



การศึกษาแบบจำลองสำหรับคำนวณดิฟฟิวชันออสโมมิแนนบนพื้นเอียง

โดย

นายเจษฎา ประทุมสิทธิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาแบบจำลองสำหรับคำนวณดิฟฟิวชันออสโมมิแนนบนพื้นเอียง

โดย

นายเจษฎา ประทุมสิทธิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**A STUDY OF MODELS FOR CALCULATING DIFFUSE ILLUMINANCE ON
INCLINED SURFACES**

**By
Jedsada Prathumsit**

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

MASTER OF SCIENCE

Department of Physics

Graduate School

SILPAKORN UNIVERSITY

2008

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “การศึกษาแบบจำลอง
สำหรับคำนวณคิฟิวซ์อิมูมิเนนบนพื้นเอียง” เสนอโดย นายเจษฎา ประทุมสิทธิ์ เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะตั้งกูร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รองศาสตราจารย์ ดร.เสริม จันทร์ฉาย

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์จ้านงค์ ชำรงมาศ)

...../...../.....

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิชัย นามประกาย)

...../...../.....

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย)

...../...../.....

49306201 : สาขาวิชาฟิสิกส์

คำสำคัญ : แสงสว่างธรรมชาติ / ดิฟฟิวส์อิลลูมินแนน / แสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า

เจษฎา ประทุมสิทธิ์ : การศึกษาแบบจำลองสำหรับคำนวณดิฟฟิวส์อิลลูมินแนนบนพื้นเอียง.

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รศ.ดร.เสริม จันทร์ฉาย. 148 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองสำหรับคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียง จำนวน 17 แบบจำลอง โดยเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดที่สถานี เชียงใหม่ (18.78°N, 98.98°E), อุบลราชธานี (15.25°N, 104.87°E), นครปฐม (13.82°N, 100.04°E) และสงขลา (7.2°N, 100.60°E) ผลการเปรียบเทียบพบว่า แบบจำลองของ Muneer และแบบจำลองของ Perez ซึ่งใช้สัมประสิทธิ์ชูดิฟฟิวส์ของสถาบัน AIT มีสมรรถนะที่ดีกว่าแบบจำลองอื่นๆ โดยมีค่าความแตกต่างในรูป root mean square error (RMSE) ในช่วง 15-28% โดยขึ้นกับทิศทางและมุมเอียงของระนาบ จากนั้นผู้วิจัยได้พัฒนาวิธีการคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงโดยใช้แบบจำลอง sky luminance ซึ่งใช้ข้อมูลดาวเทียมในการจำแนกสภาพท้องฟ้า หลังจากนั้นผู้วิจัยได้นำวิธีการดังกล่าวไปใช้คำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียง โดยเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดที่สถานีเชียงใหม่ อุบลราชธานี และสงขลา ผลที่ได้พบว่า ค่า RMSE ของความแตกต่างระหว่างค่าจากการวัดและการคำนวณ มีค่าอยู่ในช่วง 10-19% ข้อได้เปรียบของวิธีการดังกล่าวคือ ผู้ใช้สามารถคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงโดยอาศัยข้อมูลดาวเทียมและพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตเป็นข้อมูลอินพุทเท่านั้น สุดท้ายผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของ global และ diffuse illuminance ที่วัดได้จาก 4 สถานี ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพแสงสว่างธรรมชาติที่ค่อนข้างสูง

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

49306201 : MAJOR : PHYSICS

KEY WORD : DAYLIGHT / DIFFUSE ILLUMINANCE / SKY LUMINANCE

JEDSADA PRATHUMSIT : A STUDY OF MODELS FOR CALCULATING DIFFUSE ILLUMINANCE ON INCLINED SURFACES. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SERM JANJAI, Ph.D. 148 pp.

In this work, the performance of seventeen inclined diffuse illuminance models was tested against measured data at four solar radiation monitoring stations in Thailand namely, Chiang Mai (18.78°N, 98.98°E), Ubon Ratchathani (15.25°N, 104.87°E), Nakhon Pathom (13.82°N, 100.04°E) and Songkhla (7.2°N, 100.60°E). It was found that the Muneer model and Perez model with local coefficient at AIT performed better than the other models, with the discrepancy in terms of root mean square error (RMSE) in the range of 15-28%, depending on the orientation and inclined angle of surfaces. Afterward, a method for estimating diffuse illuminance on inclined surfaces by using a satellite-based sky luminance model was developed. The method was used to predict inclined diffuse illuminance measured Chiang Mai, Ubon Ratchathani and Songkhla. The RMSE between the measurement and prediction was in range of 10-19%. The advantage of this method is that it can be used to calculate inclined diffuse illuminance using only satellite data and geometrical parameters of the sun and inclined surfaces as input data. Finally, statistical characteristics of global and diffuse illuminances measured at the four stations were investigated. The results indicated that Thailand has relatively high daylight potentials.

Department of Physics Graduate School, Silpakorn University Academic Year 2008

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณ
พลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณ
ไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง และขอขอบคุณศูนย์อุดมศึกษาภาคเหนือ ศูนย์อุดมศึกษาภาค
ตะวันออกเฉียงเหนือ และศูนย์อุดมศึกษาภาคใต้ฝั่งตะวันออก ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่
ติดตั้งและดูแลอุปกรณ์การวัดแสงสว่างธรรมชาติ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาผู้ให้
คำแนะนำด้านวิชาการ พร้อมทั้งจัดหาทุนวิจัย เครื่องมือ อุปกรณ์ และข้อมูลสำหรับการ
ดำเนินงานวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์จ่านงค์ ชำรงมาศ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ คณะ
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้การสนับสนุนด้านงานบริหารต่างๆ และขอขอบพระคุณ
รองศาสตราจารย์ ดร. พิชัย นามประกาย อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงาน
และวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นกรรมการสอบ
วิทยานิพนธ์

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ประสาน ปานแก้ว ดร. อิศระ มะศิริ คุณรุ่งรัตน์ วัลลภ
คุณยุทธศักดิ์ บุญรอด และนักวิจัยของห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะ
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ช่วยสนับสนุนงานวิจัย และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ในภาควิชา
ฟิสิกส์ทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ คุณประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดาและมารดา
รวมทั้งคุณอาจารย์ทุกท่าน เพื่อตอบแทนพระคุณที่ได้ช่วยให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
สัญลักษณ์.....	ท
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
2 หลักทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	3
2.2 แสงสว่าง (visible light).....	4
2.2.1 การตอบสนองของสายตามนุษย์.....	4
2.2.2 ปริมาณแสงสว่าง.....	5
2.3 แสงสว่างธรรมชาติ (daylight).....	8
2.3.1 แหล่งกำเนิดของแสงสว่างธรรมชาติ.....	8
2.3.2 ปริมาณแสงสว่างธรรมชาติ.....	13
2.3.3 การหาค่าปริมาณแสงสว่างธรรมชาติ.....	14
2.3.4 การวัดปริมาณแสงสว่างธรรมชาติ.....	16
2.4 ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์บนพื้นเอียง.....	20
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
2.5.1 แบบจำลองรังสีกระจายบนพื้นเอียงแบบ Isotropic.....	24
2.5.2 แบบจำลองรังสีกระจายบนพื้นเอียงแบบ Anisotropic.....	25
3 วิธีการวิจัยและผล.....	41
3.1 เครื่องมือวัด.....	41

บทที่	หน้า
3.2 การสอบเทียบเครื่องวัดแสงสว่างธรรมชาติ.....	53
3.3 การควบคุมคุณภาพข้อมูล.....	59
3.4 การทดสอบสมรรถนะแบบจำลองสำหรับคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียง.....	61
3.4.1 การเตรียมข้อมูล.....	64
3.4.2 ผลการทดสอบแบบจำลองสำหรับคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียง.....	66
3.4.2.1 ผลการทดสอบที่สถานีเชียงใหม่.....	67
3.4.2.2 ผลการทดสอบที่สถานีอุบลราชธานี.....	70
3.4.2.3 ผลการทดสอบที่สถานีสงขลา.....	73
3.4.2.4 ผลการทดสอบที่สถานีนครปฐม.....	76
3.5 การคำนวณ Diffuse illuminance บนพื้นเอียง โดยวิธีการอินทิเกรต Sky luminance distribution.....	86
3.5.1 แบบจำลองแสงสว่างธรรมชาติจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า (Sky luminance model).....	90
3.5.2 การหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนของบรรยากาศและพื้นผิวโลกจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม.....	94
3.5.3 Normalization Ratio (NR).....	97
3.5.4 การคำนวณค่า Normalization ratio (NR).....	98
3.5.5 ผลการคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียง โดยวิธีการอินทิเกรต sky luminance.....	102
3.6 ลักษณะทางสถิติของแสงสว่างธรรมชาติในภูมิภาคต่างๆ ในประเทศไทย.....	113
3.6.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงสว่างธรรมชาติตามเวลาในรอบวัน.....	113
3.6.1.1 การแปรค่าตามเวลาในรอบวันของ global illuminance.....	113
3.6.1.2 การแปรค่าตามเวลาในรอบวันของ diffuse illuminance.....	119
3.6.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงสว่างธรรมชาติตามฤดูกาลในรอบปี.....	124
3.6.2.1 การแปรค่าตามฤดูกาลของ global illuminance.....	124
3.6.2.2 การแปรค่าตามฤดูกาลของ diffuse illuminance.....	126

บทที่	หน้า
3.6.3 การแจกแจงค่าความเข้มแสงสว่างธรรมชาติในรอบวัน.....	129
3.6.3.1 การแจกแจงของ global illuminance.....	129
3.6.3.2 การแจกแจงของ diffuse illuminance.....	136
4 สรุป.....	143
บรรณานุกรม.....	145
ประวัติผู้วิจัย.....	148

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ในแบบจำลองของ Perez et al. (1990).....	37
2.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของ Perez et al. ที่พัฒนาใหม่จากข้อมูลวัดในประเทศไทย ตามแบบ AIT0a.....	38
2.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของ Perez et al. ที่พัฒนาใหม่จากข้อมูลวัดในประเทศไทย ตามแบบ AIT0b กรณีด้านที่เห็นดวงอาทิตย์.....	39
2.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของ Perez et al. ที่พัฒนาใหม่จากข้อมูลวัดในประเทศไทย ตามแบบ AIT0b กรณีด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์.....	39
2.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของ Perez et al. ที่พัฒนาใหม่จากข้อมูลวัดในประเทศไทย ตามแบบ AIT25.....	40
3.1 แสดงชนิดและช่วงเวลาของข้อมูลปริมาณแสงสว่างธรรมชาติรายชั่วโมงที่นำมาใช้ ในงานวิจัย.....	45
3.2 แสดงแบบจำลองแบบ Isotropic.....	62
3.3 แสดงแบบจำลองแบบ Anisotropic.....	62
3.4 แสดงแบบจำลองแบบ Anisotropic (ต่อ).....	63
3.5 แสดงค่า RMSE(%) และ MBE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการทดสอบที่ สถานีเชียงใหม่.....	67
3.6 แสดงค่า RMSE(%) และ MBE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการทดสอบที่ สถานีอุบลราชธานี.....	70
3.7 แสดงค่า RMSE(%) และ MBE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการทดสอบที่ สถานีสงขลา.....	73
3.8 แสดงค่า RMSE (%) และ MBE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการทดสอบที่ สถานีนครปฐม.....	76
3.9 แสดงค่าจำนวน sky element ค่าอะซิมุทที่เพิ่มขึ้น และค่ามุมตันของ sky element ที่แต่ละมุมเงย.....	90
3.10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ a_0, \dots, a_7	92
3.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ a_8, \dots, a_{15}	93
3.12 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ b_0, b_1, b_2, b_3	93

ตารางที่	หน้า
3.13 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ c_1, c_2, c_3 ของสมการเทอม NR ตามกลุ่มของค่า ρ'_{EA}	101
3.14 แสดงค่าความแตกต่างระหว่างค่า diffuse illuminance บนพื้นราบจากการคำนวณกับ ค่าจากการวัด ปี 2007 ของทั้ง 4 สถานี.....	102
3.15 แสดงค่าความแตกต่างระหว่างค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงจากการคำนวณกับ ค่าจากการวัดของสถานีเชียงใหม่ ปี 2007.....	104
3.16 แสดงค่าความแตกต่างระหว่างค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงจากการคำนวณกับ ค่าจากการวัดของสถานีอุบลราชธานี ปี 2007.....	106
3.17 แสดงค่าความแตกต่างระหว่างค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงจากการคำนวณกับ ค่าจากการวัดของสถานีสงขลา ปี 2007.....	108

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ.....	3
2.2	แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความยาวคลื่นช่วงต่างๆ.....	4
2.3	แสดงการตอบสนองของสายตามนุษย์ตามมาตรฐานของ CIE (Murdoch, 1985).....	4
2.4	แสดงการให้คำจำกัดความของ luminance.....	5
2.5	แสดงการให้คำจำกัดความของ illuminance.....	6
2.6	แสดงการให้คำจำกัดความของ luminous exitance.....	7
2.7	แสดงการให้คำจำกัดความของ luminous intensity.....	8
2.8	แสดงสเปกตรัมของรังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (Iqbal, 1983).....	9
2.9	แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมรังสีตรง (Iqbal, 1983).....	10
2.10	แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมรังสีกระจาย (Iqbal, 1983).....	11
2.11	แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมรังสีรวม (Iqbal, 1983).....	11
2.12	แสดงแสงตรงจากดวงอาทิตย์ (sunlight) และแสงกระจายจากท้องฟ้า (skylight).....	12
2.13	แสดงความเข้มของแสงสว่างธรรมชาติในรูปของ direct illuminance และ diffuse illuminance.....	13
2.14	แสดงความเข้มของแสงสว่างธรรมชาติในรูปของความเข้มของแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า หรือ sky luminance.....	14
2.15	แสดงเครื่อง sky scanner.....	16
2.16	แสดงลักซ์มิเตอร์.....	17
2.17	แสดงเครื่องวัดแสงสว่างธรรมชาติที่กระจายจากท้องฟ้า.....	18
2.18	แสดงเครื่องวัดแสงสว่างธรรมชาติบนระนาบในแนวตั้ง 4 ทิศ (a) และบนระนาบ 45 องศา หันไปทิศใต้ (b).....	19
2.19	แสดงรังสีดวงอาทิตย์บนพื้นเอียง.....	20
2.20	แสดงมุมตกกระทบของรังสีดวงอาทิตย์บนพื้นเอียง.....	22
2.21	แสดงการแบ่งท้องฟ้าเป็น 3 ส่วน โดยส่วนที่ 1 เป็นท้องฟ้าบริเวณรอบดวงอาทิตย์ ส่วนที่ 2 เป็นท้องฟ้าบริเวณขอบฟ้า และส่วนที่ 3 เป็นท้องฟ้าส่วนที่เหลือ ตามแบบจำลองของ Temps-Coulson (1977)	27
2.22	แสดงการแบ่งท้องฟ้าเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 เป็นท้องฟ้าบริเวณรอบดวงอาทิตย์ และส่วนที่ 2 เป็นท้องฟ้าส่วนที่เหลือ ตามแบบจำลองของ Hay (1979).....	29

รูปที่	หน้า
2.23 แสดงการแบ่งท้องฟ้าเป็น 3 ส่วน โดยส่วนที่ 1 เป็นท้องฟ้าบริเวณรอบดวงอาทิตย์ ส่วนที่ 2 เป็นท้องฟ้าบริเวณขอบฟ้า และส่วนที่ 3 เป็นท้องฟ้าส่วนที่เหลือ ตามแบบจำลองของ Reindl (1990).....	34
2.24 แสดงการแบ่งท้องฟ้าออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนที่ 1 เป็นท้องฟ้าบริเวณขอบฟ้า ส่วนที่ 2 เป็นท้องฟ้าบริเวณรอบดวงอาทิตย์ และส่วนที่ 3 เป็นท้องฟ้าส่วนที่เหลือ ตามแบบจำลองของ Perez et al. (1990).....	36
3.1 แสดงอุปกรณ์วัด global illuminance บนระนาบแนวตั้ง (a) และบนระนาบเอียง 45 องศา (b).....	42
3.2 แสดงอุปกรณ์วัด diffuse illuminance บนพื้นราบ.....	43
3.3 แสดงลักซ์มิเตอร์.....	44
3.4 แสดงเครื่องบันทึกข้อมูล.....	44
3.5 แสดงตำแหน่งที่ตั้งของอุปกรณ์วัดแสงสว่างธรรมชาติ.....	46
3.6 แสดงอุปกรณ์วัด global illuminance บนระนาบแนวตั้ง 4 ทิศ ที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยา ภาคเหนือจังหวัดเชียงใหม่.....	47
3.7 แสดงอุปกรณ์วัด global illuminance บนระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ ที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยา ภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่.....	47
3.8 แสดงอุปกรณ์วัด diffuse illuminance บนพื้นราบ ที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยา ภาคเหนือจังหวัดเชียงใหม่.....	48
3.9 แสดงอุปกรณ์วัด global illuminance บนระนาบแนวตั้ง 4 ทิศ ที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยา ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี.....	48
3.10 แสดงอุปกรณ์วัด global illuminance บนระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ ที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยา ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี.....	49
3.11 แสดงอุปกรณ์วัด diffuse illuminance บนพื้นราบ ที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยา ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี.....	49
3.12 แสดงอุปกรณ์วัด global illuminance บนระนาบแนวตั้ง 4 ทิศ ที่มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม.....	50
3.13 แสดงอุปกรณ์วัด diffuse illuminance บนพื้นราบ ที่มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม.....	50

รูปที่	หน้า
3.14 แสดงอุปกรณ์วัด global illuminance บนระนาบเอียง 45 องศาทิศเหนือ (a) ทิศใต้ (b) ทิศตะวันออก (c) และทิศตะวันตก (d) ที่มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม.....	51
3.15 แสดงอุปกรณ์วัด global illuminance บนระนาบแนวตั้ง 4 ทิศ ที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา.....	52
3.16 แสดงอุปกรณ์วัด global illuminance บนระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ ที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา.....	52
3.17 แสดงอุปกรณ์วัด diffuse illuminance บนพื้นราบ ที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา.....	53
3.18 แสดงกราฟระหว่างค่าความเข้มแสงสว่างของหัววัดลักซ์มิเตอร์มาตรฐาน กับค่าศักย์ไฟฟ้าของหัววัดลักซ์มิเตอร์ที่ทำการสอบเทียบ.....	54
3.19 แสดงภาพการสอบเทียบที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่.....	55
3.20 แสดงภาพการสอบเทียบที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี.....	55
3.21 แสดงภาพการสอบเทียบที่มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม.....	56
3.22 แสดงภาพการสอบเทียบที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา.....	56
3.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่า illuminance ที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยาภาคเหนือจังหวัดเชียงใหม่.....	57
3.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่า illuminance ที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี.....	57
3.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่า illuminance ที่มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม.....	58
3.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่า illuminance ที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา.....	58
3.27 แสดงข้อมูลผลิตภัณฑ์เนื่องจากวงแหวนไม่บังดวงอาทิตย์.....	60
3.28 กราฟแสดงค่า RMSE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการคำนวณ diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้ง ทิศเหนือ (a) ทิศใต้ (b) ทิศตะวันออก (c) ทิศตะวันตก (d) ระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ (e) และระนาบเอียงทั้งหมด (f) ที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่.....	68

รูปที่	หน้า
3.29 กราฟแสดงค่า MSE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการคำนวณ diffuse illuminance บน ระนาบแนวตั้ง ทิศเหนือ (a) ทิศใต้ (b) ทิศตะวันออก (c) ทิศตะวันตก (d) ระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ (e) และระนาบเอียงทั้งหมด (f) ที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยา ภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่.....	69
3.30 กราฟแสดงค่า RMSE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการคำนวณ diffuse illuminance บน ระนาบแนวตั้ง ทิศเหนือ (a) ทิศใต้ (b) ทิศตะวันออก (c) ทิศตะวันตก (d) ระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ (e) และระนาบเอียงทั้งหมด (f) ที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยา ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี.....	71
3.31 กราฟแสดงค่า MSE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการคำนวณ diffuse illuminance บน ระนาบแนวตั้ง ทิศเหนือ (a) ทิศใต้ (b) ทิศตะวันออก (c) ทิศตะวันตก (d) ระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ (e) และระนาบเอียงทั้งหมด (f) ที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยา ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี.....	72
3.32 กราฟแสดงค่า RMSE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการคำนวณ diffuse illuminance บน ระนาบแนวตั้ง ทิศเหนือ (a) ทิศใต้ (b) ทิศตะวันออก (c) ทิศตะวันตก (d) ระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ (e) และระนาบเอียงทั้งหมด (f) ที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยา ภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา.....	74
3.33 กราฟแสดงค่า MSE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการคำนวณ diffuse illuminance บน ระนาบแนวตั้ง ทิศเหนือ (a) ทิศใต้ (b) ทิศตะวันออก (c) ทิศตะวันตก (d) ระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ (e) และระนาบเอียงทั้งหมด (f) ที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยา ภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา.....	75
3.34 กราฟแสดงค่า RMSE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการคำนวณ diffuse illuminance บน ระนาบแนวตั้ง ทิศเหนือ (a) ทิศใต้ (b) ทิศตะวันออก (c) ทิศตะวันตก (d) และ ระนาบเอียง 45 องศา ทิศเหนือ (e) ทิศใต้ (f) ที่สถานีนครปฐม.....	77
3.35 กราฟแสดงค่า RMSE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการคำนวณ diffuse illuminance บน ระนาบเอียง 45 องศา ทิศตะวันออก (a) ทิศตะวันตก (b) และระนาบเอียงทั้งหมด (c) ที่สถานีนครปฐม.....	78
3.36 กราฟแสดงค่า MSE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการคำนวณ diffuse illuminance บน ระนาบแนวตั้ง ทิศเหนือ (a) ทิศใต้ (b) ทิศตะวันออก (c) ทิศตะวันตก (d) และ ระนาบเอียง 45 องศา ทิศเหนือ (e) ทิศใต้ (f) ที่สถานีนครปฐม.....	79

รูปที่	หน้า
3.37 กราฟแสดงค่า MSE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการคำนวณ diffuse illuminance บน ระนาบเอียง 45 องศา ทิศตะวันออก (a) ทิศตะวันตก (b) และระนาบเอียงทั้งหมด (c) ที่สถานีนครปฐม.....	80
3.38 แสดงแผนภาพวิธีการหา diffuse illuminance บนพื้นเอียง.....	86
3.39 แสดงตำแหน่งของ sky element เทียบกับตำแหน่งของพื้นเอียง.....	87
3.40 แสดงการแบ่งท้องฟ้าออก 145 เซลล์พื้นที่เท่าๆ กัน ตามรูปแบบการวัดของ เครื่อง Sky scanner.....	89
3.41 แสดงตำแหน่งดวงอาทิตย์ และตำแหน่งบนท้องฟ้า (P) ที่จะหาปริมาณแสงสว่าง โดย Z เป็นมุมเซนนิซของจุดที่พิจารณา Z_s เป็นมุมเซนนิซของดวงอาทิตย์ χ เป็นมุม ระหว่างจุดบนท้องฟ้าที่พิจารณากับตำแหน่งดวงอาทิตย์ ϕ เป็นมุมอาซิมุทของ จุดที่พิจารณา γ_s เป็นมุมอาซิมุทของดวงอาทิตย์.....	91
3.42 ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมใน satellite projection.....	94
3.43 ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมใน cylindrical projection ซึ่งหาพิกัดแล้ว.....	95
3.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า grey level และ Pseudo-reflectivity ของข้อมูล ภาพถ่ายดาวเทียม.....	96
3.45 แสดงการพิกตรูปภาพเทอม NR เทียบกับมุมเซนนิซของดวงอาทิตย์ ในกรณีพื้นราบและระนาบ แนวตั้ง 90 องศา.....	99
3.46 แสดงการพิกตรูปภาพค่า NR กรณีระนาบแนวตั้ง ทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก และทิศ ตะวันตก เทียบกับกับมุมเซนนิซดวงอาทิตย์.....	100
3.47 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance บนพื้นราบจากการคำนวณ โดยการ อินทิเกรตกับค่าวัดจริงของสถานี เชียงใหม่ (a) อุบลราชธานี (b) สงขลา (c).....	103
3.48 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงจากการคำนวณกับค่าจากการวัด ของสถานีเชียงใหม่.....	105
3.49 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงจากการคำนวณกับค่าจากการวัด ของสถานีอุบลราชธานี.....	107
3.50 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงจากการคำนวณกับค่าจากการวัด ของสถานีสงขลา.....	109
3.51 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงทั้งหมด จากการคำนวณ กับค่าจากการวัดของพื้นเอียงทั้งหมด ที่สถานีเชียงใหม่.....	110

รูปที่	หน้า
3.52 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงทั้งหมด จากการคำนวณ กับค่าจากวัดของพื้นเอียงทั้งหมด ที่สถานีอุบลราชธานี.....	110
3.53 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงทั้งหมด จากการคำนวณ กับค่าจากการวัดของพื้นเอียงทั้งหมดที่สถานีสงขลา.....	111
3.54 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance บนพื้นราบจากการคำนวณ กับค่าจากการวัดของทั้ง 3 สถานี.....	111
3.55 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้ง จากการคำนวณกับค่าจากการวัดของทั้ง 3 สถานี.....	112
3.56 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance บนระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ จากการคำนวณกับค่าจากการวัดของทั้ง 3 สถานี.....	112
3.57 กราฟแสดง global illuminance รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเชียงใหม่.....	115
3.58 กราฟแสดง global illuminance รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีอุบลราชธานี.....	116
3.59 กราฟแสดง global illuminance รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนครปฐม.....	117
3.60 กราฟแสดง global illuminance รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสงขลา.....	118
3.61 กราฟแสดง diffuse illuminance รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเชียงใหม่.....	120
3.62 กราฟแสดง diffuse illuminance รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีอุบลราชธานี.....	121
3.63 กราฟแสดง diffuse illuminance รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนครปฐม.....	122
3.64 กราฟแสดง diffuse illuminance รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสงขลา.....	123
3.65 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า global illuminance ตามฤดูกาลในรอบปี ของสถานีเชียงใหม่.....	124
3.66 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า global illuminance ตามฤดูกาลในรอบปี ของสถานีอุบลราชธานี.....	125
3.67 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า global illuminance ตามฤดูกาลในรอบปี ของสถานีนครปฐม.....	125
3.68 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า global illuminance ตามฤดูกาลในรอบปี ของสถานีสงขลา.....	126
3.69 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า diffuse illuminance ตามฤดูกาลในรอบปี ของสถานีเชียงใหม่.....	127

รูปที่	หน้า
3.70 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า diffuse illuminance ตามฤดูกาลในรอบปี ของสถานีอุบลราชธานี.....	127
3.71 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า diffuse illuminance ตามฤดูกาลในรอบปี ของสถานีนครปฐม.....	128
3.72 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า diffuse illuminance ตามฤดูกาลในรอบปี ของสถานีสงขลา.....	128
3.73 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า global illuminance รายวันของเดือนต่างๆ ของสถานี เชียงใหม่.....	130
3.74 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า global illuminance รายวันของเดือนต่างๆ ของสถานี อุบลราชธานี.....	131
3.75 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า global illuminance รายวันของเดือนต่างๆ ของสถานี นครปฐม.....	132
3.76 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า global illuminance รายวันของเดือนต่างๆ ของสถานี สงขลา.....	133
3.77 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า global illuminance ตลอดทั้งปี จากข้อมูลสถานีเชียงใหม่ ในช่วงปี ค.ศ. 2001-2008.....	134
3.78 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า global illuminance ตลอดทั้งปี จากข้อมูลสถานีอุบลราชธานี ในช่วงปี ค.ศ. 2001-2008.....	134
3.79 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า global illuminance ตลอดทั้งปี จากข้อมูลสถานีนครปฐม ในช่วงปี ค.ศ. 2001-2008.....	135
3.80 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า global illuminance ตลอดทั้งปี จากข้อมูลสถานีสงขลา ในช่วงปี ค.ศ. 2001-2008.....	135
3.81 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า diffuse illuminance รายวันของเดือนต่างๆ ของสถานี เชียงใหม่.....	137
3.82 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า diffuse illuminance รายวันของเดือนต่างๆ ของสถานี อุบลราชธานี.....	138
3.83 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า diffuse illuminance รายวันของเดือนต่างๆ ของสถานี นครปฐม.....	139

รูปที่	หน้า
3.84 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า diffuse illuminance รายวันของเดือนต่างๆ ของสถานี สงขลา.....	140
3.85 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า diffuse illuminance ตลอดทั้งปี จากข้อมูลสถานีเชียงใหม่ ในช่วงปี ค.ศ. 2001-2008.....	141
3.86 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า diffuse illuminance ตลอดทั้งปี จากข้อมูลสถานี อุบลราชธานีในช่วงปี ค.ศ. 2001-2008.....	141
3.87 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า diffuse illuminance ตลอดทั้งปี จากข้อมูลสถานีนครปฐม ในช่วงปี ค.ศ. 2001-2008.....	142
3.88 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า diffuse illuminance ตลอดทั้งปี จากข้อมูลสถานีสงขลา ในช่วงปี ค.ศ. 2001-2008.....	142

สัญลักษณ์

A	=	พื้นที่ (m^2)
b	=	radiance distribution index (-)
E	=	illuminance (lux)
E_{bh}	=	direct illuminance บนพื้นราบ (klux)
E_{dh}	=	diffuse illuminance บนพื้นราบ (klux)
E_{gh}	=	global illuminance บนพื้นราบ (klux)
$E_{b\beta}$	=	direct illuminance บนพื้นเอียง β (klux)
$E_{d\beta}$	=	diffuse illuminance บนพื้นเอียง β (klux)
$E_{g\beta}$	=	global illuminance บนพื้นเอียง β (klux)
E_{on}	=	ความเข้มแสงสว่างนอกบรรยากาศโลกที่ระนาบตั้งฉากกับทิศทางที่แสงตกกระทบ (lux)
E_{sc}	=	ความเข้มแสงสว่างนอกบรรยากาศโลกที่ระนาบตั้งฉากกับทิศทางที่แสงตกกระทบที่ระยะทางเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (lux)
$E_{d,model,i}$	=	ค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงที่คำนวณจากแบบจำลอง (klux)
$E_{d,meas,i}$	=	ค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด (klux)
$\bar{E}_{d,meas}$	=	ค่าเฉลี่ยของ diffuse illuminance บนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด (klux)
$G_{S\lambda}$	=	ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ บนระนาบตั้งฉากกับแสงที่ระยะเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ ($W/m^2 - \mu m$)
I_{bh}	=	รังสีตรงบนพื้นราบ (W/m^2)
I_{dh}	=	รังสีกระจายบนพื้นราบ (W/m^2)
I_{gh}	=	รังสีรวมบนพื้นราบ (W/m^2)
I_{oh}	=	รังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกบนพื้นราบ (W/m^2)
I_{on}	=	รังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกบนระนาบตั้งฉากกับลำแสง (W/m^2)
I_{gT}	=	รังสีรวมบนพื้นเอียง (W/m^2)
I_{bT}	=	รังสีตรงบนพื้นเอียง (W/m^2)
$I_{dT,g}$	=	รังสีกระจายบนพื้นเอียงจากพื้นดิน (W/m^2)
$I_{dT,sky}$	=	รังสีกระจายบนพื้นเอียงจากท้องฟ้า (W/m^2)

I_{bh}	=	รังสีตรงบนพื้นราบ (W/m^2)
m_a	=	air mass (-)
M	=	luminous exitance (lux)
L	=	ปริมาณแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า (sky element) (KCd/m^2)
L_z	=	ปริมาณแสงสว่างธรรมชาติที่ตำแหน่งกลางท้องฟ้า (zenith luminance) (KCd/m^2)
NR	=	normalization ratio
R_b	=	geometric factor
R_λ	=	ฟังก์ชันการตอบสนองของสายตามนุษย์ต่อความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ (-)
T_F	=	Tilt factor (-)
Z	=	มุมเซนนิธของตำแหน่งบนท้องฟ้า (sky element) (เรเดียน)
Z_s	=	มุมเซนนิธของตำแหน่งดวงอาทิตย์ (เรเดียน)
β	=	มุมเอียงของพื้นเอียง (องศา)
α_s	=	มุมเงยของดวงอาทิตย์ (องศา)
α	=	มุมเงยของ sky element (องศา)
γ	=	มุมอาซิมุทของพื้นเอียง (องศา)
γ_s	=	มุมอาซิมุทของดวงอาทิตย์ (องศา)
φ	=	ละติจูด (องศา)
ϕ	=	มุมอะซิมุทของ sky element (องศา)
σ	=	มุมตกกระทบของ sky element บนพื้นเอียง (องศา)
χ	=	ระยะเชิงมุมระหว่างตำแหน่งบนท้องฟ้ากับตำแหน่งดวงอาทิตย์ (เรเดียน)
ω	=	มุมชั่วโมง (องศา)
δ	=	เดคลิเนชัน (องศา)
Δ	=	sky brightness (-)
ε	=	sky clearness (-)
θ_i	=	มุมตกกระทบของรังสีตรงบนพื้นเอียง (องศา)
ϕ_E	=	ฟลักซ์ของแสงสว่าง (W)
Ω	=	มุมตันที่รองรับพื้นที่ของ sky element (สเตอเรเดียน)

ρ'_{EA} = สัมประสิทธิ์การสะท้อนของบรรยากาศและพื้นผิวโลกในช่วงความยาวคลื่นของดาวเทียม (0.55-0.90 μm) (-)

ρ'_{pseu} = Pseudo-reflectivity (-)

บทที่ 1

บทนำ

1. ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

ในปัจจุบันการใช้ไฟฟ้าเพื่อให้แสงสว่างในประเทศไทยคิดเป็นสัดส่วนประมาณ 15% ของการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเติบโตของสังคมเมืองและการพัฒนาทางอุตสาหกรรม โดยทั่วไปอาคารสำนักงานและโรงงานอุตสาหกรรมจะเปิดไฟให้แสงสว่างตลอดทั้งวัน นอกจากนี้การใช้ไฟฟ้าแสงสว่างยังมีแนวโน้มสูงขึ้นตามการขยายตัวของเศรษฐกิจ ทำให้ต้องเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าซึ่งต้องใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (fossil fuel) มากขึ้นและยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าววิธีหนึ่งคือ นำแสงสว่างธรรมชาติจากดวงอาทิตย์มาใช้ในอาคาร เพื่อลดการใช้ไฟฟ้าแสงสว่างในเวลากลางวัน

โดยทั่วไปรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกจะมีสเปกตรัมอยู่ในช่วง $0.25-4.0 \mu\text{m}$ แต่สายตามนุษย์สามารถใช้ประโยชน์ในรูปแบบแสงสว่างได้เฉพาะในช่วงความยาวคลื่น $0.38-0.77 \mu\text{m}$ โดยเรียกความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่สายตามนุษย์สามารถตอบสนองได้ว่าแสงสว่างธรรมชาติ (daylight) ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ แสงที่พุ่งตรงมาจากดวงอาทิตย์ (sunlight) และแสงที่ถูกกระเจิงโดยองค์ประกอบของบรรยากาศ ซึ่งมาจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า (skylight) ในการนำแสงสว่างธรรมชาติมาใช้ในอาคาร ผู้ออกแบบอาคารจะต้องทราบข้อมูล sunlight และ skylight โดยในปัจจุบันได้มีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณแสงสว่างที่เข้าไปภายในอาคารโดยอาศัยข้อมูล sunlight และ skylight นอกอาคาร ข้อมูลความเข้มแสงสว่างธรรมชาติภายในอาคารที่คำนวณได้จะช่วยให้ออกแบบอาคารสามารถคำนวณและกำหนดมาตรการของการใช้แสงประดิษฐ์ (artificial light) ร่วมกับการใช้แสงสว่างธรรมชาติที่เหมาะสม เพื่อลดการใช้แสงสว่างจากไฟฟ้า

โดยทั่วไปข้อมูลปริมาณแสงสว่างธรรมชาติจะมีการวัดอยู่ 2 รูปแบบ คือ ปริมาณแสงสว่างที่ตกกระทบบนระนาบใดๆ (illuminance) และปริมาณแสงสว่างจากส่วนต่างๆของท้องฟ้า (sky luminance) โดยปริมาณแสงสว่างในรูปแบบ sky luminance นั้นจะมีข้อมูลการวัดที่น้อยมาก เนื่องจากเครื่องมือวัดมีราคาแพง ส่วนปริมาณแสงสว่างธรรมชาติในรูปแบบ illuminance นั้นจะมีข้อมูลการวัดมากกว่า ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นข้อมูลการวัดบนพื้นราบ แต่ในการใช้งานจริง มักมีความต้องการข้อมูลแสงสว่างธรรมชาติบนระนาบเอียงต่างๆ เช่น ที่ระนาบเอียง 90 องศา ซึ่งเป็นระนาบของช่องหน้าต่างตามอาคาร โดยทั่วไปปริมาณแสงสว่างธรรมชาติบนพื้นเอียงในรูปแบบ illuminance จะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ แสงตรง (direct

illuminance) แสงกระจายจากท้องฟ้า (diffuse illuminance) และแสงที่สะท้อนจากพื้นดิน (ground reflected) โดยปริมาณ direct illuminance บนพื้นเอียง สามารถคำนวณได้โดยง่ายเหมือนการแตกแรง ส่วนปริมาณแสงที่สะท้อนจากพื้นก็สามารถคำนวณได้เมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นดิน ความยุ่งยากของการคำนวณปริมาณแสงสว่างธรรมชาติบนพื้นเอียงจะอยู่ในส่วนของการคำนวณปริมาณ diffuse illuminance ในช่วง 20 ปี ที่ผ่านมามีนักวิจัยในประเทศต่างๆ ได้เสนอแบบจำลองสำหรับคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงจากข้อมูลการวัดบนพื้นราบขึ้นหลายแบบ โดยแบบจำลองดังกล่าวส่วนใหญ่พัฒนาจากข้อมูลการวัดในแถบทวีปยุโรปและอเมริกาเหนือ ซึ่งมีสภาพภูมิอากาศและทางเดินของดวงอาทิตย์ที่แตกต่างจากประเทศไทย และแบบจำลองแต่ละแบบก็ยังคงใช้สมมติฐานเกี่ยวกับแสงกระจายจากท้องฟ้า (skylight) ที่ต่างกัน ดังนั้น การนำแบบจำลองมาใช้งานจึงควรมีการทดสอบสมรรถนะของแต่ละแบบจำลองด้วยข้อมูลการวัด เพื่อพิจารณาหาแบบจำลองที่เหมาะสมกับการใช้งานในสภาพภูมิอากาศแบบประเทศไทย

นอกจากนี้ การคำนวณปริมาณแสงสว่างธรรมชาติในรูป diffuse illuminance บนพื้นเอียงสามารถทำได้โดยการอินทิเกรตปริมาณแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า (sky luminance) ตลอดทั้งทรงกลมท้องฟ้าที่อยู่เหนือพื้นเอียงที่พิจารณา ผลที่ได้จะทำให้ทราบปริมาณแสงสว่างในรูป diffuse illuminance ที่ตกกระทบบนพื้นเอียงนั้น

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงเสนอที่จะศึกษาและทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองสำหรับคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงแบบต่างๆ เพื่อพิจารณาแบบจำลองที่เหมาะสมกับการใช้งานในสภาพภูมิอากาศแบบประเทศไทย นอกจากนี้จะทำการคำนวณปริมาณแสงสว่างธรรมชาติในรูป diffuse illuminance บนพื้นเอียง ด้วยวิธีการอินทิเกรตค่า sky luminance จากแบบจำลองแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า (sky luminance model) ที่ใช้ภาพถ่ายดาวเทียมในการจำแนกสภาพท้องฟ้า เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านการใช้แสงสว่างธรรมชาติเพื่อประหยัดพลังงานต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองสำหรับคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงที่นักวิจัยต่างๆ พัฒนาขึ้น
- 2) เพื่อพัฒนาวิธีการคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียง โดยใช้แบบจำลอง sky luminance ที่ใช้ภาพถ่ายดาวเทียมในการจำแนกสภาพท้องฟ้า

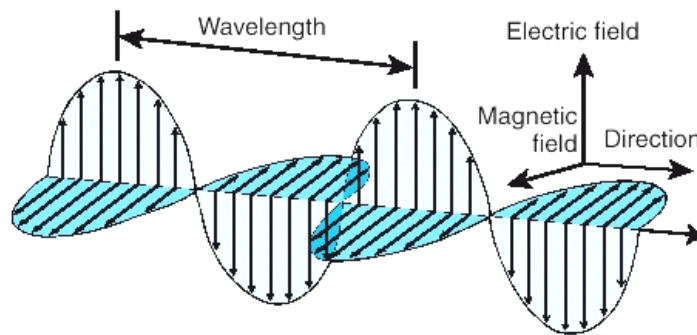
บทที่ 2

หลักทฤษฎีและการงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับแสงสว่างธรรมชาติ จำเป็นต้องมีพื้นฐานความรู้เกี่ยวกับแสงสว่างทั่วไปซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะกล่าวในรายละเอียดดังนี้

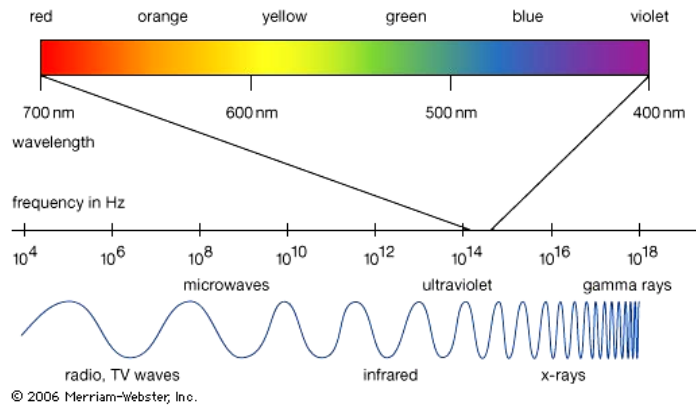
2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นคลื่นตามขวางที่ประกอบด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าตั้งฉากกัน และเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ตั้งฉากกับทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า โดยมีความเร็วในสุญญากาศเท่ากับ 3×10^8 m/s



รูปที่ 2.1 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ

ในกรณีทั่วไป คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีคุณสมบัติซึ่งสามารถทำนายหรืออธิบายได้ด้วยสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) โดยคุณสมบัติที่สำคัญได้แก่ การหักเห การสะท้อน การเลี้ยวเบน และการแทรกสอด สำหรับกรณีของปรากฏการณ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระดับอะตอมจะต้องพิจารณาว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นอนุภาค แล้วต้องใช้ทฤษฎีควอนตัมในการอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความยาวคลื่นไม่จำกัด โดยสามารถพบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ตั้งแต่รังสีแกมมา รังสีเอ็กซ์ รังสีอัลตราไวโอเล็ต แสงสว่าง และคลื่นวิทยุ (ดังรูปที่ 2.2)

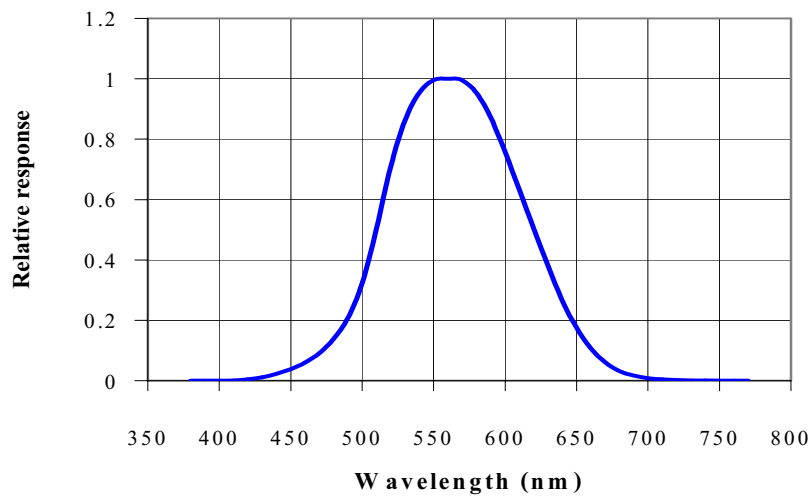


รูปที่ 2.2 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความยาวคลื่นช่วงต่างๆ

2.2 แสงสว่าง (visible light)

2.2.1 การตอบสนองของสายตามนุษย์

แสงสว่างเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่น 0.38-0.77 μm ซึ่งสามารถรับรู้ได้ด้วยสายตาของมนุษย์ โดยทั่วไป ตาของมนุษย์จะตอบสนองต่อแสงสว่างที่ความยาวคลื่นต่างๆ ไม่เท่ากัน โดยจะตอบสนองแสงสีเขียวได้ดีกว่าสีแดงหรือสีม่วง โดย International Commission of Illumination (Centre International d' Eclairage, CIE) ได้กำหนดมาตรฐานการตอบสนองของสายตามนุษย์ในสภาพแสงปกติ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการตอบสนองของสายตามนุษย์ตามมาตรฐานของ CIE (Murdoch, 1985)

2.2.2 ปริมาณแสงสว่าง

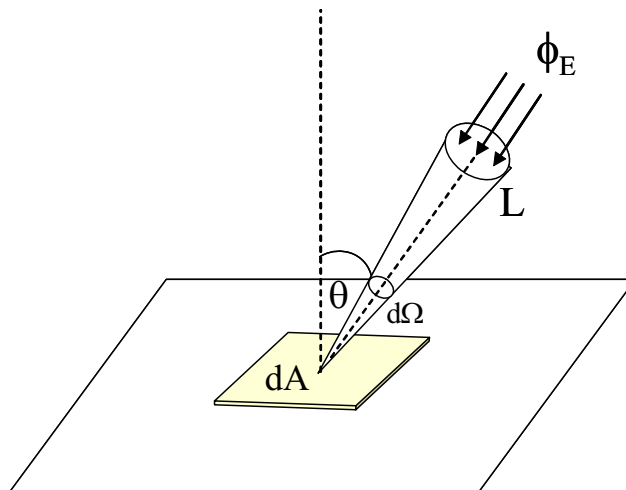
แสงสว่างโดยทั่วไปซึ่งรวมถึงแสงสว่างธรรมชาติจะมีการกำหนดศัพท์ทางเทคนิค ซึ่งใช้ในการบอกปริมาณต่าง ๆ ดังนี้

ก) ฟลักซ์ (flux) โดยทั่วไปฟลักซ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นอัตราการไหลของพลังงาน ซึ่งมีหน่วยเป็นพลังงานต่อหนึ่งหน่วยเวลา (J/s หรือ Watt) เมื่อฟลักซ์ของแสงสว่างตกกระทบประสาทตาของมนุษย์ ประสาทตาของมนุษย์จะรับรู้ในรูปของฟลักซ์ของแสงสว่างในหน่วยลูเมน (lumen) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับฟลักซ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เข้ามา ดังนี้

$$683 \text{ lumen} = 1 \text{ W} \quad \text{ที่ความยาวคลื่น } 555 \text{ นาโนเมตร}$$

ฟลักซ์ของแสงสว่างอาจเป็นฟลักซ์ที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงหรือที่ตกกระทบพื้นที่ต่างๆ หรือเป็นฟลักซ์ของแสงสว่างที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางต่าง ๆ

ข) Luminance เป็นฟลักซ์ของแสงสว่างที่พุ่งเข้าหรือพุ่งออกจากจุดบนพื้นที่ตั้งฉากกับทางเดินแสงหนึ่งหน่วย ในกรวยแคบ ๆ ซึ่งมีมุมตัน 1 สเตอเรเดียน (steradian) หรือแสดงดังรูปที่ 2.4 และเขียนในรูปสมการได้ดังสมการที่ 2.1



รูปที่ 2.4 แสดงการให้คำจำกัดความของ luminance

$$L = \frac{d^2\phi_E}{dA \cos \theta d\Omega} \quad (2.1)$$

เมื่อ

L = ลูมิแนนซ์ (cd/m^2)

ϕ_E = ฟลักซ์ของแสงสว่าง (W)

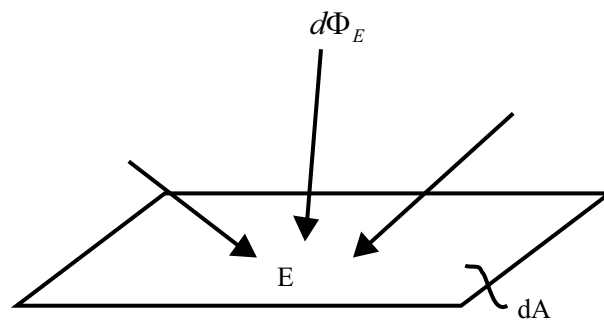
Ω = มุมตัน (steradian)

A = พื้นที่ (m^2)

θ = มุมระหว่างเส้นตั้งฉากของพื้นราบกับทิศที่แสงเดินทาง (องศา)

luminance มีหน่วยเป็น $\text{lumen}/\text{sr}\cdot\text{m}^2$ หรือมีหน่วยอีกอย่างหนึ่งว่า $\text{Candela}/\text{m}^2$ โดยแสงจากท้องฟ้าในกรณีที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ $10\text{-}12 \text{ kCd}/\text{m}^2$ สำหรับแสงตรงจากดวงอาทิตย์จะมีค่าลูมิแนนซ์ได้สูงถึง $20\text{-}50 \text{ kCd}/\text{m}^2$

ค) Illuminance เป็นปริมาณของฟลักซ์แสงสว่างที่ตกกระทบต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยมีหน่วยเป็น lumen/m^2 ซึ่งมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ลักซ์ (lux) แสดงดังรูปที่ 2.5 หรือเขียนได้ดังสมการที่ 2.2



รูปที่ 2.5 แสดงการให้คำจำกัดความของ illuminance

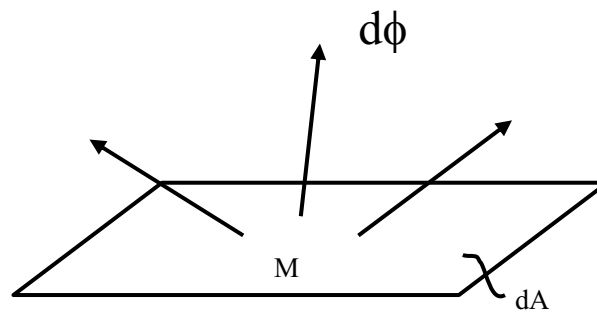
$$E = \frac{d\phi_E}{dA} \quad (2.2)$$

เมื่อ

E = illuminance (lux)

 ϕ_E = ฟลักซ์ของแสงสว่าง (W)A = พื้นที่ (m^2)

ง) Luminous exitance เป็นปริมาณแสงสว่างที่คล้ายกับ illuminance แต่จะคิดในกรณีที่แสงพุ่งออกจากพื้นที่ จากการสะท้อนหรือจากการแผ่ออกมาของแสงสว่างจากพื้นที่นั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 หรือเขียนได้ดังสมการที่ 2.3



รูปที่ 2.6 แสดงการให้คำจำกัดความของ luminous exitance

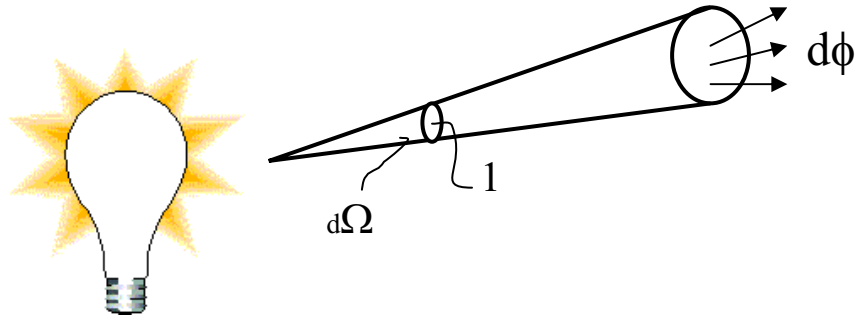
$$M = \frac{d\phi_E}{dA} \quad (2.3)$$

เมื่อ

M = luminous exitance (lux)

 ϕ_E = ฟลักซ์ของแสงสว่าง (W)A = พื้นที่ (m^2)

จ) Luminous intensity เป็นปริมาณแสงสว่างที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งบอกในรูปของฟลักซ์ของแสงสว่างที่เปล่งออกมาจากแหล่งกำเนิดในกรวยแคบๆ หนึ่งหน่วยมุมตัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 หรือเขียนได้ดังสมการที่ 2.4



รูปที่ 2.7 แสดงการให้คำจำกัดความของ luminous intensity

$$I_E = \frac{d\phi_E}{d\Omega} \quad (2.4)$$

เมื่อ

I_E = luminous intensity (lumen/steradian)

ϕ_E = ฟลักซ์ของแสงสว่าง (W)

Ω = มุมตัน (steradian)

