เทคนิคการประมาณค่าความส่องสว่างจากปริมาณรังสีดวงอาทิตย์
กรณีศึกษา : กรุงเทพมหานคร

นายทศพร นามเทพ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาคาร ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-759-3

ลิขสิทธิ์ของ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I19276006

A TECHNIQUE FOR ILLUMINATION PREDICTION FROM GLOBAL SOLAR RADIATION

Mr. Tossapom Namthep

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Architecture in Building Technology
Department of Architecture
Faculty of Architecture
Chulalongkorn University
Academic Year 1999

ISBN 974-334-759-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคการประมาณค่าความส่องสว่างจากปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ กรณีศึกษา : กรุงเทพมหานคร
โดย	นายทศพร นามเทพ
ภาควิชา	สถาปัตยกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร. สุนทร บุญญาธิการ

.....

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... รองคณบดีฝ่ายวิจัยรักษาราชการแทน
คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. วีระ สัจกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ เลอสม สถาปิตานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร. สุนทร บุญญาธิการ)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. วรสัณฑ์ บูรณากาญจน์)

..... กรรมการ
(อาจารย์พิรัส พัชรเศวต)

..... กรรมการ
(นายปราโมทย์ เอี่ยมศิริ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทศพร นามเทพ : เทคนิคการประมาณค่าความส่องสว่างจากปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ กรณีศึกษา : กรุงเทพมหานคร (A TECHNIQUE FOR ILLUMINATION PREDICTION FROM GLOBAL SOLAR RADIATION) อาจารย์ที่ปรึกษา: ศาสตราจารย์ ดร. สุนทร บุญญาธิการ, 226 หน้า. ISBN 974-334-759-3

ข้อมูลความส่องสว่างในแต่ละทิศ เป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญในการออกแบบ เพื่อนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ในอาคาร ในอดีตที่ผ่านมาประเทศไทยขาดการเก็บข้อมูลดังกล่าวอย่างจริงจัง แม้จะมีการบันทึกข้อมูลค่าพลังงานรังสีรวมที่ตกกระทบในแนวระนาบโดยกรมอุตุนิยมวิทยา แต่ข้อมูลดังกล่าวไม่สามารถนำมาใช้ในการออกแบบได้โดยตรง งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์หลักในการนำเอาข้อมูลค่าพลังงานรังสีรวมที่ตกกระทบในแนวระนาบจากกรมอุตุนิยมวิทยามาเป็นข้อมูลหลักในการที่จะประยุกต์ใช้เพื่อการพยากรณ์ปริมาณความสว่างในแต่ละทิศ

งานวิจัยเริ่มจากการเก็บข้อมูลเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความส่องสว่างภายนอกกับค่าพลังงานรังสีรวมที่ตกกระทบในแนวระนาบและตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความส่องสว่างตั้งแต่เดือนตุลาคม 2542 ถึงเดือนเมษายน 2543 การเก็บข้อมูลใช้เครื่องมือวัดค่าความส่องสว่างภายนอกในระนาบนอนและระนาบตั้งรวม 8 ทิศ ข้อมูลที่ได้เป็นค่าความส่องสว่างจากท้องฟ้าจริง โดยไม่รวมอิทธิพลจากแสงสะท้อนของพื้นดิน การเก็บข้อมูลทำการบันทึกค่าเฉลี่ยทุกๆ 5 แล้วตรวจสอบความถูกต้องก่อนนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยอาศัยหลักของสมการถดถอยทั้งแบบเส้นตรงและที่ไม่เป็นเส้นตรง เพื่อหาสมการพยากรณ์ความส่องสว่างในแต่ละทิศ

จากการศึกษาพบว่า ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความส่องสว่างมากที่สุด คือ ค่าพลังงานรังสีรวมที่ตกกระทบในแนวระนาบ มุมยกขึ้นของดวงอาทิตย์และความแปรปรวนของสภาพท้องฟ้า เมื่อนำตัวแปรดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าสมการพยากรณ์มีความสามารถอธิบายความแปรปรวนของความส่องสว่างได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ทุกสมการ

การประมาณค่าความส่องสว่างภายนอกโดยอาศัยสมการพยากรณ์ที่ได้จากผลการศึกษาครั้งนี้สามารถใช้คาดการณ์ได้ค่อนข้างแม่นยำ ทั้งในกรณีช่วงเวลาหรือตลอดทั้งปี โดยตัวแปรหลักที่ใช้ในการคำนวณได้แก่ ค่าพลังงานรังสีรวมที่ตกกระทบในแนวระนาบ มุมยกขึ้นของดวงอาทิตย์ และความแปรปรวนของสภาพท้องฟ้า ผลที่ได้จากงานวิจัย ทำให้สามารถพยากรณ์ความส่องสว่างในแต่ละทิศจากข้อมูลค่าพลังงานรังสีรวมที่ตกกระทบในแนวระนาบของกรมอุตุนิยมวิทยา ผลของค่าความส่องสว่างที่คำนวณได้นี้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญ และเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการออกแบบหรือการศึกษาที่ต้องการใช้ข้อมูลจากแสงธรรมชาติในแต่ละทิศ

ภาควิชา สถาปัตยกรรมศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา เทคโนโลยีอาคาร ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2542

##4174124625: MAJOR BUILDING TECHNOLOGY

KEY WORD: DAYLIGHT / DAYLIGHTING PREDICTION

TOSSAPORN NAMTHEP: A TECHNIQUE FOR ILLUMINATION PREDICTION FROM GLOBAL SOLAR RADIATION. THESIS ADVISOR: PROF. DR. SOONTORN BOONYATIKARN, 226 pp.

ISBN 947-334-759-3

Sky illumination is one of the crucial factors in natural light interior design. So far, there are not many studies this on sky illumination in Thailand. Even global solar radiation in every sky condition has been collected comprehensively by Meteorological Climatology Division, the government agency. But, these collected data are unable to be used in daylighting design directly. Therefore, this study is purposed on benefiting the available data as a principle information to conduct illumination prediction equations.

In this study, data were collected and examined for relationship between external illumination, its related factor, and global solar radiation concerning directional variables since October 1999 until April 2000. Data of real-sky environment merely without the influence of ground reflection consist of both vertical and horizontal plane for 8 directions. The data were integrated at five-minute interval. This integrated data were testified, then, analyzed using statistical linear and non-linear regression equations, in order to find illumination prediction equation in each direction.

The most influential factor on illumination founded are global solar radiation, altitude angle, and sky factor. By applying statistical procedures to these data, the equations with r-square value more than 95% are attained.

The external illumination can be precisely estimated in both of each period or throughout the year. The groups of variables contributed to predict forms are global solar radiation, solar altitude angle, and sky factor. The resulting equation can predict illumination in each direction from global solar radiation collected by Meteorological Climatology Division. These will be the essentially fundamental data that can be utilized in daylighting design or any other natural-light researches committed to external illumination.

ภาควิชา สถาปัตยกรรมศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา เทคโนโลยีอาคาร ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2542 .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องด้วยความกรุณา ความอนุเคราะห์ จากบุคคล และสถาบันต่างๆ ดังนี้

ขอขอบพระคุณอธิการบดี สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการวิจัยนี้

ขอขอบคุณพระคุณในกรุณาของ ศาสตราจารย์ ดร.สุนทร บุญญาธิการ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำคำปรึกษา รวมถึงตำราทางวิชาการ ที่มีประโยชน์เป็นอย่างยิ่งต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ช่วยประสานงานให้งานวิจัยสามารถดำเนินงานได้จนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณอย่างยิ่ง สำหรับ ศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ จิระรัตนานนท์ อาจารย์ประจำ คณะพลังงานสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ที่ช่วยให้คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัยนี้ และ คุณพิพัฒน์ คุณพิชัย สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ที่ได้กรุณาให้ข้อมูลที่สำคัญต่องานวิจัยในครั้งนี้ รวมถึงคุณคมกฤช ชูเกียรติมั่น ที่กรุณาให้ข้าพเจ้าใช้ข้อมูลวิทยานิพนธ์ เพื่อเป็นแนวทางในงานวิจัยนี้ รวมทั้งน้อง ๆ ที่ได้ร่วมทุกข์ร่วมสุข ตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษาอยู่ ณ สถาบันแห่งนี้

ขอขอบคุณในคำแนะนำ ที่เป็นประโยชน์ ต่อข้าพเจ้า สำหรับ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และ อ.ทรงศิริ แต้สมบัติ

ประโยชน์ของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ข้าพเจ้าขออุทิศแก่ คุณพ่อลุวิทย์ นามเทพ คุณแม่อำพัน บุญโยม ที่ทำให้ข้าพเจ้า สามารถสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตารางประกอบ ..... ฎ
สารบัญรูปภาพประกอบ ..... ฎ
สารบัญแผนภูมิประกอบ ..... ฑ

บทที่ 1 บทนำ
1.1 ความเป็นมาของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 1
1.3 ขั้นตอนการศึกษา 2
1.4 ขอบเขตการศึกษา 5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5

บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2.1 ความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 6
2.1.1 การคำนวนพิกัดของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า 6
2.1.2 การทำนายค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลทางสถิติ 13
2.1.3 การคำนวนค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 14
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการคำนวนสมการถดถอย 16
2.2.1 สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย 17
2.2.2 การวิเคราะห์ข้อมูล 19
2.2.3 การวิเคราะห์สมการพหุคูณ 21
2.2.4 การคัดเลือกสมการถดถอยที่ดีที่สุด 25
2.2.5 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน 26
2.2.6 สมมุติฐานในการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ 29
2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับแสง 32
2.4 พฤติกรรมของแสง 34
2.4.1 การดูดกลืน 34
2.4.2 การสะท้อนของแสง 34
2.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับการส่องสว่าง 37
2.5.1 ปริมาณแสง 38
2.5.2 ความส่องสว่าง 39
2.5.3 การส่องสว่าง 40

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.6 คุณสมบัติอื่นๆ ของแสง 41
2.6.1 ความจ้า 41
2.6.2 ความเปรียบต่าง 41
2.7 ทฤษฎีเกี่ยวกับแสงธรรมชาติ 42
2.7.1 แหล่งกำเนิดแสงและการนำไปใช้งาน 42
2.7.2 การนำแสงธรรมชาติไปใช้งาน 43
2.8 ทฤษฎีเกี่ยวกับดวงอาทิตย์ 44
2.8.1 ตำแหน่งของที่ตั้ง 45
2.8.2 การบอกเวลา 46
2.8.3 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ 47
2.9 การแผ่รังสีของแสงจากดวงอาทิตย์ 49
2.10 การแผ่รังสีของแสงจากท้องฟ้า 52
2.11 สภาพท้องฟ้า 59
2.11.1 สภาพท้องฟ้าโปร่งปราศจากเมฆปกคลุม 59
2.11.2 สภาพท้องฟ้าที่มีเมฆปกคลุมบางส่วน 60
2.11.3 สภาพท้องฟ้าที่ปกคลุมด้วยเมฆ จนไม่เห็นแสงจากดวงอาทิตย์ 61
2.12 แสงธรรมชาติในสภาพภูมิอากาศเขตร้อน 62
2.13 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 65
2.13.1 การตรวจวัดพิกัดของดวงอาทิตย์ 65
2.13.2 การคำนวนค่ามวลอากาศ 66
2.13.3 การคำนวนค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์ 68
2.13.4 ค่าปรับแก้ของอุปกรณ์วัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ 75
2.13.5 การประมาณค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์ด้วยวิธีทางสถิติ 76

บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการติดตั้งที่ใช้ในการวิจัย
3.1 เครื่องมือ 78
3.1.1 ลักซ์มิเตอร์ 78
3.1.2 แคมเบลล์ ดาต้าล็อคเกอร์ 79
3.1.3 ไพรานอมิเตอร์ 79
3.2 วิธีการติดตั้งเครื่องมือ 83
3.2.1 การติดตั้งเครื่องมืออ่านค่าแสงภายนอก 83
3.2.2 การติดตั้งเครื่องมืออ่านค่ารังสีดวงอาทิตย์ 84
3.2.3 การบันทึกข้อมูล 85
3.2.4 สถานที่และสภาพแวดล้อม 86
3.2.5 ผังแสดงการติดตั้งเครื่องมือ 88
3.2.6 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการทดลอง 89

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล
4.1 แนวความคิดในการแสงธรรมชาติเข้าใช้ในอาคาร 91
4.2 ค่าความส่องสว่างภายนอกของท้องฟ้าอันเนื่องมาจากรังสีดวงอาทิตย์ 93
4.2.1 สภาพท้องฟ้า 93
4.2.1.1 สภาพท้องฟ้าโปร่งปราศจากเมฆปกคลุม 94
4.2.1.2 สภาพท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมบางส่วน 95
4.2.1.3 สภาพท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆจนมองไม่เห็นดวงอาทิตย์ 95
4.3 การศึกษาความส่องสว่างภายนอกของท้องฟ้า อันเนื่องมาจากแสงกระจายของดวงอาทิตย์ 96
4.3.1 การศึกษาความส่องสว่างจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนแนวระนาบ 96
4.3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการศึกษา 98
4.3.3 การศึกษารูปแบบการกระจายของแสงในแต่ละทิศ 99
4.3.4 การศึกษาค่าความส่องสว่างของท้องฟ้า ในทุกสภาพท้องฟ้า 104
4.4 การศึกษาความส่องสว่างภายนอกของท้องฟ้า อันเนื่องมาจากแสงตรงของดวงอาทิตย์ ... 109
4.4.1 การศึกษาความส่องสว่างจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนแนวระนาบ 109
4.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการศึกษา 111
4.4.3 การศึกษารูปแบบการกระจายของแสงในแต่ละทิศ 112
4.4.4 การศึกษาค่าความส่องสว่างของท้องฟ้า ในทุกสภาพท้องฟ้า 115

บทที่ 5 การวิเคราะห์สมการถดถอย
5.1 การวิเคราะห์สมการถดถอย 118
5.1.1 การพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปร 118
5.1.2 การพล็อตแสดงลักษณะการกระจายของข้อมูล 123
5.1.2.1 กรณีศึกษาแสงกระจายจากท้องฟ้า 123
5.1.2.2 กรณีศึกษาแสงตรงจากดวงอาทิตย์ 129
5.1.3 รูปแบบสมการถดถอยที่ดี 133
5.1.4 การวิเคราะห์เพื่อหาสมการถดถอยในการพยากรณ์ 135
5.1.4.1 การวิเคราะห์สมการพยากรณ์ค่าความส่องสว่างภายนอก กรณีศึกษา แสงกระจายจากท้องฟ้า .. 135
5.1.4.2 การวิเคราะห์สมการพยากรณ์ค่าความส่องสว่างภายนอก กรณีศึกษา แสงตรงจากดวงอาทิตย์ .. 172

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ
บทสรุป 197
ข้อเสนอแนะ 204

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง 205

ภาคผนวก 207

ภาคผนวก ก 207

ภาคผนวก ข 208

ภาคผนวก ค 211

ประวัติผู้เขียน 226

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตารางประกอบ

ตารางที่		หน้า
2.1	(ก) ค่า Extraterrestrial Solar Radiation และค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง (SI Unit)	7
	(ข) ค่า Extraterrestrial Solar Radiation และค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง (English Unit)	8
2.2	แสดงทิศทางการวางตัวของผนังเทียบกับทิศใต้	13
2.3	แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อวิเคราะห์ค่า F	20
2.4	แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อคำนวนค่า F	23
2.5	แสดงความเชื่อมั่นของค่าสัมประสิทธิ์	28
2.6	แสดงค่าความส่องสว่าง ในแต่ละพื้นที่ใช้งาน ตามมาตราฐาน CIE	39
2.7	แสดงที่ตั้งของจังหวัดต่างๆ ที่สำคัญ ในประเทศไทย ในแต่ละภูมิภาค ตามแนวละติจูด และลองติจูด	45
2.8	แสดงที่ตั้งของเส้นแบ่งเวลาที่สำคัญของโลก	46
2.9	ค่าคงที่ของปริมาณแสงอาทิตย์	50
2.10	ค่าคงที่ของความส่องสว่างท้องฟ้า (Sky Zenith Illuminance) ที่เซนิท สำหรับท้องฟ้าในลักษณะเมฆปกคลุมทึบ (Overcast Sky)	53
2.11	แสดงค่าสัมประสิทธิ์สำหรับคำนวนค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ของ ASHREA	68
2.12	แสดงค่าสัมประสิทธิ์สำหรับคำนวนค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ที่ได้รับการปรับปรุงใหม่	71
2.13	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ 2.83	73
2.14	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ 2.92 และ 2.93	74
3.1	แสดงตัวอย่างของการเก็บข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา ณ สภาพท้องฟ้าจริง	90
4.1	แสดงการแบ่งประเภทของสภาพท้องฟ้า	93
4.2	แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูล กรณีแสงกระจายจากดวงอาทิตย์	96
4.3	แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูล กรณีแสงกระจายจากดวงอาทิตย์	97
4.4	แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูล กรณีแสงตรงจากดวงอาทิตย์	109
4.5	แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูล กรณีแสงตรงจากดวงอาทิตย์	110
5.1	แสดงการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม	119
6.1	แสดงค่าประสิทธิผลความสว่างของแสงธรรมชาติ	199
6.2	แสดงรูปแบบสมการพยากรณ์ กรณีแสงกระจายจากท้องฟ้า ทั้งระนาบนอนและระนาบตั้ง	207
6.3	แสดงรูปแบบสมการพยากรณ์ กรณีแสงตรงจากดวงอาทิตย์ ทั้งระนาบนอนและระนาบตั้ง	211

สารบัญรูปภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์	6
2.2	การแบ่งเส้นเวลามาตรฐานท้องถิ่น	7
2.3	ค่า Equation of time บนเส้นเวลามาตรฐานท้องถิ่น	9
2.4	ปริมาณรังสี Extraterrestrial Solar Radiation และรังสี Solar Radiation ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ เมื่อมวลอากาศมีค่าเท่ากับ 1.5	11
2.5	มุม Zenith เมื่อมวลอากาศมีค่าเท่ากับ 1.0 และ 1.5	11
2.6	มุมของรังสีดวงอาทิตย์ที่ทำกับพื้นผิว ที่วางทำมุมใด ๆ กับแนวระดับ	12
2.7	แสดงความสัมพันธ์เชิงกิจกรรมรูปแบบต่าง ๆ ระหว่างตัวแปร X และ Y	21
2.8	แสดงความถี่ และความยาวคลื่นของพลังงานต่างๆ	32
2.9	สเปกตรัมของคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น เกิดการหักเหไม่เท่ากัน ของความยาวคลื่นที่แสงที่แตกต่างกัน	33
2.10	พฤติกรรมของแสงเมื่อกระทำกับวัตถุ	34
2.11	การดูดกลืนของแสงเมื่อตกกระทบตัวกลาง	34
2.12	การสะท้อนแสงกลับแบบกระจกเงา (Specula Reflection)	35
2.13	การสะท้อนของแสงแบบกระจาย (Diffuse Reflection)	35
2.14	การสะท้อนของแสงแบบผสม (Combined Specula and Diffuse Reflection)	36
2.15	แสงตกกระทบตัวกลาง เกิดการหักเหของแสงแล้วทะลุผ่าน	36
2.16	แสงทะลุผ่านตัวกลาง และทะลุผ่านแบบกระจาย	37
2.17	ปริมาณการส่องสว่าง (Luminous Flux)	38
2.18	ความเข้มของการส่องสว่าง เปลี่ยนแปลงไปตามมุมที่ทำกับแนวแกนของแหล่งกำเนิดแสง	38
2.19	แสดงปริมาณการส่องสว่าง 1 cd ที่ระยะต่างๆ จากแหล่งกำเนิดแสง	40
2.20	ความเปรียบต่าง (contrast) ความส่องสว่างของวัตถุเมื่อเทียบกับสภาพข้างเคียงในการมองเห็น	42
2.21	สเปกตรัมที่มาจากรังสีดวงอาทิตย์ ที่มีความยาวคลื่นต่างกันสามลักษณะ	43
2.22	ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ จากมุมอัลติจูด(at,altitude)และมุมอะซิมุท(az,azimuth)	44
2.23	ค่าของมุมต่างๆ ที่ใช้ในสมการ	54
2.24	ค่าความส่องสว่างรังสีตรงดวงอาทิตย์ ในแต่ละมุมอัลติจูล และ อัลซิมุทของดวงอาทิตย์	56
2.25	ค่าความส่องสว่างของดวงอาทิตย์ในระนาบตั้งในแต่ละมุมอัลติจูดและอัลซิมุทของดวงอาทิตย์ สำหรับความสว่างเต็มท้องฟ้า	57
2.26	ค่าความส่องสว่างของดวงอาทิตย์ในระนาบนอนในแต่ละมุมอัลติจูลและอัลซิมุทของดวงอาทิตย์ สำหรับความสว่างครึ่งท้องฟ้า	58

สารบัญรูปภาพประกอบ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.27	รูปแสดงท้องฟ้าแบบ (Clear sky)	59
2.28	รูปแสดงท้องฟ้าแบบ (Clear sky) และมุมแบริ่ง (Bearing angle)	60
2.29	รูปแสดงท้องฟ้าแบบ (Overcast Sky)	62
3.1	แสดงเครื่องมือวัดแสงที่ใช้ในการศึกษา	78
3.2	แสดงเครื่องมือ แดมเบลล์ คาต้าล้อคเกอร์ 21 X	79
3.3	แสดงเครื่องมือไพรานอมิเตอร์	80
3.4	แสดงเครื่องมือไพรานอมิเตอร์วัดรังสีกระจาย	81
3.5	เครื่องมือวัดรังสีดวงอาทิตย์ไพรานอมิเตอร์	82
3.6	รูปแสดงอุปกรณ์บังเงา	82
3.7	แสดงตารางการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์	82
3.8	แสดงการติดตั้งเครื่องมือ ลักซ์มิเตอร์ DX – 200	83
3.9	แสดงการติดตั้งเครื่องมือวัดแสงโดยตรงจากดวงอาทิตย์	83
3.10	แสดงการติดตั้งเครื่องมือวัดแสงกระจายจากดวงอาทิตย์	83
3.11	แสดงการติดตั้งเครื่องมือไพรานอมิเตอร์	84
3.12	แสดงการติดตั้งเครื่องมือวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์	84
3.13	แสดงการติดตั้งเครื่องมือวัดรังสีกระจายจากดวงอาทิตย์	84
3.14	แสดงสภาพแวดล้อม ณ บริเวณที่ติดตั้งเครื่องมือ	86
3.15	แสดงสภาพแวดล้อม ณ บริเวณที่ติดตั้งเครื่องมือ	86
4.1	เปรียบเทียบค่าการส่องสว่างของแหล่งกำเนิดแสงในแต่ละประเภท เมื่อเทียบกับแสงธรรมชาติ	91
4.2	รูปแสดงท้องฟ้าแบบ (Clear sky)	94
4.3	รูปแสดงท้องฟ้าแบบ (Clear sky) และมุมแบริ่ง (Bearing angle)	94
4.4	รูปแสดงท้องฟ้าแบบ (Overcast Sky)	95

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญแผนภูมิ

แผนภูมิที่		หน้า
2.1	แสดงโมเดลถดถอยเชิงเส้น	18
2.2	แสดงความมีเอกภาพของข้อมูล	27
2.3	แสดงความขาดเอกภาพของข้อมูล	27
2.4	แสดงความมีเอกภาพของข้อมูล	28
2.5	แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง	29
2.6	แสดงแบบแผนคงที่ของการผันแปร	30
3.1	แสดงการอ่านและเก็บข้อมูลของ Campbell Data Logger	85
3.2	แสดงตัวอย่างข้อมูลที่เก็บได้จากการใช้เครื่องมือวัด	89
4.1	แสดงขั้นตอนการประยุกต์ใช้แสงธรรมชาติในการออกแบบอาคาร	92
4.2	แสดงรูปแบบการกระจายของแสง กรณีของแสงกระจาย	98
4.3	แสดงความส่องสว่างของท้องฟ้าในทุกสภาพท้องฟ้า กรณีของแสงกระจาย	103
4.4	แสดงรูปแบบการกระจายของแสง กรณีของแสงตรงจากดวงอาทิตย์	111
4.5	แสดงความส่องสว่างของท้องฟ้าในทุกสภาพท้องฟ้า กรณีของแสงตรงจากดวงอาทิตย์	114
5.1	แสดงลักษณะการกระจายของข้อมูล กรณีของแสงกระจายจากท้องฟ้า	123
5.2	แสดงลักษณะการกระจายของข้อมูล กรณีของแสงตรงจากดวงอาทิตย์	129
5.3	แสดงความมีเอกภาพของข้อมูล	134
5.4	แสดงความถูกต้องของสมการประมาณการ	134
5.5	แสดงการกระจายของแสงในระนาบนอน	137
5.6	แสดงการพล็อตค่าความสว่างในระนาบนอนกับค่าประมาณการ	137
5.7	แสดงการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน	138
5.8	แสดงการกระจายของแสงทางทิศเหนือ	141
5.9	แสดงการพล็อตค่าความสว่างทางทิศเหนือกับค่าประมาณการ	141
5.10	แสดงการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน	142
5.11	แสดงการกระจายของแสงทางทิศใต้	145
5.12	แสดงการพล็อตค่าความสว่างทางทิศใต้กับค่าประมาณการ	145
5.13	แสดงการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน	146
5.14	แสดงการกระจายของแสงทางทิศตะวันออก	149
5.15	แสดงการพล็อตค่าความสว่างทางทิศตะวันออกกับค่าประมาณการ	149
5.16	แสดงการกระจายของแสงทางทิศตะวันตก	153
5.17	แสดงการพล็อตค่าความสว่างทางทิศตะวันตกกับค่าประมาณการ	153
5.18	แสดงการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน	154
5.19	แสดงการกระจายของแสงทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ	157
5.20	แสดงการพล็อตค่าความสว่างทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือกับค่าประมาณการ	157
5.21	แสดงการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน	150

สารบัญแผนภูมิ(ต่อ)

แผนภูมิที่		หน้า
5.22	แสดงการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน	158
5.23	แสดงการกระจายของแสงทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ	161
5.24	แสดงการพล็อตค่าความสว่างทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือกับค่าประมาณการ	161
5.25	แสดงการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน	162
5.26	แสดงการกระจายของแสงทางทิศตะวันออกเฉียงใต้	165
5.27	แสดงการพล็อตค่าความสว่างทางทิศตะวันออกเฉียงใต้กับค่าประมาณการ	165
5.28	แสดงการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน	166
5.29	แสดงการกระจายของแสงทางทิศตะวันตกเฉียงใต้	169
5.30	แสดงการพล็อตค่าความสว่างทางทิศตะวันตกเฉียงใต้กับค่าประมาณการ	169
5.31	แสดงการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน	170
5.32	แสดงการกระจายของแสงในระนาบนอน	174
5.33	แสดงการพล็อตค่าความสว่างในระนาบนอนกับค่าประมาณการ	174
5.34	แสดงการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน	175
5.35	แสดงการกระจายของแสงทางทิศใต้	178
5.36	แสดงการพล็อตค่าความสว่างทางทิศใต้กับค่าประมาณการ	178
5.37	แสดงการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน	179
5.38	แสดงการกระจายของแสงทางทิศตะวันออก	182
5.39	แสดงการพล็อตค่าความสว่างทางทิศตะวันออกกับค่าประมาณการ	182
5.40	แสดงการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน	183
5.41	แสดงการกระจายของแสงทางทิศตะวันตก	186
5.42	แสดงการพล็อตค่าความสว่างทางทิศตะวันตกกับค่าประมาณการ	186
5.43	แสดงการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน	187
5.44	แสดงการกระจายของแสงทางทิศตะวันออกเฉียงใต้	190
5.45	แสดงการพล็อตค่าความสว่างทางทิศตะวันออกเฉียงใต้กับค่าประมาณการ	190
5.46	แสดงการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน	191
5.47	แสดงการกระจายของแสงทางทิศตะวันตกเฉียงใต้	194
5.48	แสดงการพล็อตค่าความสว่างทางทิศตะวันตกเฉียงใต้กับค่าประมาณการ	194
5.49	แสดงการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน	195