความสว่างบริเวณพื้นห้องทดสอบที่มีการติดตั้งท่อนำแสงแนวตั้งโลหะอลูมิเนียมมีค่าลดลงซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของค่าความส่องสว่างบริเวณปลายท่อด้านล่างของท่อนำแสงแนวตั้ง จากผลการทดลองค่าความส่องสว่างเฉลี่ยบริเวณพื้นห้องสามารถนำมาแสดงเป็นภาพ 3 มิติได้ดังภาพ 46 พบว่าค่าความส่องสว่างสามารถนำไปใช้ภายในอาคารเพื่อทดแทนแสงประดิษฐ์ได้ เนื่องจากค่ามาตรฐานความส่องสว่างในอาคารตามมาตรฐาน CIE [52] โดยห้องทำงานทั่วไปมีค่าความส่องสว่างอยู่ระหว่าง 300-500-750 ลักซ์ ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยบริเวณพื้นห้องทั้ง 3 วัน ที่ทำการทดลองจะเห็นว่าค่าความส่องสว่างพื้นห้องมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละวันแต่ค่าความส่องสว่างจะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นจากเวลา 06.00 - 12.00 น. แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปช่วงหนึ่งจะเห็นว่าที่เวลา 13.00 - 18.00 น. ค่าความส่องสว่างมีค่าลดลงเมื่อเวลาที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ แสดงดังภาพ 47 - 48



ภาพ 47 ค่าความสว่างเฉลี่ยบริเวณพื้นห้องทดสอบที่ติดตั้งท่อนำแสงแนวตั้งแบบ 3 มิติ

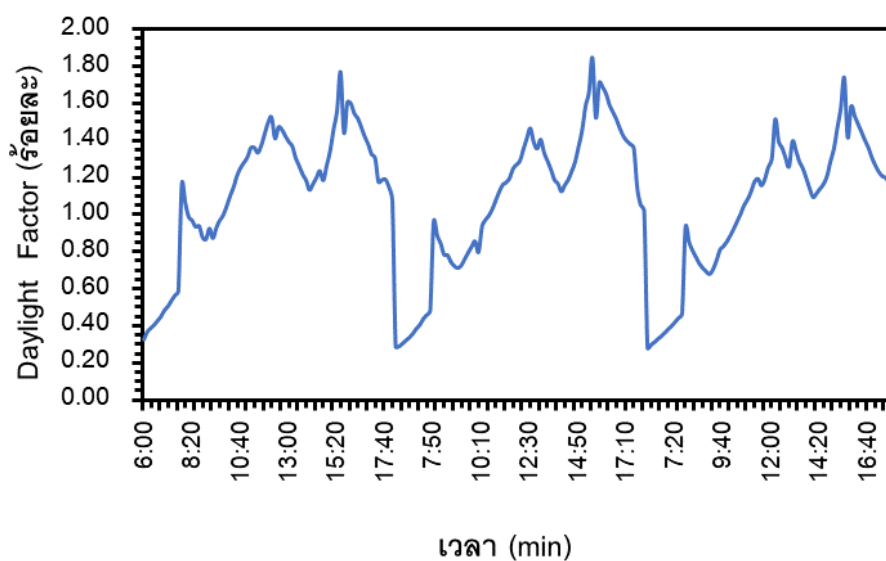


ภาพ 48 ค่าความสว่างเฉลี่ยบริเวณพื้นห้องทดสอบที่ติดตั้งท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียม
สภาวะอากาศจริงระยะเวลา 3 วัน

4.5 Daylight Factor (%)

จากการคำนวณอัตราส่วนของแสงภายในห้องทดสอบที่ติดตั้งท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมกับแสงบริเวณพื้นราบภายนอกห้องทดสอบ ซึ่งค่าความสว่างบริเวณพื้นภายนอกห้องทดสอบมีค่าประมาณ 5,295 ลักซ์ จากนั้นหาค่า Daylight Factor พบว่าช่วงเวลา 11.00 น. มีค่า Daylight Factor สูงกว่าร้อยละ 1.5 แสดงว่าปริมาณของแสงภายในห้องทดสอบมีปริมาณเพียงพอและเหมาะสมในการนำแสงจากภายนอกเข้ามาใช้ภายในอาคารแต่ละช่วงเวลา พบว่าที่เวลา 16.30 น. มีค่า Daylight Factor ต่ำกว่าร้อยละ 1.5 แสดงว่าปริมาณของแสงภายในห้องทดสอบมีปริมาณที่ต่ำกว่าเกณฑ์กำหนด เนื่องจากมุมมีผลต่อทิศทางของแสงที่ตั้งฉากกับด้านข้างของท่อนำแสงทำให้ปริมาณของแสงที่เข้าสู่ภายในห้องมีปริมาณน้อยมากทำให้แสงที่ลงมาสู่พื้นห้องทดสอบจากท่อนำแสงมีค่าน้อยลง ค่า Daylight Factor จึงมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 1.5 ดังแสดงในภาพ 49 พบว่าค่า Daylight Factor ที่ช่วงเวลา 11.00 น. มีค่า Daylight Factor สูงกว่าร้อยละ 1.5 แสดงว่าปริมาณของแสงภายในห้องทดสอบมีปริมาณเพียงพอและเหมาะสมในการนำแสงจากภายนอกเข้ามาใช้ภายในอาคารแต่ละช่วงเวลา ดังแสดงในภาพ 49 พบว่ามีค่า Daylight Factor ในช่วงเวลา 11.00 น. มีค่า Daylight Factor ต่ำกว่าร้อยละ 1.5 เนื่องจากมุมมีผลต่อทิศทางของแสงที่ตั้งฉากกับด้านข้างของท่อนำแสงทำให้ปริมาณของแสงที่เข้าสู่ภายในห้องมีปริมาณน้อยมากทำให้แสงที่ลงมาสู่พื้นห้องทดสอบ

จากท่อนำแสงมีค่าน้อยลง จากผลการทดลองส่งผลทำให้ค่า Daylight Factor เกิดขึ้นจากการที่การเก็บผลการทดลองตัว Sensor GY-30 มีข้อจำกัดในการรับแสงจึงทำให้ค่าบางช่วงของ Daylight Factor มีค่าไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน



ภาพ 49 ค่า Daylight Factor ของวันที่ 10 - 12 มีนาคม 2564

4.6 ผลการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ การติดตั้งระบบท่อนำแสง

ในการศึกษาเชิงเทคนิคนี้ ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงเฉพาะส่วนท่อนำแสง เพื่อพิจารณาให้ครอบคลุมและเป็นข้อมูลในการพิจารณาในการติดตั้ง งานวิจัยนี้จึงศึกษาและวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยจะพิจารณาราคาค่าวัสดุ ค่าแรงทำท่อนำแสง ค่าแรงการติดตั้งระบบท่อนำแสงทั้งระบบ โดยจะพิจารณาการประยุกต์ใช้กับห้องเก็บของขนาด 24 ตารางเมตร โดยมีรายละเอียดการศึกษา ดังนี้

ตาราง 9 ราคาวัสดุที่ใช้ทำท่อนำแสง

รายการ	ขนาด (เมตร)	ราคา (บาท)
แผ่นอลูมิเนียม	ความกว้างxความยาว (1x2)	210
โคมอะคริลิก	∅ (0.30)	960
แผ่นกระจายแสง	∅ (0.30)	268

ตาราง 10 ราคาวัสดุและจำนวนท่อที่จะนำไปติดตั้งกับห้องเก็บของ

รายการ	จำนวน (ชิ้น)	ราคา (บาท)
แผ่นอลูมิเนียม	24	5,040
โคมอะคริลิก	24	23,040
แผ่นกระจายแสง	24	6,432
รวมทั้งหมด	-	34,512

ตาราง 11 ค่าจ้างเหมาทำท่อนำแสง และติดตั้งบนหลังคาห้อง

รายการ	บาท/ชิ้น	จำนวน (ชิ้น)	ราคา (บาท)
ค่าขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียมทำท่อนำแสง	100	24	2,400
ค่าจ้างติดตั้งรายวัน (เหมา)	-	-	10,000

ตาราง 12 ค่าอุปกรณ์ วัสดุ และค่าจ้างในการทำท่อนำแสงและติดตั้งกับอาคาร

รายการ	ราคา (บาท)
ค่าอุปกรณ์	34,512
ค่าจ้างแรงงานขึ้นรูปท่อนำแสง	2,400
ค่าจ้างแรงงานติดตั้งท่อนำแสง (เหมา)	10,000
รวม	46,912

การศึกษาในงานนี้ ศึกษาเฉพาะส่วนของการส่องสว่างภายในพื้นที่ห้อง ซึ่งการนำท่อนำแสงมาประยุกต์ใช้งานกับห้องในอาคารอาจจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของภายในห้องที่นำไปประยุกต์ใช้ ดังนั้นการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์นี้จึงไม่ได้นำผลของภาระทางความร้อนภายในอาคารมาพิจารณาด้วย ดังนั้นงานนี้จึงสมมุติให้มีการใช้งานกับห้องที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องปรับอากาศในอาคาร

จากการศึกษาข้างต้นพบว่าในช่วงเวลา 06.00-18.00 น. ค่าการส่องสว่างบนพื้นที่ห้องหรือพื้นที่การใช้งานมีค่าอยู่ในช่วง 300-800 ลักซ์ ในช่วงเวลา 09.00 - 16.00 น. เมื่อพิจารณาจากค่าใช้จ่ายการติดตั้งระบบท่อนำแสงข้างต้น จะวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน อัตราผลตอบแทนภายใน และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ โดยจะสมมุติให้นำไปประยุกต์ใช้งานกับห้องเก็บของมีขนาด 24-30 ตารางเมตร และเป็นห้องเก็บของที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องปรับอากาศ โดยกำหนดให้มีการใช้งานทุกวัน เปิดใช้ไฟตั้งแต่เวลา 09.00 - 16.00 น. เปิดไฟวันละ 7 ชั่วโมง เพื่อทดแทนการใช้งานจากหลอดไฟลู่ออเรส เซนต์จำนวน 24 หลอด แต่ละหลอดมีขนาด 36 วัตต์ ได้ผลการวิเคราะห์ดังตาราง 12 โดยการคำนวณค่าไฟฟ้าจะมีการพิจารณาค่าธรรมเนียมไปด้วยตามเกณฑ์การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งจะมีค่าใช้จ่ายในแต่ละเดือนเท่ากับ 668.49 บาท เมื่อพิจารณาใน 1 ปีพบว่ามีการใช้จ่าย เท่ากับ 8,021.88 บาท

หลังจากนั้น เมื่อคำนวณหาระยะเวลาคืนทุน อัตราผลตอบแทนภายใน และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ โดยใช้สมการที่ 20-22 ซึ่ง A_0 คือ ค่าอุปกรณ์ วัสดุ และค่าจ้างในการทำท่อนำแสงและติดตั้งกับอาคาร A_s คือ เงินที่ประหยัดได้จากการลดการใช้ไฟฟ้าจากหลอดไฟลู่ออเรส เซนต์จำนวน 24 หลอด และสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลาประมาณ 5.85 ปี อัตราผลตอบแทนภายในประมาณร้อยละ 16.74 และมูลค่าปัจจุบันสุทธิประมาณ 55,138 บาท ดังแสดงในตาราง 13

ตาราง 13 การคำนวณค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าหลอดไฟลู่ออเรส เซนต์

ชนิด	กำลังไฟฟ้า (kW)	กำลังไฟฟ้า 1 วัน (kWh)	กำลังไฟฟ้า 1 เดือน (kWh)	ค่าไฟฟ้า 1 เดือน (บาท)	ค่าไฟฟ้า 1 ปี (บาท)
หลอดไฟลู่ออเรส เซนต์	0.864	6.048	181.44	668.49	8,021.88

ตาราง 14 ระยะเวลาคืนทุน อัตราผลตอบแทนภายใน และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ

รูปแบบ	A ₀ (บาท)	A _s (บาท)	PBP (ปี)	NPV (บาท)	IRR %
ระบบท่อน้ำแสง	46,912	8,021	5.85	55,138	16.74

โดยที่ A₀ = เงินลงทุน (บาท)
 A_s = เงินที่ประหยัดได้ (บาท)
 I = อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ เท่ากับ 6.05 % ของธนาคารกรุงศรีอยุธยา จำกัด (มหาชน) ณ วันที่ 1 เมษายน 2564
 N = จำนวน (ปี), (n=25ปี)

$$\text{NPV} = -46,912 + 8,021 \left[\frac{(1+0.0605)^{25}-1}{0.0605(1+0.0605)^{25}} \right]$$

$$= 55,138 \text{ บาท}$$

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการออกแบบท่อนำแสงแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 0.25 และ 0.30 เมตร ขนาดท่อที่มีความยาว 0.50 1.00 และ 1.50 เมตร โดยใช้วัสดุต่างชนิดกัน ได้แก่ โลหะผสมอลูมิเนียม โลหะผสมสังกะสี และวัสดุพีวีซี สำหรับวัสดุพีวีซีจะใช้ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร และความยาว 0.50 เมตร เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการส่งผ่านของแสงภายในของท่อนำแสงแนวตั้ง โดยการศึกษาก่อเป็น 2 ขั้นตอน โดยติดตั้งบริเวณด้านบนของห้องทดสอบที่มีความยาว 1.00 เมตร ความกว้าง 1.00 เมตร และความสูง 1.70 เมตร โดยใช้หลอดไฟ LED ขนาด 20 วัตต์ จำนวน 1 หลอด โดยเปลี่ยนมุมที่หลอดไฟกระทำกับท่อนำแสง ได้แก่ มุมเงยตั้งแต่ 0° ถึง 80° เพิ่มขึ้นครั้งละ 10° บันทึกค่าความส่องสว่างของท่อนำแสงด้วยเครื่องลักซ์มิเตอร์รุ่น Digicon LX-70 เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดแสงจำลองโดยจะทำการศึกษาทั้ง 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 ศึกษาประสิทธิภาพของท่อนำแสงแนวตั้งภายใต้สภาวะควบคุม กรณีที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพของท่อนำแสงแนวตั้งภายใต้สภาวะแวดล้อม ซึ่งในบทนี้จะสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการบันทึกค่าความส่องสว่างของท่อนำแสงแนวตั้งที่ทำจากวัสดุต่างชนิดกันระหว่างท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมกับท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมสังกะสี เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของท่อนำแสงแนวตั้งภายใต้สภาวะควบคุม พบว่าที่มุมเงยที่ 80° มีค่าความส่องสว่างบริเวณปากท่อด้านบนและปลายท่อด้านล่างสูงที่สุดเมื่อเทียบกับมุมเงยอื่น ๆ ซึ่งมุมเงยที่ 0° ถึง 80° มีค่าความส่องสว่างเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากที่มุม 80° ได้รับปริมาณแสงตรงมากทำให้ค่าความส่องสว่างมีค่ามาก แต่เมื่อมุมเงยลดลงจะได้รับปริมาณแสงตรงน้อยลงได้รับปริมาณแสงกระจายเป็นส่วนใหญ่จึงทำให้มีค่าความส่องสว่างลดลง

จากนั้นนำค่าความส่องสว่างของท่อนำแสงตั้งมาเปรียบเทียบกันพบว่าท่อนำแสงแนวตั้งชนิดโลหะผสมอลูมิเนียมมีประสิทธิภาพการส่องสว่างเฉลี่ยในทุก ๆ มุมดีกว่าท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมสังกะสีเฉลี่ยประมาณร้อยละ 20 เนื่องจากโลหะผสมอลูมิเนียมมีสมบัติการสะท้อนแสงได้ดีกว่าโลหะ

ผสมสังกะสีทำให้มีประสิทธิภาพการส่องสว่างดีกว่าโลหะผสมสังกะสี สำหรับการศึกษาระสิทธิภาพของท่อนำแสงแนวตั้งภายใต้สภาวะแวดล้อม พบว่าค่าความส่องสว่างบริเวณพื้นห้องทดสอบเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าความส่องสว่างจากการคำนวณพบว่าเมื่อมุมเพิ่มค่าความส่องสว่างจากการบันทึกผลการทดลองและจากการคำนวณมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยค่าจากการบันทึกผลการทดลองของท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมมีค่าน้อยกว่าค่าจากการคำนวณเฉลี่ยประมาณร้อยละ 20 และบริเวณพื้นของห้องทดสอบเปรียบเทียบกับค่าความสว่างภายนอกห้องทดสอบ มีค่า Daylight Factor ที่มากกว่าร้อยละ 1.5 แสดงว่าปริมาณของแสงเพียงพอในการใช้งาน สำหรับการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ ท่อนำแสงแนวตั้งโลหะผสมอลูมิเนียมมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 5.85 ปี อัตราผลตอบแทนภายในประมาณร้อยละ 16.74 และมูลค่าปัจจุบันสุทธิประมาณ 55,138 บาท ดังนั้นท่อนำแสงแนวตั้งจึงสามารถนำแสงจากภายนอกเข้ามาใช้ทดแทนแสงประดิษฐ์ภายในอาคารได้จึงนำไปสู่การประหยัดพลังงานภายในอาคาร

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 อาจมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ทำท่อนำแสงที่หลากหลายชนิดมากขึ้น
- 5.2.2 อาจมีการศึกษาเพิ่มเติมหรือเพิ่มเงื่อนไขเกี่ยวกับขนาดของท่อนำแสง อาจเพิ่มหรือลดความยาวหรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำแสง
- 5.2.3 อาจมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสารเคลือบที่ใช้ทาบริเวณภายในท่อนำแสงที่หลากหลาย
- 5.2.4 งานนี้ศึกษาเฉพาะส่วนนำแสง และเหมาะกับการนำไปใช้งานกับห้องหรือพื้นที่ที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องปรับอากาศ

บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

1. ดร.กระมล ทองธรรมชาติ และคณะ, สังคมศึกษา ศาสนาและวัฒนธรรม ม.1, สำนักพิมพ์ อักษรเจริญทัศน์ อจท. จำกัด, 2548
2. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน โครงการแผนที่ศักยภาพพลังงาน แสงอาทิตย์จากข้อมูลดาวเทียมสำหรับประเทศไทย ปี 2542
3. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่าย ดาวเทียม สำหรับประเทศไทย กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554
4. นิตยสารส่งเสริมด้านการอนุรักษ์พลังงาน Thailand Energy Awards 2011 จากกรมพัฒนา พลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน June 21, 2018
5. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. รายงานฉบับสุดท้าย เล่ม 1 หลักเกณฑ์การอนุรักษ์พลังงานใน อาคาร โครงการจัดทำหลักเกณฑ์และแนวทางการส่งเสริมการอนุรักษ์ พลังงานในอาคารเรื่อง ข้อกำหนดและแนวทางการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานในอาคารขนาดต่ำกว่าอาคารควบคุมขนาดใหญ่พิเศษ ตาม พ.ร.บ.ควบคุมอาคาร และอาคารที่พักอาศัย. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2549.
6. ภิญโญ ชุมมณี. (2549). “การออกแบบและทดสอบการใช้แสงธรรมชาติผ่านท่อนำแสงใน อาคาร”. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
7. ศิวตล อุปพงษ์. และ ยิ่งสวัสดิ์ ไชยะกุล. (2556). “การใช้แสงธรรมชาติในอาคารผ่านท่อนำ แสงแนวตั้ง”. วารสารวิชาการ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 12, 1(เมษายน- ตุลาคม): 78-85.
8. นศมา เพ็ญนภักตร์ และคณะ. (2553). “ รูปแบบและขนาดช่องเปิดของช่องแสงที่หลังคา เพื่อการนำแสงธรรมชาติมาใช้ในอาคารประเภทซูเปอร์สโตร์ ”. วารสารวิจัยพลังงานปีที่ 7. สาขา สถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
9. วัชรินทร์ วิมานจตุรงค์ และคณะ. (2558). “ การใช้แสงธรรมชาติในห้างค้าปลีกขนาดใหญ่ ผ่านท่อนำแสงแนวตั้ง ”. 202 หน้า.คณะสถาปัตยกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
10. บริรักษ์ อินทรกุลชัย. (2552). “ การออกแบบและพัฒนาระบบท่อนำแสงแนวนอนสำหรับ อาคารประเภทสำนักงาน ”. คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

11. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, (2550), คู่มือมาตรฐานการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร
12. Shao, L.; Riffat, S.B. Daylighting using light pipes and its integration with solar heating and natural ventilation. *Int. J. Lighting Res. Technol.* 2000, 32, 133–139.
13. R.; Peron, F.; Rossi, G. Day light and energy performances of a new type of light pipe. *Energy Build.* 2004, 36, 1163–1176.
14. Canziani, R.; Peron, F.; Rossi, G. Day light and energy performances of a new type of light pipe. *Energy Build.* 2004, 36, 1163–1176.
15. Hansen, V.G.; Edmonds, I. Methods for the illumination of multilevel buildings with vertical light pipes. *Sol. Energy* 2015, 117, 74–88.
16. Shao, L.; Riffat, S.; Icks, W.H. A study of performance of light pipes under cloudy and sunny conditions in the UK. *Right Light* 1997, 1, 155–159.
17. Mohelnikova, J. Daylighting and energy savings with tubular light guides. *WSEAS Trans. Environ. Dev.* 2008, 4, 200–209.
18. Alrubaih, M.S.; Zain, M.F.M.; Alghoul, M.A.; Ibrahim, N.L.N.; Shameri, M.A.; Elayeb, O. Research and development on aspects of daylighting fundamentals. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, 21, 494–505.
19. Smith, B.J.; Phillips, G.M.; Sweeney, M. Daylighting. In *Environmental Science*; Routledge: London, UK, 2014; Chapter 9.
20. Zhang, X.; Muneer, T. Mathematical model for the performance of light pipes. *Light. Res. Technol.* 2000, 32, 141–146.
21. Vasilakopoulou, K.; Synnefa, A.; Kolokotsa, D.; Karlessi, T.; Santamouris, M. Performance prediction and design optimization of an integrated light pipe and artificial lighting system. *Int. J. Sustain. Energy* 2014, 35, 675–685.
22. Ekren, N.; Gorgulu, S. An investigation into the usability of straight light-pipes in Istanbul. *Energy Educ. Sci. Tech. Part A Energy Sci. Res.* 2012, 30, 637–644.
23. Li, D.H.W.; Tsang, E.K.W.; Cheung, K.L.; Tam, C.O. An analysis of light-pipe system via full-scale measurements. *Appl. Energy* 2010, 87, 799–805.
24. Yun, G.Y.; Shin, H.Y.; Kim, J.T. Monitoring and evaluation of a light-pipe system used in Korea. *Indoor Built Environ.* 2010, 9, 129–136.

25. Yanpeng, W.; Rendong, J.; Deying, L.; Wenming, Z.; Chongfang, M. Experimental Investigation of Top Lighting and Side Lighting Solar Light Pipes under Sunny Conditions in Winter in Beijing. In Proceedings of the SPIE—The International Society for Optical Engineering, Beijing, China, 2 February 2009.
26. Mushtaha, E.; Kana'an, B.A.; Al-Jawazneh, R.A.; Hammad, R.S. Effect of using different light pipe parameters on the daylight quality in buildings: The case of Jordan. *Int. J. Green Energy* 2016, 3, 1590–1598.
27. Gago, E.J.; Muneer, T.; Knez, M.; Köster, H. Natural light controls and guides in buildings. Energy saving for electrical lighting, reduction of cooling load. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015, 41, 1–13.
28. Pleshkov, S.; Brakale, G.; Vedishcheva, I. A Project aimed to increase energy efficiency of the object swimming pool universitates by application of hollow mirrored tubular light guides under trademark. *Mater. Sci. Eng.* 2018, 463, 042050.
29. Ahsan, M.d.; Ahsan, R.U.; Kim, Y.R.; Ashiri, R.; Cho, Y.J.; Jeong, C.; Park, Y.D. Cold metal transfer (CMT) MAWof zinc coated steel. *Weld. J.* 2016, 95, 120–132.
30. Mahawan, J.; Thongtha, A.; Promphak, K.; Chansomsak, S. Application of solar tube integrating with roof for energy consumption reduction in building. In Proceedings of the International Conference on Sustainable Energy and Green Technology 2019 (SEGT 2019), Bangkok, Thailand, 11–14 December 2019; The Joint Graduate School of Energy and Environment—Center of Excellence on Energy Technology and Environment (JGSEE-CEE), Centre for Energy Sciences (University of Malaya, Malaysia), and Centre for Vehicular Technology (UTAR, Malaysia): Bangkok, Thailand, 2019.
31. รายงานฉบับสมบูรณ์ การสำรวจสถานภาพอุตสาหกรรมโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous metals): อะลูมิเนียม ภายใต้โครงการพัฒนาศูนย์ข้อมูลเชิงลึกอุตสาหกรรมเหล็กและโลหะการประจำปีงบประมาณ 2557
32. Anuwat Janmano. (2560). “คุณสมบัติของแสง,การเดินทางเป็นเส้นตรงของแสง,การหักเหของแสง,การสะท้อนของแสง,การกระจายของแสง”. สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.)
33. Loisos George, “Skylighting and Retail Sales and Investigation into the Relationship Between Daylighting and Human Performance,” in Daylighting Initiative

- Design tools and information from The Pacific Gas and Electric Company, The Pacific Gas and Electric Company (California: Heschong Mahone Mahone Group, 1999), 1 – 29.
34. Sunlight Dome [pseud], Sunlight Dome Natural Tubular Skylight, accessed November 18, 2015, available from www.sunlightdome.com
35. รายงานฉบับสมบูรณ์ การสำรวจสถานภาพอุตสาหกรรมโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous metals): อะลูมิเนียม ภายใต้โครงการพัฒนาศูนย์ข้อมูลเชิงลึกอุตสาหกรรมเหล็กและโลหะการ ประจำปีงบประมาณ 2557
36. กิตติพันธ์ บายี่ขัน. สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน.กรมอุตสาหกรรมพื้นฐาน และการเหมืองแร่. หน้า 88-94
37. โครงสร้างทางเคมี PVC.[ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://surachai6.blogspot.com/2017/09/pvc.html>. (วันที่สืบค้น : 4 มิถุนายน 2563)
38. นักสิทธิ์ คุ้มณาชัย. (2533). การถ่ายเทความร้อน. ปรับปรุงและพิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ. โครงการตำราเรียนสำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.
39. Gábor Horváth and others, Visual estimation of the sun position in cloudy and twilight skies, accessed November 18, 2015, available from <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/366/1565/772>
40. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน การพัฒนาและผลิตพลังงานทดแทน (พลังงานแสงอาทิตย์)
41. A.A.M. sayigh, Solar Energy Engineering, Academic Press, New York, 1977
42. รังสีอาทิตย์. Solar Radiation. ศาสตราจารย์ดร.เสริม จันท์ฉาย. ภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
43. เสริม จันท์ฉาย. (2557). รังสีอาทิตย์. (พิมพ์ครั้งที่ 1). นครปฐม: เพชรเกษมการพิมพ์.
44. คู่มือ แนวทางการออกแบบการส่องสว่างภายในอาคาร, สมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย
45. คู่มือฝึกอบรม การประเมินศักยภาพการอนุรักษ์พลังงาน. (2560). ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง. หน้า 1-25
46. คู่มือผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน(โรงงาน). (2561). การอนุรักษ์พลังงาน. หน้า 3-1 – 3-7.
47. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (2556). หน้า 36 – 40.
48. กฎกระทรวง ฉบับที่ 55 (พ.ศ. 2543) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522

49. อธิสมัย โสพันธ์, “การออกแบบระบบส่องสว่าง” (เอกสารประกอบการสอนวิชา ไฟฟ้าส่องสว่างมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา, 2554).
50. คู่มือแนวทางการออกแบบการส่องสว่างภายในอาคาร. ประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่อง มาตรฐานความเข้มของแสงสว่าง เล่ม ๑๓๕ ตอนพิเศษ ๓๙ ง ราชกิจจานุเบกษา ๒๑ กุมภาพันธ์ ๒๕๖๑. หน้า 15.
51. ฟิสิกส์วิทยาศาสตร์ของอาคาร. แสงสว่างในบริบทอาคาร. หน้า 70.
52. เอกสารคู่มือบอร์ดเซ็นเซอร์วัดความเข้มแสง BH1750 LUX SENSOR หน้า 1 – 3
53. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2555). บทที่ 4 การตรวจวัดและวิเคราะห์การใช้พลังงาน. คู่มือการอนุรักษ์พลังงานจากกรณีตัวอย่างที่ประสบผลสำเร็จอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์โลหะ เครื่องจักร และอุปกรณ์, 4-37 – 4-40.
54. วัชรินทร์ วิมานจตุรงค์ และคณะ. (2558). “ การใช้แสงธรรมชาติในห้างค้าปลีกขนาดใหญ่ผ่านท่อนำแสงแนวตั้ง ”. 202 หน้า.คณะสถาปัตยกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
55. ศิวดล อุปพงษ์. และ ยິงส์สวัสดิ์ ไชยะกุล. (2556). “การใช้แสงธรรมชาติในอาคารผ่านท่อนำแสงแนวตั้ง”. วารสารวิชาการ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 12, 1(เมษายน-ตุลาคม): 78-85.
56. นศมา เพ็ญภักตร์ และคณะ. (2553). “ รูปแบบและขนาดช่องเปิดของช่องแสงที่หลังคาเพื่อการนำแสงธรรมชาติมาใช้ในอาคารประเภทซูเปอร์สโตร์ ”. วารสารวิจัยพลังงานปีที่ 7. สาขาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย