



การพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มแสงสว่างรวมจากดวงอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลภาพถ่าย

ดาวเทียม Himawari

โดย

นางสาวธัชววรรณ บรรดาจันทร์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มแสงสว่างรวมจากดวงอาทิตย์โดยใช้ข้อมูล

ภาพถ่ายดาวเทียม Himawari



โดย
นางสาวธฤชวรรณ บรรดาจันทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

A DEVELOPMENT OF A MODEL FOR CALCULATING GLOBAL SOLAR
ILLUMINANCE USING HIMAWARI SATELLITE DATA



By
MISS Taritsawan BANDACHAN

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for Master of Science (PHYSICS)

Department of PHYSICS

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2019

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

60306202 : พิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

คำสำคัญ : ความเข้มแสงสว่าง, ภาพถ่ายดาวเทียม

นางสาว ธฤชวรรณ บรรดาจันทร์: การพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มแสงสว่างรวมจากดวงอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Himawari อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณค่ารายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของความเข้มแสงสว่าง โดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม Himawari ในการพัฒนาแบบจำลองดังกล่าว ผู้วิจัยได้ทำการประมวลผลข้อมูลในช่องแสงสว่าง (visible channel) ของดาวเทียม Himawari จำนวน 3 ปี (ค.ศ. 2016 - 2018) จากผลการประมวลจะได้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ซึ่งประกอบด้วย matrix ของพิกเซลขนาด 550 x 850 พิกเซล โดยพิกเซลของข้อมูลดาวเทียมจะให้ค่าระดับความเทา (gray level) ซึ่งอยู่ในช่วง 0 - 255 และผู้วิจัยได้ทำการแปลงค่าระดับความเทาดังกล่าวให้เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อน (0 - 1) โดยใช้ตารางสอบเทียบซึ่งได้จากหน่วยงานที่จัดการข้อมูลดาวเทียม หลังจากนั้นผู้วิจัยจะทำการคำนวณดัชนีเมฆ (cloud index) จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflectivity) ในขณะเดียวกันผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลความเข้มแสงสว่างจำนวน 3 ปี (ค.ศ. 2016 - 2018) จากสถานีวัดในภูมิภาคหลักของประเทศไทย ได้แก่ สถานีเชียงใหม่ ในภาคเหนือ (18.78°N , 98.98°E) สถานีอุบลราชธานี ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (15.25°N , 104.87°E) สถานีนครปฐม ในภาคกลาง (13.82°N , 100.04°E) และสถานีสงขลา ในภาคใต้ (7.2°N , 100.6°E) ข้อมูลที่ได้นี้จะนำไปคำนวณดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศในช่วงความยาวคลื่นแสงสว่าง (illuminance clearness index) จากนั้นผู้วิจัยได้นำดัชนีดังกล่าวไปสัมพันธ์กับดัชนีเมฆซึ่งได้จากภาพถ่ายดาวเทียมที่ตำแหน่งสถานีวัด ซึ่งจะทำให้ได้แบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณทั้งสอง แบบจำลองที่ได้สามารถนำไปใช้คำนวณดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศจากดัชนีเมฆที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียม จากค่าดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศเราสามารถคำนวณค่าความเข้มแสงสว่างได้ หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่ได้กับข้อมูลอิสระของความเข้มแสงสว่างซึ่งวัดที่สถานี 11 แห่ง ในประเทศไทย ผลที่ได้พบว่าความเข้มแสงสว่างส่วนใหญ่ที่คำนวณได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัดมีความสอดคล้องกันค่อนข้างดี โดยมีค่า root mean square difference อยู่ในช่วง 7.8 ถึง 12.4% และ mean bias difference อยู่ในช่วง -5.3 ถึง 7.8% สุดท้ายผู้วิจัยได้นำเสนอการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของค่าความเข้มแสงสว่างของทั้ง 4 สถานี

60306202 : Major (PHYSICS)

Keyword : illuminance, satellite data

MISS TARITSAWAN BANDACHAN : A DEVELOPMENT OF A MODEL FOR CALCULATING GLOBAL SOLAR ILLUMINANCE USING HIMAWARI SATELLITE DATA THESIS ADVISOR : PROFESSOR SERM JANJAI, Ph.D.

In this research work, a model for calculating monthly average hourly global illuminance from Himawari satellite data was developed. A 3-year period (2016-2018) of data from the visible channel (0.51 μm) of Himawari satellite was processed to obtain rectified images. Each rectified image consists of a matrix of 550 x 850 pixels. The pixels contain the information of the gray level ranging from 0 to 255. The values of the gray level were converted into the reflectivity (0-1) using a calibration table provided by the satellite data agency. The reflectivity was used to calculate satellite-derived cloud index. A 3-year (2016-2018) period of data on global illuminance measured at four stations situated in the main region of Thailand were gathered. These stations are Chaing Mai (18.78°N, 98.98°E) in the northern region, Ubon Ratchathani (15.25°N, 104.87°E) in the northeastern region, Nakhon Pathom (13.82°N, 100.04°E) in the central region and Songkhla (7.2°N, 100.6°E) in the southern region. These data were used to calculate illuminance clearness index. Then this clearness index was correlated with the satellite-derived cloud index at the position of the stations to obtain a model relating the two quantities. This model can be used to calculate the clearness index from the satellite-derived cloud index. With the value of the clearness index, the value of illuminance can be obtained. The model was tested against independent dataset of illuminance measured at 11 stations in Thailand. It was found that most of illuminance calculated from the model and that obtained from the measurement is in reasonable agreement with the root mean square difference of 7.8 to 12.4% and mean bias difference of -5.3 to 7.8%. Finally, time variation of illuminance at the four stations were also presented.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต ผู้วิจัยได้รับทุนสนับสนุนผู้ช่วยวิจัยจากห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ให้คำปรึกษาผู้ให้คำแนะนำด้านวิชาการ พร้อมทั้งจัดหาทุนวิจัย เครื่องมือ อุปกรณ์ และข้อมูลสำหรับการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิรติ เกิดศิริ อาจารย์ประจำสาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้เป็นอย่างสูง

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กรทิพย์ โต้ะสิงห์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อิศระ มะศิริ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุมาลย์ บันเทิง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รุ่งรัตน์ วัตตาล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสาน ปานแก้ว อาจารย์ ดร. อรวรรณ อัมพร และนักวิจัยของห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ช่วยสนับสนุน ช่วยเหลือ และแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัย และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

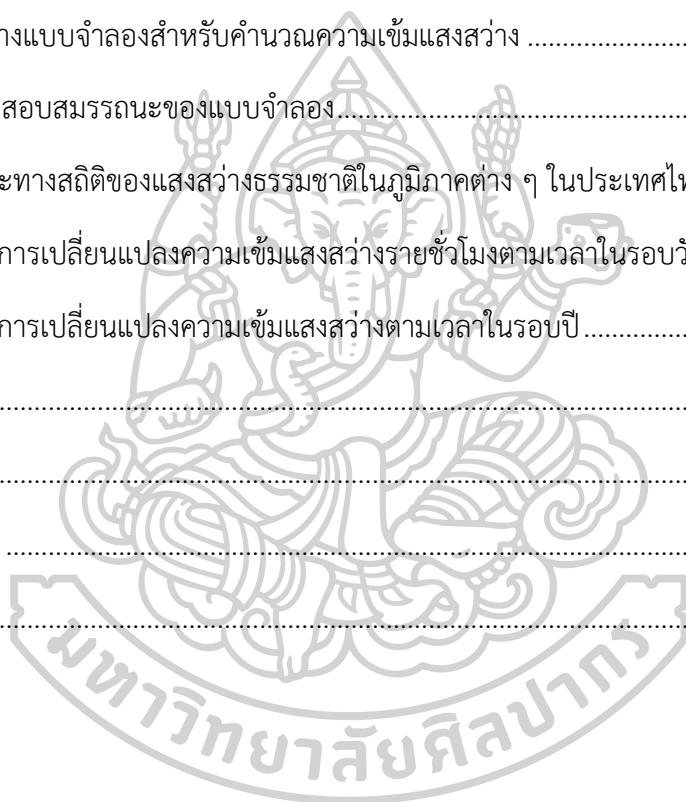
สุดท้ายนี้ คุณประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดาและมารดา รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่าน เพื่อตอบแทนพระคุณที่ได้ช่วยให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการศึกษา

ธฤชวรรณ บรรดาจันทร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
บทที่ 2	3
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎี.....	3
2.1.1 แหล่งที่มาของรังสีอาทิตย์.....	3
2.1.2 แสงสว่าง (visible radiation)	5
2.1.2.1 แหล่งกำเนิดของแสงสว่างธรรมชาติ	5
2.1.2.2 การตอบสนองของสายตามนุษย์ต่อแสงสว่าง.....	9
2.1.2.3 ปริมาณแสงสว่าง.....	11
2.1.2.4 การหาค่าปริมาณแสงสว่างธรรมชาติ.....	14
2.1.3 ดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา	18
2.1.3.1 ดาวเทียม Himawari-8.....	20
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23

บทที่ 3	31
วิธีการดำเนินการวิจัยและผล.....	31
3.1 การเตรียมข้อมูลสำหรับการพัฒนาแบบจำลอง	31
3.1.1 ข้อมูลภาคพื้นดิน	31
3.1.2 การควบคุมคุณภาพข้อมูล.....	41
3.1.3 ดัชนีเมฆ (cloud index, n) จากภาพถ่ายดาวเทียม Himawari	43
3.2 การสร้างแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มแสงสว่าง	54
3.3 การทดสอบสมรรถนะของแบบจำลอง.....	57
3.4 ลักษณะทางสถิติของแสงสว่างธรรมชาติในภูมิภาคต่าง ๆ ในประเทศไทย	66
3.4.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงสว่างรายชั่วโมงตามเวลาในรอบวัน.....	66
3.4.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงสว่างตามเวลาในรอบปี.....	72
บทที่ 4	75
สรุป.....	75
รายการอ้างอิง	77
ประวัติผู้เขียน.....	79



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ช่วงความยาวคลื่นและสัดส่วนของพลังงานในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ที่สำคัญเมื่อเทียบกับพลังงานทั้งหมดของรังสีที่แผ่จากดวงอาทิตย์ (เสริม จันทรฉาย, 2560)	5
ตารางที่ 2.2 ค่าการตอบสนองของสายตามนุษย์ (R_{λ}) ตามมาตรฐานของ CIE (Murdoch, 1985)	10
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดสถานีวัด 4 แห่ง สำหรับใช้สร้างแบบจำลอง	33
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดสถานีวัด 11 แห่ง สำหรับใช้ทดสอบสมรรถนะของแบบจำลอง	33
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลความเข้มแสงสว่างรายวันเฉลี่ยต่อเดือนในหน่วย klux ของสถานีเชียงใหม่.....	42
ตารางที่ 3.4 ข้อมูลความเข้มแสงสว่างเฉลี่ยต่อเดือนในหน่วย klux ของสถานีอุบลราชธานี	42
ตารางที่ 3.5 ข้อมูลความเข้มแสงสว่างรายวันเฉลี่ยต่อเดือนในหน่วย klux ของสถานีนครปฐม.....	42
ตารางที่ 3.6 แสดงข้อมูลความเข้มแสงสว่างรายวันเฉลี่ยต่อเดือนในหน่วย klux ของสถานีสงขลา ..	43
ตารางที่ 3.7 รายละเอียดช่องรับสัญญาณ 16 ช่อง ของดาวเทียม Himawari-8 เทียบกับช่องสัญญาณของดาวเทียม MTSAT-1R/2 (JMA, 2013).....	44
ตารางที่ 3.8 ค่าความแตกต่างทางสถิติ RMSD และ MBD ทางสถิติที่ได้จากการเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลองของ 11 สถานีในประเทศไทย...	65

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างดวงอาทิตย์ (sunflowercosmos.org).....	4
รูปที่ 2.2 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก ตามมาตรฐาน ASTM E-490 เมื่อ I_{λ} คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ และ λ คือ ความยาวคลื่น (เสริม จันทร์ฉาย, 2560).....	6
รูปที่ 2.3 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ (Iqbal,1983).....	7
รูปที่ 2.4 รังสีตรงจากดวงอาทิตย์ (sunlight) และรังสีกระจายจากท้องฟ้า (skylight)	8
รูปที่ 2.5 แสดงความเข้มของแสงสว่างธรรมชาติในรูปของ direct illuminance และ diffuse illuminance	8
รูปที่ 2.6 แสดงการตอบสนองต่อแสงสว่างของสายตามนุษย์ตามมาตรฐาน CIE (Murdoch, 1985) 9	
รูปที่ 2.7 พลั๊กซ์ของแสงสว่างตามจำกัดความของความส่องสว่าง	11
รูปที่ 2.8 พลั๊กซ์ของแสงสว่าง $d\Phi_E$ ที่ตกกระทบพื้นที่ ตามจำกัดความของความสว่าง	12
รูปที่ 2.9 การให้คำจำกัดความของ luminous exitance	13
รูปที่ 2.10 เครื่องวัดความเข้มของแสงสว่างหรือ ลักซ์มิเตอร์ (luxmeter)	15
รูปที่ 2.11 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่เวลาใดๆ	16
รูปที่ 2.12 ทางโคจรของดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา polar orbiting satellite	19
รูปที่ 2.13 ทางโคจรของดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา geostationary satellite	20
รูปที่ 2.14 ลักษณะของดาวเทียม Himawari-8.....	21
รูปที่ 2.15 ตำแหน่งและพื้นที่ ครอบคลุมของดาวเทียม Himawari-8 (ภาพจาก Japan Meteorological AgencyJMA).....	21
รูปที่ 2.16 ภาพรวมของดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาของญี่ปุ่นตั้งแต่อดีตจนถึงอนาคต.....	22
รูปที่ 2.17 ลักษณะภาพ Real-time ของดาวเทียม Himawari-8 วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2020 เวลา 10:30 นาฬิกา ของประเทศไทย (ภาพจาก www.himawari8.nict.go.jp)	22
รูปที่ 2.18 แผนภูมิการคำนวณความเข้มแสงสว่างวิธีการทางตรงและวิธีการทางอ้อมนำเสนอโดย He & Ng (2010).....	25

รูปที่ 2.19 แผนภูมิการตุกคลื่นและการกระเจิงของรังสีอาทิตย์ที่เกิดจากองค์ประกอบต่าง ๆ ของบรรยากาศ 27

รูปที่ 3.1 เครื่องลักซ์มิเตอร์ที่ผลิตโดยบริษัทเอคโกล (EKO) 32

รูปที่ 3.2 ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดความเข้มแสงสว่างทั้ง 15 สถานี ของประเทศไทย โดยสัญลักษณ์ ★ แสดง 4 สถานีหลักที่จะนำข้อมูลมาสร้างแบบจำลอง ได้แก่ สถานีเชียงใหม่สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา พร้อมทั้งแสดงภาพของเครื่องลักซ์มิเตอร์ด้วยสัญลักษณ์ ● แสดงตำแหน่งของ 11 สถานีวัดที่จะนำมาทดสอบแบบจำลอง 34

รูปที่ 3.3 data logger รุ่น DX2000 ผลิตโดยบริษัท Yokokawa..... 35

รูปที่ 3.4 การสอบเทียบเครื่องลักซ์มิเตอร์ของสถานีสงขลา 36

รูปที่ 3.5 การสอบเทียบเครื่องลักซ์มิเตอร์ที่ศูนย์อุตุฯนิคมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่..... 37

รูปที่ 3.6 การสอบเทียบเครื่องลักซ์มิเตอร์ที่ศูนย์อุตุฯนิคมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี..... 37

รูปที่ 3.7 การสอบเทียบเครื่องลักซ์มิเตอร์ที่มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม..... 38

รูปที่ 3.8 การสอบเทียบเครื่องลักซ์มิเตอร์ที่ศูนย์อุตุฯนิคมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา.. 38

รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าความเข้มแสงสว่าง ที่ศูนย์อุตุฯนิคมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่..... 39

รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าความเข้มแสงสว่าง ที่ศูนย์อุตุฯนิคมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี..... 39

รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าความเข้มแสงสว่าง ที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม..... 40

รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าความเข้มแสงสว่าง ที่ศูนย์อุตุฯนิคมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา..... 40

รูปที่ 3.13 ตัวอย่างกราฟบันทึกข้อมูลความเข้มแสงสว่างในวันที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ ซึ่งทำการวัดที่สถานีนครปฐม ของวันที่ 31 ตุลาคม 2018 41

รูปที่ 3.14 ตัวอย่างของภาพถ่ายที่ได้จากดาวเทียม Himawari-8 45

รูปที่ 3.15 ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่ครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทยในรูปแบบของ satellite projection 46

รูปที่ 3.16 ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมใน ใน cylindrical projection ที่ทำการหาพิกัดแล้ว	47
รูปที่ 3.17 ภาพถ่ายดาวเทียมในรอบวันที่แสดงพิกเซลที่มีเมฆปกคลุมและไม่มีเมฆปกคลุมของวันที่ 21 เมษายน 2018	49
รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า grey level กับ Pseudo-reflectivity ของข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม.....	50
รูปที่ 3.19 แผนภูมิการคำนวณดัชนีเมฆ (ดัดแปลงจาก Hammer et al., 2003).....	51
รูปที่ 3.20 ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณที่ปกคลุมสถานีวัดที่พิจารณา โดยทำการตัดพิกเซลที่คลุมสถานีวัดขนาด 3 x 3 พิกเซล ณ ตำแหน่งสถานีสงขลา	53
รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศกับดัชนีของเมฆที่ได้จากสถานีวัด 4 แห่ง ซึ่งเป็นข้อมูลในช่วงปี ค.ศ. 2016 - 2018.....	55
รูปที่ 3.22 แผนภูมิของวิธีการคำนวณหาความเข้มแสงสว่างจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้	56
รูปที่ 3.23 การเปรียบเทียบความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลองของสถานีวัดทั้ง 11 แห่งโดยเป็นข้อมูลในช่วงปี ค.ศ. 2016 - 2018	58
รูปที่ 3.24 การเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลอง ของสถานีกรุงเทพ	59
รูปที่ 3.25 การเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลอง ของสถานีเพชรบูรณ์.....	59
รูปที่ 3.26 การเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลอง ของสถานีแม่สะเรียง	60
รูปที่ 3.27 การเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลอง ของสถานีแพร่.....	60
รูปที่ 3.28 การเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลอง ของสถานีกาญจนบุรี	61
รูปที่ 3.29 การเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลอง ของสถานีชุมพร	61

รูปที่ 3.30 การเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลอง ของสถานีภูเก็ต 62

รูปที่ 3.31 การเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลอง ของสถานีประจวบคีรีขันธ์ 62

รูปที่ 3.32 การเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลอง ของสถานีนครสวรรค์ 63

รูปที่ 3.33 การเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลอง ของสถานีลพบุรี 63

รูปที่ 3.34 การเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลอง ของสถานีโคราช 64

รูปที่ 3.35 การแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีเชียงใหม่ ซึ่งเป็นตัวแทนของภาคเหนือของประเทศไทย 67

รูปที่ 3.36 การแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีอุบลราชธานี ซึ่งเป็นตัวแทนของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย 68

รูปที่ 3.37 การแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีนครปฐม ซึ่งเป็นตัวแทนภาคกลางของประเทศไทย 69

รูปที่ 3.38 การแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีสงขลา ซึ่งเป็นตัวแทนของภาคใต้ของประเทศไทย 70

รูปที่ 3.39 การแปรค่าความเข้มแสงสว่างตามฤดูกาลในรอบปีของสถานีเชียงใหม่ 72

รูปที่ 3.40 การแปรค่าความเข้มแสงสว่างตามฤดูกาลในรอบปีของสถานีอุบลราชธานี 73

รูปที่ 3.41 การแปรค่าความเข้มแสงสว่างตามฤดูกาลในรอบปีของสถานีนครปฐม 73

รูปที่ 3.42 การแปรค่าความเข้มแสงสว่างตามฤดูกาลในรอบปีของสถานีสงขลา 74

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

ในปัจจุบันการใช้ไฟฟ้าเพื่อให้แสงสว่างในประเทศไทยมีปริมาณสูงขึ้น เนื่องจากมีการเติบโตของสังคมเมือง การพัฒนาของอุตสาหกรรม อีกทั้งยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการขยายตัวของเศรษฐกิจ โดยทั่วไปแล้วจะเห็นว่าภายในอาคารสำนักงานต่าง ๆ ที่มีขนาดใหญ่ ออกแบบให้มีความซับซ้อนทำให้ภายในตัวอาคารมืด จึงต้องมีการเปิดไฟเพื่อให้แสงสว่างภายในอาคารตลอดทั้งวัน ดังนั้นการใช้แสงสว่างจากหลอดไฟจึงเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทำให้ต้องเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าซึ่งต้องใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (fossil fuel) มากขึ้นและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย การแก้ปัญหาดังกล่าววิธีหนึ่งคือการนำแสงสว่างธรรมชาติจากดวงอาทิตย์มาใช้ในอาคารเพื่อลดการใช้ไฟฟ้าเพื่อให้แสงสว่างในเวลากลางวัน

ดวงอาทิตย์ส่งพลังงานออกสู่อวกาศภายนอกในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีความยาวคลื่นตั้งแต่รังสีแกมมาจนถึงคลื่นวิทยุ ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.3 – 3.0 ไมครอน โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะผ่านบรรยากาศมายังพื้นผิวโลกซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นแสงสว่างและรังสีอินฟราเรด โดยส่วนที่เป็นแสงสว่าง (visible light) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.38 - 0.77 ไมครอน ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่ตอบสนองต่อสายตามนุษย์ ปริมาณรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นนี้ที่ถ่วงน้ำหนักด้วยการตอบสนองของตามนุษย์ (photopic response) จะเรียกว่า ค่าความเข้มแสงสว่างหรือความสว่าง (illuminance) ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่องานด้านการอนุรักษ์พลังงาน โดยการนำข้อมูลความเข้มแสงสว่างไปประมาณค่าแสงสว่างที่เข้าไปในอาคารเพื่อลดการใช้ไฟฟ้าสำหรับให้แสงสว่างภายในอาคาร (Krarti, 2005) ในการประยุกต์ใช้ข้อมูลดังกล่าว ผู้ออกแบบอาคารจำเป็นต้องทราบข้อมูลความเข้มแสงสว่างที่บริเวณนั้นๆ ซึ่งทำได้โดยการติดตั้งเครื่องมือวัดความสว่างที่เรียกว่าลักซ์มิเตอร์ (luxmeter) แต่ปัญหาที่ผู้ออกแบบมักพบอยู่เสมอคือ ข้อมูลความเข้มแสงสว่างมีจำกัด ไม่มีข้อมูลที่จะนำมาใช้งานเพราะสถานีวัดอยู่ห่างไกลหรือไม่มีสถานีวัดอยู่เลย อย่างไรก็ตามในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีตรวจจับระยะไกล (remote sensing) สำหรับประมาณค่าความเข้มแสงสว่างโดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมเพื่อให้ได้ข้อมูลความเข้มแสงสว่างที่ครอบคลุมทุกพื้นที่ (Janjai et al., 2008) แต่เนื่องจากปริมาณแสงสว่างที่ตกกระทบพื้นผิวโลกขึ้นกับองค์ประกอบต่าง ๆ ของบรรยากาศจึงทำให้วิธีการที่มีอยู่แล้วค่อนข้างซับซ้อนและต้องการข้อมูลอินพุตค่อนข้างมาก

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงจะทำการพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มแสงสว่างจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมฮิมาวารี Himawari ในสภาพท้องฟ้าทั่วไปสำหรับประเทศไทย ซึ่งเป็น

แบบจำลองที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ทั้งนี้เพื่อนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการคำนวณความเข้มแสงสว่างสำหรับนำไปใช้งานด้านอนุรักษ์พลังงานในอาคารต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณค่าความเข้มแสงสว่างจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Himawari ในสภาพท้องฟ้าทั่วไปสำหรับประเทศไทย
2. เพื่อทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น



บทที่ 2

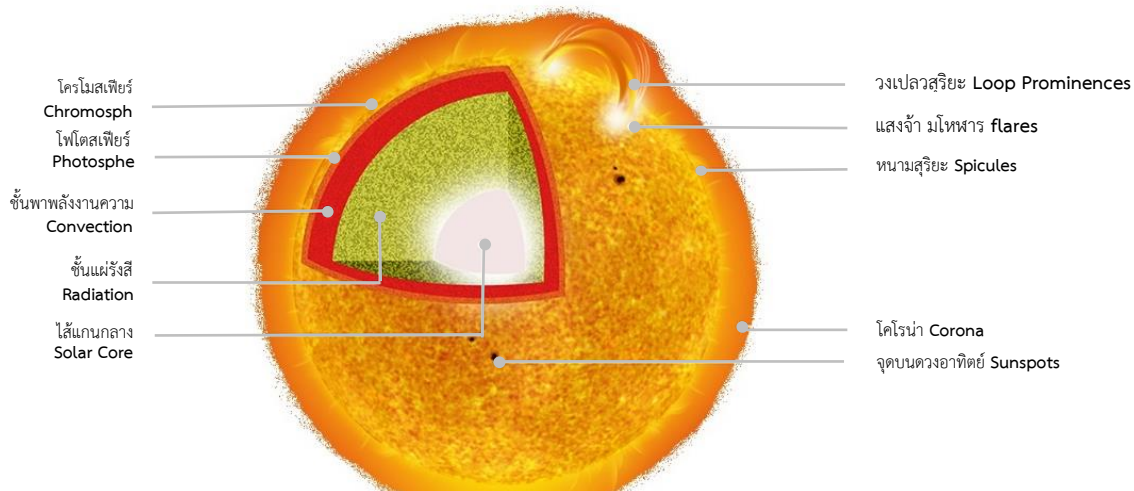
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มแสงสว่างธรรมชาติ จำเป็นต้องมีพื้นฐานความรู้เกี่ยวกับความเข้มแสงสว่างซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งมาจากดวงอาทิตย์ ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของความเข้มแสงสว่างรวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 แหล่งที่มาของรังสีอาทิตย์

ดวงอาทิตย์ คือ ดาวฤกษ์ที่อยู่ตรงศูนย์กลางของระบบสุริยะ (solar system) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 ล้านกิโลเมตร มีโลกและดาวเคราะห์อื่นๆ เป็นบริวาร โดยดวงอาทิตย์จะแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ โดยที่มาถึงพื้นผิวโลกจะมีความยาวคลื่น 0.3 - 3.0 μm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นในช่วง รังสีอัลตราไวโอเล็ต แสงสว่าง และรังสีอินฟราเรด ดวงอาทิตย์ประกอบด้วยชั้นจากมวลสารของไฮโดรเจน 70.67 % ฮีเลียม 27.43 % และส่วนที่เหลือเป็นคาร์บอน ไนโตรเจน ออกซิเจน และโลหะต่างๆ เป็นมวลมหาศาลจะดึงดูดเข้าหากันด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravitational attraction) ทำให้เกิดความกดทับกันจนอุณหภูมิที่บริเวณแกนกลางของดวงอาทิตย์สูงถึง 15 ล้านเคลวิน ซึ่งโครงสร้างของดวงอาทิตย์จากภายในสู่ภายนอก ประกอบด้วย บริเวณใจกลาง (core) บริเวณแผ่รังสี (radiative zone) บริเวณพาความร้อน (convective zone) และส่วนของบรรยากาศโดยบรรยากาศชั้นล่างสุดของดวงอาทิตย์คือ โฟโตสเฟียร์ (Photosphere) ถัดมาเป็นบรรยากาศชั้นกลางของดวงอาทิตย์คือ โครโมสเฟียร์ (chromosphere) และบรรยากาศชั้นบนสุดคือ โคโรนา (corona) โดยลักษณะโครงสร้างของดวงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างดวงอาทิตย์ (sunflowercosmos.org)

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานสำคัญที่สุดสำหรับสิ่งมีชีวิตบนโลก พลังงานที่กำเนิดจากดวงอาทิตย์จะแผ่ออกสู่อวกาศโดยรอบในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ ซึ่งอยู่ในรูปของรังสีและแสงสว่าง เรียกว่า รังสีอาทิตย์ (solar radiation) พลังงานรวมของรังสีทั้งหมดที่แผ่จากดวงอาทิตย์จะมีค่าเท่ากับ 3.854×10^{26} วัตต์ (เสริม จันทร์ฉาย, 2560) ซึ่งประกอบด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต แสงสว่าง และรังสีอินฟราเรด รังสีอาทิตย์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแสงสว่างและรังสีอินฟราเรด สำหรับรังสีอัลตราไวโอเล็ต ถึงแม้จะมีสัดส่วนค่อนข้างน้อยแต่มีพลังงานโฟตอน (photon energy) สูง ซึ่งมีผลกระทบต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิต นอกจากรังสีต่าง ๆ ดังกล่าวแล้ว ดวงอาทิตย์ยังแผ่รังสีเอกซ์ และคลื่นวิทยุอีกเล็กน้อย ซึ่งมีผลในด้านพลังงานน้อยมาก โดยพลังงานของรังสีแต่ละช่วงความยาวคลื่นมีสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับพลังงานทั้งหมด แสดงดังตารางที่

2.1

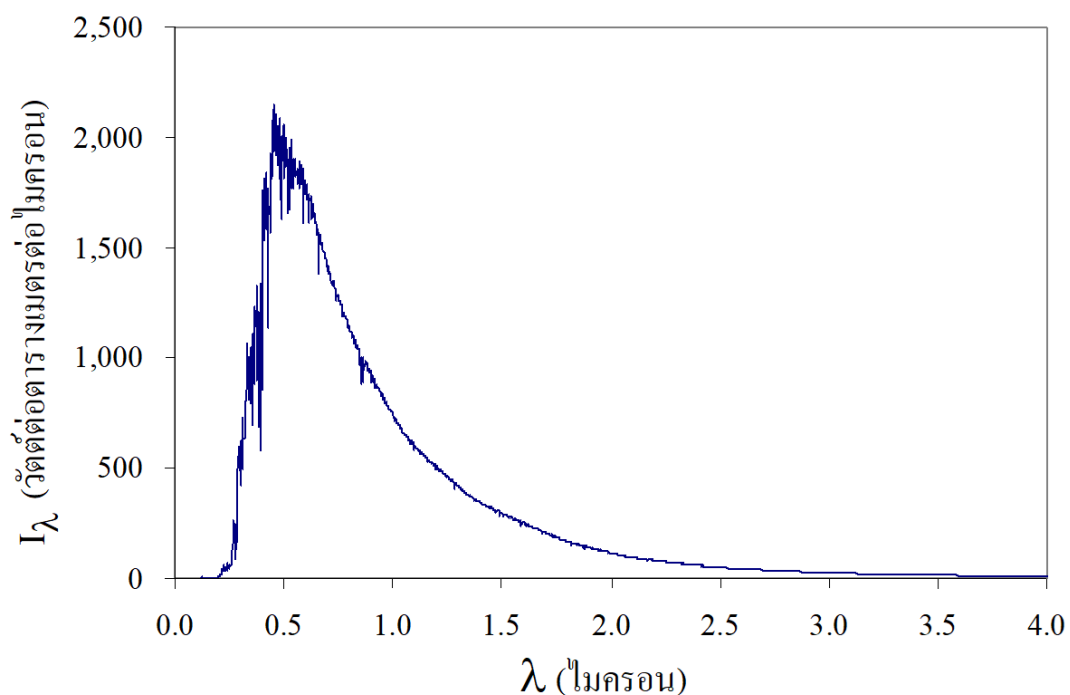
ตารางที่ 2.1 ช่วงความยาวคลื่นและสัดส่วนของพลังงานในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ ที่สำคัญเมื่อเทียบกับพลังงานทั้งหมดของรังสีที่แผ่จากดวงอาทิตย์ (เสริม จันทร์ฉาย, 2560)

รังสีอาทิตย์	ช่วงความยาวคลื่น (μm)	สัดส่วนของพลังงาน เมื่อเทียบกับพลังงานทั้งหมดที่แผ่ออกมา (%)
รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ความคลื่นสั้นมาก (extreme ultraviolet, XUV)	0.01-0.1	3×10^{-6}
รังสีอัลตราไวโอเล็ตไกล (far ultraviolet, FUV)	0.1-0.2	0.01
รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี (ultraviolet C, UVC)	0.2-0.28	0.5
รังสีอัลตราไวโอเล็ตบี (ultraviolet B, UVB)	0.28-0.32	1.3
รังสีอัลตราไวโอเล็ตเอ (ultraviolet A, UVA)	0.32-0.40	6.2
แสงสว่าง (visible radiation)	0.40-0.78	39
รังสีอินฟราเรด (infrared radiation)	0.78-1,000	52.9

2.1.2 แสงสว่าง (visible radiation)

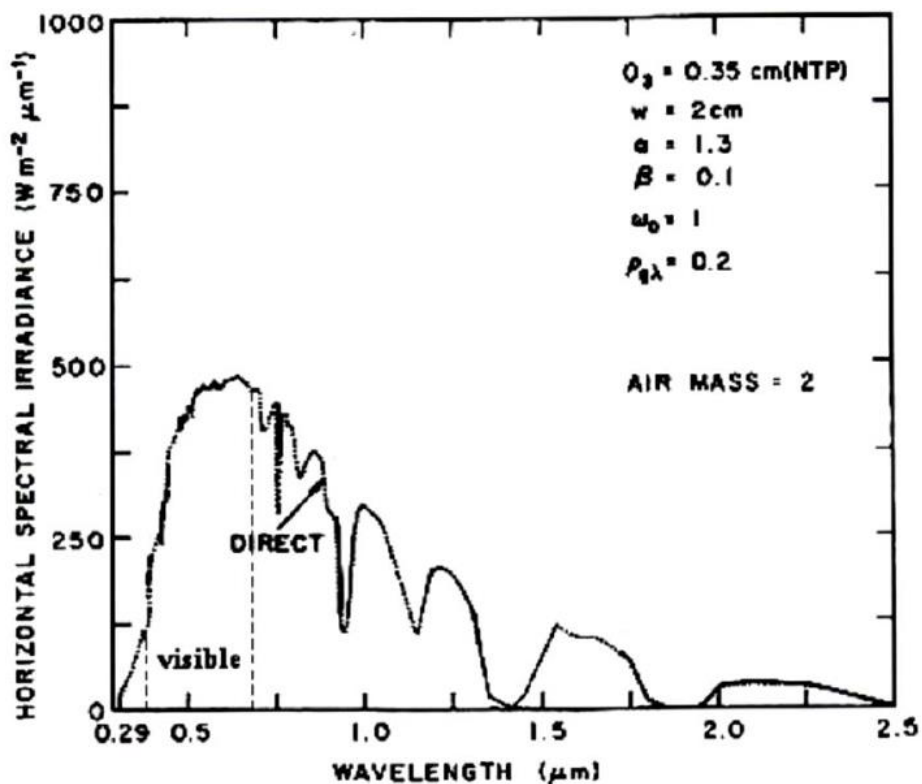
2.1.2.1 แหล่งกำเนิดของแสงสว่างธรรมชาติ

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดของแสงสว่างธรรมชาติ ซึ่งแสงสว่างธรรมชาติเป็นส่วนหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์ โดยความยาวคลื่นจะอยู่ในช่วง 0.38 - 0.77 μm ซึ่งเป็นช่วงที่สายตามนุษย์รับรู้ได้ ที่นอกบรรยากาศโลกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนนี้จะมีค่าความเข้มสูง จะสังเกตได้จากสเปกตรัมของรังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก ดังรูปที่ 2.2



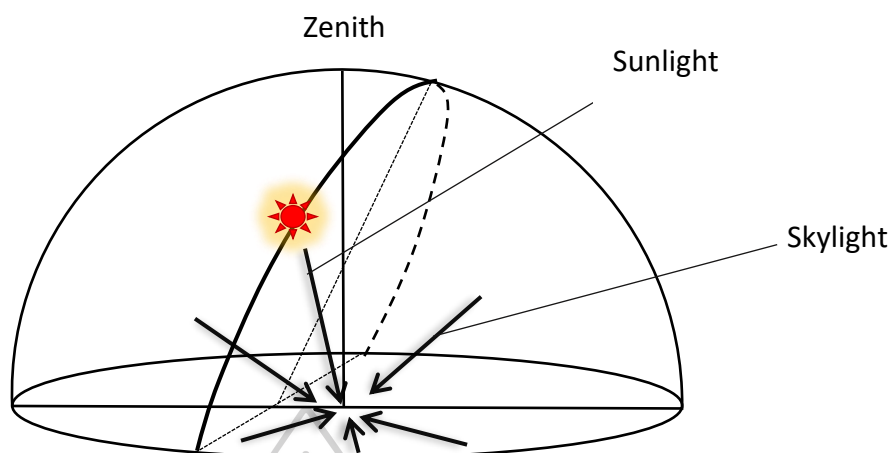
รูปที่ 2.2 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก ตามมาตรฐาน ASTM E-490 เมื่อ I_{λ} คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ และ λ คือ ความยาวคลื่น (เสริม จำนวน, 2560)

เมื่อรังสีอาทิตย์เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศของโลกจะถูกองค์ประกอบต่าง ๆ ของบรรยากาศ เช่น ไอน้ำ ผุ่นละออง โอโซน หรือเมฆ ลดทอนลงไป ทำให้ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่มาถึงพื้นผิวโลกมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นสเปกตรัมของรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก ในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ



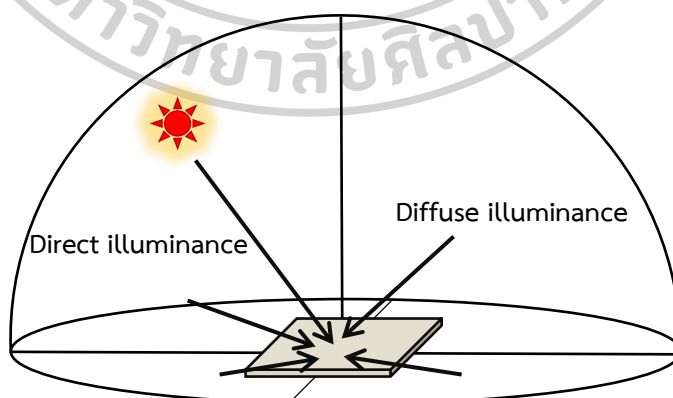
รูปที่ 2.3 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ (Iqbal, 1983)

ส่วนของสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่สายตามนุษย์รับรู้ได้เรียกว่า แสงสว่างธรรมชาติ (daylight) ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ รังสีตรงจากดวงอาทิตย์ (sunlight) และรังสีกระจายจากท้องฟ้า (skylight) รังสีตรงจากดวงอาทิตย์จะเป็นส่วนของรังสีดวงอาทิตย์ที่พุ่งตรงจากดวงอาทิตย์ผ่านบรรยากาศของโลกมายังตำแหน่งที่พิจารณา ส่วนรังสีกระจายจากท้องฟ้าจะเป็นรังสีที่เกิดจากการกระเจิง (scattering) ของรังสีตรงจากดวงอาทิตย์โดยโมเลกุลอากาศ ฝุ่นละออง และเมฆ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รังสีตรงจากดวงอาทิตย์ (sunlight) และรังสีกระจายจากท้องฟ้า (skylight)
(เสริม จันทร์ฉาย, 2560)

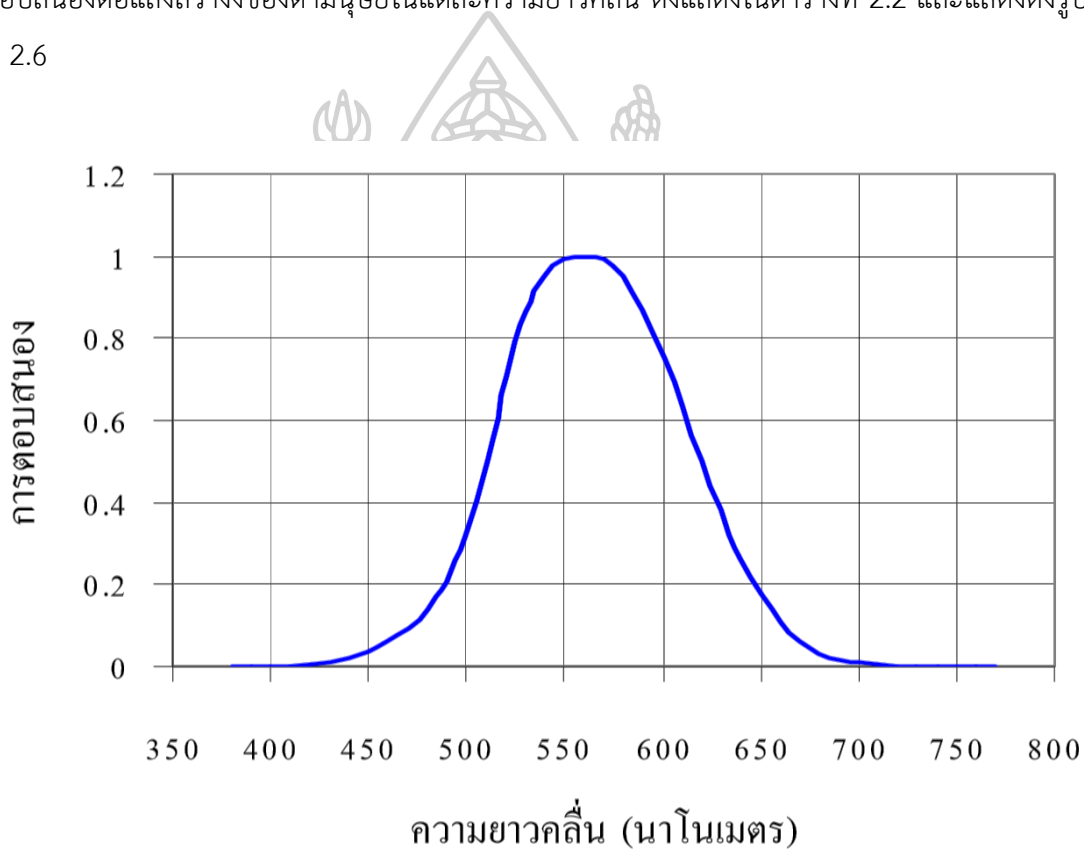
แสงสว่างธรรมชาติ เป็นรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นแสงสว่าง ($0.38-0.77 \mu\text{m}$) ซึ่งถ่วงน้ำหนักด้วยผลการตอบสนองของตามนุษย์และทำให้เกิดความสว่าง โดยประกอบด้วยความสว่างจากแสงตรง (direct illuminance) และความสว่างจากแสงกระจาย (diffuse illuminance) ผลรวมของปริมาณทั้งสองจะเรียกว่า ความสว่างจากแสงรวม (global illuminance) บางครั้งจะเรียกความสว่างจากแสงตรงว่าแสงจากดวงอาทิตย์ (sunlight) และความสว่างจากแสงกระจายว่าแสงจากท้องฟ้า (skylight) มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงความเข้มของแสงสว่างธรรมชาติในรูปของ direct illuminance และ diffuse illuminance (เสริม จันทร์ฉาย, 2560)

2.1.2.2 การตอบสนองของสายตามนุษย์ต่อแสงสว่าง

แสงสว่างเป็นช่วงหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สายตามนุษย์สามารถมองเห็นได้ มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง $0.38 - 0.77 \mu\text{m}$ โดยทั่วไปแล้วตามนุษย์ตอบสนองต่อแสงสว่างที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ไม่เท่ากัน โดยจะตอบสนองได้สูงสุดที่ความยาวคลื่น (λ) เท่ากับ 555 นาโนเมตร หรือในช่วงสีเขียว และการตอบสนองจะลดลงที่ความยาวคลื่นต่ำกว่าและสูงกว่าค่าดังกล่าว โดยคณะกรรมการความสว่างนานาชาติ (Commission Internationale d'Eclairage, CIE) ได้กำหนด มาตรฐานการตอบสนองต่อแสงสว่างของตามนุษย์ในแต่ละความยาวคลื่น ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงการตอบสนองต่อแสงสว่างของสายตามนุษย์ตามมาตรฐาน CIE (Murdoch, 1985)

ตารางที่ 2.2 ค่าการตอบสนองของสายตามนุษย์ (R_λ) ตามมาตรฐานของ CIE (Murdoch, 1985)

Wavelength (nm)	Photopic response	Wavelength (nm)	Photopic response
380	0.00004	580	0.95200
390	0.00012	590	0.87000
400	0.00040	600	0.75700
410	0.00120	610	0.63100
420	0.00400	620	0.50300
430	0.01160	630	0.38100
440	0.02300	640	0.26500
450	0.03800	650	0.17500
460	0.06000	660	0.10700
470	0.09700	670	0.06100
480	0.13900	680	0.03200
490	0.20800	690	0.01700
500	0.32300	700	0.00820
510	0.50300	710	0.00410
520	0.71000	720	0.00210
530	0.86200	730	0.00105
540	0.95400	740	0.00052
550	0.99500	750	0.00025
555	1.00000	760	0.00012
560	0.99500	770	0.00006
570	0.99500		

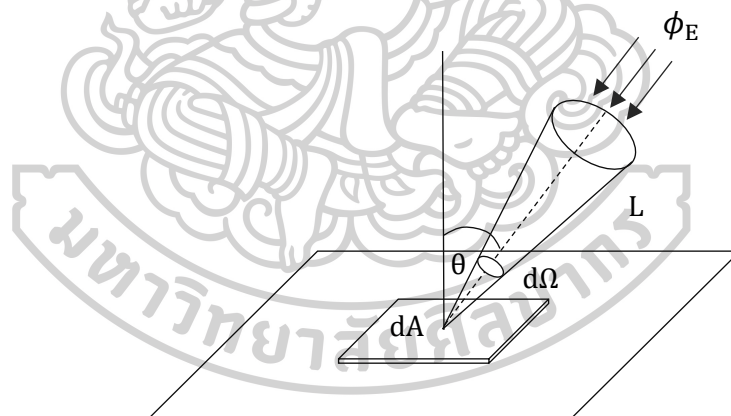
2.1.2.3 ปริมาณแสงสว่าง

แสงสว่างหรือแสงสว่างธรรมชาติ (daylight) จะมีการกำหนดศัพท์เทคนิคซึ่งใช้ในการบอกปริมาณต่างๆ ของแสงสว่าง ดังนี้

1) ฟลักซ์ของแสงสว่าง (luminous flux) โดยทั่วไปฟลักซ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (radiant flux) จะเป็นอัตราการไหลของพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลา (J/s หรือ Watt) เมื่อฟลักซ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นแสงสว่างตกกระทบตามนุษย์ ประสาทตาจะรับรู้ในรูปของฟลักซ์ของแสงสว่างในหน่วยลูเมน (lumen, lm) โดยฟลักซ์ของแสงสว่างจะมีความสัมพันธ์กับฟลักซ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนี้

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

2) ความส่องสว่าง (luminance) เป็นฟลักซ์ของแสงสว่างที่พุ่งเข้าหรือออกจากจุดบนพื้น ซึ่งตั้งฉากกับทางเดินของแสงหนึ่งหน่วยในกรวยแคบ ๆ ซึ่งมีมุมตัน 1 สเตอเรเดียน (steradian) ดังรูปที่ 2.7 และเขียนได้ดังสมการ (2.1)



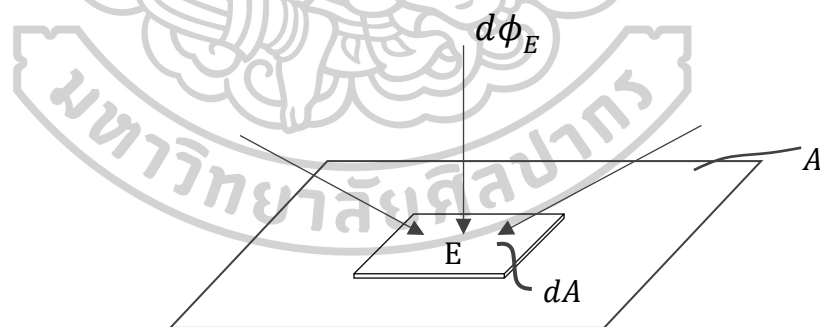
รูปที่ 2.7 ฟลักซ์ของแสงสว่างตามจำกัดความของความส่องสว่าง (เสริม จันทร์ฉาย, 2556)

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

เมื่อ	L	คือ	ความส่องสว่างจากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า [Cd/m^2]
	Φ_E	คือ	ฟลักซ์ของแสงสว่าง [lm]
	Ω	คือ	มุมตัน [sr]
	A	คือ	พื้นที่ [m^2]
	θ	คือ	มุมตกกระทบของแสงสว่างบนพื้นที่ที่พิจารณา [degree]

ความส่องสว่างมีหน่วยเป็นลูเมนต่อสเตอเรเดียนต่อตารางเมตร แต่นักวิทยาศาสตร์กำหนดให้ลูเมนต่อสเตอเรเดียนเป็นหน่วยพื้นฐาน (International System of Units, SI) สำหรับวัดแสงสว่าง เรียกว่า แคนเดลา (candela, Cd) ดังนั้นความส่องสว่างจึงมีหน่วยเป็นแคนเดลาต่อตารางเมตร

3) ความสว่างหรือความเข้มของแสงสว่าง (illuminance) เป็นปริมาณของฟลักซ์ของแสงสว่างจากทุกทิศทางที่ตกกระทบพื้นที่หนึ่งหน่วย มีหน่วยเป็นลูเมนต่อตารางเมตร หรือเรียกอีกชื่อว่าลักซ์ (lux, lx) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และสามารถเขียนได้ดังสมการ (2.2)

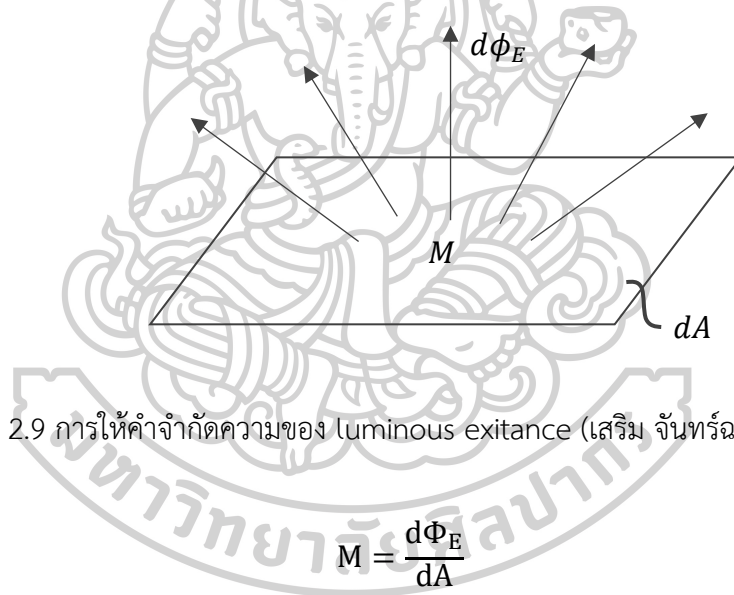


รูปที่ 2.8 ฟลักซ์ของแสงสว่าง $d\Phi_E$ ที่ตกกระทบพื้นที่ ตามจำกัดความของความสว่าง (เสริม จันทร์ฉาย, 2556)

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

เมื่อ	E	คือ	ความสว่าง [lux]
	Φ_E	คือ	ฟลักซ์ของแสงสว่าง [lm]
	A	คือ	พื้นที่ [m^2]

4) Luminance exitance เป็นแสงสว่างที่คล้ายกับอิลลูมินานซ์แต่คิดในกรณีที่แสงพุ่งออกจากพื้นที่ซึ่งเกิดจากการสะท้อนหรือการแผ่รังสี ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และสามารถเขียนได้ดังสมการ (2.3)



รูปที่ 2.9 การให้คำจำกัดความของ luminous exitance (เสริม จันทร์ฉาย, 2556)

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

เมื่อ	M	คือ	Luminance exitance [lux]
	Φ_E	คือ	ฟลักซ์ของแสงสว่าง [lm]
	A	คือ	พื้นที่ [m^2]

2.1.2.4 การหาค่าปริมาณแสงสว่างธรรมชาติ

1) แสงสว่างธรรมชาตินอกบรรยากาศโลก

โดยทั่วไปแสงสว่างธรรมชาตินอกบรรยากาศโลกสามารถหาได้จากการคำนวณ ทั้งนี้เพราะปัจจุบันเราทราบค่าสเปกตรัมของรังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกและค่าการตอบสนองของสายตามนุษย์ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ได้อย่างละเอียด จากปริมาณทั้งสองเราสามารถหาความเข้มแสงสว่างธรรมชาติในรูปของ illuminance บนระนาบที่ตั้งฉากกับรังสีจากดวงอาทิตย์ที่ระยะเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ ดังสมการ (2.4)

$$\bar{E}_{sc} = k \int_{0.38}^{0.77} G_{s\lambda} R_{\lambda} d\lambda \quad (2.4)$$

เมื่อ	\bar{E}_{sc}	คือ	แสงสว่างนอกบรรยากาศโลกบนระนาบตั้งฉากกับทิศทางของรังสีอาทิตย์ที่ระยะทางเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ [lux]
	$G_{s\lambda}$	คือ	สเปกตรัมรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก [W/m ² -μm]
	R_{λ}	คือ	ฟังก์ชันการตอบสนองของตามนุษย์ [-]
	k	คือ	ประสิทธิภาพแสงสว่างธรรมชาติ (daylight efficacy) [683 lm/W]
	λ	คือ	ความยาวคลื่น [μm]

ค่า R_{λ} สามารถหาได้จากตารางมาตรฐานของ CIE ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.2 และกราฟในรูปที่ 2.2

สำหรับแสงสว่างนอกบรรยากาศโลกบนระนาบในแนวระดับที่ขนานกับพื้นผิวโลก (E_{oh}) สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$E_{oh} = \bar{E}_{sc} E_0 \cos \theta_z \quad (2.5)$$

เมื่อ	E_0	คือ	แฟคเตอร์สำหรับแก้ผลจากการแปรค่าของระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ [-]
	θ_z	คือ	มุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ [degree]

2) แสงสว่างธรรมชาติที่พื้นผิวโลก

ดังที่กล่าวไปแล้วว่าแสงสว่างธรรมชาติที่พื้นผิวโลกประกอบไปด้วยแสงสว่างธรรมชาติที่พุ่งตรงมาจากดวงอาทิตย์ที่เรียกว่า beam illuminance และแสงที่กระเจิง มาจากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าเรียกว่า diffuse illuminance และผลรวมของปริมาณทั้งสองเรียกว่า global illuminance ซึ่งมีหน่วยเป็น lumen/m^2 หรือ lux เครื่องมือที่ใช้วัดปริมาณแสงสว่างธรรมชาติเรียกว่า ลักซ์มิเตอร์ (luxmeter) ซึ่งมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.10

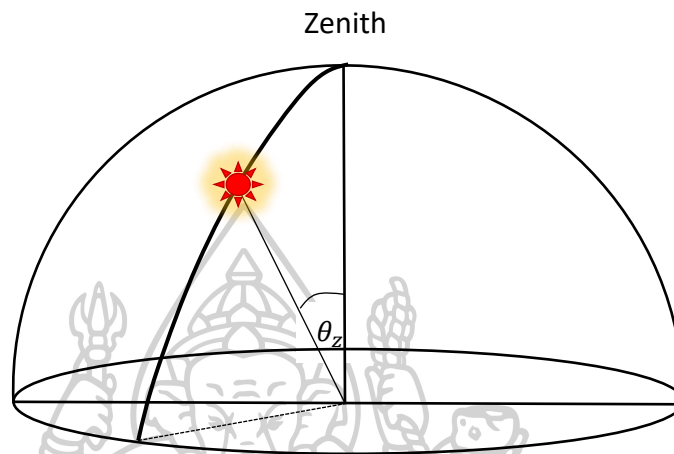


รูปที่ 2.10 เครื่องวัดความเข้มของแสงสว่างหรือ ลักซ์มิเตอร์ (luxmeter)

สำหรับกรณีท้องฟ้ามีเมฆการคำนวณค่า illuminance โดยอาศัยข้อมูลภาคพื้นดินทำได้ยาก โดยปริมาณและตำแหน่งของเมฆเป็นข้อมูลที่ไม่มีการวัดเป็นประจำที่สถานีอุตุนิยมวิทยาทั่วไป ดังนั้นการหาค่า illuminance ทั่วไปจะทำการจัดตั้งสถานีวัดโดยติดตั้งเครื่อง luxmeter และทำการวัดต่อเนื่องกันเป็นเวลานานหลายปี เพื่อให้ค่าที่เป็นตัวแทนทางสถิติของบริเวณนั้น

นอกจากปริมาณเมฆแล้วการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงสว่างที่ตกกระทบพื้นผิวโลกมีการแปรค่าตามเวลาในรอบวัน ซึ่งขึ้นกับตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า ถ้าสังเกตในช่วงเช้าและเย็นดวงอาทิตย์จะอยู่ที่ขอบฟ้าซึ่งตำแหน่งของดวงอาทิตย์จะอยู่ห่างจากจุดเซนธิมากทำให้ความเข้ม

รังสีอาทิตย์มีค่าน้อย ในทางกลับกันในช่วงเที่ยงวัน ตำแหน่งของดวงอาทิตย์อยู่ใกล้กับจุดเซนธิ์ทำให้ ความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่ามาก ตัวแปรที่บอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในเวลาใด ๆ กับ จุดเซนธิ์จะ เรียกว่า มุมเซนธิ์ของดวงอาทิตย์ (Solar zenith angle, θ_z) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่เวลาใด ๆ

มุมเซนธิ์ของดวงอาทิตย์สามารถคำนวณได้โดยอาศัยสมการของ Iqbal, 1983 ดังนี้

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (2.6)$$

เมื่อ	θ_z	คือ	มุมเซนธิ์ของดวงอาทิตย์ [degree]
	ω	คือ	มุมชั่วโมง [degree]
	φ	คือ	ละติจูด [degree]
	δ	คือ	เดคลิเนชัน [degree]

โดยมุมชั่วโมงสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\omega = 15(12 - ST) \quad (2.7)$$

เมื่อ	ω	คือ	มุมชั่วโมง [degree]
	ST	คือ	เวลาดวงอาทิตย์ [hr. : min]

โดยที่

$$ST = LST + 4(L_s - L_{loc}) + E_t \quad (15) \quad (2.8)$$

เมื่อ	ST	คือ	เวลาดวงอาทิตย์ [hr. : min]
	LST	คือ	เวลามาตรฐานท้องถิ่น [hr. : min]
	L _s	คือ	เส้นลองจิจูดมาตรฐาน [degree]

และมุมเดคลิเนชันสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\delta = (0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.006758 \cos 2 \Gamma + 0.000907 \sin 2 \Gamma - 0.002697 \cos 3 \Gamma + 0.00148 \sin 3 \Gamma)(180/\pi) \quad (2.9)$$

โดยที่

$$\Gamma = 2\pi(d_n - 1)/365 \quad (2.10)$$

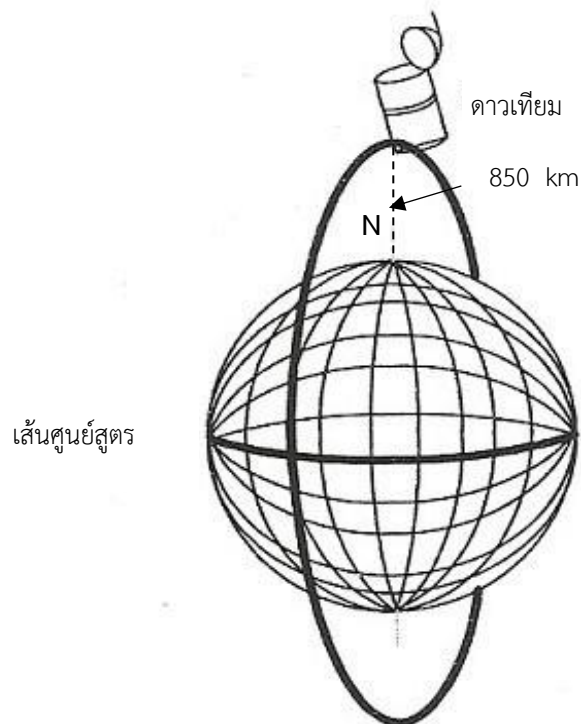
เมื่อ	Γ	คือ	มุมวัน (day angle) [radian]
	δ	คือ	มุมเดคลิเนชันของดวงอาทิตย์ [degree]
	d_n	คือ	วันในรอบปี, $d_n = 1$ สำหรับวันที่ 1 มกราคม

2.1.3 ดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา

ดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา (Meteorological Satellite) เป็นดาวเทียมซึ่งใช้ในการตรวจวัดข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา การสังเกตจากดาวเทียมนั้นไม่ได้ใช้สำหรับการพยากรณ์เพียงอากาศเท่านั้น แต่ยังรวมถึงการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศและการวิจัยในชั้นบรรยากาศอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีการนำข้อมูลดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาเป็นข้อมูลสำหรับใช้งานด้านการหาปริมาณความเข้มแสงสว่าง เนื่องจากดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาจะบันทึกภาพของโลก การเคลื่อนไหวในชั้นบรรยากาศ และปริมาณเมฆที่ปกคลุม ซึ่งเมฆเป็นตัวแปรหลักของการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มแสงสว่างที่พื้นโลก โดยทั่วไปดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะการโคจร ดังนี้

1) ดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาชนิดโคจรในแนวขั้วโลก (polar orbiting satellite)

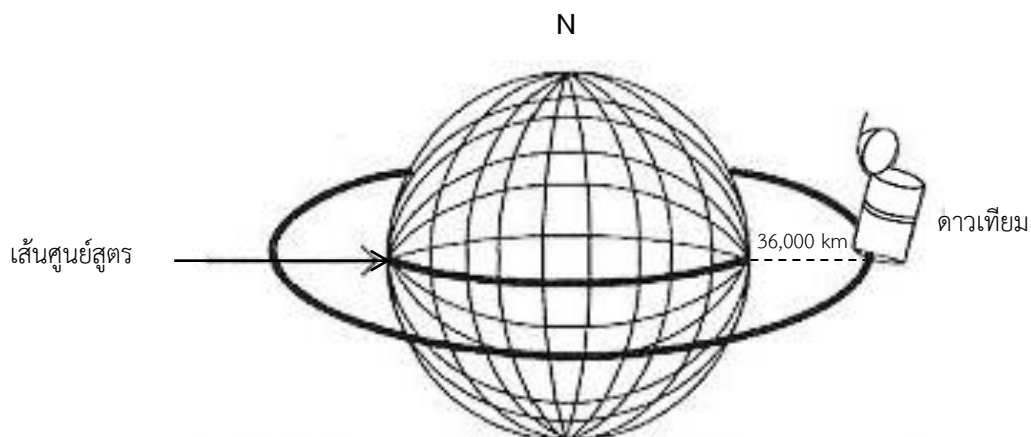
polar orbiting satellite เป็นดาวเทียมโคจรที่โคจรอยู่ในแนวขั้วโลก ดังรูปที่ 2.12 โดยอยู่สูงจากพื้นโลกประมาณ 850 กิโลเมตร และโคจรจากแนวขั้วโลกเหนือไปขั้วโลกใต้ ขณะที่โลกหมุนรอบตัวเองจากทิศตะวันตกไปทิศตะวันออก ดาวเทียมจะกวาดพื้นที่ครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของพื้นผิวโลก ดาวเทียมประเภทนี้ได้แก่ ดาวเทียม NOAA ของสหรัฐอเมริกา และดาวเทียม FY-1 ของจีน ซึ่งข้อมูลดาวเทียมนี้ไม่เหมาะสมสำหรับการนำมาหาค่ารังสีอาทิตย์ได้โดยตรง เนื่องจากดาวเทียมโคจรผ่านและบันทึกภาพพื้นผิวโลกในช่วงกลางวันเพียง 2 ภาพต่อวัน จึงไม่เพียงพอต่อการติดตามการเปลี่ยนแปลงของรังสีอาทิตย์ในรอบวัน



รูปที่ 2.12 ทางโคจรของดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา polar orbiting satellite (Suparerk, 2014)

2) ดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาชนิดโคจรแบบอยู่ตำแหน่งเดิมเมื่อเทียบกับพื้นผิวโลก (geostationary satellite)

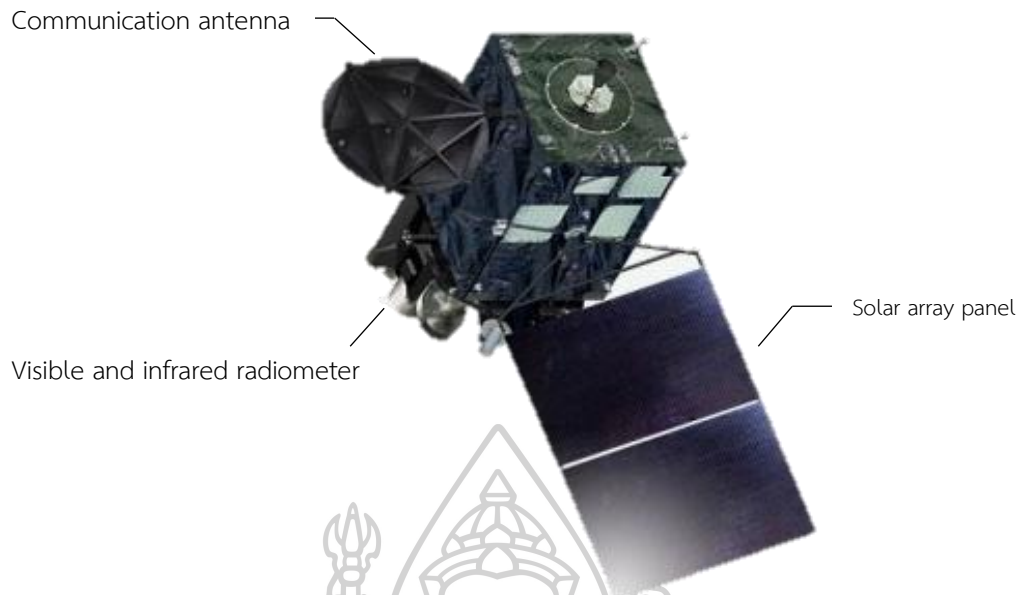
geostationary satellite เป็นดาวเทียมที่โคจรแบบอยู่ตำแหน่งเดิมเมื่อเทียบกับพื้นผิวโลก ดังรูปที่ 2.13 โดยดาวเทียมโคจรรอบโลกใช้เวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งวงโคจรจะอยู่ในตำแหน่งเส้นศูนย์สูตรของโลก โดยอยู่สูงจากพื้นโลกประมาณ 36,000 กิโลเมตร และโคจรไปในทางเดียวกับการหมุนของโลกด้วยความเร็วเท่ากัน ดังนั้นภาพที่ได้จากดาวเทียมประเภทนี้จึงเป็นภาพที่ต่อเนื่องในบริเวณตำแหน่งเดิมได้ทุกชั่วโมงตลอดวัน ดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาประเภทนี้ในปัจจุบัน ได้แก่ GOES-E-13 GOES-W-15 METEOSAT-10 INSAT MTSAT และ Himawari



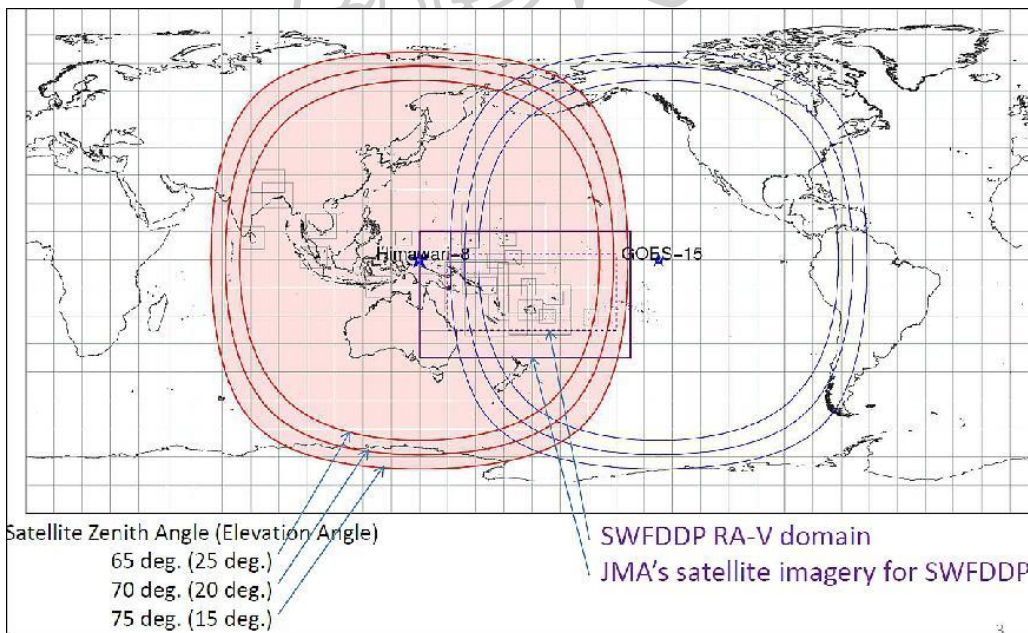
รูปที่ 2.13 ทางโคจรของดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา geostationary satellite (Suparerk, 2014)

2.1.3.1 ดาวเทียม Himawari-8

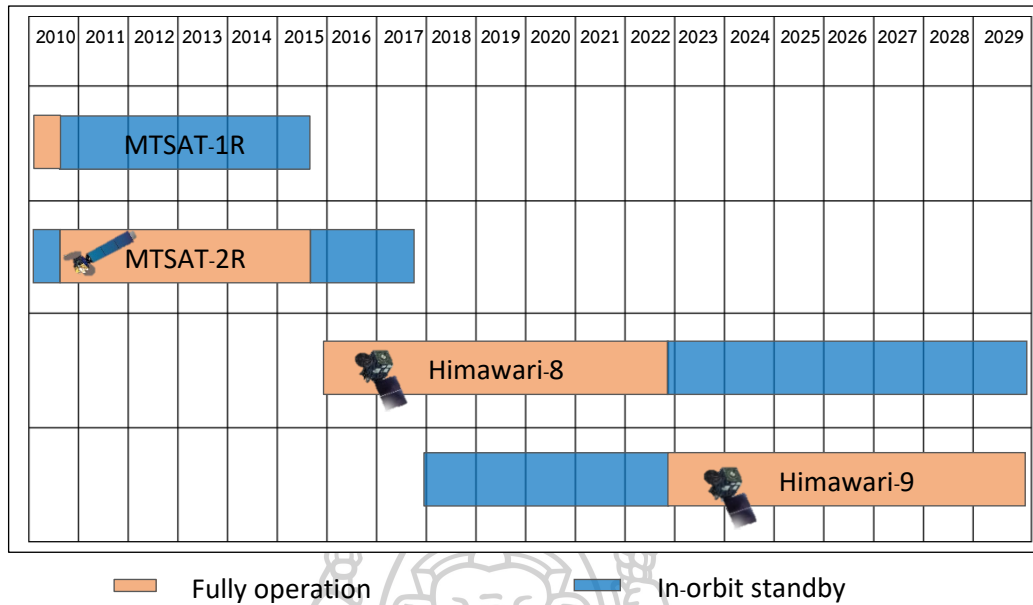
ดาวเทียม Himawari-8 คือดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาของประเทศญี่ปุ่น (himawari แปลว่า "ทานตะวัน" เป็นภาษาญี่ปุ่น) เป็นดาวเทียมชนิด geostationary satellite อยู่เหนือเส้นศูนย์สูตรที่ระดับความสูงประมาณ 35,800 กิโลเมตร ที่ตำแหน่งลองจิจูดประมาณ 140.7°E ลักษณะของดาวเทียม Himawari-8 แสดงดังรูปที่ 2.14 ดาวเทียมนี้ทำการตรวจวัดสภาวะอากาศครอบคลุมภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงและแปซิฟิกตะวันตก ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ของประเทศไทยด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.15 โดยดาวเทียม Himawari-8 ขึ้นสู่วงโคจรเมื่อวันที่ 7 ตุลาคม ปี ค.ศ. 2014 และทำการถ่ายภาพทุก ๆ 10 นาที ดาวเทียม Himawari-8 ถูกปล่อยขึ้นสู่วงโคจรเพื่อใช้ในการดำเนินงานด้านอุตุนิยมวิทยาแทนดาวเทียม MTSAT-2 เมื่อวันที่ 7 กรกฎาคม 2015 โดยรูปที่ 2.16 แสดงภาพรวมของดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาของญี่ปุ่นที่ปล่อยขึ้นสู่วงโคจรสำหรับใช้งานด้านอุตุนิยมวิทยาตั้งแต่อดีตปัจจุบัน และรวมไปถึงที่จะใช้งานในอนาคต



รูปที่ 2.14 ลักษณะของดาวเทียม Himawari-8 (JMA, 2013)

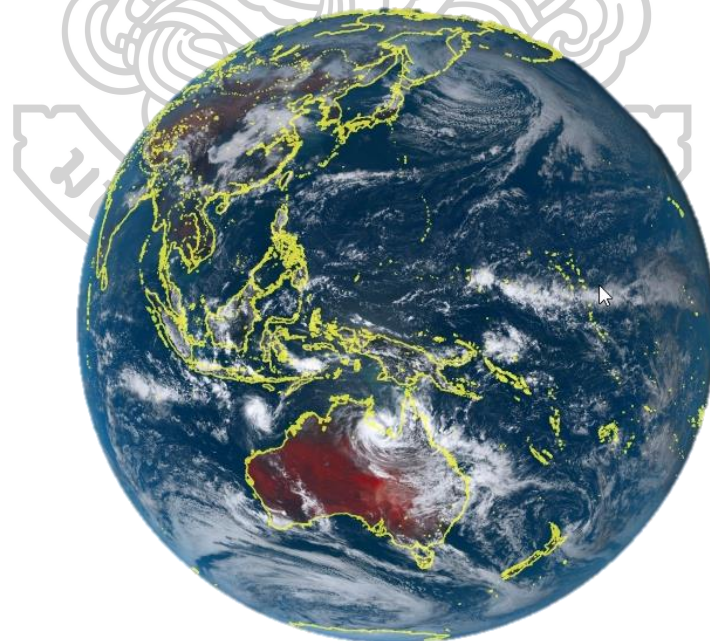


รูปที่ 2.15 ตำแหน่งและพื้นที่ครอบคลุมของดาวเทียม Himawari-8 (ภาพจาก Japan Meteorological Agency JMA)



รูปที่ 2.16 ภาพรวมของดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาของญี่ปุ่นตั้งแต่อดีตจนถึงอนาคต

ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมที่ได้จากดาวเทียม Himawari-8 ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ลักษณะภาพ Real-time ของดาวเทียม Himawari-8 วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2020 เวลา 10:30 นาฬิกา ของประเทศไทย (ภาพจาก www.himawari8.nict.go.jp)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากปริมาณแสงสว่างเป็นข้อมูลที่สำคัญปริมาณหนึ่ง ซึ่งนำไปประยุกต์ในงานด้านการออกแบบอาคารให้ใช้ประโยชน์จากแสงสว่างธรรมชาติ จึงทำให้มีผู้สนใจศึกษาความเข้มแสงสว่างโดยวิธีการวัดด้วยเครื่องวัดภาคพื้นดินและการสร้างแบบจำลองทางฟิสิกส์หรือทางสถิติ โดยงานที่สำคัญต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

(Ineichen & Perez, 1999) ได้เสนอแบบจำลองซึ่งดัชนีเมฆเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญของแบบจำลองในการหาปริมาณความเข้มแสงสว่าง จากนั้นก็พิจารณาผลกระทบของมวลอากาศและผลจากการกระเจิงกลับที่ส่งผลต่อความเข้มแสงสว่าง โดยแบบจำลองสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\text{illuminance} = G_{\text{clear}}(1 - n) + G_{\text{min}} \quad (2.11)$$

เมื่อ	illuminance	คือ	ค่าความเข้มแสงสว่าง [klux]
	G_{clear}	คือ	ค่าความเข้มแสงสว่างในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ [klux]
	G_{min}	คือ	ค่าความเข้มแสงสว่างต่ำสุด [klux]
	n	คือ	ดัชนีเมฆ [-]

ผู้วิจัยได้ทดสอบการสมรรถนะของแบบจำลองในพื้นที่ที่มีความแตกต่างของสภาพภูมิอากาศพบว่าแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้งานได้ถึงแม้ว่าจะมีความแตกต่างกันมากของสภาพภูมิอากาศหรือภูมิประเทศ

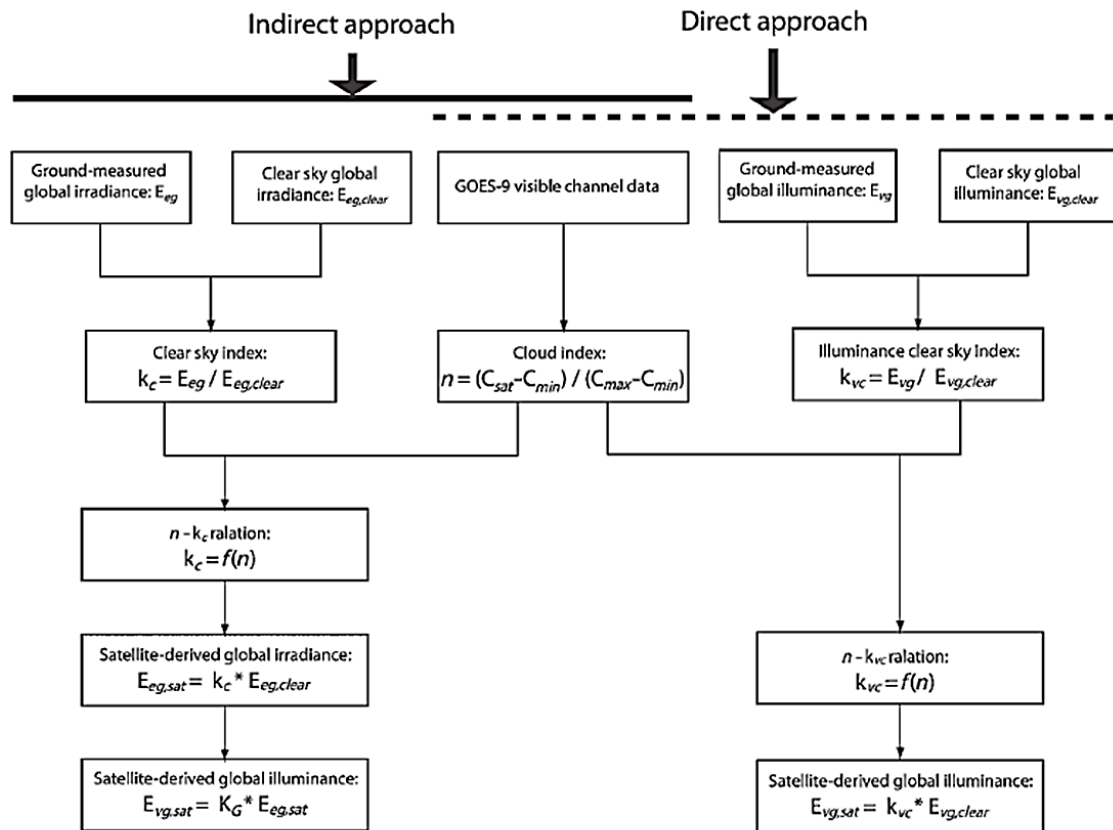
(Kandilli & Utgen, 2008) ได้เสนอแบบจำลองสำหรับหาความเข้มแสงสว่างโดยใช้ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยใช้ข้อมูลความยาวนานแสงแดดและข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างกับความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยใช้แบบจำลอง 3 แบบจำลอง คือแบบจำลอง Aydinli แบบจำลอง Perez และแบบจำลอง IESNA พบว่าแบบจำลองของ Perez เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดที่นำมาคำนวณหาความเข้มแสงสว่าง ซึ่งแบบจำลองของ Perez สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$g = I[a_i + b_i W + c_i \cos \theta_z + d_i \ln(\Delta)] \quad (2.12)$$

เมื่อ	g	คือ	ความเข้มแสงสว่าง [lux]
	I	คือ	ความเข้มรังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน [W/m^2]
	W	คือ	ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ [cm]
	θ_z	คือ	มุมเซนิตของดวงอาทิตย์ [degree]
	Δ	คือ	ดัชนีความแจ่มใสของท้องฟ้า [-]
	a_i, b_i, c_i, d_i	คือ	สัมประสิทธิ์ความแจ่มใสของบรรยากาศ [-]

(He & Ng, 2010) นำเสนอแบบจำลองทางสถิติที่สามารถนำมาคำนวณความเข้มแสงสว่างบนระนาบในแนวระดับสำหรับสภาพอากาศกึ่งเขตร้อนจากข้อมูลดาวเทียม โดยแบบจำลอง 2 แบบจำลองประกอบด้วย วิธีการทางตรงและวิธีการทางอ้อม การเลือกวิธีการที่จะใช้ในการพัฒนาแบบจำลองขึ้นอยู่กับชนิดของข้อมูลที่มีอยู่ ถ้ามีข้อมูลความเข้มแสงสว่างรังสีรวมของสถานีวัดภาคพื้นดินให้เลือกใช้วิธีการทางตรงซึ่งเป็นวิธีการที่ดีกว่า แต่ถ้ามีค่าความเข้มรังสีรวมจากสถานีวัดภาคพื้นดินให้เลือกใช้วิธีการทางอ้อม ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการเก็บข้อมูลภายใต้โครงการ International Daylight Monitoring Program (IDMP) ใน Chinese University ประเทศฮ่องกง ขั้นตอนการคำนวณความเข้มแสงสว่างวิธีการทางตรงและวิธีการทางอ้อมแสดงดังแผนภูมิรูปที่ 2.18





รูปที่ 2.18 แผนภูมิการคำนวณความเข้มแสงสว่างวิธีการทางตรงและวิธีการทางอ้อมนำเสนอโดย He & Ng (2010)

การคำนวณความเข้มแสงสว่างโดยวิธีการทางอ้อมนั้นจะทำการหาความเข้มรังสีรวมโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเมฆ (n) กับดัชนีความแจ่มใสของท้องฟ้า (k_c) จากนั้นแปลงความเข้มรังสีรวมบนระนาบไปเป็นความเข้มแสงสว่างรังสีรวมโดยใช้แบบจำลองประสิทธิภาพของแสงสว่างโดยดัชนีความแจ่มใสของท้องฟ้าที่นิยามได้ดังสมการ

$$k_c = \frac{E_{eg}}{E_{eg,clear}} \quad (2.13)$$

เมื่อ E_{eg} คือ ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงบนระนาบในแนวระดับที่ได้จากการวัด [W/m^2]

$E_{eg,clear}$ คือ ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงบนระนาบในแนวระดับที่ได้จากการวัดในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ [W/m^2]

จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเมฆ (n) กับ ดัชนีความแจ่มใสของท้องฟ้า (k_c) โดยคำนึงถึงมุมเงยของดวงอาทิตย์ (solar altitude, γ_s) ด้วย ซึ่งเขียนได้ดังสมการ

$$k_c = 0.549 - 0.370n + 0.562 \sin \gamma_s + 0.262n^2 - 1.614n \cdot \sin \gamma_s + 1.133n \cdot \sin^2 \gamma_s - 0.370 \sin^3 \gamma_s \quad (2.14)$$

และความเข้มรังสีรวมบนระนาบในแนวระดับจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ($E_{eg,sat}$) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_{eg,sat} = k_c \cdot E_{eg,clear} \quad (2.15)$$

จากนั้นคำนวณความเข้มแสงสว่างจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมสามารถคำนวณได้โดยใช้วิธีการทางอ้อมได้ดังสมการ

$$E_{vg,sat} = K_G \cdot E_{eg,sat} \quad (2.16)$$

เมื่อ K_G คือ ประสิทธิภาพของแสงสว่างซึ่งเป็นฟังก์ชันของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ (k_t) ดังสมการ

$$K_G = 136.6 - 74.541k_t + 57.342k_t^2 \quad (2.17)$$

โดย k_t คือ ดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศซึ่งเป็นอัตราส่วนของความเข้มรังสีรวมบนระนาบในแนวระดับต่อความเข้มรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก [-]

สำหรับการคำนวณความเข้มแสงสว่างวิธีการตรงโดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเมฆ (n) กับดัชนีความส่องสว่างของท้องฟ้า (k_{vc}) โดยตรง ซึ่งดัชนีความส่องสว่างสามารถคำนวณจากดังสมการ

$$k_{vc} = \frac{E_{vg}}{E_{vg,clear}} \quad (2.18)$$

โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีเมฆและดัชนีความส่องสว่างของท้องฟ้ารวมทั้งพิจารณา มุมเงยของดวงอาทิตย์เข้าไปด้วยจะเขียนได้ดังสมการ

$$k_{vc} = 1.383 - 0.659n + 2.037 \sin \gamma_s - 0.858n \cdot \sin \gamma_s \quad (2.19)$$

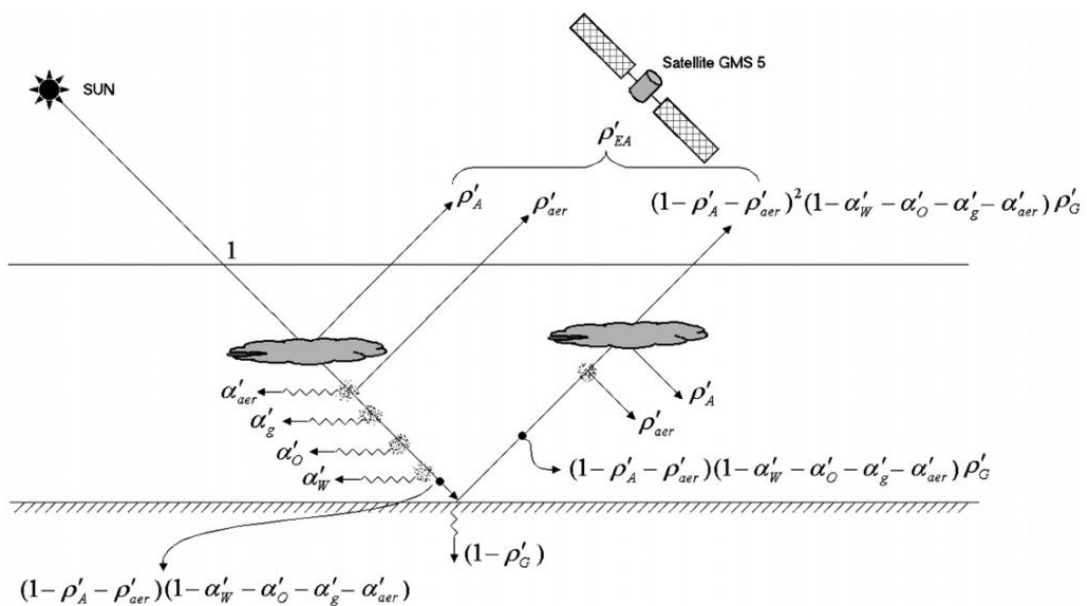
$$+ 3.166 \sin^2 \gamma_s + 0.284n^3 - 0.351n^2 \cdot \sin^2 \gamma_s$$

$$+ 0.962n \cdot \sin^2 \gamma_s - 1.697 \sin^3 \gamma_s$$

จากนั้นความเข้มแสงสว่างบนระนาบในแนวระดับจากภาพถ่ายดาวเทียม $E_{vg,sat}$ สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$E_{vg,sat} = k_{vc} \cdot E_{vg,clear} \quad (2.20)$$

(Janjai, Tohsing, Nunez, & Laksanaboonsong, 2008) เสนอแบบจำลองเชิงฟิสิกส์สำหรับความสว่างจากแสงสว่างธรรมชาติโดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียม ซึ่งแบบจำลองได้คิดผลของการดูดกลืนและการกระเจิงแสงขององค์ประกอบต่าง ๆ ของบรรยากาศ แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แผนภูมิการดูดกลืนและการกระเจิงของรังสีอาทิตย์ที่เกิดจากองค์ประกอบต่างๆ ของบรรยากาศ

ถ้ากำหนดให้ความเข้มแสงสว่างที่ตกกระทบบมีค่า 1 หน่วย ดังนั้นผลรวมของรังสีที่เกิดจากการตกกระทบครั้งแรกกับรังสีที่ตกกระทบบพื้นผิวโลกซึ่งเกิดจากการกระเจิงกลับไปมาระหว่างพื้นผิวโลกกับบรรยากาศคือสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ของบรรยากาศในช่วงความยาวคลื่นแสงสว่าง (transmittances, τ) ซึ่งเขียนได้ดังสมการ

$$\tau = \frac{(1 - \rho_A - \rho_{aer})(1 - \alpha_o - \alpha_w - \alpha_g - \alpha_{aer})}{1 - (\rho_A - \rho_{aer})\rho_G} \quad (2.21)$$

เมื่อ	τ	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน [-]
	ρ_A	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของบรรยากาศและพื้นผิวโลก [-]
	ρ_{aer}	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจากฝุ่นละออง [-]
	ρ_G	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวโลก [-]
	α_w	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนความสว่างเนื่องจากปริมาณไอน้ำ [-]
	α_{aer}	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนความสว่างเนื่องจากฝุ่นละออง [-]
	α_o	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนความสว่างเนื่องจากเมฆ [-]
	α_g	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนความสว่างเนื่องจากก๊าซต่าง ๆ ในบรรยากาศ [-]

จากนั้นสามารถคำนวณหาความเข้มแสงสว่าง (E_{gh}) จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในช่วงความยาวคลื่นแสงสว่าง (τ) และความสว่างนอกบรรยากาศโลกได้จากสมการที่ (2.27)

$$E_{gh} = \tau E_{oh} \quad (2.22)$$

สำหรับแสงสว่างนอกบรรยากาศโลกบนระนาบในแนวระดับที่ขนานกับพื้นผิวโลก (E_{oh}) สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$E_{oh} = \bar{E}_{sc} E_0 \cos \theta_z \quad (2.23)$$

เมื่อ	E_0	คือ	แฟคเตอร์สำหรับแก้ผลจากการแปรค่าของระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ [-]
	θ_z	คือ	มุมเซนธิซของดวงอาทิตย์ [degree]
	\bar{E}_{sc}	คือ	แสงสว่างนอกบรรยากาศโลกบนระนาบตั้งฉากกับทิศทางของรังสีอาทิตย์ที่ระยะทางเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ [lux]

จากแบบจำลองเชิงฟิสิกส์ซึ่งมีความซับซ้อนในการคำนวณปริมาณความเข้มแสงสว่าง (Pattarapanitchai, Janjai, Tohsing, & Prathumsit, 2015) จึงได้เสนอเทคนิคการสร้างแผนที่ความเข้มแสงสว่างจากข้อมูลดาวเทียมโดยใช้แบบจำลองกึ่งเอมไพริคัล ซึ่งพิจารณาองค์ประกอบต่างๆ ของบรรยากาศที่ลดทอนความเข้มแสงสว่าง ได้แก่ โอโซน ฝุ่นละออง ไอน้ำ และเมฆ โดยแบบจำลองกึ่งเอมไพริคัลที่นำเสนอเขียนได้ดังสมการ

$$E_g = E_{sc} e_0 \cos \theta_z \{ \exp[-(a_0 + a_1 AOD + a_2 TOC + a_3 W) m_a] \} \times (1 - a_4 n) \quad (2.24)$$

เมื่อ	E_g	คือ	ค่าความเข้มแสงสว่าง [klux]
	E_{sc}	คือ	ค่าคงตัวรังสี [klux]
	e_0	คือ	แฟคเตอร์สำหรับแก้ผลจากการแปรค่าของระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ [-]
	θ_z	คือ	มุมเซนธิซของดวงอาทิตย์ [degree]
	AOD	คือ	ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองที่ 500 nm [-]
	TOC	คือ	ปริมาณโอโซน [cm]
	W	คือ	ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ [cm]
	m_a	คือ	มวลอากาศ [-]
	n	คือ	ดัชนีเมฆ [-]
	a_0, a_1, a_2, a_3	คือ	สัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง [-]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่าแบบจำลองส่วนใหญ่มีความซับซ้อนและต้องใช้ข้อมูลของตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบต่าง ๆ ของบรรยากาศจึงไม่สะดวกที่จะนำมาใช้งานทั่วไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงจะทำการพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มแสงสว่างธรรมชาติที่ไม่ซับซ้อนและสามารถนำไปใช้งานต่อไปได้



บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัยและผล

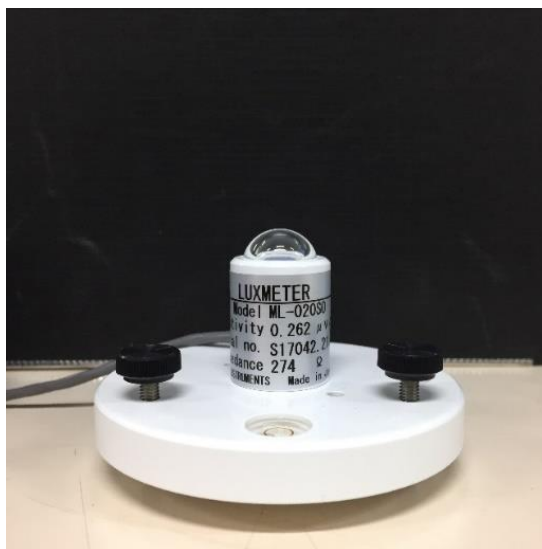
ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะทำการพัฒนาแบบจำลองกึ่งเอมไพริคัลสำหรับคำนวณค่าความเข้มแสงสว่างบนพื้นผิวโลกโดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ซึ่งเป็นแบบจำลองที่พิจารณาองค์ประกอบของบรรยากาศที่มีผลต่อค่าความเข้มแสงสว่างให้ได้แบบจำลองที่ไม่ยุ่งยากและซับซ้อน โดยขั้นตอนการดำเนินงานมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การเตรียมข้อมูลสำหรับการพัฒนาแบบจำลอง

การพัฒนาแบบจำลองในงานวิจัยนี้จะต้องใช้ข้อมูลสองชนิด คือ ข้อมูลความเข้มแสงสว่างจากสถานีวัดภาคพื้นดินและข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมเพื่อสร้างแบบจำลองและทดสอบสมรรถนะของแบบจำลอง โดยรายละเอียดข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

3.1.1 ข้อมูลภาคพื้นดิน

ในการวัดปริมาณความเข้มแสงสว่างจะใช้เครื่องวัดความเข้มแสงสว่าง หรือเรียกว่า ลักซ์มิเตอร์ (luxmeter) โดยทั่วไปลักซ์มิเตอร์จะมีหลักการทำงานคือ เครื่องจะประกอบด้วยตัวรับแสงซึ่งทำหน้าที่รับแสงจากภายนอกแล้วกระจายเข้าไปภายในเครื่องวัดแบบ Lambertian กล่าวคือ แสงที่กระจายออกไปในแนวตั้งฉากกับผิวของหัววัดจะมีค่าสูงสุด จากนั้นจะลดหลั่นกันตาม cosine ของมุมหักเห แสงที่กระจายเหล่านี้จะผ่านฟิวเตอร์ (filter) ที่กรองแสงแบบการตอบสนองของสายตามนุษย์ตามมาตรฐานของ CIE แสงที่ผ่านฟิวเตอร์แล้วจะมีอุปกรณ์รับสัญญาณซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นแบบ solid state sensor ซึ่งจะให้สัญญาณเป็นศักย์ไฟฟ้า เมื่อทำการสอบเทียบกับแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานก็จะสามารถแปลงให้เป็นค่าความเข้มแสงสว่างได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องลักซ์มิเตอร์ที่ผลิตโดยบริษัทเอคโค (EKO) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องลักซ์มิเตอร์ที่ผลิตโดยบริษัทเอกโก (EKO)

เนื่องจากการพัฒนาแบบจำลองจำเป็นต้องใช้ข้อมูลความเข้มแสงสว่างเพื่อสร้างแบบจำลองและเพื่อการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลอง ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการรวบรวมข้อมูลความเข้มแสงสว่างซึ่งทำการวัดด้วยเครื่องลักซ์มิเตอร์ ของบริษัท EKO รุ่น ML-02050 ที่สถานีวัด 15 แห่ง ของประเทศไทย โดยผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลความเข้มแสงสว่างจากสถานีวัด 4 แห่ง ซึ่งเป็นสถานีวัดที่ตั้งอยู่ในภูมิภาคหลักของประเทศไทยในช่วงปี ค.ศ. 2016 – 2018 สำหรับการสร้างแบบจำลอง หลังจากสร้างแบบจำลองแล้ว ผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลความเข้มแสงสว่างจาก 11 สถานีวัดซึ่งกระจายอยู่ตามภูมิภาคต่าง ๆ ของประเทศไทยในช่วงปี ค.ศ. 2016 - 2018 เช่นเดียวกันเพื่อทดสอบสมรรถนะของแบบจำลอง โดยรายละเอียดสถานีวัดสำหรับใช้สร้างแบบจำลองและทดสอบแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

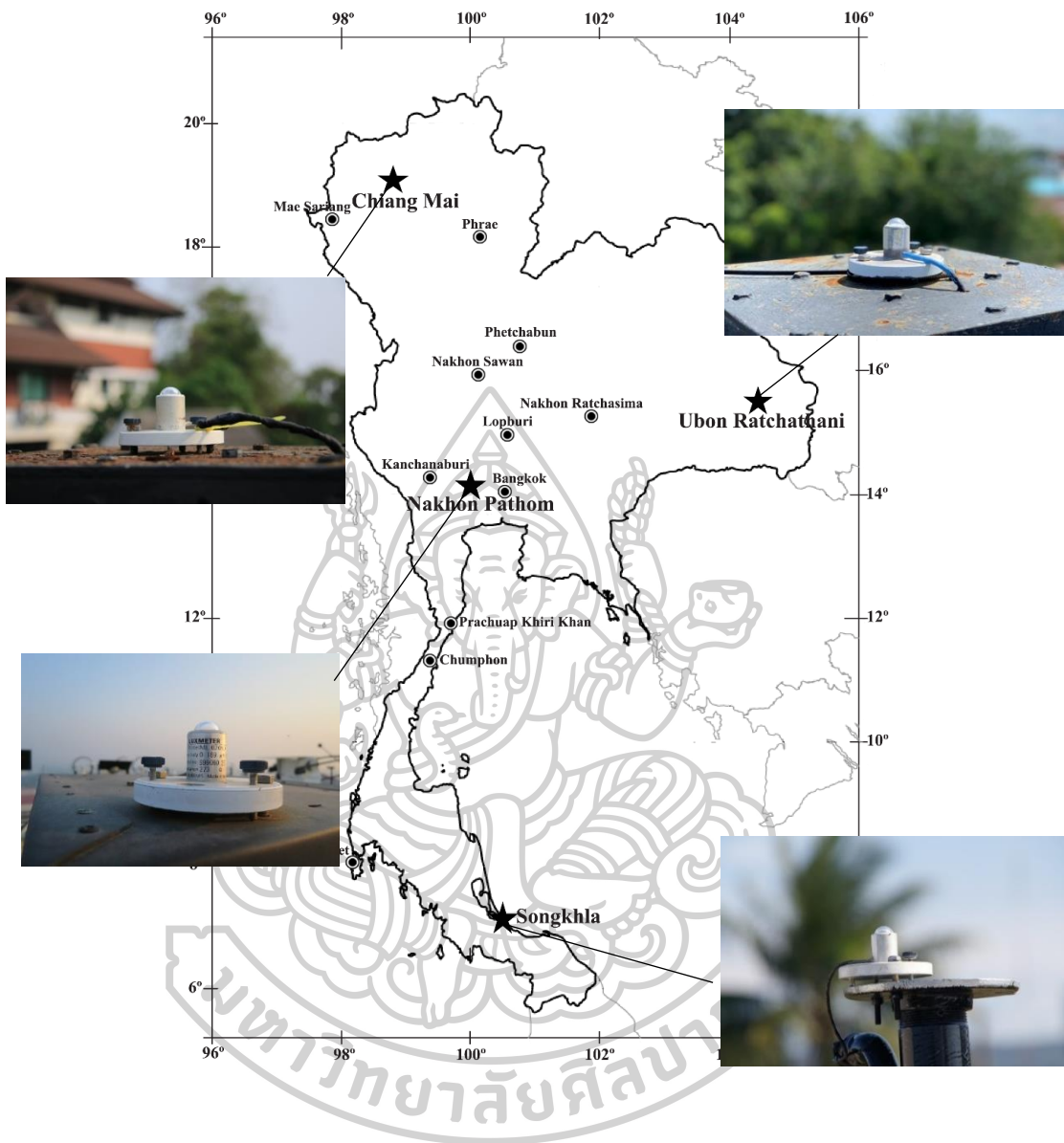
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดสถานีวัด 4 แห่ง สำหรับใช้สร้างแบบจำลอง

ลำดับ	สถานี	latitude (°N)	longitude (°E)
1	ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่	18.78	98.98
2	ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี	15.25	104.87
3	ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัด สงขลา	7.2	100.6
4	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม	13.82	100.04

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดสถานีวัด 11 แห่ง สำหรับใช้ทดสอบสมรรถนะของแบบจำลอง

ลำดับ	สถานี	latitude (°N)	longitude (°E)
1	กรุงเทพ (Bangkok)	13.75	100.5
2	เพชรบูรณ์ (Phetchabun)	16.82	101.25
3	แม่สะเรียง (Measariang)	18.17	97.93
4	แพร่ (Phrae)	18.06	100.06
5	กาญจนบุรี (Kanchanaburi)	14.02	99.53
6	ชุมพร (Chomporn)	10.4	99.18
7	ภูเก็ต (Phuket)	8.13	98.3
8	ประจวบคีรีขันธ์ (Prachuap Khiri Khan)	11.83	99.88
9	นครสวรรค์ (Nakhonsawan)	15.67	100.12
10	ลพบุรี (Lopburi)	15.27	101.19
11	นครราชสีมา (Nakhon Ratchasima)	8.57	99.94

ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดความเข้มแสงสว่างทั้ง 4 แห่ง สำหรับการสร้างแบบจำลอง แสดงด้วยสัญลักษณ์ (★) และแสดงภาพของเครื่องลักซ์มิเตอร์ (ผู้วิจัยจะกำหนดให้สถานีที่กล่าวมาทั้ง 4 แห่ง เป็นตัวแทนสถานีหลักของแต่ละภูมิภาค และจะเรียกแบบย่อของแต่ละสถานีว่า สถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีสงขลา และสถานีนครปฐม) ส่วนตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัด 11 แห่ง สำหรับทดสอบแบบจำลองแสดงด้วยสัญลักษณ์ (●) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดความเข้มแสงสว่างทั้ง 15 สถานี ของประเทศไทย โดยสัญลักษณ์ ★ แสดง 4 สถานีหลักที่จะนำข้อมูลมาสร้างแบบจำลอง ได้แก่ สถานีเชียงใหม่สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา พร้อมทั้งแสดงภาพของเครื่องลักซ์มิเตอร์ด้วยสัญลักษณ์ ● แสดงตำแหน่งของ 11 สถานีวัดที่จะนำมาทดสอบแบบจำลอง

ในการวัดความเข้มแสงสว่างจากแสงรวม เราจะติดตั้งเครื่องลักซ์มิเตอร์ไว้กลางแจ้งให้สามารถรับแสงจากทุกส่วนของท้องฟ้าและต่อสายสัญญาณเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล ซึ่งทำการวัดและบันทึกความเข้มแสงสว่างทุก ๆ 1 วินาที จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ยในช่วงเวลาที่ต้องการ เช่น 1 นาที 10 นาที หรือ 1 ชั่วโมง และมีช่องสำหรับใส่สายสัญญาณเพื่อเป็นตัวเชื่อมในการนำข้อมูลและบันทึกข้อมูล (cable and connector) ไปยังเครื่องบันทึกข้อมูล หรือ data logger รุ่น DX2000 บริษัท Yokokawa ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 data logger รุ่น DX2000 ผลิตโดยบริษัท Yokokawa

สัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำมาแปลงเป็นค่าความสว่างโดยการหารด้วยค่าสภาพตอบสนอง (responsivity) ของเครื่องวัด ซึ่งได้จากการสอบเทียบเครื่องวัดดังกล่าวกับเครื่องวัดมาตรฐานโดยเขียนได้ดังสมการ

$$E = \frac{V}{S} \quad (3.1)$$

- เมื่อ
- | | | |
|---|-----|---|
| E | คือ | ความเข้มแสงสว่าง [lux] |
| V | คือ | ค่าสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องลักซ์มิเตอร์ [V] |
| S | คือ | sensitivity จากเครื่องลักซ์มิเตอร์ [V/lux] |

เนื่องจากเครื่องวัดความเข้มแสงสว่างต้องติดตั้งเพื่อทำการวัดอย่างต่อเนื่องอยู่กลางแจ้ง เป็นระยะเวลานาน ประสิทธิภาพในการวัดอาจเสื่อมสภาพลง หรือค่า sensitivity ของเครื่องวัดจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอายุการใช้งาน ดังนั้นจึงต้องทำการสอบเทียบอย่างสม่ำเสมออย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง

ในกระบวนการสอบเทียบเครื่องลักซ์มิเตอร์ ผู้วิจัยจะนำเครื่องลักซ์มิเตอร์มาตรฐานที่ทำการสอบเทียบแล้ว มาใช้สอบเทียบเครื่องลักซ์มิเตอร์ที่ติดตั้งอยู่ตามสถานีวัดต่าง ๆ โดยนำเครื่องลักซ์มิเตอร์มาตรฐานมาติดตั้งคู่กับเครื่องลักซ์มิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ โดยฐานของลักซ์มิเตอร์ทั้งสองตัว จะต้องอยู่ระดับเดียวกันและต้องสอบเทียบในวันที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 จากนั้นทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความเข้มแสงสว่างที่วัดได้จากเครื่องลักซ์มิเตอร์มาตรฐาน [lux] และค่าสัญญาณศักย์ไฟฟ้าจากเครื่องลักซ์มิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ [volt, V] โดยความชัน (slope) ของกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าว คือ ค่า sensitivity ค่าใหม่ของเครื่องลักซ์มิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ และสามารถคำนวณได้ดังสมการ

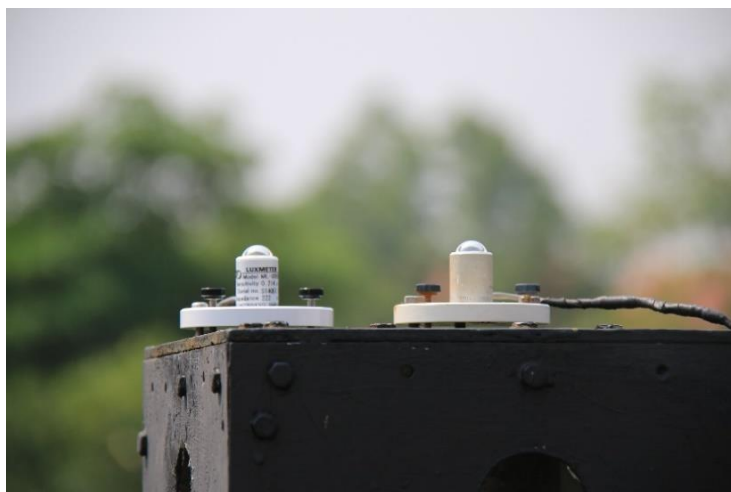
$$S = \frac{V}{E} \quad (3.2)$$

เมื่อ	S	คือ	ค่าการตอบสนองของเครื่องลักซ์มิเตอร์ [V/lux]
	V	คือ	ค่าสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องลักซ์มิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ [V]
	E	คือ	ค่าปริมาณความเข้มแสงสว่างที่ได้จากเครื่องลักซ์มิเตอร์มาตรฐาน [lux]



รูปที่ 3.4 การสอบเทียบเครื่องลักซ์มิเตอร์ของสถานีสงขลา

ผู้วิจัยได้ทำการสอบเทียบเครื่องลักซ์มิเตอร์ที่ติดตั้ง ณ สถานีวัดต่าง ๆ ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.5 – 3.8 สำหรับการสอบเทียบของสถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 การสอบเทียบเครื่องลักซ์มิเตอร์ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 3.6 การสอบเทียบเครื่องลักซ์มิเตอร์ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี



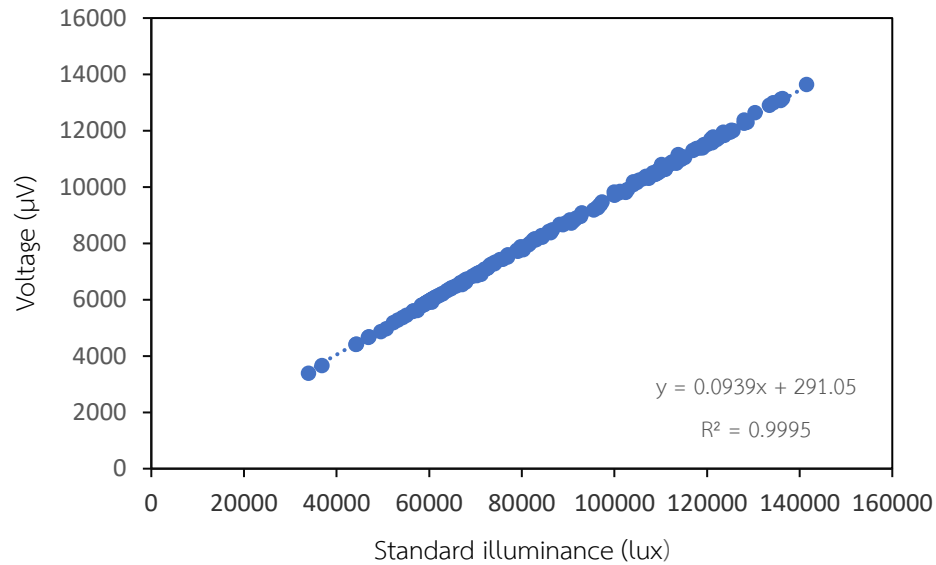
รูปที่ 3.7 การสอบเทียบเครื่องลักซ์มิเตอร์ที่มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม



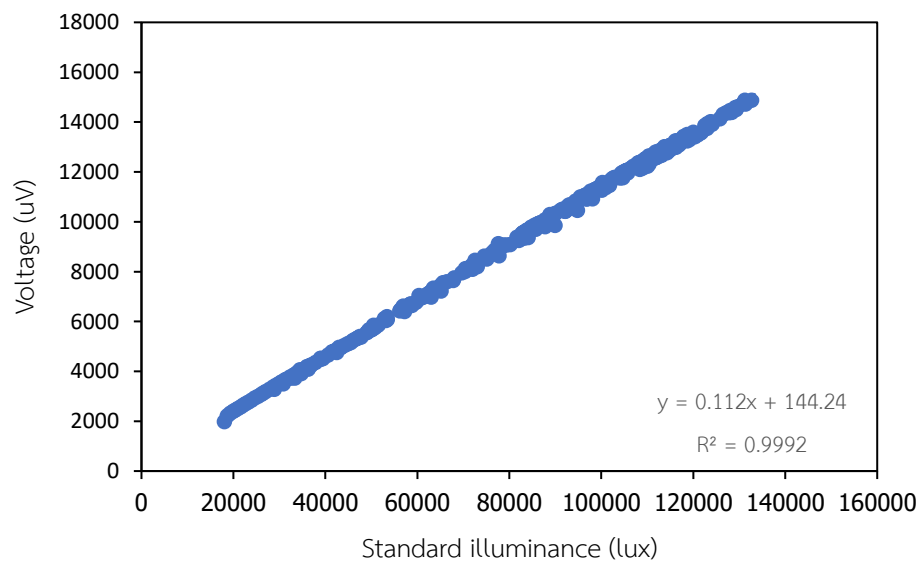
รูปที่ 3.8 การสอบเทียบเครื่องลักซ์มิเตอร์ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา

ตัวอย่างกราฟระหว่างสัญญาณศักย์ไฟฟ้าจากเครื่องลักซ์มิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบกับความเข้มแสงสว่างจากเครื่องลักซ์มิเตอร์มาตรฐานของสถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา แสดงดังรูปที่ 3.9 - 3.12 ตามลำดับ โดยความชันของกราฟเป็นค่าการตอบสนองของเครื่องลักซ์มิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบที่ได้จากกระบวนการสอบเทียบนี้ สำหรับกรณี

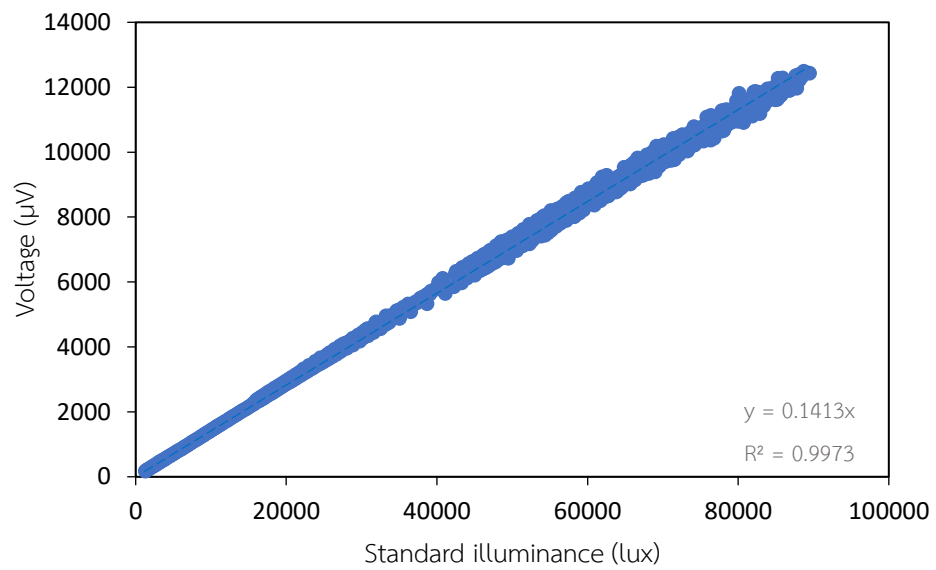
เครื่องลักซ์มิเตอร์สถานีวัด 11 แห่ง ได้รับการสอบเทียบเมื่อ ค.ศ. 2018 โดยใช้กระบวนการคล้ายกับ การสอบเทียบลักซ์มิเตอร์สถานีหลัก 4 แห่ง



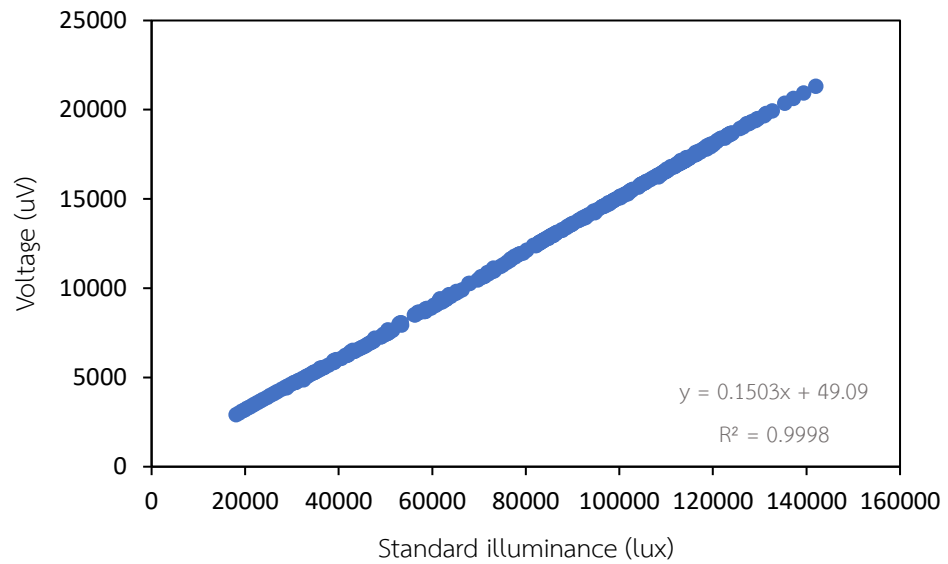
รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าความเข้มแสงสว่าง ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ (สอบเทียบเมื่อวันที่ 23 กรกฎาคม 2019)



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าความเข้มแสงสว่าง ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาค ตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี (สอบเทียบเมื่อวันที่ 6 กุมภาพันธ์ 2019)



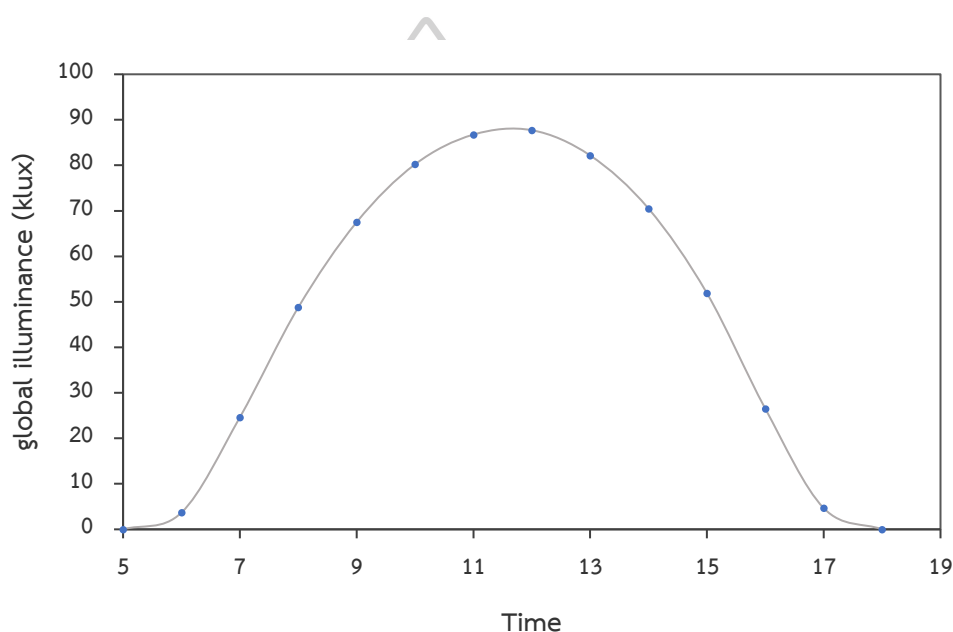
รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าความเข้มแสงสว่าง ที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม (สอบเทียบเมื่อวันที่ 9 - 11 มกราคม 2019)



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าความเข้มแสงสว่าง ที่ศูนย์อู่ตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่ง ตะวันออก จังหวัดสงขลา (สอบเทียบเมื่อวันที่ 18 มกราคม 2019)

3.1.2 การควบคุมคุณภาพข้อมูล

ข้อมูลความเข้มแสงสว่างที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ถึงแม้จะมีการสอบเทียบอย่างต่อเนื่อง แต่ข้อมูลที่จะนำมาใช้อาจมีความคลาดเคลื่อนจากสาเหตุอื่น ๆ เช่น สายสัญญาณอาจเกิดการชำรุด เครื่องบันทึกข้อมูลชำรุด การแปลงข้อมูลผิด หรือห้วงเกิดการชำรุด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพข้อมูลก่อนนำมาใช้งาน ในการตรวจสอบผู้วิจัยทำการตรวจสอบเบื้องต้นด้วยสายตา โดยในแต่ละช่วงจะเลือกดูข้อมูลในวันที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ ลักษณะการแปรค่าความเข้มแสงสว่างจะต้องมีลักษณะดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างกราฟบันทึกข้อมูลความเข้มแสงสว่างในวันที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ ซึ่งทำการวัดที่สถานีนครปฐม ของวันที่ 31 ตุลาคม 2018

ดังนั้นข้อมูลที่จะนำมาใช้จะต้องผ่านการควบคุมคุณภาพข้อมูล (Data quality control) เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่ถูกต้องและครบถ้วน โดยผู้วิจัยได้ทำการควบคุมคุณภาพข้อมูลมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) ข้อมูลความเข้มแสงสว่างที่ผู้วิจัยเลือกใช้เป็นข้อมูลรายวันเฉลี่ยต่อเดือน โดยจะใช้ข้อมูลที่มีมุมเงยของดวงอาทิตย์มากกว่า 5 องศาขึ้นไปเพื่อลดค่า error เนื่องจาก Cosine response ของหัววัด ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ข้อมูลในช่วงเวลาตั้งแต่ 8.30 – 16.30 น.

2) เปรียบเทียบข้อมูลระหว่างค่าความเข้มแสงสว่างที่วัดได้บนภาคพื้นดิน (E_g) กับข้อมูลความเข้มแสงสว่างนอกบรรยากาศโลก (E_{0h}) โดยปกติรังสีอาทิตย์ที่ผ่านเข้ามายังบรรยากาศโลกจะ

ถูกกระเจิงและลดทอนจากองค์ประกอบของบรรยากาศ ทำให้มีค่าน้อยกว่าความสว่างจากแสงอาทิตย์นอกระบบบรรยากาศโลก

3) ตรวจสอบค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนทั้ง 4 สถานี ในปีที่ถูกวิจัยนำมาสร้างแบบจำลองและทดสอบสมรรถนะแบบจำลอง (ปี ค.ศ. 2016 - 2018) ว่าแต่ละปีมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันหรือแตกต่างกัน

สำหรับข้อมูลรังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ผ่านกระบวนการควบคุมคุณภาพแล้วของสถานีวัด 4 แห่ง ที่จะนำมาสร้างแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 3.3 – 3.6 และสำหรับข้อมูลจากสถานีวัดอีก 11 แห่ง ที่จะนำมาทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองก็ต้องทำการควบคุมคุณภาพข้อมูลเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลความเข้มแสงสว่างรายวันเฉลี่ยต่อเดือนในหน่วย klux ของสถานีเชียงใหม่

Year	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2016	40.62	40.46	42.69	43.54	47.97	43.34	37.49	34.34	34.57	39.17	38.77	34.91
2017	38.34	44.14	46.55	45.54	44.48	36.29	36.07	35.86	37.26	34.73	34.23	38.75
2018	50.17	50.74	45.54	44.77	48.68	40.39	34.71	31.59	37.92	39.89	37.07	33.52

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลความเข้มแสงสว่างเฉลี่ยต่อเดือนในหน่วย klux ของสถานีอุบลราชธานี

Year	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2016	38.34	48.09	46.81	48.15	48.23	50.53	48.37	44.62	39.95	40.76	44.23	41.57
2017	42.37	43.29	41.74	49.48	44.88	45.80	42.92	46.33	40.37	40.42	42.52	40.79
2018	41.31	41.52	41.16	47.42	51.08	46.21	41.64	42.49	41.40	45.05	47.50	43.09

ตารางที่ 3.5 ข้อมูลความเข้มแสงสว่างรายวันเฉลี่ยต่อเดือนในหน่วย klux ของสถานีนครปฐม

Year	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2016	41.25	43.73	46.89	53.92	51.25	46.88	44.70	42.82	40.80	39.43	34.51	34.98
2017	39.33	45.68	49.38	48.07	48.59	46.78	39.62	41.97	42.64	35.22	31.01	33.11
2018	34.97	42.81	43.67	49.11	49.33	43.72	40.65	39.92	39.67	35.36	35.93	32.07

ตารางที่ 3.6 แสดงข้อมูลความเข้มแสงสว่างรายวันเฉลี่ยต่อเดือนในหน่วย klux ของสถานีสงขลา

Year	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2016	45.57	48.69	56.75	56.08	44.77	42.09	45.82	47.42	47.43	41.94	38.75	36.80
2017	39.62	51.24	52.63	52.66	43.65	42.26	44.14	44.46	19.32	42.43	36.27	33.63
2018	40.44	49.96	54.54	53.53	49.32	42.38	43.19	43.13	18.67	44.37	38.78	36.83

3.1.3 ดัชนีเมฆ (cloud index, n) จากภาพถ่ายดาวเทียม Himawari

เมฆ (Clouds) คือ กลุ่มของละอองน้ำขนาดเล็กซึ่งเกิดจากการควบแน่นของหยดน้ำในอากาศ แต่เมฆชั้นสูงซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งจะเป็นกลุ่มของผลึกน้ำแข็งขนาดเล็ก โดยทั่วไปอนุภาคภายในเมฆมีขนาดอยู่ระหว่าง $10 \mu\text{m} - 100 \mu\text{m}$ ปกติน้ำบริสุทธิ์และไอน้ำโปร่งแสงจนไม่สามารถมองเห็นได้ แต่หยดน้ำและผลึกน้ำแข็งมีพื้นผิวซึ่งเมื่อรวมกันเป็นกลุ่มจะสังเกตเห็นเป็นก้อนเมฆ รังสีอาทิตย์ที่ผ่านเข้ามายังชั้นบรรยากาศจะถูกกระเจิง โดยเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้าออกสู่นอกบรรยากาศโลก รังสีส่วนที่เหลือจะผ่านเข้ามายังชั้นบรรยากาศและถูกกระเจิงในช่วงความยาวคลื่นแสงสว่างที่ตามองเห็น ซึ่งสะท้อนแสงทำให้เราสามารถมองเห็นเป็นก้อนสีขาว และในบางครั้งมุมตกกระทบของแสงและเงาจากเมฆชั้นบนหรือเมฆที่อยู่ข้างเคียง รวมทั้งความหนาแน่นของหยดน้ำในก้อนเมฆก็อาจทำให้มองเห็นเมฆเป็นสีเทา (LESA, 2012)

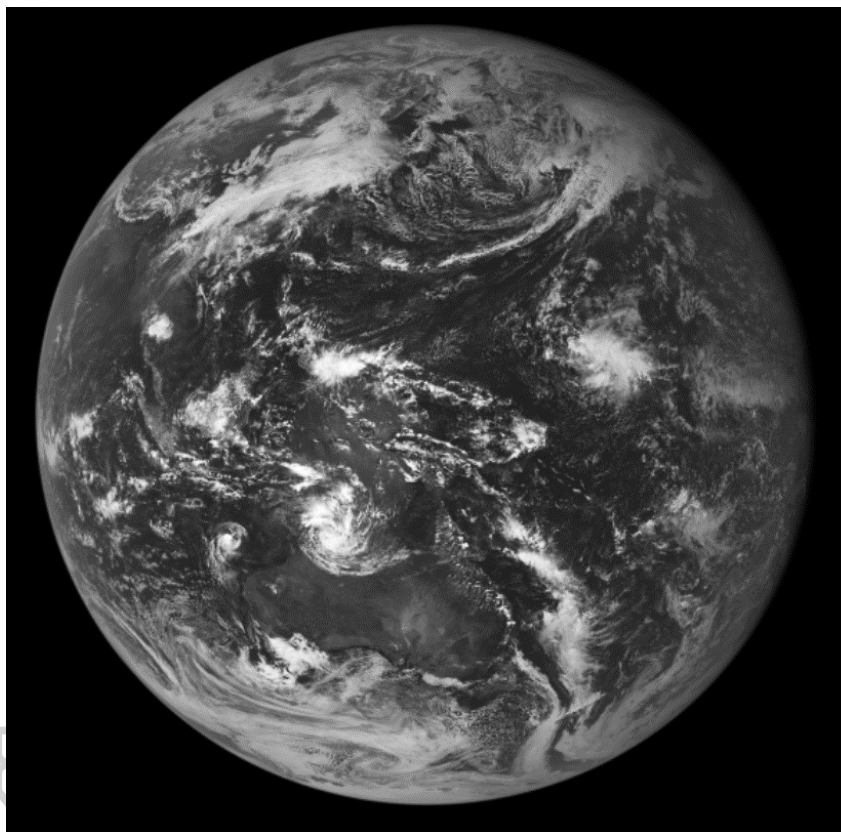
เนื่องจากปริมาณเมฆเป็นตัวแปรที่สำคัญซึ่งส่งผลต่อปริมาณแสงสว่างธรรมชาติ โดยทั่วไปการวัดปริมาณเมฆตามสถานีอุตุนิยมวิทยาทั่วไปจะตรวจวัดด้วยสายตา ซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะหาดัชนีเมฆเพื่อเป็นตัวบ่งบอกปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้าในตำแหน่งสถานีวัดทั้ง 15 แห่ง โดยใช้ข้อมูลช่องแสงสว่าง (visible channel) ของดาวเทียม Himawari-8 ซึ่งเป็นดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาแบบอยู่กับที่เมื่อเทียบกับตำแหน่งบนโลก (geostationary satellite) ดาวเทียมดังกล่าวอยู่เหนือเส้นศูนย์สูตรประมาณ 36,000 กิโลเมตร ที่ลองจิจูด 140°E ดาวเทียมนี้มีช่องรับสัญญาณในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ 16 ช่องสัญญาณ โดยรายละเอียดช่องสัญญาณทั้ง 16 ช่อง ของดาวเทียม Himawari-8 แสดงดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 รายละเอียดช่องรับสัญญาณ 16 ช่อง ของดาวเทียม Himawari-8 เทียบกับช่องสัญญาณ
ของดาวเทียม MTSAT-1R/2 (JMA, 2013)

Wave length [μm]	Himawari-8			MTSAT-1R/2	
	Band number	Spatial resolution at SSP [km]	Central wave length [μm]	Channel name	Spatial resolution at SSP [km]
			AHI-8 (Himawari-8)		
0.47	1	1	0.47063	-	-
0.51	2	1	0.51000	-	-
0.64	3	0.5	0.63914	VIS	1
0.86	4	1	0.85670	-	-
1.6	5	2	1.6101	-	-
2.3	6	2	2.2568	-	-
3.9	7	2	3.8853	IR4	4
6.2	8	2	6.2429	IR3	5
6.9	9	2	6.9410	-	-
7.3	10	2	7.3467	-	-
8.6	11	2	8.5926	-	-
9.6	12	2	9.6372	-	-
10.4	13	2	10.4073	IR1	4
11.2	14	2	11.2395	IR2	4
12.4	15	2	12.3806	-	-
13.3	16	2	13.2807	-	-

SSP: sub satellite point

ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นข้อมูลในช่องแสงสว่างของดาวเทียม Himawari-8 ซึ่งทำการบันทึกภาพของโลกทุก ๆ 10 นาที ครอบคลุมพื้นที่ซีกหนึ่งของโลกและสามารถสังเกตเห็นกลุ่มก้อนของเมฆบนท้องฟ้าได้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.14

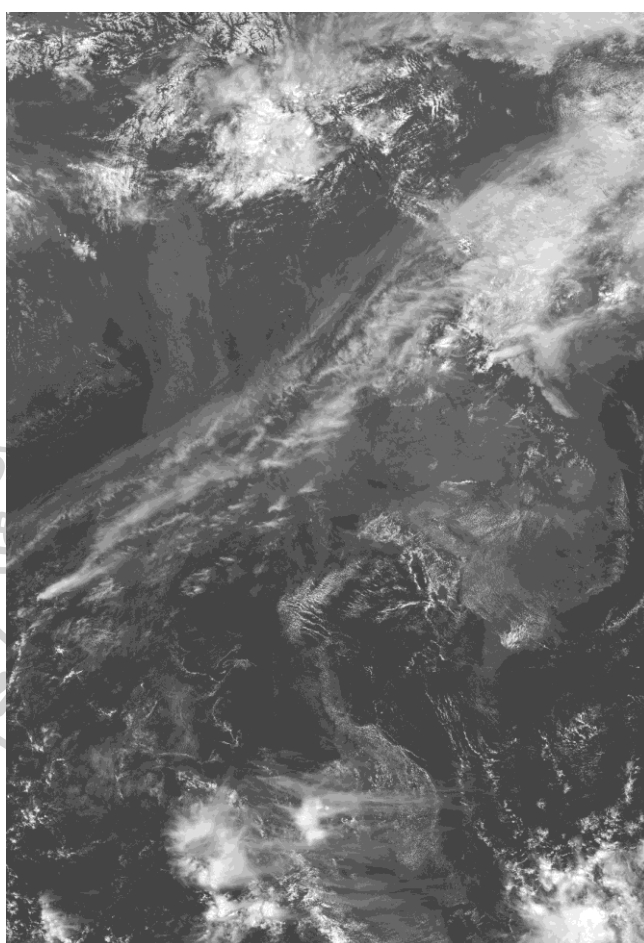


รูปที่ 3.14 ตัวอย่างของภาพถ่ายที่ได้จากดาวเทียม Himawari-8

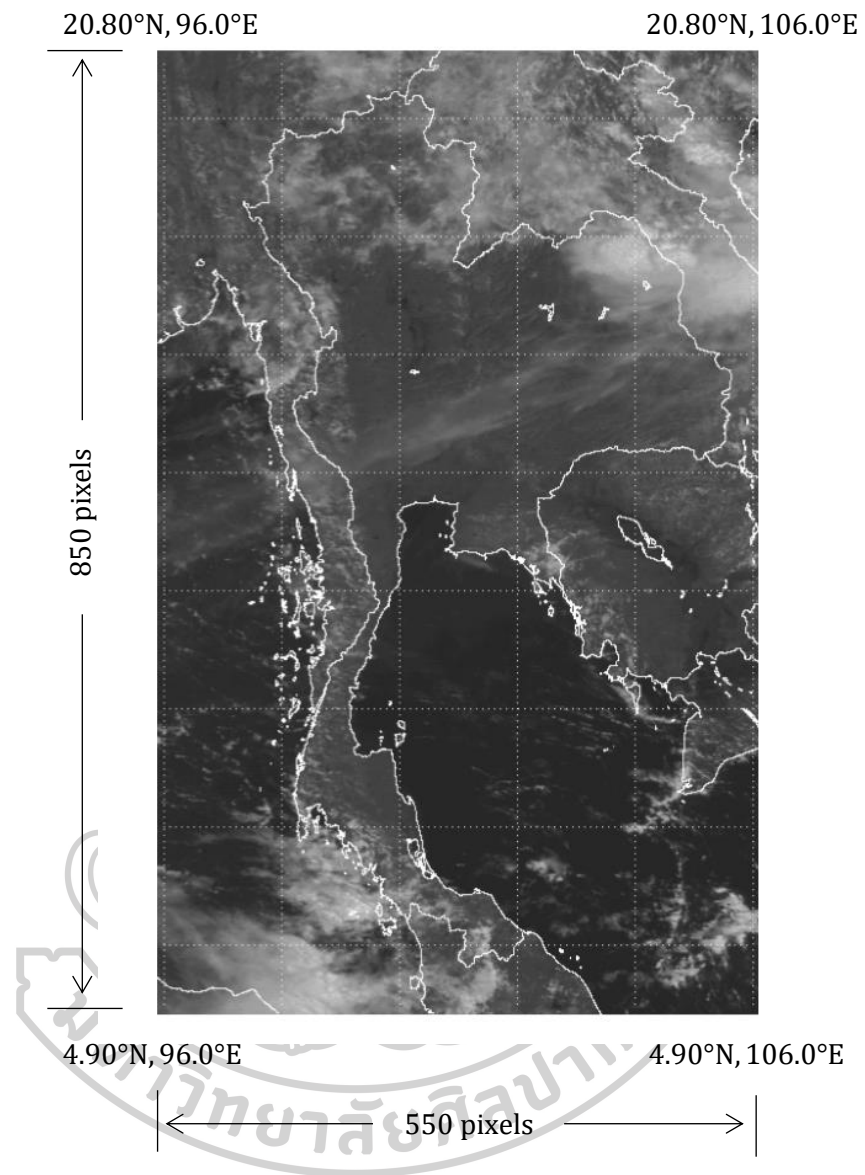
โดยผู้วิจัยจะนำภาพที่เวลา 8:30, 9:30, 10:30, 11:30, 12:30, 13:30, 14:30, 15:30 และ 16:30 น. ตามเวลาท้องถิ่น จากช่องสัญญาณช่องที่ 2 ซึ่งเป็นช่องสัญญาณแสงสว่าง (ความยาวคลื่น $0.51 \mu\text{m}$) ของดาวเทียมมาใช้ในการคำนวณ ข้อมูลที่ได้จากดาวเทียมเป็นข้อมูลดิจิทัล 10 บิต สัญญาณจากภาพที่ได้จะประกอบด้วยหน่วยย่อยที่สุดที่เรียกว่าพิกเซล (pixel) ซึ่งมีความละเอียดเชิงพื้นที่ (spatial resolution) ณ ตำแหน่งประเทศไทยขนาด 3×3 ตารางกิโลเมตร

ในการใช้งานข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Himawari-8 ผู้วิจัยจะใช้ส่วนของภาพถ่ายดาวเทียมที่ครอบคลุมพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทย เนื่องจากภาพที่ได้จากดาวเทียมจะอยู่ในรูปของ satellite projection ซึ่งจะเห็นเป็นส่วนโค้งของโลกและระยะของภาพ

ไม่ได้แปรตามกับระยะบนพื้นดินดังตัวอย่างในรูปที่ 3.15 ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการตัดให้เหลือเฉพาะประเทศไทยและบางส่วนของประเทศข้างเคียง แล้วทำการแปลงให้อยู่ใน cylindrical projection เพื่อให้ได้ระยะบนภาพที่แปรโดยตรงกับระยะบนพื้นผิวโลก จากนั้นนำพิกัดของประเทศไทยมาซ้อนทับบนภาพโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำการปรับแผนที่ให้ตรงกับภาพถ่ายดาวเทียมโดยใช้แนวชายฝั่งและเกาะต่าง ๆ เป็นจุดอ้างอิง ซึ่งภาพที่ทำการ process แล้วดังแสดงในรูปที่ 3.16 จะมีขนาด 550 x 850 พิกเซล โดยมีขอบภาพอยู่ที่ละติจูด $4.90^{\circ}\text{N} - 20.80^{\circ}\text{N}$ และลองจิจูด $96.0^{\circ}\text{E} - 106.0^{\circ}\text{E}$



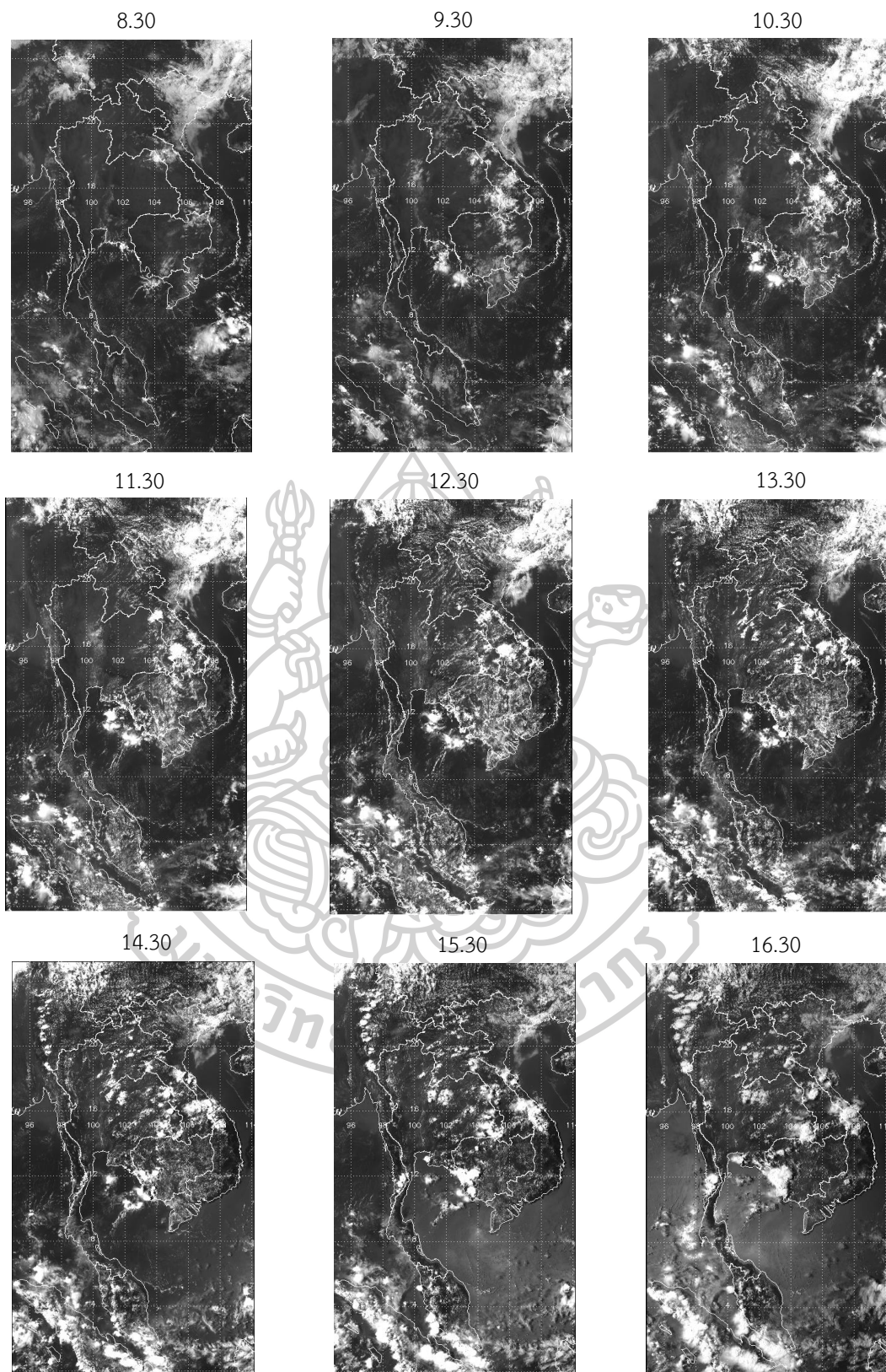
รูปที่ 3.15 ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่ครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทยในรูปของ satellite projection



รูปที่ 3.16 ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมใน ใน cylindrical projection ที่ทำการหาพิกัดแล้ว

ภาพถ่ายดาวเทียมแต่ละภาพจะประกอบด้วยหน่วยเล็ก ๆ ที่เรียกว่า พิกเซล ข้อมูลที่อยู่ในแต่ละพิกเซลของภาพถ่ายดาวเทียมที่หาพิกัดแล้วจะเป็นค่าระดับความเทา (grey level) หรือ ตัวเลขดิจิทัล (digital count) โดยดาวเทียม Himawari-8 ให้ข้อมูลเป็นสัญญาณดิจิทัล 10 บิต จึงมีจำนวน 1024 ระดับ (สีดำไปจนถึงสีขาว) ตั้งแต่ 0 ถึง 1023 และเครื่องรับสัญญาณของสถานีวัดจะทำการแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล 8 บิต ซึ่งแทน grey level 0-255 ในช่องแสงสว่าง โดยค่าระดับความเทา 0 หรือพิกเซลสีดำ จะแสดงให้เห็นว่าพิกเซลนั้นไม่มีเมฆปกคลุมซึ่งรังสีอาทิตย์สามารถส่งผ่านมายังพื้นดินได้ ส่วนพิกเซลสีขาวแสดงว่าพิกเซลนั้นถูกปกคลุมไปด้วยเมฆซึ่งจะสะท้อนรังสีอาทิตย์บางส่วนออกสู่อวกาศภายนอก ซึ่งจากภาพถ่ายดาวเทียมสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้าในรอบวัน ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3.17

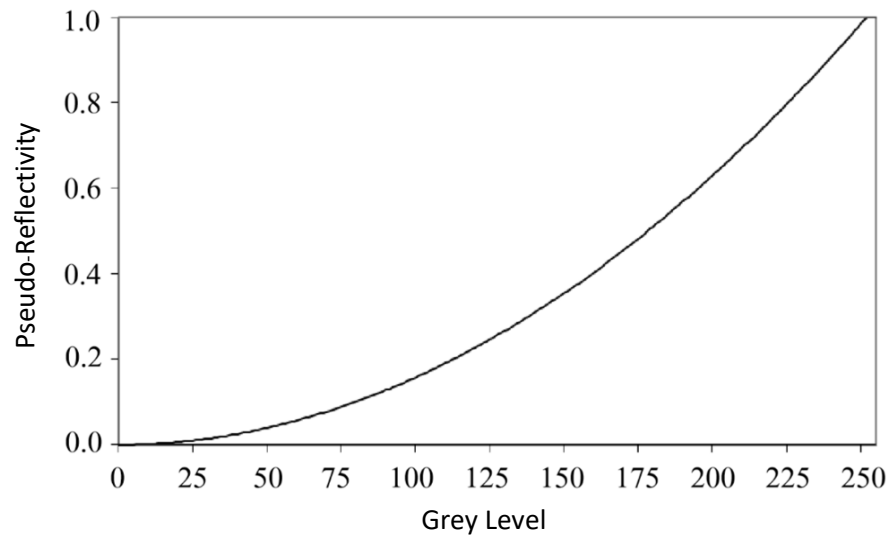




รูปที่ 3.17 ภาพถ่ายดาวเทียมในรอบวันที่แสดงพิกเซลที่มีเมฆปกคลุมและไม่มีเมฆปกคลุมของวันที่

21 เมษายน 2018

ผู้วิจัยทำการแปลงค่า grey level ให้เป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีอาทิตย์กรณีที่รังสีอาทิตย์ตกกระทบตั้งฉากกับหัววัด (Pseudo-reflectivity, ρ_{pseu}) โดยอาศัยตารางสอบเทียบจากผู้ผลิตดาวเทียม (Marshall, 1993) โดยตารางสอบเทียบดังกล่าวจะสามารถเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า grey level กับ Pseudo-reflectivity ของข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม (JMA, 2012)

เนื่องจากรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบแต่ละพิกเซลมิได้ทำมุมตั้งฉากกับพิกเซลนั้นๆ ดังนั้น เราต้องทำการแก้ไขผลของมุมตกกระทบโดยการหารค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงที่ได้จากการ สอบเทียบ ด้วยโคไซน์ของมุมตกกระทบและจะเรียกว่าสัมประสิทธิ์ที่แก้ไขแล้วนี้ว่า สัมประสิทธิ์การสะท้อนของบรรยากาศและพื้นผิวโลก (Earth – atmospheric reflectivity , ρ_{EA}) ดังสมการ

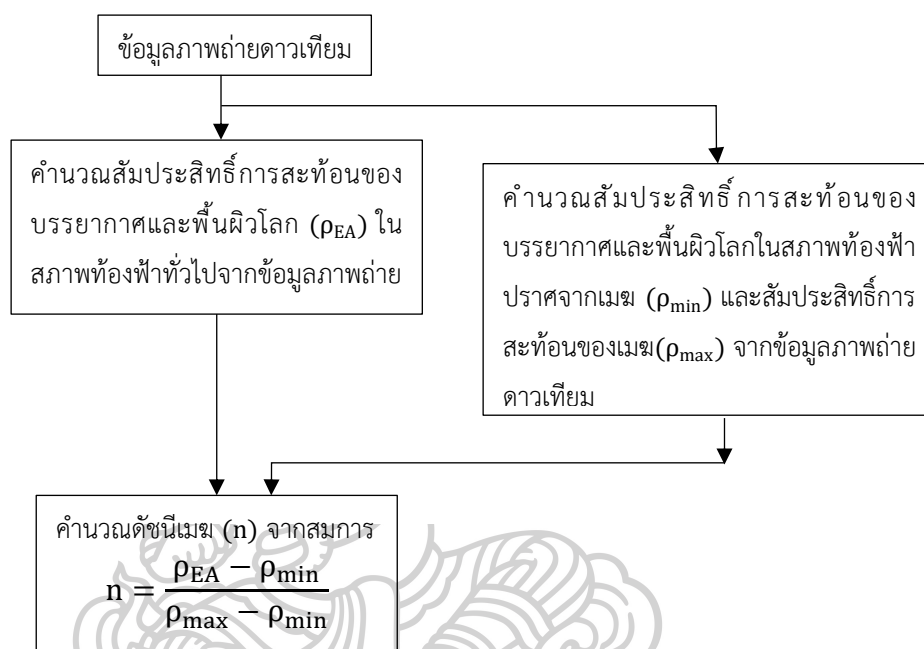
$$\rho_{EA} = \frac{\rho_{pseu}}{\cos Z_s} \quad (3.3)$$

เมื่อ ρ_{EA} คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของบรรยากาศและพื้นผิวโลก [-]

ρ_{pseu} คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากตารางสอบเทียบ [-]

Z_s คือ มุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ ณ ตำแหน่งของพิกเซลที่พิจารณา [degree]

สัมประสิทธิ์การกระเจิงรังสีอาทิตย์ของบรรยากาศและพื้นผิวโลกที่ได้นี้จะมีค่าอยู่ ระหว่าง 0 ถึง 1 และจะนำไปใช้ในแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก โดยจะ นำสัมประสิทธิ์การกระเจิงนี้ไปใช้คำนวณหาดัชนีเมฆ (cloud index, n) ขั้นตอนการคำนวณตาม แผนภูมิดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แผนภูมิการคำนวณดัชนีเมฆ ดัดแปลงจาก (Hammer, 2003)

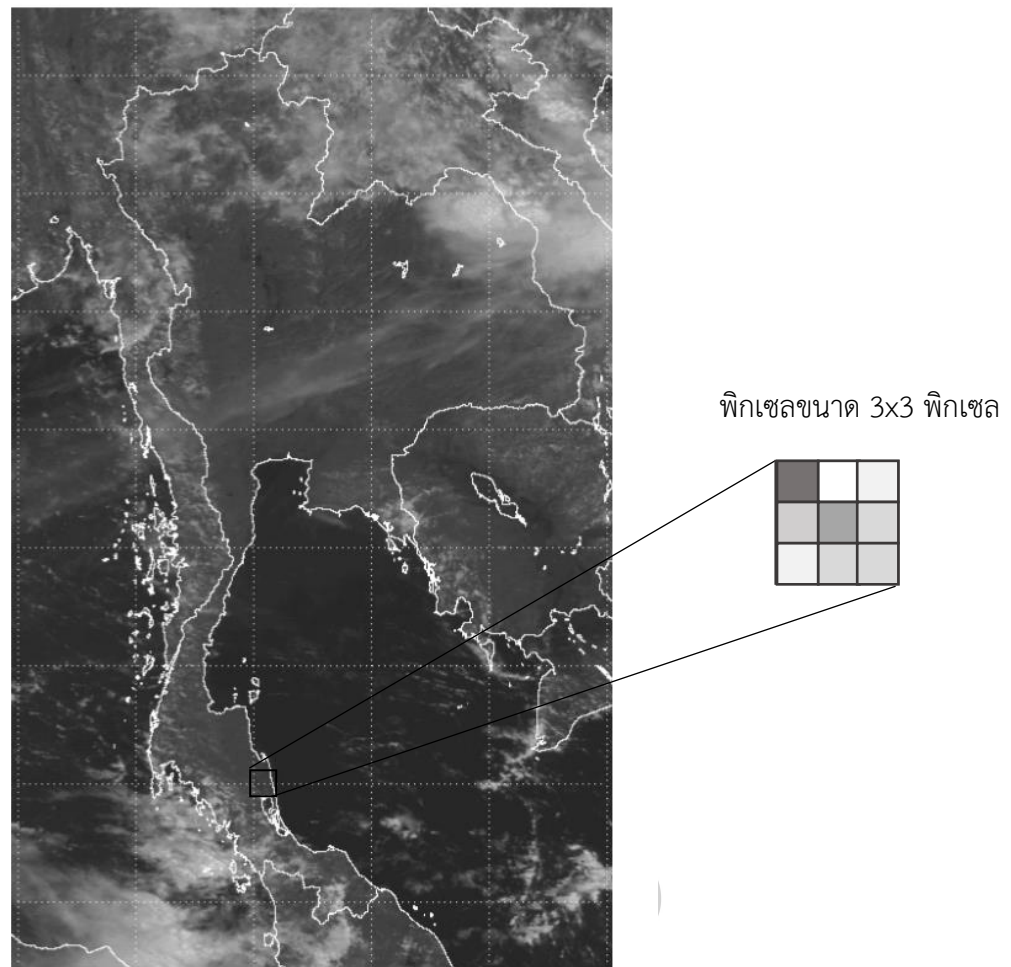
ในงานวิจัยนี้ ทำการนำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมมาใช้สำหรับคำนวณค่าดัชนี โดยขั้นตอนแรก ทำการเตรียมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมในช่วงเวลาเดียวกันกับข้อมูลจากสถานีวัดภาคพื้น ค่าระดับ ความเทาของแต่ละพิกเซลจะถูกนำมาแปลงเป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนของบรรยากาศและพื้นผิวโลก , ρ_{EA} จากนั้นนำข้อมูล ρ_{EA} ของทุกภาพมาหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวโลก (ρ_{min}) และสัมประสิทธิ์การสะท้อนของเมฆ (ρ_{max}) โดยเป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุด ตามลำดับในแต่ละเดือน และขั้นตอนสุดท้ายทำการคำนวณดัชนีเมฆของทุกชั่วโมงโดยใช้สมการ (Cano et al., 1986)

$$n = \frac{\rho_{EA} - \rho_{\min}}{\rho_{\max} - \rho_{\min}} \quad (3.4)$$

โดยที่	n	คือ	ดัชนีเมฆ [-]
	ρ_{EA}	คือ	สัมประสิทธิ์การกระเจิงรังสีอาทิตย์ของบรรยากาศและพื้นผิวโลก [-]
	ρ_{\min}	คือ	สัมประสิทธิ์การกระเจิงรังสีอาทิตย์ของพื้นผิวโลก [-]
	ρ_{\max}	คือ	สัมประสิทธิ์การกระเจิงรังสีอาทิตย์ของเมฆ [-]

เมื่อได้ cloud index ของพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทย แล้ว การนำ cloud index ไปใช้งาน ผู้วิจัยจะเลือกใช้ที่ตำแหน่งสถานีวัดนั้น ๆ โดยจะทำการตัด พิกเซลที่คลุมสถานีวัดขนาด 3×3 พิกเซล แล้วทำการเฉลี่ยเพื่อให้ได้ cloud index ณ ตำแหน่ง สถานีวัดสำหรับนำไปคำนวณความเข้มแสงสว่าง รูปที่ 3.20 แสดงตำแหน่งตัวอย่างของพิกเซลที่ทำการตัดขนาด 3×3 ตารางกิโลเมตร ณ ตำแหน่งสถานีสงขลา ขั้นตอนการแปลงทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นทำได้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษา IDL (Interactive Data Language) ที่พัฒนาโดยห้องปฏิบัติการวิจัยรังสีอาทิตย์ (SOLAR LAB) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร





รูปที่ 3.20 ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณที่ปกคลุมสถานีวัดที่พิจารณา โดยทำการตัดพิกเซลที่คลุมสถานีวัดขนาด 3 x 3 พิกเซล ณ ตำแหน่งสถานีสงขลา

3.2 การสร้างแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มแสงสว่าง

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นแบบจำลองกึ่งเอมไพริคัลซึ่งจะใช้ข้อมูลจากสถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลาในช่วงปี ค.ศ 2016 – 2018 มาทำการสร้างแบบจำลอง โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงสว่าง ซึ่งอยู่ในรูปของค่าดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ (clearness index, k_{vc}) ในช่วงความยาวคลื่นแสงสว่าง ที่ขึ้นอยู่กับค่าดัชนีเมฆ (cloud index, n) และมุมอัสติจูดของดวงอาทิตย์ (solar altitude, γ_s) ด้วย

ในการสร้างแบบจำลองจะเริ่มจากการคำนวณดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ, k_{vc} ซึ่งเขียนได้ดังสมการ (Hammer et al., 2003)

$$k_{vc} = \frac{E_g}{E_{oh}} \quad (3.5)$$

เมื่อ E_g คือ ความเข้มแสงสว่างรายชั่วโมงที่ได้จากการวัด [klux]
 E_{oh} คือ ความเข้มสว่างนอกบรรยากาศโลกบนระนาบในแนวระดับที่ขนานกับพื้นผิวโลก ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$E_{oh} = E_{sc} E_0 \cos \theta_z \quad (3.6)$$

เมื่อ E_{sc} คือ ค่าคงตัวแสงสว่างธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ 128 klux
 E_0 คือ แฟคเตอร์สำหรับแก้ผลการแปรค่าของระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ [-]
 θ_z คือ มุมเซนธิซของดวงอาทิตย์ [degree]

จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการจัดเตรียมข้อมูลและทำการสร้างหาความสัมพันธ์ระหว่าง k_{vc} , n และ γ_s ซึ่งอยู่ในรูปสมการเอมไพริคัล ดังนี้

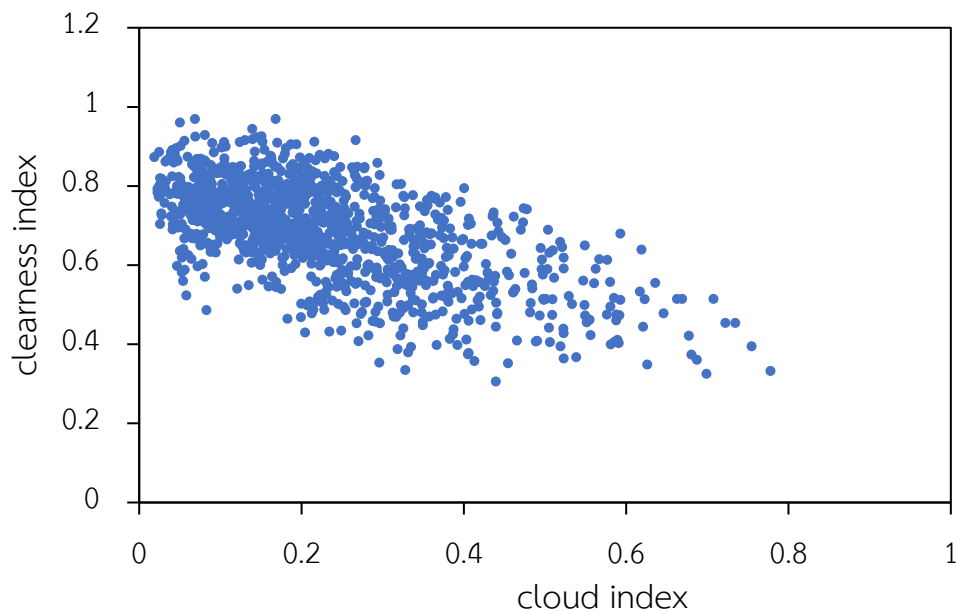
$$k_{vc} = a_0 + a_1 n + a_2 \sin \gamma_s + a_3 n \cdot \sin \gamma_s + a_4 \sin^2 \gamma_s + a_5 n^3 + a_6 n^2 \cdot \sin \gamma_s + a_7 n \cdot \sin^2 \gamma_s + a_8 \sin^3 \gamma_s \quad (3.7)$$

เมื่อ $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots$ คือ สัมประสิทธิ์ของสมการ [-]
 γ_s คือ มุมอัสติจูดของดวงอาทิตย์ [degree]

โดยเมื่อผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นของสมการ (3.7) ด้วยข้อมูลความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดของสถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา ทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง k_{vc} , n และ γ_s พร้อมทั้งสัมประสิทธิ์ของสมการที่ (3.7) ได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} k_{vc} = & 1.225 - 0.507n - 2.119 \sin \gamma_s + 0.2008n \cdot \sin \gamma_s \\ & + 3.3426 \sin^2 \gamma_s - 0.202n^3 + 0.274n^2 \cdot \sin \gamma_s \\ & - 0.384n \cdot \sin^2 \gamma_s - 1.651 \sin^3 \gamma_s \end{aligned} \quad (3.8)$$

และเขียนกราฟการกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความแจ่มใสของท้องฟ้ากับดัชนีของเมฆจากข้อมูลที่ได้จากการวัดของทั้ง 4 สถานี ได้ดังรูปที่ 3.21



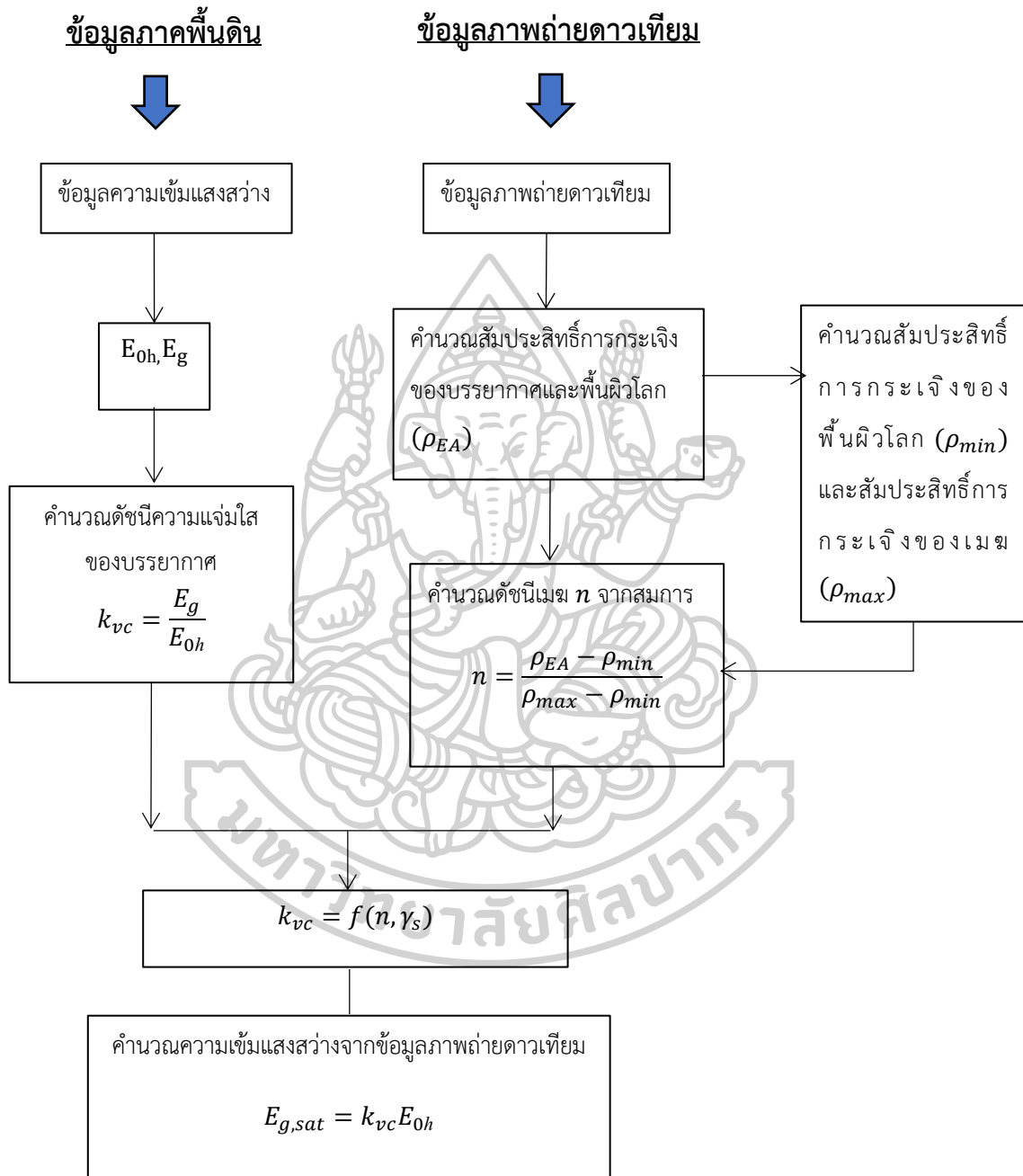
รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศกับดัชนีของเมฆที่ได้จากสถานีวัด 4 แห่ง ซึ่งเป็นข้อมูลในช่วงปี ค.ศ. 2016 - 2018

ในขั้นตอนสุดท้าย ผู้วิจัยสามารถคำนวณความเข้มแสงสว่างบนระนาบในแนวระดับจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Himawari-8 ได้โดยใช้สมการ

$$E_{g,sat} = k_{vc} \cdot E_{0h} \quad (3.9)$$

ในการสร้างแบบจำลองสำหรับการหาความเข้มแสงสว่าง วิธีดังกล่าวสรุปได้ตั้งแผนภูมิในรูปที่

3.22



รูปที่ 3.22 แผนภูมิของวิธีการคำนวณหาความเข้มแสงสว่างจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่พัฒนาขึ้น
ในงานวิจัยนี้ ดัดแปลงจาก (Hammer, 2003)

3.3 การทดสอบสมรรถนะของแบบจำลอง

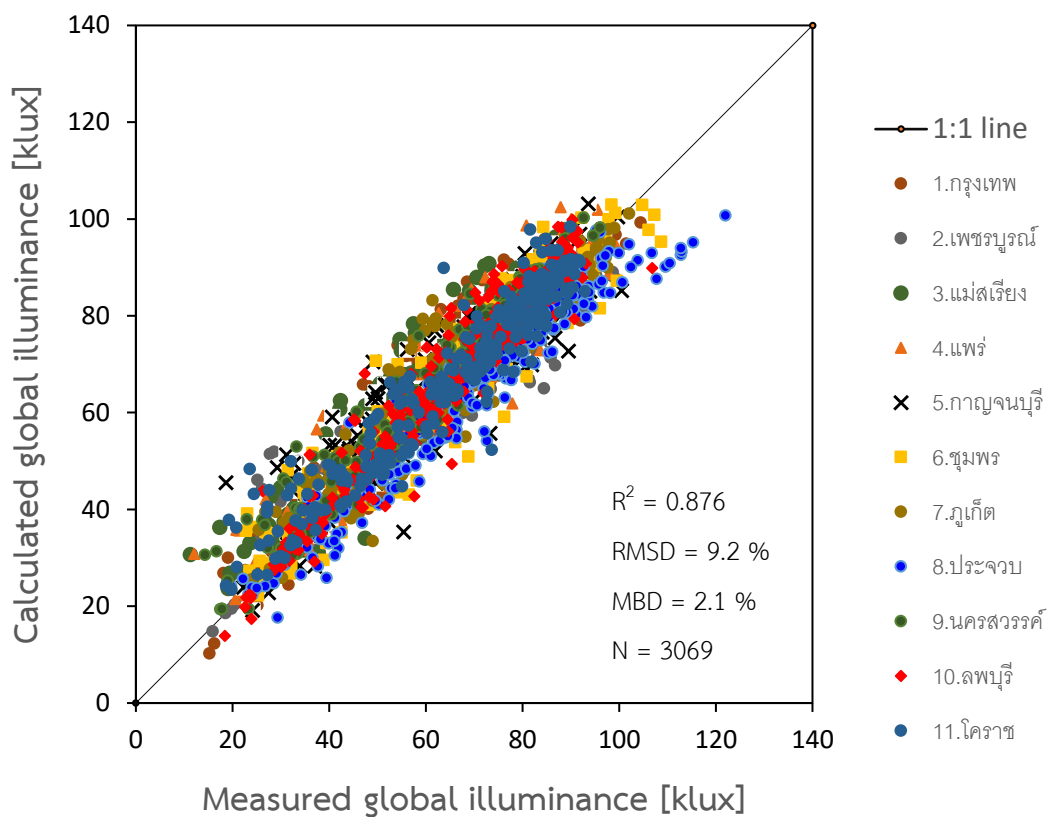
หลังจากที่ทำการสร้างแบบจำลองแล้ว ก่อนนำแบบจำลองไปใช้งาน ผู้วิจัยจะทำการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นซึ่งเขียนได้ตามสมการ 3.9 โดยผู้วิจัยได้ทำการคำนวณความเข้มแสงสว่างจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ($E_{g,sat}$) ที่สถานีวัด 11 แห่ง (รายละเอียดของสถานีแสดงในตารางที่ 3.2) จากนั้นนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัด ($E_{g,meas}$) ของทั้ง 11 สถานี โดยเป็นข้อมูลในช่วงปี ค.ศ. 2016 – 2018 ความแตกต่างของค่าความเข้มแสงสว่างธรรมชาติที่ได้จากข้อมูลทั้ง 2 ชุด จะบอกในรูปของ root mean square difference (RMSD) และ mean bias difference (MBD) ซึ่งเขียนได้ดังสมการที่ (3.10) และ (3.11) ตามลำดับ (Iqbal, 1983)

$$RMSD = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_{g,sat} - E_{g,meas})^2}{N}}}{\frac{\sum_{i=1}^N E_{g,meas}}{N}} \times 100\% \quad (3.10)$$

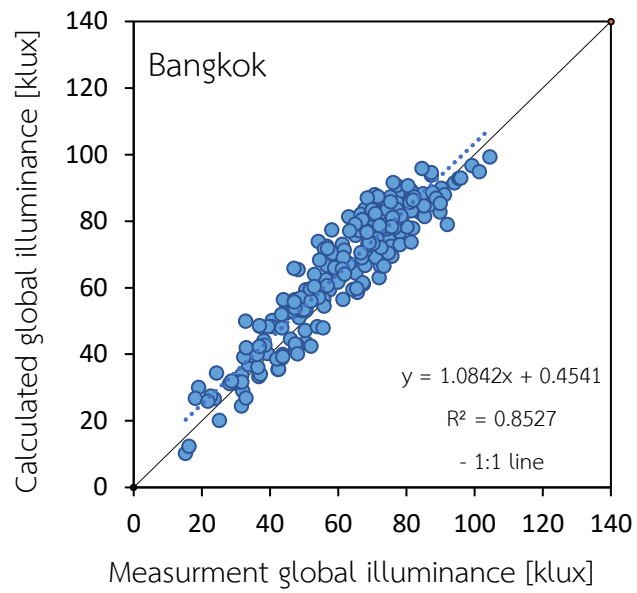
$$MBD = \frac{\frac{\sum_{i=1}^N (E_{g,sat} - E_{g,meas})}{N}}{\frac{\sum_{i=1}^N E_{g,meas}}{N}} \times 100\% \quad (3.11)$$

เมื่อ	$E_{g,sat}$	คือ	ค่าความเข้มแสงสว่างรายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลอง [klux]
	$E_{g,meas}$	คือ	ค่าความเข้มแสงสว่างรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากการวัด [klux]
	N	คือ	จำนวนข้อมูล

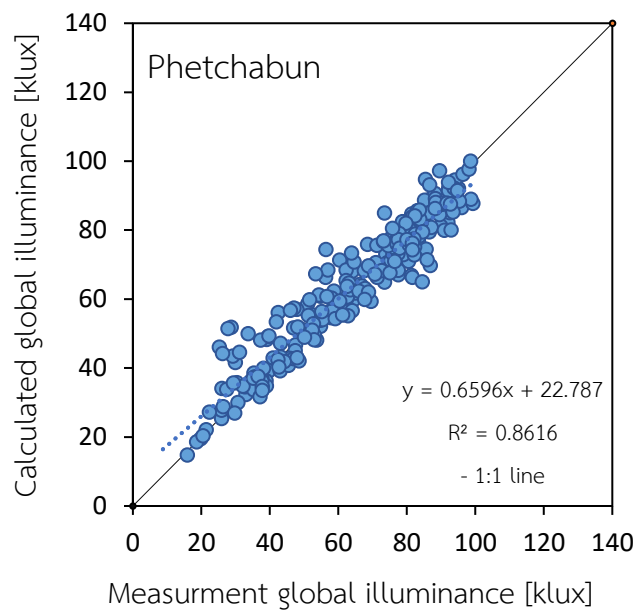
ผู้วิจัยได้นำแบบจำลองมาคำนวณความเข้มแสงสว่างและนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดที่สถานีวัด 11 แห่งดังที่กล่าวมาแล้ว ผลการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองรวมทั้ง 11 สถานีวัด แสดงดังรูปที่ 3.23 และผลการทดสอบสมรรถนะแบบจำลองแยกเป็นรายสถานีแสดงดังรูปที่ 3.24 – 3.34 โดยผู้วิจัยได้ทำการสรุปค่าความแตกต่างในเทอมของ RMSD และ MBD ของทั้ง 11 สถานีวัด ดังแสดงในตารางที่ 3.8



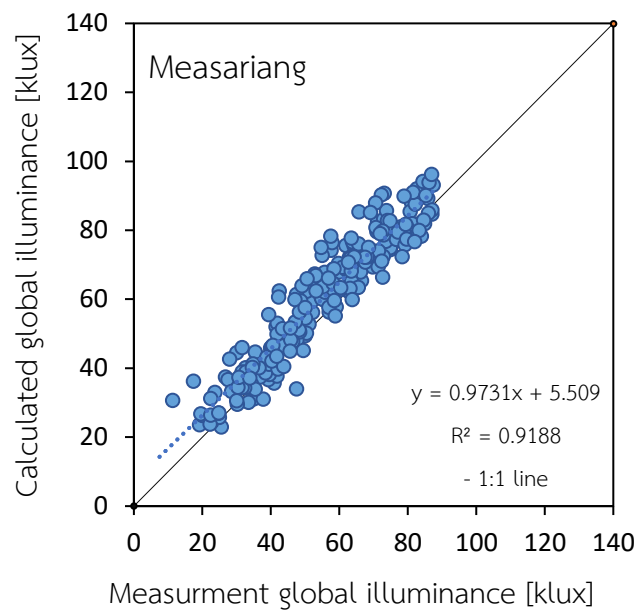
รูปที่ 3.23 การเปรียบเทียบความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลองของสถานีวัดทั้ง 11 แห่งโดยเป็นข้อมูลในช่วงปี ค.ศ. 2016 - 2018



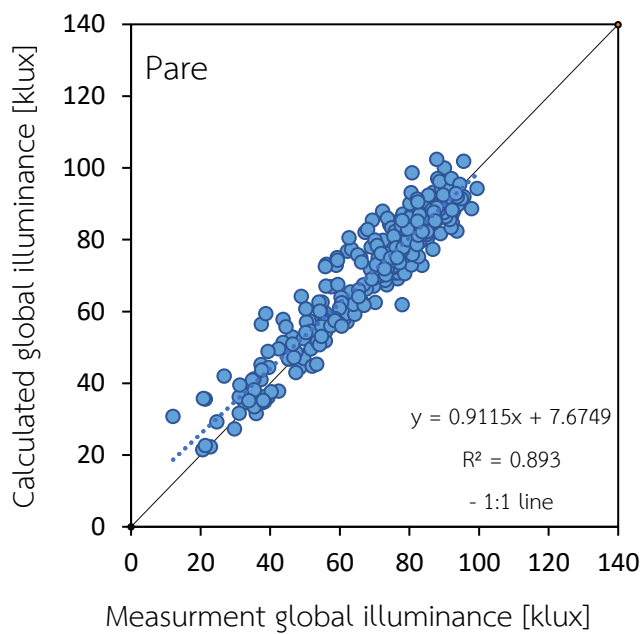
รูปที่ 3.24 การเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลอง ของสถานีกรุงเทพ



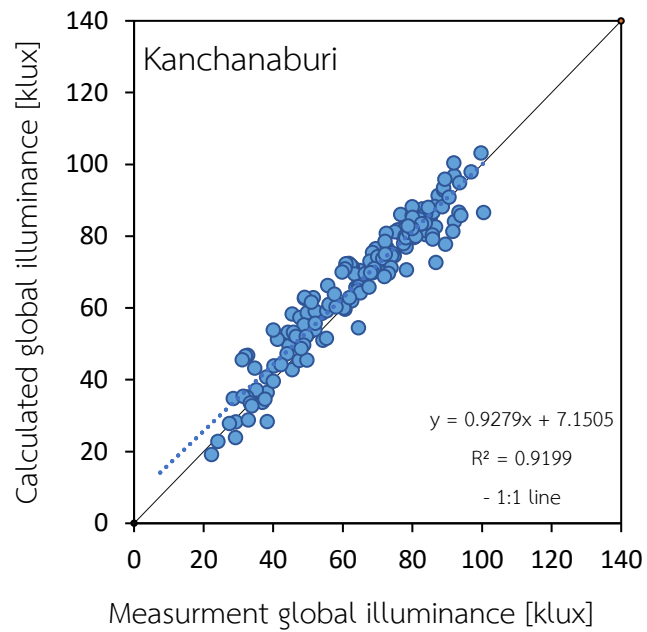
รูปที่ 3.25 การเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลอง ของสถานีเพชรบูรณ์



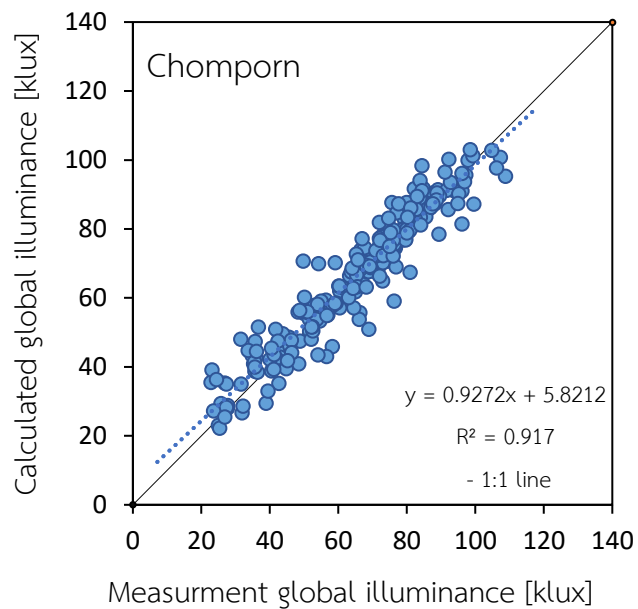
รูปที่ 3.26 การเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลอง ของสถานีแม่สะเรียง



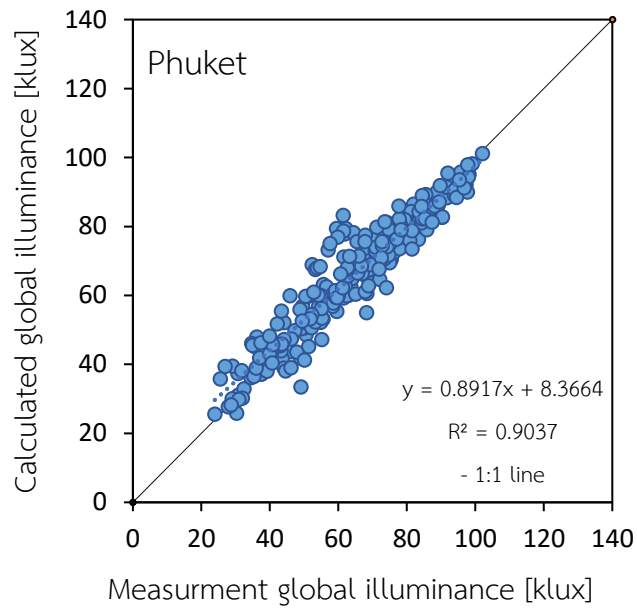
รูปที่ 3.27 การเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลอง ของสถานีแพะ



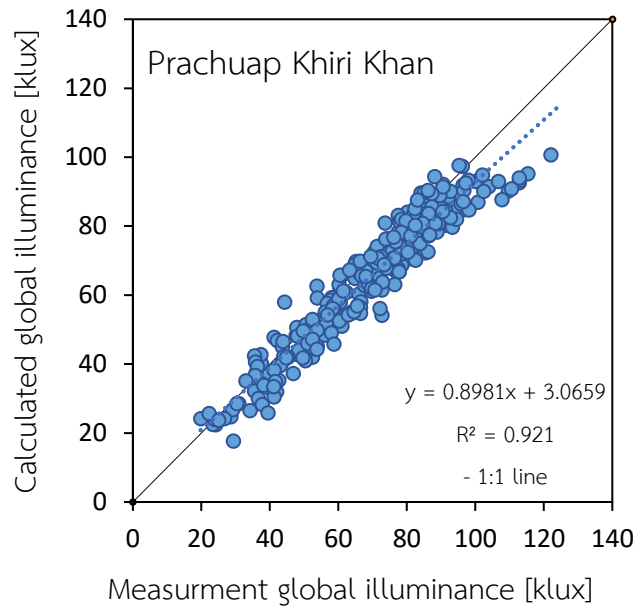
รูปที่ 3.28 การเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลอง ของสถานีกาญจนบุรี



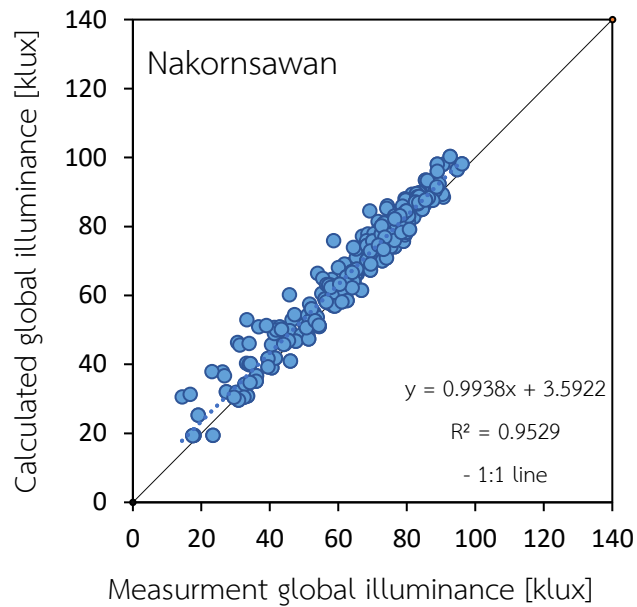
รูปที่ 3.29 การเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลอง ของสถานีชุมพร



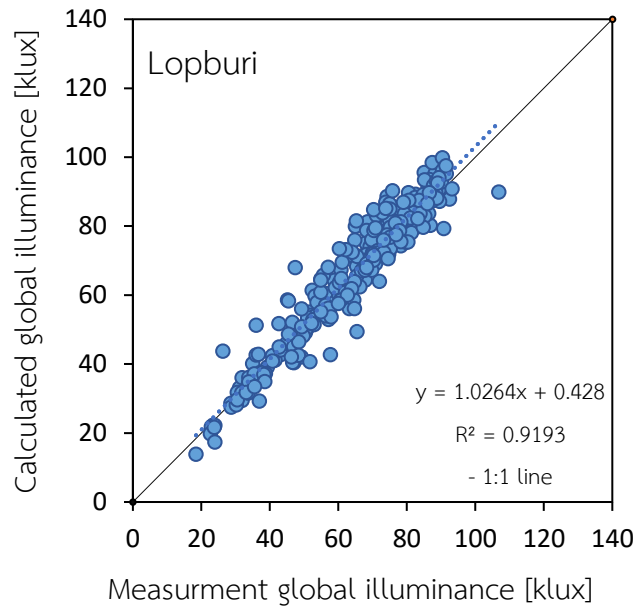
รูปที่ 3.30 การเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลอง ของสถานีภูเก็ต



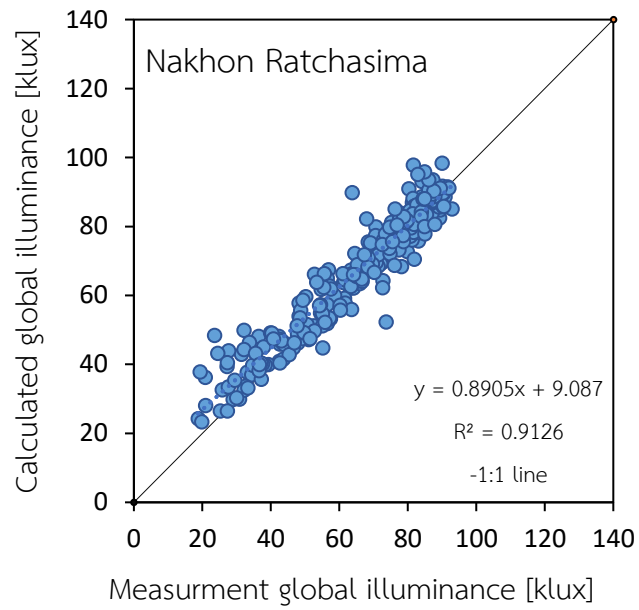
รูปที่ 3.31 การเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลอง ของสถานีประจวบคีรีขันธ์



รูปที่ 3.32 การเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลอง ของสถานีนครสวรรค์



รูปที่ 3.33 การเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลอง ของสถานีลพบุรี



รูปที่ 3.34 การเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลอง ของสถานีโคราช



ตารางที่ 3.8 ค่าความแตกต่างทางสถิติ RMSD และ MBD ทางสถิติที่ได้จากการเปรียบเทียบความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดกับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากแบบจำลองของ 11 สถานีในประเทศไทย

ลำดับ	สถานี	RMSD (%)	MBD (%)
1	กรุงเทพ (Bangkok)	12.4	6.5
2	เพชรบูรณ์ (Phetchabun)	8.15	-1.7
3	แม่สะเรียง (Measariang)	10.7	7.8
4	แพร่ (Phrae)	8.7	2.2
5	กาญจนบุรี (Kanchanaburi)	7.8	3.2
6	ชุมพร (Chomporn)	8.5	1.1
7	ภูเก็ต (Phuket)	8.9	1.9
8	ประจวบคีรีขันธ์ (Prachuap Khiri Khan)	9.0	-5.3
9	นครสวรรค์ (Nakhonsawan)	8.5	4.9
10	ลพบุรี (Lopburi)	9.1	3.2
11	นครราชสีมา (Nakhon Ratchasima)	9.4	3.0
	ทดสอบรวมทั้ง 11 สถานี	9.2	2.1

ผลจากการทดสอบสมรรถนะแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 3.22 – 3.33 จะเห็นว่าค่าความเข้มแสงสว่างที่คำนวณได้จากแบบจำลองส่วนใหญ่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดภาคพื้นดิน โดยมีค่าความแตกต่างในรูปของ RMSD อยู่ในช่วง 7.8 ถึง 12.4% และ MBD อยู่ในช่วงประมาณ -5.3 ถึง 7.8% เมื่อพิจารณาแยกเป็นรายสถานี หากพิจารณารวมทั้ง 11 สถานี จะมีค่าความแตกต่างในรูป RMSD และ MBD เท่ากับ 9.2% และ 2.1% ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีสมรรถนะที่ดีและมีความละเอียดถูกต้องค่อนข้างสูงสามารถนำไปคำนวณค่าความเข้มแสงสว่างต่อไป

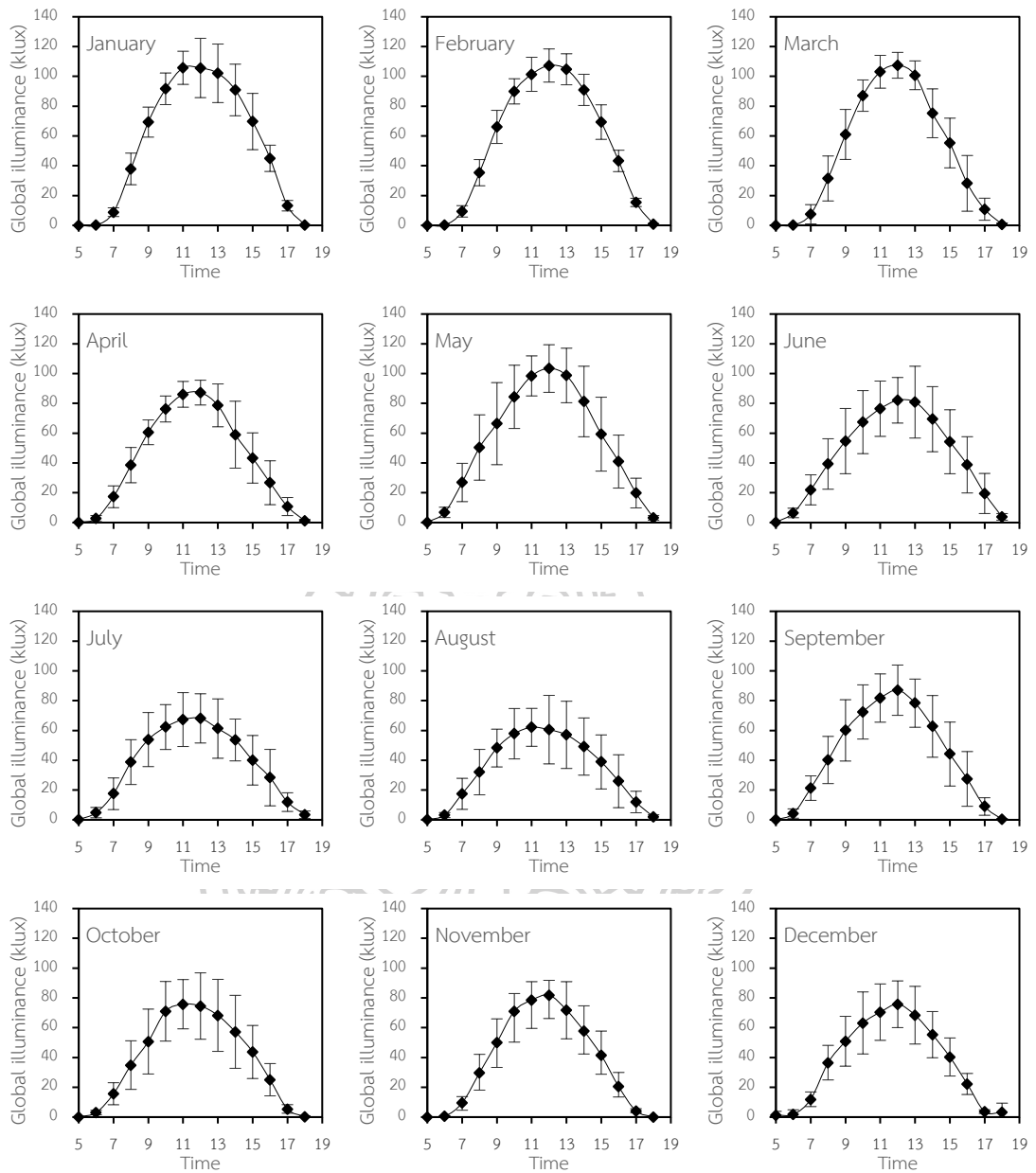
3.4 ลักษณะทางสถิติของแสงสว่างธรรมชาติในภูมิภาคต่าง ๆ ในประเทศไทย

นอกจากการพัฒนาแบบจำลองแล้วผู้วิจัยจะทำการศึกษาลักษณะการแปรค่าของความเข้มแสงสว่างในภูมิภาคต่าง ๆ ของประเทศไทยด้วย ปริมาณความเข้มแสงสว่างเป็นส่วนหนึ่งของรังสีอาทิตย์ที่เคลื่อนที่ผ่านบรรยากาศมายังพื้นผิวโลก ซึ่งจะถูกลดทอนโดยองค์ประกอบของบรรยากาศ ซึ่งเมฆเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีอิทธิพลต่อประมาณความเข้มแสงสว่าง โดยปริมาณเมฆจะมีการเปลี่ยนแปลงในรอบวันและตามฤดูกาล อย่างไรก็ตามการศึกษาโดยใช้ข้อมูลย้อนหลังสามารถนำมาเป็นตัวแทนในการดูแนวโน้มเชิงสถิติได้ ตัวอย่างเช่นในช่วงฤดูฝน มีโอกาสที่ท้องฟ้าจะปกคลุมไปด้วยเมฆมากกว่าในช่วงฤดูร้อนและฤดูหนาว ซึ่งส่งผลให้ปริมาณความเข้มแสงสว่างในดังกล่าวมีปริมาณน้อยกว่าในช่วงอื่น ๆ เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษารูปแบบการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงสว่างในรอบวันและการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลในรอบปีด้วย เพื่อจะได้ทราบถึงศักยภาพของแสงสว่างธรรมชาติในภูมิภาคหลักของประเทศไทย สำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการอนุรักษ์พลังงานต่อไป

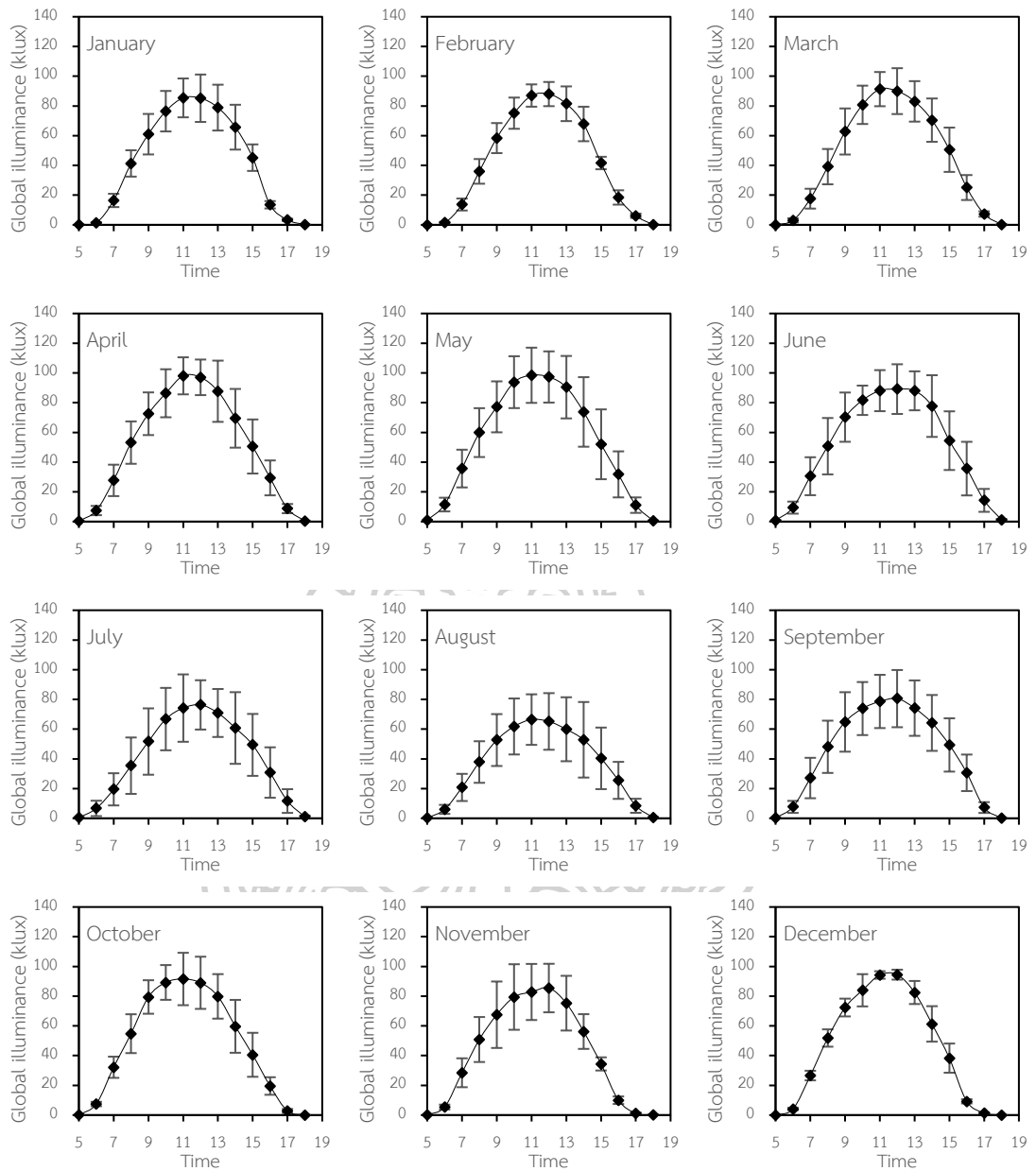
ผู้วิจัยได้นำข้อมูลความเข้มแสงสว่างที่วัดได้จากสถานีเชียงใหม่ อุบลราชธานี นครปฐม และสงขลา ในปี ค.ศ. 2016 - 2018 มาทำการวิเคราะห์และศึกษาลักษณะตามรายละเอียดดังนี้

3.4.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงสว่างรายชั่วโมงตามเวลาในรอบวัน

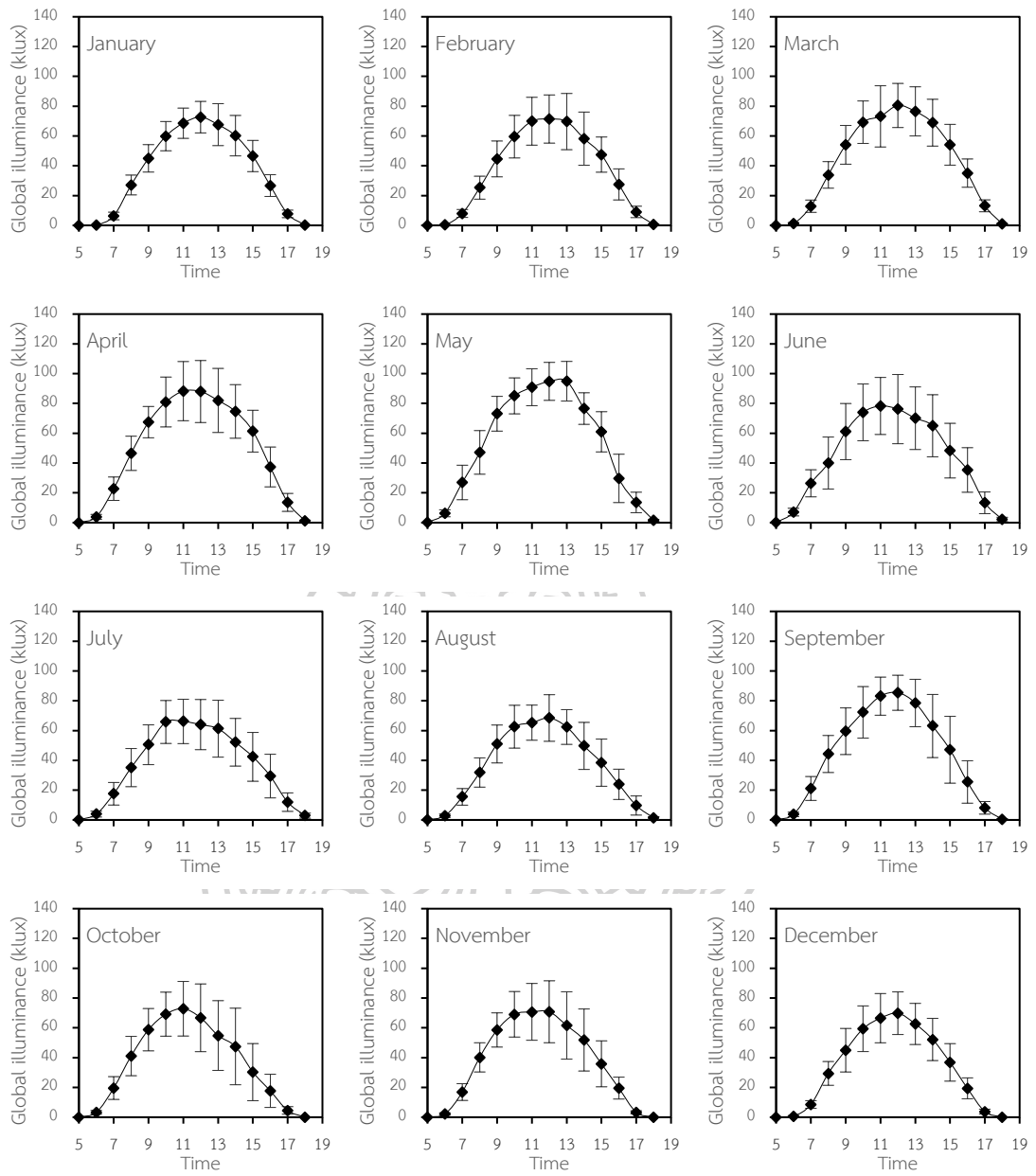
เนื่องจากข้อมูลความเข้มแสงสว่างมีการแปรค่าในรอบวันตามเวลาของพระอาทิตย์ ซึ่งจะมีค่าค่าสูงสุดในเวลาเที่ยงวันซึ่งเป็นผลของทางเดินของดวงอาทิตย์ โดยทั่วไปแล้วค่าความเข้มแสงสว่างในช่วงเวลาเดียวกันในแต่ละวันจะมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากสภาพอากาศและองค์ประกอบต่างๆ ในชั้นบรรยากาศของแต่ละวันมีความแตกต่างกัน ในการจะใช้งานจึงต้องทราบค่าเฉลี่ยตลอดทั้งเดือนในชั่วโมงนั้น ๆ ดังนั้นผู้วิจัยจึงคำนวณหาค่าเฉลี่ยจากนั้นนำมาเขียนกราฟกับเวลาในรอบวัน ผลการแปรค่าแสดงดังรูปที่ 3.35 - 3.38



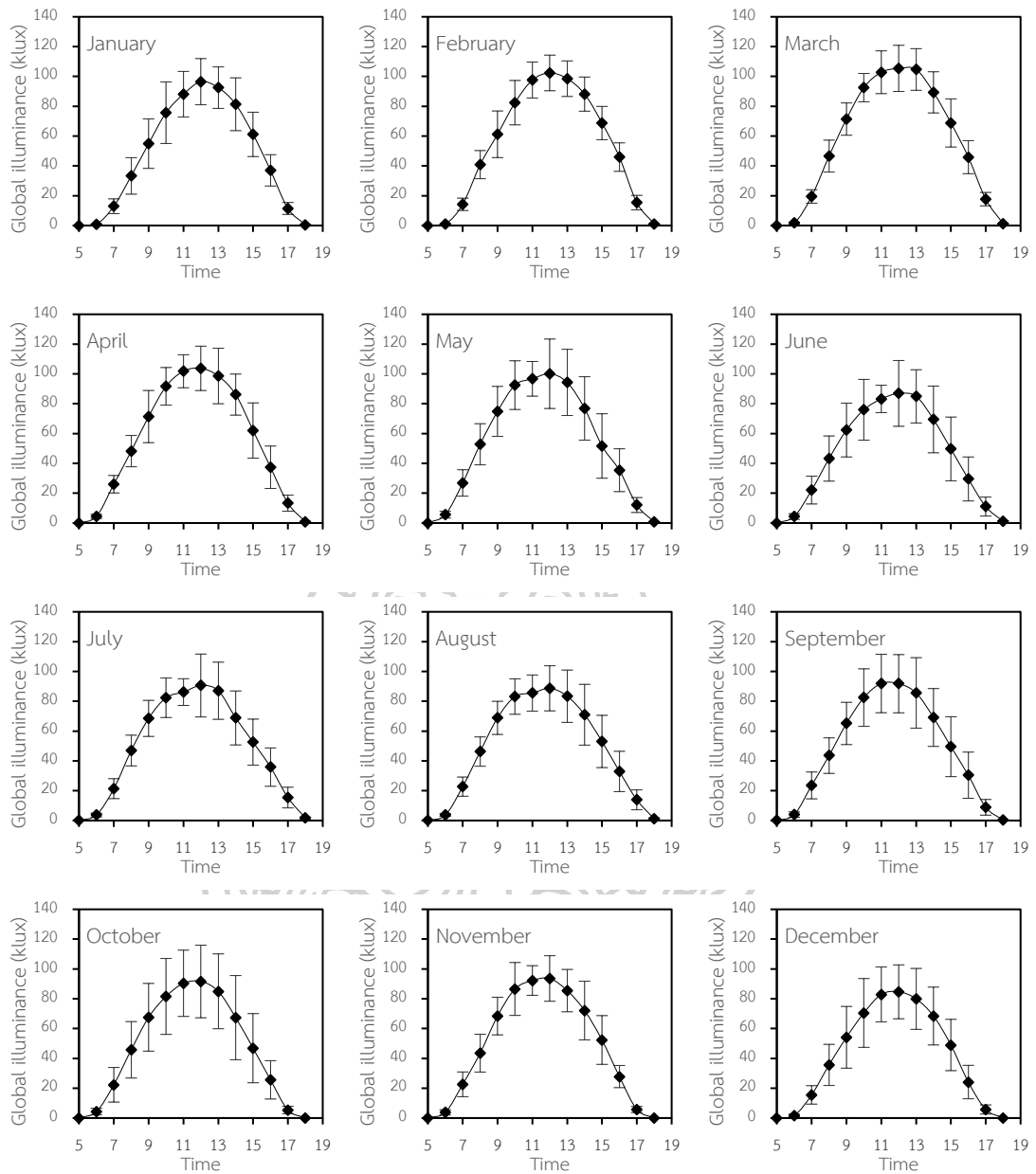
รูปที่ 3.35 การแปรค่าความเข้มแสงสว่างรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีเชียงใหม่ ซึ่งเป็นตัวแทนของภาคเหนือของประเทศไทย



รูปที่ 3.36 การแปรค่าความเข้มแสงสว่างรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีอุบลราชธานี ซึ่งเป็นตัวแทนของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย



รูปที่ 3.37 การแปรค่าความเข้มแสงสว่างรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีนครปฐม ซึ่งเป็นตัวแทนภาคกลางของประเทศไทย

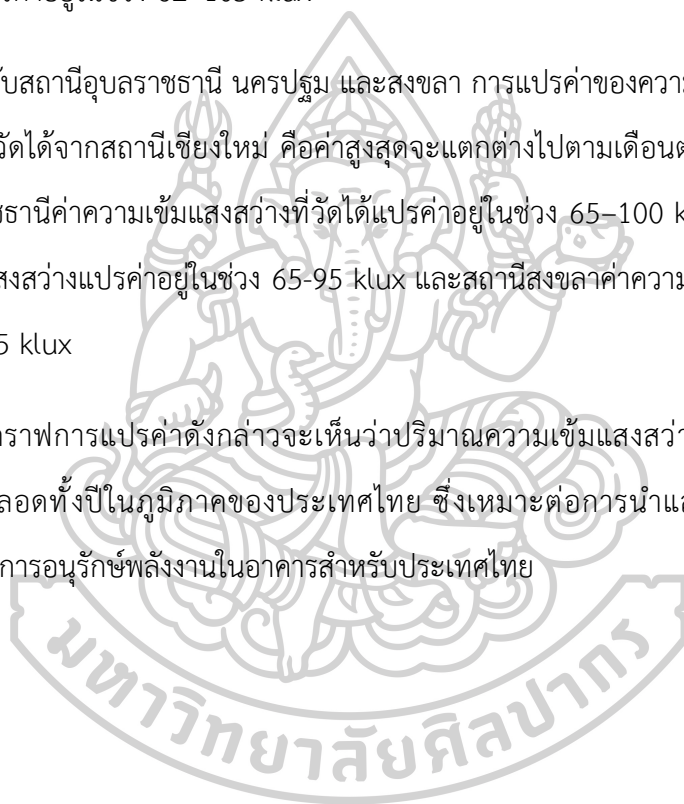


รูปที่ 3.38 การแปรค่าความเข้มแสงสว่างรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีสงขลา ซึ่งเป็นตัวแทนของภาคใต้ของประเทศไทย

จากกราฟการแปรค่าของสถานีเชียงใหม่พบว่าความความเข้มแสงสว่างค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากช่วงเช้าที่ดวงอาทิตย์ขึ้นและจะมีค่าสูงสุดในช่วงเที่ยงวัน จากนั้นค่าจะค่อย ๆ ลดลงจนถึงช่วงเย็น ลักษณะการแปรค่าของข้อมูลมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำซึ่งข้อมูลในช่วงเช้าและช่วงเย็นค่อนข้างสมมาตร เมื่อพิจารณาค่าความเข้มแสงสว่างในแต่ละเดือนพบว่าค่าความเข้มแสงสว่างในเดือนกุมภาพันธ์จนถึงเดือนพฤษภาคมในช่วงเที่ยงจะมีค่าสูงสุดเนื่องจากเป็นช่วงฤดูร้อนของประเทศไทย ส่วนเดือนอื่น ๆ จะมีค่าต่ำกว่า โดยเดือนสิงหาคมซึ่งเป็นฤดูฝนจะมีค่าความเข้มแสงสว่างต่ำที่สุด สำหรับค่าสูงสุดในแต่ละเดือนจะแปรค่าอยู่ในช่วง 62–105 klux

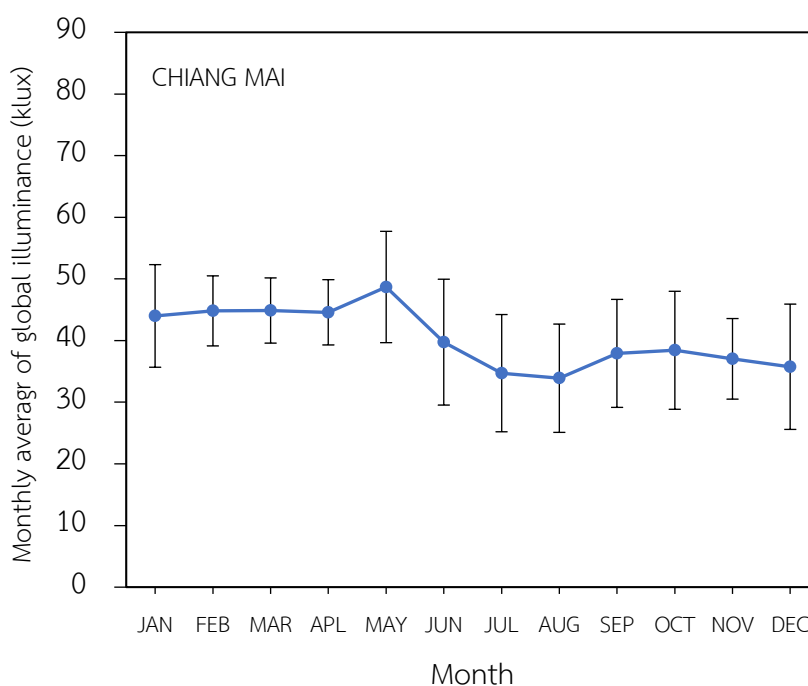
สำหรับสถานีอุบลราชธานี นครปฐม และสงขลา การแปรค่าของความเข้มแสงสว่างมีลักษณะคล้ายกับค่าที่วัดได้จากสถานีเชียงใหม่ คือค่าสูงสุดจะแตกต่างกันไปตามเดือนต่าง ๆ ในรอบปี สำหรับสถานีอุบลราชธานีค่าความเข้มแสงสว่างที่วัดได้แปรค่าอยู่ในช่วง 65–100 klux ส่วนสถานีนครปฐมค่าความเข้มแสงสว่างแปรค่าอยู่ในช่วง 65-95 klux และสถานีสงขลาค่าความเข้มแสงสว่างแปรค่าอยู่ในช่วง 85-105 klux

จากกราฟการแปรค่าดังกล่าวจะเห็นว่าปริมาณความเข้มแสงสว่างของประเทศไทยมีค่าค่อนข้างสูงตลอดทั้งปีในภูมิภาคของประเทศไทย ซึ่งเหมาะต่อการนำแสงสว่างธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ด้านการอนุรักษ์พลังงานในอาคารสำหรับประเทศไทย

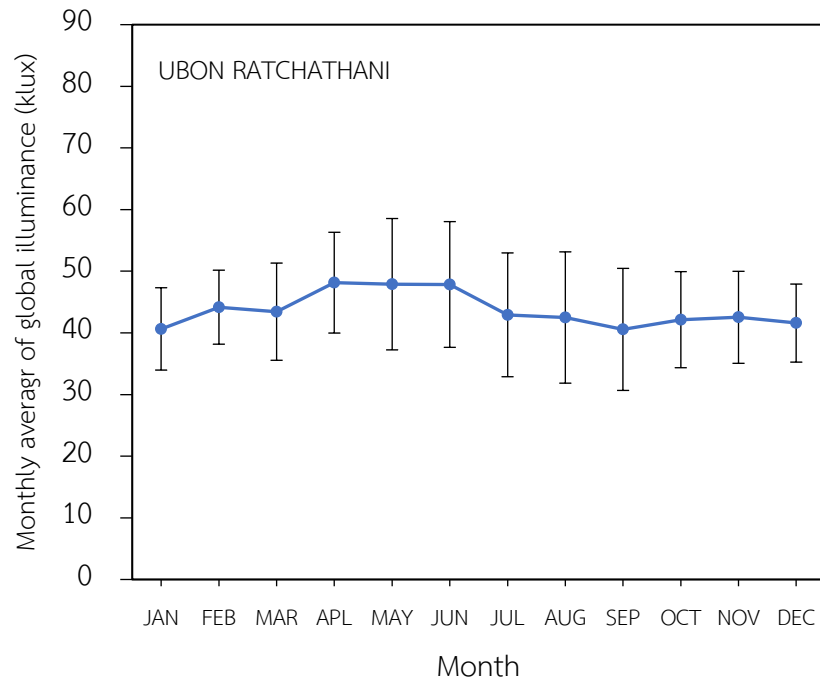


3.4.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงสว่างตามเวลาในรอบปี

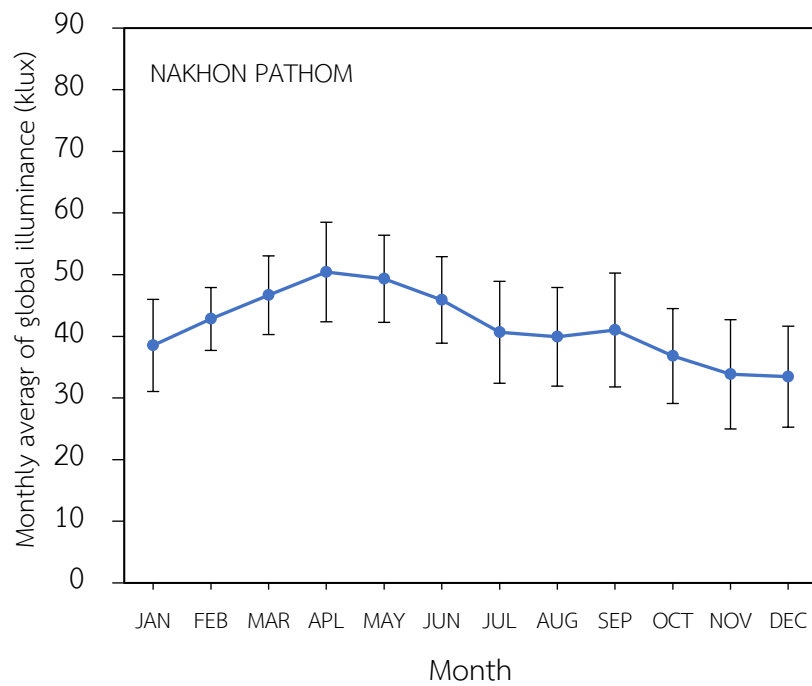
ความเข้มแสงสว่างก็มีลักษณะเช่นเดียวกับรังสีอาทิตย์ซึ่งแปรค่าตามเวลาในรอบปี ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้นำข้อมูลความเข้มแสงสว่างที่วัดได้จากสถานีเชียงใหม่ อุบลราชธานี นครปฐม และสงขลา มาทำการหาค่าความเข้มแสงสว่างรายวันเฉลี่ยต่อเดือนและนำมาเขียนกราฟเพื่อแสดงการแปรค่าในรอบปี ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.39 – 3.42 สำหรับสถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา ตามลำดับ



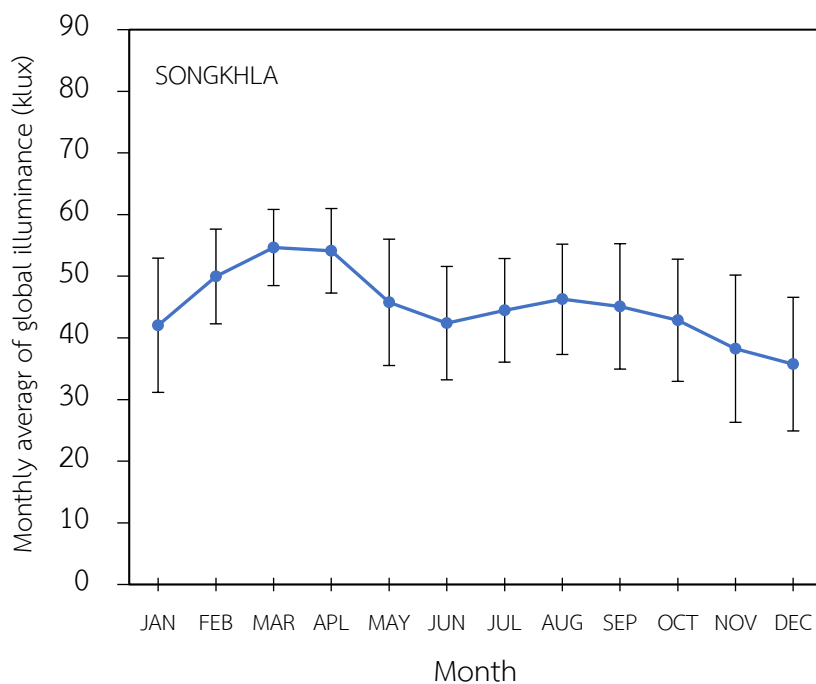
รูปที่ 3.39 การแปรค่าความเข้มแสงสว่างตามฤดูกาลในรอบปีของสถานีเชียงใหม่



รูปที่ 3.40 การแปรค่าความเข้มแสงสว่างตามฤดูกาลในรอบปีของสถานีอุบลราชธานี



รูปที่ 3.41 การแปรค่าความเข้มแสงสว่างตามฤดูกาลในรอบปีของสถานีนครปฐม



รูปที่ 3.42 การแปรค่าความเข้มแสงสว่างตามฤดูกาลในรอบปีของสถานีสงขลา

จากกราฟจะเห็นว่าค่าความเข้มแสงสว่างของทั้ง 4 สถานีวัดในภูมิภาคหลักของประเทศไทย มีการแปรค่าในรอบปีในลักษณะคล้ายๆ กัน โดยสถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม ค่าความเข้มแสงสว่างจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในเดือนมกราคมและจะมีค่าสูงสุดในช่วงเดือนเมษายน - พฤษภาคม จากนั้นค่าจะค่อย ๆ ลดลงในช่วงฤดูฝน และมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงฤดูหนาว ส่วนสถานีสงขลา ค่าสูงสุดในช่วงเดือนมีนาคม - พฤษภาคม จากนั้นจะค่อย ๆ ลดลง ไปจนถึงเดือน ธันวาคม โดยค่าความเข้มแสงสว่างรายวันเฉลี่ยต่อเดือนแปรค่าอยู่ในช่วง 35 - 55 klux

บทที่ 4

สรุป

เนื่องจากปัญหาข้อมูลความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดมีอยู่จำกัดไม่เพียงพอต่อการนำมาใช้งาน ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มแสงสว่างในสภาพท้องฟ้าทั่วไปจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม สำหรับนำไปประมาณค่าความเข้มแสงสว่างสำหรับการประยุกต์ใช้ในการออกแบบอาคารโดยใช้แสงสว่างธรรมชาติ แบบจำลองดังกล่าวจะอาศัยข้อมูลความเข้มแสงสว่างที่ทำการวัดภาคพื้นดินที่ 4 สถานีวัดในภูมิภาคหลักของประเทศไทย ได้แก่ ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือจังหวัดเชียงใหม่ ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือจังหวัดอุบลราชธานี ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือจังหวัดอุบลราชธานี และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม และข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Himawari-8 ข้อมูลความเข้มแสงสว่างที่วัดได้จะถูกนำไปหาค่าดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ (clearness index, k_{vc}) ส่วนข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Himawari-8 จะถูกนำไปหาค่าดัชนีเมฆ (cloud index, n) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้บ่งบอกปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้าและส่งผลไปยังความเข้มแสงสว่างธรรมชาติที่ตกกระทบพื้นโลกด้วย เนื่องจากเมฆสามารถดูดกลืนและกระเจิงรังสีอาทิตย์ได้ จากนั้นผู้วิจัยจะทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ ดัชนีเมฆ และมุมเงยของดวงอาทิตย์ จะอยู่ในรูปของสมการเอมไพริคัล พร้อมทั้งหาสัมประสิทธิ์ของสมการจากข้อมูลความเข้มแสงสว่างที่ได้จากการวัดที่ 4 สถานี ท้ายที่สุดผู้วิจัยสามารถคำนวณความเข้มแสงสว่างจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมได้ สำหรับข้อมูลที่นำมาสร้างแบบจำลองและทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองทั้งภาคพื้นดินและดาวเทียม Himawari-8 เป็นข้อมูลในช่วง ค.ศ. 2016 - 2018

ผู้วิจัยได้ใช้แบบจำลองและค่าสัมประสิทธิ์ที่หามาได้ไปคำนวณค่าความเข้มแสงสว่างธรรมชาติที่สถานีวัด 11 แห่ง ซึ่งกระจายอยู่ทั่วภูมิภาคของประเทศไทย จากนั้นนำค่าที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกันดี โดยมีความแตกต่างในรูปของ RMSD และ MBD อยู่ในช่วง 7.8 ถึง 12.4% และ -5.3 ถึง 7.8% ตามลำดับจากการทดสอบแบบจำลองดังกล่าวทำให้เห็นว่าสามารถนำแบบจำลองไปใช้คำนวณความเข้มแสงสว่างสำหรับประเทศไทยเพื่อนำข้อมูลความเข้มแสงสว่างไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ศึกษาการแปรค่าของความเข้มแสงสว่างตามเวลาในรอบวันและรอบปีของ 4 ภูมิภาคหลักของประเทศไทย โดยการแปรค่าในรอบวันนั้นความเข้มแสงสว่างจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตอนเช้ามีค่าสูงสุดในตอนเที่ยงวันและลดลงมีค่าต่ำสุดในช่วงเย็น ซึ่งสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของ

ดวงอาทิตย์ในรอบวัน สำหรับการแปรค่าความเข้มแสงสว่างในรอบปีตามฤดูกาลนั้น ค่าความเข้มแสงสว่างจะมีค่าที่สูงสุดในฤดูร้อนและต่ำที่สุดในฤดูฝนซึ่งสอดคล้องกับการแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ในรอบปี

ข้อเสนอแนะ : เนื่องจากการวัดความเข้มแสงสว่างในประเทศไทยยังมีค่อนข้างจำกัด ดังนั้นผู้วิจัยเสนอแนะให้เพิ่มจำนวนสถานีวัด เพื่อนำมาใช้งานด้านแสงสว่างธรรมชาติอย่างกว้างขวางต่อไป



รายการอ้างอิง

- Hammer, A., Heinemann, P., Hoyer, D., Kuhlenmann, R., Lorenz, E., Muller, R., Beyer, H.G. (2003). Solar energy assessment using remote sensing technology. *Remote Sensing of Environment*, 86, 423-432.
- He, J., & Ng, E. (2010). Using satellite-based methods to predict daylight illuminance for subtropical Hong Kong. *Lighting Research & Technology*, 42(2), 135-147.
- Ineichen, P., & Perez, R. (1999). Derivation of cloud index from geostationary satellites and application to the production of solar irradiance and daylight illuminance data. *Theoretical and Applied Climatology*, 64(1-2), 119-130.
- Iqbal, M. (1983). Introduction to Solar Radiation. *Academic Press*.
- Janjai, S., Tohsing, K., Nunez, M., & Laksanaboonsong, J. (2008). A technique for mapping global illuminance from satellite data. *Solar Energy*, 82(6), 543-555.
- JMA. (2012). *Calibration of MTSAT*. Japan.
- JMA. (2013). *Himawari-8/9 band corresponding to the MTSAT-1R/2 IR1 band*. Japan.
- Kandilli, C., & Ulgen, K. (2008). Solar illumination and estimating daylight availability of global solar irradiance. *Energy Sources, Part A*, 30(12), 1127-1140.
- Murdoch. (1985). *Illumination Engineering from Edison Lamp to the Laser*: Macmillan Publishing Company, New York.
- Pattarapanitchai, S., Janjai, S., Tohsing, K., & Prathumsit, J. (2015). A technique to map monthly average global illuminance from satellite data in the tropics using a simple semi-empirical model. *Renewable energy*, 74, 170-175.
- เสริม จันทร์ฉาย, อ. ม., รุ่งรัตน์ วัตตาล, สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย, สุมามาลย์ บรรเทิง. (2556). การพัฒนาปรับปรุงคู่มือข้อมูลมาตรฐานด้านภูมิอากาศและแสงอาทิตย์สำหรับใช้งานด้านพลังงานทดแทน. Retrieved from กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์ พลังงาน กรุงเทพฯ:



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวธฤชวรรณ บรรดาจันทร์
วัน เดือน ปี เกิด	13 กันยายน 2536
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลอุตรดิตถ์ จังหวัดอุตรดิตถ์
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	226 หมู่ 6 ตำบลบ้านตึก อำเภอศรีสชนาลัย จังหวัดสุโขทัย 64130