โดย luminous intensity มีหน่วยเป็น lumen/steradian

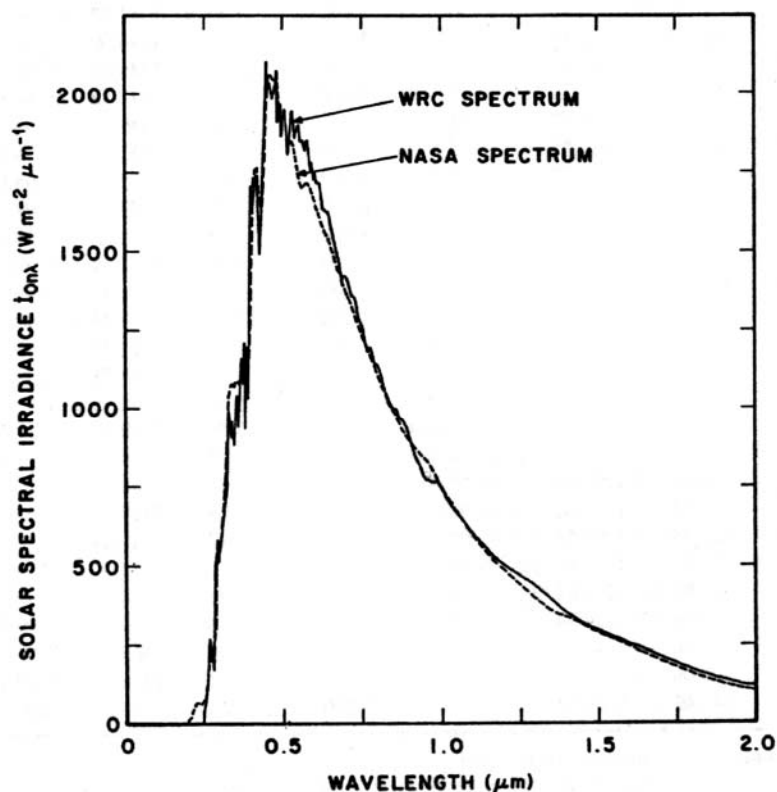
2.3 แสงสว่างธรรมชาติ (daylight)

2.3.1 แหล่งกำเนิดของแสงสว่างธรรมชาติ

ดวงอาทิตย์ส่งพลังงานออกมาสู่อวกาศโดยรอบในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความยาวคลื่นตั้งแต่รังสีแกมมาจนถึงคลื่นวิทยุ เมื่อผ่านบรรยากาศของโลกจะถูกโมเลกุลของอากาศ ฝุ่น ละอองและเมฆดูดกลืน และกระเจิง โดยส่วนที่ตกกระทบพื้นผิวโลกจะเหลือเฉพาะรังสีอุลตราไวโอ-

เขต แสงสว่าง และรังสีอินฟราเรด ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.29-4.0 μm (Iqbal, 1983) ดังแสดงในรูปที่ 2.8

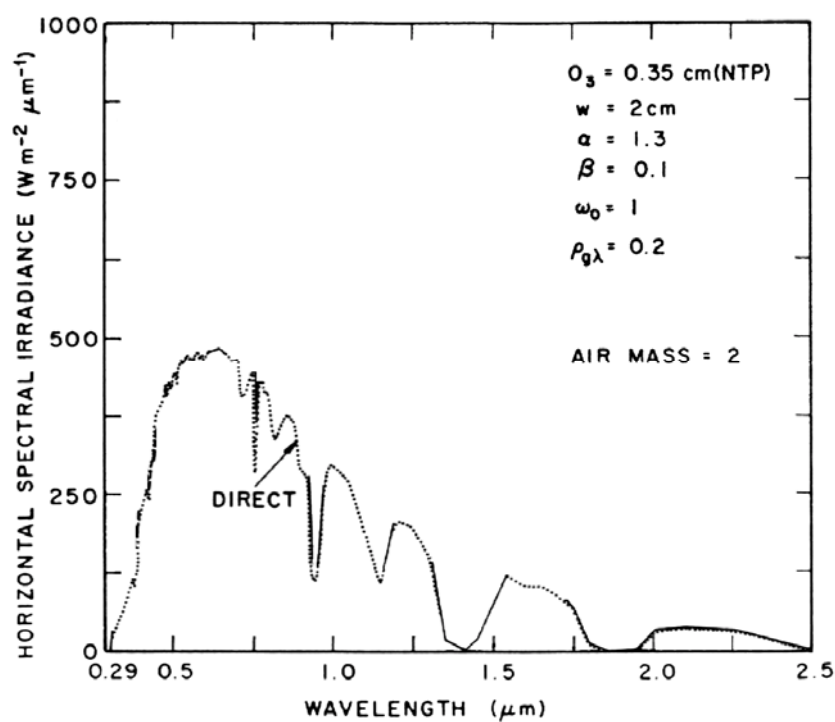
สเปกตรัมรังสีดวงอาทิตย์ที่มาถึงพื้นผิวโลกนี้ มีเฉพาะบางส่วนเท่านั้นที่สายตาคมมนุษย์สามารถรับรู้ได้ในรูปของแสงสว่าง คือ ในช่วงความยาวคลื่น 0.38-0.77 μm โดยประสาทตาจะตอบสนองต่อความยาวคลื่นต่างๆ ไม่เท่ากันกล่าวคือจะตอบสนองช่วงความยาวคลื่นของแสงสีเขียวได้ดีกว่าช่วงความยาวคลื่นของแสงสีแดงและสีน้ำเงิน



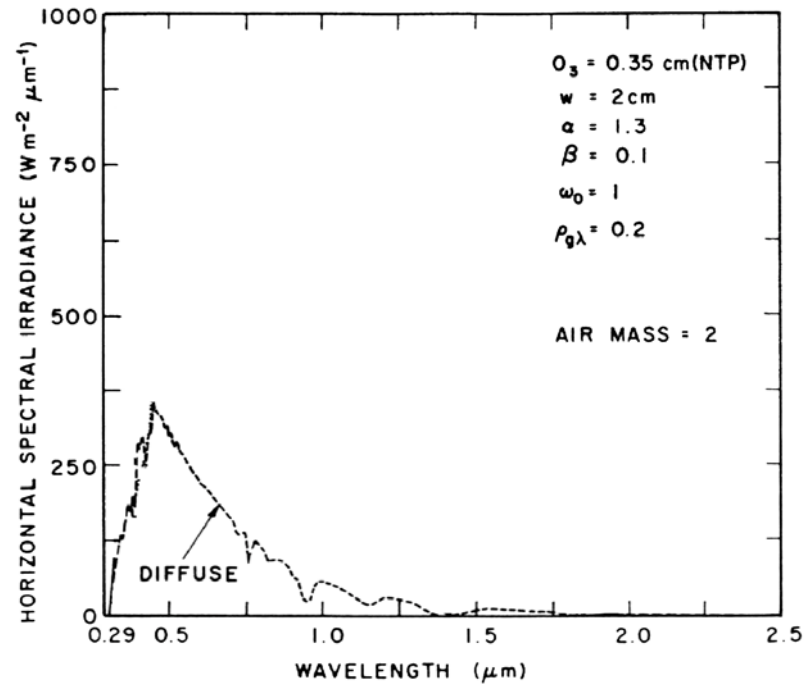
รูปที่ 2.8 แสดงสเปกตรัมของรังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (Iqbal, 1983)

เมื่อรังสีดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่านบรรยากาศมายังพื้นผิวโลกจะถูก โมเลกุลอากาศ ฝุ่น ละออง (aerosol) และเมฆดูดกลืน (absorb) และกระเจิง (scatter) ส่วนที่ถูกกระเจิงจะทำให้เกิดรังสีกระจาย (diffuse radiation) และส่วนที่เหลือพุ่งตรงมายังผู้สังเกตจะเรียกว่า รังสีตรง (direct radiation)

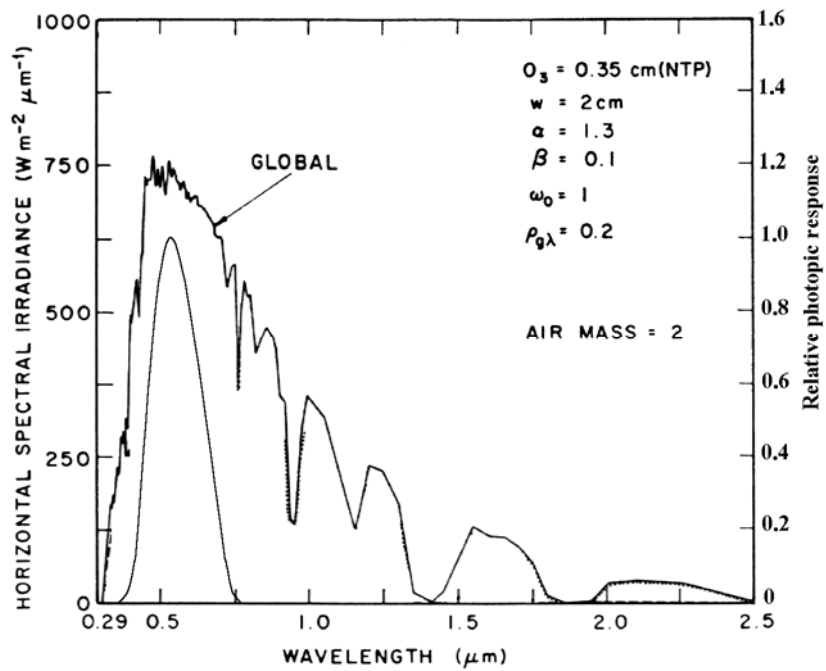
ผลรวมของรังสีทั้งสองจะเรียกว่า รังสีรวม (global radiation) สเปกตรัมของรังสีตรง รังสีกระจาย และ รังสีรวม ในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของบรรยากาศที่สำคัญ ได้แก่ โอโซน (ozone) ไอน้ำ ฝุ่นละออง และก๊าซต่าง ๆ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับมวลอากาศ (air mass) ที่รังสีดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่าน ตัวอย่างของสเปกตรัมรังสีตรง รังสีกระจายและรังสีรวม แสดงดังรูปที่ 2.9–2.11



รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมรังสีตรง (Iqbal, 1983)

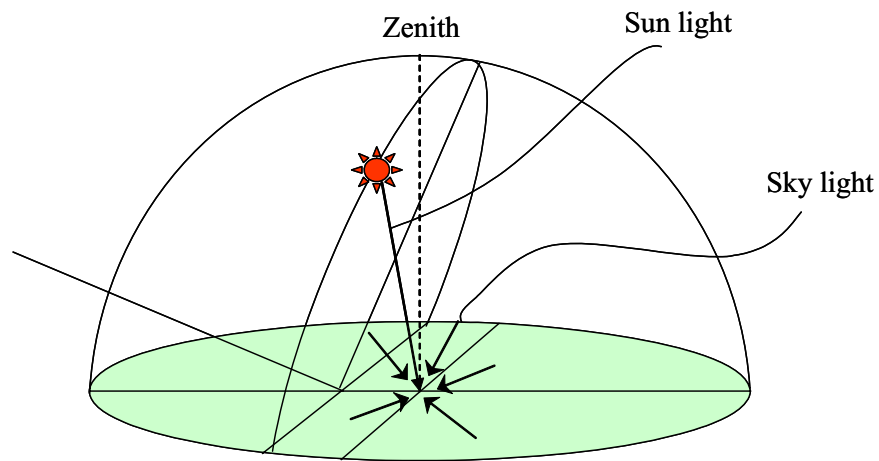


รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมรังสีกระจาย (Iqbal, 1983)



รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมรังสีรวม (Iqbal, 1983)

ส่วนของสเปกตรัมรังสีดวงอาทิตย์ที่สายตามนุษย์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จะเรียกว่าแสงสว่างธรรมชาติ (daylight) ซึ่งประกอบด้วยสองส่วน ได้แก่ แสงตรงจากดวงอาทิตย์ (sunlight) และแสงกระจายจากท้องฟ้า (skylight) ซึ่งมีความยาวคลื่นในช่วง $0.38\text{-}0.77\ \mu\text{m}$ โดยแสงตรงจากดวงอาทิตย์จะเป็นส่วนของรังสีดวงอาทิตย์ที่พุ่งตรงจากดวงอาทิตย์ผ่านบรรยากาศของโลกมายังตำแหน่งที่พิจารณา ส่วนแสงกระจายจากท้องฟ้าจะเป็นแสงที่เกิดจากการกระเจิง (scattering) ของแสงตรงจากดวงอาทิตย์โดยโมเลกุลของอากาศ ฝุ่นละออง และเมฆ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



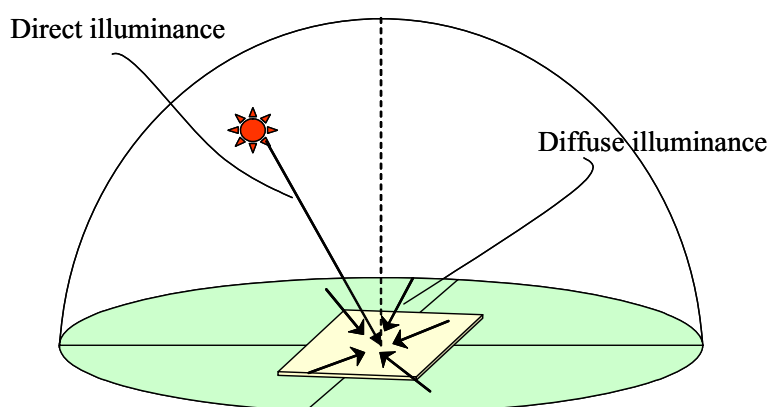
รูปที่ 2.12 แสดงแสงตรงจากดวงอาทิตย์ (sunlight) และแสงกระจายจากท้องฟ้า (skylight)

เมื่อแสงตรงจากดวงอาทิตย์และแสงกระจายจากท้องฟ้าตกกระทบพื้นดิน ต้นไม้ และสิ่งปลูกสร้างต่างๆ จะมีการสะท้อน ซึ่งแสงสว่างส่วนนี้ยังคงเป็นแสงสว่างธรรมชาติอีกส่วนหนึ่งซึ่งเรียกว่า แสงสว่างธรรมชาติ ซึ่งสะท้อนจากพื้นผิวโลก

2.3.2 ปริมาณแสงสว่างธรรมชาติ

ก) Direct Illuminance และ Diffuse Illuminance

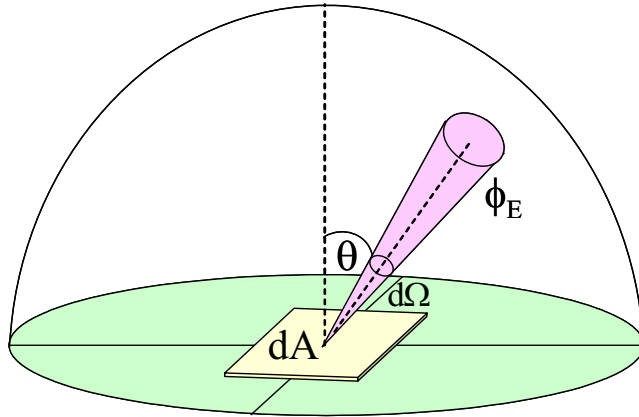
เป็นปริมาณของแสงสว่างธรรมชาติในรูปของฟลักซ์แสงสว่างจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่หนึ่งหน่วย ถ้าเป็นฟลักซ์ของแสงตรงจากดวงอาทิตย์ จะเรียกว่า direct illuminance หรือ beam illuminance กรณีที่เป็นฟลักซ์ของแสงกระจายจากท้องฟ้า จะเรียกว่า diffuse illuminance และเรียกผลรวมว่า global illuminance ดังแสดงในแผนภูมิรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงความเข้มของแสงสว่างธรรมชาติในรูปของ direct illuminance และ diffuse illuminance

ข) sky luminance

เมื่อรังสีดวงอาทิตย์เดินทางผ่านบรรยากาศของโลกจะถูกกระเจิงโดยโมเลกุลของอากาศ ฝุ่นละออง และเมฆ เกิดเป็นรังสีกระจาย ซึ่งสายตามนุษย์รับรู้ได้ในรูปของความเข้มของแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า หรือ sky luminance ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงความเข้มของแสงสว่างธรรมชาติในรูปของความเข้มของแสงสว่างจากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า หรือ sky luminance

โดยทั่วไปที่สภาพท้องฟ้าแบบหนึ่งและดวงอาทิตย์อยู่ ณ ตำแหน่งหนึ่ง ค่าความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า จะมีค่าขึ้นอยู่กับระยะห่างเชิงมุม (angular distance) จากจุดๆ นั้น กับดวงอาทิตย์ และมุมเซนนิธของจุดๆ นั้น (Kittler, 1967)

2.3.3 การหาค่าปริมาณแสงสว่างธรรมชาติ

ก) แสงสว่างธรรมชาตินอกบรรยากาศโลก

โดยทั่วไปแสงสว่างธรรมชาตินอกบรรยากาศโลกสามารถหาได้โดยการคำนวณ ทั้งนี้เพราะในปัจจุบันเราทราบค่าสเปกตรัมของรังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกและค่า response ของสายตามนุษย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ได้้อย่างละเอียด จากปริมาณทั้งสองจะสามารถหาความเข้มแสงสว่างธรรมชาติในรูปของ illuminance บนระนาบตั้งฉากกับลำแสงจากดวงอาทิตย์ที่ระยะเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ โดยอาศัยสมการ

$$\bar{E}_{on} = k \int_{0.38}^{0.77} G_{s\lambda} R_{\lambda} d\lambda \tag{2.5}$$

เมื่อ \bar{E}_{on} = illuminance ของแสงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกที่ระนาบตั้งฉากกับแสงจากดวงอาทิตย์ (lux)

$$G_{s\lambda} = \text{ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ บนระนาบตั้งฉากกับแสงที่}$$

$$\text{ระยะเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (W/m}^2 \cdot \mu\text{m)}$$

$$R_{\lambda} = \text{ฟังก์ชันการตอบสนองของสายตามนุษย์ต่อความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ความ}$$

$$\text{ยาวคลื่นต่างๆ (-)}$$

$$k = \text{maximum luminous efficacy (683 lm/W)}$$

เมื่อแทนค่า $G_{s\lambda}$ และ R_{λ} ลงในสมการที่ 2.5 จะได้ \bar{E}_{on} ดังสมการ

$$\bar{E}_{on} = 127.5 \quad (\text{klux}) \quad (2.6)$$

ค่า \bar{E}_{on} ที่ได้นี้เทียบกับค่า solar constant (1367 W/m^2) ซึ่งใช้ในการคำนวณความเข้มรังสีดวงอาทิตย์

ข) แสงสว่างธรรมชาติที่พื้นผิวโลก

ดังที่กล่าวไปแล้วว่าแสงสว่างธรรมชาติที่พื้นผิวโลกประกอบด้วย แสงสว่างธรรมชาติที่พุ่งตรงมาจากดวงอาทิตย์ที่เรียกว่า beam illuminance และแสงที่กระเจิง (scatter) มาจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้าเรียกว่า diffuse illuminance การหาปริมาณทั้งสองในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆสามารถคำนวณได้ แต่ในการคำนวณปริมาณดังกล่าวจำเป็นต้องทราบองค์ประกอบต่างๆ ของบรรยากาศที่สำคัญได้แก่ ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (precipitable water) และปริมาณฝุ่นละออง (aerosols)

สำหรับกรณีท้องฟ้ามีเมฆ การคำนวณค่า illuminance โดยอาศัยข้อมูลภาคพื้นดินทำได้ยากทั้งนี้เพราะเมฆเป็นตัวแปรที่สำคัญซึ่งมีผลต่อปริมาณแสงสว่างธรรมชาติทั้ง beam illuminance และ diffuse illuminance โดยที่ปริมาณและตำแหน่งของเมฆเป็นข้อมูลที่ไม่มีการวัดในลักษณะของการวัดประจำที่สถานีอุตุนิยมวิทยาทั่วไป ดังนั้นการหาค่า illuminance จึงทำได้โดยการจัดตั้งสถานีวัดและการทำการวัดต่อเนื่องกันเป็นเวลานานหลายปี เพื่อให้ได้ค่าที่เป็นตัวแทนทางสถิติของบริเวณนั้น

2.3.4 การวัดปริมาณแสงสว่างธรรมชาติ

จากที่ทราบกันแล้วว่าปริมาณของแสงสว่างธรรมชาติจะขึ้นกับสภาพดินฟ้าอากาศ (weather) ซึ่งแปรตามฤดูกาลและสถานที่ ในการนำแสงสว่างธรรมชาติมาใช้งานในอาคาร ผู้ออกแบบอาคารจำเป็นต้องทราบข้อมูลของปริมาณแสงสว่างในบริเวณนั้นหรือบริเวณใกล้เคียง ซึ่งมีการวัดปริมาณแสงสว่างธรรมชาติ โดยการวัดที่สำคัญมีดังนี้

ก) การวัดปริมาณแสงสว่างธรรมชาติที่มาจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า

ข้อมูลดังกล่าวจะวัดในรูปของ luminance ซึ่งจะเป็นฟลักซ์ของแสงสว่างที่เปล่งออกมาจากท้องฟ้าเข้ามาในกรวยแคบๆ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศที่แสงเข้ามา มีหน่วยเป็น candela/m^2 เครื่องมือที่ใช้วัดเรียกว่า sky scanner มีลักษณะดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงเครื่อง sky scanner

เครื่องมือนี้จะมีหัววัดความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า ซึ่งกวาดไปทั่วทุกส่วนของท้องฟ้า และจะวัดค่าความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า ข้อมูลนี้ถือว่าเป็นข้อมูลที่ดีที่สุดสำหรับการออกแบบอาคารโดยใช้แสงสว่างธรรมชาติ ทั้งนี้เพราะสามารถนำมาใช้

คำนวณปริมาณแสงสว่างธรรมชาติที่ผ่านช่องแสง หรือหน้าต่างอาคารเข้ามายังพื้นที่ที่ใช้งานในอาคาร ได้ อย่างไรก็ตาม sky scanner มีราคาแพง จึงมีการวัดในประเทศต่างๆ น้อยมาก

ข) การวัดปริมาณแสงสว่างธรรมชาติที่ตกกระทบระนาบต่าง ๆ

ฟลักซ์ของแสงสว่างธรรมชาติที่ตกกระทบระนาบต่างๆ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จะเรียกว่า illuminance ประกอบด้วย direct หรือ beam illuminance และ diffuse illuminance และผลรวมของปริมาณทั้งสองจะเรียกว่า global illuminance ซึ่งมีหน่วยเป็น lumen/m² หรือ lux ซึ่งเครื่องมือที่ใช้วัดปริมาณดังกล่าว เรียกว่า ลักซ์มิเตอร์ (lux meter) มีลักษณะดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงลักซ์มิเตอร์

เครื่องมือดังกล่าวใช้วัด global illuminance บนระนาบต่างๆ ที่สำคัญ ได้แก่ การวัดบนพื้นราบ และการวัดบนระนาบในแนวตั้ง (vertical plane) ที่หันหน้าไปทางทิศเหนือ ใต้ ตะวันออก และตะวันตก นอกจากนี้ยังสามารถใช้วัด diffuse illuminance บนพื้นราบ โดยการติดตั้งวงแหวนบังแสงตรง (ดังรูปที่ 2.17) จากค่า global illuminance และ diffuse illuminance บนพื้นราบ เราสามารถ

คำนวณ direct illuminance บนพื้นราบได้ จากนั้นจะสามารถนำไปใช้คำนวณ direct illuminance บนระนาบในแนวตั้งได้ ซึ่งค่าดังกล่าวเมื่อนำไปหักออกจากค่า global illuminance ในแนวตั้งก็จะได้ค่า diffuse illuminance บนระนาบในแนวตั้งได้ ค่า diffuse illuminance และค่า direct illuminance บนระนาบในแนวตั้ง โดยข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับใช้คำนวณปริมาณแสงสว่างธรรมชาติที่ผ่านช่องเปิดของกรอบอาคาร เช่น หน้าต่างเข้าไปภายในอาคาร



รูปที่ 2.17 แสดงเครื่องวัดแสงสว่างธรรมชาติที่กระจายจากท้องฟ้า



(a)

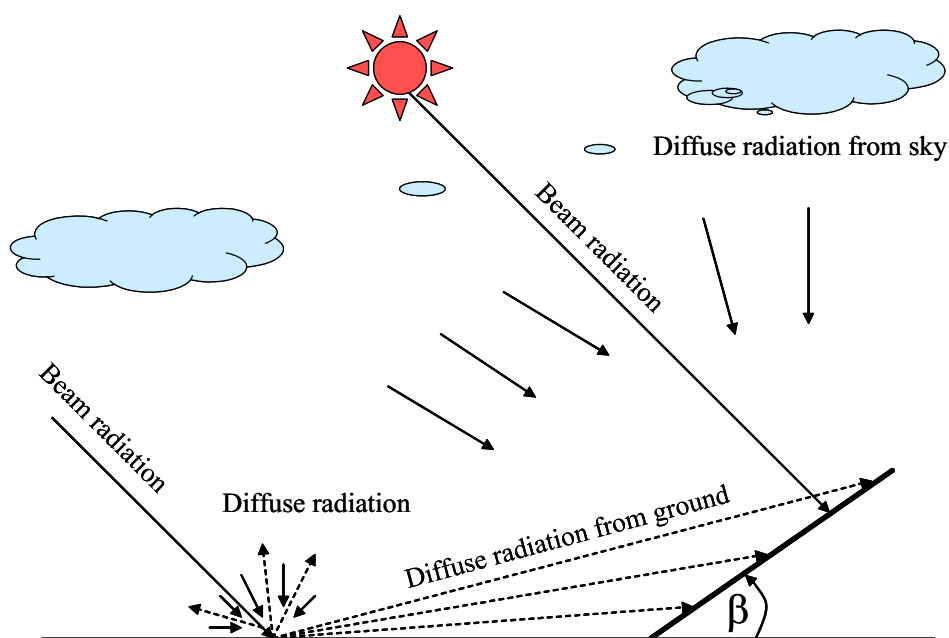


(b)

รูปที่ 2.18 แสดงเครื่องวัดแสงสว่างธรรมชาติบนระนาบในแนวตั้ง 4 ทิศ (a)
และบนระนาบ 45 องศา หันไปทิศใต้ (b)

2.4 ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์บนพื้นเอียง

รังสีดวงอาทิตย์บนพื้นเอียงมีความสำคัญต่องานด้านพลังงานแสงอาทิตย์และอนุรักษ์พลังงาน ทั้งนี้อุปกรณ์พลังงานแสงอาทิตย์มักมีตัวรับรังสีดวงอาทิตย์วางทำมุมกับพื้นราบ เพื่อให้รับรังสีดวงอาทิตย์ได้สูงสุด โดยทั่วไปความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นเอียงจะประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ รังสีตรง รังสีกระจายจากท้องฟ้า และรังสีกระจายจากพื้นดินและสิ่งแวดล้อม ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงรังสีดวงอาทิตย์บนพื้นเอียง

โดยทั่วไป การคำนวณความเข้มรังสีดวงอาทิตย์บนพื้นเอียงนั้นต้องแยกคำนวณแต่ละส่วน โดยในส่วนของความเข้มรังสีตรงบนพื้นเอียงสามารถหาได้โดยการแตกค่าของความเข้มรังสีตรงบนพื้นราบให้ไปอยู่บนพื้นเอียงเช่นเดียวกับการแตกแรง และส่วนของรังสีกระจายที่สะท้อนจากพื้นดินสามารถคำนวณได้โดยอาศัยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นดิน แต่สำหรับในส่วนของรังสีกระจายที่มาจากท้องฟ้าการคำนวณจะค่อนข้างยุ่งยาก ทั้งนี้เพราะแสงที่กระจายจากท้องฟ้าจะขึ้นกับสถานะของท้องฟ้าและตำแหน่งของดวงอาทิตย์ ซึ่งเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

ในอดีตที่ผ่านมา มีนักวิจัยเสนอแบบจำลองสำหรับคำนวณปริมาณรังสีกระจายจากท้องฟ้าบนพื้นเอียงขึ้นหลายแบบจำลอง เช่น แบบจำลองของ Lui and Jordan (1962), แบบจำลองของ Klucher (1979), แบบจำลองของ Perez (1990), แบบจำลองของ Muneer (1997) ฯลฯ โดยแบบจำลองรังสีกระจายจากท้องฟ้าเหล่านี้พัฒนาขึ้นสำหรับใช้คำนวณปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (irradiance) แต่ก็สามารถนำมาใช้กับการคำนวณปริมาณแสงสว่างธรรมชาติ (illuminance) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมรังสีดวงอาทิตย์ได้เช่นเดียวกัน

จากที่กล่าวไปแล้วว่าปริมาณรังสีรวมบนพื้นเอียงประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ รังสีตรงบนพื้นเอียง รังสีกระจายจากพื้นดิน และรังสีกระจายจากท้องฟ้า ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_{gT} = I_{bT} + I_{dT,g} + I_{dT,sky} \quad (2.7)$$

โดยที่

$$I_{gT} = \text{รังสีรวมบนพื้นเอียง (W/m}^2\text{)}$$

$$I_{bT} = \text{รังสีตรงบนพื้นเอียง (W/m}^2\text{)}$$

$$I_{dT,g} = \text{รังสีกระจายบนพื้นเอียงจากพื้นดิน (W/m}^2\text{)}$$

$$I_{dT,sky} = \text{รังสีกระจายบนพื้นเอียงจากท้องฟ้า (W/m}^2\text{)}$$

จากสมการที่ 2.8 ปริมาณรังสีในแต่ละส่วน สามารถคำนวณได้ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

ความเข้มรังสีตรงบนพื้นเอียง I_{bT} สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับการแตกแรง ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$I_{bT} = I_{bh} \frac{\cos \theta_i}{\cos Z_s} = R_b I_{bh} \quad (2.8)$$

โดยที่

$$I_{bh} = \text{รังสีตรงบนพื้นราบ (W/m}^2\text{)}$$

$$\theta_i = \text{มุมตกกระทบของรังสีตรงบนพื้นเอียง (องศา)}$$

$$Z_s = \text{มุมตกกระทบของรังสีตรงบนพื้นราบซึ่งเท่ากับมุมเซนนิธ (องศา)}$$

$$R_b = \text{geometric factor ซึ่งเท่ากับ } \frac{\cos \theta_i}{\cos Z_s}$$

มุมตกกระทบของรังสีตรงบนพื้นเอียง (θ_i) แสดงดังรูปที่ 2.20 และสามารถหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \cos \theta_i &= (\sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta \cos \gamma) \sin \delta \\ &+ (\cos \phi \cos \beta + \sin \phi \sin \beta \cos \gamma) \cos \delta \cos \omega \\ &+ \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (2.9)$$

หรือ

$$\cos \theta_i = \cos \beta \cos Z_s + \sin \beta \sin Z_s \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (2.10)$$

เมื่อ

θ_i = มุมตกกระทบของรังสีตรงบนพื้นเอียง (องศา)

Z_s = มุมตกกระทบของรังสีตรงบนพื้นราบซึ่งเท่ากับมุมเซนนิธ (องศา)

β = มุมเอียงของพื้นเอียง (องศา)

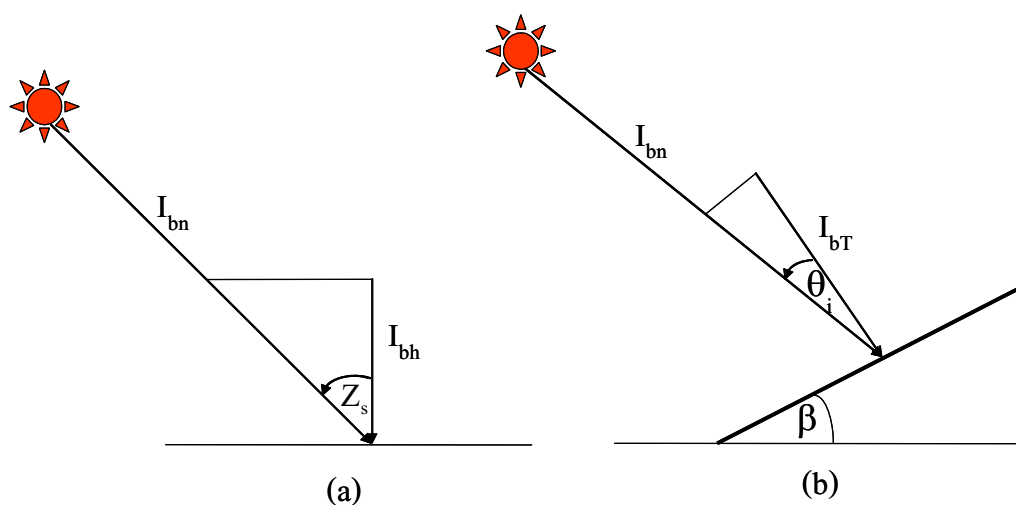
γ = มุมอาซิมุทของพื้นเอียง (องศา)

γ_s = มุมอาซิมุทของดวงอาทิตย์ (องศา)

ϕ = ละติจูด (องศา)

ω = มุมชั่วโมง (องศา)

δ = เคคลิเนชัน (องศา)



รูปที่ 2.20 แสดงมุมตกกระทบของรังสีดวงอาทิตย์บนพื้นเอียง

มุมตกกระทบของรังสีตรงบนพื้นราบ (Z_s) จะหาจากสมการ

$$\cos Z_s = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (2.11)$$

เมื่อ Z_s = มุมตกกระทบของรังสีตรงบนพื้นราบซึ่งเท่ากับมุมเซนนิธ (องศา)
 ϕ = ละติจูด (องศา)
 ω = มุมชั่วโมง (องศา)
 δ = เคคลิเนชัน (องศา)

ปริมาณรังสีกระจายในส่วนที่สะท้อนจากพื้นดิน ($I_{dT,g}$) สามารถคำนวณได้โดยอาศัยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นดิน และ view factor ของพื้นเอียงดังสมการ

$$I_{dT,g} = \frac{1}{2} I_{dh} \rho_g (1 - \cos \beta) \quad (2.12)$$

เมื่อ $I_{dT,g}$ = รังสีกระจายบนพื้นเอียงจากพื้นดิน (W/m^2)
 ρ_g = สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นดิน (-)

ซึ่งโดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นดินจะอยู่ที่ 0.2 หรือ 20%

การคำนวณปริมาณรังสีกระจายจากท้องฟ้าบนพื้นเอียง มีขั้นตอนที่ค่อนข้างจะยุ่งยากเนื่องจากจำเป็นต้องทราบผลจากการดูดกลืนของเมฆและการกระเจิงแสงของฝุ่นละอองในบรรยากาศ ซึ่งมีส่วนทำให้ปริมาณรังสีกระจายจากท้องฟ้าในแต่ละทิศทางและแต่ละส่วนของท้องฟ้ามีลักษณะไม่เท่ากัน หรือเรียกว่ามีลักษณะเป็น แบบ Anisotropic โดยในอดีตที่ผ่านมาได้มีผู้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้คำนวณปริมาณรังสีกระจายที่ตกกระทบบนระนาบเอียงต่างๆ ขึ้นหลายแบบจำลอง โดยรายละเอียดของแต่ละแบบจำลองจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอดีตที่ผ่านมา มีนักวิจัยในประเทศต่างๆ ได้เสนอแบบจำลองสำหรับคำนวณแสงสว่างหรือรังสีดวงอาทิตย์บนพื้นเอียงขึ้นหลายแบบจำลอง ซึ่งในแต่ละแบบจำลองนั้นการคำนวณในส่วนของรังสีตรง และส่วนของรังสีที่สะท้อนจากพื้นดินจะมีลักษณะเหมือนกัน แต่จะมีความแตกต่างของแต่ละแบบจำลองอยู่ในส่วนของการคำนวณปริมาณรังสีกระจายจากท้องฟ้า สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับแบบจำลองรังสีกระจายจากท้องฟ้าแบบต่างๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.1 แบบจำลองรังสีกระจายบนพื้นเอียงแบบ Isotropic

แบบจำลองแบบ isotropic เป็นแบบจำลองที่ใช้สมมติฐานว่า ปริมาณรังสีกระจายจากท้องฟ้ามีลักษณะเท่ากันในทุกทิศทาง โดยงานวิจัยที่เกี่ยวกับแบบจำลองที่มีลักษณะแบบ isotropic มีดังต่อไปนี้

Liu และ Jordan (1962) เป็นคนแรกที่เสนอแบบจำลองรังสีกระจายบนพื้นเอียง โดยพิจารณาว่ารังสีกระจายจากท้องฟ้าจะมีลักษณะเหมือนกันทุกทิศทาง (isotropic) โดยรังสีกระจายส่วนที่พื้นเอียงได้รับจะขึ้นอยู่กับ view factor ของพื้นเอียงเท่านั้น ซึ่งเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$I_{dT,sky} = \frac{1}{2} I_{dh} (1 + \cos \beta) \quad (2.13)$$

เมื่อ $\frac{1}{2}(1 + \cos \beta)$ เป็น view factor ของพื้นเอียง และ β เป็นมุมเอียงของพื้นเอียง (องศา) โดยแบบจำลอง Liu และ Jordan นี้ส่วนใหญ่ผู้ใช้งานจะเรียกชื่อว่า แบบจำลอง “isotropic”

Koronakis (1986) ใช้สมมติฐานของรังสีกระจายจากท้องฟ้าเป็นแบบ isotropic แต่พิจารณาว่าที่มุมเอียง 90 องศา พื้นเอียงควรได้รับรังสีกระจายประมาณ 67 % ของรังสีกระจายจากท้องฟ้าทั้งหมด ซึ่งแบบจำลองจะมีรูปสมการได้ดังนี้

$$I_{dT,sky} = \frac{1}{3} I_{dh} (2 + \cos \beta) \quad (2.14)$$

Tian (2001) ได้เสนอแบบจำลองรังสีกระจายบนพื้นเอียง โดยพิจารณาว่าปริมาณรังสีกระจายบนพื้นเอียงจากท้องฟ้า มีลักษณะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของมุมเอียงของพื้นเอียง ดังนี้

$$\frac{I_{dT,sky}}{I_{dh}} = 1 - \frac{\beta}{180} \quad (2.15)$$

Badescu (2002) ได้เสนอแบบจำลองรังสีกระจายจากท้องฟ้าเป็นแบบ isotropic แต่คิด view factor ของพื้นเอียงแบบ 3 มิติ ซึ่งต่างจากของ Liu และ Jordan ที่คิดแบบ 2 มิติ โดยแบบจำลองดังกล่าวเขียนได้ดังสมการ

$$I_{dT,sky} = I_{dh} \left(\frac{3 + \cos(2\beta)}{4} \right) \quad (2.16)$$

2.5.2 แบบจำลองรังสีกระจายบนพื้นเอียง แบบ Anisotropic

แบบจำลองแบบ Anisotropic นั้นจะพิจารณาว่ารังสีที่กระจายจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้ามีลักษณะไม่เท่ากัน โดยในแบบจำลองจะมีการแบ่งรังสีกระจายจากท้องฟ้าออกเป็นส่วนต่างๆ คือ รังสีกระจายจากบริเวณรอบๆ ดวงอาทิตย์ (circumsolar) รังสีกระจายจากขอบฟ้า (horizontal brightening) และรังสีกระจายในส่วนที่เหลือแบบเป็น isotropic โดยงานวิจัยเกี่ยวกับแบบจำลองรังสีกระจายที่เป็นแบบ anisotropic มีรายละเอียดดังนี้

Iqbal (1983) เสนอแบบจำลอง circum-solar โดยแบบจำลองนี้จะพิจารณาว่ารังสีทั้งหมดทุกทิศทุกทางมาจากดวงอาทิตย์ ดังนั้นรังสีกระจายจึงเสมือนรังสีตรงจากดวงอาทิตย์ โดยเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$I_{dT,sky} = I_{dh} R_b \quad (2.17)$$

$$\text{โดยที่} \quad R_b = \frac{\cos \theta_i}{\cos Z_s} \quad (2.18)$$

เมื่อ

$$I_{dT,sky} = \text{รังสีกระจายบนพื้นเอียงจากท้องฟ้า (W/m}^2\text{)}$$

$$\begin{aligned}
 I_{dh} &= \text{รังสีกระจายบนพื้นราบ (W/m}^2\text{)} \\
 \theta_i &= \text{มุมตกกระทบของรังสีตรงบนพื้นเอียง (องศา)} \\
 Z_s &= \text{มุมเซนนิซของดวงอาทิตย์ (องศา)}
 \end{aligned}$$

Bugler (1977) ได้เสนอแบบจำลองซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$I_{dT,sky} = \left[(I_{dh} - 0.05 \frac{I_{bT}}{\cos Z_s}) \frac{1 + \cos \beta}{2} \right] + 0.05 I_{bT} \cos \theta \quad (2.19)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 I_{dT,sky} &= \text{รังสีกระจายบนพื้นเอียง (W/m}^2\text{)} \\
 I_{dh} &= \text{รังสีกระจายบนพื้นราบ (W/m}^2\text{)} \\
 \theta_i &= \text{มุมตกกระทบของรังสีตรงบนพื้นเอียง (องศา)} \\
 Z_s &= \text{มุมเซนนิซของดวงอาทิตย์ (องศา)} \\
 \beta &= \text{มุมเอียงของพื้นเอียง (องศา)} \\
 I_{bT} &= \text{รังสีตรงบนพื้นเอียง (W/m}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

Temps และ Coulson (1977) ได้เสนอแบบจำลองสำหรับสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ โดยใช้ผลการศึกษาจากกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ พบว่าความเข้มรังสีกระจายจากท้องฟ้าจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นที่บริเวณขอบฟ้า และบริเวณรอบๆ ดวงอาทิตย์ และได้เสนอแฟคเตอร์ขึ้นใหม่ 2 เทอม ที่แสดงถึงอิทธิพลของรังสีกระจายบริเวณรอบๆ ดวงอาทิตย์ (circumsolar) และรังสีกระจายบริเวณขอบฟ้า (horizontal brightening) เพิ่มเข้าไปในแบบจำลอง isotropic ของ Liu และ Jordan โดยเทอมที่แสดงรังสีกระจายจากบริเวณรอบๆดวงอาทิตย์ คือ

$$P_1 = 1 + \cos^2 \theta_i \sin^3 Z_s \quad (2.20)$$

และเทอมที่แสดงรังสีกระจายจากบริเวณขอบฟ้า คือ

$$P_2 = 1 + \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \quad (2.21)$$

ดังนั้น รังสีกระจายจากท้องฟ้าทั้งหมด จะเขียนได้ดังนี้

$$I_{dT,sky} = \frac{1}{2} I_{dh} (1 + \cos \beta) \left[1 + \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] (1 + \cos^2 \theta_i \sin^3 Z_s) \quad (2.22)$$

เมื่อ

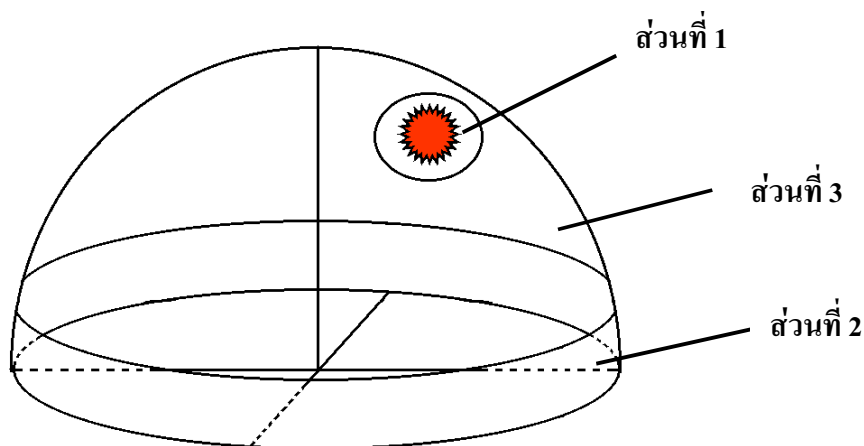
$I_{dT,sky}$ = รังสีกระจายบนพื้นเอียงจากท้องฟ้า (W/m^2)

I_{dh} = รังสีกระจายบนพื้นราบ (W/m^2)

θ_i = มุมตกกระทบของรังสีตรงบนพื้นเอียง (องศา)

Z_s = มุมเซนนิซของดวงอาทิตย์ (องศา)

β = มุมเอียงของพื้นเอียง (องศา)



รูปที่ 2.21 แสดงการแบ่งท้องฟ้าเป็น 3 ส่วน โดยส่วนที่ 1 เป็นท้องฟ้าบริเวณรอบดวงอาทิตย์ ส่วนที่ 2 เป็นท้องฟ้าบริเวณขอบฟ้า และส่วนที่ 3 เป็นท้องฟ้าส่วนที่เหลือ ตามแบบจำลองของ Temps-Coulson (1977)

Klucher (1979) ได้พัฒนาแบบจำลองของ Temp-Coulson เพื่อให้ใช้ได้กับกรณีสภาพท้องฟ้าทั่วไป โดยเสนอ เทอม modulating function (F') ขึ้น เพื่อใช้เป็นแฟคเตอร์ถ่วงน้ำหนักระหว่างกรณีสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ กับสภาพท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมทั้งหมด

โดยที่

$$F' = 1 - (I_{dh} / I_{gh})^2 \quad (2.23)$$

โดยกรณีสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ ($F' = 1$) และในกรณีสภาพท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมทั้งหมด ($F' = 0$) แบบจำลองของ Klucher จะเขียนได้ดังสมการ

$$I_{dT,sky} = I_{dh} \{ [(1 + \cos \beta) / 2] [1 - F' \sin^3 \beta / 2] \times [1 + F' (\cos^2 \theta_i) (\sin^3 Z_s)] \} \quad (2.24)$$

เมื่อ

$I_{dT,sky}$ = รังสีกระจายบนพื้นเอียงจากท้องฟ้า (W/m^2)

I_{dh} = รังสีกระจายบนพื้นราบ (W/m^2)

I_{gh} = รังสีรวมบนพื้นราบ (W/m^2)

θ_i = มุมตกกระทบของรังสีตรงบนพื้นเอียง (องศา)

Z_s = มุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ (องศา)

β = มุมเอียงของพื้นเอียง (องศา)

Hay (1979) ได้เสนอแบบจำลองโดยพิจารณาการกระจายจากท้องฟ้าเป็น 2 ส่วน กล่าวคือ ส่วนที่เกิดจากบริเวณรอบตำแหน่งดวงอาทิตย์ (circumsolar) และส่วนที่ 2 เป็นส่วนท้องฟ้าที่เหลือทั้งหมด ซึ่งมีรังสีกระจายเหมือนกันทุกทิศทาง (isotropic) ดังรูปที่ 2.22 โดยที่ปริมาณรังสีทั้งสองส่วนจะถูก weight ด้วยเทอม Anisotropic index (F'') ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$I_{dT,sky} = I_{dh} \{ F'' (\cos(\theta_i) / \sin(\alpha_s) + [(1 - F'')(1 + \cos(\beta))] / 2) \} \quad (2.25)$$

โดยที่

$$F'' = I_{bh} / I_{oh} \quad (2.26)$$

เมื่อ

$I_{dT,sky}$ = รังสีกระจายบนพื้นเอียงจากท้องฟ้า (W/m^2)

I_{dh} = รังสีกระจายบนพื้นราบ (W/m^2)

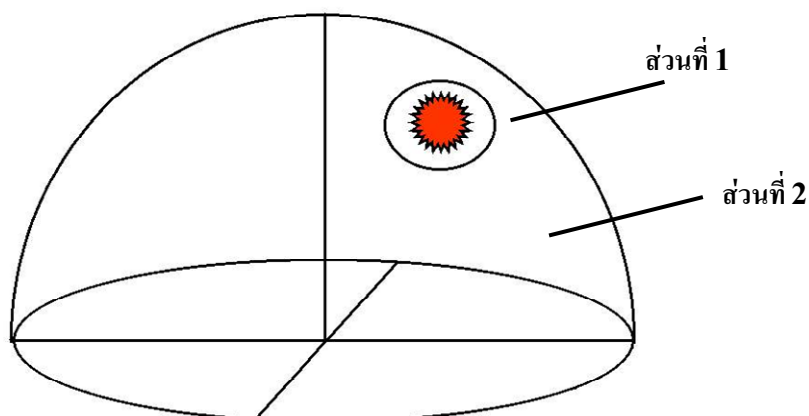
I_{bh} = รังสีตรงบนพื้นราบ (W/m^2)

I_{oh} = รังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกบนพื้นราบ (W/m^2)

θ_i = มุมตกกระทบของรังสีตรงบนพื้นเอียง (องศา)

α_s = มุมเงยของดวงอาทิตย์ (องศา)

β = มุมเอียงของพื้นเอียง (องศา)



รูปที่ 2.22 แสดงการแบ่งท้องฟ้าเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 เป็นท้องฟ้าบริเวณรอบดวงอาทิตย์ และส่วนที่ 2 เป็นท้องฟ้าส่วนที่เหลือ ตามแบบจำลองของ Hay (1979)

Wilmott (1982) ได้ใช้สมมติฐานเดียวกับ Hay แต่ได้นิยามเทอม anisotropic index ขึ้นมาใหม่ดังนี้คือ

$$K_i = \frac{I_{bn}}{I_{sc}} \cos \theta_i \quad (2.27)$$

เมื่อ

I_{sc} = solar constant (W/m^2)

I_{bn} = รังสีตรงบนระนาบตั้งฉากกับลำแสง (W/m^2)

โดยรังสีกระจายในส่วนที่เป็นแบบ anisotropic คือ

$$I_{d,ani} = I_{dh} \left(\frac{K_i}{\cos Z_s} \right) \quad (2.28)$$

และรังสีกระจายส่วนที่เป็น isotropic คือ

$$I_{d,iso} = I_{dh} C_\beta \left(1 - \frac{K_0}{\cos Z_s} \right) \quad (2.29)$$

ดังนั้นรังสีกระจายจากท้องฟ้าบนพื้นเอียง สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$I_{dT,sky} = I_{d,ani} + I_{d,iso} \quad (2.30)$$

เมื่อ	$K_0 = \text{anisotropic index กรณีพื้นราบ (} K_i \text{ กรณี } \beta=0)$	
และ	$C_\beta = 1.0115 - 0.20293\beta - 0.080823\beta^2$	(2.31)

C_β คือ wilmott's isotropic reduction factor บนพื้นเอียง

Ma และ Iqbal (1983) ได้พัฒนาแบบจำลองซึ่งพิจารณาว่ารังสีกระจายจากท้องฟ้าแบ่งเป็น 2 ส่วน กล่าวคือส่วนที่เกิดจากบริเวณรอบตำแหน่งดวงอาทิตย์ (circumsolar) และส่วนที่ 2 เป็นส่วนท้องฟ้าที่เหลือทั้งหมด สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$I_{dT,sky} = I_{dh} \left[M_T R_b + (1 - M_T) \cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] \quad (2.32)$$

โดยที่

$$M_T = \frac{I_{gh}}{I_{oh}} \quad (2.33)$$

เมื่อ

$$I_{dT,sky} = \text{รังสีกระจายบนพื้นเอียงจากท้องฟ้า (W/m}^2\text{)}$$

$$I_{dh} = \text{รังสีกระจายบนพื้นราบ (W/m}^2\text{)}$$

$$\begin{aligned}
 I_{gh} &= \text{รังสีรวมบนพื้นราบ (W/m}^2\text{)} \\
 I_{oh} &= \text{รังสีนอกบรรยากาศโลกบนพื้นราบ (W/m}^2\text{)} \\
 \theta_i &= \text{มุมตกกระทบของรังสีตรงบนพื้นเอียง (องศา)} \\
 \beta &= \text{มุมเอียงของพื้นเอียง (องศา)} \\
 R_b &= \text{geometric factor ซึ่งเท่ากับ } \frac{\cos \theta_i}{\cos Z_s}
 \end{aligned}$$

Skartveit และ Olseth (1986) ได้เสนอแบบจำลองซึ่งพัฒนาขึ้นสำหรับใช้ในบริเวณที่ละติจูดสูงๆ โดยแบบจำลองสามารถเขียนได้ตามสมการ

$$I_{dT,sky} = I_{dh} \left[F'' R_b + C \cos \beta + (1 - F'' - C) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \right] \quad (2.34)$$

โดยที่

$$C = \max(0.3 - 2F'', 0) \quad (2.35)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 I_{dT,sky} &= \text{รังสีกระจายบนพื้นเอียงจากท้องฟ้า (W/m}^2\text{)} \\
 I_{dh} &= \text{รังสีกระจายบนพื้นราบ (W/m}^2\text{)} \\
 I_{bh} &= \text{รังสีตรงบนพื้นราบ (W/m}^2\text{)} \\
 I_{oh} &= \text{รังสีนอกบรรยากาศโลกบนพื้นราบ (W/m}^2\text{)} \\
 C &= \text{correction factor (-)} \\
 \theta_i &= \text{มุมตกกระทบของรังสีตรงบนพื้นเอียง (องศา)} \\
 \beta &= \text{มุมเอียงของพื้นเอียง (องศา)} \\
 R_b &= \text{geometric factor ซึ่งเท่ากับ } \frac{\cos \theta_i}{\cos Z_s}
 \end{aligned}$$

Gueymard (1984) ได้เสนอแบบจำลองสำหรับคำนวณค่ารังสีกระจายในสภาพท้องฟ้าที่มีเมฆปกคลุมบางส่วน โดยใช้ผลรวมเชิงเส้นระหว่างรังสีกระจายในสภาพท้องฟ้าที่ปราศจากเมฆ (I_{d0}) กับรังสีกระจายในสภาพท้องฟ้าที่มีเมฆปกคลุมทั้งหมด (I_{d1}) ซึ่งรังสีกระจายจากท้องฟ้าสามารถหาได้ดังสมการ

$$I_{dT,sky} = I_{dh} [(1 - N_G)I_{d0} + N_G I_{d1}] \quad (2.36)$$

โดยที่

$$N_G = \max[\min(Y,1),0] \quad (2.37)$$

เมื่อ

$$Y = 6.6667 \left(\frac{I_{dh}}{I_{gh}} \right) - 1.4167 \quad \frac{I_{dh}}{I_{gh}} \leq 0.227 \quad (2.38)$$

$$Y = 1.2121 \left(\frac{I_{dh}}{I_{gh}} \right) - 0.1758 \quad \frac{I_{dh}}{I_{gh}} > 0.227 \quad (2.39)$$

รังสีกระจายในสภาพท้องฟ้าที่ปราศจากเมฆ (I_{d0}) จะเป็นผลรวมของรังสีกระจายบริเวณรอบดวงอาทิตย์และบริเวณขอบฟ้า ซึ่งแสดงดังสมการ

$$I_{d0} = \exp(a_0 + a_1 \cos \theta_i + a_2 \cos^2 \theta_i + a_3 \cos^3 \theta_i) + F(\beta)G(\alpha) \quad (2.40)$$

เมื่อ α_s = มุมเงยของดวงอาทิตย์ (องศา) และ $\alpha' = 0.01\alpha_s$

$$a_0 = -0.897 - 3.364\alpha' + 3.960\alpha'^2 - 1.909\alpha'^3 \quad (2.41)$$

$$a_1 = 4.448 - 12.962\alpha' + 34.601\alpha'^2 - 48.784\alpha'^3 + 27.511\alpha'^4 \quad (2.42)$$

$$a_2 = -2.770 + 9.164\alpha' - 18.876\alpha'^2 + 23.776\alpha'^3 - 13.014\alpha'^4 \quad (2.43)$$

$$a_3 = 0.312 - 0.217\alpha' - 0.805\alpha'^2 + 0.318\alpha'^3 \quad (2.44)$$

$$F(\beta) = \frac{(1 - 0.2249 \sin^2 \beta + 0.1231 \sin(2\beta) - 0.0342 \sin(4\beta))}{(1 - 0.2249)} \quad (2.45)$$

$$G(h) = 0.408 - 0.323\alpha' + 0.384\alpha'^2 - 0.170\alpha'^3 \quad (2.46)$$

ส่วนรังสีกระจายในสภาพท้องฟ้าที่เมฆปกคลุมทั้งหมด (I_{d1}) จะขึ้นอยู่กับมุมเอียงของพื้นเอียงเพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$I_{dl} = \frac{(1 + \cos \beta)}{2} - \frac{\left\{ \frac{(\beta \cos \beta - \sin \beta)}{\pi} + \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \right\}}{\left(1 + \frac{3}{2b} \right)} \quad (2.47)$$

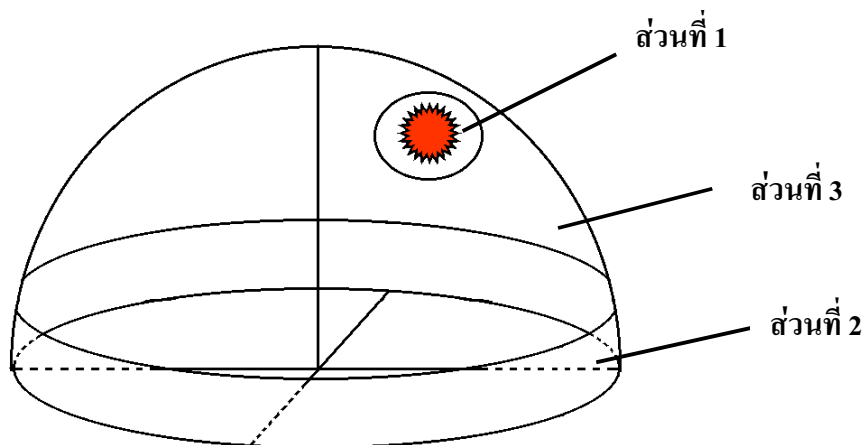
Reindl (1990) ได้เสนอแบบจำลอง โดยพิจารณารังสีกระจายจากท้องฟ้าเป็น 3 ส่วน โดยเพิ่มเติมจากแบบจำลองของ Hay กล่าวคือส่วนที่เกิดจากบริเวณรอบตำแหน่งดวงอาทิตย์ (circumsolar) ส่วนที่ 2 เป็นท้องฟ้าบริเวณขอบฟ้า และส่วนที่ 3 เป็นส่วนท้องฟ้าที่เหลือทั้งหมด ซึ่งมีรังสีกระจายเหมือนกันทุกทิศทาง (isotropic) ดังรูปที่ 2.23 แบบจำลองของ Reindl สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$I_{dT,sky} = I_{dh} \left[(1 - F'') (1 + f \sin^3(\beta/2)) (1 + \cos(\beta)/2 + F''(\cos(\theta)/\sin(\alpha_s))) \right] \quad (2.48)$$

โดย $f = I_{bh} / I_{gh}$ (2.49)

$$F'' = I_{bh} / I_{oh} \quad (2.50)$$

เมื่อ	$I_{dT,sky}$	= รังสีกระจายบนพื้นเอียง (W/m^2)
	I_{dh}	= รังสีกระจายบนพื้นราบ (W/m^2)
	θ_i	= มุมตกกระทบของรังสีตรงบนพื้นเอียง (องศา)
	α_s	= มุมเงยของดวงอาทิตย์ (องศา)
	β	= มุมเอียงของพื้นเอียง (องศา)
	I_{gh}	= รังสีรวมบนพื้นราบ (W/m^2)
	I_{bh}	= รังสีตรงบนพื้นราบ (W/m^2)
	I_{oh}	= รังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกบนพื้นราบ (W/m^2)



รูปที่ 2.23 แสดงการแบ่งท้องฟ้าเป็น 3 ส่วน โดยส่วนที่ 1 เป็นท้องฟ้าบริเวณรอบดวงอาทิตย์ ส่วนที่ 2 เป็นท้องฟ้าบริเวณขอบฟ้า และส่วนที่ 3 เป็นท้องฟ้าส่วนที่เหลือ ตามแบบจำลองของ Reindl (1990)

Muneer (1997) เสนอแบบจำลอง ซึ่งแบ่งการพิจารณาเป็นด้านที่เห็นดวงอาทิตย์ (sunlit) และด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ (shade) และแบ่งท้องฟ้าเป็นท้องฟ้าที่เมฆปกคลุมทั้งหมดและท้องฟ้าที่ไม่มีเมฆปกคลุมทั้งหมดในด้านที่เห็นดวงอาทิตย์

โดยรังสีกระจายจากท้องฟ้าในด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ และด้านที่เห็นดวงอาทิตย์ในสภาพท้องฟ้าที่มีเมฆปกคลุมทั้งหมดสามารถหาได้จากสมการ

$$I_{dT,sky} = I_{dh} T_F \quad (2.51)$$

เมื่อ T_F คือ Tilt factor สามารถหาได้จากสมการ

$$T_F = \cos^2(\beta/2) + \frac{2b}{\pi(3+2b)}(\sin \beta - \beta \cos \beta - \pi \sin^2(\beta/2))$$

และสำหรับด้านที่เห็นดวงอาทิตย์ในสภาพท้องฟ้าแบบไม่มีเมฆปกคลุมทั้งหมดสามารถหาได้จากสมการ

$$I_{dT,sky} = I_{dh} \left[T_F(1 - F'') + F'' \left(\frac{\cos \theta}{\cos Z_s} \right) \right] \quad (2.52)$$

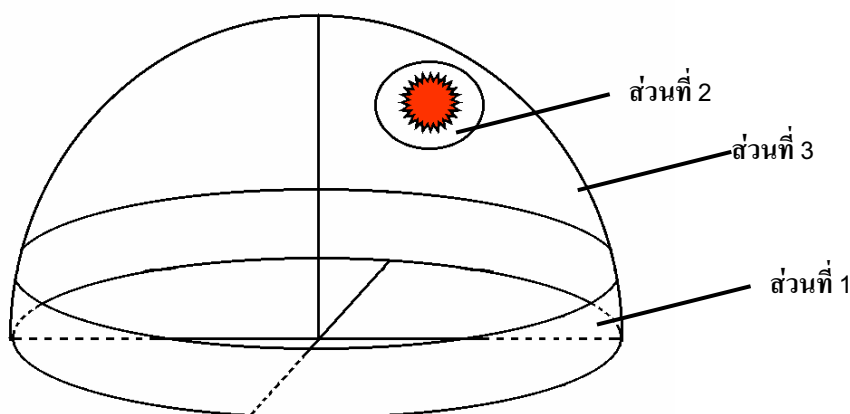
เมื่อ	$I_{dT,sky}$	= รังสีกระจายบนพื้นเอียงจากท้องฟ้า (W/m^2)
	I_{dh}	= รังสีกระจายบนพื้นราบ (W/m^2)
	θ_i	= มุมตกกระทบของรังสีตรงบนพื้นเอียง (องศา)
	Z_s	= มุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ (องศา)
	β	= มุมเอียงของพื้นเอียง (องศา)
	T_F	= Tilt factor (-)
	b	= radiance distribution index (-)

โดยที่ในด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์และด้านที่เห็นดวงอาทิตย์ในสภาพท้องฟ้าที่มีเมฆปกคลุมทั้งหมด ค่า b มีค่าเท่ากับ 2.5 และสำหรับด้านที่เห็นดวงอาทิตย์ในสภาพท้องฟ้าที่ไม่มีเมฆปกคลุมทั้งหมดสามารถหาค่า b ได้จากสมการ

$$\frac{2b}{[\pi(3 + 2b)]} = 0.04 - 0.82F'' - 2.026F''^2 \quad (2.53)$$

สำหรับการคำนวณปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (irradiance) และสำหรับปริมาณแสงสว่าง (illuminance) ค่า b สามารถหาได้จากสมการ

$$\frac{2b}{[\pi(3 + 2b)]} = 0.111F'' - 4.317F''^2 \quad (2.54)$$



รูปที่ 2.24 แสดงการแบ่งท้องฟ้าออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนที่ 1 เป็นท้องฟ้าบริเวณขอบฟ้า ส่วนที่ 2 เป็นท้องฟ้าบริเวณรอบดวงอาทิตย์ และส่วนที่ 3 เป็นท้องฟ้าส่วนที่เหลือ ตามแบบจำลองของ Perez et al. (1990)

Perez et al. (1990) ได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีกระจายจากท้องฟ้าบนพื้นเอียงโดยแบ่งท้องฟ้าออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ บริเวณขอบฟ้า บริเวณรอบดวงอาทิตย์ และบริเวณที่เหลือ ดังแสดงในรูปที่ 2.24 จากนั้นจะทำการคำนวณรังสีกระจายจากท้องฟ้าซึ่งเป็นผลรวมของส่วนต่างๆ ตามสมการ

$$I_{dT,sky} = I_{dh} [0.5(1 + \cos\beta)(1 - F_1) + F_1(a_1/a_2) + F_2 \sin\beta] \quad (2.55)$$

โดย

$$a_1 = \max[0, \cos\theta] \quad (2.56)$$

$$a_2 = \max[\cos 85, \cos Z_s] \quad (2.57)$$

$$F_1 = \max\{0, [f_{11} + f_{12} \Delta + f_{13} * Z_s (\pi/180)]\} \quad (2.58)$$

$$F_2 = [f_{21} + f_{22} \Delta + f_{23} * Z_s (\pi/180)] \quad (2.59)$$

เมื่อ

$$I_{dT,sky} = \text{รังสีกระจายบนพื้นเอียงจากท้องฟ้า (W/m}^2\text{)}$$

$$I_{dh} = \text{รังสีกระจายบนพื้นราบ (W/m}^2\text{)}$$

$$\theta_i = \text{มุมตกกระทบของรังสีตรงบนพื้นเอียง (องศา)}$$

$$Z_s = \text{มุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ (องศา)}$$

α_s = มุมเงยของดวงอาทิตย์ (องศา)

β = มุมเอียงของพื้นเอียง (องศา)

Δ = sky brightness (-)

ε = sky clearness (-)

โดยที่

$$\Delta = m_a \frac{I_{dh}}{I_{on}} \quad (2.60)$$

$$\varepsilon = \left[\frac{I_{dh} + I_{bh}}{I_{dh}} + 5.535 \times 10^{-6} \times Z_s^3 \right] / (1 + 5.535 \times 10^{-6} \times Z_s^3) \quad (2.61)$$

เมื่อ

m_a = air mass (-)

I_{dh} = รังสีกระจายบนพื้นราบ (W/m^2)

I_{on} = รังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกบนระนาบตั้งฉากกับลำแสง (W/m^2)

I_{bh} = รังสีตรงบนพื้นราบ (W/m^2)

สำหรับค่า f_{11} , f_{12} , f_{13} , f_{21} , f_{22} และ f_{23} จะขึ้นกับ sky clearness (ε) ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ในแบบจำลองของ Perez et al. (1990)

bin (ε)	upper limit	f11	f12	f13	f21	f22	f23
1	1.065	0.0113	0.5707	-0.0820	-0.0947	0.1579	-0.0177
2	1.230	0.4296	0.3634	-0.3066	0.0499	0.0080	-0.0650
3	1.500	0.8093	-0.0535	-0.4422	0.1809	-0.1686	-0.0918
4	1.950	1.0141	-0.2522	-0.5311	0.2750	-0.3498	-0.0957
5	2.800	1.2818	-0.4205	-0.6888	0.3802	-0.5586	-0.1144
6	4.500	1.4257	-0.6533	-0.7789	0.4247	-0.7851	-0.0966
7	6.200	1.4848	-1.2139	-0.7837	0.4111	-0.6292	-0.0822
8	-	1.1695	-0.2998	-0.6149	0.5180	-1.8924	-0.0511

ค่าสัมประสิทธิ์ในตารางที่ 2.1 ตามแบบจำลอง Perez นั้นจะมีลักษณะขึ้นอยู่กับแต่ละสถานที่ โดยสัมประสิทธิ์ที่แสดงในตาราง Perez ได้ทำการพัฒนาจากข้อมูลการวัดในหลายๆ สถานที่ ทั้งบริเวณที่ละติจูดสูง และที่บริเวณละติจูดต่ำ เพื่อให้สามารถใช้ได้ทั่วไป แต่เพื่อการคำนวณที่ถูกต้องมากขึ้นควรมีการหาสัมประสิทธิ์ขึ้นใหม่จากข้อมูลการวัดในสถานที่ใช้งานนั้นๆ

Robledo และ Soler (1998) ได้ทำการพัฒนาสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง Perez โดยพิจารณาแยกกันระหว่างพื้นเอียงกรณีด้านที่เห็นดวงอาทิตย์และด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ และได้เสนอสัมประสิทธิ์ขึ้น 2 ชุด สำหรับใช้ในการคำนวณกรณีด้านที่เห็นและไม่เห็นดวงอาทิตย์ โดยกรณีด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์นั้น สัมประสิทธิ์ F_1 จะมีค่าเป็นศูนย์

สำหรับในประเทศไทยได้มีผู้พัฒนาค่าสัมประสิทธิ์ของ Perez ขึ้นเช่นกัน คือ Chirarattananon และคณะ (2006) โดยอาศัยข้อมูลการวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (irradiance) และแสงสว่างธรรมชาติ (illuminance) บนรานาบแนวตั้ง 4 ทิศทาง ที่สถาบัน Asian Institute of Technology (AIT) และได้เสนอสัมประสิทธิ์ขึ้นมา 3 แบบ คือ 1) แบบ AIT0a ซึ่งได้จากข้อมูลการวัดทั้งหมด 2) แบบ AIT0b เป็นสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแบ่งข้อมูลออกเป็นกรณีด้านที่เห็นดวงอาทิตย์และด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ 3) แบบ AIT25 จะเหมือนกับแบบ AIT0a แต่จะพิจารณาบริเวณรอบๆ ดวงอาทิตย์ (circumsolar) เป็นพื้นที่ซึ่งรองรับด้วยมุมตัน 25 องศา โดยค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 3 แบบสำหรับใช้คำนวณปริมาณแสงสว่าง (illuminance) แสดงดังตารางที่ 2.2-2.5

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของ Perez et al. ที่พัฒนาใหม่จากข้อมูลวัดในประเทศไทย
ตามแบบ AIT0a

bin (ϵ)	upper limit	f11	f12	f13	f21	f22	f23
1	1.065	0.1870	0.5780	-0.2120	0.1310	-0.0810	-0.1390
2	1.230	0.5830	0.1760	-0.3560	0.2720	-0.2060	-0.1920
3	1.500	0.6370	0.1620	-0.3660	0.3030	-0.2060	-0.2060
4	1.950	1.0860	-0.5100	-0.4710	0.4640	-0.4010	-0.2640
5	2.800	1.3790	-1.0510	-0.5850	0.6520	-0.6850	-0.3500
6	4.500	1.4030	-1.0180	-0.7270	0.8120	-0.9460	-0.4720
7	6.200	3.8840	-10.7870	-1.8250	2.3150	-7.0590	-1.0420
8	-	2.3500	-1.3650	-2.3770	1.9510	-4.9170	-1.4030

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของ Perez et al. ที่พัฒนาใหม่จากข้อมูลวัดในประเทศไทย
ตามแบบ AIT0b กรณีด้านที่เห็นดวงอาทิตย์

bin (€)	upper limit	f11	f12	f13	f21	f22	f23
1	1.065	0.1560	0.4910	-0.1780	0.0710	-0.0280	-0.0740
2	1.230	0.4340	0.1300	-0.2570	0.1810	-0.1850	-0.0550
3	1.500	0.4150	0.1250	-0.2250	0.1930	-0.2020	-0.0250
4	1.950	0.6720	-0.3680	-0.2500	0.3620	-0.4970	-0.0260
5	2.800	0.6800	-0.5540	-0.2550	0.5020	-0.8320	-0.0050
6	4.500	0.2960	0.1760	-0.1960	0.5620	-1.1080	0.0310
7	6.200	-0.6250	4.5810	-0.1870	0.5940	-1.1880	0.0240
8	-	0.1070	3.1570	-0.9270	1.2710	-4.4610	-0.3360

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของ Perez et al. ที่พัฒนาใหม่จากข้อมูลวัดในประเทศไทย
ตามแบบ AIT0b กรณีด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์

bin (€)	upper limit	f11	f12	f13	f21	f22	f23
1	1.065	-	-	-	0.0660	-0.4260	-0.0490
2	1.230	-	-	-	0.0000	-0.3280	-0.0390
3	1.500	-	-	-	-0.0040	-0.3140	-0.0490
4	1.950	-	-	-	-0.1120	-0.0980	-0.0440
5	2.800	-	-	-	-0.1120	-0.0320	-0.0610
6	4.500	-	-	-	-0.0240	-0.1620	-0.0840
7	6.200	-	-	-	0.0790	-0.3230	-0.1270
8	-	-	-	-	0.5130	-3.0140	-0.1810

ตารางที่ 2.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของ Perez et al. ที่พัฒนาใหม่จากข้อมูลวัดในประเทศไทย
ตามแบบ AIT25

bin (ϵ)	upper limit	f11	f12	f13	f21	f22	f23
1	1.065	0.0680	0.7790	-0.1490	0.0820	-0.0480	-0.1000
2	1.230	0.5240	0.2490	-0.2950	0.2310	-0.2110	-0.1460
3	1.500	0.6300	0.1860	-0.3340	0.2740	-0.2180	-0.1700
4	1.950	1.1570	-0.5700	-0.4810	0.4420	-0.4120	-0.2350
5	2.800	1.5050	-1.0920	-0.6690	0.6320	-0.6630	-0.3340
6	4.500	1.6160	-1.0980	-0.9070	0.8130	-0.9290	-0.4770
7	6.200	1.7670	-0.1100	-1.4680	1.0710	-1.1380	-0.7880
8	-	3.1450	-2.9550	-3.1190	2.0690	-5.1800	-1.5040

แบบจำลองรังสีกระจายจากท้องฟ้าบนพื้นเอียงต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ส่วนใหญ่พัฒนาโดยใช้ข้อมูลการวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (irradiance) แต่ในความเป็นจริงแบบจำลองเหล่านี้สามารถนำมาใช้คำนวณปริมาณแสงสว่างธรรมชาติ (illuminance) ได้เช่นเดียวกัน

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะดำเนินการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองรังสีกระจายจากท้องฟ้าบนพื้นเอียงแบบต่างๆ สำหรับนำมาคำนวณปริมาณแสงสว่างธรรมชาติในรูป diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้ง 90 องศา และบนระนาบเอียง 45 องศา เพื่อพิจารณาหาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในประเทศไทย

บทที่ 3

วิธีการวิจัยและผล

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะดำเนินการทดสอบและเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองสำหรับคำนวณปริมาณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงแบบต่างๆ จากนั้นจะดำเนินการคำนวณปริมาณ diffuse illuminance บนพื้นเอียง ด้วยวิธีการอินทิเกรตปริมาณแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า (sky luminance) พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของปริมาณแสงสว่างธรรมชาติในประเทศไทย

3.1 เครื่องมือวัด

ในงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลปริมาณแสงสว่างธรรมชาติ ซึ่งประกอบด้วยข้อมูล global illuminance ที่ทำการวัดบนพื้นราบ บนระนาบแนวตั้ง และบนระนาบเอียง 45 องศา และข้อมูล diffuse illuminance บนพื้นราบ ข้อมูลดังกล่าวได้มาจากการวัดด้วยอุปกรณ์สำหรับวัดปริมาณแสงสว่างธรรมชาติ ซึ่งได้ติดตั้งไว้ตามภูมิภาคหลักของประเทศไทย 4 แห่งคือ

- 1) ภาคเหนือ ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ (18.78 °N, 98.98°E)
- 2) ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี (15.25 °N, 104.87 °E)
- 3) ภาคกลาง ที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม (13.82 °N, 100.04 °E)
- 4) ภาคใต้ ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา (7.2 °N, 100.6 °E)

อุปกรณ์สำหรับวัดแสงสว่างธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

- 1) อุปกรณ์วัด global illuminance บนพื้นราบและบนระนาบแนวตั้ง

อุปกรณ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยม ขนาด 30×30×30 ซม. ซึ่งทำจากแผ่นอะลูมิเนียม กล่องดังกล่าวจะติดตั้งหัววัดลักซ์มิเตอร์ที่ด้านบนสำหรับวัด global illuminance บนแนวระดับ (horizontal plane) และที่ด้านข้างทั้ง 4 ด้านสำหรับวัด global illuminance บนระนาบแนวตั้ง (vertical plane) ด้านละ 1 ตัว โดยบริเวณขอบล่างของกล่องจะมีแผ่นกันแสงสะท้อนจากพื้นดินที่ทาด้วย

2) อุปกรณ์วัด global illuminance บนระนาบเอียง 45 องศา

อุปกรณ์ดังกล่าวทำจากแผ่นอะลูมิเนียมสีเหลี่ยมผืนผ้าสีดำ ขนาด 30×45 ซม. ลักษณะของแผ่นอะลูมิเนียมดังกล่าวจะถูกพับด้านหนึ่งให้มีมุมเอียง 45 องศาจากแนวระดับ โดยจะเหลือส่วนที่อยู่ในแนวระดับซึ่งทำหน้าที่บังรังสีสะท้อนจากพื้นดินไว้ 30 ซม. บนระนาบเอียงของแผ่นดังกล่าวจะทำการติดตั้งหัววัดลักซ์มิเตอร์ เพื่อใช้วัดแสงสว่างจากท้องฟ้าที่ตกกระทบบนระนาบเอียง 45 องศา



(a)



(b)

รูปที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์วัด global illuminance บนระนาบแนวตั้ง (a) และบนระนาบเอียง 45 องศา (b)

3) อุปกรณ์วัด diffuse illuminance บนพื้นราบ

สำหรับการวัด diffuse illuminance บนพื้นราบนั้น จะใช้หัววัดลักซ์มิเตอร์ซึ่งติดตั้งวงแหวนสำหรับบังปริมาณแสงตรงจากดวงอาทิตย์ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วงแหวนบังรังสีดวงอาทิตย์ของ Kipp-Zonen รุ่น CM 121 อุปกรณ์ดังกล่าวมีลักษณะดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์วัด diffuse illuminance บนพื้นราบ

หัววัดลักซ์มิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นลักซ์มิเตอร์ชนิดใช้งานกลางแจ้งยี่ห้อ EKO รุ่น ML-020S-O สัญญาณที่ได้จากหัววัดจะอยู่ในรูปศักย์ไฟฟ้าในช่วง 0-20 mV และทำการบันทึกสัญญาณด้วยเครื่อง Data collector ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DC 100 ลักษณะของลักซ์มิเตอร์และเครื่องบันทึกข้อมูลแสดงไว้ดังรูปที่ 3.3-3.4



รูปที่ 3.3 แสดงหัววัดลักซ์มิเตอร์



รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องบันทึกข้อมูล

อุปกรณ์การวัด global illuminance บนพื้นราบและระนาบแนวตั้ง และอุปกรณ์การวัด diffuse illuminance บนพื้นราบดังกล่าว ได้ทำการติดตั้งในเดือนตุลาคม ค.ศ. 2002 และได้ดำเนินการวัดและบันทึกข้อมูลจนถึงปัจจุบัน (ค.ศ. 2008) สำหรับอุปกรณ์การวัด global illuminance บนระนาบเอียง 45 องศาในทิศใต้ ผู้วิจัยได้นำไปติดตั้งเพิ่มที่สถานีวัดทั้ง 4 แห่ง คือ เชียงใหม่ วันที่ 16 ก.ย. 2006, อุบลราชธานี วันที่ 8 พ.ย. 2006, นครปฐม วันที่ 9 ต.ค. 2006 และสงขลา วันที่ 9 ม.ค. 2007 ส่วนอุปกรณ์การวัด global illuminance บนระนาบเอียง 45 องศาในทิศเหนือ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตกนั้น ผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งที่สถานีนครปฐม เมื่อวันที่ 10 พ.ย. 2007

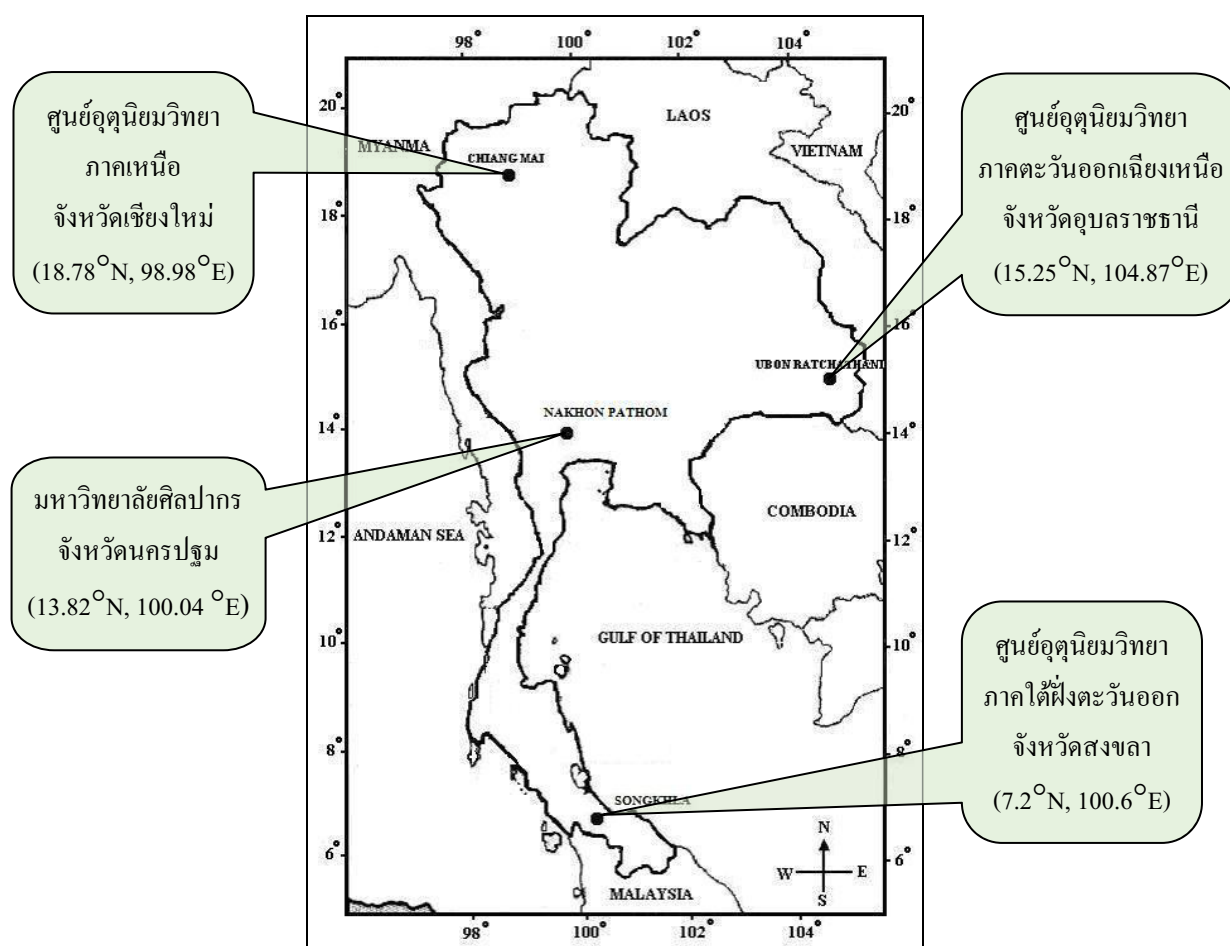
ในงานวิจัยนี้ จะใช้ข้อมูลปริมาณแสงสว่างธรรมชาติซึ่งได้จากอุปกรณ์การวัดที่กล่าวมาข้างต้นประกอบด้วย ข้อมูล global illuminance และ diffuse illuminance บนพื้นราบ ข้อมูล global illuminance บนระนาบแนวตั้งและระนาบเอียง 45 องศา โดยรายละเอียดและช่วงเวลาของข้อมูลปริมาณแสงสว่างธรรมชาติที่นำมาใช้ แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงชนิดและช่วงเวลาของข้อมูลปริมาณแสงสว่างธรรมชาติรายชั่วโมงที่นำมาใช้

ในงานวิจัย

สถานี \ ข้อมูล	global illuminance horizontal	diffuse illuminance horizontal	global illuminance vertical (N-E-W-S)	global illuminance inclined-45 (S)	global illuminance inclined-45 (N-E-W)
เชียงใหม่	2003-2008	2003-2008	2003-2008	2007-2008	-
อุบลราชธานี	2003-2008	2003-2008	2003-2008	2007-2008	-
นครปฐม	2003-2008	2003-2008	2003-2008	2007-2008	2008
สงขลา	2003-2008	2003-2008	2003-2008	2007-2008	-

ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดความเข้มแสงสว่างธรรมชาติทั้ง 4 แห่ง ตามภูมิภาคหลักของประเทศไทย แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงตำแหน่งที่ตั้งของอุปกรณ์วัดแสงสว่างธรรมชาติ 4 แห่ง ตามภูมิภาคหลักของประเทศไทย



รูปที่ 3.6 แสดงอุปกรณ์วัด global illuminance บนระนาบแนวตั้ง 4 ทิศ ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยา
ภาคเหนือจังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 3.7 แสดงอุปกรณ์วัด global illuminance บนระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้
ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 3.8 แสดงอุปกรณ์วัด diffuse illuminance บนพื้นราบ ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ
จังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 3.9 แสดงอุปกรณ์วัด global illuminance บนระนาบแนวตั้ง 4 ทิศ ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยา
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี



รูปที่ 3.10 แสดงอุปกรณ์วัด global illuminance บนระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้
ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี



รูปที่ 3.11 แสดงอุปกรณ์วัด diffuse illuminance บนพื้นราบ ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาค
ตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี



รูปที่ 3.12 แสดงอุปกรณ์วัดวัด global illuminance บนระนาบแนวตั้ง 4 ทิศ ที่มหาวิทยาลัย
ศิลปากร จังหวัดนครปฐม



รูปที่ 3.13 แสดงอุปกรณ์วัดวัด diffuse illuminance บนพื้นราบ ที่มหาวิทยาลัยศิลปากร
จังหวัดนครปฐม



(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 3.14 แสดงอุปกรณ์วัด global illuminance บนระนาบเอียง 45 องศาทิศเหนือ (a) ทิศใต้ (b) ทิศตะวันออก (c) และทิศตะวันตก (d) ที่มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม



รูปที่ 3.15 แสดงอุปกรณ์วัด global illuminance บนระนาบแนวตั้ง 4 ทิศ ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยา
ภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา



รูปที่ 3.16 แสดงอุปกรณ์วัด global illuminance บนระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้
ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา



รูปที่ 3.17 แสดงอุปกรณ์วัด diffuse illuminance บนพื้นราบ ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้
ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา

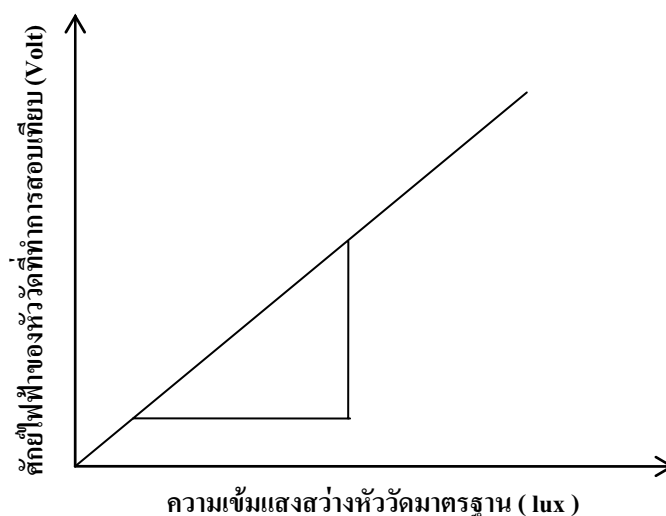
3.2 การสอบเทียบเครื่องวัดแสงสว่างธรรมชาติ

โดยทั่วไปลักซ์มิเตอร์ซึ่งใช้วัด illuminance ต้องทำงานต่อเนื่องอยู่กลางแจ้งตลอดเวลา ยาวนาน ทำให้หัววัดมีการเสื่อมสภาพ โดยค่า sensitivity ของเครื่องวัดจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอายุการใช้งาน ดังนั้นจึงต้องทำการสอบเทียบอย่างสม่ำเสมอ ประมาณปีละ 1-2 ครั้ง

ในงานการสอบเทียบ ผู้วิจัยจะนำลักซ์มิเตอร์ที่สอบเทียบจากบริษัทผู้ผลิตมาใช้เป็นหัววัดมาตรฐาน โดยจะนำหัววัดมาตรฐานไปตั้งคู่กับหัววัดที่ใช้งานจริงของสถานีวัดแต่ละแห่ง โดยจะถอดลักซ์มิเตอร์ที่วัดในแนวตั้งไปวางไว้ในแนวราบที่ระดับเดียวกันกับหัววัดมาตรฐาน แล้วต่อสายสัญญาณจากหัววัดเข้ากับ data logger และบันทึกสัญญาณพร้อมกัน จากนั้นจะทำการเก็บข้อมูลทุก 1 วินาที โดยเริ่มตั้งแต่เช้าถึงเย็น ในการสอบเทียบผู้วิจัยจะเลือกปฏิบัติในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆน้อยหรือปราศจากเมฆ หลังจากนั้นจะทำการคำนวณหาค่า sensitivity ค่าใหม่ตามขั้นตอนดังนี้

1) นำข้อมูลที่ได้จากห้วงวัดลักซ์มิเตอร์มาตรฐานมาแปลงเป็นค่า illuminance ในหน่วย lux แล้วนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากห้วงวัดลักซ์มิเตอร์ที่ต้องการจะสอบเทียบดังตัวอย่างกราฟในรูปที่ 3.18

2) อ่านค่าความชันของกราฟซึ่งจะเป็นค่า sensitivity ค่าใหม่ของห้วงวัดที่ทำการสอบเทียบนั้น



รูปที่ 3.18 แสดงกราฟระหว่างค่าความเข้มแสงสว่างของห้วงวัดลักซ์มิเตอร์มาตรฐาน กับค่าศักย์ไฟฟ้าของห้วงวัดลักซ์มิเตอร์ที่ทำการสอบเทียบ

โดยทั่วไปค่า sensitivity ใหม่ที่ได้จะลดลงจากค่าเดิมประมาณ 2-5% ต่อปี ภาพการสอบเทียบและกราฟที่ได้จากการสอบเทียบของสถานี่ต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ 3.19-3.26 จากนั้นผู้วิจัยได้นำค่า sensitivity ใหม่ที่ได้มาคำนวณปรับแก้ค่าที่ได้จากการวัด



รูปที่ 3.19 แสดงภาพการสอบเทียบที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่



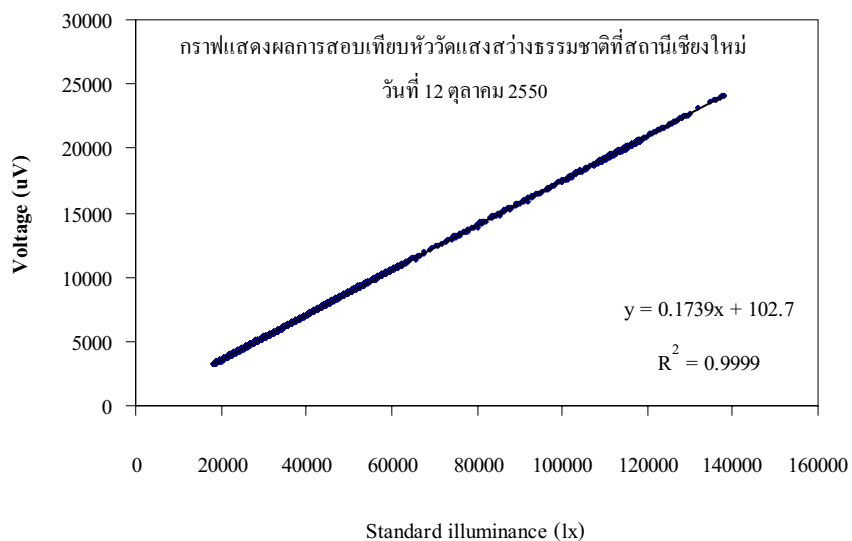
รูปที่ 3.20 แสดงภาพการสอบเทียบที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัด
อุบลราชธานี



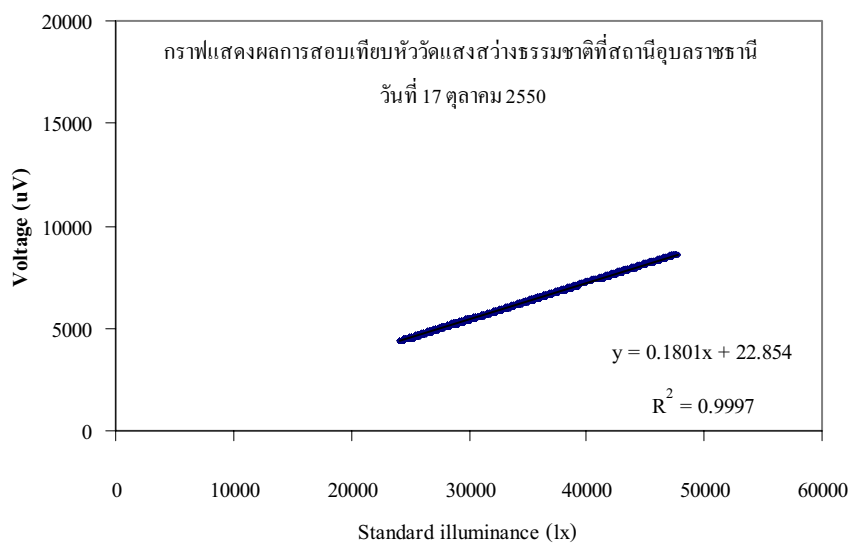
รูปที่ 3.21 แสดงภาพการสอบเทียบที่มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม



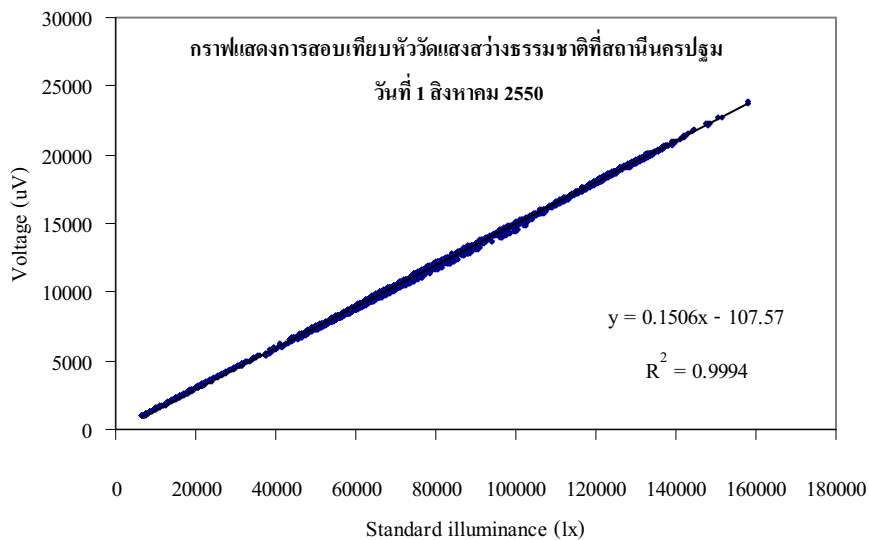
รูปที่ 3.22 แสดงภาพการสอบเทียบที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา



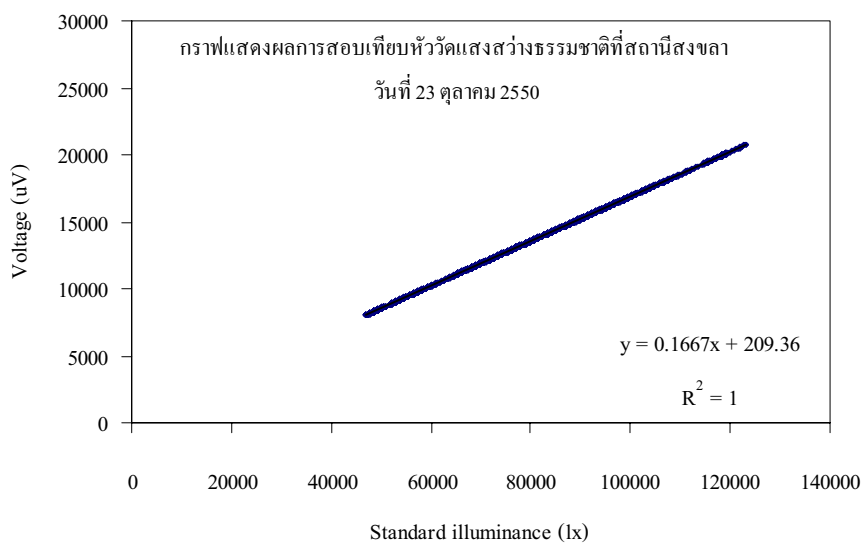
รูปที่ 3.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่า illuminance ที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยา
ภาคเหนือจังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 3.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่า illuminance ที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยา
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี



รูปที่ 3.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่า illuminance ที่มหาวิทยาลัยศิลปากร
จังหวัดนครปฐม



รูปที่ 3.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่า illuminance ที่ศูนย์อุตุนิคมวิทยา
ภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา

3.3 การควบคุมคุณภาพข้อมูล

ข้อมูลแสงสว่างธรรมชาติที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือข้อมูล global และ diffuse illuminance บนพื้นราบ กับข้อมูล global illuminance บนระนาบแนวคิง 4 ทิศ และบนพื้นเอียง 45 องศา ซึ่งถึงแม้ว่าเครื่องมือวัดจะมีการสอบเทียบอยู่เป็นประจำ แต่ข้อมูลที่จะนำมาใช้งานก็จะต้องผ่านการควบคุมคุณภาพของข้อมูลก่อน (Data quality control) เพื่อกำจัดข้อมูลที่ผิดปกติออกไป โดยผู้วิจัยได้ทำการควบคุมคุณภาพข้อมูลตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) เลือกใช้ข้อมูลแสงสว่างธรรมชาติในช่วงเวลาที่มุมเงยของดวงอาทิตย์มากกว่า 5 องศาขึ้นไป เพื่อหลีกเลี่ยงค่า error เนื่องจาก Cosine response ของหัววัด ซึ่งในที่นี้จะเลือกใช้ข้อมูลในช่วงเวลาดังแต่ 8.30 – 16.30 น.

2) เปรียบเทียบระหว่างค่า global illuminance และ diffuse illuminance โดยค่า diffuse illuminance จะต้องไม่ค่าไม่เกินค่า global illuminance ดังสมการ

$$E_{dh} \leq E_{gh} \quad (3.1)$$

เมื่อ E_{gh} = global illuminance บนพื้นราบ (klux)
 E_{dh} = diffuse illuminance บนพื้นราบ (klux)

3) เปรียบเทียบระหว่างค่า global illuminance กับค่าความเข้มแสงสว่างนอกบรรยากาศโลก (Extraterrestrial illuminance) โดยค่า global illuminance จะต้องไม่ค่าไม่เกิน Extraterrestrial illuminance

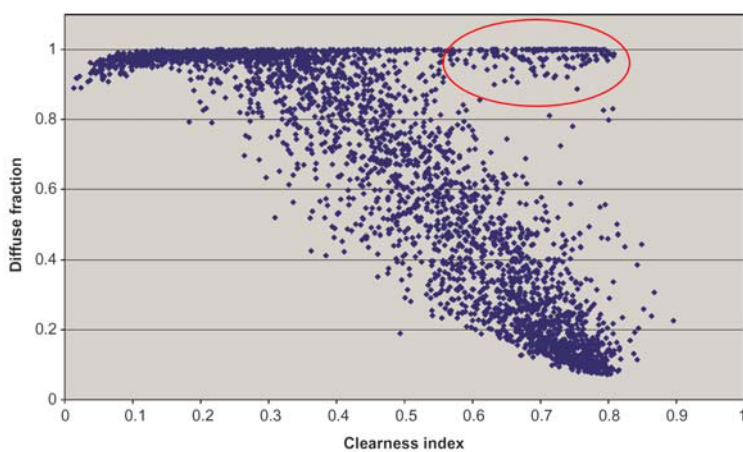
$$E_{gh} \leq E_{oh} \quad (3.2)$$

เมื่อ E_{oh} = ความเข้มแสงสว่างนอกบรรยากาศโลก (klux)
 E_{gh} = global illuminance บนพื้นราบ (klux)

4) หลังจากผ่านการควบคุมคุณภาพทั้ง 3 ข้อแล้ว จะทำการตรวจสอบอีกครั้ง โดย ทำการพลอตความสัมพันธ์ระหว่างค่า Diffuse fraction กับค่า Clearness index เพื่อตรวจสอบค่าผิดปกติของรังสีกระจายกรณีที่วงแหวนไม่บังดวงอาทิตย์ โดยใช้สมการ

$$\text{Diffuse fraction} = \frac{E_{dh}}{E_{gh}} \quad (3.3)$$

$$\text{Clearness index} = \frac{E_{gh}}{E_{oh}} \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.27 แสดงข้อมูลผิดปกติเนื่องจากวงแหวนไม่บังดวงอาทิตย์

โดยปกติ เมื่อท้องฟ้ามีสภาพโปร่งใส ค่า Clearness index จะมีค่ามาก ปริมาณรังสีกระจายจะมีค่าน้อยซึ่งส่งผลให้ ค่า Diffuse fraction จะมีค่าน้อยตามกัน ดังนั้นข้อมูล diffuse illuminance ที่ขัดกับหลักความจริงดังกล่าว จะถือว่าเป็นข้อมูลที่เกิดจากการที่วงแหวนไม่บังดวงอาทิตย์ ข้อมูลในวงกลมแสดงดังรูปที่ 3.27 จึงต้องกำจัดออก

3.4 การทดสอบสมรรถนะแบบจำลองสำหรับคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียง

โดยทั่วไปข้อมูลปริมาณแสงสว่างธรรมชาติในรูป illuminance จะเป็นข้อมูลที่ได้จากการวัดบนพื้นราบ แต่ในการใช้งานจริงนั้น มีความต้องการข้อมูลบนพื้นเอียงที่ทำมุมต่างๆ กับแนวระดับ โดยเฉพาะที่มุมเอียง 90 องศาหรือระนาบในแนวตั้ง ซึ่งเป็นระนาบของช่องหน้าต่างของอาคารทั่วไป ปริมาณ global illuminance บนระนาบแนวตั้งเป็นข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณปริมาณแสงสว่างธรรมชาติที่ส่องผ่านหน้าต่างเข้าไปภายในอาคาร ซึ่งจะช่วยในการออกแบบอาคารประหยัดพลังงานที่อาศัยแสงสว่างธรรมชาติร่วมกับการใช้แสงสว่างจากไฟฟ้า

ปริมาณ global illuminance บนพื้นราบที่วัดได้ (E_{gh}) จะเป็นผลรวมของ direct illuminance (E_{bh}) และ diffuse illuminance (E_{dh}) ในการแปลง global illuminance บนพื้นราบให้ไปอยู่บนระนาบเอียงต่างๆ นั้น จะต้องทำการคิดแยกกันระหว่าง direct illuminance และ diffuse illuminance โดยการแปลงค่า direct illuminance บนพื้นราบให้เป็นค่าบนพื้นเอียงดังกล่าว สามารถทำได้โดยการคูณ direct illuminance ด้วยแฟกเตอร์การแปลง R_b (สมการ 2.8) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งดวงอาทิตย์ ตำแหน่งและมุมเอียงของพื้นเอียง ส่วนการแปลงค่า diffuse illuminance บนพื้นราบให้อยู่บนระนาบเอียงต่างๆ นั้นค่อนข้างจะยุ่งยาก เนื่องจากปริมาณ diffuse illuminance จากท้องฟ้ามีลักษณะไม่เหมือนกันทุกทิศทาง (anisotropic) ซึ่งเป็นผลมาจากเมฆและการกระเจิงของฝุ่นละอองในอากาศ ดังนั้นการจะคำนวณปริมาณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงจากข้อมูลบนพื้นราบนั้น จะต้องอาศัยแบบจำลองสำหรับคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียง มาช่วยในการแปลงค่า diffuse illuminance บนพื้นราบให้เป็นการคำนวณบนพื้นเอียงดังกล่าว

ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา มีผู้เสนอแบบจำลองสำหรับคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงจากข้อมูลการวัดบนพื้นราบขึ้นหลายแบบจำลอง โดยแบบจำลองดังกล่าวส่วนมากพัฒนามาจากข้อมูลการวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (irradiance) ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการคำนวณปริมาณแสงสว่าง diffuse illuminance บนพื้นเอียงได้เช่นกัน แบบจำลองดังกล่าวมีทั้งที่เป็นแบบจำลองอย่างง่าย คือพิจารณาว่ารังสีกระจายจากท้องฟ้าเหมือนกันทุกทิศทาง (isotropic) Lui and Jordan (1960) และแบบจำลองที่เป็นแบบ anisotropic เช่น แบบจำลองของ Klucher (1997), Hay (1979), Reindl (1990) และ Perez et al. (1990) เป็นต้น ซึ่งแบบจำลองส่วนใหญ่จะพัฒนาขึ้นในแถบทวีปยุโรปและอเมริกา โดยมีงานวิจัยมากมาย ที่แสดงการทดสอบการใช้งานแบบจำลองเหล่านี้ ในหลายๆ สถานที่ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นพื้นที่ทางยุโรปและอเมริกาและจะเป็นการทดสอบโดยการใช้ในการคำนวณปริมาณรังสีดวงอาทิตย์

(irradiance) สำหรับแถบทวีปเอเชีย นั้น ได้มีการแสดงการทดสอบแบบจำลองรังสีกระจายบนพื้นเอียงเหล่านี้เล็กน้อยเช่นกัน โดยทำการทดสอบที่ประเทศฮ่องกง (Danny H.W. Li and Joseph C. Lam)

ในงานวิจัยนี้ ส่วนแรกผู้วิจัยจะดำเนินการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองรังสีกระจายบนพื้นเอียงแบบต่างๆ ในหัวข้อ 2.5 สำหรับการนำมาคำนวณปริมาณแสงสว่างธรรมชาติในส่วนของ diffuse illuminance บนระนาบเอียงแนวตั้ง 90 องศา และระนาบเอียง 45 องศาจากแนวระดับ โดยใช้ข้อมูลการวัดจาก 4 สถานที่ ตามภูมิภาคหลักของประเทศไทย คือ เชียงใหม่ อุบลราชธานี นครปฐม และสงขลา ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวส่วนใหญ่นำมาจากการวัดปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ แต่สามารถนำมาใช้คำนวณปริมาณแสงสว่างธรรมชาติซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมรังสีดวงอาทิตย์ได้เช่นกัน ด้วยการแทนค่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (I) ในแบบจำลองด้วยปริมาณแสงสว่าง (E) โดยแบบจำลองที่เลือกนำมาทดสอบมีทั้งที่เป็นแบบ Isotropic และแบบ Anisotropic ดังนี้คือ

ตารางที่ 3.2 แสดงแบบจำลองแบบ Isotropic

แบบจำลองแบบ Isotropic	สมการ
Lui and Jordan (1960)	$E_{dp} = \frac{1}{2} E_{dh} (1 + \cos \beta)$
Koronakis (1986)	$E_{dp} = \frac{1}{3} E_{dh} (2 + \cos \beta)$
Tain (2001)	$E_{dp} = E_{dh} \left(1 - \frac{\beta}{180}\right)$
Badescu (2002)	$E_{dp} = E_{dh} \left(\frac{3 + \cos(2\beta)}{4}\right)$

ตารางที่ 3.3 แสดงแบบจำลองแบบ Anisotropic

แบบจำลองแบบ Anisotropic	สมการ
Bugler (1977)	$E_{dp} = \left[(E_{dh} - 0.05 \frac{E_{bT}}{\cos Z_s}) \frac{1 + \cos \beta}{2} \right] + 0.05 E_{bT} \cos \theta$
Temps and Coulson (1977)	$E_{dp} = \frac{1}{2} E_{dh} (1 + \cos \beta) \left[1 + \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] (1 + \cos^2 \theta_i \sin^3 Z_s)$
Klucher (1979)	$E_{dp} = E_{dh} \{ [(1 + \cos \beta) / 2] [1 - F' \sin^3 \beta / 2] [1 + F' (\cos^2 \theta_i) (\sin^3 Z_s)] \}$, $F' = 1 - (E_{dh} / E_{gh})^2$
Hay (1979)	$E_{dp} = E_{dh} \{ F'' (\cos(\theta_i) / \sin(\alpha_s) + [(1 - F'') (1 + \cos(\beta)) / 2] \}$, $F'' = I_{bh} / I_{oh}$
Wilmott (1982)	$E_{dp} = E_{dh} [(E_{bn} \cos \theta_i) / (E_{sc} \cos Z_s) + C_p (1 - E_{bn} / E_{sc})]$, $C_p = 1.0115 - 0.20293\beta - 0.080823\beta^2$

ตารางที่ 3.4 แสดงแบบจำลองแบบ Anisotropic (ต่อ)

Ma and Igbal (1983)	$E_{d\beta} = E_{dh} [M_T R_b + (1 - M_T) \cos^2(\beta/2)]$, $M_T = E_{gh} / E_{dh}$
Skartveit and Olseth (1986)	$E_{d\beta} = E_{dh} [F'' R_b + Z \cos \beta + (1 - F'' - Z)(1 + \cos \beta) / 2]$, $C = \max[(0.3 - 2F''), 0]$
Gueymart (1987)	$E_{d\beta} = E_{dh} [(1 - N_G) R_{d0} + N_G R_{d1}]$ $R_{d0} = \exp(a_0 + a_1 \cos \theta_i + a_2 \cos^2 \theta_i + a_3 \cos^3 \theta_i) + F(\beta)G(\alpha)$ $R_{d1} = \frac{(1 + \cos \beta)}{2} - \left\{ \frac{(\beta \cos \beta - \sin \beta)}{\pi} + \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \right\} \left(1 + \frac{3}{2b} \right)$
Reindl (1990)	$E_{d\beta} = E_{dh} [(1 - F'')(1 + f \sin^3(\beta/2))(1 + \cos(\beta)/2 + F''(\cos(\theta)/\sin(\alpha_s)))]$, $f = I_{bh} / I_{gh}$
Perez et al. (1990)	$E_{d\beta} = E_{dh} [0.5(1 + \cos \beta)(1 - F_1) + F_1(a_1 / a_2) + F_2 \sin \beta]$
Muneer (1990)	$E_{d\beta} = E_{dh} \left[T_F (1 - F'') + F'' \left(\frac{\cos \theta}{\cos Z_s} \right) \right]$ $T_F = \cos^2(\beta/2) + \frac{2b}{\pi(3 + 2b)} (\sin \beta - \beta \cos \beta - \pi \sin^2(\beta/2))$
AIT0a (Chirarattananon et al.)	$E_{d\beta} = E_{dh} [0.5(1 + \cos \beta)(1 - F_1) + F_1(a_1 / a_2) + F_2 \sin \beta]$
AIT0b (Chirarattananon et al.)	$E_{d\beta} = E_{dh} [0.5(1 + \cos \beta)(1 - F_1) + F_1(a_1 / a_2) + F_2 \sin \beta]$

แบบจำลอง AIT0a และ AIT0b คือแบบจำลองที่ใช้สมการเดียวกับแบบจำลองของ Perez แต่จะต่างกันตรงที่ค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งแบบจำลอง AIT0a และ AIT0b จะเป็นแบบจำลองที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ชุดใหม่ที่พัฒนาขึ้นจากข้อมูลการวัดที่สถาบัน Asian Institute of Technology (AIT) โดย Chirarattananon และคณะ (2006) โดยสัมประสิทธิ์แบบ AIT0a จะเป็นสัมประสิทธิ์ที่ได้มาจากการ regression ข้อมูลการวัดทั้งหมด ส่วนสัมประสิทธิ์แบบ AIT0b เป็นสัมประสิทธิ์แบบแบ่งเป็นพื้นเอียงกรณีด้านที่เห็นและไม่เห็นดวงอาทิตย์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะเรียกแบบจำลอง Perez ที่ใช้ร่วมกับสัมประสิทธิ์ชุดใหม่ทั้ง 2 แบบว่า แบบจำลอง AIT0a และแบบจำลอง AIT0b

3.4.1 การเตรียมข้อมูล

ข้อมูลปริมาณ diffuse illuminance บนระนาบเอียงกรณีต่างๆ จากทั้ง 4 สถานีวัด ที่นำมาใช้ในการทดสอบแบบจำลอง มีดังนี้คือ

1. diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้งทิศเหนือ (North-90) ปี 2003-2008
2. diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้งทิศใต้ (South-90) ปี 2003-2008
3. diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้งทิศตะวันออก (East-90) ปี 2003-2008
4. diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้งทิศตะวันตก (West-90) ปี 2003-2008
5. diffuse illuminance บนระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ (South-45) ปี 2007-2008

สำหรับที่สถานีนครปฐม นอกจากการทดสอบทั้ง 5 กรณีดังกล่าวแล้ว ผู้วิจัยได้แสดงการทดสอบในกรณีของระนาบเอียง 45 องศา ในทิศเหนือ (North-45) ทิศตะวันออก (East-45) และทิศตะวันตก (West-45) จากข้อมูลวัดในปี 2008 เพิ่มเติมด้วย

ข้อมูล diffuse illuminance บนพื้นเอียงกรณีต่างๆ ข้างต้นที่จะนำมาใช้ในการทดสอบแบบจำลอง สามารถคำนวณได้จากข้อมูลการวัดปริมาณแสงสว่างธรรมชาติของอุปกรณ์ตามหัวข้อ 3.1 ซึ่งข้อมูลที่วัดได้จากอุปกรณ์ดังกล่าวจะอยู่ในรูปความเข้มแสงสว่างรายชั่วโมง ประกอบด้วย ข้อมูล global illuminance บนพื้นราบ (E_{gh}) และบนพื้นเอียง (E_{gp}) ที่ระนาบแนวตั้งและระนาบเอียง 45 องศา และข้อมูล diffuse illuminance บนพื้นราบ (E_{dh}) จากข้อมูลดังกล่าวจะสามารถคำนวณค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียง (E_{dp}) ได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) คำนวณค่า direct illuminance บนพื้นราบจากผลต่างระหว่างค่า global illuminance และค่า diffuse illuminance บนพื้นราบ ดังสมการ

$$E_{bh} = E_{gh} - E_{dh} \quad (3.5)$$

เมื่อ E_{gh} = global illuminance บนพื้นราบ (klux)

E_{dh} = diffuse illuminance บนพื้นราบ (klux)

E_{bh} = direct illuminance บนพื้นราบ (klux)

2) คำนวณค่า direct illuminance บนพื้นเอียง

$$E_{b\beta} = E_{bh} R_b \quad (3.6)$$

เมื่อ $E_{b\beta}$ = direct illuminance บนพื้นเอียง β (klux)
 R_b = แฟกเตอร์สำหรับคำนวณแสงตรงบนพื้นเอียง (-)

โดยที่

$$R_b = \frac{\cos \theta_i}{\cos Z_s} \quad (3.7)$$

เมื่อ θ_i = มุมตกกระทบของแสงตรงบนพื้นเอียง (องศา)
 Z_s = มุมเซนนิซของดวงอาทิตย์ (องศา)

3) คำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงจากผลต่างระหว่างค่า global illuminance บนพื้นเอียงกับค่า direct illuminance บนพื้นเอียง

$$E_{d\beta} = E_{g\beta} - E_{b\beta} \quad (3.8)$$

เมื่อ $E_{d\beta}$ = diffuse illuminance บนพื้นเอียง β (klux)
 $E_{g\beta}$ = global illuminance บนพื้นเอียง β (klux)
 $E_{b\beta}$ = direct illuminance บนพื้นเอียง β (klux)

3.4.2 ผลการทดสอบแบบจำลองสำหรับคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียง

ในการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองสำหรับคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียง ผู้วิจัยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงที่คำนวณได้จากแบบจำลองต่างๆ กับค่าที่ทำการวัดจริง โดยการเปรียบเทียบจะอาศัยพารามิเตอร์ทางสถิติ 2 ตัว คือ Mean Bias Error (MBE) และ Root Mean Square Error (RMSE) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$MBE = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_{d,model,i} - E_{d,meas,i})}{\bar{E}_{d,meas}} \times 100\% \quad (3.9)$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_{d,model,i} - E_{d,meas,i})^2}}{\bar{E}_{d,meas}} \times 100\% \quad (3.10)$$

เมื่อ

- $E_{d,model,i}$ = ค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงที่คำนวณจากแบบจำลอง (klux)
- $E_{d,meas,i}$ = ค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด (klux)
- $\bar{E}_{d,meas}$ = ค่าเฉลี่ยของ diffuse illuminance บนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด (klux)
- N = จำนวนข้อมูล

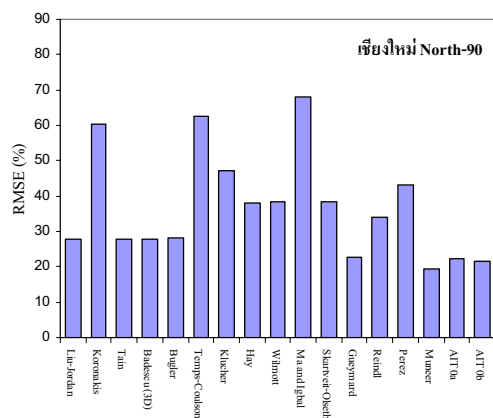
ค่า MBE จะมีทั้งค่าที่เป็นบวกและลบ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงว่าแบบจำลองนั้นให้ผลการทำนายที่สูงหรือต่ำกว่าค่าที่วัดจริง โดยค่า MBE ที่เป็นบวกจะแสดงว่าแบบจำลองให้ผลการคำนวณที่เกินค่าวัดจริง ส่วนค่า RMSE จะมีค่าเป็นบวกเสมอ โดยเป็นค่าที่แสดงการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองรอบๆ ค่าวัดจริง

ผลการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองสำหรับคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงแบบต่างๆ จะแสดงในรูปแบบตาราง และกราฟแท่ง ซึ่งแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ MBE และ RMSE ของแต่ละแบบจำลองในการคำนวณปริมาณ diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้งและระนาบเอียง 45 องศาจากแนวระดับ ผลการทดสอบของแต่ละสถานีแสดงดังต่อไปนี้

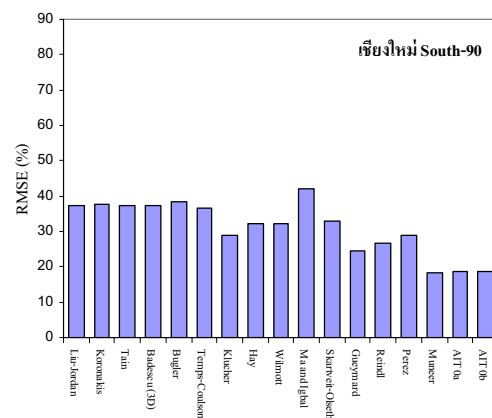
3.4.2.1 ผลการทดสอบที่สถานีเชียงใหม่

ตารางที่ 3.5 แสดงค่า RMSE (%) และ MBE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการทดสอบที่สถานีเชียงใหม่

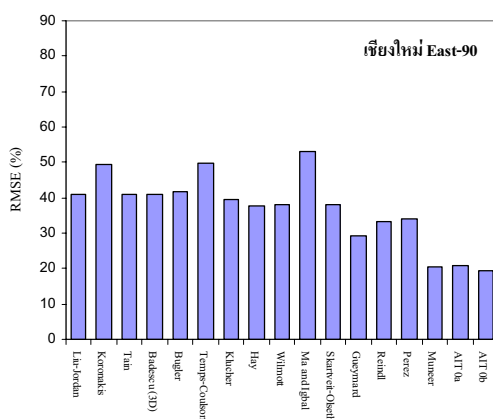
MODELS		North-90	South-90	East-90	West-90	South-45	All surfaces
Lui and Jordan	MBE (%)	12.20	-19.11	-8.47	-0.77	-16.35	-6.97
	RMSE (%)	27.97	37.39	40.80	36.55	26.81	34.74
Koronakis	MBE (%)	49.60	7.85	22.04	32.31	-11.57	20.69
	RMSE (%)	60.39	37.84	49.26	53.66	24.62	45.74
Tain	MBE (%)	12.20	-19.11	-8.47	-0.77	-26.50	-8.44
	RMSE (%)	27.97	37.39	40.80	36.55	33.67	35.73
Badescu (3D)	MBE (%)	12.20	-19.11	-8.47	-0.77	-26.50	-8.44
	RMSE (%)	27.97	37.39	40.80	36.55	33.67	35.73
Bugler	MBE (%)	12.04	-20.24	-9.09	-1.71	-18.61	-7.94
	RMSE (%)	28.11	38.48	41.61	37.44	28.87	35.69
Temps and Coulson	MBE (%)	52.07	14.52	31.30	43.15	-0.69	28.63
	RMSE (%)	62.73	36.70	49.88	57.02	16.74	45.56
Klucher	MBE (%)	36.29	1.47	14.69	25.09	-6.38	14.35
	RMSE (%)	47.02	28.87	39.44	42.25	17.08	35.50
Hay	MBE (%)	-21.14	-21.29	-20.37	-10.34	-12.21	-17.53
	RMSE (%)	37.98	32.30	37.57	34.44	18.92	32.99
Wilmott	MBE (%)	-22.35	-21.61	-21.21	-11.11	-16.48	-18.78
	RMSE (%)	38.23	32.33	37.95	35.05	21.69	33.65
Ma and Igbal	MBE (%)	-59.60	-28.30	-30.10	-19.43	-9.75	-29.89
	RMSE (%)	67.89	42.03	53.16	58.82	15.92	48.80
Skartveit and Olseth	MBE (%)	-26.31	-25.00	-24.55	-14.90	-12.93	-21.35
	RMSE (%)	38.31	32.78	37.99	34.10	18.98	33.20
Gueymard	MBE (%)	2.15	-14.31	-7.55	1.73	-11.66	-6.20
	RMSE (%)	22.55	24.47	29.44	25.38	18.89	24.60
Reindl	MBE (%)	-6.08	-10.42	-8.08	2.98	-10.40	-6.40
	RMSE (%)	34.00	26.75	33.25	33.75	17.79	29.62
Perez et al.	MBE (%)	-31.46	-19.60	-18.21	-9.47	-6.60	-17.51
	RMSE (%)	43.18	29.04	33.98	33.53	12.65	31.23
Muneer	MBE (%)	-4.72	-0.73	-2.35	10.22	-4.28	-0.10
	RMSE (%)	19.25	18.31	20.53	28.64	13.78	20.41
AIT0a (Chirarattananon et al.)	MBE (%)	-13.51	-8.58	-4.38	5.04	-2.09	-4.85
	RMSE (%)	22.19	18.56	20.70	22.95	13.40	19.83
AIT0b (Chirarattananon et al.)	MBE (%)	-13.43	-6.33	-5.95	4.00	-3.39	-5.01
	RMSE (%)	21.46	18.83	19.50	21.83	14.79	19.48
Number of data		15824	15821	15682	15633	5733	68693



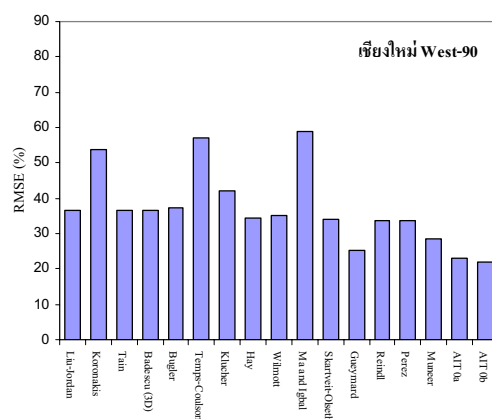
(a)



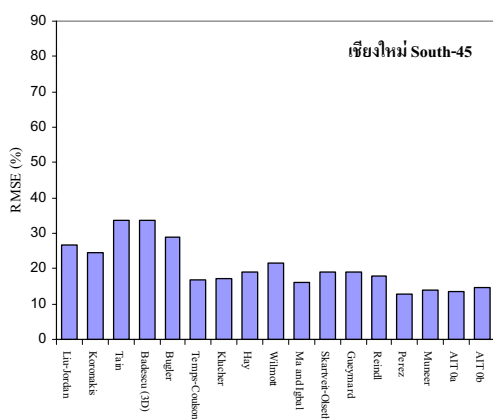
(b)



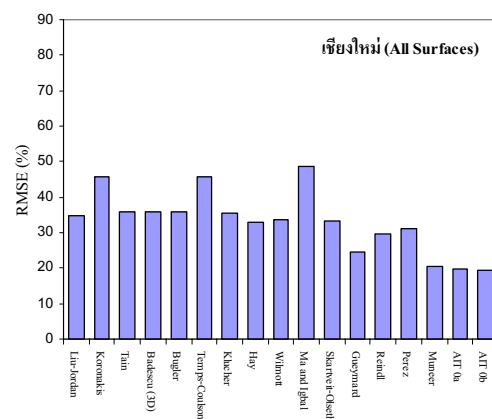
(c)



(d)

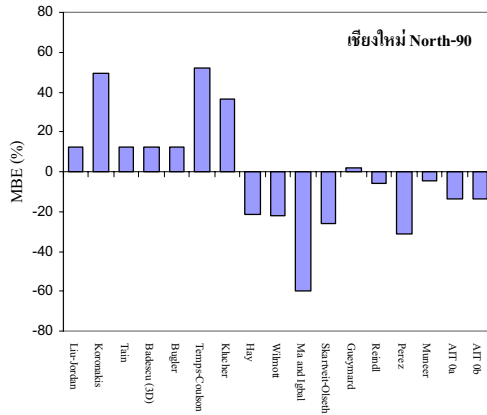


(e)

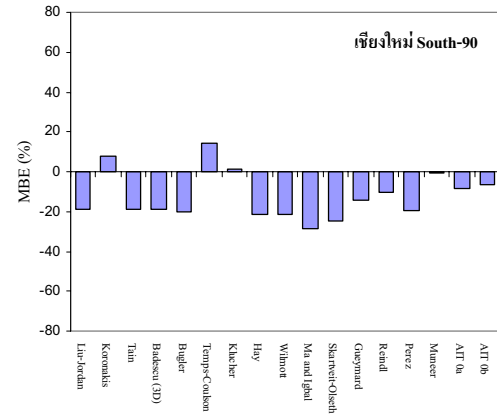


(f)

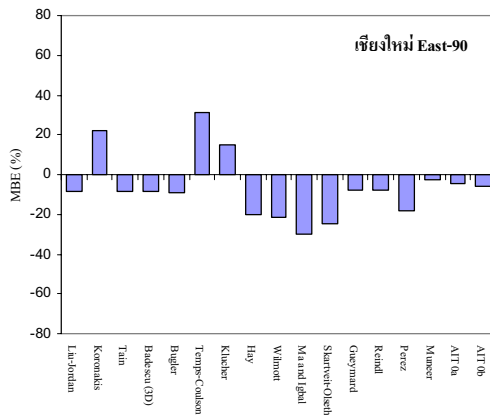
รูปที่ 3.28 กราฟแสดงค่า RMSE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการคำนวณ diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้ง ทิศเหนือ (a) ทิศใต้ (b) ทิศตะวันออก (c) ทิศตะวันตก (d) ระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ (e) และระนาบเอียงทั้งหมด (f) ที่ศูนย์ออดูนิมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่



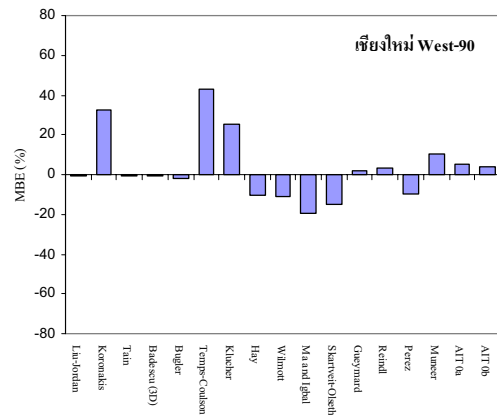
(a)



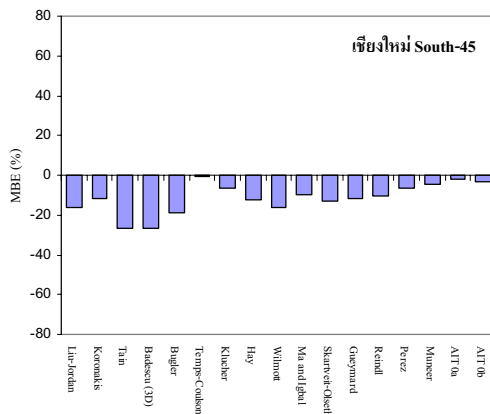
(b)



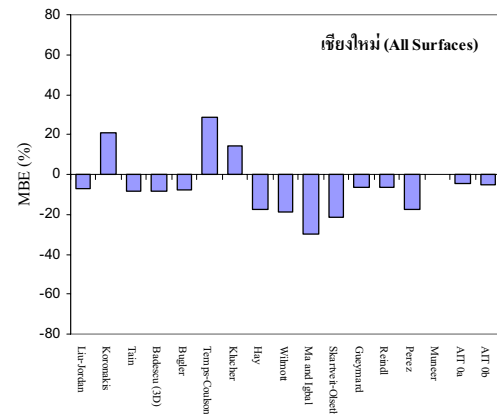
(c)



(d)



(e)



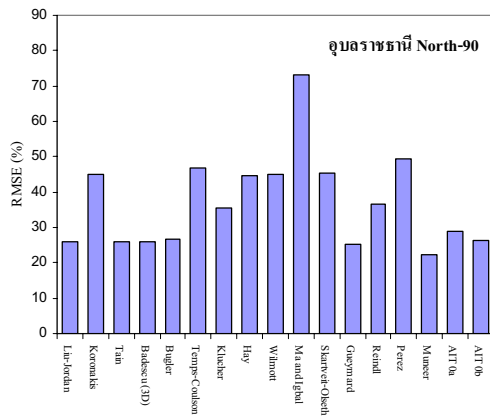
(f)

รูปที่ 3.29 กราฟแสดงค่า MBE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการคำนวณ diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้ง ทิศเหนือ (a) ทิศใต้ (b) ทิศตะวันออก (c) ทิศตะวันตก (d) ระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ (e) และระนาบเอียงทั้งหมด (f) ที่ศูนย์อู่ตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่

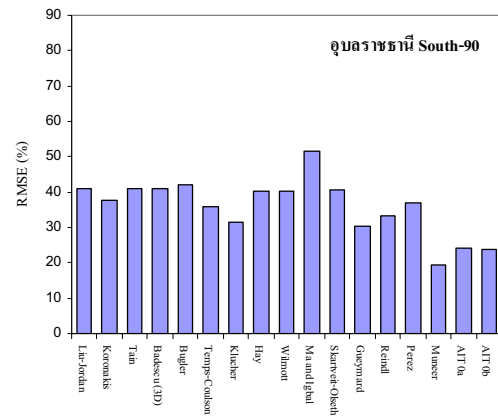
3.4.2.2 ผลการทดสอบที่สถานีอุบลราชธานี

ตารางที่ 3.6 แสดงค่า RMSE (%) และ MBE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการทดสอบที่
สถานีอุบลราชธานี

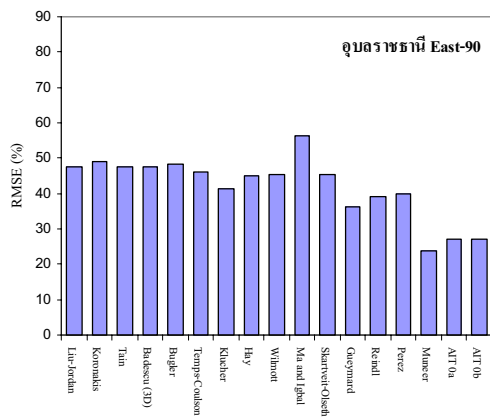
MODELS		North-90	South-90	East-90	West-90	South-45	All surfaces
Lui and Jordan	MBE (%)	-1.37	-24.24	-17.28	-8.46	-21.41	-14.80
	RMSE (%)	26.16	40.99	47.66	31.93	29.04	36.18
Koronakis	MBE (%)	31.50	1.01	10.30	22.05	-16.91	10.53
	RMSE (%)	44.93	37.60	48.96	42.69	26.20	40.94
Tain	MBE (%)	-1.37	-24.24	-17.28	-8.46	-30.94	-16.15
	RMSE (%)	26.16	40.99	47.66	31.93	36.47	37.23
Badescu (3D)	MBE (%)	-1.37	-24.24	-17.28	-8.46	-30.94	-16.15
	RMSE (%)	26.16	40.99	47.66	31.93	36.47	37.23
Bugler	MBE (%)	-1.65	-25.11	-17.77	-9.23	-23.22	-15.59
	RMSE (%)	26.53	41.94	48.43	32.54	30.65	37.01
Temps and Coulson	MBE (%)	33.80	5.89	16.68	33.78	-7.96	17.22
	RMSE (%)	46.75	35.84	46.27	46.51	18.71	39.95
Klucher	MBE (%)	21.25	-4.74	4.25	17.27	-12.76	5.46
	RMSE (%)	35.54	31.29	41.17	34.50	20.55	33.43
Hay	MBE (%)	-32.65	-31.58	-30.80	-17.56	-19.26	-27.03
	RMSE (%)	44.50	40.23	45.01	35.88	24.20	38.96
Wilmott	MBE (%)	-33.66	-31.84	-31.49	-17.88	-22.27	-27.93
	RMSE (%)	44.93	40.29	45.40	36.90	26.42	39.66
Ma and Igbal	MBE (%)	-65.40	-42.61	-44.56	-20.78	-18.33	-39.48
	RMSE (%)	73.25	51.53	56.31	64.31	23.02	55.22
Skartveit and Olseth	MBE (%)	-36.03	-34.17	-33.63	-20.68	-19.78	-29.64
	RMSE (%)	45.23	40.78	45.39	36.53	24.40	39.47
Gueymard	MBE (%)	-9.17	-21.41	-16.56	-4.48	-18.11	-14.14
	RMSE (%)	25.32	30.39	36.22	23.55	23.28	28.36
Reindl	MBE (%)	-19.53	-21.50	-19.79	-5.37	-17.56	-16.93
	RMSE (%)	36.71	33.47	39.02	32.46	22.88	33.62
Perez et al.	MBE (%)	-39.33	-31.05	-30.01	-13.66	-14.53	-26.53
	RMSE (%)	49.36	36.85	39.94	35.59	18.61	37.06
Muneer	MBE (%)	-12.63	-10.23	-11.57	6.00	-11.18	-7.84
	RMSE (%)	22.25	19.36	23.78	30.88	17.16	22.91
AIT0a (Chirarattananon et al.)	MBE (%)	-21.31	-19.13	-16.35	1.14	-10.17	-13.56
	RMSE (%)	28.85	24.12	27.15	21.52	15.51	23.95
AIT0b (Chirarattananon et al.)	MBE (%)	-19.91	-16.50	-17.62	1.55	-10.65	-12.92
	RMSE (%)	26.31	23.90	27.10	22.50	17.17	23.83
Number of data		15189	15212	15216	15093	5289	65999



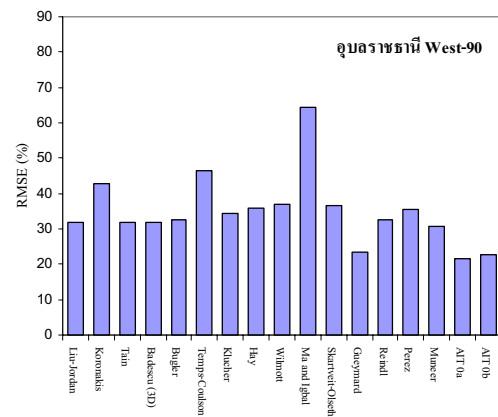
(a)



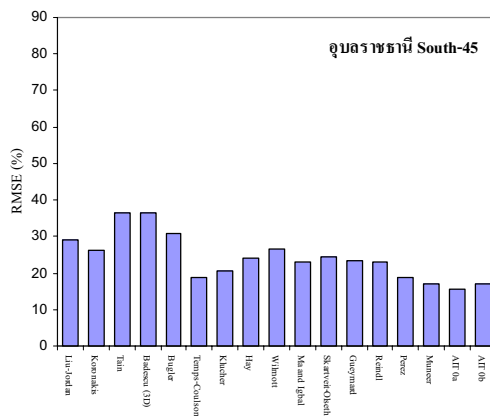
(b)



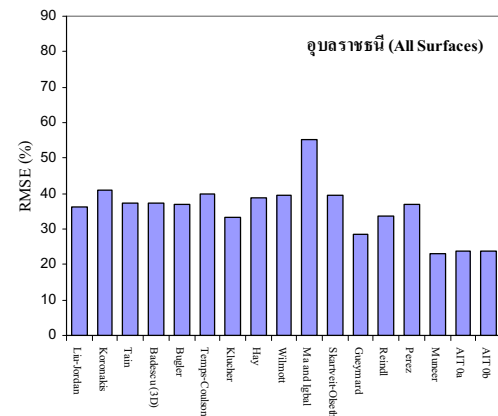
(c)



(d)

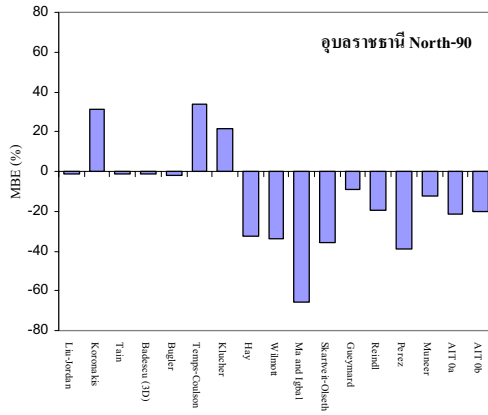


(e)

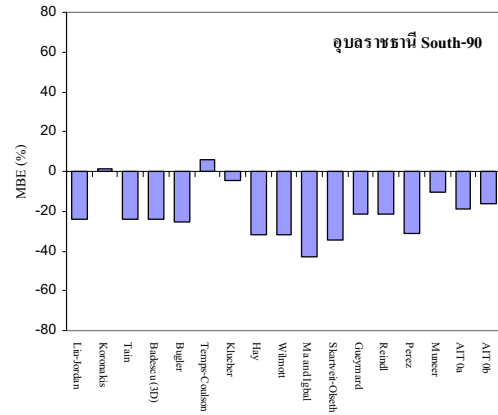


(f)

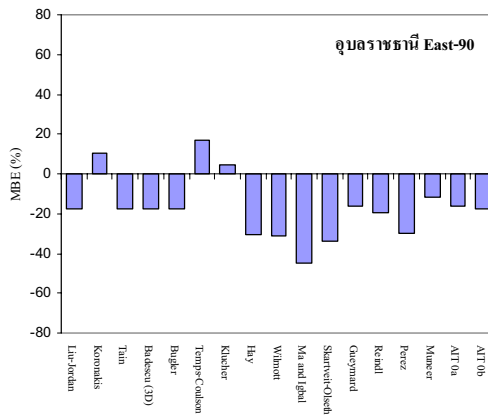
รูปที่ 3.30 กราฟแสดงค่า RMSE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการคำนวณ diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้ง ทิศเหนือ (a) ทิศใต้ (b) ทิศตะวันออก (c) ทิศตะวันตก (d) ระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ (e) และระนาบเอียงทั้งหมด (f) ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี



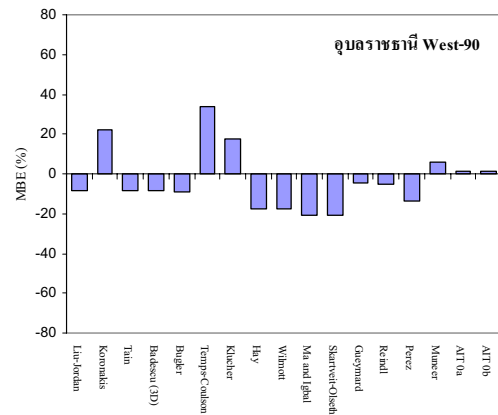
(a)



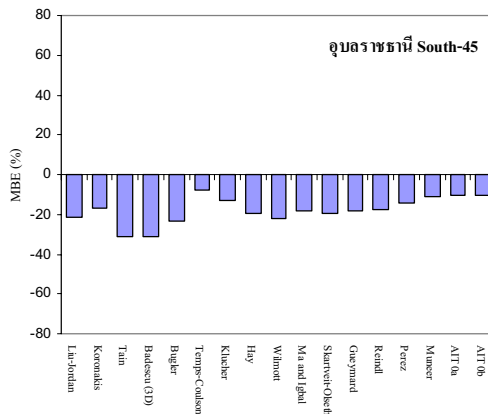
(b)



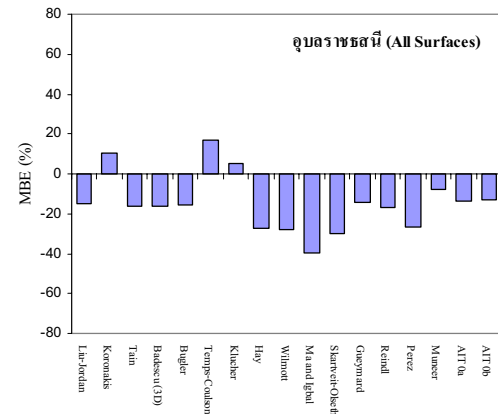
(c)



(d)



(e)



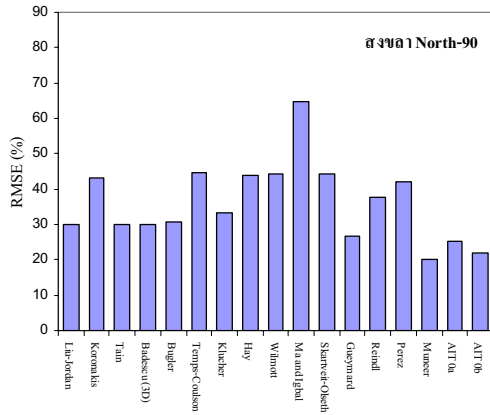
(f)

รูปที่ 3.31 กราฟแสดงค่า MBE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการคำนวณ diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้ง ทิศเหนือ (a) ทิศใต้ (b) ทิศตะวันออก (c) ทิศตะวันตก (d) ระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ (e) และระนาบเอียงทั้งหมด (f) ที่ศูนย์อู่ศูนย์นิคมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี

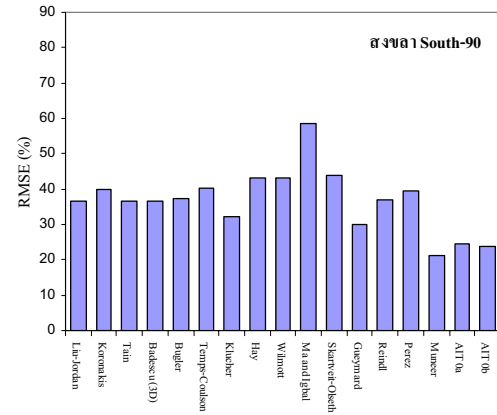
3.4.2.3 ผลการทดสอบที่สถานีสงขลา

ตารางที่ 3.7 แสดงค่า RMSE (%) และ MBE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการทดสอบที่สถานีสงขลา

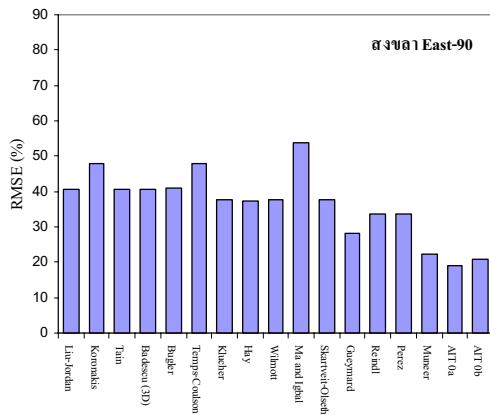
MODELS		North-90	South-90	East-90	West-90	South-45	All surfaces
Lui and Jordan	MBE (%)	-6.61	-15.44	-10.80	-7.40	-18.67	-11.40
	RMSE (%)	30.09	36.54	40.62	38.27	28.96	35.37
Koronakis	MBE (%)	24.52	12.75	18.94	23.47	-14.02	14.94
	RMSE (%)	43.04	39.85	47.75	48.80	26.33	42.15
Tain	MBE (%)	-6.61	-15.44	-10.80	-7.40	-28.54	-12.81
	RMSE (%)	30.09	36.54	40.62	38.27	36.23	36.41
Badescu (3D)	MBE (%)	-6.61	-15.44	-10.80	-7.40	-28.54	-12.81
	RMSE (%)	30.09	36.54	40.62	38.27	36.23	36.41
Bugler	MBE (%)	-7.11	-16.12	-11.24	-7.95	-20.54	-12.14
	RMSE (%)	30.83	37.42	41.15	38.90	30.35	36.17
Temps and Coulson	MBE (%)	27.15	16.54	27.82	33.25	-6.93	21.30
	RMSE (%)	44.57	40.25	47.80	51.11	21.93	42.42
Klucher	MBE (%)	13.89	3.95	12.32	16.54	-11.79	8.19
	RMSE (%)	33.26	32.11	37.66	38.79	22.83	33.61
Hay	MBE (%)	-31.06	-31.73	-21.23	-19.68	-20.53	-25.23
	RMSE (%)	43.74	43.14	37.48	39.05	27.54	38.98
Wilmott	MBE (%)	-32.02	-32.12	-21.98	-20.35	-23.62	-26.26
	RMSE (%)	44.10	43.27	37.76	39.44	29.59	39.52
Ma and Igbal	MBE (%)	-57.74	-49.72	-31.25	-29.59	-22.45	-39.33
	RMSE (%)	64.91	58.37	53.87	63.12	28.74	55.53
Skartveit and Olseth	MBE (%)	-35.31	-35.52	-25.18	-23.80	-21.22	-28.78
	RMSE (%)	44.26	43.87	37.74	39.48	27.71	39.42
Gueymard	MBE (%)	-12.86	-17.91	-8.87	-6.53	-18.21	-12.59
	RMSE (%)	26.84	29.84	28.20	27.79	25.22	27.79
Reindl	MBE (%)	-19.17	-20.96	-9.85	-7.88	-18.88	-15.18
	RMSE (%)	37.57	37.01	33.49	35.70	26.31	34.57
Perez et al.	MBE (%)	-35.23	-33.19	-19.13	-19.18	-17.12	-25.38
	RMSE (%)	42.18	39.63	33.66	37.23	22.38	35.92
Muneer	MBE (%)	-10.73	-11.89	-0.97	1.56	-11.94	-6.51
	RMSE (%)	19.95	21.25	22.22	26.00	19.72	21.96
AIT0a (Chirarattananon et al.)	MBE (%)	-18.29	-18.32	-4.07	-3.02	-10.54	-10.96
	RMSE (%)	25.25	24.39	18.98	22.03	15.42	21.64
AIT0b (Chirarattananon et al.)	MBE (%)	-15.44	-15.45	-6.75	-2.09	-8.78	-9.85
	RMSE (%)	21.84	23.62	20.72	23.74	16.32	21.61
Number of data		13545	13563	13533	13510	4999	59150



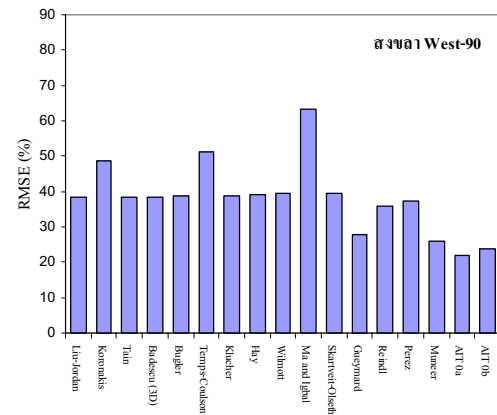
(a)



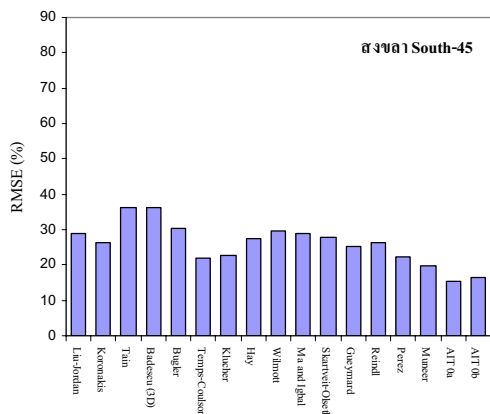
(b)



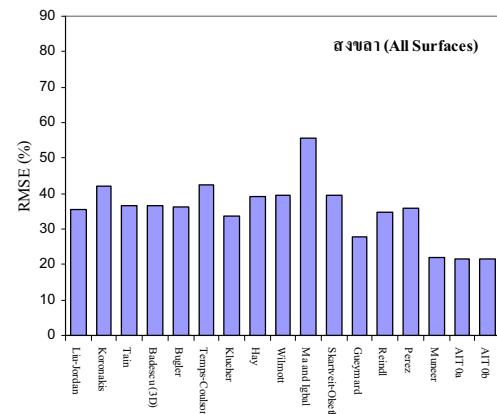
(c)



(d)

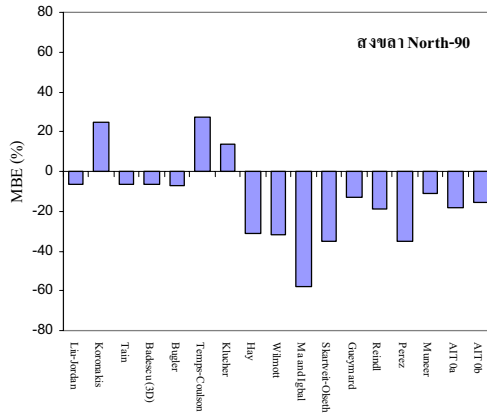


(e)

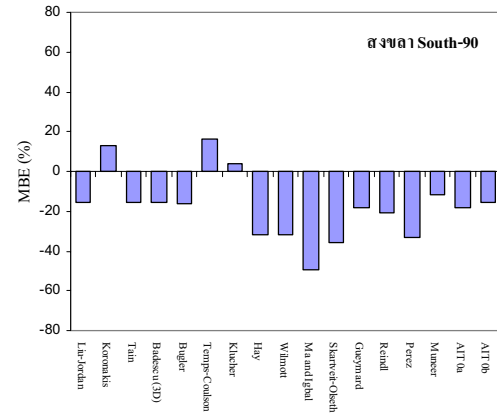


(f)

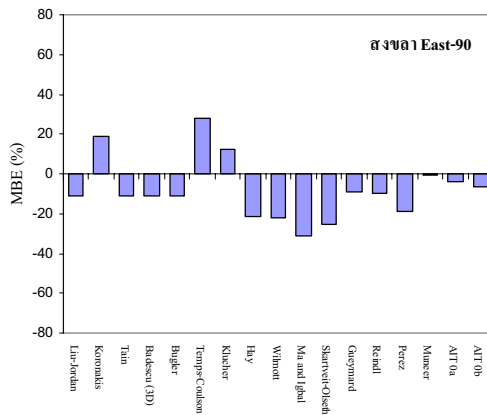
รูปที่ 3.32 กราฟแสดงค่า RMSE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการคำนวณ diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้ง ทิศเหนือ (a) ทิศใต้ (b) ทิศตะวันออก (c) ทิศตะวันตก (d) ระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ (e) และระนาบเอียงทั้งหมด (f) ที่ศูนย์อู่ตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา



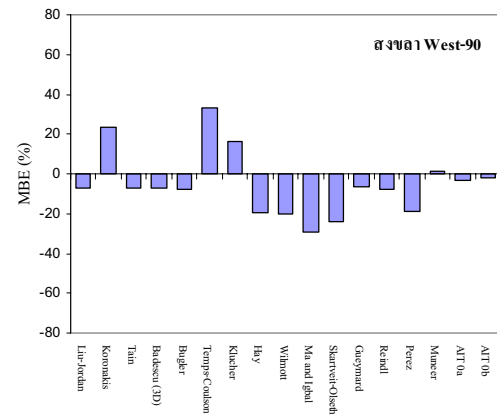
(a)



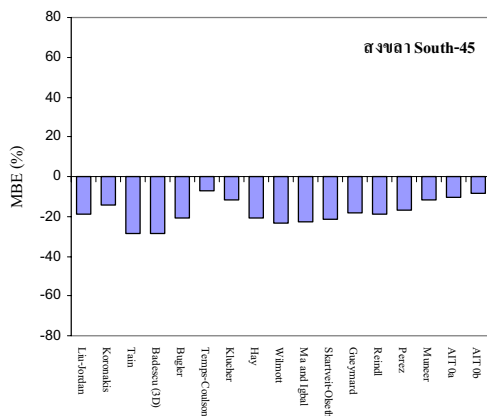
(b)



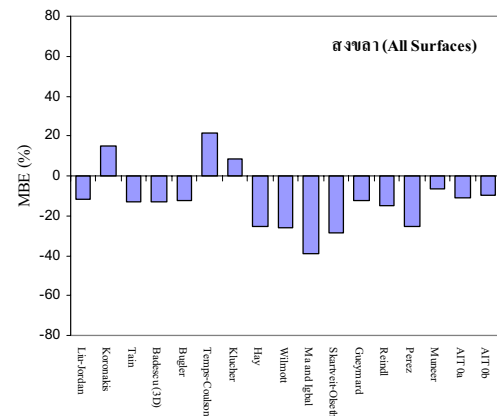
(c)



(d)



(e)



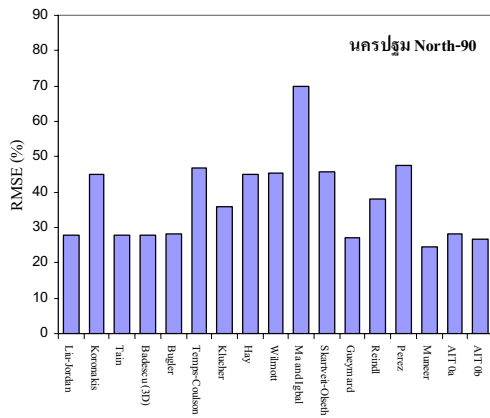
(f)

รูปที่ 3.33 กราฟแสดงค่า MBE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการคำนวณ diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้ง ทิศเหนือ (a) ทิศใต้ (b) ทิศตะวันออก (c) ทิศตะวันตก (d) ระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ (e) และระนาบเอียงทั้งหมด (f) ที่ศูนย์อุตสาหกรรมวิทยากราคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา

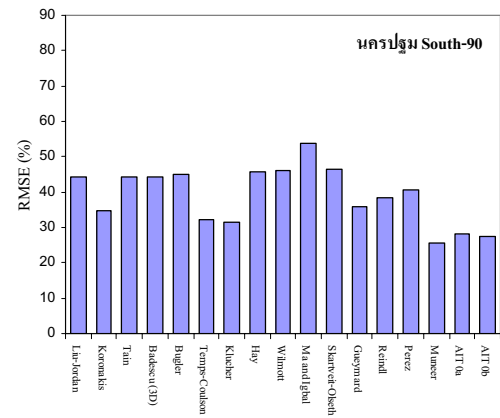
3.4.2.4 ผลการทดสอบที่สถานีนครปฐม

ตารางที่ 3.8 แสดงค่า RMSE (%) และ MBE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการทดสอบที่สถานีนครปฐม

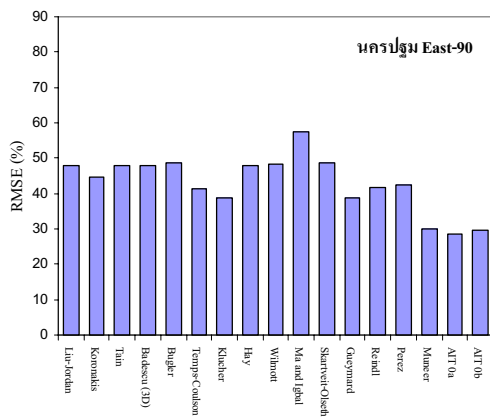
MODELS		North-90	South-90	East-90	West-90	North-45	East-45	West-45	South-45	All surfaces
Lui and Jordan	MBE (%)	-2.70	-30.74	-23.40	-8.19	-19.59	-27.27	-18.15	-26.41	-19.48
	RMSE (%)	27.91	44.27	47.99	37.07	29.50	37.43	31.09	32.21	37.99
Koronakis	MBE (%)	29.73	-7.65	2.13	22.42	-14.99	-23.11	-13.47	-22.20	1.25
	RMSE (%)	44.97	34.85	44.78	45.36	26.71	34.50	28.60	28.81	38.40
Tain	MBE (%)	-2.70	-30.74	-23.40	-8.19	-29.34	-36.10	-28.08	-35.34	-22.17
	RMSE (%)	27.91	44.27	47.99	37.07	36.89	44.47	38.04	40.12	40.14
Badescu (3D)	MBE (%)	-2.70	-30.74	-23.40	-8.19	-29.34	-36.10	-28.08	-35.34	-22.17
	RMSE (%)	27.91	44.27	47.99	37.07	36.89	44.47	38.04	40.12	40.14
Bugler	MBE (%)	-3.00	-31.52	-23.85	-8.83	-20.87	-28.39	-19.73	-28.34	-20.33
	RMSE (%)	28.33	45.11	48.57	37.58	30.79	38.72	32.59	33.93	38.85
Temps and Coulson	MBE (%)	32.00	-3.00	9.45	31.96	-12.10	-14.84	-2.99	-13.28	7.76
	RMSE (%)	46.65	32.13	41.49	48.43	24.41	25.39	21.55	20.87	35.95
Klucher	MBE (%)	20.05	-12.49	-2.41	17.34	-15.03	-19.88	-9.15	-17.73	-1.95
	RMSE (%)	35.98	31.48	38.89	38.34	25.62	28.91	23.09	23.31	32.77
Hay	MBE (%)	-32.81	-37.74	-34.34	-18.83	-29.87	-31.09	-20.40	-24.57	-30.02
	RMSE (%)	45.08	45.63	47.99	40.88	35.27	35.87	27.10	28.72	41.09
Wilmott	MBE (%)	-33.90	-38.04	-35.04	-19.10	-33.39	-34.09	-23.75	-27.21	-31.30
	RMSE (%)	45.50	46.00	48.42	41.55	38.02	38.37	29.65	30.95	42.13
Ma and Igbal	MBE (%)	-63.58	-45.68	-43.09	-27.37	-42.38	-35.03	-22.84	-22.56	-40.24
	RMSE (%)	69.89	53.71	57.36	63.62	45.49	39.27	32.72	27.75	52.94
Skartveit and Olseth	MBE (%)	-35.81	-39.83	-36.72	-21.67	-30.40	-31.57	-20.93	-24.93	-31.94
	RMSE (%)	45.78	46.32	48.56	41.51	35.49	36.09	27.35	28.89	41.61
Gueymard	MBE (%)	-10.12	-27.88	-21.25	-5.14	-24.52	-27.66	-17.69	-23.00	-19.01
	RMSE (%)	26.89	35.99	38.65	30.43	30.30	33.40	25.16	26.97	32.13
Reindl	MBE (%)	-19.34	-28.14	-23.75	-6.13	-28.10	-29.49	-18.60	-22.94	-21.45
	RMSE (%)	38.03	38.31	41.57	37.10	33.78	34.45	25.69	27.31	36.25
Perez et al.	MBE (%)	-39.10	-34.90	-30.74	-16.96	-32.46	-29.20	-18.67	-19.14	-28.72
	RMSE (%)	47.49	40.60	42.27	40.41	35.91	32.28	23.42	22.84	38.18
Muneer	MBE (%)	-14.19	-18.40	-16.75	3.15	-21.41	-22.45	-11.23	-16.35	-13.83
	RMSE (%)	24.35	25.50	30.07	32.33	26.51	27.97	19.85	20.47	26.62
AIT0a (Chirarattananon et al.)	MBE (%)	-20.67	-23.14	-16.62	-0.91	-26.55	-24.40	-13.58	-14.60	-16.79
	RMSE (%)	28.11	28.05	28.48	25.54	28.86	27.03	17.20	18.35	26.03
AIT0b (Chirarattananon et al.)	MBE (%)	-19.30	-20.18	-18.25	0.54	-18.74	-21.23	-10.20	-14.47	-15.17
	RMSE (%)	26.64	27.32	29.63	27.24	24.05	25.94	17.69	19.29	25.93
Number of data		14339	14428	14244	14283	2603	2603	2603	4667	69770



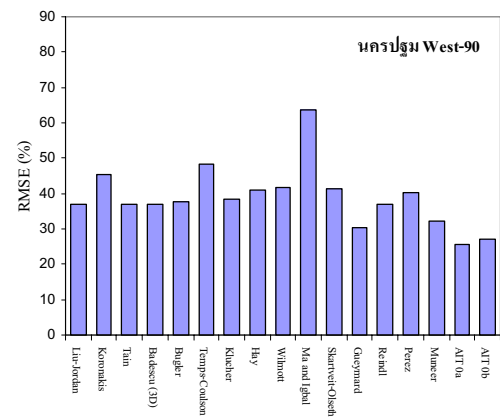
(a)



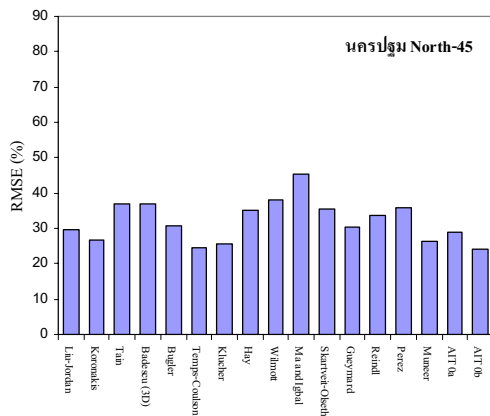
(b)



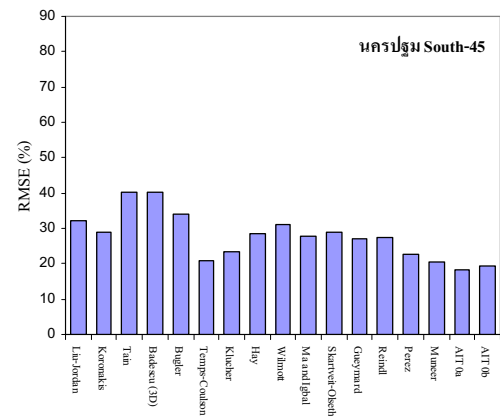
(c)



(d)

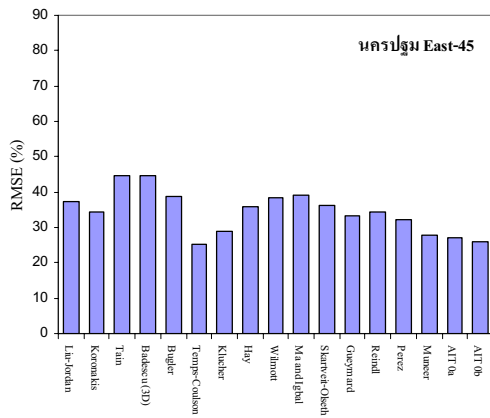


(e)

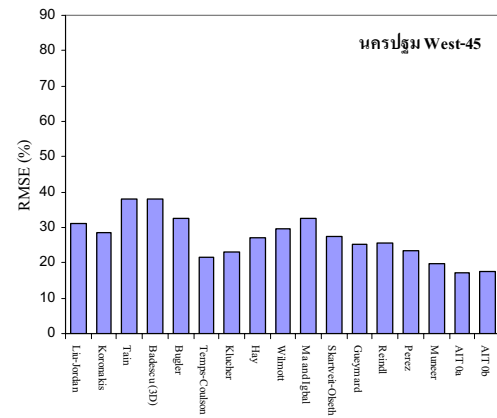


(f)

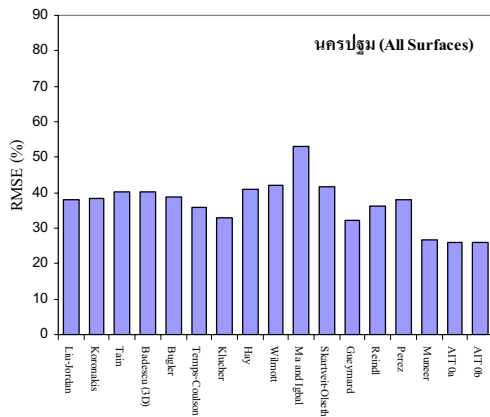
รูปที่ 3.34 กราฟแสดงค่า RMSE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการคำนวณ diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้ง ทิศเหนือ (a) ทิศใต้ (b) ทิศตะวันออก (c) ทิศตะวันตก (d) และระนาบเอียง 45 องศา ทิศเหนือ (e) ทิศใต้ (f) ที่สถานีนครปฐม



(a)

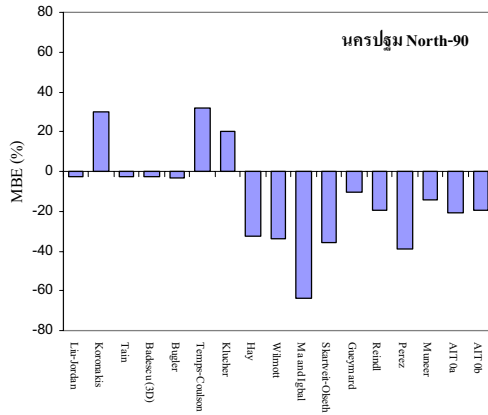


(b)

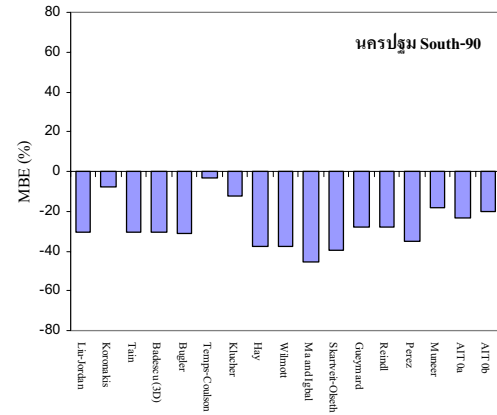


(c)

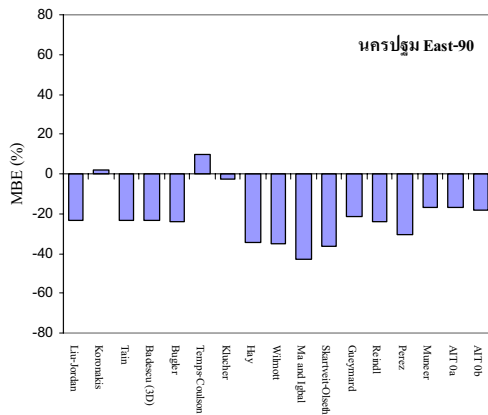
รูปที่ 3.35 กราฟแสดงค่า RMSE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการคำนวณ diffuse illuminance บนระนาบเอียง 45 องศา ทิศตะวันออก (a) ทิศตะวันตก (b) และระนาบเอียงทั้งหมด (c) ที่สถานีนครปฐม



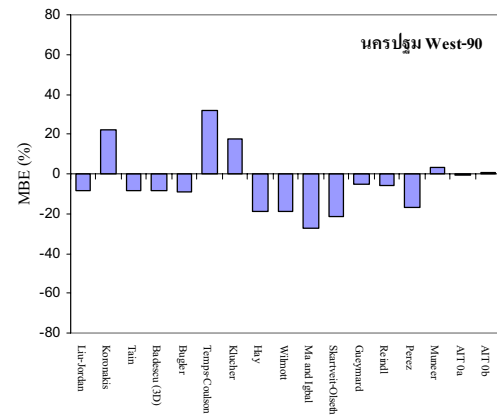
(a)



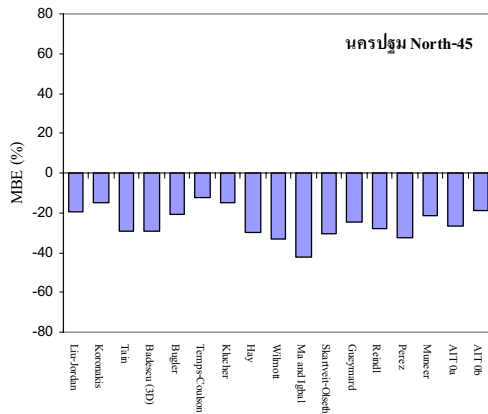
(b)



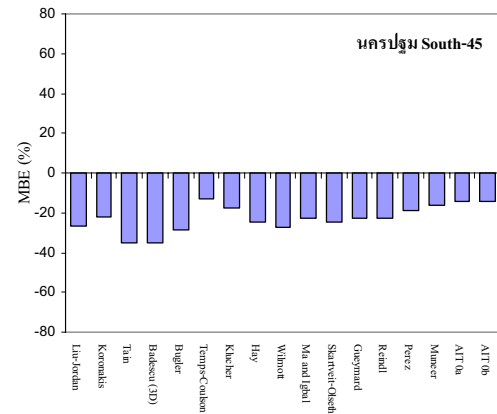
(c)



(d)

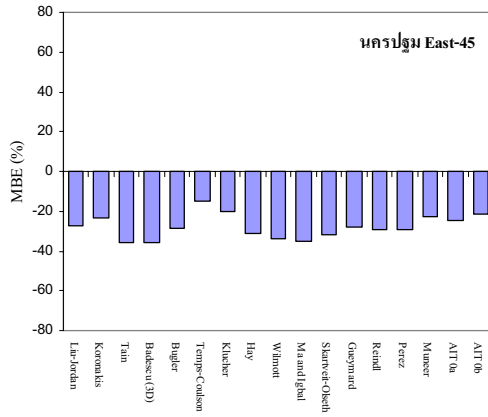


(e)

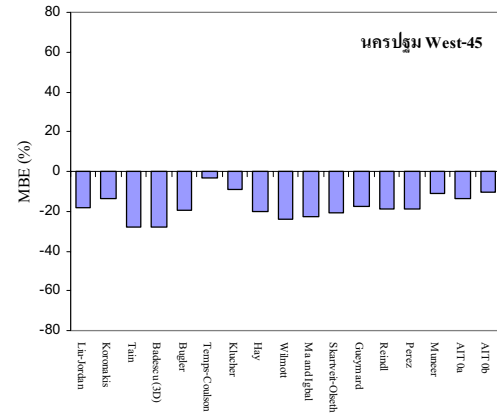


(f)

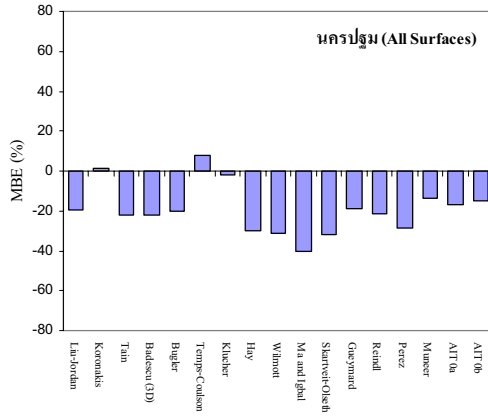
รูปที่ 3.36 กราฟแสดงค่า MBE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการคำนวณ diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้ง ทิศเหนือ (a) ทิศใต้ (b) ทิศตะวันออก (c) ทิศตะวันตก (d) และระนาบเอียง 45 องศา ทิศเหนือ (e) ทิศใต้ (f) ที่สถานีนครปฐม



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 3.37 กราฟแสดงค่า MBE (%) ของแต่ละแบบจำลองในการคำนวณ diffuse illuminance บนระนาบเอียง 45 องศา ทิศตะวันออก (a) ทิศตะวันตก (b) และระนาบเอียงทั้งหมด (c) ที่สถานีนครปฐม

ผลการทดสอบแบบจำลองต่างๆ สำหรับคำนวณปริมาณ diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้งและระนาบเอียง 45 องศา จากข้อมูลวัดทั้ง 4 สถานี สรุปได้ดังนี้

1) สถานีเชียงใหม่

ผลการเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance ที่คำนวณจากแบบจำลองแต่ละแบบกับข้อมูลการวัดบนระนาบแนวตั้ง 4 ทิศ และระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ ที่สถานีเชียงใหม่ พบว่า ในกรณีของการคำนวณ diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้งในทิศเหนือและทิศใต้ แบบจำลอง Muneer จะให้ผลการคำนวณที่แม่นยำที่สุด (ทิศเหนือ RMSE = 19.25%, MBE = -4.72 ทิศใต้ RMSE = 18.31%, MBE = -0.73) ส่วนกรณีระนาบแนวตั้งในทิศตะวันออกและทิศตะวันตก แบบจำลองที่ให้ผลการคำนวณแม่นยำที่สุดคือ แบบจำลอง AIT0b ที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่พัฒนาขึ้นใหม่จากข้อมูลวัดในประเทศไทยที่สถาบัน AIT (ทิศตะวันออก RMSE = 19.50%, MBE = -5.95 ทิศตะวันตก RMSE = 21.83%, MBE = 4.00) ส่วนกรณีระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้นั้น พบว่าแบบจำลอง Perez ที่ใช้สัมประสิทธิ์แบบดั้งเดิมจะให้ผลการคำนวณสอดคล้องกับค่าจากการวัดมากที่สุด (RMSE = 12.65%, MBE = -6.60%) ทั้งนี้แบบจำลองส่วนใหญ่จะให้ผลการคำนวณที่มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าการคำนวณในกรณีระนาบแนวตั้ง โดยผลการคำนวณ diffuse illuminance บนระนาบเอียง 45 องศา ของแต่ละแบบจำลองจะมีค่า RMSE น้อยกว่า 30% (ยกเว้นแบบจำลอง Tain และ Badescu) นอกจากนี้พบว่า ผลการคำนวณของแบบจำลองทุกแบบ จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริง เมื่อพิจารณาที่ค่า MBE ของการคำนวณบนระนาบแนวตั้งพบว่าแบบจำลอง Koronakis, Temps and Coulson และ Klucher จะแสดงผลการคำนวณที่สูงกว่าค่าที่วัดได้จริง นอกจากนี้พบว่า แบบจำลองที่เป็นแบบ isotropic ประกอบด้วยแบบจำลอง Lui and Jordan, Tain และ Badescu จะแสดงผลการคำนวณที่ดีในกรณีระนาบแนวตั้งทิศเหนือ โดยมีค่า RMSE ต่ำกว่า 30% ทั้งนี้เนื่องจากในประเทศไทยดวงอาทิตย์จะอยู่ทางทิศใต้เป็นส่วนใหญ่ในรอบปี ซึ่งจะมีเฉพาะช่วงเดือนพฤษภาคม-กรกฎาคมเท่านั้น ที่ดวงอาทิตย์อยู่ทางทิศเหนือ ทำให้พื้นเอียงในทิศเหนือไม่ได้รับอิทธิพลของแสงจากบริเวณรอบๆ ดวงอาทิตย์ (circumsolar) สมมติฐานแบบ isotropic จึงค่อนข้างเป็นจริงสำหรับการคำนวณบนระนาบแนวตั้งทิศเหนือ

เมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบโดยรวมของการคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงทั้งหมด (All surfaces) พบว่า แบบจำลองที่ให้ผลการคำนวณที่ค่อนข้างสอดคล้องกับค่าจากการวัดมากกว่าแบบจำลองอื่นๆ คือ แบบจำลอง Muneer, AIT0a และ AIT0b โดยมีความคลาดเคลื่อนของการคำนวณโดยรวมในรูป RMSE อยู่ในช่วง 19.48-20.41% โดยแบบจำลอง AIT0b จะให้ผลที่แม่นยำที่สุด

ส่วนแบบจำลองอื่นที่ให้ผลการคำนวณที่ีร็องลงมาคือ แบบจำลอง Gueymard มีค่า RMSE โดยรวมอยู่ที่ 24.60% สำหรับแบบจำลองแบบ isotropic ประกอบด้วย Lui and Jordan, Tain และ Badescu กับแบบจำลองแบบ anisotropic คือ แบบจำลอง Bugler และ Klucher จะแสดงผลการคำนวณที่มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับเดียวกัน มีค่า RMSE อยู่ในช่วง 34-35% ส่วนแบบจำลองที่ให้ผลการคำนวณที่ไม่สอดคล้องกับค่าจากการวัด คือ แบบจำลอง Koronakis, Temps and Coulson และ Ma and Igbal

2) สถานีอุบลราชธานี

ผลการทดสอบแบบจำลองสำหรับคำนวณ diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้งและระนาบเอียง 45 องศา จากข้อมูลการวัดที่จังหวัดอุบลราชธานี พบว่า แบบจำลองที่ให้ผลการคำนวณ diffuse illuminance ที่สอดคล้องกับค่าจากการวัดมากที่สุด กรณีระนาบแนวตั้งทิศเหนือ ทิศใต้ และทิศตะวันออก คือ แบบจำลอง Muneer โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนในรูป RMSE ในช่วง 19-23% โดยผลที่สอดคล้องมากที่สุดที่ได้จากแบบจำลองนี้จะอยู่ที่ระนาบแนวตั้งทิศใต้ อย่างไรก็ตามแบบจำลองดังกล่าวจะให้ผลการคำนวณที่ต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริง โดยค่า MBE อยู่ในช่วง -10.23% ถึง -12.63% ส่วนกรณีการคำนวณบนระนาบแนวตั้งทิศตะวันตกและระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้นั้น แบบจำลองที่แสดงผลการคำนวณแม่นยำที่สุด คือ แบบจำลอง AIT0a โดยผลการคำนวณที่ระนาบแนวตั้งทิศตะวันตก จะมีค่า RMSE = 21.52%, MBE = 1.14% และการคำนวณที่ระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ จะมี RMSE = 15.51%, MBE = -10.17% ส่วนแบบจำลอง AIT0b จะให้ผลการคำนวณที่ดีในระดับใกล้เคียงกันกับ แบบจำลอง AIT0a สำหรับกรณีของการคำนวณที่ระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้นั้น พบว่าผลการคำนวณของทุกแบบจำลองจะให้ผลที่ต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริงทั้งหมด แต่ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองส่วนใหญ่เมื่อเทียบกับการคำนวณบนระนาบแนวตั้งจะมีค่าลดลง โดยผลการคำนวณของแบบจำลองทั้งหมด (ยกเว้นแบบจำลอง Tain, Badescu ,Bugler) จะมีค่า RMSE ต่ำกว่า 30% สำหรับแบบจำลองแบบ isotropic ได้แก่ แบบจำลอง Lui and Jordan, Tain และ Badescu จะให้ผลการคำนวณที่ดี ในกรณีของระนาบแนวตั้งทิศเหนือเท่านั้น

สำหรับผลการทดสอบโดยรวมของการคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงทั้งหมด (All surfaces) พบว่า แบบจำลอง Muneer, AIT0a และ AIT0b ยังคงแสดงผลการคำนวณที่ดีกว่าแบบจำลองอื่นๆ ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวจะมีค่า RMSE ของการคำนวณโดยรวมอยู่ในช่วง 22.91-23.95% โดยแบบจำลองที่ให้ผลแม่นยำที่สุดคือ แบบจำลอง Muneer สำหรับแบบจำลองอื่นที่ให้ผลการคำนวณที่ีร็องลงมาคือ แบบจำลอง Gueymard, Reindl และ Klucher ตามลำดับ โดยมีค่า RMSE ในช่วง 28-33%

ส่วนแบบจำลองอื่นๆ ประกอบด้วย แบบจำลอง Lui and Jordan, Tain, Badescu, Bugler, Temps and Coulson, Hay, Wilmott, Skartveit and Olseth และ Perez จะมีค่า RMSE ของการคำนวณโดยรวมอยู่ในช่วง 36-40% สำหรับแบบจำลองที่ให้ผลการคำนวณที่ไม่สอดคล้องกับค่าจากการวัดมากที่สุดคือแบบจำลอง Ma and Iqbal โดยมีความคลาดเคลื่อนในรูป RMSE สูงถึง 55.22%

3) สถานีสงขลา

ผลการทดสอบแบบจำลองสำหรับการคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียง จากข้อมูลการวัดในภาคใต้ ที่จังหวัดสงขลา พบว่า แบบจำลองของ Muneer มีผลการคำนวณที่สอดคล้องกับข้อมูลการวัดมากที่สุด ทั้งในกรณีระนาบแนวตั้งทิศเหนือและทิศใต้ โดยมี RMSE = 19.95%, MBE = -10.73% และ RMSE = 21.25%, MBE = -11.89% ส่วนผลการคำนวณบนระนาบแนวตั้งในทิศตะวันออกกับทิศตะวันตก และกรณีระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ แบบจำลองที่ให้ผลแม่นยำที่สุดคือ แบบจำลอง AIT0a (ทิศตะวันออก RMSE = 18.98%, MBE = -4.07% ทิศตะวันตก RMSE = 22.03%, MBE = -3.02% และระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ RMSE = 15.42%, MBE = -10.54%) โดยพบว่าแบบจำลอง AIT0b จะให้ผลที่ใกล้เคียงกับแบบ AIT0a สำหรับแบบจำลองแบบ isotropic ยังคงให้ผลการคำนวณที่ดีในกรณีของระนาบแนวตั้งทิศเหนือเช่นเดียวกับผลการทดสอบของสถานีเชียงใหม่ และอุบลราชธานี แต่จะแสดงค่า RMSE ที่สูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากค่า diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้งทิศเหนือที่จังหวัดสงขลา มีค่าสูงกว่าที่สถานีทั้งสองดังกล่าว

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบโดยรวมของการคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงทั้งหมด (All surfaces) พบว่า แบบจำลอง Muneer, AIT0a และ AIT0b ยังคงให้ผลการคำนวณที่แม่นยำกว่าแบบจำลองอื่นๆ โดยแบบจำลองดังกล่าวจะให้ผลการคำนวณที่ดีในระดับเดียวกัน ซึ่งจะมีค่าความคลาดเคลื่อนโดยรวมในรูป RMSE อยู่ที่ประมาณ 21% ส่วนแบบจำลองอื่นที่ให้ผลการคำนวณที่ดีรองลงมาคือ แบบจำลอง Gueymard, Klucher และ Reindl ตามลำดับ โดยมีค่า RMSE อยู่ในช่วง 27-34% สำหรับแบบจำลองแบบ isotropic ประกอบด้วย แบบจำลอง Lui and Jordan, Tain และ Badescu กับแบบจำลองแบบ anisotropic คือ Bugler และ Perez จะแสดงผลการคำนวณที่มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับเดียวกัน โดยมีค่า RMSE อยู่ในช่วง 35-36%

4) สถานีนครปฐม

ผลการทดสอบแบบจำลองสำหรับคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงจากข้อมูลการวัดที่สถานีนครปฐม ประกอบด้วย การทดสอบกรณีระนาบแนวตั้ง 4 ทิศทาง และกรณีระนาบเอียง 45 องศา 4 ทิศทางเช่นกัน โดยผลการทดสอบที่ได้สามารถสรุปตามกรณีได้ดังนี้

ก) กรณีระนาบแนวตั้ง

จากผลการทดสอบแบบจำลองสำหรับคำนวณ diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้งกับข้อมูลการวัดที่จังหวัดนครปฐม พบว่า กรณีของการคำนวณ diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้งทิศเหนือและทิศใต้ นั้น แบบจำลองที่ให้ผลการคำนวณที่ดีที่สุด ยังคงเป็นแบบจำลอง Muneer เช่นเดียวกับผลการทดสอบของสถานีเชียงใหม่ อุบลราชธานี และสงขลา (ทิศเหนือ RMSE=24.35%, MBE=-14.19% ทิศใต้ RMSE=25.50%, MBE=-18.40%) ส่วนกรณีทิศตะวันออกและทิศตะวันตก แบบจำลอง AIT0a ให้ผลการคำนวณแม่นยำที่สุด โดยในทิศตะวันออกจะมีค่า RMSE เท่ากับ 28.48% และ MBE เท่ากับ -16.62% สำหรับทิศตะวันตกจะมีค่า RMSE เท่ากับ 25.54% และ MBE เท่ากับ -0.91%

ข) กรณีระนาบเอียง 45 องศา

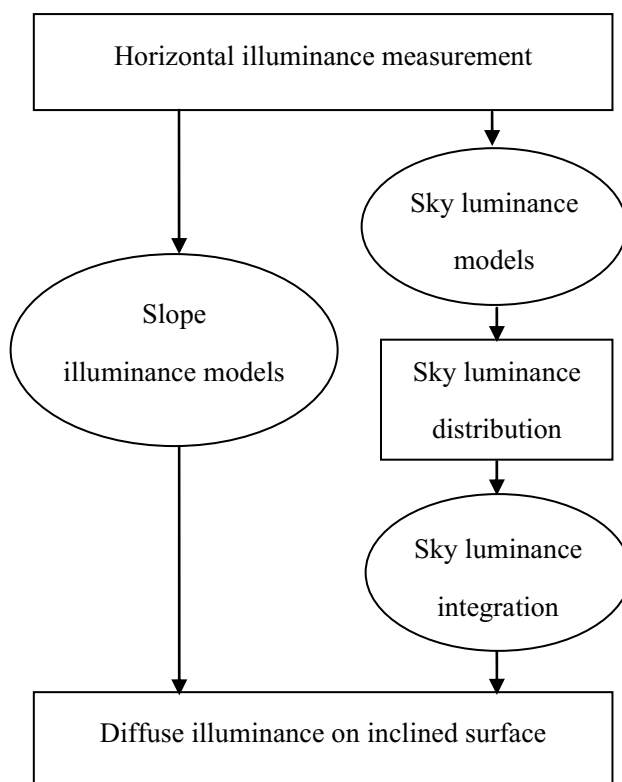
ผลการทดสอบแบบจำลองสำหรับคำนวณ diffuse illuminance บนระนาบเอียง 45 องศา พบว่า กรณีทิศเหนือ แบบจำลอง AIT0b จะให้ผลการคำนวณที่แม่นยำที่สุด โดยมี RMSE เท่ากับ 24.05% และ MBE เท่ากับ -18.74% ส่วนกรณีระนาบเอียงในทิศตะวันออก แบบจำลอง Temps and Coulson จะให้ผลการคำนวณที่แม่นยำกว่าแบบจำลองอื่น โดยมี RMSE เท่ากับ 25.39% และ MBE เท่ากับ -14.84% สำหรับกรณีระนาบเอียงในทิศตะวันตกและทิศใต้ แบบจำลองที่ให้ผลการคำนวณแม่นยำที่สุดคือแบบจำลอง AIT0a โดยผลที่ได้ในทิศตะวันตกจะมีค่า RMSE เท่ากับ 17.20% และ MBE เท่ากับ -13.58% และผลการเปรียบเทียบในทิศใต้จะมี RMSE เท่ากับ 18.35% และ MBE เท่ากับ -14.60% ทั้งนี้แบบจำลองส่วนใหญ่จะมีค่าความคลาดเคลื่อนลดลงเมื่อเทียบกับการคำนวณในกรณีระนาบแนวตั้งในทิศเดียวกัน เมื่อพิจารณาผลแต่ละทิศพบว่า ผลการคำนวณของแต่ละแบบจำลองในกรณีระนาบเอียงทิศใต้และทิศตะวันตก จะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการคำนวณในทิศเหนือและทิศตะวันออก โดยในกรณีพื้นเอียง 45 องศา นั้น แบบจำลองทั้งหมดจะให้ผลการคำนวณที่ต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริง

เมื่อพิจารณาที่ผลการทดสอบโดยรวมของแต่ละแบบจำลองในการคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงทั้งหมด (All surfaces) ทั้งกรณีระนาบแนวตั้งและระนาบเอียง 45 องศา พบว่าแบบจำลองที่ให้ผลการคำนวณที่สอดคล้องกับค่าจากการวัดมากกว่าแบบจำลองอื่นๆ ยังคงเป็นแบบจำลอง Muneer, AIT0a และ AIT0b เช่นเดียวกับผลการทดสอบที่สถานีเชียงใหม่ อุบลราชธานี

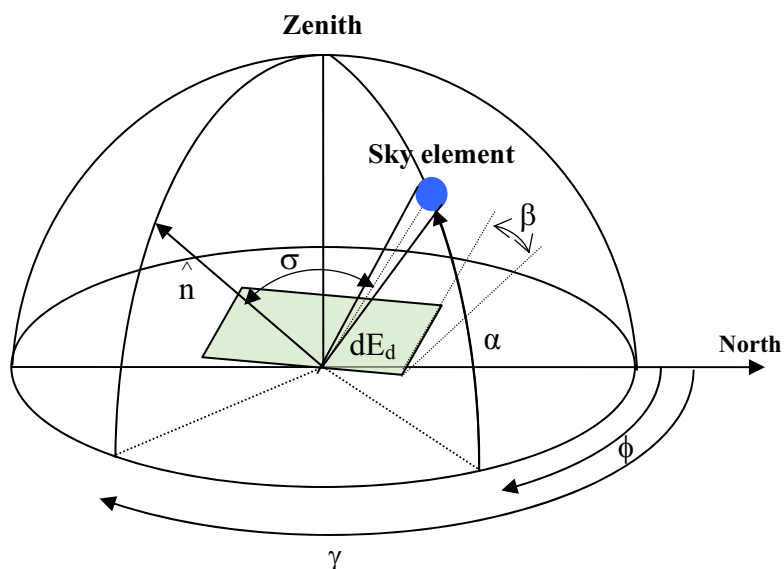
และสงขลา โดยมีค่า RMSE ของการคำนวณโดยรวมอยู่ในช่วง 25.93-26.62% ซึ่งแบบจำลอง AIT0b จะให้ผลการคำนวณโดยรวมดีที่สุด ส่วนแบบจำลองอื่นที่ให้ผลการคำนวณที่ตรงลงมาคือ แบบจำลอง Gueymard และ Klucher โดยจะให้ผลการคำนวณที่ดีในระดับเดียวกัน มีค่า RMSE อยู่ที่ประมาณ 32% สำหรับแบบจำลองที่ให้ผลการคำนวณที่ไม่สอดคล้องกับค่าจากการวัดมากที่สุด ยังคงเป็นแบบจำลอง Ma and Igbal โดยมีค่า RMSE ของการคำนวณอยู่ที่ 52.94%

3.5 การคำนวณ Diffuse illuminance บนพื้นเอียงโดยวิธีการอินทิเกรต Sky luminance distribution

การคำนวณปริมาณ diffuse illuminance บนพื้นเอียง นอกจากจะอาศัยแบบจำลองรังสีกระจายบนพื้นเอียง เพื่อแปลงค่า diffuse illuminance บนพื้นราบไปเป็น diffuse illuminance บนระนาบเอียงที่มุมต่างๆ แล้ว ยังสามารถคำนวณได้โดยใช้วิธีการอินทิเกรตปริมาณแสงสว่างธรรมชาติจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า (sky luminance) เหนือทรงกลมท้องฟ้าทั้งหมดที่มองเห็นจากพื้นเอียง โดยที่ปริมาณ sky luminance ที่ส่วนต่างๆ ของท้องฟ้าสามารถหาได้จากการวัดโดยตรงด้วยเครื่อง Sky scanner ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีราคาแพง ทำให้มีข้อมูลการวัดน้อยมาก หรือสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองแสงสว่างธรรมชาติจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า (sky luminance model) ซึ่งโดยทั่วไปแบบจำลอง sky luminance model ต่างๆ จะอาศัยข้อมูลการวัด illuminance บนพื้นราบเพื่อช่วยในการจำแนกสภาพท้องฟ้า การหาปริมาณแสงสว่างธรรมชาติบนพื้นเอียงจากข้อมูลการวัดบนพื้นราบ ทั้ง 2 วิธี แสดงดังแผนภาพ



รูปที่ 3.38 แสดงแผนภาพวิธีการหา diffuse illuminance บนพื้นเอียง



รูปที่ 3.39 แสดงตำแหน่งของ sky element เทียบกับตำแหน่งของพื้นเอียง

การคำนวณปริมาณแสงสว่าง diffuse illuminance (dE_d) ที่มาจากส่วนย่อยๆ ของท้องฟ้า (sky element) บนระนาบใดๆ สามารถคำนวณได้จากปริมาณ luminance ($L(\alpha, \phi)$) ของ sky element ดังกล่าว ตามสมการ

$$dE_d = L(\alpha, \phi) \cos \sigma d\Omega \quad (3.11)$$

- เมื่อ
- $L(\alpha, \phi)$ = ค่า luminance ของ sky element (candela/m²)
 - α = มุมเงยของ sky element (องศา)
 - ϕ = มุมอะซิมูทของ sky element (องศา)
 - σ = มุมตกกระทบของ sky element บนพื้นเอียง (องศา)
 - Ω = มุมตันที่รองรับพื้นที่ของ sky element (สเตอเรเดียน)

โดยที่ มุมตกกระทบ (σ) และมุมตัน ของ sky element สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\cos \sigma = \cos \beta \sin \alpha + \sin \beta \cos \alpha \cos |\phi - \gamma| \quad (3.12)$$

และ

$$d\Omega = \cos \alpha d\alpha d\phi \quad (3.13)$$

เมื่อ β = มุมเอียงของพื้นเอียง (องศา)
 γ = มุม Azimuth ของพื้นเอียง (องศา)

ดังนั้นจากสมการ (3.11)-(3.13) ปริมาณ diffuse illuminance บนพื้นเอียง β สามารถคำนวณได้จาก การอินทิเกรต dE_d เทียบกับมุมเงย (α) และมุมอะซิมุท (ϕ) ของ sky element ตลอดทั้งทรงกลมท้องฟ้าดังสมการ

$$E_{d\beta} = \iint_{\alpha\phi} L(\alpha, \phi) (\cos\beta \sin\alpha + \sin\beta \cos\alpha \cos|\phi - \gamma|) \cos\alpha \, d\alpha \, d\phi \quad (3.14)$$

เมื่อ $E_{d\beta}$ = ปริมาณ diffuse illuminance บนพื้นเอียง (klux)

โดยกรณีพื้นราบ ($\beta = 0$) สมการ (3.14) จะลดรูปเป็น

$$E_{dh} = \iint_{\alpha\phi} L(\alpha, \phi) \sin\alpha \cos\alpha \, d\alpha \, d\phi \quad (3.15)$$

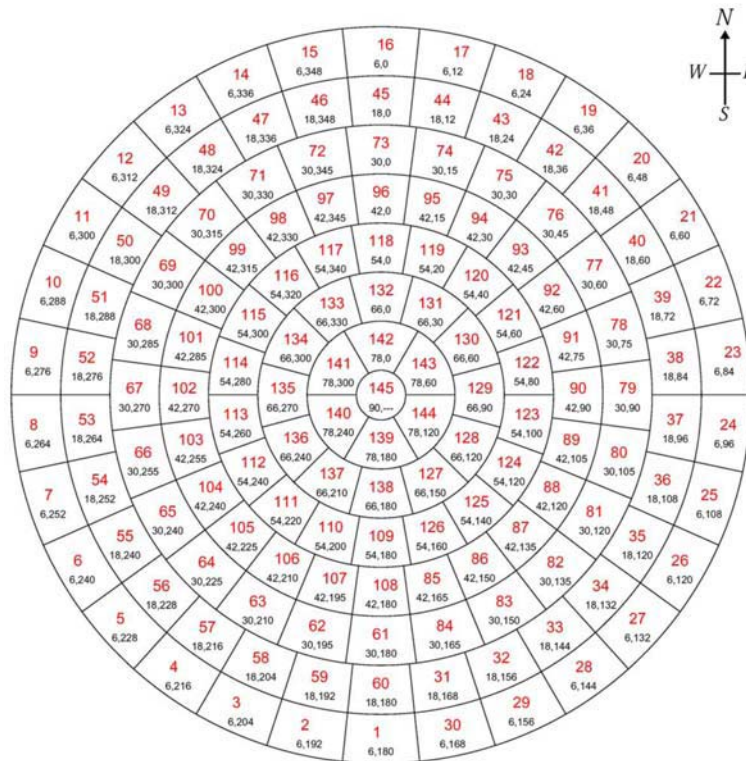
เมื่อ E_{dh} = ปริมาณ diffuse illuminance บนพื้นราบ (klux)

อย่างไรก็ตามการจะอินทิเกรตสมการข้างต้นแบบเชิงวิเคราะห์ (analytical) นั้นค่อนข้างยุ่งยากเนื่องจากฟังก์ชันของ sky luminance distribution ($L(\alpha, \phi)$) ส่วนใหญ่เป็นฟังก์ชันที่ค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้นการอินทิเกรตสมการดังกล่าวจึงต้องใช้การคำนวณแบบเชิงตัวเลข (numerical method) โดยแปลงสมการ (3.14) ให้อยู่ในรูปของสมการ summation ดังนี้

$$E_{d\beta} = \sum_i L_i \cos\sigma_i \Omega_i \quad (3.16)$$

เมื่อ $E_{d\beta}$ = ปริมาณ diffuse illuminance บนพื้นเอียง (klux)
 L_i = ค่า luminance ของ sky element ที่ i (candela/m²)
 σ_i = มุมตกกระทบของบนพื้นเอียง sky element ที่ i (องศา)
 Ω_i = มุมตันที่รองรับพื้นที่ของ sky element ที่ i (สเตอเรเดียน)

จากสมการ (3.16) ปริมาณ diffuse illuminance บนพื้นเอียง สามารถหาได้จากผลรวมของผลคูณระหว่าง $L_i, \cos \sigma_i$ และ Ω_i ของแต่ละ sky element ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะใช้การแบ่งทรงกลมท้องฟ้าออกเป็น 145 เซลล์ (145 sky element) ตามรูปแบบการวัดของเครื่อง sky scanner จากนั้นจะทำการคำนวณค่า luminance มุมตกกระทบ และมุมตันของแต่ละ sky element เพื่อใช้คำนวณหาปริมาณ diffuse illuminance โดยลักษณะการแบ่งท้องฟ้าดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.40



รูปที่ 3.40 แสดงการแบ่งท้องฟ้าออกเป็น 145 เซลล์พื้นที่เท่าๆ กัน
ตามรูปแบบการวัดของ เครื่อง Sky scanner

จากลักษณะการแบ่งท้องฟ้าออกเป็น 145 เซลล์ดังกล่าว จะเห็นว่ามุมเงย (α) ที่กึ่งกลางของเซลล์จะเริ่มที่ 6 องศาและเพิ่มขึ้นตามมุมเงยระดับละ 12 องศา จนถึงจุดกึ่งกลางท้องฟ้า คือ 6, 18, 30, 42, 54, 66, 78 และ 90 องศา ตามลำดับ ส่วนมุมอะซิมุท (ϕ) ที่กึ่งกลางเซลล์จะเริ่มนับจากทางทิศเหนือ และลักษณะการเพิ่มของมุมอะซิมุทในแต่ละค่าของมุมเงยนั้นจะไม่เท่ากัน คือที่มุมเงย 6 และ 18 องศา มุมอะซิมุทจะเพิ่มครั้งละ 12 องศา ที่มุมเงย 30 และ 42 องศา มุมอะซิมุทจะเพิ่มครั้งละ 15 องศา ที่มุมเงย

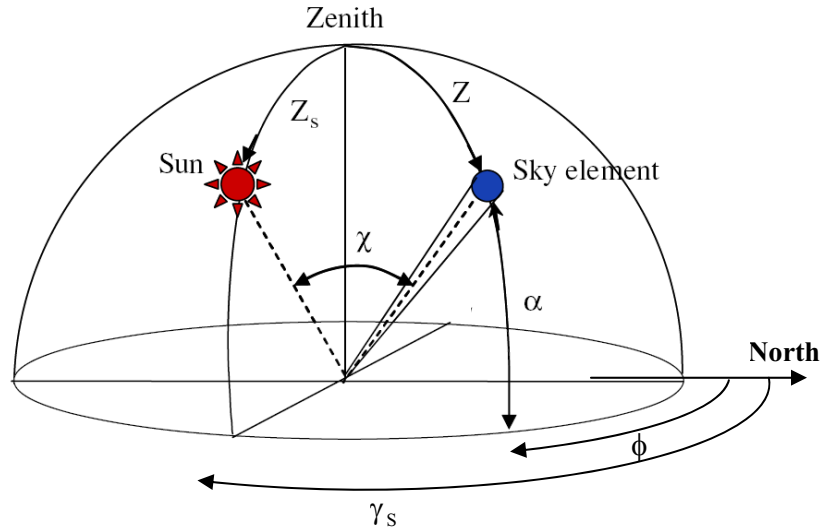
54 องศา มุมอะซิมุทจะเพิ่มครั้งละ 20 องศา ที่มุมเงย 66 องศา มุมอะซิมุทจะเพิ่มครั้งละ 30 องศา ที่มุมเงย 78 องศา มุมอะซิมุทจะเพิ่มครั้งละ 60 องศาและที่มุมเงย 90 องศา มุมอะซิมุทจะมีค่าเป็น 360 องศา คือมีหนึ่งเซลล์ที่กึ่งกลางท้องฟ้า โดยจำนวนเซลล์ ค่าการเพิ่มของมุมอะซิมุท และมุมตัน ของแต่ละเซลล์หรือ sky element ที่แต่ละค่าของมุมเงยดังกล่าว แสดงดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 แสดงค่าจำนวน sky element ค่าอะซิมุทที่เพิ่มขึ้น และค่ามุมตันของ sky element ที่แต่ละมุมเงย

Altitude of band centre (°)	Number of zones in band	Azimuth increment (°)	Solid angle (Sr)
6	30	12	0.0435
18	30	12	0.0416
30	24	15	0.0474
42	24	15	0.0407
54	18	20	0.0429
66	12	30	0.0445
78	6	60	0.0455
90	1	360	0.0344

3.5.1 แบบจำลองแสงสว่างธรรมชาติจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า (Sky luminance model)

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะทำการคำนวณปริมาณแสงสว่างธรรมชาติในรูปแบบ diffuse illuminance บนพื้นเอียง โดยอาศัยการอินทิเกรตค่า sky luminance ซึ่งปริมาณ sky luminance ดังกล่าว สามารถหาได้จากแบบจำลองแสงสว่างธรรมชาติจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า (sky luminance model) ในส่วนนี้ ผู้วิจัยจะเลือกเอาแบบจำลองแสงสว่างธรรมชาติจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้าที่พัฒนาโดย Janjai และคณะ (2007) จากห้องปฏิบัติการฟิสิกส์บรรยากาศ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร แบบจำลองดังกล่าวเป็นแบบจำลองเชิงสถิติ ซึ่งอาศัยภาพถ่ายดาวเทียมในการจำแนกสภาพท้องฟ้า โดยมีสมมติฐานที่ว่า ในสภาพท้องฟ้าแบบหนึ่ง ปริมาณแสงสว่างธรรมชาติของจุดๆ หนึ่งบนท้องฟ้า จะขึ้นอยู่กับมุมเซนนิซ (Z) ของจุดที่พิจารณา มุมเซนนิซของดวงอาทิตย์ (Z_s) และระยะห่างเชิงมุมระหว่างจุดที่พิจารณากับดวงอาทิตย์ (χ) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.41



รูปที่ 3.41 แสดงตำแหน่งดวงอาทิตย์ และตำแหน่งบนท้องฟ้า (P) ที่จะหาปริมาณแสงสว่าง โดย Z เป็นมุมเซนนิธของจุดที่พิจารณา Z_s เป็นมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ χ เป็นมุมระหว่างจุดบนท้องฟ้าที่พิจารณากับตำแหน่งดวงอาทิตย์ φ เป็นมุมอาซิมุทของจุดที่พิจารณา γ_s เป็นมุมอาซิมุทของดวงอาทิตย์

สมการของแบบจำลองดังกล่าว จะแสดงอยู่ในรูปปริมาณแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้าสัมพัทธ์ (relative luminance, $I_v = L/L_z$) กล่าวคือ การกระจายของแสงสว่างธรรมชาติที่ส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า เมื่อเทียบกับแสงสว่างที่กลางท้องฟ้า (zenith luminance) จะเป็นผลคูณของ 2 ฟังก์ชันคือ ฟังก์ชันแรกจะแสดงอิทธิพลของมุมเซนนิธของจุดที่พิจารณา และฟังก์ชันที่สองจะแสดงอิทธิพลของระยะเชิงมุมของตำแหน่งดวงอาทิตย์กับจุดที่พิจารณา ซึ่งแบบจำลองแสงสว่างธรรมชาติจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้าดังกล่าว เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_v = \frac{L}{L_z} = \frac{F_1(Z)}{F_1(0)} \cdot \frac{F_2(\chi)}{F_2(Z_s)} \tag{3.17}$$

โดย

$$\begin{aligned} \frac{F_1(Z)}{F_1(0)} = & a_0 + a_1Z + a_2Z_s + a_3Z^2 + a_4Z_s^2 + a_5Z^3 + a_6Z_s^3 + a_7ZZ_s \\ & + a_8Z^2Z_s + a_9ZZ_s^2 + a_{10}Z^2Z_s^2 + a_{11}Z^3Z_s^3 + a_{12}Z^4Z_s^2 + a_{13}Z^2Z_s^4 \\ & + a_{14}Z^6Z_s^3 + a_{15}Z^3Z_s^6 \end{aligned} \tag{3.18}$$

และ

$$\frac{F_2(\chi)}{F_2(Z_s)} = \frac{b_0 + b_1\chi + b_2\chi^2 + b_3\chi^3}{b_0 + b_1Z_s + b_2Z_s^2 + b_3Z_s^3} \quad (3.19)$$

- เมื่อ
- L = ปริมาณแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า (sky element) (Kcd/m^2)
 - L_z = ปริมาณแสงสว่างธรรมชาติที่ตำแหน่งกลางท้องฟ้า (zenith luminance) (Kcd/m^2)
 - F_1 = ฟังก์ชันซึ่งแสดงอิทธิพลของตำแหน่งของจุดบนท้องฟ้าที่จะหาความเข้มแสงสว่าง
 - F_2 = ฟังก์ชันซึ่งแสดงอิทธิพลของระยะเชิงมุมระหว่างตำแหน่งของจุดบนท้องฟ้าที่พิจารณากับตำแหน่งดวงอาทิตย์
 - Z = มุมเซนธิของตำแหน่งบนท้องฟ้า (sky element) (เรเดียน)
 - Z_s = มุมเซนธิของตำแหน่งดวงอาทิตย์ (เรเดียน)
 - χ = ระยะเชิงมุมระหว่างตำแหน่งบนท้องฟ้ากับตำแหน่งดวงอาทิตย์ (เรเดียน)

ค่าสัมประสิทธิ์ a, b ในแบบจำลองจะแปรค่าสภาพท้องฟ้า โดยสามารถหาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของบรรยากาศและพื้นผิวโลก (Earth-atmospheric reflectivity, ρ'_{EA}) ซึ่งคำนวณได้จากภาพถ่ายดาวเทียม ในการจำแนกสภาพท้องฟ้า โดยค่าสัมประสิทธิ์ a_0, \dots, a_{15} และ b_0, b_1, b_2, b_3 ตามค่า ρ'_{EA} ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.10-3.12

ตารางที่ 3.10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ a_0, \dots, a_7

ρ'_{EA}	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
$0.05 \leq \rho'_{EA} < 0.15$	1.00	0.15	0.06	-0.66	-0.09	0.29	0.03	-0.73
$0.15 \leq \rho'_{EA} < 0.25$	1.00	-0.07	0.40	-0.22	-1.11	0.06	0.65	-0.55
$0.25 \leq \rho'_{EA} < 0.35$	1.00	-0.46	0.06	-0.24	-0.22	0.28	0.13	0.90
$0.35 \leq \rho'_{EA}$	1.00	-1.91	0.40	1.47	-1.20	-0.44	0.71	4.86

ตารางที่ 3.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ a_8, \dots, a_{15}

ρ'_{EA}	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}
$0.05 \leq \rho'_{EA} < 0.15$	1.48	-0.59	2.54	1.24	-1.89	-1.44	0.26	0.07
$0.15 \leq \rho'_{EA} < 0.25$	1.06	-0.03	2.30	0.13	-0.97	-1.28	0.16	0.21
$0.25 \leq \rho'_{EA} < 0.35$	0.00	-0.54	1.43	1.70	-1.65	-0.69	0.21	-0.23
$0.35 \leq \rho'_{EA}$	-3.87	-3.43	5.25	-3.61	1.43	-0.02	-0.10	0.55

ตารางที่ 3.12 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ b_0, b_1, b_2, b_3

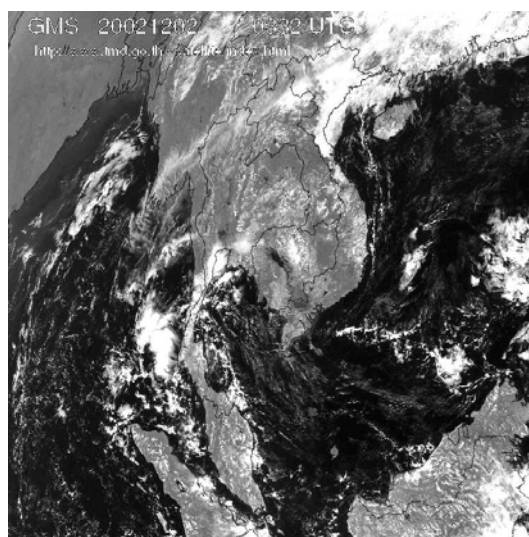
ρ'_{EA}	b_0	b_1	b_2	b_3
$0.05 \leq \rho'_{EA} < 0.15$	3.13	-3.09	1.15	-0.14
$0.15 \leq \rho'_{EA} < 0.25$	3.12	-2.98	1.01	-0.11
$0.25 \leq \rho'_{EA} < 0.35$	2.48	-1.95	0.54	-0.04
$0.35 \leq \rho'_{EA}$	2.36	-1.80	0.54	-0.05

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะทำการคำนวณปริมาณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงด้วยวิธีการอินทิเกรตค่า sky luminance ที่ได้จากแบบจำลอง sky luminance model ดังกล่าว ในแบบค่ารายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยรายเดือนของแต่ละชั่วโมง ที่ช่วงเวลาระหว่าง 9.30 – 15.30 น.

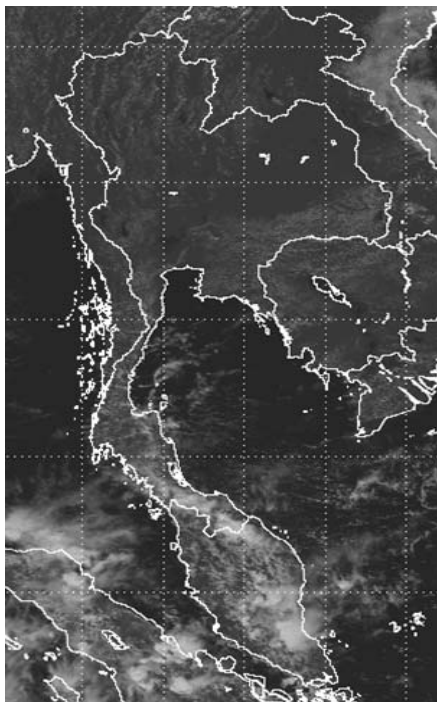
3.5.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของบรรยากาศและพื้นผิวโลกจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม

แบบจำลองแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า (sky luminance model) ที่เลือกมาใช้ในการงานวิจัยนี้ ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของบรรยากาศและพื้นผิวโลก (ρ'_{EA}) มาเป็นตัวแปรในการจำแนกสภาพท้องฟ้า โดย input ของแบบจำลอง จะประกอบด้วย ค่า ρ'_{EA} มุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ (Z_s) มุมเซนนิธของตำแหน่งบนท้องฟ้าที่พิจารณา (Z) และระยะห่างระหว่างดวงอาทิตย์กับตำแหน่งที่พิจารณา (χ) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของบรรยากาศและพื้นผิวโลก สามารถคำนวณได้จากภาพถ่ายดาวเทียม ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

ผู้วิจัยได้นำข้อมูลจากดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา มาใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของบรรยากาศและพื้นผิวโลก ข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลดิจิทัล 8 บิต จากช่องสัญญาณแสงสว่าง (0.55-0.90 μm) ของดาวเทียม ที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ ณ ตำแหน่งประเทศไทยประมาณ 3×3 ตารางกิโลเมตร โดยข้อมูลที่สถานีรับสัญญาณรับได้จะอยู่ในรูปของ satellite projection กล่าวคือ เมื่อแปลงเป็นสัญญาณภาพจะเห็นเป็นส่วนโค้งของโลกดังตัวอย่างในรูปที่ 3.1 ดังนั้นจะต้องทำการแปลงให้อยู่ใน cylindrical projection ซึ่งระยะบนภาพจะแปรโดยตรงกับระยะบนพื้นดิน จากนั้นจะทำการหาพิกัดของตำแหน่งบนภาพโดยการนำแผนที่มาซ้อนทับ โดยภาพที่ทำการ process แล้วจะมีลักษณะดังตัวอย่างในรูปที่ 3.42-3.43

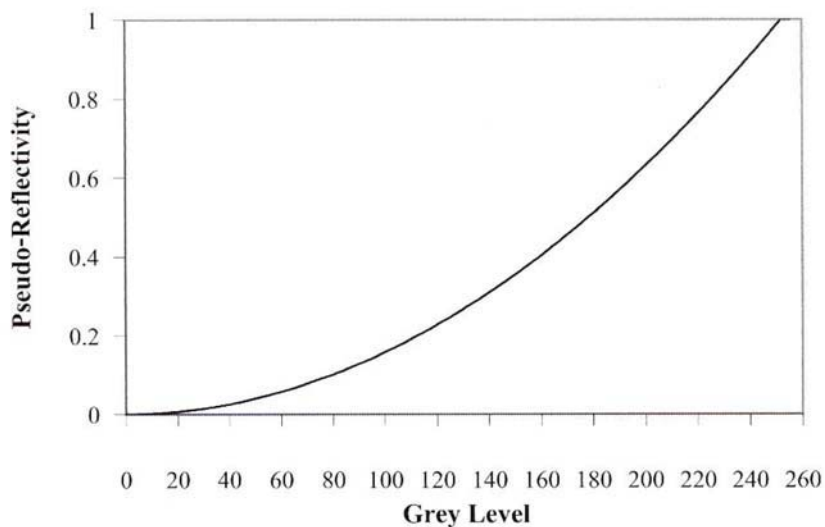


รูปที่ 3.42 ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมใน satellite projection



รูปที่ 3.43 ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมใน cylindrical projection ซึ่งหาพิกัดแล้ว

ข้อมูลของแต่ละ pixel ที่ประกอบเป็นภาพถ่ายดาวเทียมที่อยู่ในรูปของดิจิทัล 8 บิตดังกล่าว จะแทนด้วยค่า grey level ซึ่งแปรค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 255 ในการแปลงค่า grey level ให้เป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ กรณีดวงอาทิตย์ตกกระทบตั้งฉากกับหัววัด (Pseudo-reflectivity , ρ'_{pseu}) จะอาศัยตารางสอบเทียบของผู้ผลิตดาวเทียม (Marshall, 1993) โดยค่าสอบเทียบดังกล่าวสามารถเขียนเป็นกราฟ ได้ดังรูปที่ 3.44



รูปที่ 3.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า grey level และ Pseudo-reflectivity ของข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม

เนื่องจากค่า ρ'_{pseu} เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ ที่คิดในกรณีรังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบตั้งฉากกับพื้นผิวโลก แต่ในสภาพทั่วไปรังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบพื้นผิวโลกด้วยมุมค่าต่างๆ ขึ้นกับตำแหน่งและเวลา ดังนั้นจึงต้องทำการแปลงค่า Pseudo-reflectivity ให้เป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ ρ'_{EA} โดยการหารด้วย cosine ของมุมเซนนิซของดวงอาทิตย์ ดังสมการ

$$\rho'_{\text{EA}} = \frac{\rho'_{\text{pseu}}}{\cos Z_s} \quad (3.20)$$

เมื่อ ρ'_{EA} = สัมประสิทธิ์การสะท้อนของบรรยากาศและพื้นผิวโลกในช่วงความยาวคลื่นของดาวเทียม (0.55-0.90 μm) (-)

ρ'_{pseu} = Pseudo-reflectivity (-)

Z_s = มุมเซนนิซของดวงอาทิตย์ (องศา)

ผู้วิจัยจะคำนวณค่า ρ'_{EA} ในแต่ละชั่วโมงครอบคลุมช่วงเวลา 9.30-15.30 น. จากนั้นจะนำค่าที่ได้มาทำการเฉลี่ยเป็นค่ารายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน แล้วจึงนำค่าที่ได้ไปใช้เลือกค่าสัมประสิทธิ์ตาม

แบบจำลอง sky luminance model เพื่อคำนวณปริมาณ luminance จากนั้นจึงทำการอินทิเกรตค่า luminance ตลอดทั่วทั้งทรงกลมท้องฟ้า เพื่อคำนวณหาค่า diffuse illuminance บนพื้นราบและบนพื้นเอียงต่อไป

3.5.3 Normalization Ratio (NR)

เนื่องจากแบบจำลองแสงสว่างธรรมชาติจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า (sky luminance model) ที่นำมาใช้คำนวณปริมาณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงนั้นอยู่ในรูปสัมพัทธ์ (relative luminance) ระหว่างค่าแสงสว่างที่ส่วนต่างๆ ของท้องฟ้าและค่าแสงสว่างที่กึ่งกลางท้องฟ้า (L / L_z) ปริมาณ diffuse illuminance ที่คำนวณได้จากการอินทิเกรตค่า sky luminance จึงอยู่ในรูปสัมพัทธ์เช่นกัน ดังนั้นค่า diffuse illuminance ที่คำนวณได้จึงต้องปรับแก้ให้เป็นค่าที่ถูกต้อง โดยการคูณด้วยเทอม normalization ratio (NR) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่า diffuse illuminance บนพื้นราบกับค่าการอินทิเกรตข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง sky luminance ในกรณีพื้นราบ ($\beta = 0$) ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$NR = \frac{E_{dh}}{\iint_{\alpha\phi} l_v(\alpha, \phi) \sin \alpha \cos \alpha d\alpha d\phi} \quad (3.21)$$

เมื่อ E_{dh} = ค่าวัด diffuse illuminance บนพื้นราบ (klux)

$l_v(\alpha, \phi)$ = relative sky luminance model

ดังนั้นการจะหาปริมาณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงด้วยวิธีการอินทิเกรตค่า sky luminance ที่ได้จากแบบจำลอง sky luminance model ดังกล่าว จึงต้องอาศัยค่าวัด diffuse illuminance บนพื้นราบ โดยค่า diffuse illuminance บนระนาบใดๆ สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$E_d = NR \times \sum_i l_{v,i} \cos \sigma_i \Omega_i \quad (3.22)$$

เมื่อ $l_{v,i}$ = ค่า relative luminance (L / L_z) ของ sky element ที่ i

σ_i = มุมตกกระทบของบนพื้นเอียง sky element ที่ i

Ω_i = มุมตันที่รองรับพื้นที่ของ sky element ที่ i

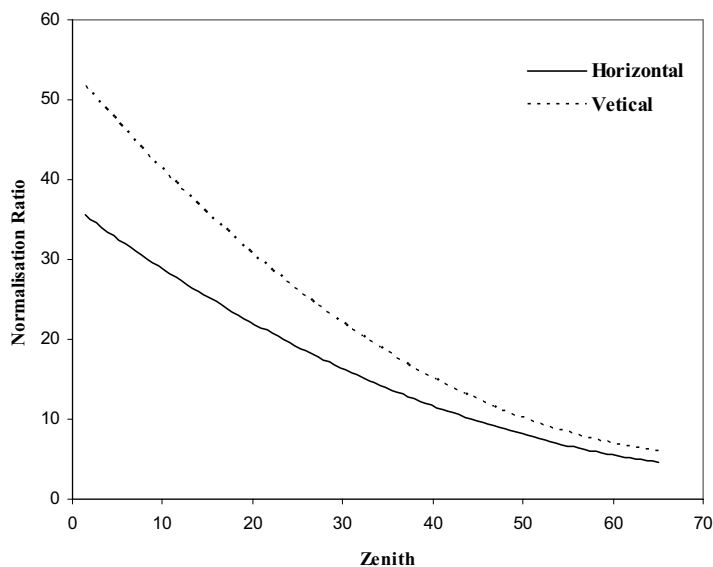
NR = normalization ratio

อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยจะไม่อาศัยข้อมูลวัดภาคพื้นดินในการคำนวณปริมาณ diffuse illuminance บนพื้นเอียง กล่าวคือ จะคำนวณค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียง โดยใช้แบบจำลอง sky luminance model และใช้ข้อมูลดาวเทียมในการเลือกสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง จากนั้นจะนำค่า luminance ที่ได้จากแบบจำลอง มาทำการอินทิเกรตเพื่อหาค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียง โดยจากการคำนวณพบว่าเทอม NR จะขึ้นกับมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ (Z_s) และสภาพท้องฟ้า

3.5.4 การคำนวณค่า Normalization Ratio (NR)

ในการหาสมการเทอม normalization ratio (NR) ผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลการวัด diffuse illuminance ปี 2005 ของ 4 สถานี คือ เชียงใหม่ อุบลราชธานี นครปฐมและสงขลา ร่วมกับข้อมูล diffuse illuminance ของสถานีนครปฐม ปี 2007 มาทำการวิเคราะห์ เพื่อหาสมการของ NR ดังกล่าว

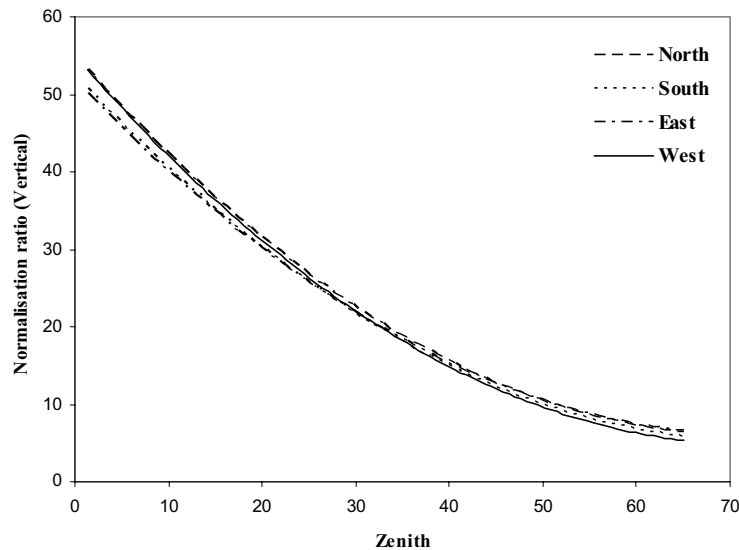
ในขั้นแรก ผู้วิจัยจะนำข้อมูล diffuse illuminance ปี 2005 ซึ่งประกอบด้วย ข้อมูล diffuse illuminance บนพื้นราบและบนระนาบแนวตั้ง 4 ทิศ (เหนือ ใต้ ตะวันออก ตะวันตก) มาทำการเฉลี่ยเป็นค่ารายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน ครอบคลุมช่วงเวลา 9.30-15.30 น. จากนั้นจะนำค่าวัดที่ได้ไปคำนวณหาค่า NR ที่แต่ละชั่วโมงนั้น ตามสมการ (3.21) ซึ่งค่า NR ที่คำนวณได้จะเป็นค่ารายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนเช่นกัน ผู้วิจัยได้แยกการคำนวณเทอม NR ออกเป็นกรณีพื้นราบ (NR_H) และกรณีระนาบแนวตั้ง (NR_V) จากนั้นจะนำค่า NR ที่คำนวณได้ไปพลอตกราฟเทียบกับมุมเซนนิธ (Z_s) ของดวงอาทิตย์ที่ชั่วโมงเดียวกัน โดยจะใช้ค่าเซนนิธในวันที่ 15 เป็นตัวแทนของแต่ละเดือน ในการพลอต กราฟจะทำแยกกันระหว่างกรณีพื้นราบกับกรณีระนาบแนวตั้ง สำหรับค่า NR กรณีระนาบแนวตั้งนั้นจะนำทั้ง 4 ทิศ มาพลอตรวมกัน จากนั้นจึงทำการหาความสัมพันธ์ของกราฟด้วยสมการ โพลีโนเมียลกำลังสองของ Z_s ผลการแปรค่าค่า NR กรณีพื้นราบและระนาบแนวตั้ง เทียบกับ Z_s สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.45



รูปที่ 3.45 แสดงการ fit กราฟค่า NR เทียบกับมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ ในกรณีพื้นราบและระนาบแนวตั้ง 90 องศา

ผลการ fit กราฟค่า NR ของกรณีพื้นราบและกรณีระนาบแนวตั้ง พบว่าค่า NR ของทั้ง 2 กรณี มีค่าไม่เท่ากัน โดยที่ค่ามุมเซนนิธเดียวกัน ค่า NR ของกรณีระนาบเอียงแนวตั้งจะมีค่ามากกว่าของกรณีพื้นราบ จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า เทอม NR มีลักษณะขึ้นกับมุมเอียงของระนาบที่พิจารณาด้วยเช่นกัน

จากนั้นผู้วิจัย จะทำการวิเคราะห์เทอม NR กรณีระนาบแนวตั้ง โดยแบ่งการศึกษาออกตามทิศทั้ง 4 ด้าน คือ ทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออกและทิศตะวันตก โดยทำการพลอตกราฟค่า NR ของระนาบแนวตั้งแต่ละทิศเทียบกับค่ามุมเซนนิธ (Z_s) แล้วทำการฟิตกราฟ ผลการฟิตกราฟของค่า NR กรณีระนาบแนวตั้งแต่ละทิศแสดงดังรูปที่ 3.46



รูปที่ 3.46 แสดงการ fit กราฟค่า NR กรณีระนาบแนวตั้ง ทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก และทิศ ตะวันตก เทียบกับกับมุมเซนนิทรวงอาทิตย์

จากผลการ fit กราฟจะเห็นว่า ค่า NR ของกรณีระนาบแนวตั้งในทิศต่างๆ มีลักษณะการแปรค่าที่คล้ายคลึงกัน แสดงว่าค่า NR จะไม่ขึ้นกับทิศของระนาบเอียง แต่จะขึ้นกับมุมเอียงของพื้นเอียง ดังนั้นสมการเทอม NR ที่ได้จะเป็นฟังก์ชันของมุมเซนนิทรวงอาทิตย์ (Z_s) และมุมเอียงของระนาบที่พิจารณา ผู้วิจัยจะดำเนินการหาสมการเทอม NR โดยเริ่มจากการหาสมการของเทอม NR ในกรณีพื้นราบก่อนโดยใช้ข้อมูลวัด diffuse illuminance บนพื้นราบ ปี 2005 ของทั้ง 4 สถานี จากนั้นผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลของสถานีนครปฐม ปี 2007 ซึ่งประกอบด้วยข้อมูล diffuse illuminance บนพื้นราบ บนระนาบแนวตั้งและบนระนาบเอียง 45 องศา มาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า NR ของกรณีพื้นราบกับของกรณีพื้นเอียงที่มุมต่างๆ

การหาเทอม NR ของการคำนวณกรณีพื้นราบ จากข้อมูล ปี 2005 นั้นจะเริ่มจาก นำค่า NR ที่คำนวณได้ในแต่ละชั่วโมง มาแบ่งเป็นกลุ่ม ตามค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของบรรยากาศและพื้นผิวโลก (ρ'_{EA}) รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน ตามการแบ่งกลุ่มลักษณะเดียวกับในแบบจำลอง sky luminance model โดยแบ่งเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้คือ $0.05 \leq \rho'_{EA} < 0.15$, $0.15 \leq \rho'_{EA} < 0.25$, $0.25 \leq \rho'_{EA} < 0.35$ และ $0.35 \leq \rho'_{EA}$ จากนั้นจะนำค่า NR ในแต่ละกลุ่มมาหาความสัมพันธ์กับค่ามุมเซนนิทรวงอาทิตย์ (Z_s) ด้วยการ regression โดยได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$NR_H = c_1 + c_2 Z_s + c_3 Z_s^2 \quad (3.23)$$

โดย c_1, c_2, c_3 จะเป็นสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับค่า ρ'_{EA}

จากนั้นผู้วิจัยจะใช้ข้อมูล diffuse illuminance บนพื้นราบ บนระนาบแนวตั้ง และบนระนาบเอียง 45 องศา ของสถานีนครปฐม ปี 2007 มาทำการหาความสัมพันธ์ของค่า NR ระหว่างกรณีพื้นราบกับกรณีพื้นเอียง โดยเริ่มจากคำนวณค่า NR จากข้อมูลบนพื้นราบ บนระนาบแนวตั้ง และบนระนาบเอียง 45 องศา ตามลำดับ จากนั้นจึงนำค่า NR ที่คำนวณได้กรณีพื้นเอียง 45 องศาและระนาบแนวตั้งดังกล่าว มาทำการหาความสัมพันธ์กับ NR กรณีพื้นราบโดยวิธีการ regression ความสัมพันธ์ระหว่าง NR กรณีพื้นราบกับกรณีพื้นเอียง สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$NR_\beta = NR_H (0.586\beta - 0.154\beta^2 - 0.265\beta Z_s + 1) \quad (3.24)$$

เทอมในวงเล็บทางขวาของสมการ (3.24) จะเป็นเทอมแก้ไขของการคำนวณในกรณีระนาบเอียงต่างๆ โดยกรณี $\beta = 0$ สมการ (3.24) จะลดรูปเป็น

$$NR_\beta = NR_H \quad (3.25)$$

ดังนั้นจากสมการ (3.23) และ (3.24) สมการสำหรับเทอม normalization ratio (NR) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$NR = (c_1 + c_2 Z_s + c_3 Z_s^2) \times (0.586\beta - 0.154\beta^2 - 0.265\beta Z_s + 1) \quad (3.26)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์ c_1, c_2, c_3 ที่แบ่งตามกลุ่มของค่า ρ'_{EA} แสดงดังตารางที่ 3.13

ตารางที่ 3.13 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ c_1, c_2, c_3 ของสมการเทอม NR ตามกลุ่มของค่า ρ'_{EA}

ρ'_{EA}	c_1	c_2	c_3	R^2
$0.05 \leq \rho'_{EA} < 0.15$	39.12	-67.81	34.95	0.99
$0.15 \leq \rho'_{EA} < 0.25$	30.25	-37.91	12.71	0.96
$0.25 \leq \rho'_{EA} < 0.35$	35.49	-43.64	13.74	0.95
$0.35 \leq \rho'_{EA}$	52.03	-93.68	52.00	0.97

3.5.5 การคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงโดยวิธีการอินทิเกรต sky luminance

จากสมการ (3.22) และเทอม NR ที่พัฒนาขึ้น (สมการ 3.26) ปริมาณ diffuse illuminance บนระนาบใดๆ สามารถคำนวณได้ โดยการอินทิเกรตค่า sky luminance ที่ได้จากแบบจำลอง sky luminance model ดังสมการ

$$E_{d\beta} = \left[\sum_i I_{v,i} \cos \sigma_i \Omega_i \right] \times [(c_1 Z^2 + c_2 Z + c_3) \times (0.586\beta - 0.154\beta^2 - 0.265\beta Z + 1)] \quad (3.27)$$

สำหรับการทดสอบผลจากการคำนวณ diffuse illuminance ตามสมการ (3.27) ผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลการวัด diffuse illuminance รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่วัดได้ใน ปี 2007 ของ 3 สถานี คือ เชียงใหม่ อุบลราชธานี และสงขลา มาใช้ทำการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณดังกล่าว โดยจะทำการทดสอบผลการคำนวณ diffuse illuminance ในกรณีพื้นราบ และกรณีพื้นเอียง ซึ่งประกอบด้วยระนาบเอียงแนวตั้ง 4 ทิศคือ เหนือ ใต้ ตะวันออก ตะวันตก และระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ ผลที่ได้จะแสดงอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ของค่า MBE และ RMSE ดังต่อไปนี้

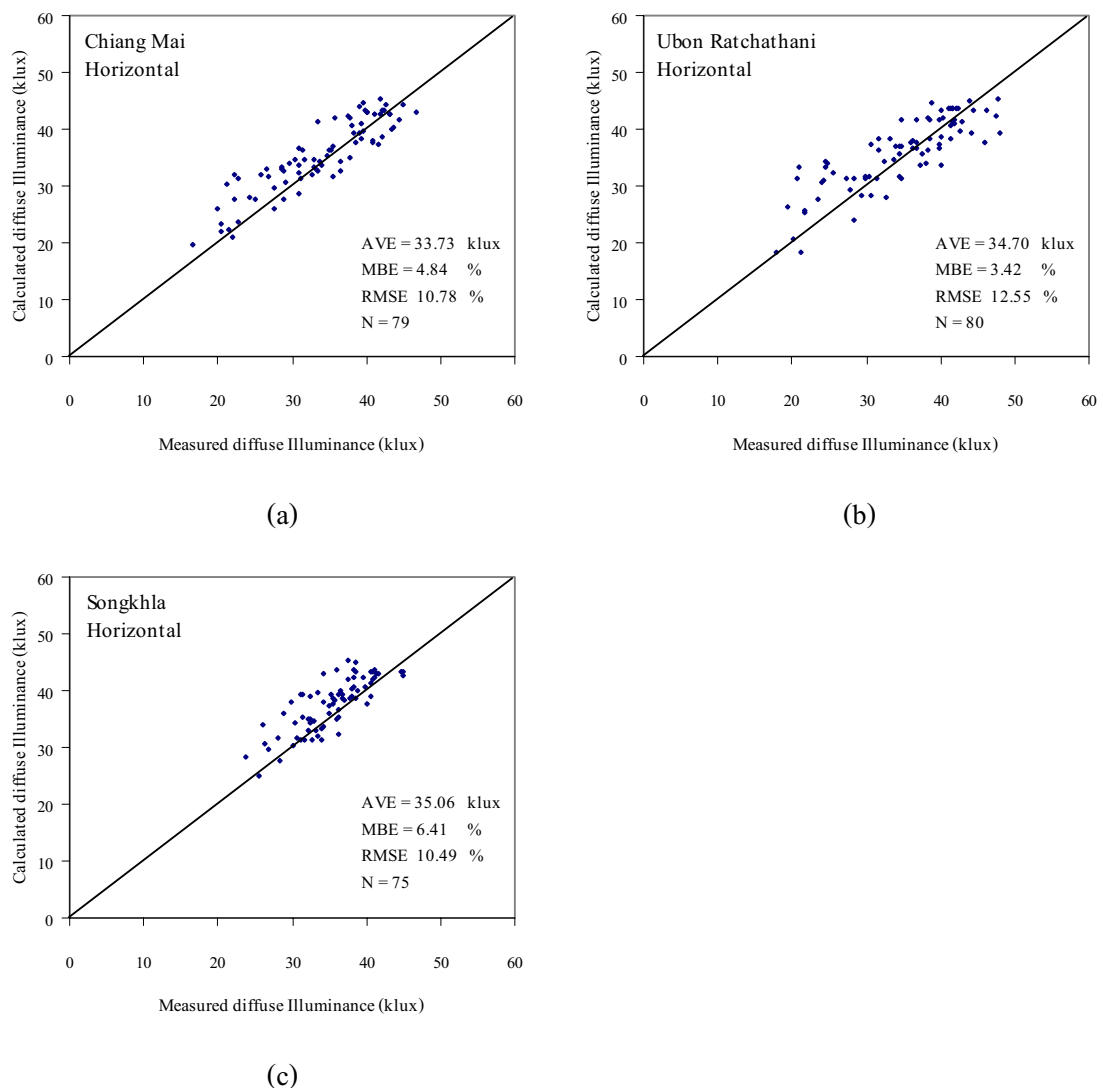
ก) การคำนวณกรณีพื้นราบ (horizontal)

ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่า diffuse illuminance บนพื้นราบที่ได้จากการคำนวณกับค่าจากการวัด ปี 2007 ของทั้ง 3 สถานีแสดงดังตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.14 แสดงค่าความแตกต่างระหว่างค่า diffuse illuminance บนพื้นราบจากการคำนวณกับค่าจากการวัด ของทั้ง 4 สถานี

สถานี	MBE (%)	RMSE (%)	AVE (klux)	N
เชียงใหม่	4.84	10.78	33.73	80
อุบลราชธานี	3.42	12.55	34.70	81
สงขลา	6.41	10.49	35.28	75

ผลการเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance บนพื้นราบ ระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการอินทิเกรตกับค่าที่ได้จากการวัด ในปี 2007 ของสถานีเชียงใหม่ อุบลราชธานี และสงขลา พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกันดี มีค่าความคลาดเคลื่อนในรูป RMSE อยู่ในช่วง 10-12% โดยผลการคำนวณที่สถานีสงขลาจะมีค่า RMSE ต่ำสุด และเมื่อพิจารณาค่า MBE พบว่าค่า diffuse illuminance จากการคำนวณจะมีค่าสูงกว่าค่าที่วัดได้จริงในทุกสถานี กราฟผลการเปรียบเทียบของทั้ง 3 สถานี แสดงดังรูปที่ 3.47



รูปที่ 3.47 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance บนพื้นราบจากการคำนวณ โดยการอินทิเกรตกับค่าวัดจริงของสถานี (a) เชียงใหม่, (b) อุบลราชธานี และ (c) สงขลา

ข) การคำนวณกรณีพื้นเอียง (inclined surface)

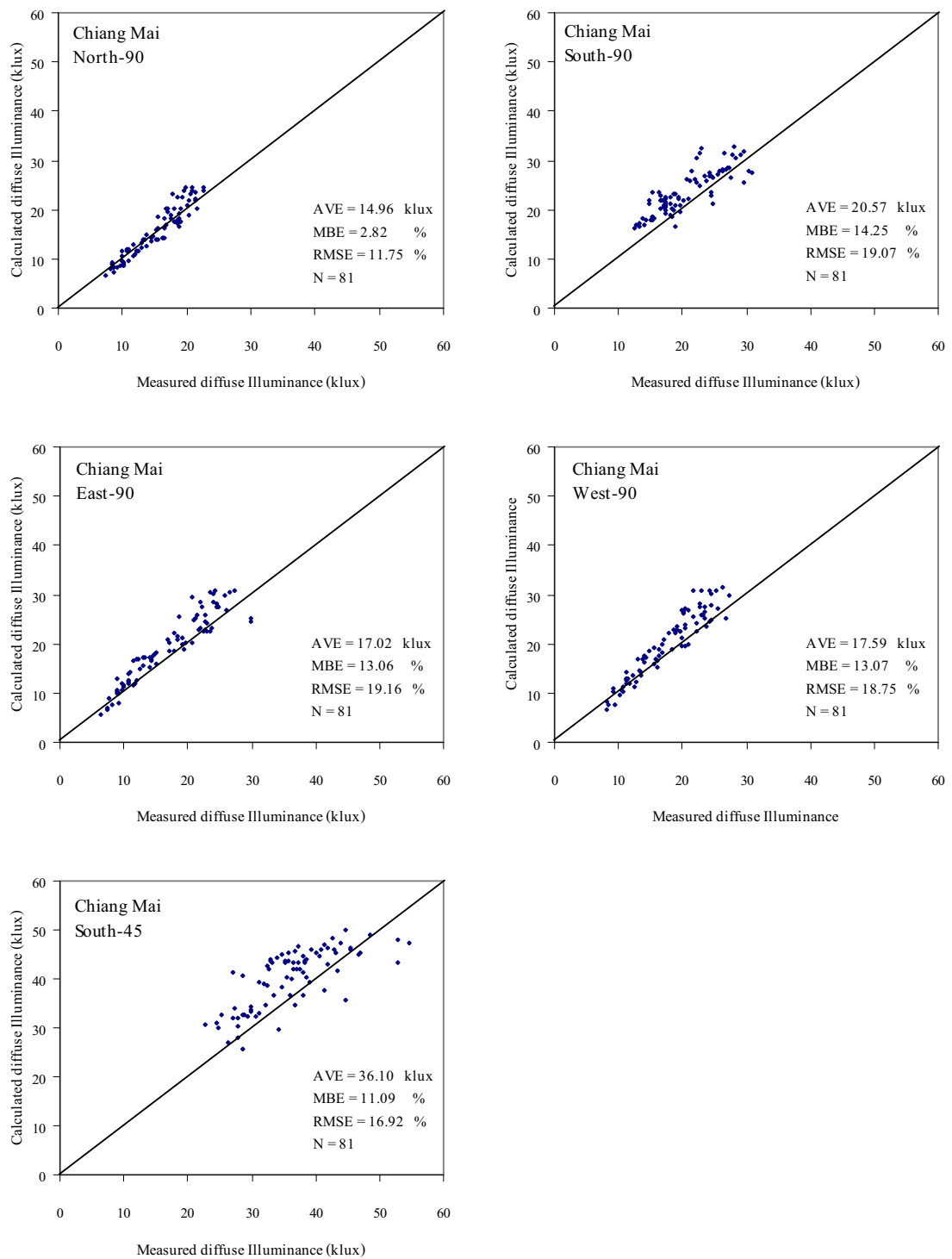
1) สถานีเชียงใหม่

ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงที่ได้จากการวัดกับค่าจากการคำนวณ โดยวิธีอินทิเกรต luminance ของสถานีเชียงใหม่ ปี 2007 แสดงดังตารางที่ 3.15

ตารางที่ 3.15 แสดงค่าความแตกต่างระหว่างค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงจากการคำนวณกับค่าจากการวัดของสถานีเชียงใหม่ ปี 2007

เชียงใหม่	MBE (%)	RMSE (%)	AVE (klux)	N
North-90	2.82	11.75	14.96	81
South-90	14.25	19.07	20.57	81
East-90	13.06	19.16	17.02	81
West-90	13.07	18.75	17.59	81
South-45	11.09	16.92	36.10	81

จากผลการเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียง ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการอินทิเกรตกับค่าที่วัดจริง ในปี 2007 ที่สถานีเชียงใหม่ พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกันดี โดยมีค่า RMSE อยู่ในช่วง 11-19% โดยผลการคำนวณในกรณีระนาบแนวตั้งทิศเหนือจะมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด เมื่อพิจารณาจากค่า MBE พบว่า ผลการคำนวณทั้งหมดจะมีลักษณะที่สูงกว่าค่าวัดจริง กราฟผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับค่าจากการคำนวณบนระนาบเอียงกรณีต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.48



รูปที่ 3.48 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงจากการคำนวณกับค่าจากการวัดของสถานีเชียงใหม่

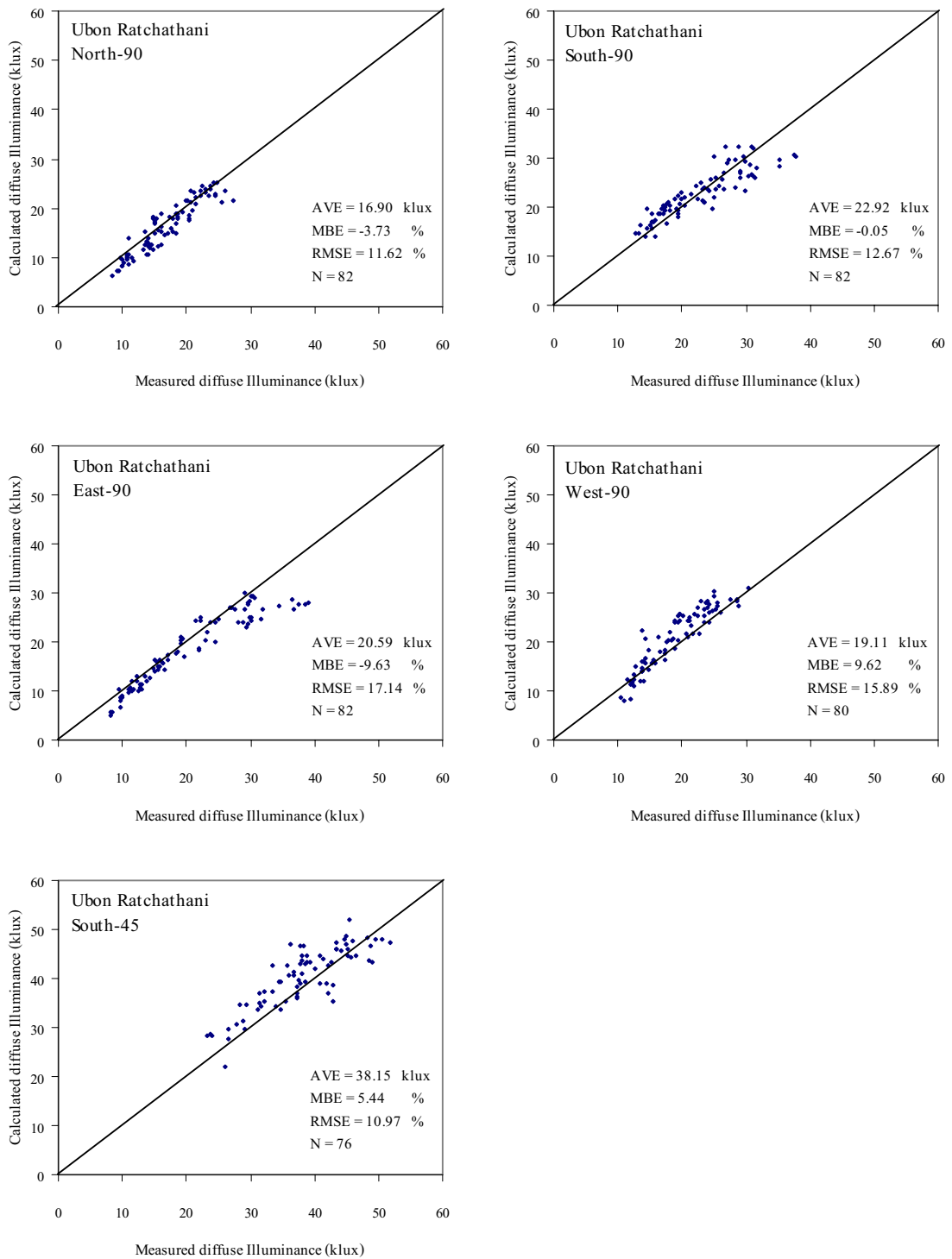
2) สถานีอุบลราชธานี

ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีอินทิเกรตกับค่าจากการวัดของสถานีอุบลราชธานี ปี 2007 แสดงดังตารางที่ 3.16

ตารางที่ 3.16 แสดงค่าความแตกต่างระหว่างค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงจากการคำนวณกับค่าจากการวัดของสถานีอุบลราชธานี ปี 2007

อุบลราชธานี	MBE (%)	RMSE (%)	AVE (klux)	N
North-90	-3.73	11.62	16.90	82
South-90	-0.05	12.67	22.92	82
East-90	-9.63	17.14	20.59	82
West-90	9.62	15.89	19.11	80
South-45	5.44	10.97	38.15	76

จากผลการเปรียบเทียบพบว่า ความแตกต่างระหว่างค่า diffuse illuminance ที่ได้จากการคำนวณกับค่าวัดจริง ที่สถานีอุบลราชธานี ปี 2007 จะมีค่า RMSE อยู่ในช่วง 10-17% โดยผลการคำนวณที่ดีที่สุดพบในกรณีระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ มีค่า RMSE เท่ากับ 10.97% เมื่อพิจารณาที่ค่า MBE พบว่ากรณีของการคำนวณที่ระนาบแนวตั้งทิศเหนือ ทิศใต้และทิศตะวันออก ค่า diffuse illuminance จากการคำนวณจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริง ส่วนในกรณีระนาบแนวตั้งทิศตะวันตกและระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ พบว่าผลการคำนวณจะมีค่าสูงกว่าค่าที่วัดได้จริง กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่า diffuse illuminance จากการวัดกับค่าที่ได้จากการคำนวณ บนระนาบเอียงกรณีต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.49



รูปที่ 3.49 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงจากการคำนวณกับค่าจากการวัดของสถานีอุบลราชธานี

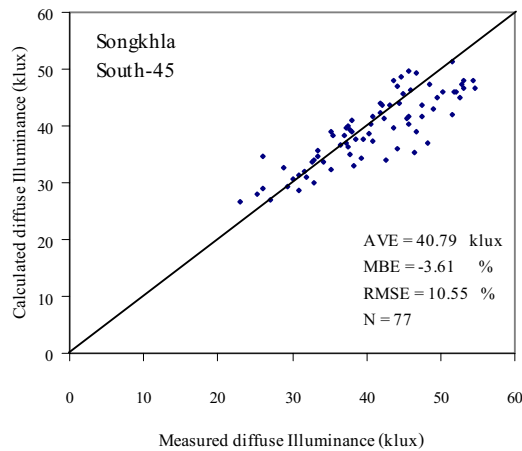
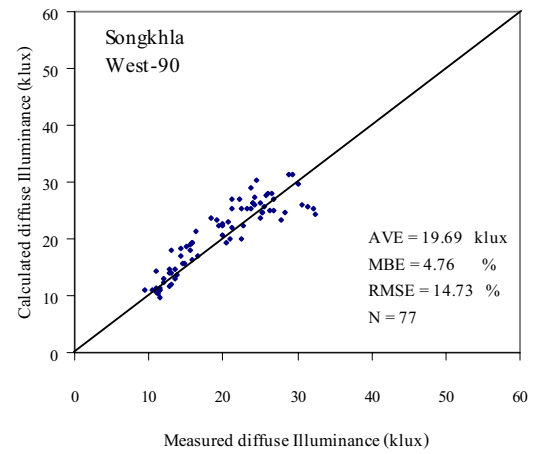
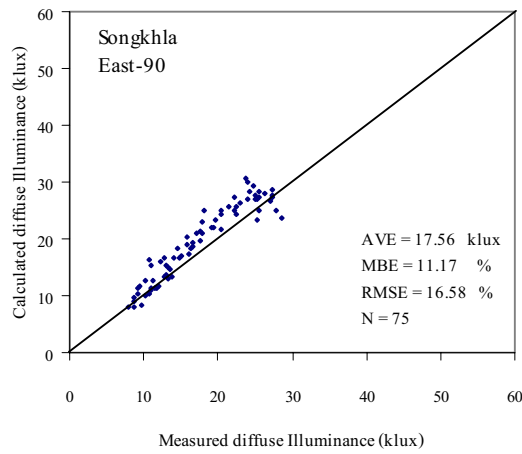
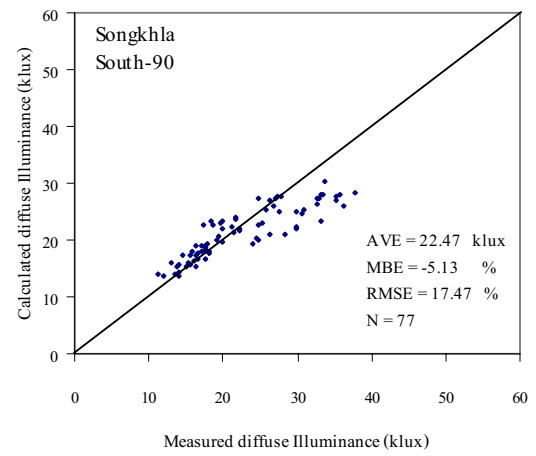
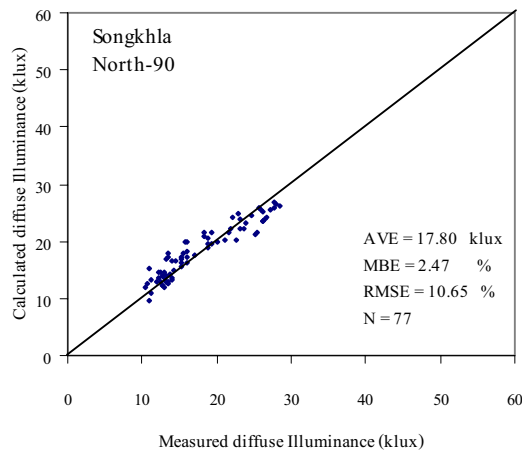
3) สถานีสงขลา

ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณกับค่าจากการวัดของสถานีสงขลา ปี 2007 แสดงดังตารางที่ 3.17

ตารางที่ 3.17 แสดงค่าความแตกต่างระหว่างค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงจากการคำนวณกับค่าจากการวัดของสถานีสงขลา ปี 2007

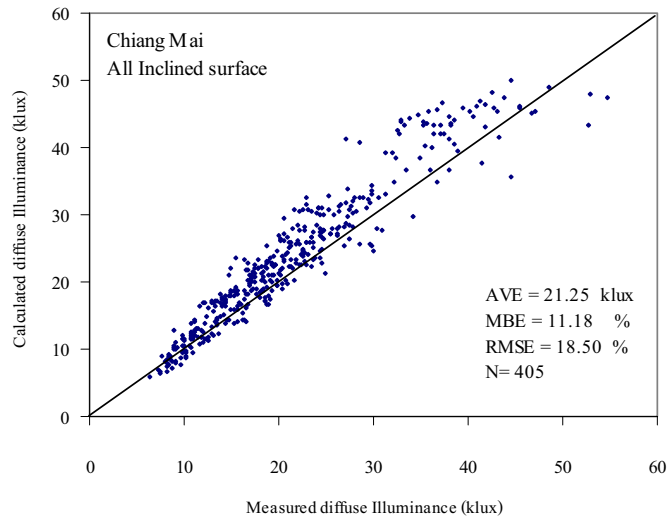
สงขลา	MBE (%)	RMSE (%)	AVE (klux)	N
North-90	2.47	10.65	17.80	77
South-90	-5.13	17.47	22.47	77
East-90	11.17	16.58	17.56	75
West-90	4.76	14.73	19.69	77
South-45	-3.61	10.55	40.79	77

ผลการคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงโดยวิธีการอินทิเกรต sky luminance เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการวัด ที่สถานีสงขลา พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 10-17% โดยผลการคำนวณกรณีระนาบเอียง 45 องศา จะมีค่า RMSE ต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาค่า MBE พบว่าผลการคำนวณในกรณีระนาบแนวตั้งทิศใต้และระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ จะมีค่าต่ำกว่าค่าวัดจริง ส่วนกรณีระนาบแนวตั้งทิศเหนือ ตะวันออกและตะวันตก ผลการคำนวณจะสูงกว่าค่าวัดจริง กราฟแสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดกับค่าการคำนวณบนระนาบเอียงกรณีต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.50

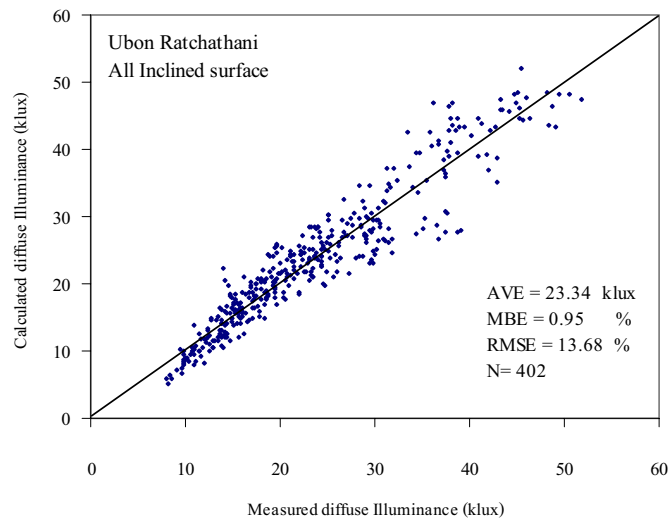


รูปที่ 3.50 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงจากการคำนวณกับค่าจากการวัด
ที่สถานีสงขลา

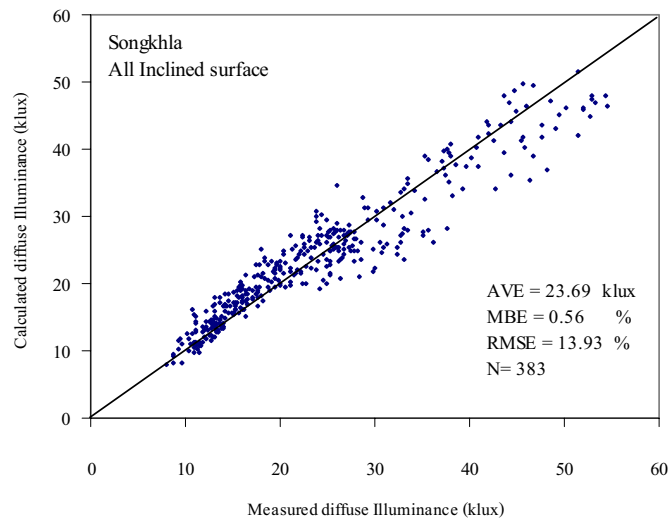
ผลการเปรียบเทียบโดยรวมของการคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงกรณีต่างๆ ของแต่ละสถานี แสดงดังรูปที่ 3.51-3.53



รูปที่ 3.51 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงทั้งหมด จากการคำนวณกับค่าจากการวัด ที่สถานีเชียงใหม่

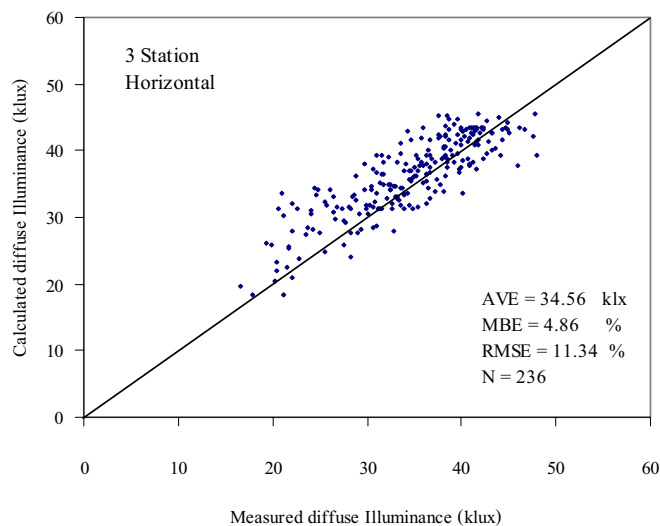


รูปที่ 3.52 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงทั้งหมด จากการคำนวณกับค่าจากการวัด ที่สถานีอุบลราชธานี

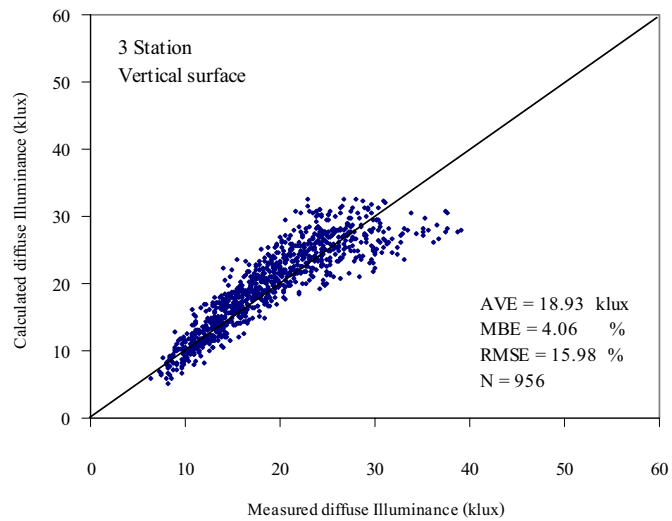


รูปที่ 3.53 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance บนพื้นเอียงทั้งหมด
จากการคำนวณกับค่าจากการวัด ที่สถานีสงขลา

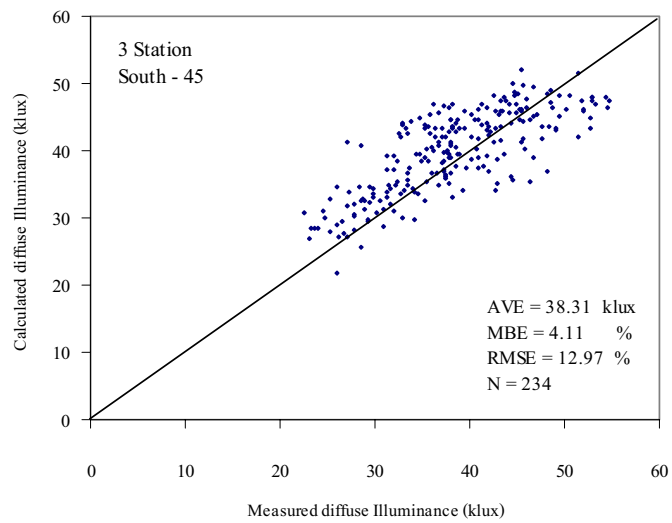
สำหรับผลการเปรียบเทียบโดยรวม จากข้อมูลการวัดทั้ง 3 สถานี ในการคำนวณ diffuse illuminance กรณีบนพื้นราบ ระนาบแนวตั้ง และระนาบเอียง 45 องศา แสดงดังรูปที่ 3.54-3.56



รูปที่ 3.54 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance บนพื้นราบจากการคำนวณ
กับค่าจากการวัดของทั้ง 3 สถานี



รูปที่ 3.55 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้ง
จากการคำนวณกับค่าจากการวัดของทั้ง 3 สถานี



รูปที่ 3.56 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า diffuse illuminance บนระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้
จากการคำนวณกับค่าจากการวัดของทั้ง 3 สถานี

3.6 ลักษณะทางสถิติของแสงสว่างธรรมชาติในภูมิภาคต่างๆ ในประเทศไทย

เนื่องจากปริมาณแสงสว่างธรรมชาติมีแหล่งกำเนิดมาจากดวงอาทิตย์เมื่อผ่านบรรยากาศลงมายังพื้นผิวโลกจะถูกกลดทอนโดยองค์ประกอบของบรรยากาศที่สำคัญคือ อิทธิพลของเมฆ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงในรอบวันและตามฤดูกาล ซึ่งไม่สามารถทำนายได้อย่างเที่ยงตรง อย่งไรก็ตามการศึกษาโดยใช้ข้อมูลย้อนหลังจำนวนมากๆ สามารถนำมาใช้เป็นตัวแทนในการทำนายแนวโน้มในเชิงสถิติได้ ยกตัวอย่างกรณีในช่วงฤดูฝน จะมีโอกาสที่ท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆมากกว่าในช่วงฤดูแล้ง เป็นต้น ดังนั้นการนำข้อมูลปริมาณแสงสว่างธรรมชาติซึ่งขึ้นกับสภาพท้องฟ้าและภูมิภาคมาใช้งาน จึงไม่สามารถเลือกเอาวันใดวันหนึ่งมาใช้งานได้ โดยทั่วไปจำเป็นต้องรู้การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงสว่างธรรมชาติตามเวลาในรอบวันและการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลในรอบปีระยะยาว

ผู้วิจัยได้นำข้อมูลความเข้มแสงสว่างธรรมชาติที่วัดได้จากสถานีเชียงใหม่ อุบลราชธานี นครปฐม และสงขลา มาทำการวิเคราะห์ตามรายละเอียดดังนี้

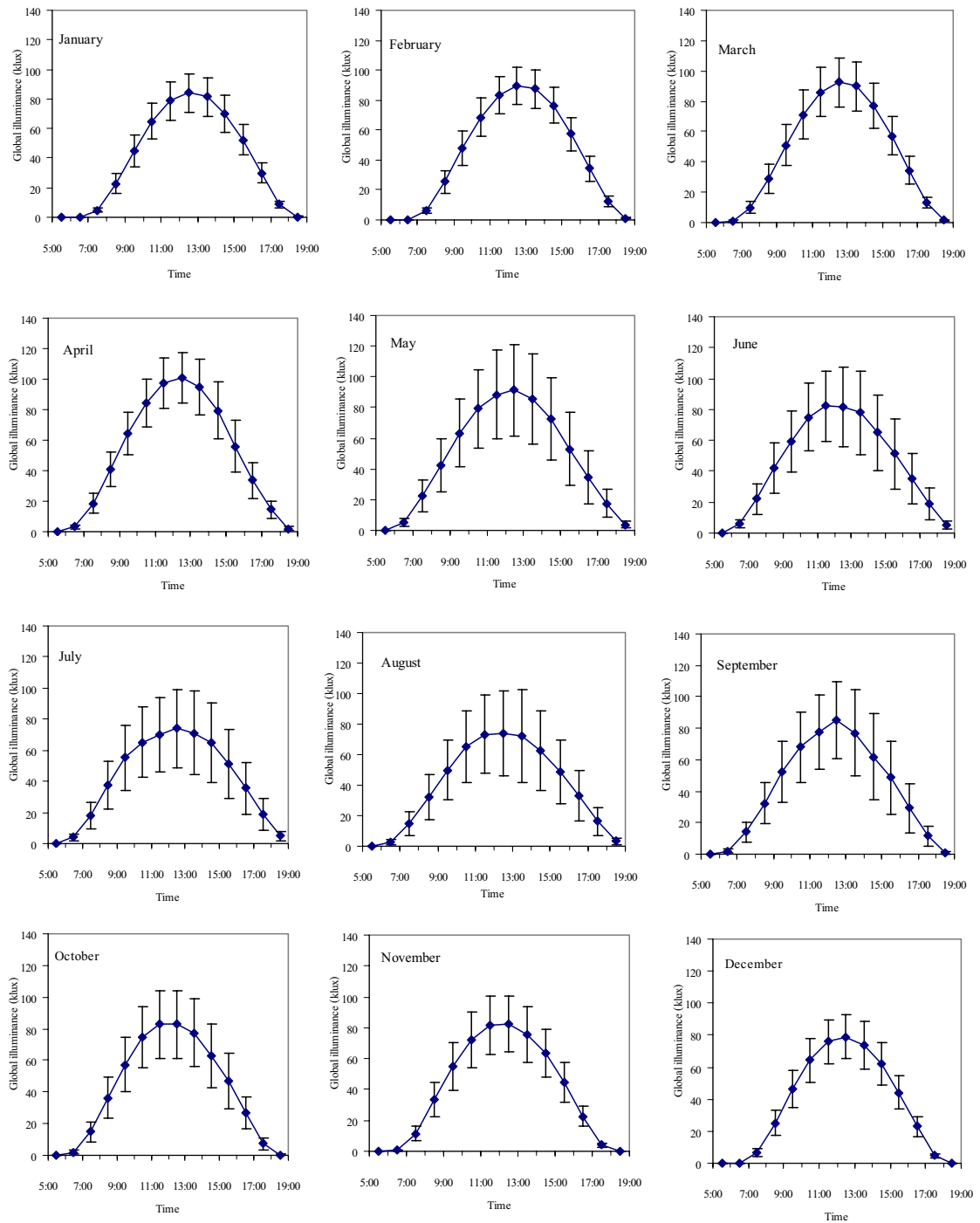
3.6.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงสว่างธรรมชาติตามเวลาในรอบวัน

3.6.1.1 การแปรค่าตามเวลาในรอบวันของ global illuminance

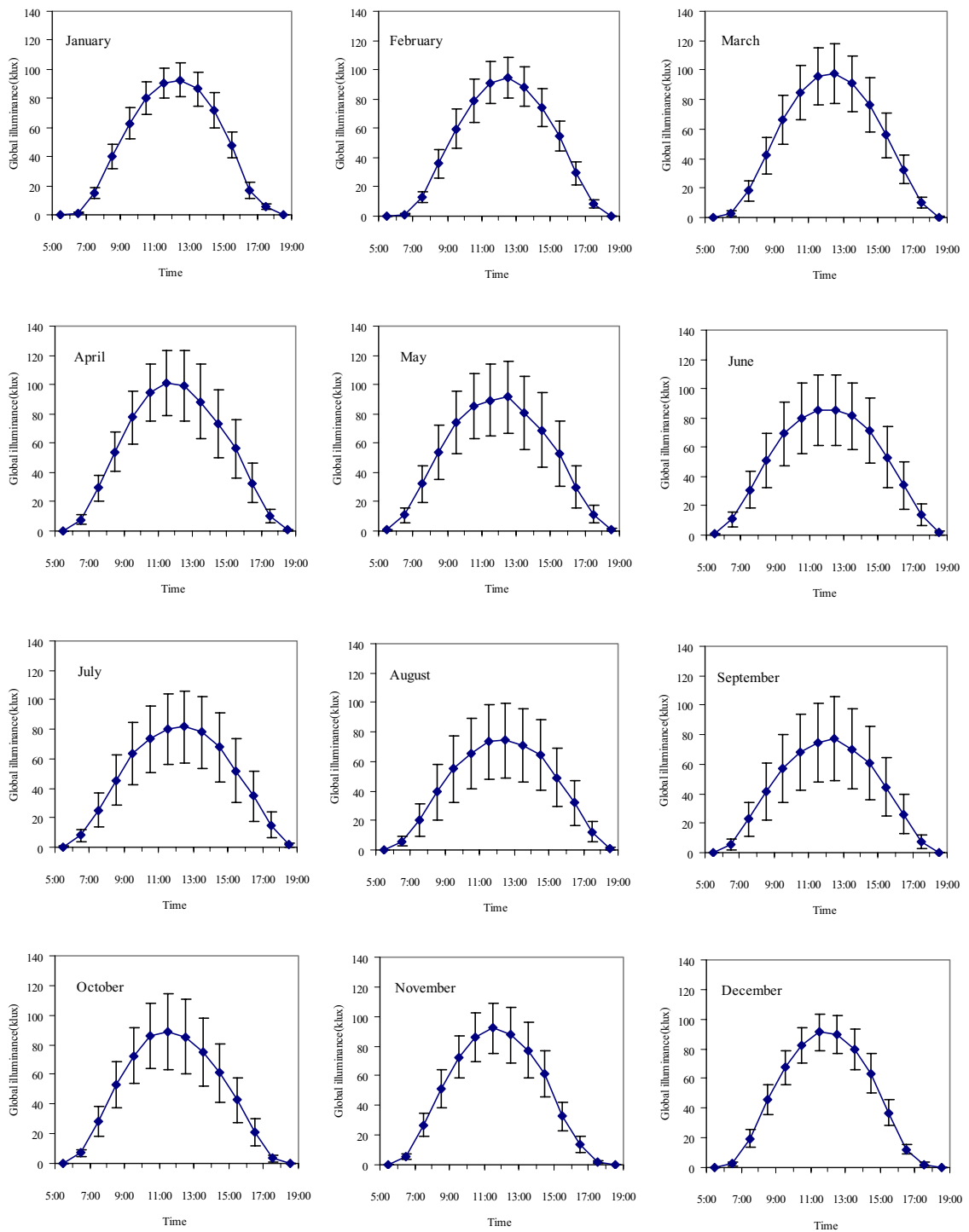
เนื่องจากข้อมูล global illuminance ของชั่วโมงที่กำหนด เช่น ที่เวลา 10.00 น. ของวันหนึ่ง โดยทั่วไปจะไม่เท่ากับ global illuminance ที่ชั่วโมงเดียวกันของวันถัดไป ทั้งนี้เพราะสภาพอากาศของแต่ละวันไม่เหมือนกัน ในการใช้งานข้อมูล global illuminance ที่แต่ละเวลา ผู้ใช้มักต้องการค่าเฉลี่ยตลอดทั้งเดือนของชั่วโมงนั้นๆ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการคำนวณหาค่าเฉลี่ยดังกล่าวแล้วนำมาเขียนกราฟกับเวลาในรอบวัน ผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.57-3.60 โดยจากกราฟของสถานีเชียงใหม่จะเห็นว่าค่า global illuminance จะเพิ่มขึ้นจากช่วงเช้าจนถึงค่าสูงสุดในตอนเที่ยงวันและจะค่อยๆ ลดลงจนถึงตอนเย็น โดยมีลักษณะการแปรค่าในช่วงเช้าและช่วงบ่ายค่อนข้างสมมาตร เมื่อพิจารณาค่าความเข้มแสงสว่างของแต่ละเดือนพบว่าค่าสูงสุดจะแตกต่างกันตามเดือนต่างๆ ในรอบปี โดยเดือนกุมภาพันธ์จนถึงเดือนพฤษภาคมซึ่งเป็นช่วงฤดูแล้งในประเทศไทยจะมีค่าตอนเที่ยงวันอยู่ที่ระดับสูง สำหรับเดือนอื่นๆ จะมีค่าที่ต่ำกว่า ซึ่งค่าสูงสุดในแต่ละเดือนจะแปรค่าอยู่ในช่วง 75-105 klux

สำหรับสถานีอุบลราชธานีจะมีการแปรค่า global illuminance ที่คล้ายกับค่าที่วัดได้จากสถานีเชียงใหม่ กล่าวคือค่าสูงสุดจะแตกต่างกันไปตามเดือนต่างๆ ในรอบปี และเดือนมกราคมจนถึงเดือนพฤษภาคมจะมีค่าตอนเที่ยงวันสูงสุด แปรค่าอยู่ในช่วง 80-105 klux สำหรับสถานีนครปฐมค่า global illuminance ที่วัดได้จะแปรค่าอยู่ระหว่าง 70-105 klux และของสถานีสงขลาจะแปรค่าอยู่ในช่วง

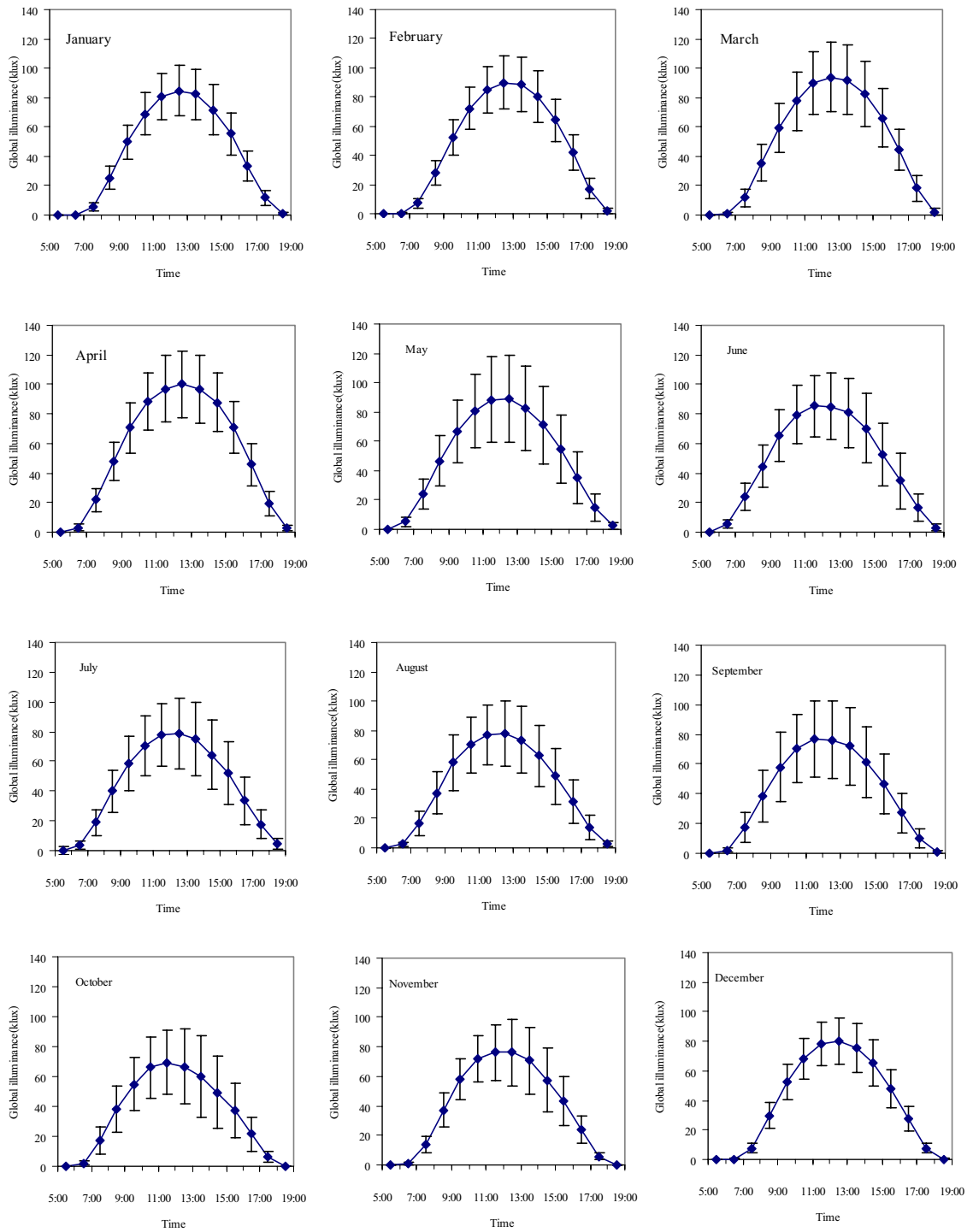
80-120 klux จากผลดังกล่าวแสดงว่าปริมาณ global illuminance ในช่วงเที่ยงวันของประเทศไทยจะมีค่าค่อนข้างสูงตลอดทั้งปี ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้ นับเป็นผลดีต่อการนำแสงสว่างธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ในอาคาร



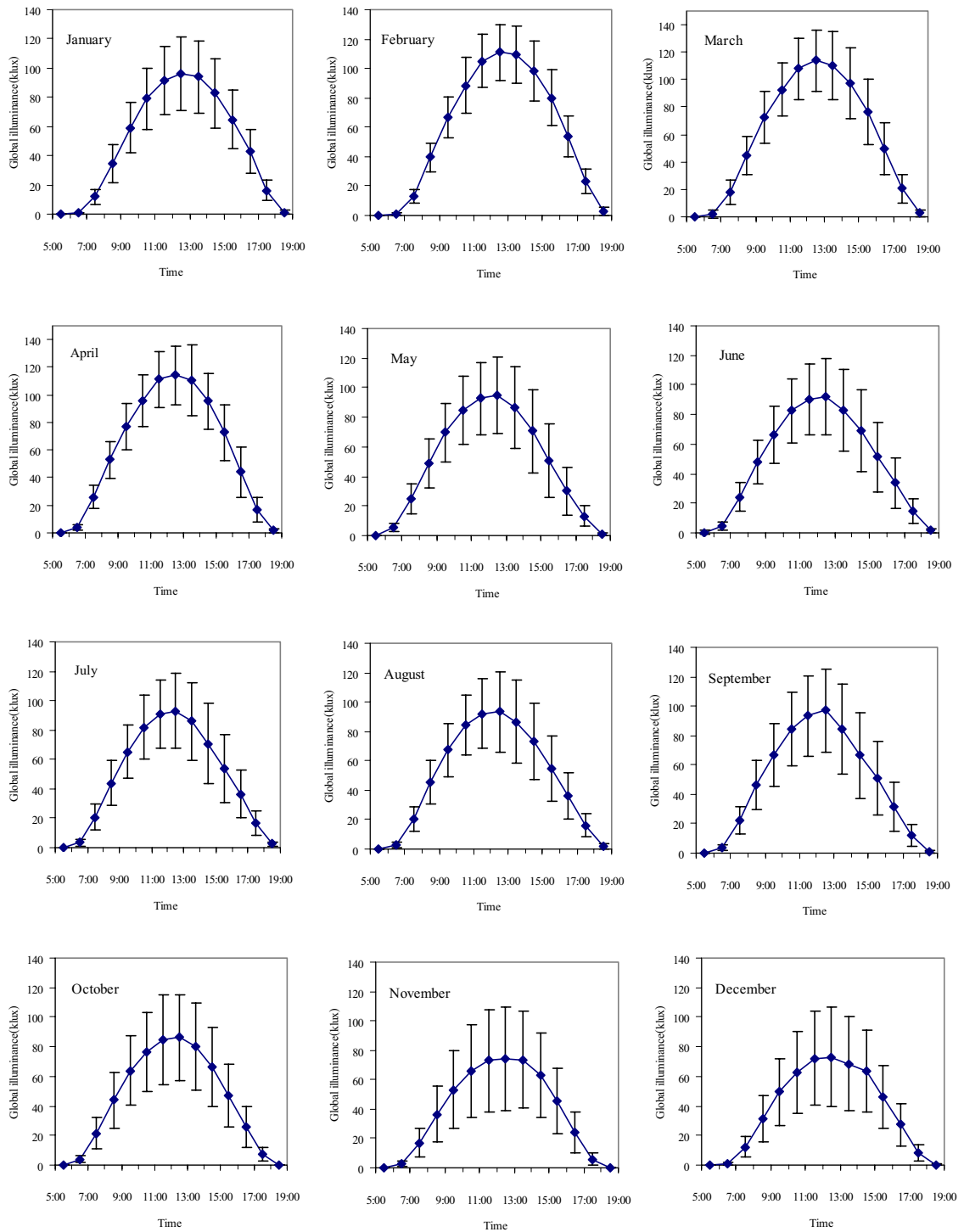
รูปที่ 3.57 กราฟแสดง global illuminance รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเชียงใหม่



รูปที่ 3.58 กราฟแสดง global illuminance รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีอุบลราชธานี



รูปที่ 3.59 กราฟแสดง global illuminance รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนครปฐม

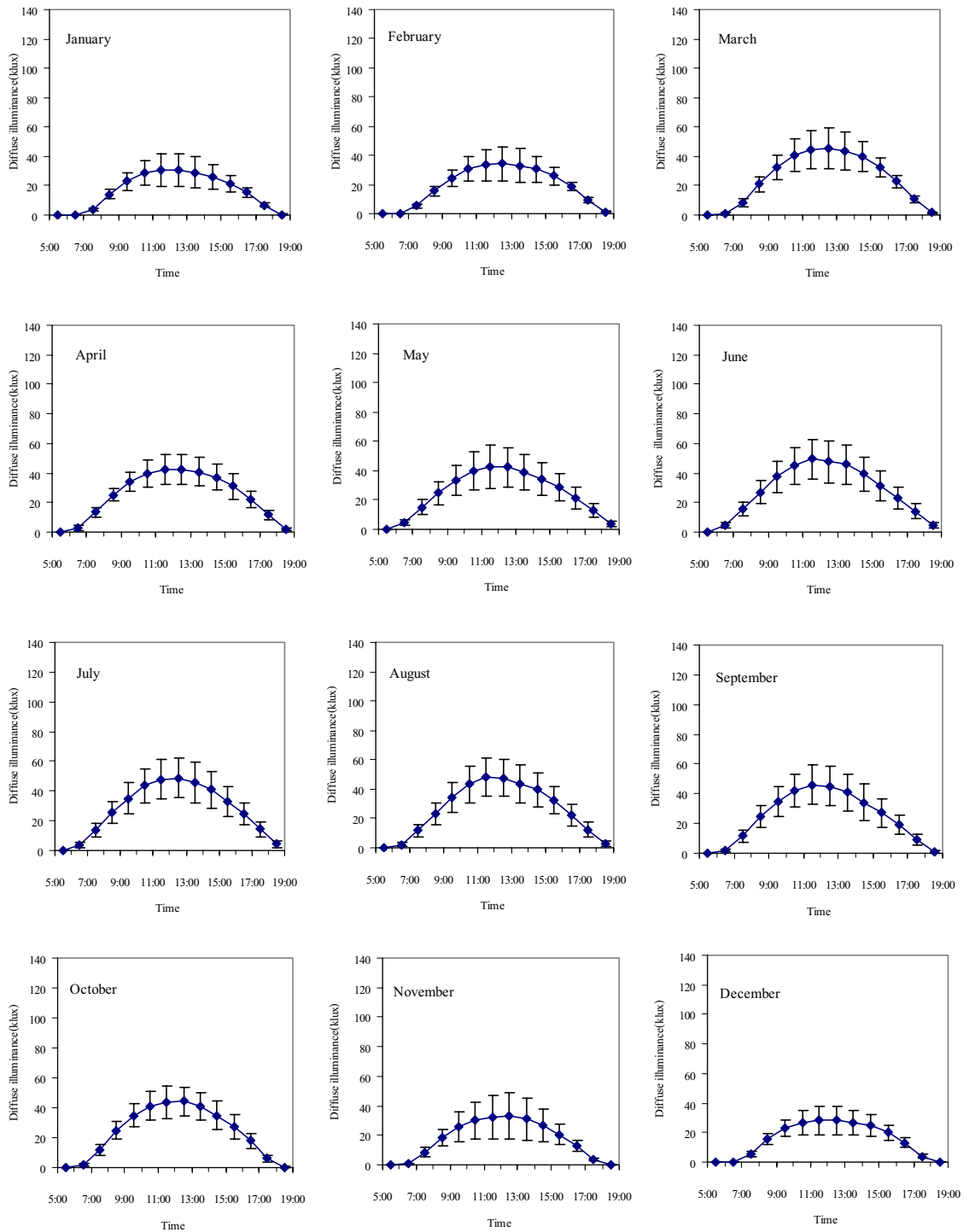


รูปที่ 3.60 กราฟแสดง global illuminance รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสงขลา

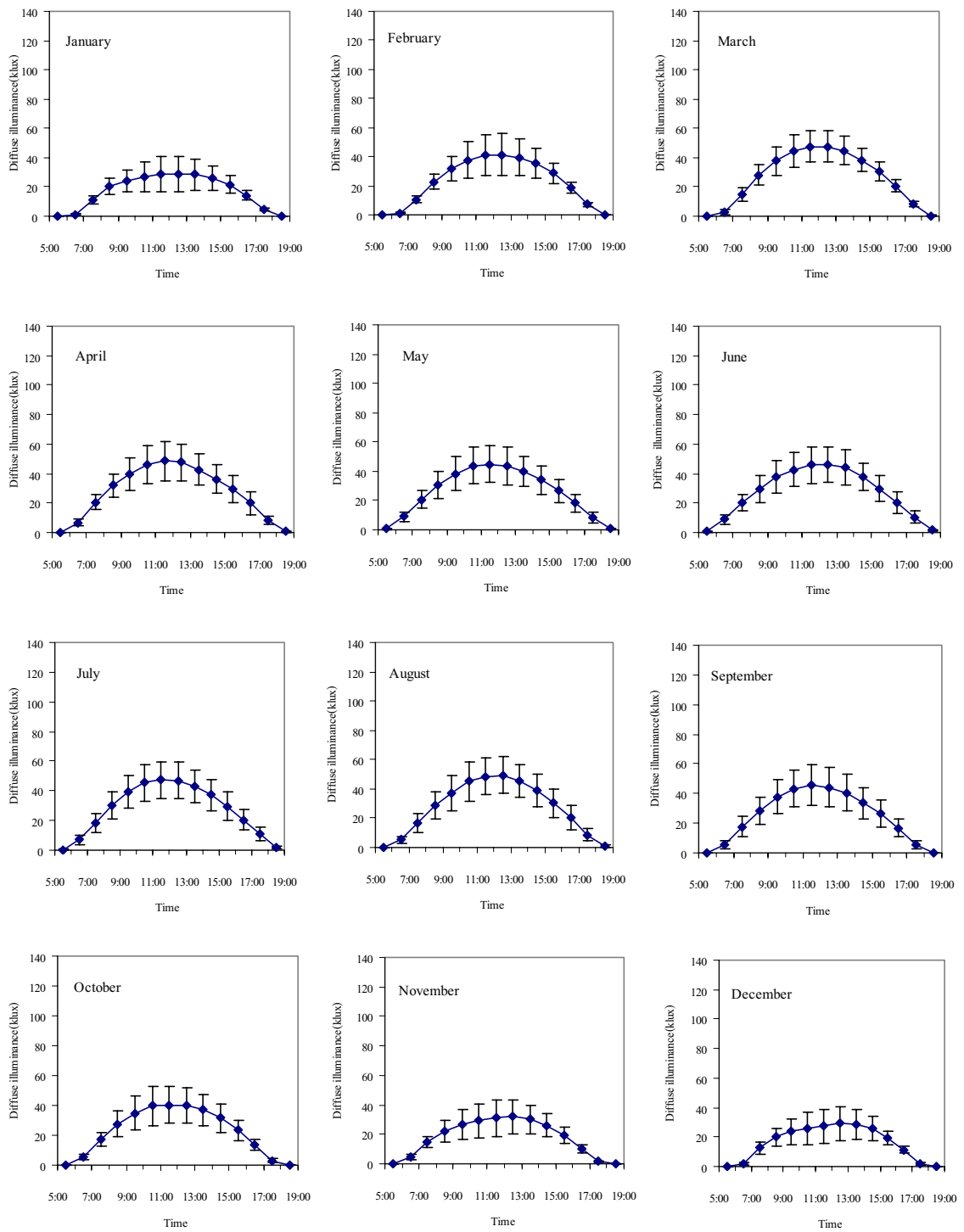
3.6.1.2 การแปรค่าตามเวลาในรอบวันของ diffuse illuminance

ในทำนองเดียวกันจะทำการศึกษาการแปรค่าตามเวลาในรอบวันของข้อมูล diffuse illuminance โดยในการศึกษาการแปรค่าดังกล่าวจะนำค่า diffuse illuminance ที่ได้มาเขียนกราฟตามเวลาในรอบวัน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.61-3.64 จากกราฟจะเห็นว่าค่า diffuse illuminance จะมีลักษณะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าสูงสุดที่เวลาเที่ยงวัน หลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงจนถึงช่วงเย็นทั้งนี้ เป็นผลมาจากการแปรค่าของมวลอากาศที่รังสีเคลื่อนที่ผ่าน โดยค่าสูงสุดของแต่ละวันจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในรอบปี

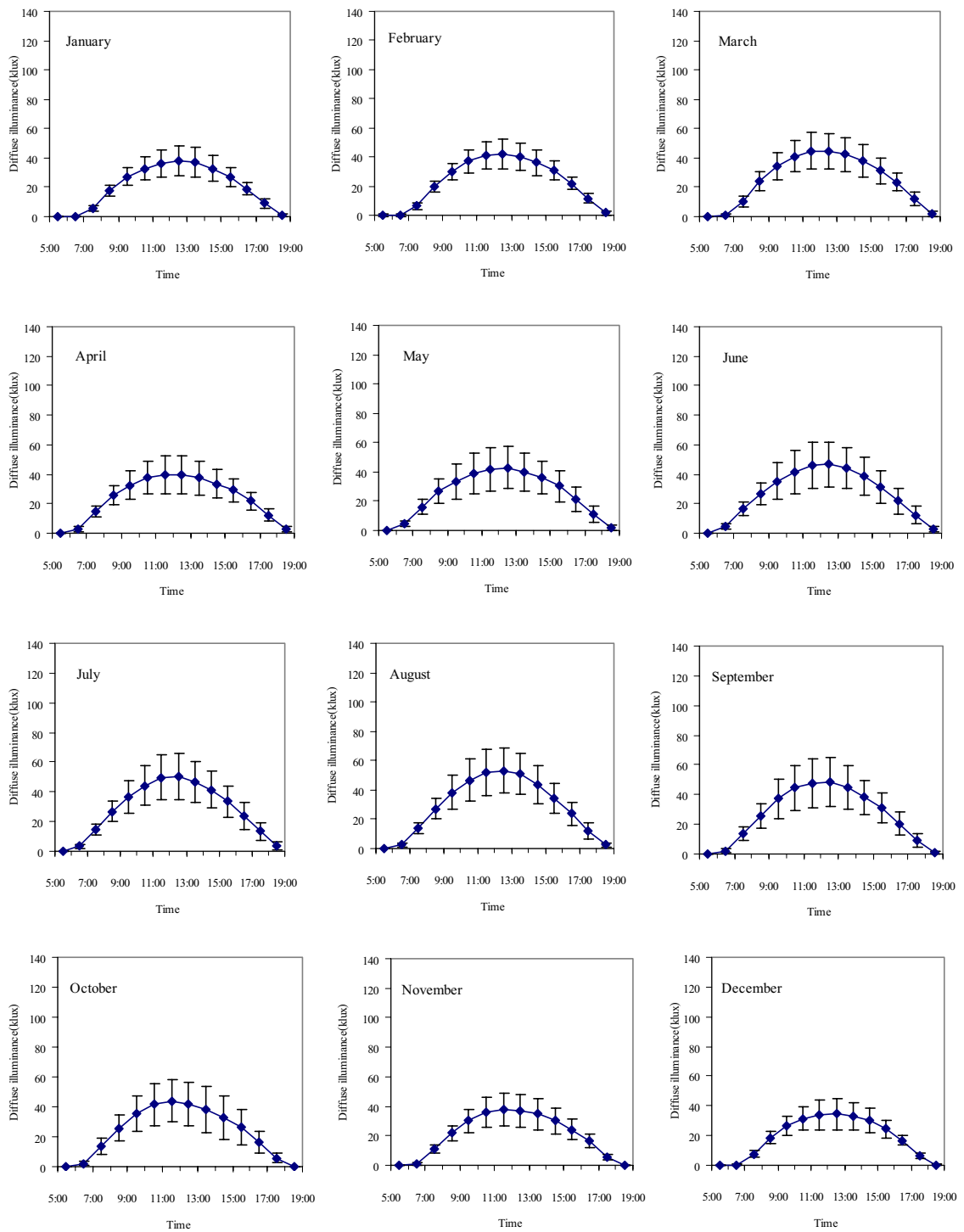
จากกราฟของสถานีเชียงใหม่ อุบลราชธานีและนครปฐม จะเห็นว่าค่า diffuse illuminance จะเพิ่มขึ้นจากช่วงเช้าจนถึงค่าสูงสุดตอนเที่ยงวัน จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงจนถึงตอนเย็น โดยในแต่ละเดือนจะมีค่าสูงสุดแตกต่างกันไปในรอบปี โดยเดือนมิถุนายนจนถึงเดือนกันยายนจะมีค่าตอนเที่ยงวันสูงสุด ส่วนเดือนอื่นๆ จะมีค่าตอนเที่ยงวันอยู่ในระดับที่ต่ำ สำหรับสถานีสงขลานั้น ในแต่ละเดือนจะมีค่าสูงสุดอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน



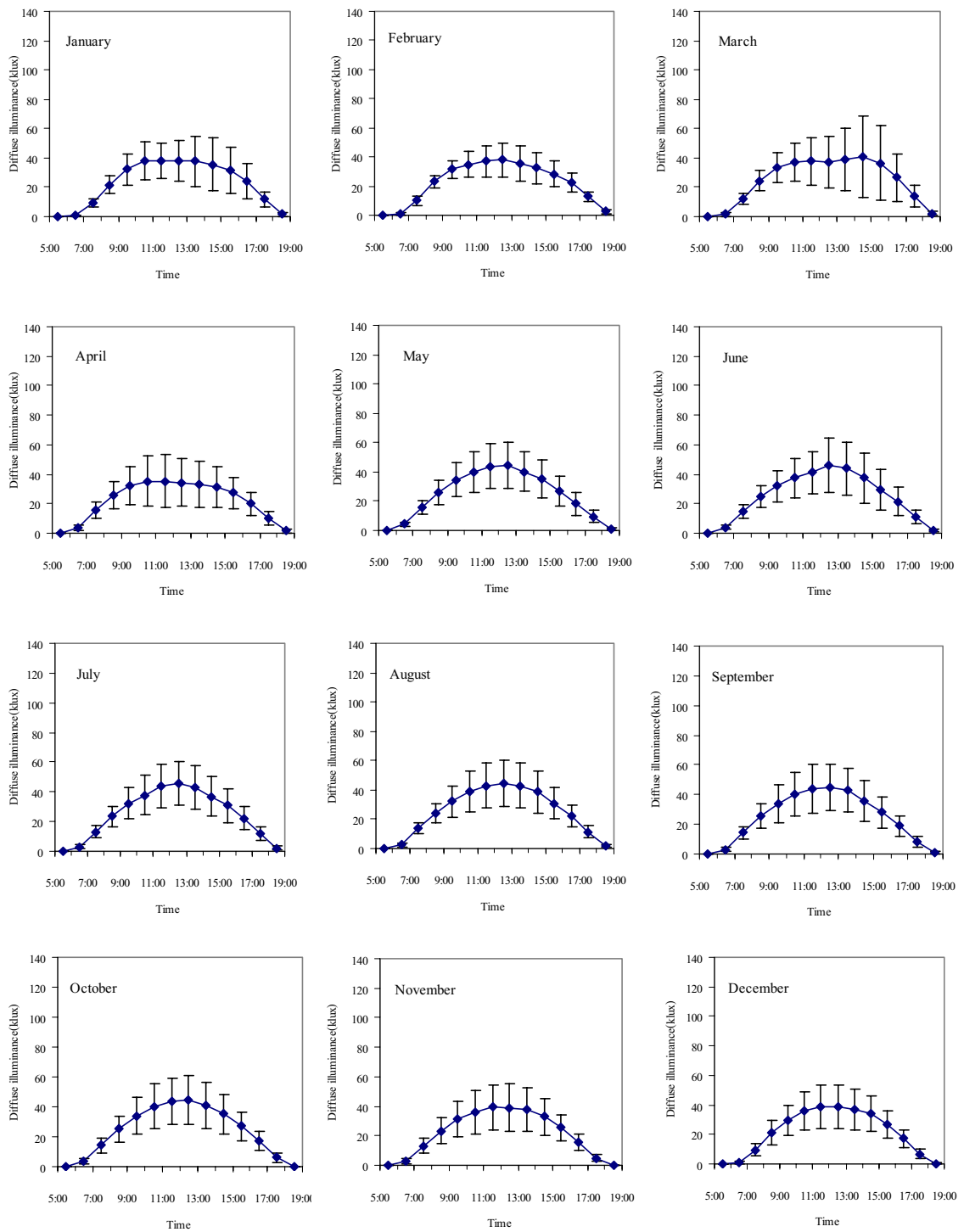
รูปที่ 3.61 กราฟแสดง diffuse illuminance รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเชียงใหม่



รูปที่ 3.62 กราฟแสดง diffuse illuminance รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีอุบลราชธานี



รูปที่ 3.63 กราฟแสดง diffuse illuminance รายชั่วโมง โมงเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนครปฐม



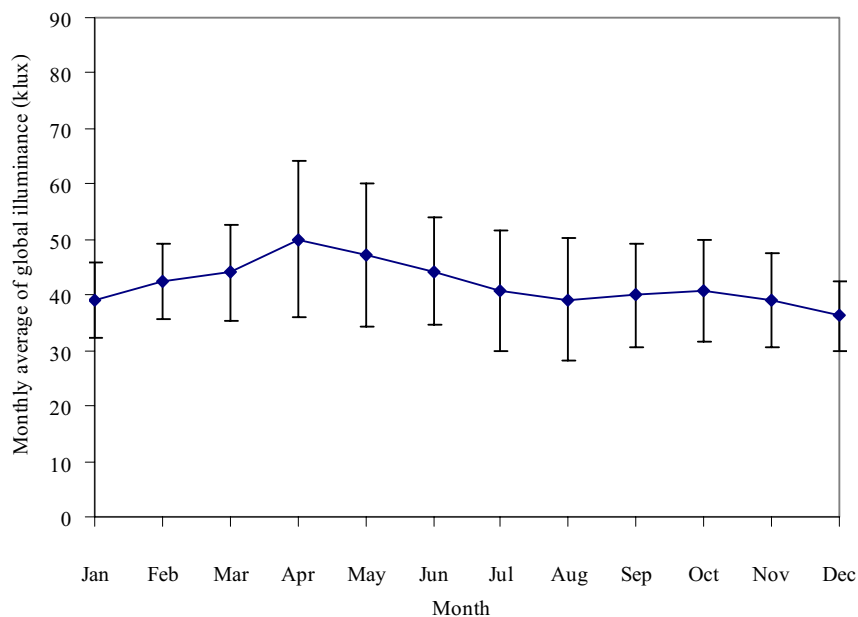
รูปที่ 3.64 กราฟแสดง diffuse illuminance รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสงขลา

3.6.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงสว่างธรรมชาติตามเวลาในรอบปี

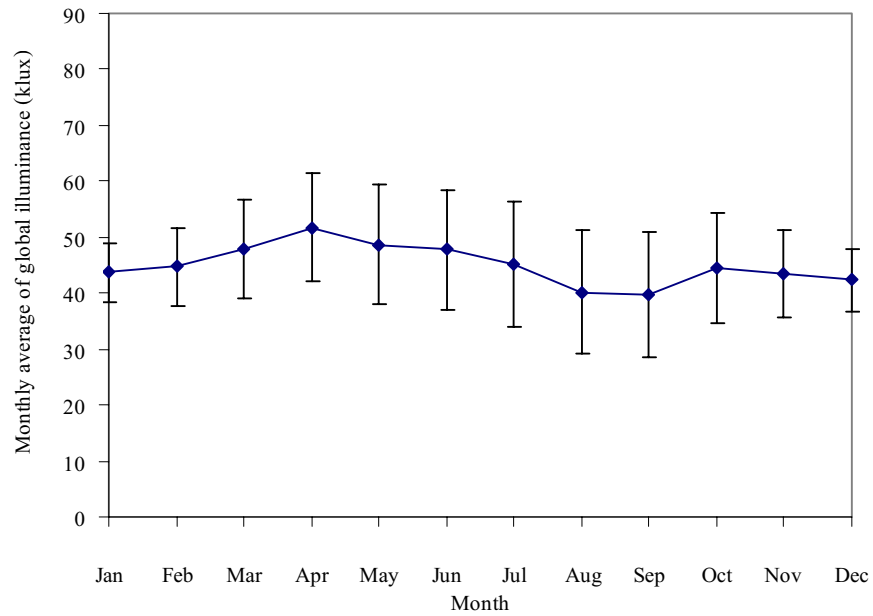
3.6.2.1 การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของ global illuminance

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้นำข้อมูล global illuminance ที่วัดจากสถานีเชียงใหม่ อุบลราชธานี นครปฐม และสงขลา มาทำการหาค่าเฉลี่ยของค่า global illuminance รายวันและรายเดือน และนำมาเขียนกราฟเพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงในรอบปี ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.65-3.68

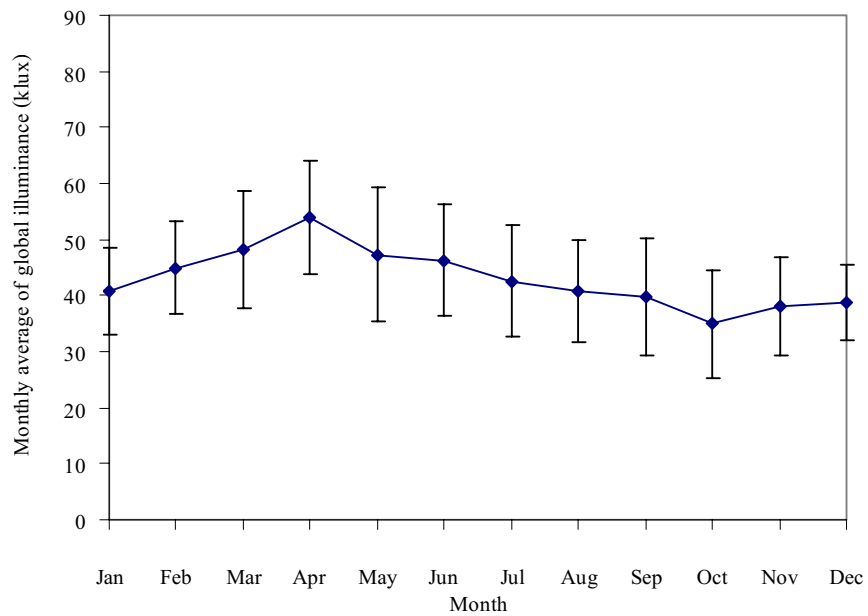
จากกราฟจะเห็นว่าค่า global illuminance ของทั้ง 4 สถานี มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงในรอบปีคล้ายกัน กล่าวคือ ค่า global illuminance จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากเดือนมกราคมจนถึงค่าสูงสุดที่เดือนเมษายนของสถานีเชียงใหม่ อุบลราชธานี และนครปฐม จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงในช่วงฤดูฝน (พฤษภาคม-ตุลาคม) และจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงเล็กน้อยในช่วงฤดูหนาว ส่วนที่สถานีสงขลา ค่าสูงสุดจะอยู่ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเมษายน จากนั้นจะลดลงและมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงเล็กน้อยในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงกันยายน และจะมีค่าค่อยๆ ลดลงจนถึงเดือนธันวาคม



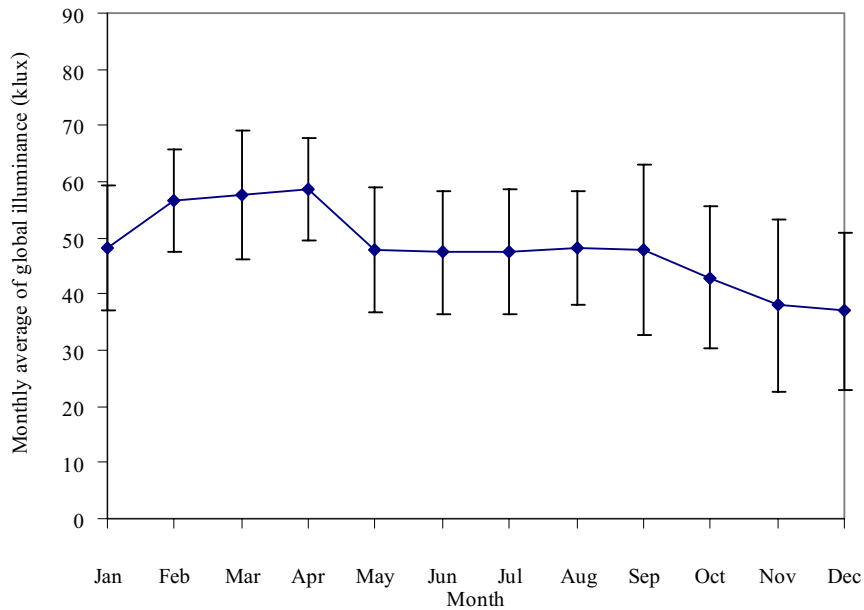
รูปที่ 3.65 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า global illuminance ตามฤดูกาลในรอบปีของสถานีเชียงใหม่



รูปที่ 3.66 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า global illuminance ตามฤดูกาลในรอบปีของสถานีอุบลราชธานี



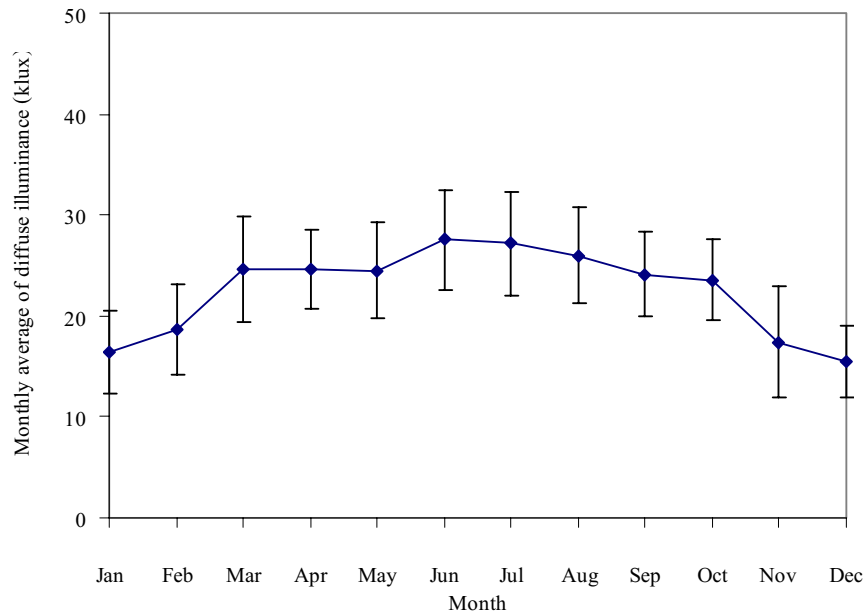
รูปที่ 3.67 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า global illuminance ตามฤดูกาลในรอบปีของสถานีนครพนม



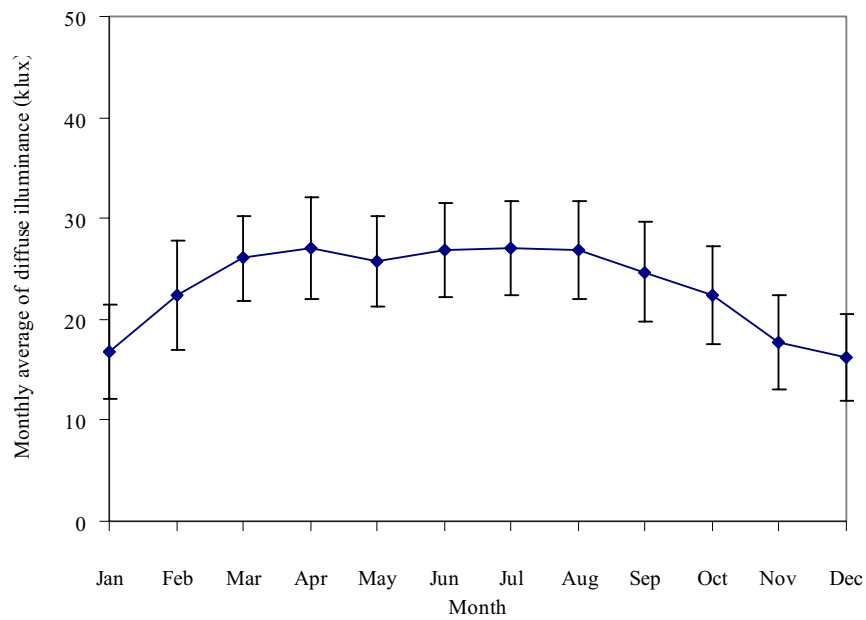
รูปที่ 3.68 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า global illuminance ตามฤดูกาลในรอบปีของสถานีสงขลา

3.6.2.2 การแปรค่าตามฤดูกาลของ diffuse illuminance

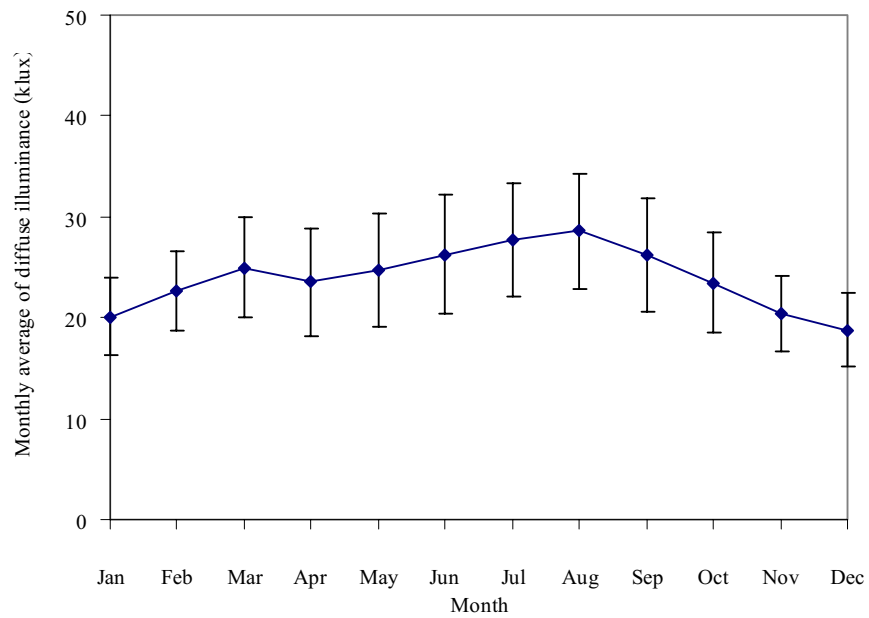
ผู้วิจัยได้ทำการหาค่าเฉลี่ยของค่า diffuse illuminance รายวันและรายเดือน แล้วนำมาเขียนกราฟเพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงในรอบปี ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.69-3.72 จากกราฟจะเห็นว่าค่า diffuse illuminance ของสถานีเชียงใหม่ อุบลราชธานีและนครปฐม มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงในรอบปีคล้ายกัน คือจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากเดือนมกราคมจนถึงเดือนมิถุนายนหรือเดือนสิงหาคม โดยค่า diffuse illuminance ที่วัดได้จากสถานีเชียงใหม่จะมีค่าสูงสุดในเดือนมิถุนายน สถานีอุบลราชธานีจะมีค่าสูงสุดในเดือนกรกฎาคม สถานีนครปฐมจะมีค่าสูงสุดในเดือนสิงหาคม จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงจนถึงเดือนธันวาคม ส่วนสถานีสงขลานั้นจะไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งปี โดยในแต่ละเดือนจะมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่า diffuse illuminance จะมีค่าสูงในช่วงฤดูฝนและต่ำในช่วงฤดูร้อน



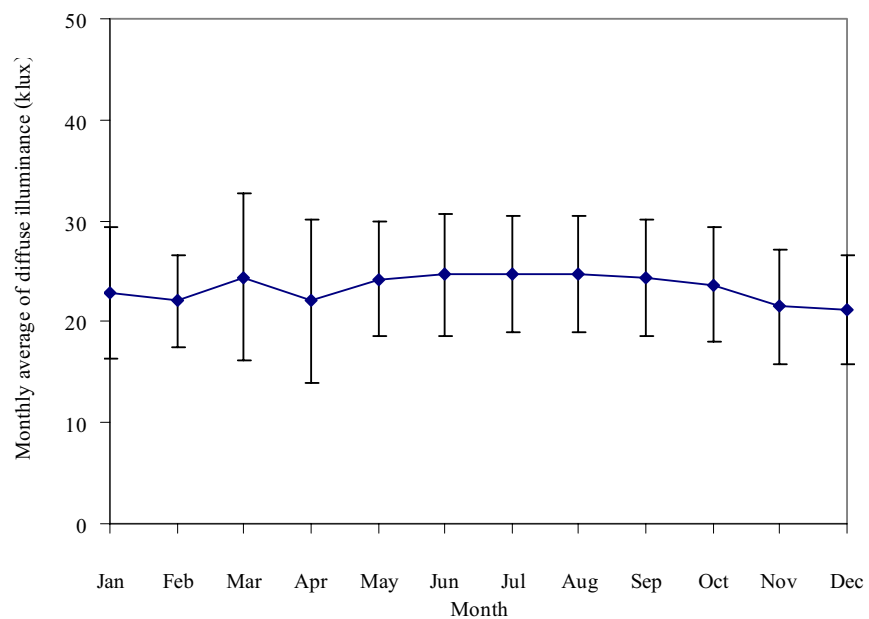
รูปที่ 3.69 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า diffuse illuminance ตามฤดูกาลในรอบปีของสถานีเชียงใหม่



รูปที่ 3.70 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า diffuse illuminance ตามฤดูกาลในรอบปีของสถานีอุบลราชธานี



รูปที่ 3.71 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า diffuse illuminance ตามฤดูกาลในรอบปีของสถานีนครปฐม



รูปที่ 3.72 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า diffuse illuminance ตามฤดูกาลในรอบปีของสถานีสงขลา

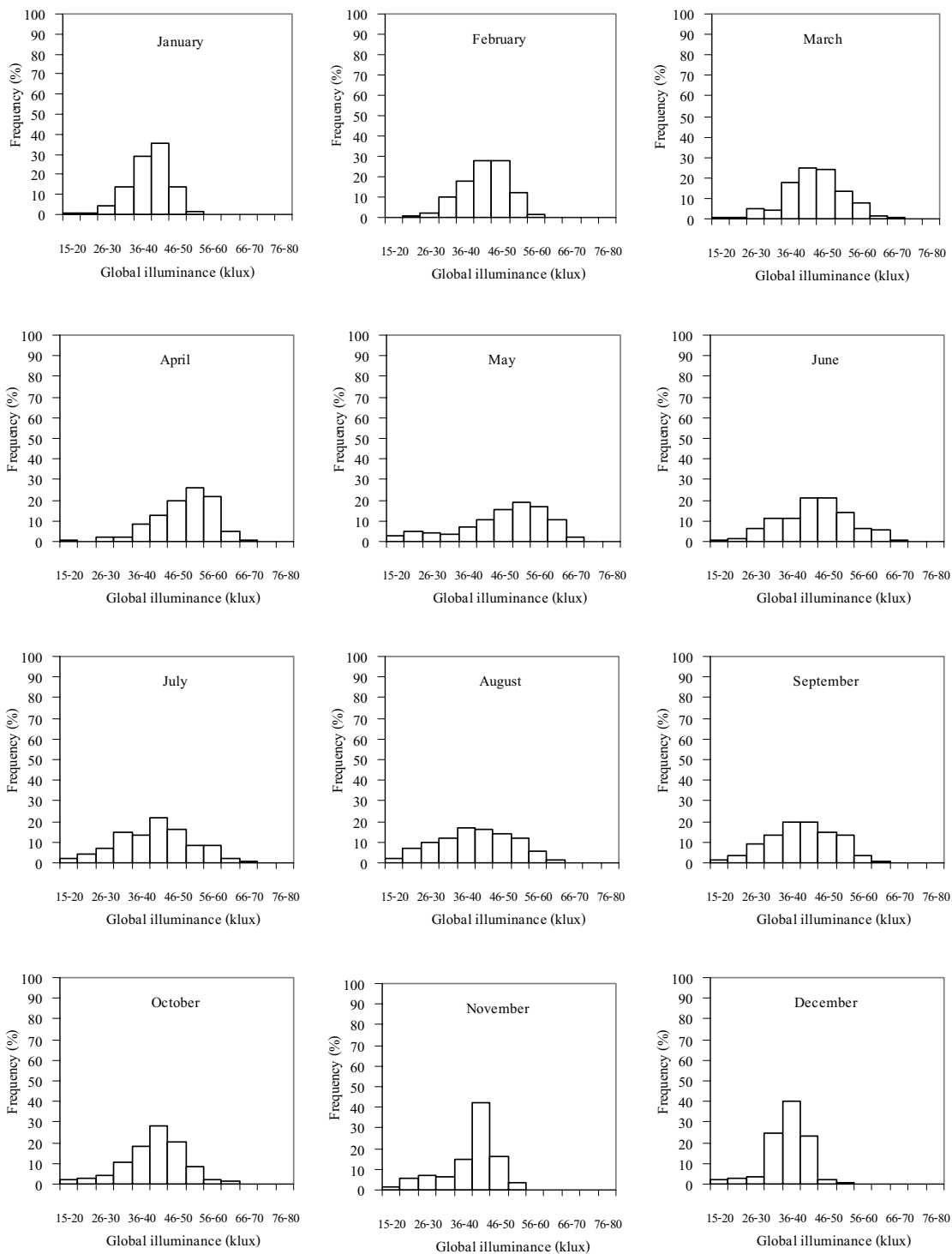
3.6.3 การแจกแจงความเข้มแสงสว่างธรรมชาติในรอบวัน

3.6.3.1 การแจกแจงของ global illuminance

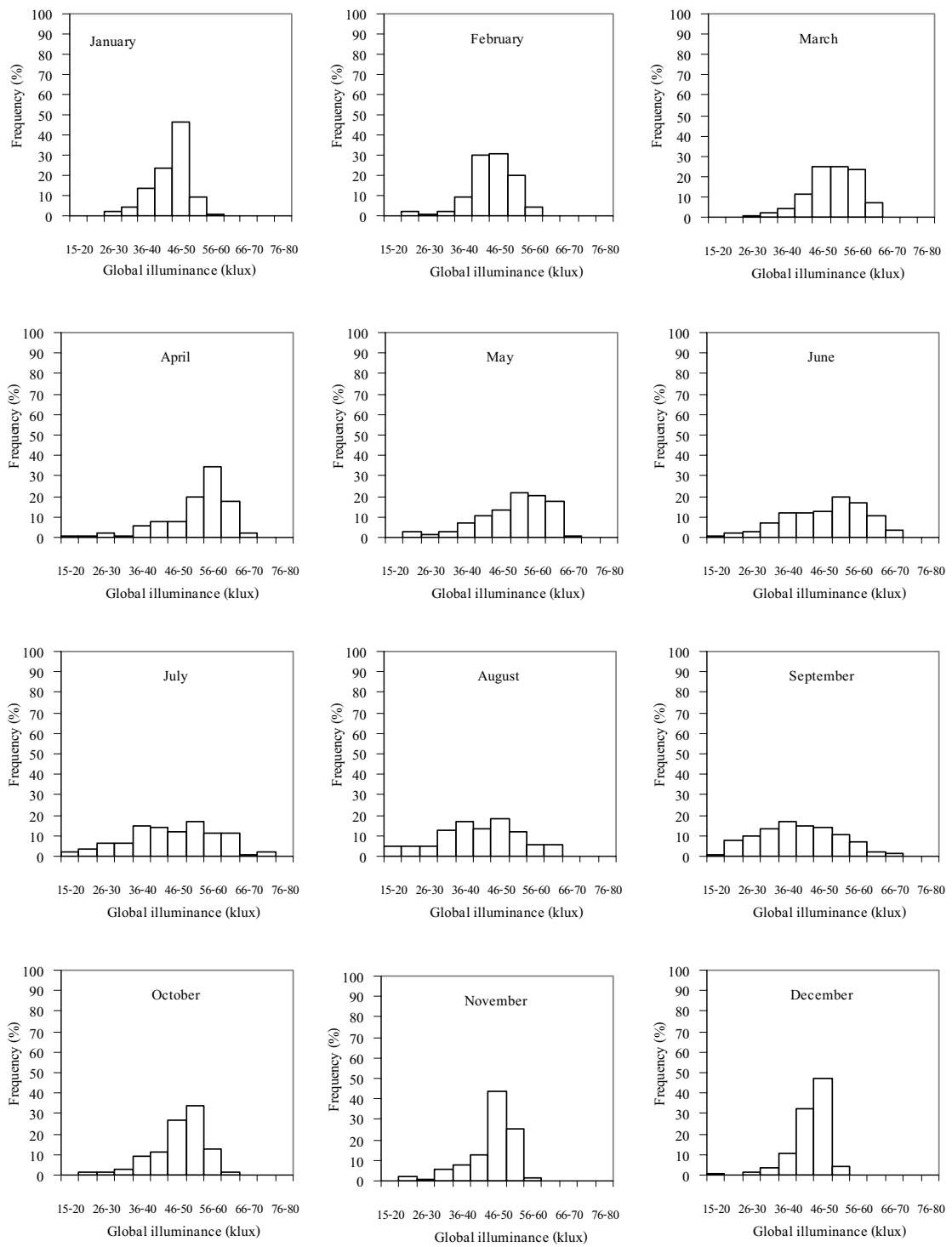
ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการแจกแจงค่า global illuminance ของแต่ละสถานีในแต่ละเดือน ซึ่งจะทำให้ทราบค่าความน่าจะเป็นของ global illuminance ตลอดทั้งวันของเดือนต่างๆ ในรอบปี โดยจะนำข้อมูล global illuminance รายวันทั้งหมดมาทำการแจกแจงความถี่ในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ของจำนวนวันที่มีค่า global illuminance ในระดับต่างๆ โดยแบ่งช่วงข้อมูล global illuminance ออกเป็นช่วงๆ ละ 5 klux ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.73-3.76

จากกราฟพบว่า การแจกแจงรายเดือนของค่า global illuminance รายวันของสถานี เชียงใหม่ อุบลราชธานี และนครปฐม จะมีลักษณะคล้ายกัน กล่าวคือ มีลักษณะการกระจายที่ค่อนข้างสมมาตร (symmetric) ยกเว้นเดือนพฤศจิกายนและธันวาคม ที่จะมีลักษณะการกระจายค่อนข้างน้อย โดยมีค่าส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 46-50 klux ส่วนของสถานีสงขลากราฟจะเบ้ไปทางค่ามาก โดยค่าส่วนใหญ่จะมีการแจกแจงอยู่ในช่วง 50-65 klux

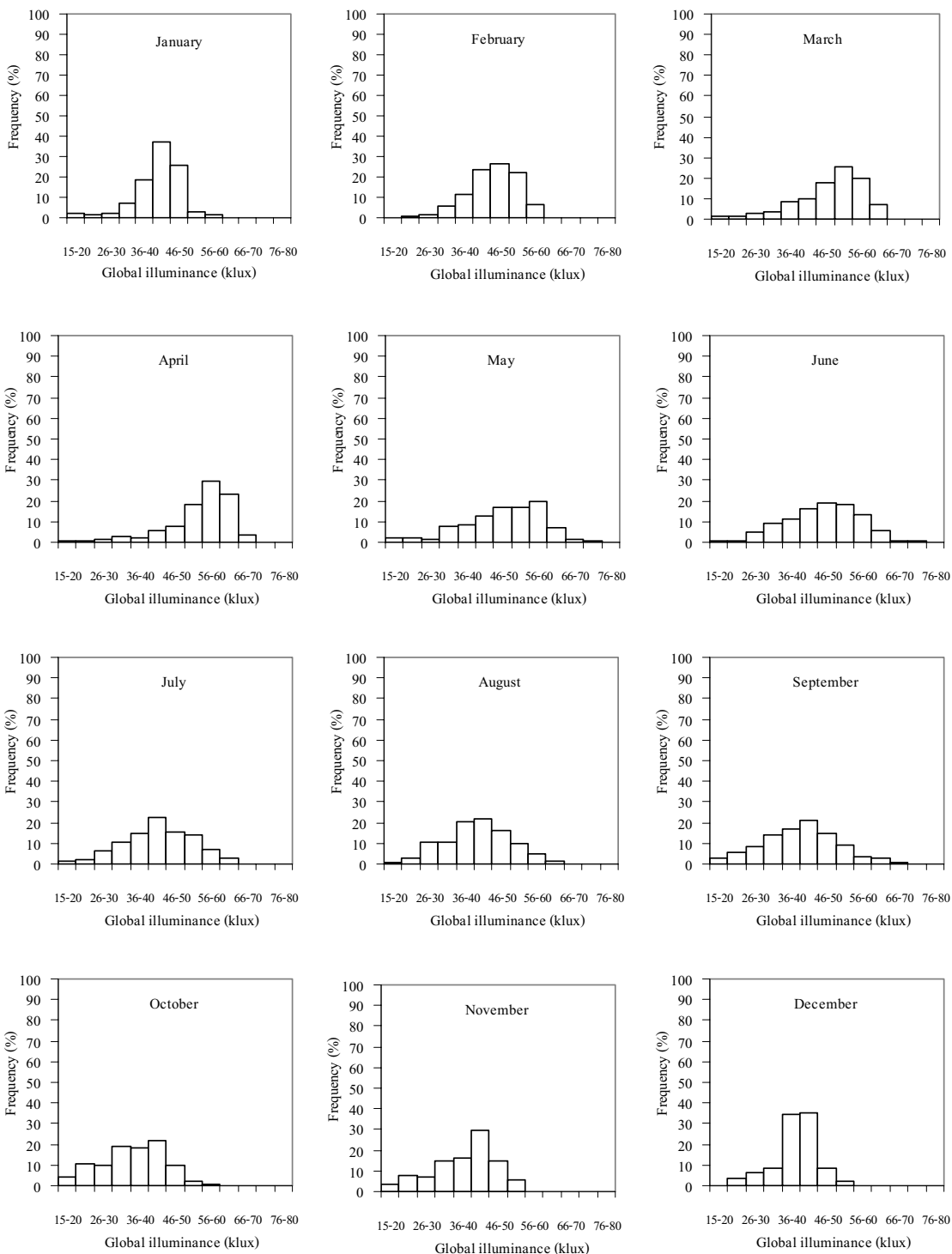
ส่วนกรณีการแจกแจงค่า global illuminance ตลอดทั้งปี (รูปที่ 3.77-3.80) กราฟของสถานี เชียงใหม่ อุบลราชธานี และนครปฐม มีลักษณะคล้ายกันคือ ลักษณะการกระจายจะสมมาตร คล้ายกับการแจกแจงปกติ (normal distribution) แต่ของสถานีสงขลากราฟจะเบ้ไปทางค่ามาก แสดงว่าค่า global illuminance ที่สถานีสงขลามีค่าเฉลี่ยสูงกว่าสถานีอื่นๆ



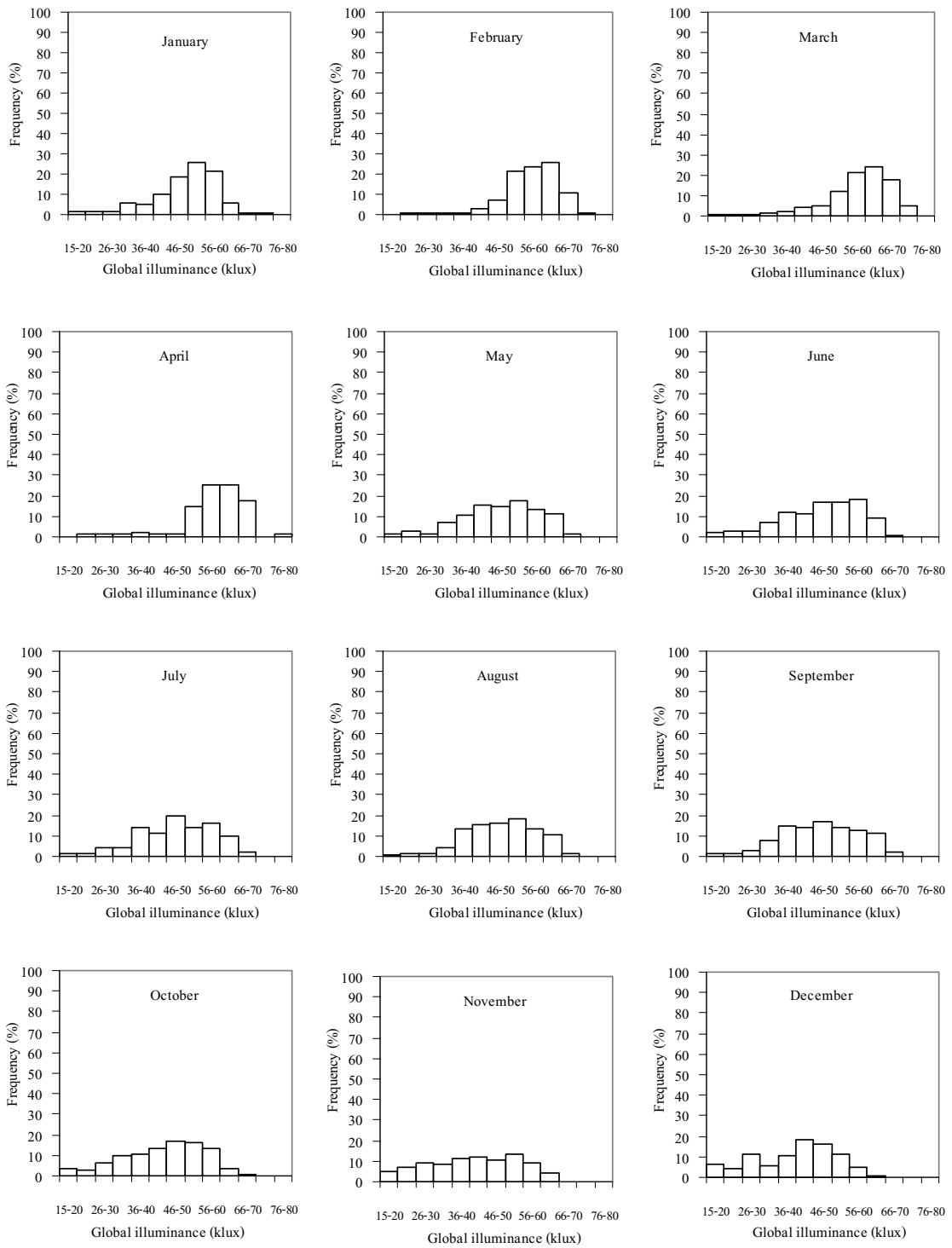
รูปที่ 3.73 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า global illuminance รายวันของเดือนต่างๆ ของสถานีเชียงใหม่



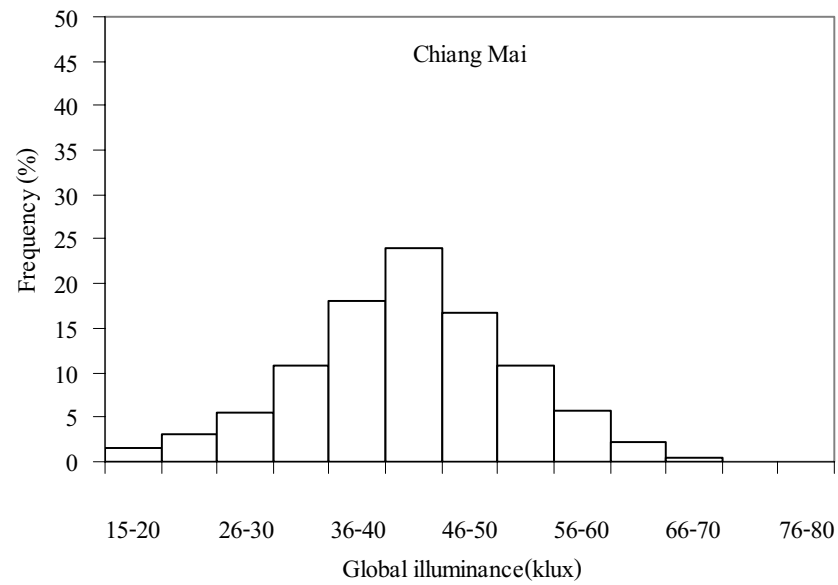
รูปที่ 3.74 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า global illuminance รายวันของเดือนต่างๆ ของสถานีอุบลราชธานี



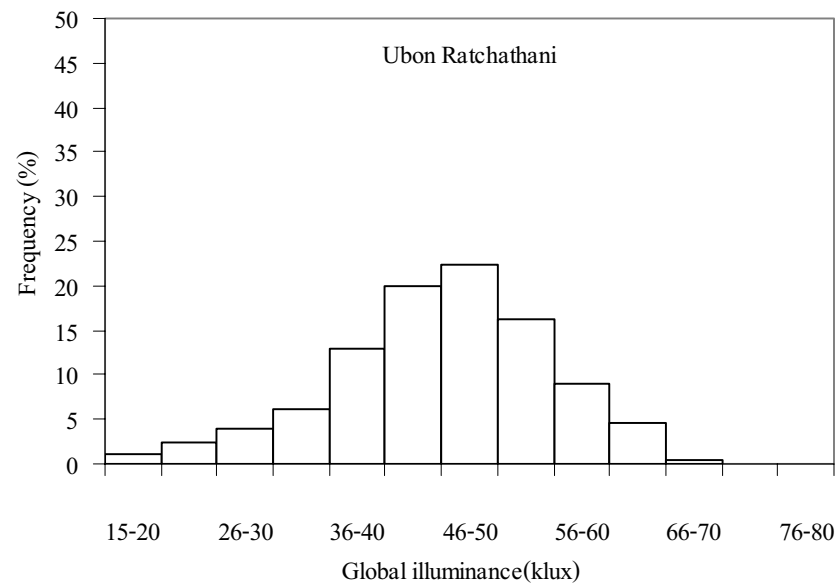
รูปที่ 3.75 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า global illuminance รายวันของเดือนต่างๆ ของสถานีนครปฐม



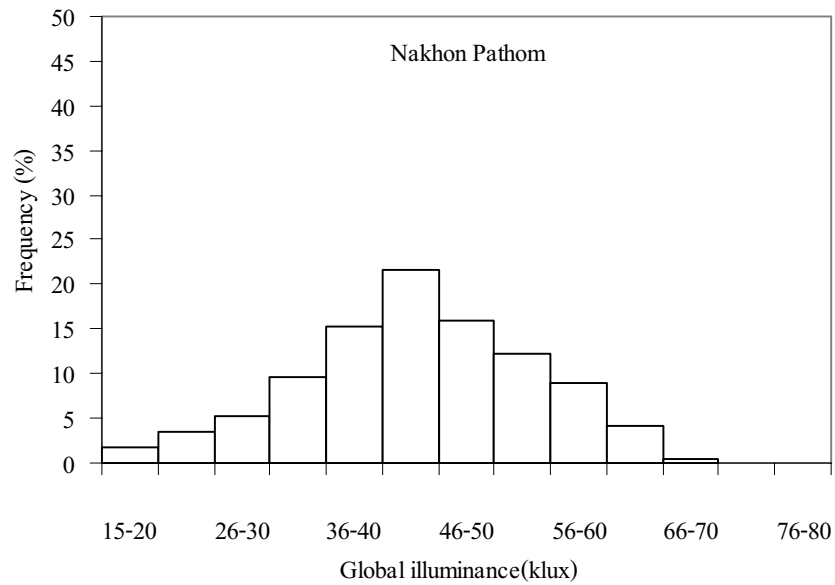
รูปที่ 3.76 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า global illuminance รายวันของเดือนต่างๆ ของสถานีสงขลา



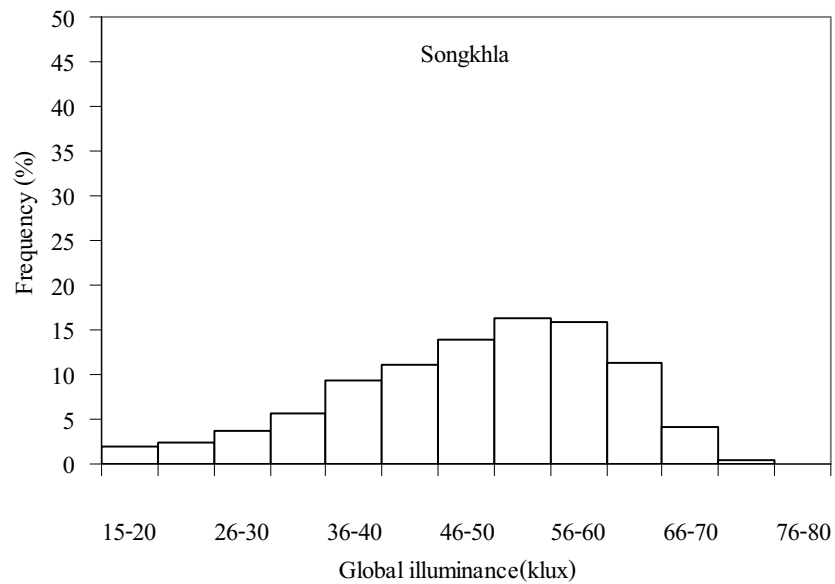
รูปที่ 3.77 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า global illuminance ตลอดทั้งปี จากข้อมูลสถานีเชียงใหม่ ในช่วงปี 2001-2008



รูปที่ 3.78 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า global illuminance ตลอดทั้งปี จากข้อมูลสถานีอุบลราชธานี ในช่วงปี 2001-2008



รูปที่ 3.79 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า global illuminance ตลอดทั้งปี จากข้อมูลสถานีนครปฐม ในช่วงปี 2001-2008

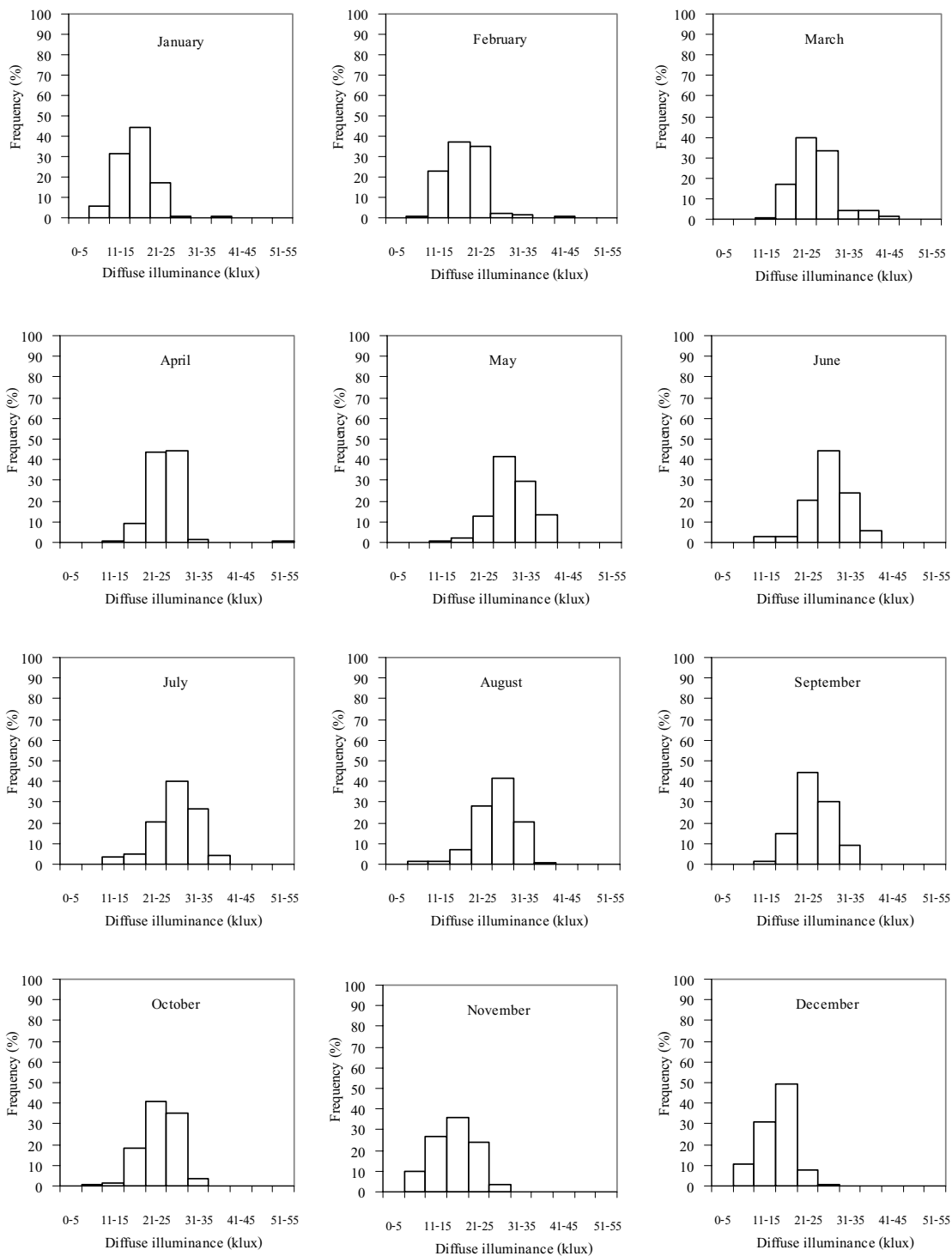


รูปที่ 3.80 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า global illuminance ตลอดทั้งปี จากข้อมูลสถานีสงขลา ในช่วงปี 2001-2008

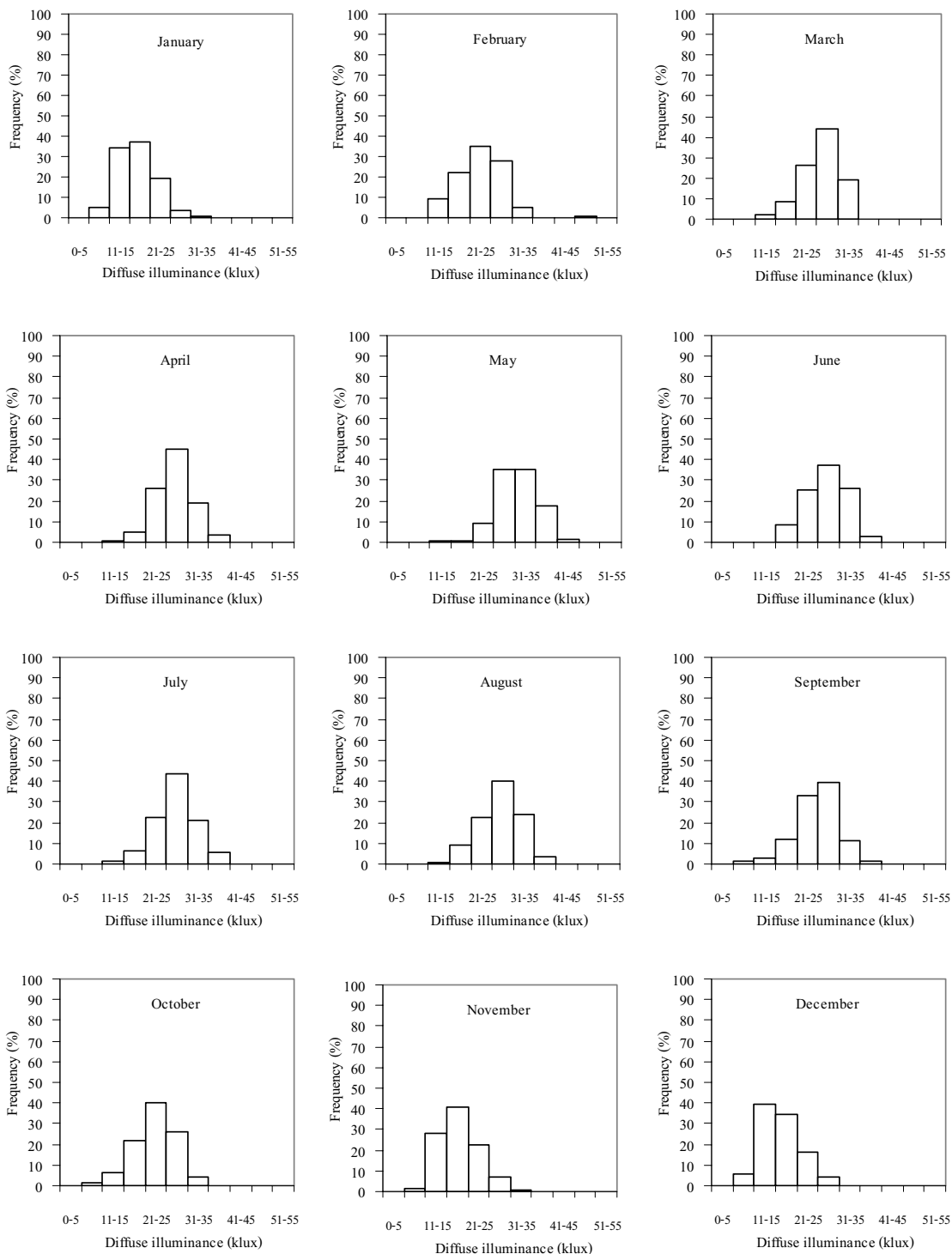
3.6.3.2 การแจกแจงของ diffuse illuminance

ในทำนองเดียวกับค่า global illuminance การทราบข้อมูลค่าเฉลี่ยเพียงอย่างเดียว บางครั้งไม่เพียงพอต่อการใช้งาน ดังนั้นเราจำเป็นต้องรู้การแจกแจงค่า diffuse illuminance ในเดือนนั้นๆ ด้วย โดยในการวิจัยนี้จะทำการแจกแจงข้อมูล diffuse illuminance ของสถานีเชียงใหม่ อุบลราชธานี นครปฐมและสงขลา โดยแบ่งช่วงข้อมูล diffuse illuminance ออกเป็นช่วงละ 5 klux โดยจะนำค่า diffuse illuminance รายวันทั้งหมดมาทำการแจกแจงเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับข้อมูลทั้งหมด แล้วนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟแจกแจงความถี่ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.81-3.84

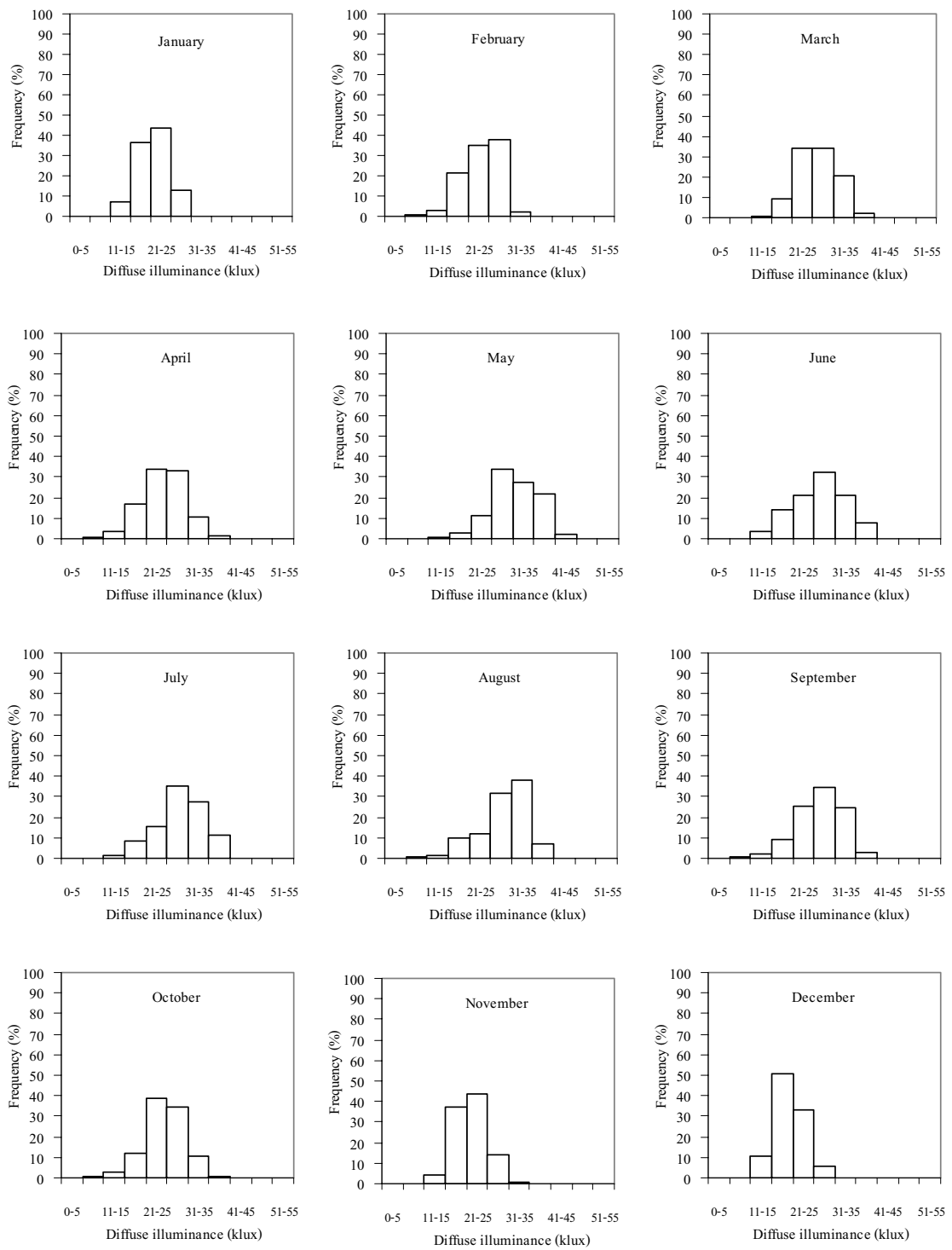
จากกราฟพบว่าลักษณะการแจกแจงรายเดือนของค่า diffuse illuminance รายวันของสถานีเชียงใหม่ อุบลราชธานี นครปฐมและสงขลา มีลักษณะคล้ายกัน กล่าวคือค่าส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 16-25 klux สำหรับการแจกแจงค่า diffuse illuminance ตลอดทั้งปี (รูปที่ 3.85-3.88) ของสถานีเชียงใหม่และอุบลราชธานี กราฟจะมีลักษณะการกระจายอยู่ในด้านความเข้มข้น ส่วนของสถานี นครปฐมและสงขลา กราฟจะค่อนข้างสมมาตร โดยมีค่าส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 16-30 klux



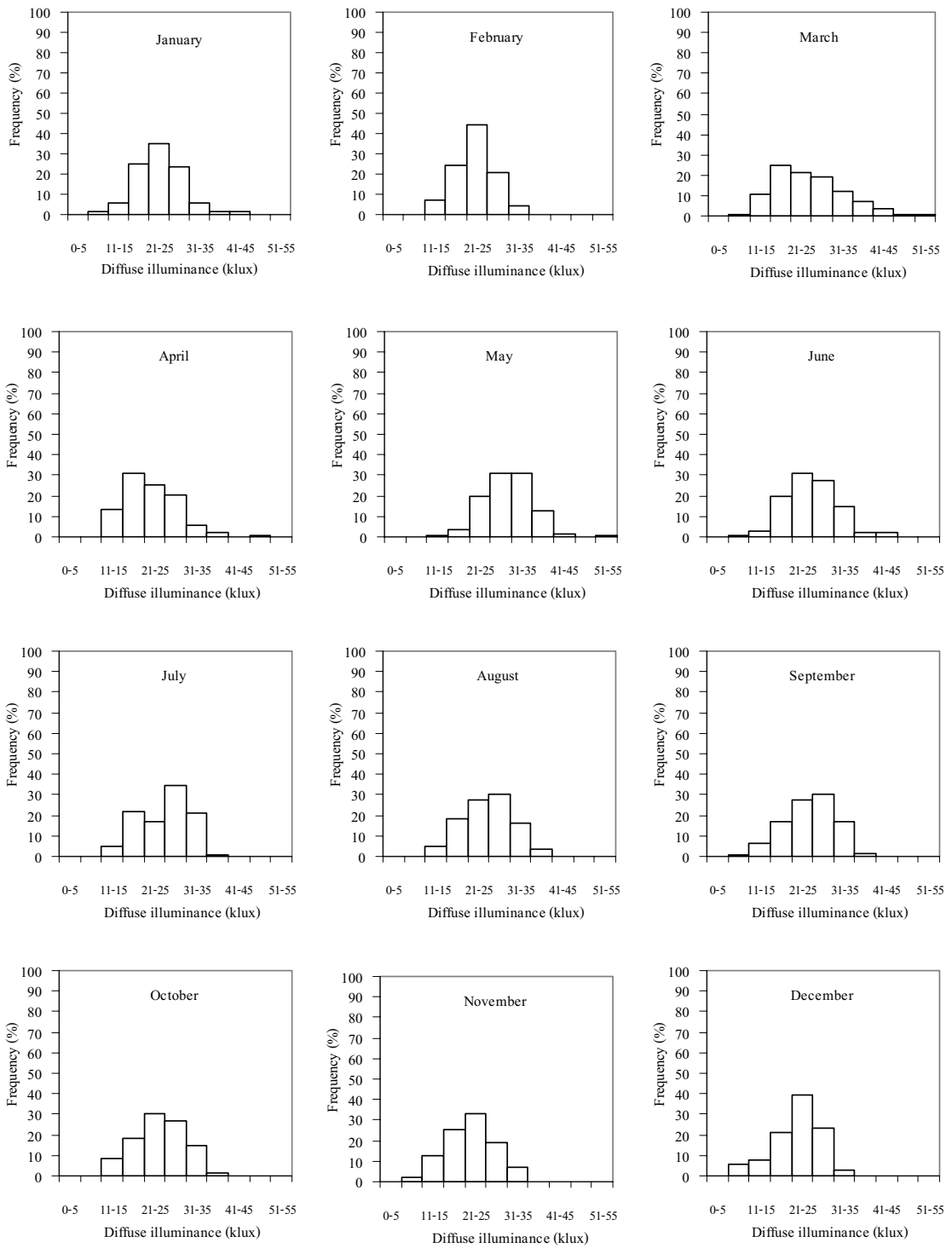
รูปที่ 3.81 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า diffusel illuminance รายวันของเดือนต่างๆ ของสถานีเชียงใหม่



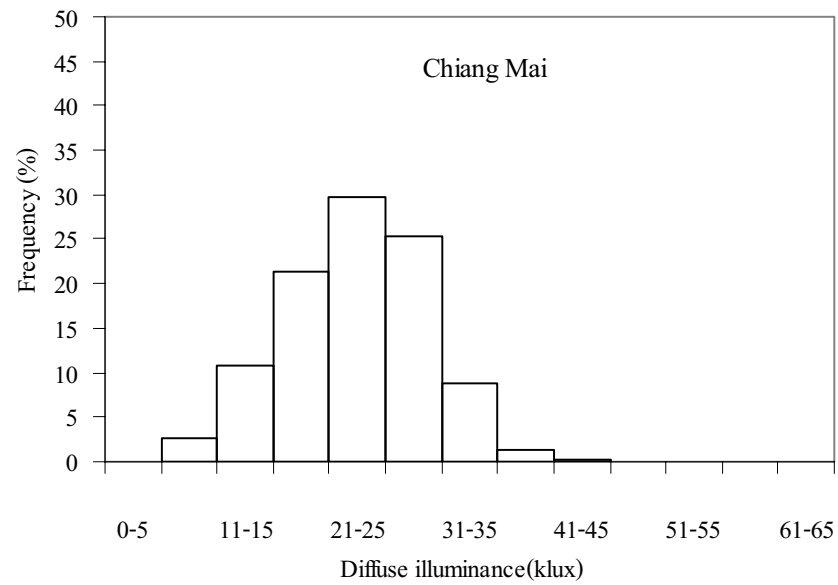
รูปที่ 3.82 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า Diffuse illuminance รายวันของเดือนต่างๆ ของสถานีอุบลราชธานี



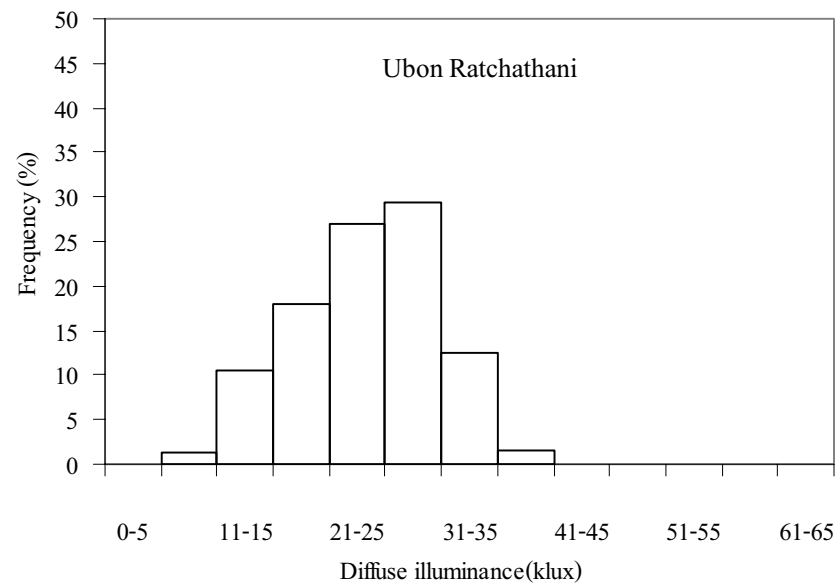
รูปที่ 3.83 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า diffusel illuminance รายวันของเดือนต่างๆ ของสถานีนครปฐม



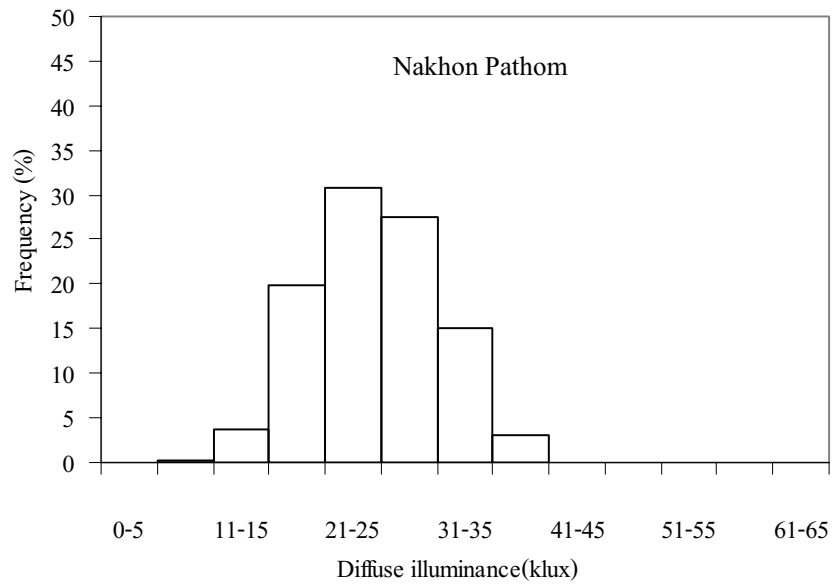
รูปที่ 3.84 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า diffusel illuminance รายวันของเดือนต่างๆ ของสถานีสงขลา



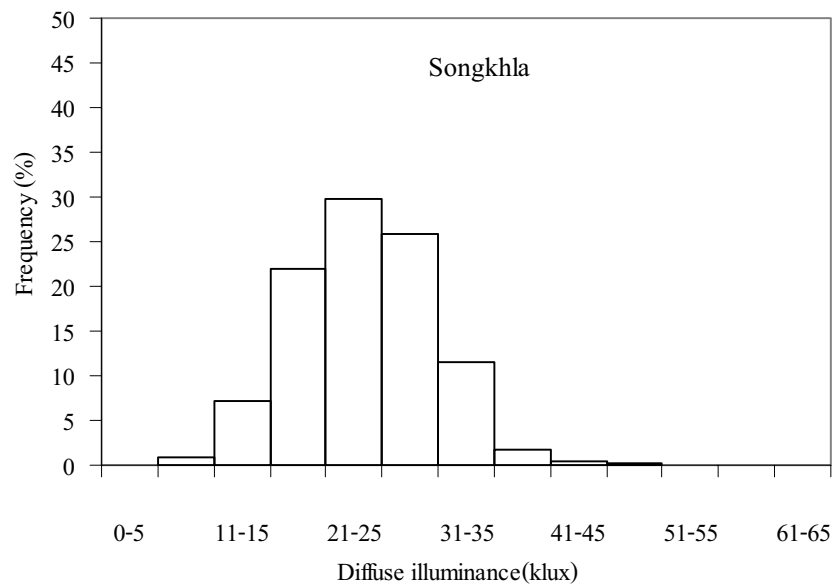
รูปที่ 3.85 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า diffusel illuminance ตลอดทั้งปี จากข้อมูลสถานีเชียงใหม่ ในช่วงปี 2001-2008



รูปที่ 3.86 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า diffusel illuminance ตลอดทั้งปี จากข้อมูลสถานีอุบลราชธานี ในช่วงปี 2001-2008



รูปที่ 3.87 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า diffusel illuminance ตลอดทั้งปี จากข้อมูลสถานีนครปฐม ในช่วงปี 2001-2008



รูปที่ 3.88 กราฟแสดงการแจกแจงของค่า diffusel illuminance ตลอดทั้งปี จากข้อมูลสถานีสงขลา ในช่วงปี 2001-2008

บทที่ 4

สรุป

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองสำหรับคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงจากข้อมูลการวัดบนพื้นราบ จำนวน 17 แบบจำลอง ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองที่เป็นแบบ isotropic จำนวน 4 แบบจำลอง และแบบ anisotropic จำนวน 13 แบบจำลอง โดยในการทดสอบได้ทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลการวัด diffuse illuminance บนระนาบแนวตั้ง 90 องศา และระนาบเอียง 45 องศา ปี 2003-2008 จากสถานีวัดซึ่งตั้งอยู่ตามภูมิภาคหลักของประเทศไทย 4 แห่งคือ เชียงใหม่ อุบลราชธานี นครปฐม และสงขลา ผลการทดสอบที่ได้พบว่า แบบจำลอง Muneer , AIT0a และ AIT0b แสดงผลการคำนวณที่แม่นยำกว่าแบบจำลองอื่นๆ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนในรูป RMSE อยู่ในช่วง 15% ถึง 28% ส่วนแบบจำลองที่ให้ผลการคำนวณที่ตรงลงมาคือ แบบจำลอง Gueymard สำหรับแบบจำลองอื่นๆ ได้แก่แบบจำลอง Bugler, Temps and Coulson, Klucher, Hay, Wilmott, Ma and Iqbal, Skartveit and Olseth, Reindl และ Perez จะมีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณค่อนข้างสูง โดยจะมีค่า RMSE มากกว่า 30% สำหรับการคำนวณที่ระนาบแนวตั้งทิศเหนือ พบว่าแบบจำลองที่เป็นแบบ isotropic ประกอบด้วย Lui and Jordan, Tain และ Badescu จะให้ผลการคำนวณที่ค่อนข้างสอดคล้องกับค่าจากการวัด ส่วนผลการคำนวณ diffuse illuminance บนระนาบเอียง 45 องศา พบว่าแบบจำลองส่วนใหญ่จะให้ผลการคำนวณที่ดีกว่าการคำนวณที่ระนาบแนวตั้ง แต่ที่ระนาบเอียง 45 องศา แบบจำลองที่นำมาทดสอบทั้งหมด จะให้ค่าการคำนวณ diffuse illuminance ที่ต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริง

ในส่วนของการคำนวณปริมาณ diffuse illuminance บนพื้นเอียงด้วยวิธีการอินทิเกรตค่า sky luminance ที่ได้จากแบบจำลอง sky luminance ซึ่งใช้ภาพถ่ายดาวเทียมในการจำแนกสภาพท้องฟ้า ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลการวัด diffuse illuminance บนพื้นราบ ปี 2005 ของ 4 สถานี คือ เชียงใหม่ อุบลราชธานี นครปฐมและสงขลา ร่วมกับข้อมูล diffuse illuminance บนพื้นราบ ระนาบแนวตั้งและระนาบเอียง 45 องศา ของสถานีนครปฐมที่วัดในปี 2007 มาทำการวิเคราะห์หาสมการของ normalization ratio (NR) จากนั้นผู้วิจัยได้นำข้อมูลการวัด diffuse illuminance ปี 2007 ของสถานี เชียงใหม่ อุบลราชธานี และสงขลา มาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณ โดยผลการเปรียบเทียบแบบค่ารายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนระหว่างค่าจากการคำนวณด้วยวิธีอินทิเกรตกับค่าที่วัดได้จริง พบว่าสำหรับผลการคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นราบ ค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับค่าจากการวัดของทั้ง 3 สถานี โดยมีค่า RMSE อยู่ในช่วง 10-12% ส่วนผลการคำนวณ diffuse illuminance บน

ระนาบแนวตั้งทั้ง 4 ทิศ และบนระนาบเอียง 45 องศาทิศใต้ พบว่าค่าที่คำนวณได้ด้วยวิธีอินทิเกรตจะมีความคลาดเคลื่อนในรูปแบบ RMSE ที่ต่ำกว่า 20% ข้อดีของวิธีการนี้คือ สามารถใช้คำนวณ diffuse illuminance โดยอาศัยข้อมูลดาวเทียมเป็นหลัก ซึ่งสามารถทำได้ทุกพื้นที่โดยที่ไม่ต้องอาศัยข้อมูล illuminance จากการวัดช่วย

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของ global illuminance และ diffuse illuminance ที่วัดจากสถานีวัดทั้ง 4 แห่ง โดยจากการวิเคราะห์การแจกแจงตามเวลาในรอบวันของ global illuminance และ diffuse illuminance พบว่าโดยรวมค่า global illuminance จะเพิ่มขึ้นจากช่วงเช้าจนถึงค่าสูงสุดในตอนเที่ยงวัน และค่อยๆ ลดลงในช่วงบ่ายจนถึงช่วงเย็น โดยมีการแปรค่าในช่วงเช้าถึงช่วงเย็นในรูปแบบที่ค่อนข้างสมมาตร ส่วนปริมาณ diffuse illuminance จะมีการแปรค่าในรอบวันที่คล้ายกับปริมาณ global illuminance แต่จะมีค่าอยู่ในระดับที่ต่ำกว่า สำหรับการแปรค่าตามฤดูกาลของค่า global illuminance และ diffuse illuminance ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่า global illuminance ของทั้ง 4 สถานี มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงในรอบปี โดยจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากเดือนมกราคมจนถึงค่าสูงสุดในช่วงฤดูร้อนที่เดือนเมษายน จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงในช่วงฤดูฝน และจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงเล็กน้อยในช่วงฤดูหนาว ส่วนค่า diffuse illuminance จะมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากเดือนมกราคมจนถึงเดือนมิถุนายนหรือเดือนกรกฎาคมซึ่งเป็นช่วงฤดูฝน แล้วจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงเดือนธันวาคม ส่วนสถานีสงขลาการแปรค่าของ diffuse illuminance จะมีการเปลี่ยนแปลงในรอบปีเพียงเล็กน้อย สำหรับการแจกแจงของค่า global illuminance ที่วัดได้ตลอดทั้งปี ของสถานีเชียงใหม่ อุบลราชธานี และนครปฐม จะมีมีลักษณะการแจกแจงแบบปกติ (normal distribution) ที่คล้ายกัน โดยมีค่าส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 41-50 klux แต่ของสถานีสงขลากราฟจะเบ้ไปทางค่ามาก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 51-60 klux ส่วนการแจกแจงค่า diffuse illuminance ตลอดทั้งปีของสถานีเชียงใหม่และอุบลราชธานี กราฟมีลักษณะการกระจายเบ้ไปทางด้านค่าความเข้มข้น แต่ของสถานีนครปฐมและสถานีสงขลา กราฟจะมีลักษณะสมมาตร จากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของ global และ diffuse illuminance ทั้ง 4 สถานี แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพแสงสว่างธรรมชาติค่อนข้างสูง

เนื่องจาก diffuse illuminance บนพื้นเอียง ขึ้นกับสภาพท้องฟ้า และตัวแปรทางเรขาคณิตหลายตัวแปร การใช้แบบจำลองทางสถิติเพื่อคำนวณให้ได้ผลแม่นยำจึงทำได้ยาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงเสนอแนะว่าในงานวิจัยต่อไปควรทำการพัฒนาแบบจำลองเชิงฟิสิกส์ (physical model) เพื่อคำนวณ diffuse illuminance บนพื้นเอียง และควรขยายเครือข่ายการวัด illuminance ทั้งบนพื้นราบและพื้นเอียง ให้กว้างขวางยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- Badescu, V. "3D isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces." **Renewable Energy** **26**, 221–233, 2002.
- Bugler, J.W. "The determination of hourly insolation on an inclined plane using a diffuse irradiance model based on hourly measured global horizontal insolation." **Solar Energy** **19(6)**, 477-491, 1977
- Behr, H.D. "Solar radiation on tilted south oriented surface: validation of transfer-models." **Solar Energy** **61**, 399-413, 2007.
- Chirarattananon, S., Rukkwansuk, P., Chaiwiwatworakul, P., Pakdeepol, P. "Evaluation of vertical illuminance and irradiance models against data form north Bangkok." **Building and Environment** **42**, 3894-3904, 2007.
- Diez-Mediavilla, M., de Miguel, A., Bilbao, J. "Measurement and comparison of diffuse solar Irradiance models on inclined surfaces in Valladolid (Spain)." **Energy Conversion and Management** **46**, 2075–2092, 2005.
- Gueymard, C. "An anisotropic solar irradiance model for tilted surface and its comparison with selected engineering algorithms." **Solar Energy** **38(5)**, 367-386, 1987.
- Hay, J.E. "Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surface." **Solar Energy** **23**, 301-307, 1979
- Igbal M. "An introduction to solar radiation." Canada: Academic Press; 1983, ISBN 0-12-373752-4.

- Janjai, S., Tohsing, K., Nunez, M., Laksanaboonsong, J. "A technique for mapping global illuminance from satellite data." **Solar Energy** **82**, 543–555, 2007.
- Janjaia, S., Masiria, I., Nunezb, M., Laksanaboonsong, J. "Modeling sky luminance using satellite data to classify sky conditions." **Building and Environment** **43**, 2059–2073, 2008.
- Klucher, T.M. "Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces." **Solar Energy** **23(2)**, 111-114, 1979.
- Li, D.H.W. and Lam, J.C. "Evaluation of slope irradiance and illuminance models against measured Hong Kong Data." **Building and Environment** **35(6)**, 501–509, 2000.
- Li, D.H.W., Lau, C.C.S., Lam, J.C. "Predicting daylight illuminance on inclined surfaces using sky luminance data." **Energy** **30**, 1649–1665, 2005.
- Liu, B.Y.H. and Jordan, R.C. "Daily insolation on surfaces tilted towards the equator." **Trans ASHRAE**, 526–541, 1962.
- Ma, C.C.Y. and Iqbal, M. "Statistical comparison of models for estimating solar radiation on inclined surfaces." **Solar Energy** **31(3)**, 313–317, 1983.
- Muneer, T. "Solar radiation and daylight models for the energy efficient design of buildings." Oxford: Architectural Press; 1997.
- Murdoch, J.B. "illumination Engineering-Form Edison's Lamp to the Laser." London: Macmillan Publishing Company, 1985.

- Noorian, A.M., Moradi, I., Kamali, G.A. "Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces." **Renewable Energy** **33**, 1406–1412, 2008.
- Notton, G., Cristofari, C., Poggi, P. "Performance evaluation of various hourly slope irradiation models using Mediterranean experimental data of Ajaccio." **Energy Conversion and Management** **47**, 147–173, 2006.
- Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., Menicucci, D. "A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces." **Solar Energy** **39(3)**, 221–231, 1987.
- Reindl, D.T., Beckman, W.A., Duffie, J.A. "Evaluation of hourly tilted surface radiation models." **Solar Energy** **45(1)**, 9–17, 1990.
- Robledo, L., Soler, A., "Modelling irradiance on inclined planes with an anisotropic model." **Energy**, **23(3)**, 193–201, 1998.
- Skartveit, A. and Olseth, J.A. "Modeling slope irradiance at high latitudes." **Solar Energy** **36(4)**, 333–344, 1986.
- Temps, R.C. and Coulson, K.L. "Solar radiation incident upon slopes of different orientation." **Solar Energy** **19(2)**, 179–184, 1977.
- Tian, Y.Q., Davies-Colley, R.J., Gong, P., Thorrold, B.W. "Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect." **Agricultural and Forest Meteorology** **109**, 67–74, 2001.
- Vartiainen, E. "A new approach to estimating the diffuse irradiance on inclined surfaces." **Renewable Energy** **20(1)**, 45–64, 2000.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายเจษฎา ประทุมสิทธิ์
ที่อยู่	46/1 หมู่ 5 ตำบลนิลเพชร อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม 73130
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2544	สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนบรหารแจ่มใสวิทยา 5 จังหวัดสุพรรณบุรี
พ.ศ. 2548	สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม
พ.ศ. 2549	ศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม