



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ เรื่อง “การพัฒนาแบบจำลองเพื่อคำนวณรังสีรวมดวงอาทิตย์จากข้อมูล
ดาวเทียมสำหรับบริเวณภูเขา”

**“Development of a Model for Estimating Solar Radiation from Satellite Data
for Mountainous Area”**

โดย นาย ชังแข็ง เลียงจินดาถาวร
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ตุลาคม 2553

สัญญาเลขที่ MRG4780105

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ เรื่อง “การพัฒนาแบบจำลองเพื่อคำนวณรังสีรวมดวงอาทิตย์จากข้อมูล
ดาวเทียมสำหรับบริเวณภูเขา”

**“Development of a Model for Estimating Solar Radiation from Satellite Data
for Mountainous Area”**

โดย นาย ชังเซ็ง เลียงจินดาถาวร
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา
และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.) ที่อนุเคราะห์ทุนในการวิจัยโครงการวิจัยนี้โดยตลอด

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย ซึ่งเป็นที่ปรึกษา (mentor) ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำทั้งทางด้านวิชาการ และคำแนะนำด้านอื่น ๆ อันเป็นประโยชน์กับโครงการเป็นอย่างดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร และนักศึกษา นักวิจัย ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่อนุเคราะห์ข้อมูล และช่วยเหลืองานติดตั้งเครื่องมือวัด รวมทั้งรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ หน่วยงานต่าง ๆ ที่อนุเคราะห์สถานที่ให้ติดตั้งเครื่องมือวัดและเก็บข้อมูลรังสีจากดวงอาทิตย์ภาคพื้นดิน ได้แก่ ศูนย์บริการนักท่องเที่ยวใกล้น้ำตกแม่กลางและที่ทำการอุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ ในเขตความรับผิดชอบของกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่าและพันธุ์พืช สังกัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม และสถานีเรดาร์ยอดดอยอินทนนท์ในเขตความรับผิดชอบของกองทัพอากาศ สังกัดกระทรวงกลาโหม

ผู้วิจัยขอขอบคุณกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ที่อนุเคราะห์เครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูลรังสีจากดวงอาทิตย์ที่จำเป็นต้องใช้บางส่วนในงานวิจัยนี้

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ต้นสังกัดผู้วิจัย ที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้อส่งอำนวยความสะดวกที่จำเป็นต้องใช้ในงานวิจัยนี้

รหัสโครงการ : MRG4780105

ชื่อโครงการ : การพัฒนาแบบจำลองเพื่อคำนวณรังสีรวมดวงอาทิตย์จากข้อมูลดาวเทียมสำหรับบริเวณภูเขา

ชื่อนักวิจัย และสถาบัน : นายชังเซ็ง เลียงจินดาถาวร มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Email Address : sungseng22@yahoo.com

ระยะเวลาโครงการ : 2 ปี

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการทดสอบและพัฒนาแบบจำลองการคำนวณรังสีรวมดวงอาทิตย์จากข้อมูลดาวเทียมสำหรับพื้นที่บริเวณภูเขา โดยได้เลือกพื้นที่บริเวณอุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์เพื่อติดตั้งเครื่องมือวัดเป็นสถานีวัดภาคพื้นดินเป็น 3 ระดับ เนื่องจากผลของค่าระดับความสูงของพื้นที่ไม่ได้นำมาคิดในแบบจำลองเดิม จากผลการวัดและการประมวลข้อมูลจากสถานีวัดภาคพื้นดินในช่วงปี 2006-2009 พบว่าในกรณีที่ท้องฟ้าแจ่มใสมีแนวโน้มที่แสดงให้เห็นว่าค่ารังสีรวมดวงอาทิตย์จะไม่แปรโดยตรงกับค่าระดับความสูงของพื้นที่ โดยทั้งค่ารังสีรวมดวงอาทิตย์ในรายชั่วโมง (I) มากกว่ารังสีรวมรายวัน (H) และรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ($\bar{H}$) ของพื้นที่บริเวณยอดดอยที่อยู่ระดับสูงสุดมีค่าสูงสุด ขณะที่ค่าดังกล่าวของบริเวณความสูงระดับกลางจะมีค่าต่ำสุด ส่วนกรณีในช่วงฤดูฝนที่มีเมฆหมอกมากมีแนวโน้มที่แสดงว่าค่ารังสีรวมรายวันและรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนโดยจะแปรผกผันกับค่าระดับความสูงของพื้นที่ และในกรณีที่ค่ารังสีรวมดวงอาทิตย์ในรายชั่วโมงไม่สามารถระบุความสัมพันธ์กับค่าระดับความสูงของพื้นที่ได้ ขณะที่ผลการประมวลผลข้อมูลดิจิทัลจากดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาที่ตำแหน่งตรงกับสถานีวัดภาคพื้นดิน 3 ระดับในช่วงวันเวลาเดียวกันให้ค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากข้อมูลที่อยู่ pixel ใกล้เคียงกันส่วนใหญ่จะเป็นค่าเดียวกันหรือแตกต่างกันเล็กน้อย ดังนั้นการประเมินค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์จากแบบจำลองด้วยข้อมูลดาวเทียมอาจไม่เหมาะสมสำหรับบริเวณแคบ ๆ และในกรณีในช่วงเวลาสั้น ๆ เพราะจะให้ค่าที่มีความคลาดเคลื่อนสูง

คำหลัก : แบบจำลอง รังสีรวมดวงอาทิตย์ พื้นที่บริเวณภูเขา ข้อมูลดาวเทียม

Project Code : **MRG4780105**

Project Title : **Development of a Model for Estimating Solar Radiation from
Satellite Data for Mountainous Area**

Investigator : **Mr. Sungseng Liengjindathaworn Ubonratchathani University**

Email Address : **sungseng22@yahoo.com**

Project Period : **2 years**

ABSTRACT

The purpose of this work is to test and develop the satellite-based solar radiation model for mountainous areas. Doi Intanon National Park was selected to install three levels of ground stations because the height of the settle area was not considered in the previous model. The measured data from the station between 2006 and 2009 and data processing show that, in the case of clear sky day, the total solar radiation is not likely to be proportional to the height of the areas. The highest level has the highest of the hourly radiation (I), daily radiation (H), and monthly average daily radiation ($\overline{H}$), but the middle level has the lowest the solar radiation. For rainy season with cloudy day, the daily solar radiation and monthly average daily radiation are likely to inversely vary to the height of the areas. The correlation between the hourly radiation and the height was not significant. However, satellite-based digital data corresponding to the same areas yielded insignificant values because vicinity pixels are nearly the same value. In short, the satellite-based solar radiation model may be not suitable to evaluate the solar radiation of close areas and in the case of short duration.

Keywords : model, total solar radiation, mountainous areas, satellite-based data

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญที่สุดของสิ่งมีชีวิตบนโลก ทั้งนี้เพราะสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ใช้รังสีจากดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทั้งทางตรงและทางอ้อม คือ เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนที่พื้นผิวและบรรยากาศของโลกซึ่งทำให้โลกมีสภาวะที่เหมาะสมกับการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ เป็นแหล่งพลังงานสำหรับการสังเคราะห์แสงของพืช และเพลงตอน ซึ่งเป็นต้นกำเนิดพลังงานของห่วงโซ่อาหารของมนุษย์ สัตว์ และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ นอกจากนี้ยังเป็นต้นกำเนิดของพลังงานที่ใช้หมุนเวียนวัฏจักรของน้ำบนโลก มนุษย์เองสามารถใช้ประโยชน์พลังงานจากดวงอาทิตย์ทั้งโดยตรงผ่านการใช้เทคโนโลยี เช่น ผ่านทางกระบวนการทางความร้อน หรือผ่านการเปลี่ยนเป็นไฟฟ้าโดยตรง (photovoltaic process) และในทางอ้อมผ่านทางธรรมชาติ โดยเป็นต้นกำเนิดพลังงานให้แหล่งพลังงานต่าง ๆ เช่น พลังงานความร้อนจากมหาสมุทร พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานที่สะสมในรูปของสารอินทรีย์ที่เป็นเชื้อเพลิงได้ (biomass fuels) พลังงานที่สะสมในรูปซากดึกดำบรรพ์ที่เป็นเชื้อเพลิง (fossil fuels) เป็นต้น

พลังงานส่วนใหญ่จากดวงอาทิตย์ที่ส่งมายังโลกจะอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยมีความยาวคลื่นรังสีแกมมาจนถึงคลื่นวิทยุ แต่เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านบรรยากาศมายังผิวโลกส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.3 - 4.0 ไมครอน ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตแสงที่มองเห็นได้และรังสีอินฟราเรด สำหรับส่วนที่เหลือจะสะท้อนและถูกดูดกลืนโดยบรรยากาศของโลก โดยทั่วไปบรรยากาศของโลกจะประกอบด้วยโมเลกุลของก๊าซต่าง ๆ ไอน้ำ ฝุ่นละออง และเมฆ โดยโมเลกุลของก๊าซในบริเวณต่าง ๆ ของโลกมีปริมาณเปลี่ยนแปลงไม่มากหรือถ้ามีการเปลี่ยนแปลงก็จะมี การเปลี่ยนแปลงแบบเป็นระบบตัวอย่างเช่น โอโซน จะมีปริมาณค่อย ๆ ลดลงจากบริเวณศูนย์สูตรไปสู่ขั้วโลก แต่ปริมาณของไอน้ำ ฝุ่น ละออง และเมฆ จะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและบริเวณพื้นที่ตั้งค่อนข้างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีของเมฆหรือหมอก ซึ่งมีอิทธิพลมากที่สุดต่อรังสีดวงอาทิตย์จะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรอบวันและเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลในรอบปี ดังนั้นความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบถึงพื้นผิวดังกล่าวจึงมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและบริเวณพื้นที่ตั้งด้วย

ข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกในบริเวณต่าง ๆ มีความสำคัญและเป็นประโยชน์ต่องานด้านต่าง ๆ เช่น เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับใช้ในการคำนวณออกแบบอุปกรณ์แปลงพลังงานแสงอาทิตย์ต่าง ๆ เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยโซลาร์เซลล์ เครื่องทำน้ำร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร และการประมาณภาวะความร้อน

สำหรับออกแบบระบบปรับอากาศเป็นต้น สำหรับงานด้านอุตุนิยมวิทยาความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการพยากรณ์อากาศซึ่งใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในด้านการเกษตรและป่าไม้ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเจริญเติบโตของพืชต่างๆ การควบคุมโรคบางชนิด การระเหยของน้ำและชลประทาน การวางแผนเพาะปลูก และเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น

โดยทั่วข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สามารถหาได้จากการวัดโดยตรง และการคำนวณหรือการคำนวณที่ใช้ข้อมูลจากการวัดรวม ในด้านการคำนวณอาจแบ่งได้เป็น 2 กรณี โดยกรณีแรกเป็นการคำนวณความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ สามารถคำนวณได้โดยใช้แบบจำลองต่างๆ [1] สำหรับกรณีท้องฟ้ามีเมฆการคำนวณโดยอาศัยข้อมูลที่มี การตรวจวัดภาคพื้นดินทำได้ยาก ทั้งนี้เพราะข้อมูลเกี่ยวกับขนาด ตำแหน่งของเมฆซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญของการคำนวณมักไม่มีการตรวจวัดทั่วไป และโดยปกติข้อมูลที่ได้จากการคำนวณส่วนใหญ่มักมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าข้อมูลที่ได้จากการวัด

สำหรับในด้านการวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์โดยตรงโดยทั่วไปจะดำเนินการโดยการติดตั้งเครือข่ายสถานีวัดและทำการวัดและบันทึกข้อมูลทุกวันต่อเนื่องกันเป็นเวลาหลายๆ ปี เพื่อให้ได้ข้อมูลเป็นตัวแทนทางสถิติของสถานีวัดนั้นๆ แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่มีความทนทานและความละเอียดถูกต้อง มักมีราคาแพง นอกจากนี้การวัดและบันทึกข้อมูลต่อเนื่องกันเป็นเวลาหลายปีต้องเสียค่าใช้จ่ายในการดูแลและซ่อมบำรุงเครื่องมือค่อนข้างสูงอีกทั้งในบางบริเวณห่างไกล เช่น ทะเลและป่าเขาก็ไม่สะดวกในการจัดตั้งสถานีวัด ดังนั้นจำนวนสถานีวัดจึงมักมีจำนวนจำกัดไม่เพียงพอต่อการใช้งาน

ในการแก้ไขปัญหาการขาดแคลนข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ นักวิทยาศาสตร์ในประเทศต่างๆ จึงได้ทำการพัฒนาเทคนิคการคำนวณความเข้มรังสีดวงอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมทางอุตุนิยมวิทยา ทั้งนี้เพราะดาวเทียมทางอุตุนิยมวิทยาทำการบันทึกภาพของเมฆและพื้นผิวโลกในบริเวณต่างๆ โดยข้อมูลที่บันทึกได้นี้สามารถนำไปวิเคราะห์หาความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกได้ [2, 3, 4]

สำหรับกรณีประเทศไทย ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้ร่วมกับ กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม ทำการหาความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบประเทศไทยโดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม GSM-5 ในช่วงปี ค.ศ. 1993 - 1998 [5] ในการคำนวณดังกล่าวได้อาศัยแบบจำลองซึ่งพัฒนาโดย Nunez [6] โดยก่อนการใช้งานได้มีการทดสอบความละเอียดถูกต้องของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้ที่สถานีวัด คือ เชียงใหม่ อุบลราชธานี นครปฐม และสงขลา อย่างไรก็ตามการทดสอบดังกล่าวใช้ข้อมูลที่มาจากการตรวจวัดเพียง 4 แห่ง ซึ่งค่อนข้างน้อย อภิชาติ พรหมดนตรีและคณะ [7] ได้ทดสอบความละเอียดถูกต้องของแบบจำลองดังกล่าวโดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวัดซึ่งได้จากเครือข่ายสถานีวัดจำนวน 25 แห่ง

ที่กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานได้ร่วมกับ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปกร จัดตั้งสถานีวัดขึ้นใหม่ [8] พบว่าข้อมูลจากการคำนวณจากแบบจำลองส่วนใหญ่สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการวัดจากสถานีวัดภาคพื้นดินมีค่า RMSE (Root Mean Square Error) ของค่ารายวันรังสีรวมเฉลี่ยต่อเดือนต่ำกว่า 10 % แต่ความถูกต้องของแบบจำลองสำหรับพื้นที่ในบริเวณที่มีภูเขา มีความถูกต้องต่ำที่สุด บางแห่งมีค่า RMSE มากถึง 10-17 % และผู้วิจัยได้เสนอแนะว่า ในกรณีพื้นที่แบบภูเขาควรจะมีการศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของเมฆเพื่อนำมาใช้แก้ไขผล อันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของเมฆและควรพิจารณาผลของหมอก รวมถึงผลของระดับความสูงของพื้นที่ด้วย

ปัญหาของการเก็บข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ที่ได้จากการวัดจากสถานีวัดภาคพื้นดินในบริเวณป่าเขาก็คือไม่สะดวกในการจัดตั้งสถานีวัดเพราะมักจะอยู่ห่างไกลจากสายส่งไฟฟ้า การขาดแคลนสาธารณูปโภค การคมนาคมและการสื่อสารไม่สะดวกบางแห่งเข้า/ออกได้เฉพาะในฤดูแล้งเท่านั้น อีกทั้งเครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่มีความทนทานและความละเอียดถูกต้องมักมีราคาแพงต้องใช้วัดและบันทึกข้อมูลกลางแจ้งต่อเนื่องกันเกือบตลอดเวลาทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาและซ่อมบำรุงเครื่องมือค่อนข้างสูง จึงยากที่จะได้ข้อมูลที่ถูกต้องสมบูรณ์ที่ต่อเนื่องกันได้ แต่ข้อมูลในบริเวณดังกล่าวก็มีความสำคัญและใช้ประโยชน์ในงานต่างๆ เช่น ใช้ในการคำนวณออกแบบอุปกรณ์พลังงานแสงอาทิตย์ต่างๆ พลังงานที่สะอาดและเหมาะสมสำหรับเขตอนุรักษ์ต่างๆ งานทางด้านป่าไม้ งานด้านเกษตรในที่สูงของชาวเขา การใช้ออกแบบภาระระบบโซลาร์เซลล์สำหรับสถานีวิจัยด้านพลังงานและการสื่อสารและไฟสัญญาณ เป็นต้น ในต่างประเทศก็ประสบปัญหาการขาดแคลนข้อมูลในบริเวณที่มีภูเขาสูงดังกล่าว และปัญหาข้อมูลที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนสูงเช่นเดียวกัน และยังไม่มีการวิจัยแก้ปัญหาในลักษณะดังกล่าว

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบและพัฒนาแบบจำลองสำหรับพื้นที่ในบริเวณที่มีภูเขาเพื่อใช้ประเมินค่าข้อมูลรังสีอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา เพื่อจะได้แบบจำลองที่มีความถูกต้องที่ดีขึ้น ทำให้ข้อมูลทั้งหมดที่ประเมินได้มีความสมบูรณ์และเหมาะสมสำหรับการใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ มากยิ่งขึ้นต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อทำการพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มรังสีดวงอาทิตย์จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับบริเวณพื้นที่ภูเขา
2. เพื่อทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่ได้สำหรับคำนวณความเข้มรังสีดวงอาทิตย์จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมโดยเปรียบเทียบกับข้อมูลซึ่งได้จากการวัด

บทที่ 2

ระเบียบวิธีวิจัย และหลักการทางวิชาการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงระเบียบวิธีวิจัย หลักการทางทฤษฎีที่ใช้

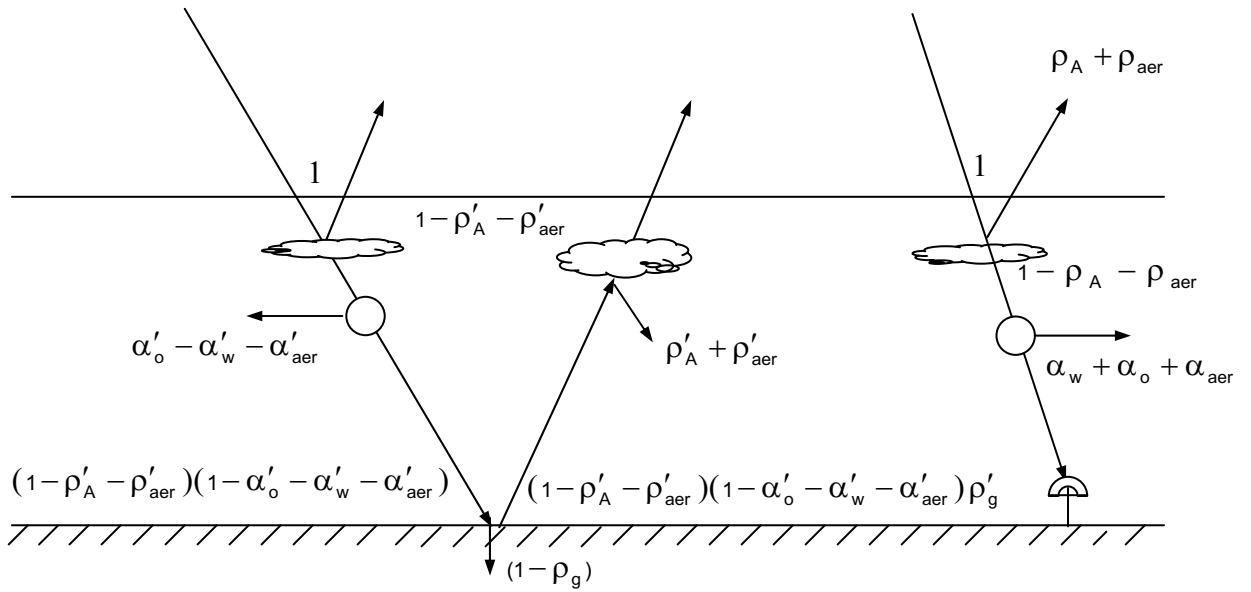
2.1 ระเบียบวิธีวิจัย

- 2.1.1 วิเคราะห์ผลการประเมินรังสีจากดวงอาทิตย์ด้วยแบบจำลองเดิมโดยจำแนกเป็นพื้นที่บริเวณภูเขาที่มีความคลาดเคลื่อนสูงกับพื้นที่อื่นที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า
- 2.1.2 วิเคราะห์ตัวแปรที่อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้แบบจำลองเดิมมีความคลาดเคลื่อนสูง
- 2.1.3 กำหนดสถานีวัดภาคพื้นดินเพื่อติดตั้งเครื่องมือวัด ประมวลข้อมูลและวิเคราะห์แนวโน้มเบื้องต้น
- 2.1.4 ประมวลข้อมูลวิเคราะห์ ปัญหาและอุปสรรค เพื่อสร้างและพัฒนาแบบจำลองใหม่
- 2.1.5 ทดสอบแบบจำลองที่ได้ วิเคราะห์ผลและแก้ไข/ปรับปรุงให้สมบูรณ์
- 2.1.6 สรุปผลการวิจัย วิเคราะห์ผลและข้อเสนอแนะ
- 2.1.7 จัดพิมพ์รายงานฉบับสมบูรณ์

2.2 หลักการทางวิชาการ

2.2.1 แบบจำลองเดิมที่ใช้คำนวณค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่พื้นดินโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม

ในการคำนวณค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่พื้นดินโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม ผู้วิจัยจะใช้วิธีของ Janjai et al. [9] ซึ่งพิจารณารังสีดวงอาทิตย์ที่ผ่านบรรยากาศมายังพื้นผิวโลก และถูกสะท้อนกลับไปยังดาวเทียมตามแผนภูมิในรูปที่ 2.1 เมื่อรังสีดวงอาทิตย์ 1 หน่วยผ่านบรรยากาศลงมาจะถูกกระเจิงด้วยฝุ่นละออง โมเลกุลอากาศ และเมฆ ซึ่งส่วนหนึ่งถูกกระเจิงออกไปสู่อวกาศภายนอก รังสีดวงอาทิตย์ที่เหลือจะถูกดูดกลืนโดยโอโซน ไอน้ำ และฝุ่นละออง เมื่อมาถึงพื้นผิวโลกจะถูกดูดกลืนโดยพื้นผิวโลก และส่วนที่เหลือจะถูกสะท้อนผ่านบรรยากาศกลับขึ้นไป โดยระหว่างทางจะถูกกระเจิงโดยโมเลกุลอากาศเมฆและฝุ่นละอองอีกครั้ง ในช่วงที่สะท้อนขึ้นจะไม่เกิดการดูดกลืนโดยโอโซน และไอน้ำ เพราะถือว่ารังสีดวงอาทิตย์ในช่วงแถบดูดกลืน (absorption band) ของตัวกลางเหล่านี้ถูกดูดกลืนหมดแล้ว ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการสมดุลของรังสีดวงอาทิตย์ได้ดังสมการ (2.1)



รูปที่ 2.1 แผนภูมิแสดงการดูดกลืนและการสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ที่ผ่านบรรยากาศโลกลงมาและถูกสะท้อนกลับออกมาไปสู่อวกาศภายนอก [9]

$$\rho'_{EA} = \rho'_A + \rho'_{aer} + (1 - \rho'_A - \rho'_{aer})^2 (1 - \alpha'_w - \alpha'_o - \alpha'_g - \alpha'_{aer}) \rho'_G \quad (2.1)$$

โดยที่

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

ρ'_A = สัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ของโมเลกุลอากาศและเมฆในช่วงความยาวคลื่นดาวเทียม

ρ'_{aer} = สัมประสิทธิ์การกระเจิงรังสีดวงอาทิตย์ของฝุ่นละอองในช่วงความยาวคลื่นดาวเทียม

α'_w = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของไอน้ำ ในช่วงความยาวคลื่นของดาวเทียม

α'_o = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของโอโซน ในช่วงความยาวคลื่นของดาวเทียม

α'_g = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของก๊าซอื่น ในช่วงความยาวคลื่นของดาวเทียม

α'_{aer} = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของฝุ่นละออง ในช่วงความยาวคลื่นของดาวเทียม

ρ'_G = สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวโลกในช่วงความยาวคลื่นดาวเทียม

จากสมการ(2.1) เราสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\rho'_A = \frac{-(1-2CB) \pm \sqrt{(1-2CB)^2 - 4C(A+CB^2)}}{2C} \quad (2.2)$$

โดยที่

$$A = \rho'_{aer} - \rho'_{EA}$$

$$B = 1 - \rho'_{aer}$$

$$C = (1 - \alpha'_w - \alpha'_o - \alpha'_g - \alpha'_{aer})\rho'_G$$

จากสมการ (2.2) จะเห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ทางขวามือ สามารถคำนวณได้จากข้อมูลดาวเทียมและข้อมูลภาคพื้นดิน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป ดังนั้นเราสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของโมเลกุลอากาศและเมฆ (ρ'_A) ได้

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ของบรรยากาศ (τ) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\tau = \frac{(1 - \rho'_A - \rho'_{aer})(1 - \alpha'_w - \alpha'_o - \alpha'_{aer})}{1 - (\rho'_A + \rho'_{aer})\rho'_G} \quad (2.3)$$

โดยที่ τ เป็นสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ของบรรยากาศโลกรายวัน

ρ'_A เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ของบรรยากาศในช่วงความยาวคลื่นกว้าง

(0.3 - 4.0 μm)

ρ'_{aer} เป็นสัมประสิทธิ์การกระเจิงรังสีดวงอาทิตย์ของฝุ่นละอองในบรรยากาศในช่วงความยาวคลื่นกว้าง

α'_w เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของไอน้ำในบรรยากาศในช่วงความยาวคลื่นกว้าง

α'_o เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของโอโซนในบรรยากาศโลกในช่วงความยาวคลื่นกว้าง

α_{aer} เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของฝุ่นละอองในบรรยากาศโลกในช่วงความยาวคลื่นกว้าง

ρ_G เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ของพื้นผิวโลกในช่วงความยาวคลื่นกว้าง

จากสมการ (2.3) ถ้าเราแทนค่า ρ'_A ซึ่งได้จากสมการ(2.1) เราจะสามารถหาค่า τ ได้และนำค่า τ มาคำนวณค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์โดยอาศัยสมการ(2.4)

$$H = \tau H_0 \quad (2.4)$$

โดยที่ τ เป็นสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ของบรรยากาศ

H เป็นความเข้มรังสีรวมรายวันที่ตกกระทบ

H_0 เป็นความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันนอกบรรยากาศของโลก

2.2.2 การคำนวณสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ของบรรยากาศและพื้นผิวโลก

(earth-atmospheric albedo, ρ'_{EA}) จากข้อมูลดาวเทียม

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของบรรยากาศและพื้นผิวโลก (ρ'_{EA}) เป็นค่าอัตราส่วนของรังสีดวงอาทิตย์จากนอกบรรยากาศที่ตกกระทบพื้นผิวโลกและบรรยากาศต่อความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่สะท้อนออกไปสู่อวกาศภายนอก สัมประสิทธิ์ดังกล่าวในกรณีที่รังสีที่กระทบอยู่ในตำแหน่งตั้งฉากกับพื้นผิวโลกสามารถคำนวณได้จาก gray level ของภาพถ่ายดาวเทียมโดยอาศัยตารางสอบเทียบ

สำหรับในกรณีทั่วไปซึ่งรังสีดวงอาทิตย์ตกทำมุมอื่น ๆ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของบรรยากาศและพื้นผิวโลกจะต้องคำนวณแก้โดยอาศัยสมการ [7,8]

$$\rho'_{EA} = \frac{\text{Pseudoreflectivity}}{\cos \theta_Z} \quad (2.5)$$

เมื่อ ρ'_{EA} = สัมประสิทธิ์การสะท้อนของรังสีดวงอาทิตย์บรรยากาศและพื้นผิวโลก

θ_Z = มุมซีกนิจของดวงอาทิตย์

ค่า θ_Z คำนวณได้จาก

$$\theta_Z = \cos^{-1} \theta_z \quad (2.6)$$

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (2.7)$$

เมื่อ δ = มุมเดคลิเนชัน (declination) ของดวงอาทิตย์
 ϕ = ละติจูด (latitude) ของสถานีวัด
 ω = มุมชั่วโมง (hour angle) ของดวงอาทิตย์

2.2.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวโลก (ground albedo , ρ_G)

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวโลกเป็นอัตราส่วนของรังสีที่สะท้อนจากพื้นผิวโลกต่อรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกโดยคิดในกรณีที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆและมีการแก้ไขผลจากการกระเจิงและการดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของบรรยากาศ สัมประสิทธิ์ดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากภาพถ่ายดาวเทียมโดยเลือกเวลาที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ การคำนวณดังกล่าวมีอยู่ด้วยกันหลายเทคนิค ในงานวิจัยนี้จะเลือกเทคนิคซึ่งมีหลักการดังนี้

ในการคำนวณตามเทคนิคดังกล่าวจะเริ่มต้นจากการนำภาพถ่ายดาวเทียมในช่วงเที่ยงวันมาทำ composite image ของแต่ละเดือน และทำการแปลง gray level ของ composite image ให้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของพื้นผิวโลกและบรรยากาศจากนั้นจะคำนวณแก้ผลของบรรยากาศโดยอาศัยความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวโลก (ρ_G) กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวโลกและบรรยากาศในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ (ρ'_{SAT}) จากเทคนิคดังกล่าวจะทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวโลกทั่วประเทศ

2.2.4 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของไอน้ำในบรรยากาศ (α_w)

ไอน้ำในบรรยากาศมีบทบาทสำคัญในการดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรด โดยการดูดกลืนจะขึ้นกับปริมาณของไอน้ำในบรรยากาศซึ่งสามารถหาได้จาก

$$W = 0.893329 \exp(0.1715 \text{ rh } P_s/T) \quad (2.8)$$

เมื่อ W เป็นปริมาณไอน้ำอิ่มตัว (cm)
 rh เป็นความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (decimal)
 T เป็นอุณหภูมิของอากาศ (K)
 P_s เป็นความดันไอน้ำอิ่มตัวของไอน้ำในอากาศ (mbar)

ค่าความดันไอน้ำอิ่มตัวหาได้จากสมการ (2.9)

$$P_s = \exp(26.23 - 5416/T) \quad (2.9)$$

ค่าของปริมาณไอน้ำในอากาศจะนำมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ของไอน้ำโดยอาศัยสมการ

$$\tau'_w = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{0\lambda} \tau_{w\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{0\lambda} d\lambda} \quad (2.10)$$

โดยที่ τ'_w คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ของไอน้ำในช่วงความยาวคลื่น λ_1 ถึง λ_2

$I_{0\lambda}$ คือ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉพาะขณะ (solar irradiance) นอกบรรยากาศโลก

λ_1 ถึง λ_2 คือ ช่วงความยาวคลื่นที่ห้วงวัดของดาวเทียมวัดได้

$\tau_{w\lambda}$ คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ของไอน้ำที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ซึ่งหาได้จากสมการ (2.11) Meclatchey [10]

$$\tau_{w\lambda} = \exp [-0.2385k_{w\lambda} W m_r / (1 + 20.07k_{w\lambda})] \quad (2.11)$$

เมื่อ W เป็นปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (precipitable water)

m_r เป็น air mass = $1/(\cos \theta_z)$

$k_{w\lambda}$ เป็น extinction coefficient เนื่องจากไอน้ำซึ่งสามารถหาได้จากรายงานวิจัยของ Leckner [11]

เนื่องจากค่า α_w จะรวมผลจากการดูดกลืนของก๊าซต่าง ๆ ด้วยโดยจะหาได้จากสัมประสิทธิ์ส่งผ่านของรังสีดวงอาทิตย์เนื่องจากการดูดกลืนของก๊าซ ดังสมการ

$$\tau_g = \exp[-1.41k_g m_r / (1 + 118.93k_g m_r)^{0.45}] \quad (2.12)$$

เมื่อ τ_g เป็นสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์เนื่องจากก๊าซ

k_g เป็น extinction coefficient ของการดูดกลืนของก๊าซซึ่งจะหาได้จากงานวิจัยของ Leckner [11]

m_r เป็น air mass

จากนั้นจะคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของไอน้ำและก๊าซในช่วงความยาวคลื่นแคบ และความยาวคลื่นกว้างโดยสมการ

$$\alpha'_w = 1 - \tau'_w \tau'_g \quad (2.13)$$

$$\alpha_w = 1 - \tau_w \tau_g \quad (2.14)$$

เมื่อ α'_w เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของไอน้ำและก๊าซในช่วงความยาวคลื่นแคบ

α_w เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของไอน้ำและก๊าซในช่วงความยาวคลื่นกว้าง

τ'_w เป็นสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ของไอน้ำในช่วงความยาวคลื่นแคบ

τ'_g เป็นสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ของก๊าซในช่วงความยาวคลื่นแคบ

τ_w เป็นสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ของไอน้ำในช่วงความยาวคลื่นกว้าง

τ_g เป็นสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ของก๊าซในช่วงความยาวคลื่นกว้าง

2.2.5 การคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของโอโซน

ก๊าซโอโซนในบรรยากาศของโลกจะดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ต และบางส่วนในช่วงแสงสว่าง (visible) ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของโอโซนโดยใช้แบบจำลอง Lacis and Hansen [12] โดยในช่วงความยาวคลื่นกว้างเขียนได้ดังสมการ

$$\alpha_0 = \frac{0.02118U_3}{1 + 0.042U_3 + 3.23U_3^2(10^{-4})} + \frac{1.082U_3}{(1 + 138.6U_3)^{0.805}} + \frac{0.0658U_3}{1 + (103.6U_3)^3} \quad (2.15)$$

และในช่วงความยาวคลื่นแคบตั้งสมการ

$$\alpha'_o = \frac{0.02118U_3}{1 + 0.042U_3 + 3.23U_3^2(10^{-4})} \quad (2.16)$$

เมื่อ α'_o เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของโอโซนในช่วงความยาวคลื่นแคบ

α_o เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของโอโซนในช่วงความยาวคลื่นกว้าง

U_3 เป็น ozone relative optical path length ซึ่งหาได้จากสมการ

$$U_3 = \text{Im}_r \quad (2.17)$$

เมื่อ I เป็นปริมาณโอโซน

m_r เป็น air mass

2.2.6 การคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและสัมประสิทธิ์การกระเจิงรังสีดวงอาทิตย์ของฝุ่นละออง

ฝุ่นละออง (aerosol) ในที่นี้จะหมายถึงของแข็งขนาดเล็กที่แทรกตัวอยู่ในบรรยากาศ นอกจากนี้ยังหมายถึงละอองน้ำเล็ก (water droplet) และเกร็ดน้ำแข็งที่อยู่ในบรรยากาศด้วย การกระจายของฝุ่นละอองในบรรยากาศจะขึ้นกับภูมิประเทศ ภูมิอากาศและกิจกรรมของมนุษย์ เช่น ในเมืองใหญ่หรือเมืองอุตสาหกรรมจะมีฝุ่นละอองที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมและยานยนต์ เราจะเรียกฝุ่นที่เกิดจากชุมชนเมืองว่า “ฝุ่นละอองแบบ urban” ส่วนฝุ่นละอองที่มีองค์ประกอบของหยดน้ำเล็กๆ เหนือพื้นผิวทะเลหรือมหาสมุทรจะเรียกว่า “ฝุ่นละอองแบบ maritime” ส่วนฝุ่นละอองที่เกิดจากการฟุ้งกระจายของดินจะเรียกว่า “ฝุ่นละอองแบบ continental” ฝุ่นละอองแต่ละแบบจะมีขนาดและคุณสมบัติในการดูดกลืนและการกระเจิงรังสีดวงอาทิตย์แตกต่างกัน ฝุ่นละอองจะทำให้รังสีดวงอาทิตย์ที่เคลื่อนที่ผ่านบรรยากาศมีค่าลดลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่บรรยากาศมีมลพิษสูง โดยทำให้รังสีดวงอาทิตย์ลดลงได้ถึง 20% หรือมากกว่า ฝุ่นละอองจะทำให้รังสีดวงอาทิตย์ลดลงโดยการดูดกลืนและการกระเจิง โดยส่วนที่ถูกกระเจิงขึ้นไปสู่อวกาศ ดาวเทียมจะสามารถตรวจวัดได้ ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและการกระเจิงรังสีดวงอาทิตย์ของฝุ่นละออง ตาม Tanre et al. [13] ซึ่งจะหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\rho_{aer} = D_{aerosol} D_{sc} \quad (2.18)$$

$$\alpha_{aer} = D_{ab} D_{aerosol} \quad (2.19)$$

เมื่อ ρ_{aer} คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงรังสีดวงอาทิตย์ของฝุ่นละออง
 α_{aer} คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของฝุ่นละออง
 D_{sc} เป็นสัดส่วนของรังสีดวงอาทิตย์ที่ถูกกระเจิงโดยฝุ่นละออง
 D_{ab} เป็นสัดส่วนของรังสีดวงอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนโดยฝุ่นละออง
 ส่วนค่า $D_{aerosol}$ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$D_{aerosol} = 0.3631 - 0.0222(VIS) + 0.0002(VIS)^2 \quad (2.20)$$

$D_{aerosol}$ คือ สัดส่วนการลดลงของรังสีดวงอาทิตย์เนื่องจากฝุ่นละออง

VIS คือ ค่ารายวันเฉลี่ยจากข้อมูลทัศนวิสัยที่เวลา 10.00 13.00 และ 16.00 (km)

2.2.7 การคำนวณสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ของบรรยากาศ (ρ_A) ในช่วงความยาวคลื่นกว้าง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของบรรยากาศในช่วงความยาวคลื่นของดาวเทียม ρ'_A สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.2) แต่ในการใช้งานจำเป็นต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ในช่วงความยาวคลื่นกว้าง (ρ_A) ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.3 – 4.0 μm ในการแปลงค่า ρ'_A ให้เป็นค่า ρ_A ในกรณีดาวเทียม GMS 5 จะทำได้โดยอาศัยสมการ (เสริม จันทรฉาย และ จรุงแสง ลักษณะบุญส่ง, 2542)

$$\rho_A = -0.0768 + 1.4846 \rho'_A \quad (2.21)$$

2.2.8 การหาความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่คำนวณได้ในรูปของ Root Mean Square Error (RMSE) , Mean Bias Error (MBE)

ในการศึกษาการเปรียบเทียบความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ จะนำค่าที่ได้จากการวัดมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยแสดงความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่คำนวณได้ในรูปของ Root Mean Square Error (RMSE) , Mean Bias Error (MBE) และกำลังสองของ Correlation Coefficient (R^2) ของแต่ละปี โดยค่าทั้งสองหาได้จากสมการ (2.22) และ (2.23) และจะบอกค่า RMSE และ MBE ในรูปของเปอร์เซ็นต์ โดยเทียบกับค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดของข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ [7,8]

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (H_{model} - H_{meas})^2}{N}} \quad (2.22)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (H_{\text{model}} - H_{\text{meas}})}{N} \quad (2.23)$$

เมื่อ H_{model} = ความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากการคำนวณ ($\text{MJ/m}^2\text{-day}$)

H_{meas} = ความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากการวัด ($\text{MJ/m}^2\text{-day}$)

N = จำนวนข้อมูล

บทที่ 3

การดำเนินการและผล

ในบทนี้จะแสดงการดำเนินการ ผลการทดลองต่างๆ การวิเคราะห์ผลตามที่วางแผนไว้ ดังนี้

3.1 ผลการประเมินรังสีจากดวงอาทิตย์ด้วยแบบจำลองเดิมโดยจำแนกเป็นพื้นที่ 2 แบบ

โดยทั่วไปยังไม่มีนิยามของบริเวณภูเขาอย่างแน่ชัด แต่ในงานวิจัยนี้จะอ้างอิงว่าพื้นที่บริเวณภูเขาหมายถึงพื้นที่ผิวโลกที่มีระดับความสูงประมาณ 610 เมตร (2000 ฟุต) จากบริเวณที่ราบ โดยรอบตาม Britannica Encyclopedia ดังนั้นจะถือว่าบริเวณพื้นที่ที่มีระดับสูงกว่า 600 เมตรจากระดับน้ำทะเลเป็นพื้นที่บริเวณภูเขา และจากผลการคำนวณค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองเดิมดังในบทที่ 2 และเปรียบเทียบกับค่าจากการวัดของสถานีวัดความเข้มรังสีรวมดวงอาทิตย์ภาคพื้นดินของเครือข่ายของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานจำนวน 25 สถานีของกิตติศักดิ์ เสงหิรัญญวงษ์และปริญญา ศรีสวัสดิ์[8] ผู้วิจัยได้จำแนกจังหวัดที่ตั้งสถานีวัดความเข้มรังสีรวมดวงอาทิตย์ภาคพื้นดินดังกล่าวออกเป็น 2 แบบ คือ ก) พื้นที่บริเวณภูเขามี 6 จังหวัด ได้แก่ เชียงใหม่ เชียงราย แม่ฮ่องสอน น่าน ดาก เพชรบูรณ์ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนของผลการประเมินรังสีจากดวงอาทิตย์ด้วยแบบจำลองเดิมเฉลี่ยสูงกว่า กับ ข) พื้นที่อื่น 19 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพฯ นครสวรรค์ ลพบุรี ทองผาภูมิ จันทบุรี ปราจีนบุรี ประจวบคีรีขันธ์ พิชณุโลก หนองคาย ขอนแก่น นครพนม สุรินทร์ อุบลราชธานี นครราชสีมา ระนอง เกาะสมุย ภูเก็ต หาดใหญ่ นราธิวาส ที่มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำกว่า ดังในตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงในรูป

Root Mean Square Error (RMSE), Mean Bias Error (MBE) ของพื้นที่บริเวณภูเขา
มี 6 จังหวัด

สถานีที่	รายชื่อสถานี	Root Mean Square Error		Mean Bias Error	
		MJ/m ² - day	Percent(%)	MJ/m ² - day	Percent(%)
1	เชียงใหม่	1.23	6.9	0.64	3.6
2	เชียงราย	2.54	15.9	2.13	13.3
3	แม่ฮ่องสอน	2.11	12.8	1.49	9
4	น่าน	1.74	9.9	0.28	1.6
5	ตาก	1.73	10.1	-0.29	-1.7
6	เพชรบูรณ์	1.39	7.7	0.03	0.2
	เฉลี่ย	1.79	10.6	0.71	4.333

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงในรูป

Root Mean Square Error (RMSE) , Mean Bias Error (MBE) ของพื้นที่อื่น
19 จังหวัด

สถานีที่	รายชื่อสถานี	Root Mean Square Error		Mean Bias Error	
		MJ/m ² - day	Percent(%)	MJ/m ² - day	Percent(%)
1	กรุงเทพฯ	1.95	11.6	1.16	6.9
2	นครสวรรค์	1.03	5.6	0.47	2.5
3	ลพบุรี	1.74	9.5	0.51	2.8
4	ทองผาภูมิ	1.31	7.4	0.87	5
5	จันทบุรี	2.18	12.3	-1.1	-6.2
6	ปราจีนบุรี	1.71	9.2	-0.5	-2.7

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัด (ต่อ)

สถานี ที่	รายชื่อสถานี	Root Mean Square Error		Mean Bias Error	
		MJ/m ² - day	Percent(%)	MJ/m ² - day	Percent(%)
7	ประจวบคีรีขันธ์	1.14	6.2	0.35	1.9
8	พิษณุโลก	1.18	6.5	-0.2	-1.1
9	หนองคาย	1.56	8.9	0.92	5.2
10	ขอนแก่น	1.44	7.8	0.56	3
11	นครพนม	1.86	10.3	0.46	2.5
12	สุรินทร์	1.62	8.6	0.25	1.3
13	อุบลราชธานี	1.3	7	0.42	2.3
14	นครราชสีมา	1.22	6.8	0.32	1.8
15	ระนอง	1.76	10.6	0.32	2
16	เกาะสมุย	1.38	7.2	-0.1	-0.5
17	ภูเก็ต	0.72	3.6	-0.1	-0.5
18	หาดใหญ่	2.26	12.4	0.65	3.6
19	นราธิวาส	1.22	6.2	0.01	0.1
	เฉลี่ย	1.50	8.3	0.28	1.6

จากผลในตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 จะเห็นว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของพื้นที่บริเวณภูเขา มี 6 จังหวัดจะสูงกว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของพื้นที่อื่น 19 จังหวัด

3.2 การวิเคราะห์ตัวแปรที่อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้แบบจำลองเดิมมีความคลาดเคลื่อนสูง

โดยทั่วไปสาเหตุของความคลาดเคลื่อนของผลการคำนวณค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่พื้นดินโดยใช้ข้อมูลดาวเทียมอาจแบ่งได้เป็น 3 เหตุ ได้แก่ ก.) ความไม่สมบูรณ์ของแบบจำลอง เช่นอาจมีตัวแปรอื่นที่สำคัญแต่ในแบบจำลองไม่ได้ใช้ ข.) ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลภาคพื้นดินเช่น ค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ข้อมูลอุณหภูมิ ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ข้อมูลทัศนวิสัย และความคลาดเคลื่อนข้อมูลดาวเทียมที่นำมาใช้ประกอบการคำนวณ ค.) ธรรมชาติของการใช้เทคนิคการคำนวณความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ด้วยข้อมูลดาวเทียม ที่ใช้

ภาพดาวเทียมเพียงชั่วโม่งละ 1 ภาพ ซึ่งเป็นข้อมูลเฉพาะขณะ (instantaneous data) มีความแตกต่างจากค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ได้จากการวัดที่สถานีภาคพื้นดินซึ่งเป็นค่ารวมตลอดทั้งชั่วโม่ง

ตัวแปรที่ไม่มีในแบบจำลองเดิมอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลการคำนวณค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ของแบบจำลองคลาดเคลื่อนจากข้อมูลจากการวัดที่สถานีภาคพื้นดินบริเวณภูเขา ได้แก่

- ก) ค่าระดับความสูงของพื้นที่
- ข) ค่าสภาพหมอกใกล้พื้นผิวเนื่องจากอิทธิพลของป่าไม้และภูเขาซึ่งมักมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรอบวันค่อนข้างรวดเร็ว
- ค) ลักษณะการถูกบังเงาของพื้นที่เนื่องจากภูเขา

3.3 การกำหนดสถานีวัดภาคพื้นดินเพื่อติดตั้งเครื่องมือวัด ประมวลข้อมูลและวิเคราะห์แนวโน้มเบื้องต้น

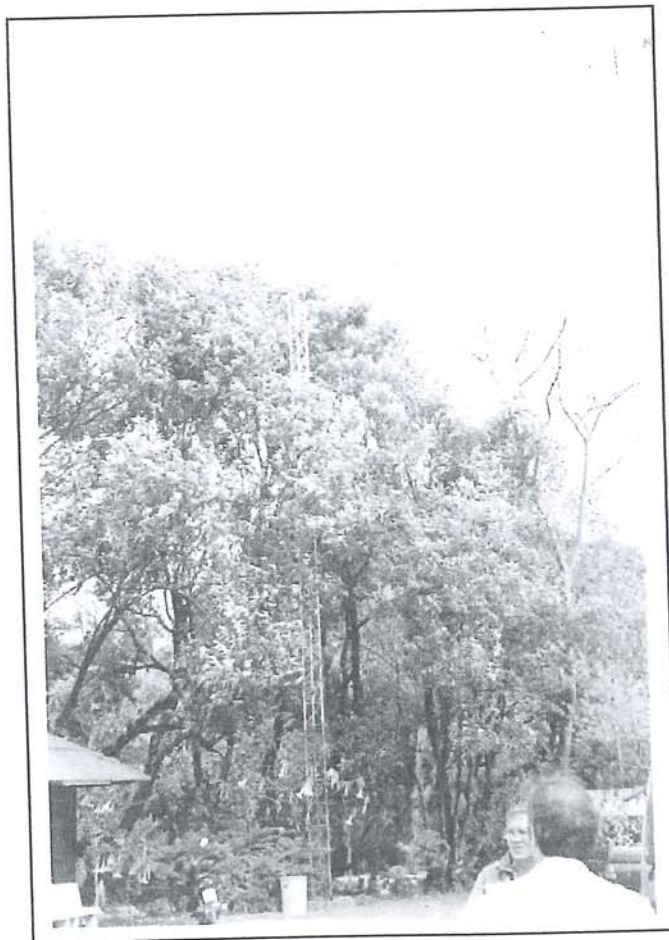
ผู้วิจัยได้เลือกพื้นที่บริเวณภูเขาเพื่อติดตั้งเครื่องมือวัดและศึกษาที่บริเวณอุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์เพราะมีสมมุติฐานว่าค่าระดับความสูงของพื้นที่จะมีผลต่อความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองเดิมมากที่สุด และดอยอินทนนท์เป็นที่ตั้งของยอดเขาที่สูงที่สุดในประเทศไทยคือสูงประมาณ 2,565 เมตรจากระดับน้ำทะเล ทำให้สามารถเลือกช่วงระดับความสูงที่แตกต่างกันได้มาก แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านงบประมาณและอาคารสถานที่สำหรับการติดตั้งเครื่องวัดรังสีรวมดวงอาทิตย์และเครื่องบันทึกผลซึ่งต้องมีไฟฟ้าตลอดเวลาและมีความต่อเนื่อง จึงได้กำหนดสถานีวัดไว้เพียง 3 ระดับได้แก่

- 1) ศูนย์บริการนักท่องเที่ยวใกล้น้ำตกแม่กลางระดับความสูงประมาณ 365 เมตร พิกัด $18^{\circ} 35.3' \text{ N}, 98^{\circ} 29.2' \text{ E}$
- 2) ที่ทำการอุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ระดับความสูงประมาณ 1,250 เมตร พิกัด $18^{\circ} 32.5' \text{ N}, 98^{\circ} 31.3' \text{ E}$
- 3) สถานีเรดาร์ยอดดอยอินทนนท์ของกองทัพอากาศระดับความสูงประมาณ 2,560 เมตร พิกัด $18^{\circ} 29.8' \text{ N}, 98^{\circ} 40.3' \text{ E}$

แผนที่ที่ตั้งสถานีวัดทั้ง 3 แห่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 ส่วนสถานที่ติดตั้งเครื่องวัดและเครื่องบันทึกผลแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 ถึง รูปที่ 3.6



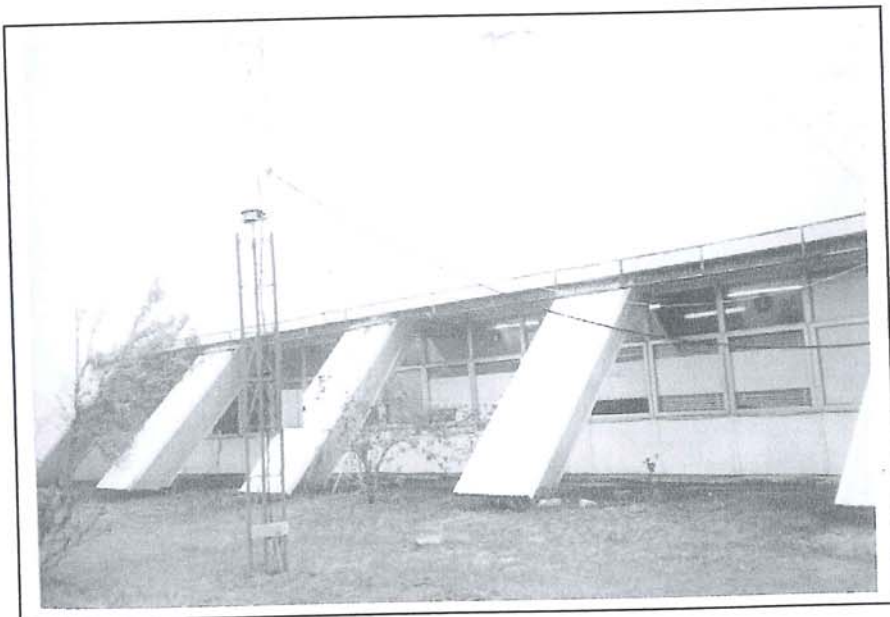
รูปที่ 3.3 อาคารที่ติดตั้งเครื่องบันทึกผลที่ศูนย์บริการนักท่องเที่ยวใกล้น้ำตกแม่กลาง



รูปที่ 3.4 สถานที่ติดตั้งเครื่องวัดใกล้ที่ทำการอุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์



รูปที่ 3.5 อาคารที่ติดตั้งเครื่องบันทึกผล ณ ที่ทำการอุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์



รูปที่ 3.6 สถานที่ติดตั้งเครื่องวัดและอาคารที่ติดตั้งเครื่องบันทึกผล ณ สถานีเรดาร์ยอดดอยอินทนนท์
ของกองทัพอากาศ

3.4 การประมวลผลข้อมูลจากสถานีวัดภาคพื้นดินบริเวณดอยอินทนนท์ 3 ระดับ ในช่วงปี 2006-2009

เนื่องได้เริ่มเก็บข้อมูลได้ไม่พร้อมกันทั้ง 3 ระดับ คือ ข้อมูลจากสถานีวัดที่ศูนย์บริการนักท่องเที่ยวใกล้น้ำตกแม่กลาง (Maeklang) และสถานีวัดที่ทำการอุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ (Office) สามารถเริ่มเก็บข้อมูลได้ในกลางปี 2005 ส่วนสถานีวัดที่สถานีเรดาร์ยอดดอยอินทนนท์ (Radar) ของกองทัพอากาศเริ่ม เก็บข้อมูลได้ในปลายปี 2005 แต่ข้อมูลในช่วงเริ่มต้นจะมีความไม่ต่อเนื่องเนื่องจากอุปกรณ์และไฟฟ้าสำรองขัดข้อง จนกระทั่งปี 2006 จึงเริ่มเก็บข้อมูลได้ต่อเนื่อง

3.4.1 ผลการประมวลผลข้อมูลรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ($\bar{H}$) จากสถานีวัดภาคพื้นดินบริเวณดอยอินทนนท์ 3 ระดับ ในช่วงปี 2006-2009

ข้อมูลรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนได้แสดงในตารางที่ 3.3 และในรูปที่ 3.7

ตารางที่ 3.3 รังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ($\bar{H}$) จากสถานีวัดภาคพื้นดินบริเวณดอยอินทนนท์ 3 ระดับ ในช่วงปี 2006-2009

month	Radar			Office			Maeklang		
	Hbar	stdev	%stdev	Hbar	stdev	%stdev	Hbar	stdev	%stdev
	(MJ/m ² -day)			(MJ/m ² -day)			(MJ/m ² -day)		
Jan	20.75	4.39	21.1	16.74	4.07	24.3	17.99	2.82	15.7
Feb	20.82	5.39	25.9	18.21	3.98	21.8	18.71	3.12	16.7
Mar	22.30	5.83	26.2	19.58	4.08	20.8	18.24	3.86	21.1
Apr	16.96	6.57	38.8	17.17	5.04	29.3	18.95	3.92	20.67
May	13.16	5.99	45.5	13.68	6.42	46.9	16.33	5.54	33.9
Jun	11.37	4.89	43.0	13.99	4.72	33.8	15.50	3.83	24.7
Jul	10.05	4.40	43.8	12.99	4.88	37.6	13.56	4.02	29.6
Aug	11.44	4.93	43.1	14.11	5.34	37.8	15.08	4.43	29.4
Sep	11.95	4.55	38.1	13.76	5.07	36.9	16.52	4.59	27.8
Oct	12.11	5.35	44.1	11.88	5.34	44.9	16.50	5.03	30.5
Nov	16.93	6.17	36.5	15.74	4.65	29.6	16.87	4.07	24.1
Dec	18.82	3.96	21.0	13.76	4.25	30.9	17.29	2.1	12.1
average>	15.55	5.20	35.59	15.13	4.82	32.88	16.80	3.94	23.86

ตารางที่ 3.4 รังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ($\bar{H}$) ในฤดูแล้งจากสถานีวัดภาคพื้นดิน บริเวณดอยอินทนนท์ 3 ระดับ ในช่วงปี 2006-2009

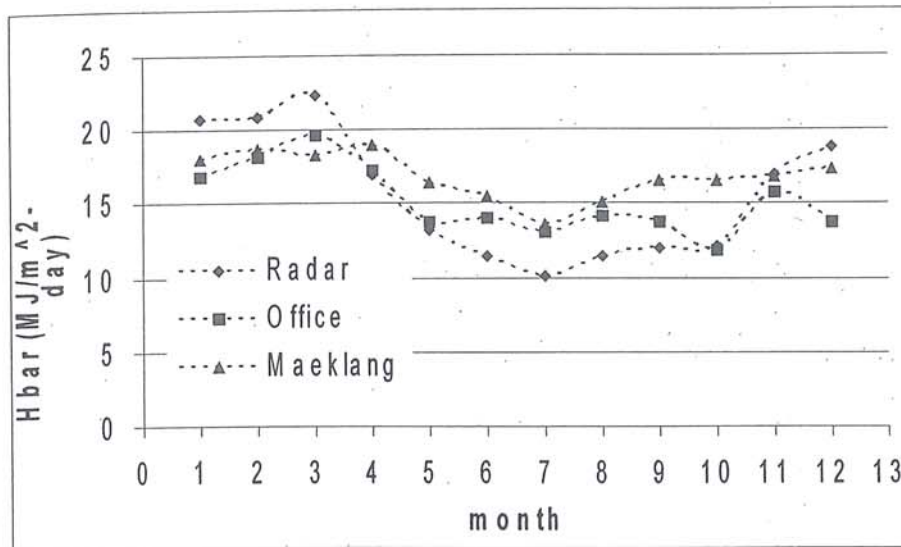
dry season						
	Radar		Office		Maeklang	
month	Hbar	%stdev	Hbar	%stdev	Hbar	%stdev
	(MJ/m ² -day)		(MJ/m ² -day)		(MJ/m ² -day)	
Nov	16.93	36.5	15.74	29.6	16.87	24.1
Dec	18.82	21.0	13.76	30.9	17.29	12.1
Jan	20.75	21.1	16.74	24.3	17.99	15.7
Feb	20.82	25.9	18.21	21.8	18.71	16.7
Mar	22.30	26.2	19.58	20.8	18.24	21.1
Apr	16.96	38.8	17.17	29.3	18.95	20.67
average>	19.43	28.25	16.87	26.12	18.01	18.40

จากการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวดังแสดงในตารางที่ 3.4 พบว่าในฤดูแล้งท้องฟ้าแจ่มใส ในช่วงเดือน พฤศจิกายน ธันวาคม มกราคม กุมภาพันธ์ มีนาคม และเมษายน ค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีเรดาร์ยอดดอยอินทนนท์ซึ่งอยู่บนพื้นที่ระดับสูงสุดจะมีค่าสูงกว่าค่าที่สองสถานีวัด และค่าบริเวณที่ทำการอุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ต่ำกว่าค่าสถานีวัดที่ศูนย์บริการนักท่องเที่ยวใกล้น้ำตกแม่กลางซึ่งอยู่บนพื้นที่ระดับต่ำสุด ค่าเปอร์เซ็นต์ความแปรปรวนเฉลี่ยในฤดูแล้งของสถานีเรดาร์ยอดดอยอินทนนท์ สถานีที่ทำการอุทยานแห่งชาติและสถานีที่ศูนย์บริการนักท่องเที่ยวใกล้น้ำตกแม่กลางมีค่าเป็น 28.25, 26.12 และ 18.40 % ตามลำดับ อาจเป็นเพราะว่าบนยอดดอยมีโอกาสจะมีเมฆหมอกหรือฝนในช่วงฤดูแล้งมากกว่าในพื้นที่ที่อยู่ระดับต่ำกว่า

ตารางที่ 3.5 รังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน($\bar{H}$) ในฤดูฝนจากสถานีวัดภาคพื้นดิน
บริเวณดอยอินทนนท์ 3 ระดับ ในช่วงปี 2006-2009

month	rainy season					
	Radar		Office		Maeklang	
	Hbar (MJ/m ² - day)	%stdev	Hbar (MJ/m ² - day)	%stdev	Hbar (MJ/m ² - day)	%stdev
May	13.16	45.5	13.68	46.9	16.33	33.9
Jun	11.37	43.0	13.99	33.8	15.50	24.7
Jul	10.05	43.8	12.99	37.6	13.56	29.6
Aug	11.44	43.1	14.11	37.8	15.08	29.4
Sep	11.95	38.1	13.76	36.9	16.52	27.8
Oct	12.11	44.1	11.88	44.9	16.50	30.5
average>	11.68	42.93	13.40	39.65	15.58	29.32

จากข้อมูลตามตารางที่ 3.5 แสดงว่าในฤดูฝนจะมีปริมาณเมฆหมอกมากท้องฟ้าไม่แจ่มใส ในช่วงเดือน พฤษภาคม ถึง ตุลาคม ค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนเฉลี่ยในฤดูฝนที่สถานีวัดที่ ศูนย์บริการนักท่องเที่ยวใกล้น้ำตกแม่กลางจะมีค่าสูงกว่าค่าที่สถานีวัดที่ทำการอุทยานแห่งชาติ ดอยอินทนนท์และค่าที่สถานีเรดาร์ยอดดอยอินทนนท์ซึ่งอยู่ระดับสูงขึ้นไปโดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 15.58, 13.40 และ 11.68 MJ/m²-day ตามลำดับ และมีเปอร์เซ็นต์ความแปรปรวนในแต่ละวัน ต่ำกว่าโดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 29.32, 39.65 และ 42.93 % ตามลำดับ แสดงว่าในฤดูฝนมีแนวโน้ม ว่าค่ารังสีรวมรายวันจะแปรผกผันกับค่าระดับความสูงของพื้นที่ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในช่วงฤดูฝน บริเวณยอดดอยมักจะมีเมฆหมอกปกคลุมนานกว่าบริเวณพื้นที่ระดับต่ำกว่า

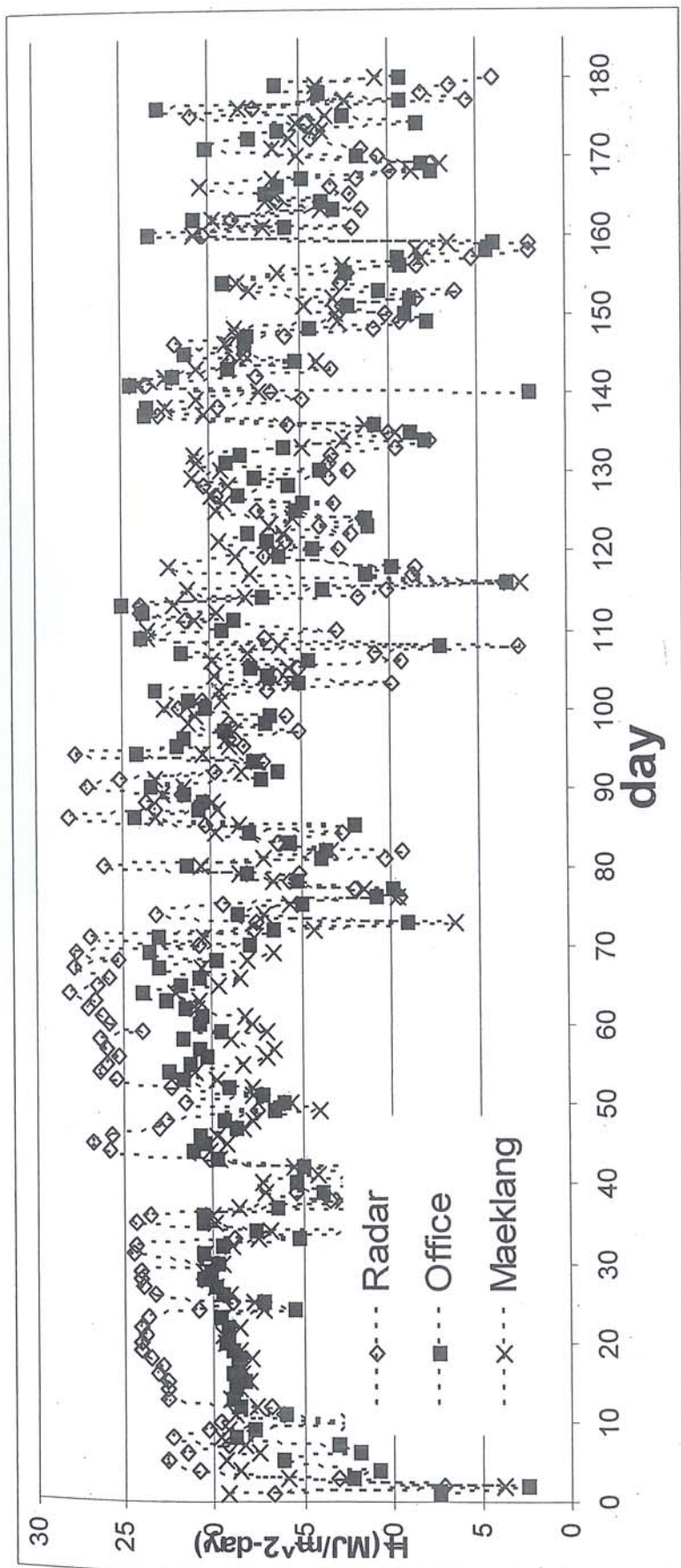


รูปที่ 3.7 ค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ($\bar{H}$) จากสถานีวัดภาคพื้นดินบริเวณดอยอินทนนท์ 3 ระดับ ในช่วงปี 2006-2009

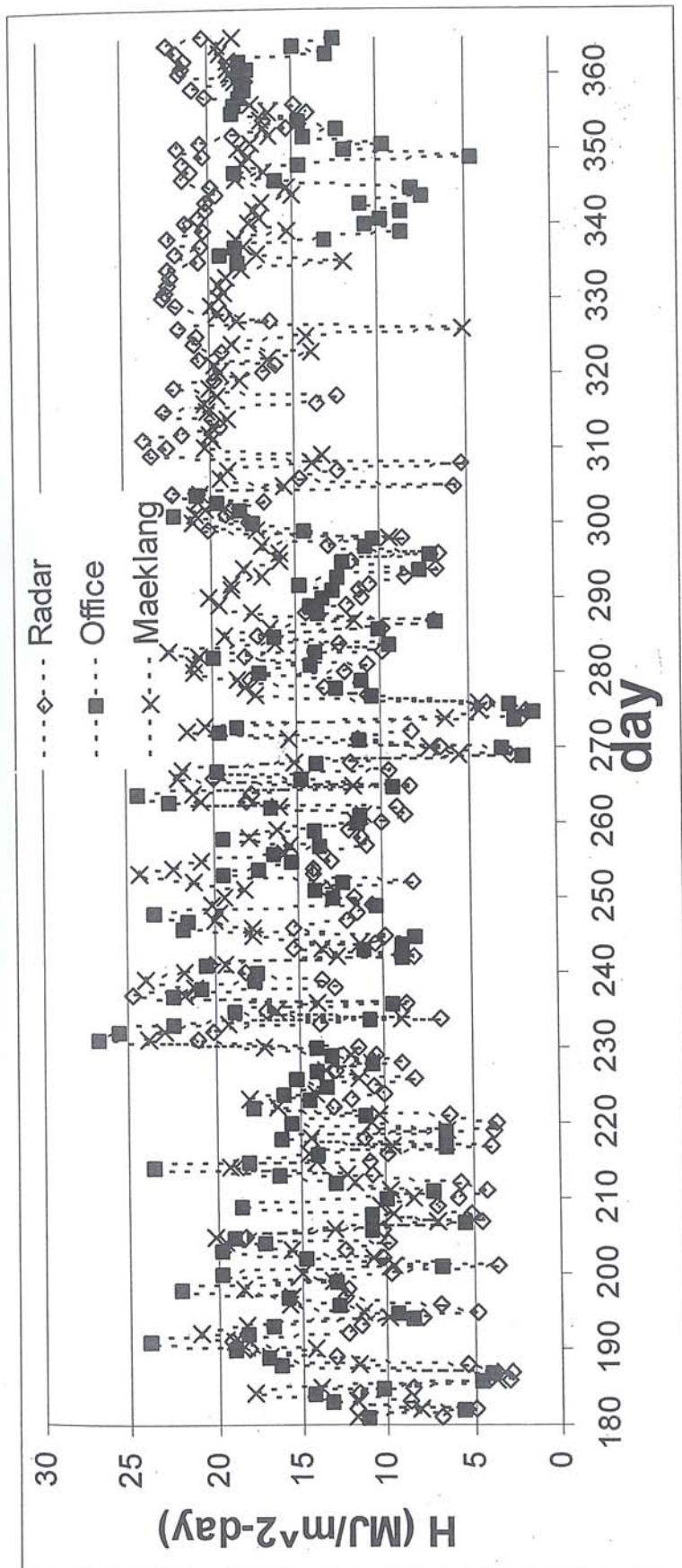
3.4.2 ผลการประมวลข้อมูลรังสีรวมรายวัน (H) จากสถานีวัดภาคพื้นดินบริเวณดอยอินทนนท์ 3 ระดับ ในช่วงปี 2006-2009 และการเปรียบเทียบข้อมูล 3 ระดับกับ 2 สถานีที่พื้นราบ

ข้อมูลรังสีรวมรายวัน (H) จากสถานีวัดภาคพื้นดินบริเวณดอยอินทนนท์ 3 ระดับ ในช่วงปี 2006-2009 ได้แสดงไว้ในภาคผนวก (ข) และในรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 เป็นตัวอย่างการเปรียบเทียบของค่ารังสีรวมรายวันจากสถานีวัดภาคพื้นดินบริเวณดอยอินทนนท์ 3 ระดับ ของปี 2009 จากรูปจะเห็นว่าในวันที่ค่ารังสีรวมรายวันสูง ๆ (มากกว่า $20 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$) มักจะเกิดในวันที่มีท้องฟ้าแจ่มใสตลอดจากเช้าถึงเย็นทำให้ค่ารังสีรวมรายวันที่สถานีเรดาร์ยอดดอยอินทนนท์ซึ่งอยู่บนพื้นที่ระดับสูงสุดจะมีค่าสูงกว่าค่าที่สองสถานีวัดที่อยู่ระดับต่ำกว่าในวันเดียวกันคือที่ทำการอุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์และสถานีวัดที่ศูนย์บริการนักท่องเที่ยวใกล้น้ำตกแม่กลาง ส่วนในวันที่ค่ารังสีรวมรายวันต่ำ ๆ (ต่ำกว่า $15 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$) มักจะเกิดในวันที่มีท้องฟ้ามีเมฆ หมอกหรือฝนในช่วงกลางวันทำให้ค่ารังสีรวมรายวันที่สถานีเรดาร์ยอดดอยอินทนนท์ซึ่งอยู่บนพื้นที่ระดับสูงสุดจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่สองสถานีวัดซึ่งอยู่บนพื้นที่ระดับต่ำกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในช่วงฤดูฝนบริเวณยอดดอยมักจะมีเมฆหมอกปกคลุมนานกว่าบริเวณพื้นที่ระดับต่ำกว่า และในบริเวณพื้นที่ระดับต่ำกว่าจะมีช่วงท้องฟ้าแจ่มใสที่มีแสงแดดสลับบ้างในรอบวัน ดังข้อมูลในภาคผนวก ก. และ ในรูปที่ 3.8 และในรูปที่ 3.9

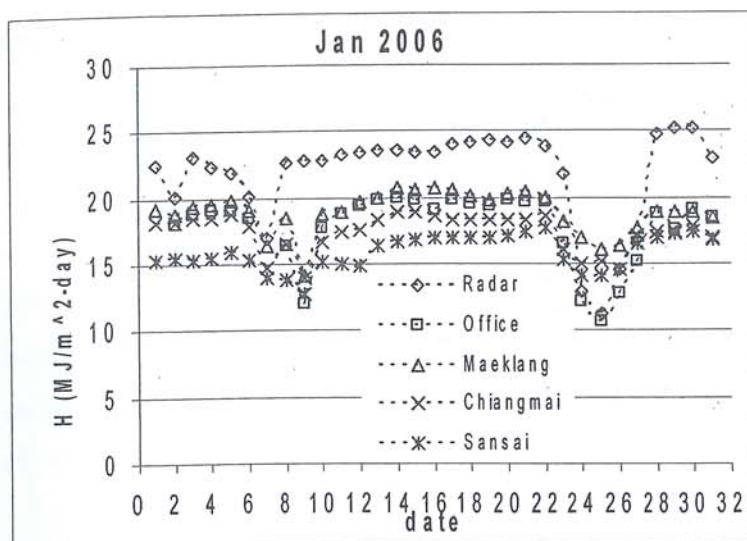
สำหรับการเปรียบเทียบข้อมูล 3 ระดับกับ 2 สถานีที่พื้นราบที่ อ. เมือง และ อ. สันทราย จ. เชียงใหม่ ในปี 2006 แสดงไว้ในรูปที่ 3.10 และในรูปที่ 3.12



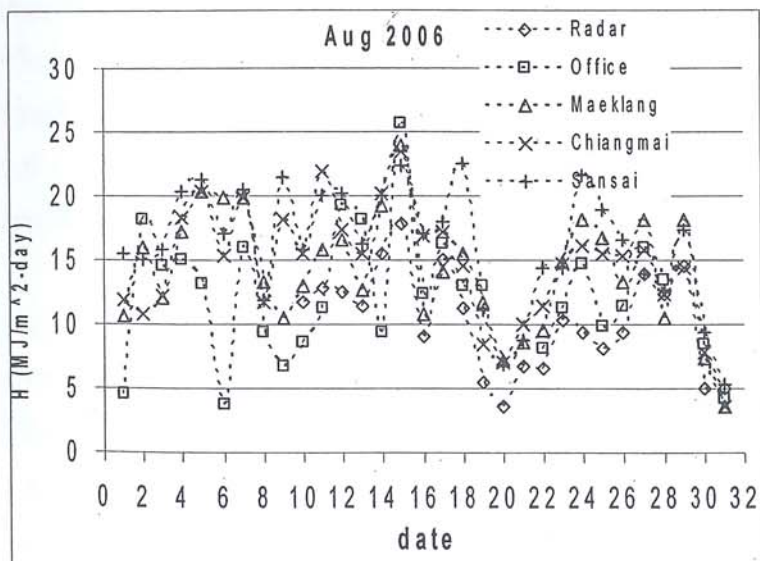
รูปที่ 3.8 เปรียบเทียบค่ารังสีรวมรายวัน(H) จากสถานีวัดภาคพื้นดินบริเวณคอยอินทนนท์ 3 ระดับ ในช่วง 6 เดือนแรกของปี 2009



รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบค่ารังสีรวมรายวัน(H) จากสถานีวัดภาคพื้นดินบริเวณคอยอินทนนท์ 3 ระดับ ในช่วง 6 เดือนหลังของปี2009



รูปที่ 3.10 การเปรียบเทียบข้อมูล 3 ระดับกับ 2 สถานีที่พื้นราบที่ อ. เมือง และ อ. สันทราย จ. เชียงใหม่ ในเดือนมกราคม ปี 2006



รูปที่ 3.11 การเปรียบเทียบข้อมูล 3 ระดับกับ 2 สถานีที่พื้นราบที่ อ. เมือง และ อ. สันทราย จ. เชียงใหม่ ในเดือนสิงหาคม ปี 2006

3.4.3 ผลการประมวลข้อมูลรังสีรวมรายชั่วโมง (I) จากสถานีวัดภาคพื้นดินบริเวณดอยอินทนนท์ 3 ระดับ ในช่วงปี 2006-2009

จากการเปรียบเทียบข้อมูลรังสีรวมรายชั่วโมงจากสถานีวัดภาคพื้นดินบริเวณดอยอินทนนท์ 3 ระดับ ในช่วงปี 2006-2009 พบว่ามีการกระจายใน ลักษณะ คือ

ก) ในฤดูหนาวมักจะมีท้องฟ้าแจ่มใสตลอดจากเช้าถึงเย็น ค่ารังสีรวมรายวันค่อนข้างสูง (มากกว่า $20 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$) ค่ารังสีรวมรายชั่วโมงจากการวัดที่สถานีเรดาร์ยอดดอยอินทนนท์ ซึ่งอยู่บนพื้นที่ระดับสูงสุดจะมีค่าสูงกว่าค่าจากการวัดสถานีที่ทำการอุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ และสถานีวัดที่ศูนย์บริการนักท่องเที่ยวใกล้น้ำตกแม่กลางซึ่งอยู่พื้นที่ระดับต่ำกว่าในเวลาเดียวกันตามลำดับ ดังในตัวอย่างรูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14

ข) ในฤดูฝนมักจะมีเมฆ หมอก หรือฝนตกทำให้ค่ารังสีรวมรายวันค่อนข้างต่ำ (ต่ำกว่า $15 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$) ค่ารังสีรวมรายชั่วโมงจากการวัดที่สถานีที่ศูนย์บริการนักท่องเที่ยวใกล้น้ำตกแม่กลางซึ่งอยู่บนพื้นที่ระดับต่ำสุดจะมีค่าสูงกว่าค่าจากการวัดสถานีที่ทำการอุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์และสถานีวัดที่สถานีเรดาร์ยอดดอยอินทนนท์ซึ่งอยู่พื้นที่ระดับสูงกว่าในเวลาเดียวกันตามลำดับ ดังในตัวอย่างรูปที่ 3.15 และรูปที่ 3.16

ค) ในฤดูฝนบางวัน ค่ารังสีรวมรายชั่วโมงจากการวัดที่สถานีทั้ง 3 ระดับมีค่าสูงต่ำไม่เรียงกันตามระดับความสูงของพื้นที่ ดังในตัวอย่างรูปที่ 3.17 และรูปที่ 3.18 อาจเนื่องมาจากในบริเวณภูเขามียาไม้ที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะของเมฆ หมอกหรือฝนค่อนข้างรวดเร็วแม้ว่าจะอยู่ในพื้นที่ระยะที่ไม่ห่างกันมาก

3.5 ผลการประมวลข้อมูลดิจิตอลจากดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาที่ตำแหน่งตรงกับสถานีวัดภาคพื้นดิน 3 ระดับในช่วงวันเวลาเดียวกัน

จากการประมวลข้อมูลดิจิตอลจากดาวเทียมที่ตำแหน่งตรงกับสถานีวัดภาคพื้นดิน 3 ระดับในช่วงวันเวลาเดียวกัน พบว่าทั้งค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของระบบที่ประกอบด้วยเมฆ อากาศและพื้นผิวโลก (ρ'_{EA}) ตามสมการ(2.1) และค่าปริมาณโอโซนจากข้อมูลดาวเทียมตามวิธีการในหัวข้อ 2.2.6 เป็นค่าเดียวกันหรือต่างกันเล็กน้อยทั้ง 3 ตำแหน่ง ดังตัวอย่างในตารางที่ 3.6 และตารางที่ 3.7 ซึ่งหากนำค่าปริมาณสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าปริมาณโอโซนดังกล่าวไปใช้คำนวณในแบบจำลองตามในบทที่ 2 ก็จะทำให้ค่ารังสีรวมดวงอาทิตย์ที่พื้นโลกเป็นใกล้เคียงกันมากทั้ง 3 ตำแหน่ง ทั้งนี้เป็นเพราะแต่ละ pixel ของข้อมูลจากดาวเทียมจะเทียบเท่าความละเอียดเชิงพื้นที่ของผิวโลกประมาณ 5×5 ตารางกิโลเมตร แม้ว่าจะระยะห่างจากสถานีเรดาร์ยอดดอยอินทนนท์ถึงสถานีวัดที่ทำการอุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ประมาณ 5.2 กิโลเมตร และระยะห่างจากสถานีเรดาร์ยอดดอยอินทนนท์ถึงสถานีวัดที่ศูนย์บริการนักท่องเที่ยวใกล้น้ำตกแม่กลางประมาณ 18.7 กิโลเมตร แต่จากข้อมูลรังสีรวมดวงอาทิตย์ที่ได้จากการวัดจริงจากสถานีทั้ง 3 ตำแหน่ง มีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังใน หัวข้อ 3.4.1-3.4.4

ตารางที่ 3.6 เปรียบเทียบค่าดิจิทัลจากข้อมูลดาวเทียมที่จะนำไปประมวลเป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของระบบที่ประกอบด้วยเมฆอากาศและพื้นผิวโลก(ρ'_{EA}) ที่ตำแหน่งสอดคล้องกับสถานีวัดภาคพื้นดิน 3 ระดับ ในวันและเวลาเดียวกัน ซึ่งมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ของวันที่ 1 มกราคม 2006 และวันที่ 5 มกราคม 2007

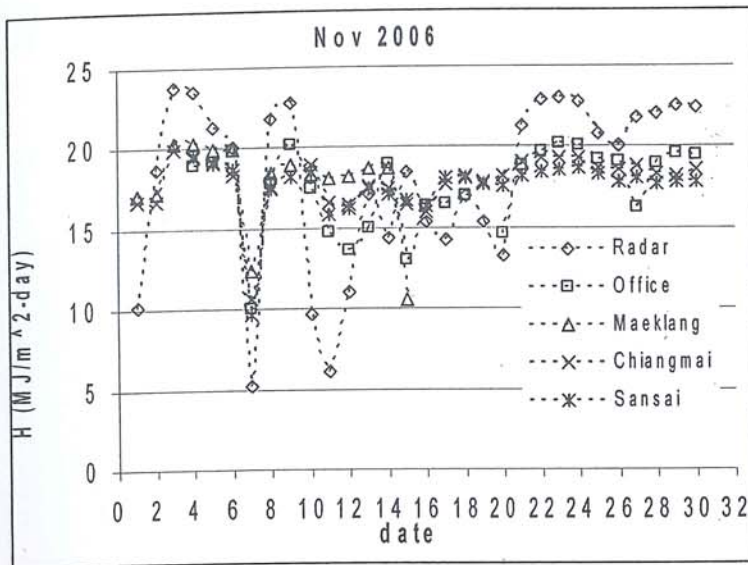
1-Jan-06			
No.	Maeklang	Office	Radar
1	0.0380000	0.0390000	0.0380000
2	0.0490000	0.0490000	0.0488889
3	0.0490000	0.0490000	0.0490000
4	0.0490000	0.0490000	0.0490000
5	0.0490000	0.0490000	0.0494444
6	0.0381111	0.0430000	0.0405556
7	0.0362222	0.0423333	0.0377778
8	0.0300000	0.0311111	0.0300000
9	0.0260000	0.0300000	0.0265556

5-Jan-07			
No.	Maeklang	Office	Radar
1	0.0490000	0.0453333	0.0453333
2	0.0576667	0.0556667	0.0576667
3	0.0590000	0.0590000	0.0590000
4	0.0590000	0.0590000	0.0590000
5	0.0488889	0.0534444	0.0512222
6	0.0490000	0.0490000	0.0490000
7	0.0488889	0.0467778	0.0490000
8	0.0380000	0.0380000	0.0380000
9	0.0300000	0.0298889	0.0298889

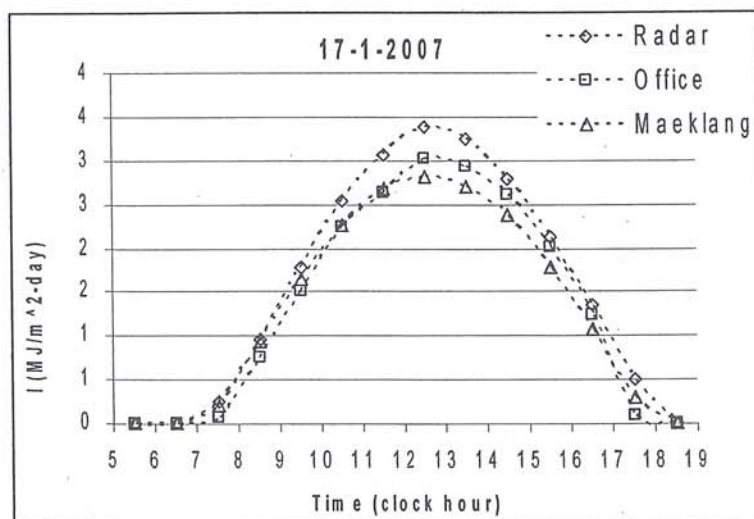
ตารางที่ 3.7 เปรียบเทียบค่าดิจิทัลจากข้อมูลดาวเทียมที่จะนำไปประมวลเป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของระบบที่ประกอบด้วยเมฆอากาศและพื้นผิวโลก(ρ'_{EA}) ที่ตำแหน่งสอดคล้องกับสถานีวัดภาคพื้นดิน 3 ระดับ ในวันและเวลาเดียวกัน ซึ่งมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ของวันที่ 10 มกราคม 2008 และวันที่ 16 มกราคม 2009

10-Jan-08			
No.	Maeklang	Office	Radar
1	0.0837778	0.0800000	0.0701111
2	0.1141110	0.1130000	0.1114440
3	0.1211110	0.1203330	0.1193330
4	0.1120000	0.1102220	0.1103330
5	0.0975556	0.0960000	0.0956667
6	0.0796667	0.0804444	0.0814444
7	0.0652222	0.0641111	0.0654444
8	0.0493333	0.0454444	0.0486667
9	0.0345556	0.0294444	0.0336667

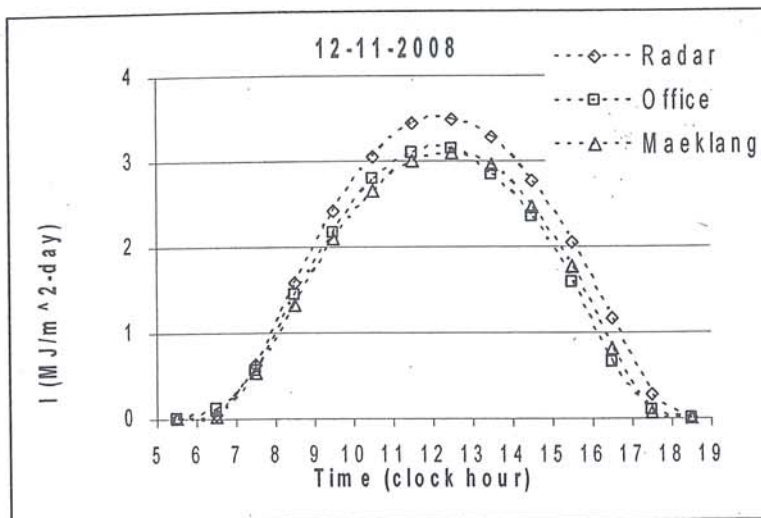
19-Jan-09			
No.	Maeklang	Office	Radar
1	0.0787778	0.0647778	0.0696667
2	0.1092220	0.1064440	0.1062220
3	0.1245560	0.1280000	0.1210000
4	0.1182220	0.1224440	0.1182220
5	0.1016670	0.1048890	0.1067780
6	0.0916667	0.0846667	0.0920000
7	0.0764444	0.0743333	0.0770000
8	0.0643333	0.0616667	0.0632222
9	0.0500000	0.0430000	0.0501111



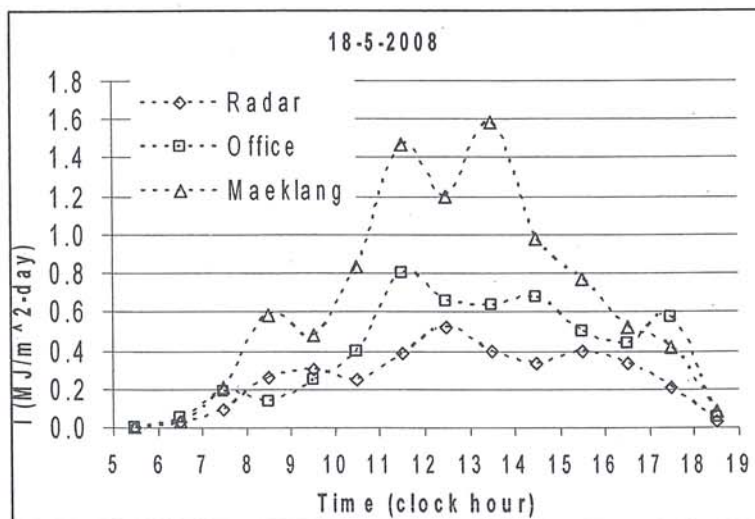
รูปที่ 3.12 การเปรียบเทียบข้อมูล 3 ระดับกับ 2 สถานีที่พื้นราบที่ อ. เมือง และ อ. สันทราย
จ. เชียงใหม่ ในเดือนสิงหาคม ปี 2006



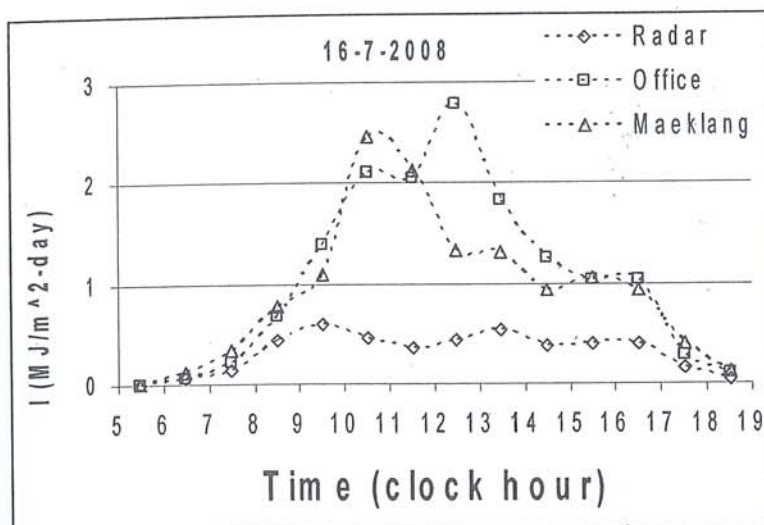
รูปที่ 3.13 เปรียบเทียบค่ารังสีรวมรายชั่วโมง (I) จากสถานีวัดภาคพื้นดินบริเวณดอยอินทนนท์
3 ระดับ ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส โดยบริเวณพื้นที่ระดับสูงกว่าจะมีค่ารังสีรวมรายชั่วโมงสูงกว่า
บริเวณพื้นที่ระดับต่ำกว่า ในวันที่ 17 มกราคม ปี 2007



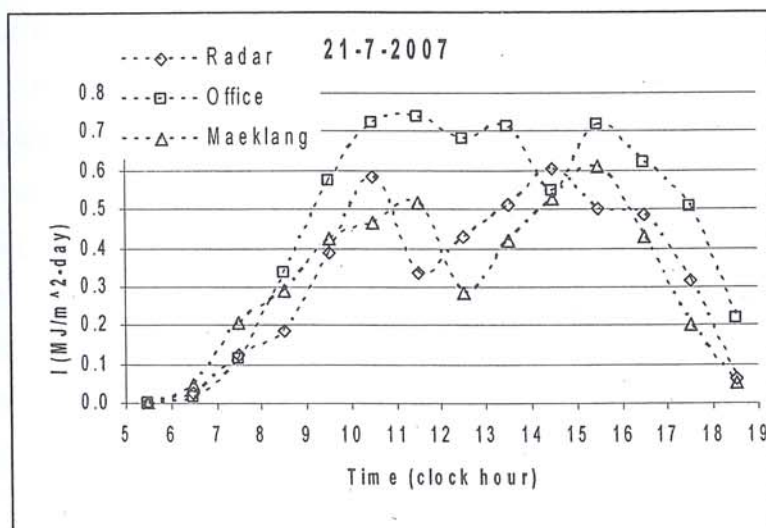
รูปที่ 3.14 เปรียบเทียบค่ารังสีรวมรายชั่วโมง (I) จากสถานีวัดภาคพื้นดินบริเวณดอยอินทนนท์ 3 ระดับ ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส โดยบริเวณพื้นที่ระดับสูงกว่าจะมีค่ารังสีรวมรายชั่วโมงสูงกว่าบริเวณพื้นที่ระดับต่ำกว่า ในวันที่ 12 พฤศจิกายน ปี 2008



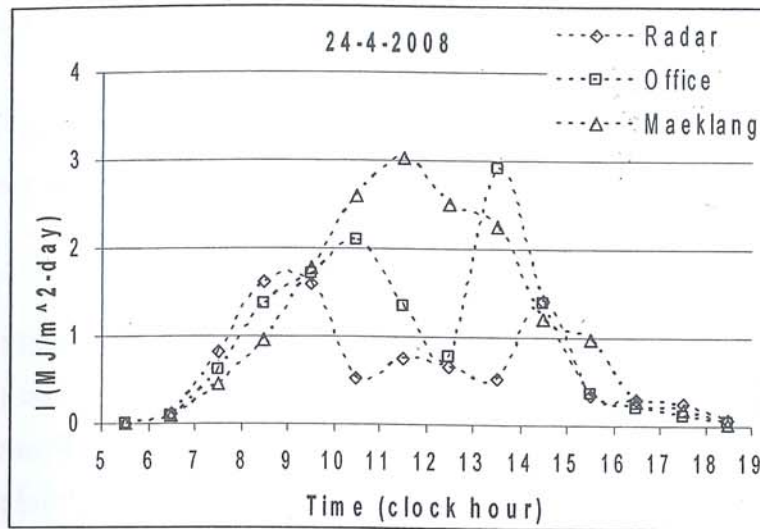
รูปที่ 3.15 เปรียบเทียบค่ารังสีรวมรายชั่วโมง (I) จากสถานีวัดภาคพื้นดินบริเวณดอยอินทนนท์ 3 ระดับ ในฤดูฝนวันที่ท้องฟ้าไม่แจ่มใส โดยบริเวณพื้นที่ระดับต่ำกว่าจะมีค่ารังสีรวมรายชั่วโมงสูงกว่าบริเวณพื้นที่ระดับสูงกว่า ในวันที่ 18 พฤษภาคม ปี 2008



รูปที่ 3.16 เปรียบเทียบค่ารังสีรวมรายชั่วโมง (I) จากสถานีวัดภาคพื้นดินบริเวณดอยอินทนนท์ 3 ระดับ ในฤดูฝนวันที่ท้องฟ้าไม่แจ่มใส โดยบริเวณพื้นที่ระดับต่ำกว่าจะมีค่ารังสีรวมรายชั่วโมงสูงกว่าบริเวณพื้นที่ระดับสูงกว่า ในวันที่ 16 กรกฎาคม ปี 2008



รูปที่ 3.17 เปรียบเทียบค่ารังสีรวมรายชั่วโมง (I) จากสถานีวัดภาคพื้นดินบริเวณดอยอินทนนท์ 3 ระดับ ในฤดูฝนวันที่ท้องฟ้าไม่แจ่มใส โดยค่ารังสีรวมรายชั่วโมงไม่ขึ้นกับระดับความสูงของพื้นที่ ในวันที่ 21 กรกฎาคม ปี 2007



รูปที่ 3.18 เปรียบเทียบค่ารังสีรวมรายชั่วโมง (I) จากสถานีวัดภาคพื้นดินบริเวณดอยอินทนนท์ 3 ระดับ ในฤดูฝนวันที่ท้องฟ้าไม่แจ่มใส โดยค่ารังสีรวมรายชั่วโมงไม่ขึ้นกับระดับความสูงของพื้นที่ ในวันที่ 24 เมษายน ปี 2008

3.6 วิเคราะห์ ปัญหาและอุปสรรค ในการสร้างและพัฒนาแบบจำลองใหม่

3.6.1 อุปสรรคข้อมูลจากดาวเทียม

เนื่องจากแบบจำลองเดิมได้ใช้ข้อมูลจากดาวเทียม GMS-5 ที่เป็นดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาแบบตำแหน่งคงที่เมื่อเทียบกับตำแหน่งบนพื้นโลกที่ถูกส่งขึ้นไปตั้งแต่ปี ค.ศ. 1995 และใช้งานต่อเนื่องมาจนถึงเดือนพฤษภาคม ปี ค.ศ. 2003 ซึ่งเป็นช่วงเริ่มโครงการวิจัยพอดิ มีการเคลื่อนดาวเทียมอุตุนิยมอื่นมาปฏิบัติงานแทนระยะหนึ่งแต่สัญญาณข้อมูลจากดาวเทียมที่มาแทนแตกต่างสัญญาณจากดาวเทียม GMS-5 จนกระทั่งมีการส่งดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาดวงใหม่ขึ้นไปปฏิบัติงานต่อไปในภายหลัง

3.6.2 อุปสรรคการติดตั้งเครื่องมือที่สถานีวัดรังสีรวมดวงอาทิตย์ภาคพื้นดิน 3 ระดับในบริเวณภูเขา

ภายหลังจากการกำหนดพื้นที่เพื่อติดตั้งเครื่องมือที่สถานีวัดรังสีรวมดวงอาทิตย์ภาคพื้นดิน 3 ระดับบริเวณภูเขาในเขตอุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์แล้ว โดย 2 สถานีอยู่ในเขตความรับผิดชอบของกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่าและพันธุ์พืช สังกัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเป็นบริเวณเขตต้นน้ำจึงเป็นเขตอนุรักษ์ชั้นหนึ่ง และอีกสถานีอยู่ที่สถานีเรดาร์ยอดดอยอินทนนท์ซึ่งเป็นเขตความรับผิดชอบของกองทัพอากาศ จึงมีการพิจารณาด้านความมั่นคงของประเทศ ทำให้มีขั้นตอนและใช้เวลาค่อนข้างมากกว่าจะได้รับอนุญาตให้เข้าไปติดตั้งเครื่องมือดังกล่าวและการเก็บข้อมูลภาคพื้นดินจึงล่าช้า

3.6.3 ปัญหาข้อมูลอุตุนิยมวิทยาภาคพื้นดินที่ใช้ประกอบการคำนวณ

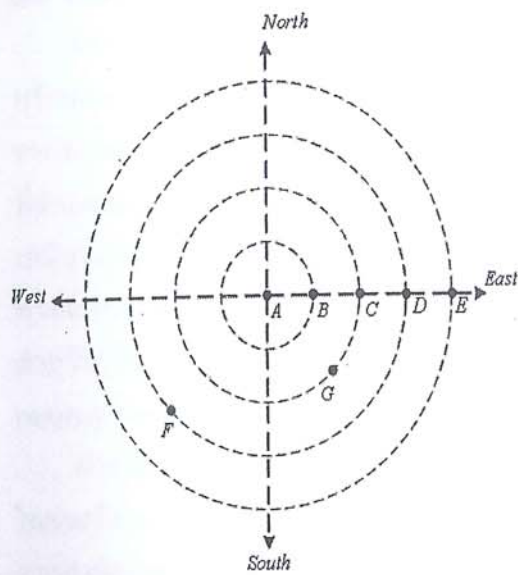
เนื่องจากข้อจำกัดด้านงบประมาณ เทคนิคและบุคลากรจึงไม่ได้เก็บข้อมูลอุตุนิยมวิทยา เช่น ค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และข้อมูลทัศนวิสัย ที่สถานีภาคพื้นดินทั้ง 3 ตำแหน่ง ต้องใช้ข้อมูลของบริเวณอื่น เช่น ของที่ อ. สันทราย จ. เชียงใหม่ หรือที่ใกล้เคียงอื่นแทน

3.7 การวิเคราะห์อิทธิพลของระดับความสูงของพื้นที่บริเวณภูเขา

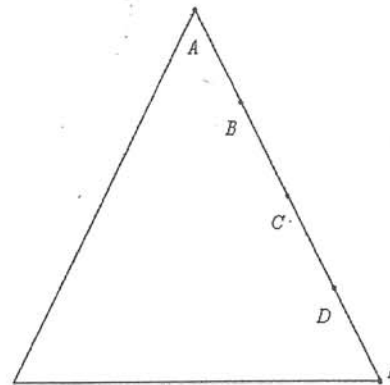
จากผลการประมวลข้อมูลในหัวข้อ 3.4.1 ถึง 3.4.1 มีแนวโน้มที่แสดงให้เห็นว่าค่าระดับความสูงของพื้นที่มีผลต่อค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์ในรายชั่วโมง (I) มากกว่ารังสีรวมรายวัน (H) และรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ($\bar{H}$) มากไปหาน้อยตามลำดับ โดยค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์จะแปรโดยตรงกับค่าระดับความสูงของพื้นที่ในกรณีที่ท้องฟ้าแจ่มใส ส่วนกรณีในช่วงฤดูฝนที่มีเมฆหมอกมาก (ค่ารังสีรวมจะต่ำกว่าค่าเฉลี่ย) มีแนวโน้มที่แสดงว่าค่ารังสีรวมในกรณีค่า H และ $\bar{H}$ จะแปรผกผันกับค่าระดับความสูง ส่วนค่า I มีบางวันที่ไม่สามารถระบุได้ ดังรูปที่ 3.15 ถึง 3.18 ทั้งนี้จะมีสาเหตุมาจากอิทธิพลของค่าเมฆหมอกมีสูงกว่าอิทธิพลของค่าระดับความสูงของพื้นที่ อย่างไรก็ตามเนื่องจากโครงการวิจัยนี้ได้ตั้งสถานีวัดภาคพื้นดินเพียง 3 ระดับเท่านั้น และในทางปฏิบัติไม่สามารถจะเลือกระดับความสูงของพื้นที่ตามต้องการได้เพราะต้องอาศัยสถานที่ตั้งห้ววัด ระบบไฟฟ้า อาคารและบุคลากรในการบันทึกข้อมูล อีกทั้งบริเวณพื้นที่ภูเขาจริงมักจะมีค่าระดับความสูงไม่ได้เรียงลำดับระดับความสูงของพื้นที่ดังในรูปที่ 3.19 แต่อาจจะมีพื้นที่เป็นยอดเขา หุบเขาและที่ราบสลับกันไปมาดังภาพตัวอย่างรูปที่ 3.20

3.8 การวิเคราะห์อิทธิพลของการบังเงาเนื่องจากที่ระดับความสูงของพื้นที่

ในโครงการวิจัยนี้ไม่สามารถศึกษาอิทธิพลของการบังเงา เนื่องจากระดับความสูงของพื้นที่ทั้งนี้เพราะห้ววัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ของสถานีวัดภาคพื้นดินทั้ง 3 ระดับถูกติดตั้งที่บนเสาสูงประมาณ 5 – 20 เมตรและอยู่ในบริเวณค่อนข้างโล่ง แต่โดยหลักการทางทฤษฎีการบังเงาจะมีผลต่อรังสีตรงดวงอาทิตย์ (direct or beam solar radiation) และรังสีที่สะท้อนจากพื้น (ground albedo) ทำให้ค่ารังสีรวมลดลงจากกรณีไม่มีการบังเงาในอัตรา มุมเงย 15° ต่อช่วงเวลา 1 ชั่วโมง ดังนั้นพื้นที่ซึ่งมียอดเขาอยู่ในแนวทิศตะวันตกบังอยู่จะค่ารังสีรวมต่ำกว่าปกติในช่วงเช้า ส่วนพื้นที่ซึ่งมียอดเขาอยู่แนวทิศตะวันตกบังอยู่จะมีค่ารังสีรวมลดลงกว่าปกติในช่วงเย็น และอิทธิพลของการบังเงามีไม่มากนักสำหรับค่ารังสีรายวันเพราะค่าความเข้มรังสีในช่วงดวงอาทิตย์เริ่มขึ้นและใกล้ตกมีค่าต่ำผลรวมทั้งวันจึงลดลงเพียงเล็กน้อย สำหรับพื้นที่ที่มียอดอยู่แนวทิศเหนือทิศใต้ค่าระดับความสูงของพื้นที่ก็จะมีผลต่อค่ารังสีรวมน้อย อย่างไรก็ตามพื้นที่บริเวณภูเขาจริงมักจะมีระดับไม่ได้เรียงลำดับดังในรูปที่ 3.19 แต่จะสูงๆต่ำๆดังในตัวอย่างในรูปที่ 3.20 และในกรณีการคำนวณค่ารังสีรวมจากข้อมูลดาวเทียมจะไม่ได้คิดค่าตัวแปรจากการบังเงา

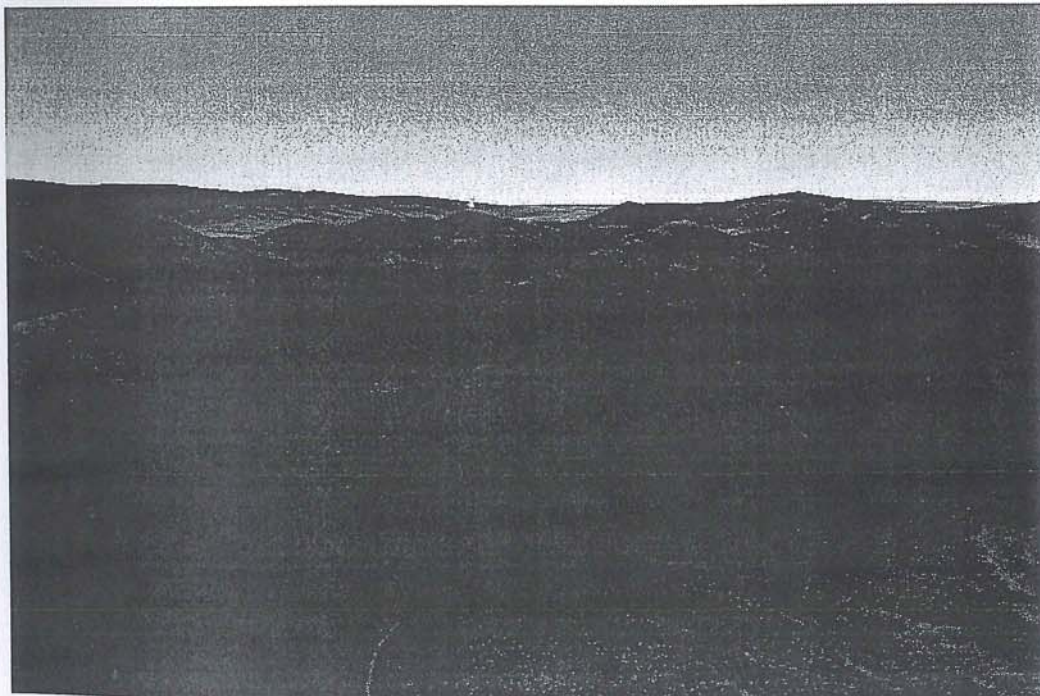


(a) Top View



(b) Side View

รูปที่ 3.19 แผนภูมิของการลดระดับความสูงของพื้นที่บริเวณภูเขาแบบอุดมคติ



รูปที่ 3.20 ภาพตัวอย่างการลดระดับความสูงของพื้นที่บริเวณภูเขาจริงมักไม่เรียงลำดับ

3.9 การวิเคราะห์ผลการดำเนินการทั้งหมด

จากผลการวัดและการประมวลข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์จากสถานีวัดภาคพื้นดินบริเวณดอยอินทนนท์ 3 ระดับ ในช่วงปี 2006-2009 ตามหัวข้อ 3.4 พบว่าส่วนใหญ่มีค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์แตกต่างกัน ขณะที่ผลการประมวลข้อมูลดิจิทัลจากดาวเทียมอณูนิยามวิทยาที่ตำแหน่งตรงกับสถานีวัดภาคพื้นดิน 3 ระดับในช่วงวันเวลาเดียวกันตามหัวข้อ 3.5 ให้ค่าเหมือนกันหรือใกล้เคียงกันเนื่องจากข้อมูลที่อยู่ pixel ใกล้เคียงกันส่วนใหญ่จะเป็นค่าเดียวกันหรือแตกต่างกันเล็กน้อย ดังนั้นการคำนวณค่ารังสีรวมจากข้อมูลดาวเทียมจึงอาจไม่เหมาะสมสำหรับบริเวณพื้นที่อยู่ใกล้ ๆ กันแต่มีระดับความสูงแตกต่างกัน ผู้วิจัยกำลังใช้เทคนิค neuron network เพื่อแก้ปัญหาสำหรับพื้นที่ลักษณะดังกล่าว

สำหรับลักษณะการกระจายของค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์ของสถานีวัดภาคพื้นดิน 3 ระดับในช่วงวันเวลาเดียวกัน พบว่าในกรณีที่ท้องฟ้าแจ่มใสมีแนวโน้มที่แสดงให้เห็นว่าค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์จะไม่แปรโดยตรงกับค่าระดับความสูงของพื้นที่ โดยทั้งค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์ในรายชั่วโมง (I) มากกว่ารังสีรวมรายวัน (H) และรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ($\bar{H}$) ของพื้นที่บริเวณยอดดอยจะมีค่าสูงสุด ขณะที่ค่าของบริเวณความสูงระดับกลางต่ำกว่าค่าของบริเวณระดับความสูงต่ำสุด ส่วนกรณีในช่วงฤดูฝนที่มีเมฆหมอกมากมีแนวโน้มที่แสดงว่าค่ารังสีรวมรายวันและรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนโดยจะแปรผกผันกับค่าระดับความสูงของพื้นที่ และในกรณีค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์ในรายชั่วโมงไม่สามารถระบุความสัมพันธ์กับค่าระดับความสูงของพื้นที่ได้

บทที่ 4

บทสรุป

ในบทนี้ จะกล่าวถึงผลสรุปของงานวิจัย ข้อวิจารณ์ และข้อเสนอแนะ

4.1 ผลสรุปของงานวิจัย

จากปัญหาของความไม่สะดวกในการเก็บข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์โดยการวัดจากสถานีวัดภาคพื้นดินในบริเวณป่าเขา จึงได้ทำการพัฒนาเทคนิคการคำนวณความเข้มรังสีดวงอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมทางอุตุนิยมวิทยา แต่ยังมีปัญหาข้อมูลที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองสำหรับพื้นที่บริเวณภูเขา ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนสูง งานวิจัยนี้ต้องการทดสอบและพัฒนาแบบจำลองสำหรับพื้นที่ในบริเวณที่มีภูเขา เพื่อทำให้ได้แบบจำลองที่มีความถูกต้องที่ดีขึ้นเหมาะสมสำหรับการใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ มากยิ่งขึ้นต่อไป

งานวิจัยนี้ได้เลือกพื้นที่บริเวณอุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์เพื่อติดตั้งเครื่องมือวัดเป็นสถานีวัดภาคพื้นดินเป็น 3 ระดับ เนื่องจากในแบบจำลองเดิมไม่ได้คิดผลค่าระดับความสูงของพื้นที่ จากผลการวัดและการประมวลผลข้อมูลจากสถานีวัดภาคพื้นดินในช่วงปี 2006-2009 พบว่าในกรณีที่ท้องฟ้าแจ่มใสในฤดูแล้งมีแนวโน้มที่แสดงให้เห็นว่าค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์จะไม่แปรโดยตรงกับค่าระดับความสูงของพื้นที่ โดยทั้งค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์ในรายชั่วโมง (I) มากกว่ารังสีรวมรายวัน (H) และรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ($\bar{H}$) ของพื้นที่บริเวณยอดดอยจะมีค่าสูงสุด ขณะที่ค่าของบริเวณความสูงระดับกลางต่ำกว่าค่าของบริเวณระดับความสูงต่ำสุด ส่วนกรณีในช่วงฤดูฝนที่มีเมฆหมอกมากมีแนวโน้มที่แสดงว่าค่ารังสีรวมรายวันและรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนจะแปรผกผันกับค่าระดับความสูงของพื้นที่ แต่ในกรณีค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์ในรายชั่วโมงไม่สามารถระบุความสัมพันธ์กับค่าระดับความสูงของพื้นที่ได้ ขณะที่ผลการประมวลผลข้อมูลดิจิทัลจากดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาที่ตำแหน่งตรงกับสถานีวัดภาคพื้นดิน 3 ระดับในช่วงวันเวลาเดียวกันให้ค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันเนื่องจากข้อมูลที่อยู่ pixel ใกล้เคียงกันส่วนใหญ่จะเป็นค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ดังนั้นการประเมินค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์จากแบบจำลองด้วยข้อมูลดาวเทียมอาจไม่เหมาะสมสำหรับบริเวณแคบ ๆ และในกรณีในช่วงเวลาสั้นๆ เพราะจะให้ค่าที่มีความคลาดเคลื่อนสูง

ข้อวิจารณ์

จากการดำเนินการวิจัยและผล มีข้อสังเกตดังนี้

4.2.1 จากผลการประมวลผลข้อมูลจากสถานีวัดภาคพื้นดินบริเวณดอยอินทนนท์ 3 ระดับในช่วงปี 2006-2009 เป็นกรณีบริเวณที่มีการเปลี่ยนความชัน(อัตราส่วนของระดับความสูงต่อระยะทางในแนวระดับ)ค่อนข้างมาก คือ ความชันระหว่างสถานีวัดที่สถานีเรดาร์ยอดดอยอินทนนท์กับสถานีวัดที่ทำการอุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์มีค่าประมาณ 1:4 และความชัน

ระหว่างสถานีวิจัยที่ศูนย์บริการนักท่องเที่ยวใกล้น้ำตกแม่กลางกับสถานีวิจัยที่ทำการอุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์มีค่าประมาณ 1:8.5 สำหรับพื้นที่บริเวณภูเขาอื่นที่มีการเปลี่ยนความชันต่ำกว่าอาจมีลักษณะการกระจายความเข้มรังสีรวมดวงอาทิตย์ทั้งในแต่ละตำแหน่งและแต่ละช่วงเวลาแตกต่างจากบริเวณดอยอินทนนท์

4.2.3 การประเมินค่าความเข้มรังสีรวมดวงอาทิตย์ที่พื้นดินจากแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลดาวเทียมในพื้นที่บริเวณภูเขา อาจจะมีการคลาดเคลื่อนสูงใน 3 กรณี คือ ก) ในฤดูฝนในบรรยากาศที่มีเมฆหมอกมาก ค่าความเข้มรังสีรวมดวงอาทิตย์จะเปลี่ยนแปลงไปมาในเวลาสั้น ๆ ทำให้ค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่คำนวณจากข้อมูลดาวเทียมซึ่งเป็นค่าขณะใดขณะหนึ่ง อาจไม่เป็นตัวแทนในการประเมินค่าในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ เช่น ค่ารายชั่วโมง หรือ ค่ารายวัน ข) ในบริเวณพื้นที่ที่มีความชันแตกต่างกันมาก(ในระยะห่างกันสั้น ๆ) ค่าความเข้มรังสีรวมดวงอาทิตย์จริงที่พื้นที่ใกล้ ๆ กันจะแตกต่างกันแต่ค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่คำนวณจากข้อมูลดาวเทียมซึ่งให้ค่าต่างกันน้อยกว่าเพราะค่าจากข้อมูลที่มี pixel ตัด ๆ กันมักจะให้ค่าใกล้เคียงกัน ค) ในพื้นที่บริเวณภูเขาส่วนใหญ่มักจะขาดข้อมูลภาคพื้นดิน เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และค่าทัศนวิสัย ที่ใช้ประกอบในการคำนวณด้วยแบบจำลองจากข้อมูลดาวเทียม เป็นเพราะความไม่สะดวกในการเก็บและบันทึกข้อมูลดังกล่าว และข้อมูลที่วัดได้ก็มักใช้เป็นตัวแทนของพื้นที่ใกล้เคียงไม่ دقيق ต่างจากในกรณีบริเวณพื้นที่ราบ

4.2.4 อย่างไรก็ตามการประเมินค่าความเข้มรังสีรวมดวงอาทิตย์ที่พื้นดินโดยใช้ข้อมูลดาวเทียมในพื้นที่บริเวณภูเขา อาจจะมีการเหมาะสมใน 3 กรณี คือ ก) ในช่วงสภาพท้องฟ้าแจ่มใสเพราะข้อมูลดาวเทียมในขณะใดขณะหนึ่งพอจะประเมินเป็นข้อมูลในช่วงระยะเวลาใกล้เคียงได้ ข) ในกรณีต้องการค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีรวมดวงอาทิตย์สำหรับพื้นที่ขนาดใหญ่ ค) ในกรณีต้องการค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีรวมดวงอาทิตย์ในระยะยาว เช่น ค่ารังสีรวมดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนต่าง ๆ หรือ ค่ารังสีรวมดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปี เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีข้อดีด้านความสะดวกและมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการวัดในสถานีวิจัยภาคพื้นดิน

4.3 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยในโครงการนี้พบว่าประเด็นที่น่าจะศึกษาต่อไปดังนี้

4.3.1 ในกรณีท้องฟ้าแจ่มใสควรจะมีการศึกษาความสัมพันธ์ของผลของระดับความสูงของพื้นที่กับค่ารังสีรวมดวงอาทิตย์โดยควรมีสถานีวิจัยในแนวเหนือ-ใต้และแปรค่าระดับความสูงให้ละเอียดขึ้น

4.3.2 ควรศึกษาความสัมพันธ์ของผลของระดับความสูงของพื้นที่กับค่ารังสีรวมดวงอาทิตย์ในบริเวณที่มีการเปลี่ยนความชันน้อยกว่าบริเวณดอยอินทนนท์ (จากพื้นราบ ถึง 1000-1500 เมตรจากระดับน้ำทะเล) เพราะเป็นค่าปานกลางสำหรับบริเวณภูเขาในประเทศไทย

4.3.3 ควรศึกษาความสัมพันธ์ของผลของข้อมูลอุตุนิยมิทยาในพื้นที่(เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ หรือค่าทัศนวิสัย ฯ)กับค่ารังสีรวมดวงอาทิตย์ในพื้นที่บริเวณภูเขา เพราะเป็นตัวแปรสำคัญในฤดูฝน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Duffie, J. A., and Beckman, W. A., 1991, **Solar Engineering of Thermal Process**, 2nd ed., John Wiley & Sons. Inc., New York, 10-141.
- [2] Cano, D., Monget, J.M., Albuissou, M., Guillard, H., Regas, N., Wald, L., 1986, "A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data", **Solar Energy**, 37, 31-39.
- [3] Cole, R.J., 1976, "Direct solar radiation data as input into mathematical models describing the thermal performance of buildings –II. Development of relationships", **Build. Environ.** 11, 181-186.
- [4] Frulla, L.A., Gallegos, H.G., Gagliardini, D.A., Atienza, G., 1990, "Analysis of satellite measured insolation in Brazil", **Solar and Wind Technology**, 7(5), 501-509.
- [5] เสริม จันทน์ฉาย และจรุงแสง ลักษณะบุญส่ง,(พ.ศ. 2542), **แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับประเทศไทย**. รายงานวิจัย, กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, บริษัทจิริงรซ์ จำกัด, กรุงเทพฯ, 1-96.
- [6] Nunez, M., 1987, "A satellite-based solar energy monitoring system for Tasmania, Australia", **Solar Energy**, 39(5), 439-444.
- [7] อภิชาติ พรหมดนตรี, (พ.ศ.2545), **การศึกษาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในประเทศไทยโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [8] กิตติศักดิ์ เสงหิรัญวงษ์และปริญญา ศรีสวัสดิ์, (พ.ศ.2547), **การศึกษาเปรียบเทียบความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่คำนวณจากภาพถ่ายดาวเทียมและจากการวัด**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [9] Janjai, S. ,Laksanaboonsong, Nunez, M. and A. Thongsathitya, 2005, "Development of a method for generating operational solar radiation maps from satellite data for a tropical Environment", **Solar Energy**, 2005, 78, 739-751.
- [10] Meclatchey, R. A., Fenn, R. W., Selby, J. E. A., Volz, F. E. and Goring, J. S., 1972, **Optical Properties of the Atmosphere**, AFCRL-72-0497.
- [11] Leckner, B., 1978, "The spectral distribution of solar radiation at the earth' s surface-elements of a model", **Solar Energy** 20(2), 143-150.
- [12] Lacis, A. A., Hansen, J. E., 1974, "Parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere", **J. Atmos. Sci.** 19, 118-132.

[13] Tanre' , D., Deroo, C., Duhaut, P., Herman, N., Morcrette, J. J., Perbos, J. and Deschamps, P. Y., 1988, "Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum", Technical Report, Laboratoire d' Optique Atmospherique, Universite' des Science et Technique de Lille, 59655 Villeneuve d' Ascq Cedex, France.

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกอ. และ สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ
กำลังเขียนบทความเกี่ยวกับ Neuron network
2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์
 - เชิงพาณิชย์
ไม่มี
 - เชิงนโยบาย
ไม่มี
 - เชิงสาธารณะ
มีเครือข่ายความร่วมมือกับห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร และ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
 - เชิงวิชาการ
มีการพัฒนาการเรียนการสอนในวิชาพลังงานแสงอาทิตย์ (1103475) และวิชาพลังงานทดแทน(1103474)
3. อื่น ๆ
การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ
บทความที่เสนอในการประชุมวิชาการนักวิจัยรุ่นใหม่พบเมธีวิจัยอาวุโส
เมื่อวันที่ 13 ตุลาคม 2549 ที่ อ. ชะอำ จ. เพชรบุรี
เรื่อง Assessment of a Satellite – Based Solar Radiation Model
Using 25 Ground Reference Stations in the Tropics
(ในภาคผนวก ข.)

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลรังสีรวมรายวัน (H) จากสถานีวัดภาคพื้นดินบริเวณดอยอินทนนท์ 3 ระดับ
ในช่วงปี 2006-2009

2006	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
1	22.564		19.192
2	20.029	17.970	18.741
3	23.132	18.685	19.298
4	22.374	18.977	19.450
5	21.885	19.109	19.861
6	20.136	18.435	19.003
7	16.993	3.456	16.379
8	22.589	16.309	18.466
9	22.735	12.066	14.027
10	22.739	17.684	18.696
11	23.223	18.704	18.828
12	23.441	19.276	19.592
13	23.557	19.730	20.010
14	23.591	19.939	20.769
15	23.474	19.742	20.595
16	23.401	18.983	20.683
17	23.967	19.738	20.587
18	24.136	19.461	20.135
19	24.231	19.387	19.854
20	24.182	19.837	20.226
21	24.430	19.594	20.391
22	23.816	19.662	19.939
23	21.745	16.567	18.144
24	12.975	12.186	16.997
25	11.307	10.686	16.003

2007	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
1			18.104
2			16.148
3			19.348
4			19.066
5		5.273	18.186
6		13.147	15.741
7	18.306		
8	21.525	12.859	
9	22.175	16.329	
10	22.490	19.124	
11	21.957	19.372	
12	21.372	18.327	13.674
13	21.835	18.767	17.699
14	22.212	19.601	18.724
15	22.783	20.058	20.214
16	21.591	19.522	19.167
17	21.995	19.120	18.770
18	22.325	20.160	20.188
19	22.577	19.733	19.060
20	22.874	20.163	20.325
21	22.702		19.971
22	23.010		19.655
23	22.990	20.230	18.354
24	20.841	12.191	15.504
25	15.934	12.898	15.822

2006	H (MJ/m ² -day)		
date	Radar	Office	Maeklang
26	14.617	12.811	16.390
27	16.868	15.125	17.668
28	24.717	18.679	18.927
29	25.260	17.478	18.831
30	25.132	19.031	18.845
31	22.910	18.434	18.457
32	21.139	19.130	18.050
33	25.613	8.806	19.874
34	24.147	19.628	20.210
35	15.733	14.748	13.392
36	7.510	11.678	15.740
37	14.810	9.548	14.330
38	14.741	8.437	15.130
39	10.519	11.912	12.141
40	19.465	15.662	15.669
41	17.966	10.870	16.262
42	13.834	13.097	16.003
43	22.128	19.367	19.758
44	22.135	18.402	19.996
45	26.136	21.303	21.624
46	26.599	21.964	21.654
47	27.289	22.801	22.228
48	22.795	20.907	21.294
49	26.781	22.281	22.074
50	26.273	21.832	21.673

2007	H (MJ/m ² -day)		
date	Radar	Office	Maeklang
26	21.079	16.197	18.178
27	20.415	13.908	16.960
28	9.240		6.912
29	14.494	16.669	17.836
30	17.853	17.814	16.590
31	14.611	15.509	14.131
32	22.142	17.326	
33	17.312	15.477	
34	16.117	15.730	
35	17.480	15.370	
36	21.233	18.568	
37	20.864	17.946	
38	19.530	15.243	
39	15.345	10.606	
40	19.494	14.031	
41	19.715	15.516	
42	23.661	19.050	
43	18.909	17.540	
44	21.657	19.519	
45	17.518	20.165	
46	17.470	18.550	
47	16.485	18.000	
48	23.155	19.725	
49	18.196	18.526	
50	25.626	22.145	

2006	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
51	19.558	15.828	21.615
52	26.302	22.034	22.497
53	24.855	21.443	20.904
54	12.595	16.989	18.504
55	16.895	16.212	18.573
56	23.354	21.558	22.255
57	27.784	23.216	22.717
58	27.462	22.448	21.226
59	21.771	15.934	19.602
60		4.771	17.960
61			17.900
62			18.822
63		20.999	22.043
64		21.154	20.596
65		18.981	19.208
66		20.646	21.218
67		17.133	20.896
68		18.371	18.792
69		22.225	20.173
70		23.004	20.833
71		23.437	22.201
72	10.425	22.556	20.315
73	26.816	18.924	20.294
74	27.131	21.454	19.493
75	29.045	23.218	21.247

2007	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
51	25.911	22.350	
52	25.733	21.560	
53	26.010	22.849	
54	25.318	21.931	
55	24.152	21.544	
56	22.767	21.429	
57	19.064	21.372	
58	21.145	20.036	
59	26.250	21.836	
60	26.051	21.641	2.790
61	27.797	22.737	20.737
62	27.567	23.768	20.957
63	26.776	20.743	17.838
64	23.767	18.652	14.770
65	25.628	20.731	17.094
66	28.568	24.771	22.068
67	28.148	21.904	22.015
68	28.575	23.875	22.536
69	27.533	21.976	18.207
70	25.555	20.106	15.894
71	26.023	20.816	16.528
72	24.385	18.825	13.630
73	25.954	21.380	17.609
74	27.526	22.963	19.764
75	25.219	21.194	17.957

2006	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
76	27.958	22.679	21.205
77	27.852	23.243	19.913
78	21.420	17.656	15.024
79	18.251	13.648	15.744
80	25.060	21.414	21.944
81	27.543	23.523	22.667
82	24.253	19.650	18.412
83	25.986	19.767	17.315
84	29.649	23.973	21.591
85	29.508	24.566	22.396
86	29.457	23.762	23.113
87	18.216	15.665	17.901
88	18.792	16.126	13.407
89	10.970	11.576	10.784
90	14.362	12.890	12.982
91	12.318	16.603	18.414
92	14.763	18.352	22.659
93	10.396	21.830	22.272
94	15.141	24.560	23.907
95	29.417	25.626	24.088
96	24.697	24.829	23.386
97	17.255	22.287	20.731
98	14.470	18.244	17.758
99	21.791	24.686	19.708
100	22.595	21.972	20.364

2007	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
76	21.376	15.815	12.072
77	22.449	20.451	18.445
78	16.763	19.062	17.102
79	17.006	15.468	17.505
80	8.096	13.707	18.333
81	15.982	19.923	17.416
82	28.505	24.671	
83	24.335	21.600	18.101
84	28.086	22.901	19.649
85	23.767		19.650
86	25.503		22.052
87	27.397		22.110
88	20.187		19.291
89	19.486		15.879
90	24.863		19.912
91	27.490		23.271
92	30.216		24.788
93	27.896		20.007
94	27.664		20.552
95	27.371		20.565
96	13.570		16.232
97	25.280		17.883
98	20.136		18.275
99	22.600		21.227
100	23.319		20.785

2006	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
101	27.968	19.147	20.902
102	26.861	24.215	20.587
103	10.295	15.962	16.910
104	25.219	24.005	22.045
105	14.947	15.380	19.282
106	21.640	9.879	15.378
107	10.851	17.490	17.587
108	7.760	11.748	14.151
109	13.227	14.130	17.859
110	10.514	15.923	19.859
111	17.354	21.971	18.780
112	15.081	15.349	13.198
113	18.822	19.730	23.874
114	12.924	15.411	17.415
115	13.568	14.131	20.018
116	9.303	15.782	14.518
117	18.980	11.743	17.457
118	13.213	11.373	13.587
119	3.857	3.877	4.898
120	7.286	10.327	22.752
121	18.487	14.643	21.377
122	16.099	16.344	22.574
123	16.241	20.221	24.195
124	18.138	25.266	25.086
125	29.297	27.417	24.915

2007	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
101	22.590		18.768
102	21.405		18.284
103	20.156		22.014
104	11.495		10.308
105	7.727		10.715
106	6.990		13.089
107	18.621		16.988
108	11.646		21.516
109	20.903		22.077
110	25.593		23.091
111	28.895		24.944
112	27.767		25.480
113	27.930		23.967
114	25.511		23.085
115	20.958		22.194
116	13.168		18.983
117	17.096		19.737
118	16.431		20.830
119	20.725		17.098
120	14.102		20.611
121	19.815	21.738	22.947
122	9.312	12.055	13.815
123	7.231	6.654	12.200
124	4.014	3.277	3.940
125	7.976	3.807	3.486

2006	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
126	17.695	19.825	24.327
127	25.173	21.083	22.668
128	21.958	22.361	8.424
129	20.582	21.315	18.864
130	18.343	15.528	21.765
131	15.560	10.330	15.392
132	20.190	20.919	24.720
133	22.386	16.752	25.288
134	19.360	14.395	15.248
135	6.691	3.497	3.804
136	12.146	6.352	3.890
137	8.244	4.431	7.362
138	6.889	2.938	4.245
139	5.815	2.448	6.448
140	9.394	3.130	5.410
141	5.282	3.047	8.242
142	10.598	4.426	7.621
143	15.097	9.757	13.570
144	6.888	6.361	10.839
145	4.945	12.198	11.652
146	21.470	13.820	19.949
147	21.108	15.494	18.713
148	23.246	21.638	19.938
149	18.780	22.286	21.091
150	8.236	9.872	12.720

2007	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
126	10.825	6.388	4.989
127	12.721	10.726	
128	16.973	10.134	
129	17.848	15.533	
130	9.657	9.311	
131	3.633	4.912	
132	3.037	5.135	
133	6.915		
134	6.455	5.063	
135	8.044	9.612	9.595
136	17.715	14.972	20.343
137	13.967	14.420	17.670
138	13.031	24.256	18.970
139	8.777	12.523	14.663
140	2.576	5.533	9.261
141	2.313	6.989	9.888
142	2.940	7.494	12.885
143	4.905	17.478	16.187
144	20.756	23.571	22.895
145	19.310	24.048	20.439
146	18.486	24.744	20.035
147	20.677	16.139	20.475
148	16.220	15.872	14.931
149	17.879	13.954	16.426
150	8.110	12.088	10.373

2006	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
151	8.222	9.637	10.865
152		15.507	3.553
153		19.400	18.105
154		13.544	15.329
155		8.189	13.943
156		10.053	17.436
157		10.113	12.047
158		17.694	15.786
159		15.579	14.870
160		10.697	12.466
161		8.840	16.460
162		7.761	13.183
163		21.941	17.889
164		22.505	21.855
165		17.605	22.545
166		16.941	20.124
167	13.247	13.999	20.512
168	8.321	8.310	13.978
169	11.201	19.056	19.400
170	4.954	6.074	12.142
171	8.350	6.662	10.116
172	8.776	7.234	12.426
173	14.385	13.083	19.222
174	10.125		16.517
175	18.158	12.616	21.300

2007	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
151	8.916	13.022	18.133
152	13.811	16.032	15.085
153	8.679	13.117	17.399
154	9.528	10.072	15.345
155	21.529	20.754	21.876
156	15.391	17.514	17.421
157	14.044	14.749	15.748
158	14.751	17.652	19.104
159	15.711	17.868	19.418
160	9.863	14.155	17.241
161	18.133	18.986	20.654
162	10.670	17.645	15.827
163	7.310	11.486	14.986
164	3.457	7.960	12.160
165	7.490	16.371	18.037
166	14.095	16.714	15.867
167	11.356	15.100	16.240
168	14.932	12.756	16.968
169	6.613	12.849	17.701
170	9.811	12.187	15.269
171	8.089	7.862	18.885
172	15.517	13.479	17.295
173	21.560	17.833	21.373
174	15.737	23.662	23.413
175	14.052	21.053	21.130

2006	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
176	12.588	11.309	20.652
177	12.712	11.424	17.665
178	22.786	12.334	21.125
179	17.679	18.708	16.388
180	10.616	13.650	13.227
181	9.916	12.844	12.151
182			
183		11.589	
184		14.705	
185		11.853	13.090
186		8.749	12.324
187		9.958	10.051
188		11.275	12.125
189		9.011	7.923
190		8.791	11.702
191		11.142	13.794
192		11.525	11.319
193	5.826	10.719	14.390
194	8.900	13.258	12.368
195	8.818	11.304	16.644
196	6.784	9.244	10.322
197	12.516	11.685	15.403
198	5.613	10.714	11.922
199	2.549	4.127	7.643
200	5.658	7.399	7.694

2007	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
176	17.585	16.079	16.457
177	9.558	8.815	11.311
178	9.021	10.697	7.640
179	3.611	4.000	10.733
180	4.611	6.865	11.459
181		20.453	16.866
182	10.116	10.541	16.815
183	12.494	13.293	15.563
184	9.789	9.450	14.487
185	7.134	10.957	14.950
186	7.728	10.458	17.410
187	6.059	6.388	6.824
188	8.118	14.672	14.266
189	14.497	16.523	15.884
190	10.504	17.737	18.038
191	15.229	21.439	20.094
192	17.585	19.557	18.550
193	13.569	12.015	17.041
194	9.942	14.506	11.675
195	9.053	13.371	14.470
196	5.596	6.118	12.392
197	6.171	9.646	12.426
198	11.226	15.585	15.668
199	9.339	18.428	15.366
200	8.446	14.860	14.331

2006	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
201	9.251	14.715	14.097
202	13.997	18.449	16.559
203	12.488	16.768	14.619
204	18.728		22.437
205	10.145	16.015	23.298
206	19.136	20.666	19.528
207	8.541	8.582	9.153
208	3.492	8.901	7.486
209	3.780	6.143	7.873
210	9.592	12.961	14.251
211	12.085		12.013
212	6.483	10.358	11.005
213		4.510	10.647
214		18.094	15.877
215		14.497	12.060
216		15.064	17.199
217		13.113	20.333
218		3.783	19.860
219		15.944	19.784
220		9.446	13.257
221		6.685	10.510
222	11.653	8.633	12.996
223	12.828	11.247	15.773
224	12.541	19.179	16.629
225	11.420	18.123	12.681

2007	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
201	5.221	7.273	7.044
202	4.555	6.507	4.472
203	9.640	7.774	11.206
204	14.336	20.105	17.920
205	9.202	8.620	6.591
206	6.250	15.279	16.533
207	21.053	22.805	18.226
208	12.823	16.775	13.935
209	20.551	26.317	22.111
210	12.932	15.736	17.061
211	10.674	16.288	18.580
212	7.937	13.224	14.450
213	13.937	13.172	13.426
214	7.672	17.963	14.898
215	6.502	19.496	13.208
216	18.667	20.539	14.493
217	19.227	17.383	16.598
218	19.710	21.296	14.886
219	13.132	20.180	16.828
220	5.392	12.220	13.662
221	5.353	11.694	13.073
222	7.393	11.217	9.740
223	2.903	3.381	9.933
224	2.547	3.216	10.165
225	5.731	11.972	21.940

2006	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
226	15.521	9.337	19.266
227	17.863	25.618	23.935
228	8.993	12.317	10.777
229	15.001	16.288	14.033
230	11.239	12.944	15.406
231	5.411	13.033	11.774
232	3.559		7.206
233	6.642		8.550
234	6.533	8.160	9.515
235	10.273	11.284	14.858
236	9.350	14.697	18.183
237	8.079	9.810	16.670
238	9.429	11.354	13.259
239	13.877	15.994	18.137
240	12.294	13.495	10.517
241	14.538		18.135
242	4.951	8.483	7.412
243	4.974	4.196	3.593
244	8.268		
245	18.489		
246	22.921		3.094
247	17.981		22.441
248	13.438		19.495
249	16.615	10.595	15.262
250	18.044	20.510	22.667

2007	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
226	8.277	12.288	17.403
227	4.403	9.741	12.370
228	5.354	7.735	7.682
229	10.684	13.341	17.650
230	16.490	24.903	17.595
231	10.231	16.998	21.555
232	13.588	16.440	20.282
233	8.730	15.048	22.062
234	12.008	21.097	17.565
235	11.763	16.747	12.474
236	8.417	9.345	11.180
237	6.964	13.034	10.353
238	16.047	20.070	14.804
239	22.208	13.600	23.581
240	8.976	6.620	14.165
241	13.224	22.146	20.638
242	10.521	9.413	16.755
243	11.722	11.076	20.706
244	21.045	13.991	
245	13.011	20.233	
246	13.081	12.875	
247	16.484	16.980	
248	16.442	14.849	
249	7.229	9.131	
250	14.037	11.745	

2006	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
251	17.889	19.495	20.345
252	9.850	8.699	20.492
253	9.430	12.108	14.425
254	8.785		8.364
255	10.076	8.645	14.560
256	11.426	9.641	16.317
257	15.231	15.605	19.996
258	10.753	8.500	19.133
259	6.911	8.222	12.158
260	12.121	10.736	19.050
261	19.449	12.422	16.832
262	10.673		12.697
263	8.717	10.785	12.952
264	6.220	12.551	16.246
265	15.745	11.638	14.033
266	14.306	10.539	19.808
267	15.107	18.811	19.387
268	14.884	18.713	18.042
269	3.329	2.809	6.860
270	2.821	2.546	10.542
271	4.376	3.548	10.021
272	10.956	8.470	13.400
273	18.586	22.053	22.979
274	23.333		
275	8.319		3.846

2007	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
251	18.897	23.518	
252	16.446	16.062	
253	17.239	13.748	
254	6.871	6.552	
255	13.598	16.001	
256	14.239	8.751	
257	7.947	9.932	
258	13.640	10.037	
259	9.170	12.598	
260	12.732	23.462	
261	2.322	3.955	
262	5.569	7.557	
263	3.472	2.189	
264	7.258	7.344	
265	17.991	14.315	
266	9.651	14.599	
267	16.503	14.844	
268	20.345	18.170	
269	10.393	11.514	
270	19.742	18.505	
271	7.646	14.279	
272	12.473	10.273	
273	10.366	8.848	
274	15.915	18.970	
275	12.358	19.738	

2006	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
276	3.601		5.549
277	10.343		6.690
278	15.546		17.993
279	9.634		17.319
280	11.380		18.336
281	14.533		15.201
282	8.257		8.073
283	13.732		13.259
284	13.550		16.028
285	8.162		17.765
286	12.499		16.550
287	12.015		21.666
288	18.145		22.306
289	13.703		22.178
290	14.180		21.882
291	7.930		21.201
292	20.702		21.015
293	18.576		19.322
294	15.910		21.973
295	12.455		21.059
296	12.942		15.688
297	15.156		20.268
298	10.505		19.217
299	11.590		18.630
300	14.688		20.362

2007	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
276	11.709	15.717	2.985
277	5.508	8.019	10.133
278	7.534	4.007	7.872
279	5.201		8.281
280	3.054	6.330	5.053
281	17.118	13.174	18.580
282	11.460	11.111	16.908
283	10.580	17.995	14.862
284	5.939	4.312	9.077
285	5.966	6.116	12.219
286	1.782	1.845	4.373
287	3.414	4.391	13.232
288	2.543	3.309	7.372
289	5.596	4.819	
290	12.711	7.597	
291	14.375	11.105	
292	14.566	15.384	
293	13.859	10.135	
294	18.507	14.578	
295	23.768	20.514	
296	21.784	21.180	
297	16.383	18.114	
298	16.564	16.207	
299	23.306	17.065	
300	21.087	18.231	

2006	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
301	21.687		19.555
302	20.794		19.033
303	21.186		18.555
304	16.732		18.010
305	10.165		17.064
306	18.638		17.185
307	23.727		20.301
308	23.504	18.980	20.288
309	21.281	19.237	19.890
310	20.103	19.791	19.907
311	5.235	10.084	12.429
312	21.757	17.867	18.397
313	22.792	20.119	18.987
314	9.596	17.484	18.282
315	6.024	14.755	18.010
316	11.018	13.613	18.189
317	17.043	14.980	18.698
318	14.387	18.969	18.736
319	18.389	12.987	10.569
320	15.407	16.308	
321	14.220	16.417	
322	17.004	16.967	
323	15.348		
324	13.205	14.642	
325	21.315	18.767	

2007	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
301	19.027	16.708	
302	14.902	13.248	
303	9.205	10.299	
304	10.901	11.246	
305	4.036	3.325	
306	12.238	7.411	
307	6.803	4.966	
308	6.627	5.399	
309	12.124	5.761	
310	17.240	6.582	
311	23.105	11.016	17.250
312	23.583	20.532	20.754
313	23.610	20.347	20.622
314	21.362	20.438	20.220
315	18.826	18.272	18.945
316	8.023	10.384	15.753
317	4.609	6.087	16.003
318	2.531	2.513	6.550
319	3.764		8.365
320	14.198		18.443
321	23.369		20.300
322	19.238		19.212
323	4.266		11.315
324	5.696		12.734
325	5.587		9.480

2006	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
326	22.931	19.647	
327	22.960	20.190	
328	22.772	20.045	
329	20.811	19.222	
330	20.089	19.044	
331	21.825	16.169	
332	21.998	18.948	
333	22.495	19.547	
334	22.433	19.485	
335	21.479	18.224	
336	21.289	19.143	
337	20.046	18.299	
338	16.034	12.994	
339	15.777	8.538	
340	18.153	10.705	
341	13.152	9.728	
342	9.705	8.486	
343	10.888	10.899	
344	7.820	7.423	
345	13.200	7.973	
346	18.204	15.956	
347	20.981	18.311	
348	19.325	14.570	
349	21.664	4.451	
350	6.943	11.876	

2007	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
326	10.531		11.384
327	16.551		14.055
328	11.811		12.021
329	22.280		17.889
330	18.265		18.425
331	20.138		18.119
332	21.823		17.564
333	20.561		17.553
334	17.630		15.526
335	15.832		17.347
336	22.549		18.621
337	7.738	4.240	14.360
338	13.999	9.473	16.898
339	9.131	8.310	16.986
340	11.356	13.022	18.540
341	13.411	11.517	18.350
342	21.886	11.458	17.810
343	14.723	10.094	16.855
344	11.188	11.929	17.414
345	21.204	15.728	17.708
346	18.194	15.364	15.917
347	21.488	18.866	19.533
348	20.947	18.557	19.190
349	20.842	17.006	18.374
350	15.413	7.943	15.248

2006	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
351	20.882	9.567	
352	21.329	14.229	
353	11.824	12.239	
354	17.196	14.499	
355	21.765	18.486	
356	21.433	18.267	
357	21.570	17.955	
358	22.000	17.660	
359	22.001	17.877	
360	21.688	17.962	
361	21.615	17.583	
362	20.411	17.995	
363	16.318	12.965	
364	11.118	14.817	
365	15.074	12.481	

2007	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
351	14.045	8.242	17.642
352	16.879	14.178	17.715
353	12.905	13.955	17.695
354	19.890	17.564	18.052
355	21.362	18.489	19.311
356	22.001	19.134	19.717
357	22.589	19.119	19.503
358	22.228	19.366	20.124
359	21.585	18.730	19.343
360	19.727	17.579	18.231
361	21.167	17.857	18.218
362	20.209	17.401	16.304
363	21.090	14.998	17.917
364	21.804	12.657	17.123
365	21.988	15.762	18.120

2008	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
1	21.851	11.637	12.301
2	22.181	15.912	15.801
3	21.578	18.274	18.351
4	21.058	17.455	17.433
5	21.122	17.757	17.19
6	21.035	17.473	17.453
7	20.605	17.547	17.534
8	21.807	18.05	17.777
9	22.581	18.499	18.338
10	22.869	19.414	19.282
11	22.498	19.486	20.095
12	22.451	19.473	19.935
13	22.512	19.164	19.864
14	22.533	19.026	19.708
15	23.046	19.413	18.757
16	20.579	12.572	17.323
17	22.413	17.089	17.93
18	22.828	18.734	18.84
19	22.939	19.959	20.053
20	22.858	19.638	19.994
21	23.675	20.293	20.589
22	23.621	19.766	19.729
23	23.712	16.885	17.381
24	23.250	17.931	17.678
25	10.928	8.85	14.239

2009	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
1	16.706	7.406	19.277
2	7.081	2.365	3.752
3	13.048	12.190	15.929
4	20.785	10.829	18.546
5	22.607	16.143	19.351
6	21.557	11.826	17.442
7	19.223	13.068	18.250
8	22.302	18.832	19.591
9	20.285	17.797	19.272
10	19.632	11.767	12.474
11	16.115	16.068	18.838
12	16.817	18.562	17.594
13	22.648	19.033	19.096
14	22.568	18.784	18.508
15	22.666	18.361	17.967
16	23.101	18.989	18.441
17	22.917	18.649	18.511
18	23.481	18.601	17.942
19	24.131	18.916	18.615
20	24.100	19.324	19.394
21	23.752	19.271	19.443
22	24.026	19.184	18.614
23	23.664	19.582	19.510
24	20.893	15.404	17.227
25	18.927	17.232	17.694

2008	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
26	20.227	9.878	10.493
27	6.998	16.208	14.811
28		2.025	4.766
29	8.196	12.86	19.856
30	6.547	14.515	14.482
31	1.732	8.099	9.12
32	1.768	4.721	2.219
33	16.031	15.114	17.806
34	24.008	21.34	21.589
35	25.534	21.863	21.555
36	25.207	21.718	21.651
37	24.859	21.147	20.74
38	24.779	21.17	21.24
39	24.494	21.226	21.024
40	23.831	21.022	20.224
41	24.756	21.523	21.103
42	20.686	17.437	21.212
43	22.284	20.741	21.438
44	17.532	15.248	17.618
45	17.86	18.487	20.175
46	12.984	17.631	17.151
47	26.812	23.277	21.982
48	26.858	23.745	23.203
49	26.405	22.49	20.055
50	15.515	11.546	16.016

2009	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
26	23.317	19.518	19.094
27	23.887	19.883	19.912
28	24.025	20.526	20.297
29	24.076	20.184	20.552
30	19.780	19.778	19.499
31	24.421	20.622	20.430
32	24.329	19.532	18.990
33	18.797	15.139	17.436
34	10.954	17.637	16.800
35	24.341	20.633	19.921
36	23.554	20.626	20.003
37	10.221	16.470	18.534
38	13.508	9.039	12.807
39	15.327	13.865	17.031
40	10.419	15.331	17.190
41	6.569	9.984	14.075
42	10.693	14.883	15.466
43	20.175	19.771	19.584
44	25.818	21.127	20.166
45	26.754	20.421	19.213
46	25.639	20.728	19.712
47	22.960	18.738	18.252
48	22.653	19.415	17.761
49	17.423	16.604	14.010
50	21.526	16.006	15.628

2008	H (MJ/m ² -day)		
date	Radar	Office	Maeklang
51	11.916	13.795	15.512
52	13.927	13.011	17.831
53	22.078	14.004	19.41
54	21.787	17.226	19.102
55	26.891	22.574	20.572
56	26.983	22.984	22.077
57	27.328	23.758	22.317
58	20.217	12.847	15.71
59	14.572	14.829	18.549
60	19.902	19.065	19.894
61	22.686	13.722	15.618
62	11.766		18.525
63	17.776	13.594	16.714
64	19.153	16.118	17.483
65	13.854	16.414	16.448
66	13.406	14.474	13.493
67	12.741	16.795	17.217
68	18.046	15.698	16.636
69	19.195	18.296	18.004
70	24.398	21.156	20.958
71	27.716	24.599	22.339
72	28.257	24.901	23.646
73	27.59	24.948	23.026
74	20.538	22.152	20.024
75	22.882	20.944	18.824

2009	H (MJ/m ² -day)		
date	Radar	Office	Maeklang
51	17.285	17.194	17.732
52	22.383	19.120	17.750
53	25.428	21.606	19.825
54	26.332	22.444	21.000
55	25.912	21.197	18.342
56	25.306	20.375	16.965
57	25.935	20.758	16.542
58	26.414	21.664	19.033
59	23.971	19.555	16.910
60	25.845	20.718	17.694
61	26.288	20.578	18.106
62	27.017	21.565	20.874
63	26.689	22.621	20.684
64	28.075	23.988	22.043
65	26.561	21.738	19.628
66	25.785	20.694	18.388
67	27.803	23.038	20.549
68	25.286	19.766	18.022
69	27.778	23.609	16.543
70	20.694	17.868	
71	26.917	23.013	20.464
72	17.685	16.565	14.325
73	17.481	9.075	6.306
74	23.205	18.562	17.083
75	19.373	14.906	15.575

2008	H (MJ/m ² -day)		
date	Radar	Office	Maeklang
76	12.552	19.953	17.37
77	26.812	23.069	20.968
78	18.784	18.449	15.793
79	17.291	14.851	18.452
80	26.502	4.75	19.516
81	26.32	24.291	22.908
82	25.278	20.395	18.732
83	20.008	17.752	17.037
84	21.14	18.931	16.081
85	26.353	22.367	20.881
86	26.007	22.76	21.308
87	26.383	24.151	22.163
88	27.251	22.989	22.904
89	23.033	24.922	19.044
90	12.288	13.612	13.988
91	7.505	10.678	9.251
92	7.655	11.74	12.135
93	11.66	18.805	19.581
94	22.334	22.355	23.083
95	13.628	16.402	24.61
96	6.664	10.737	18.334
97	13.369	14.025	16.956
98	11.37	15.052	12.989
99	15.359	15.861	14.558
100	16.413	15.78	17.924

2009	H (MJ/m ² -day)		
date	Radar	Office	Maeklang
76	9.378	10.779	9.556
77	11.943	9.786	11.431
78	15.641	15.144	16.608
79	15.079	18.078	18.378
80	26.032	21.344	20.527
81	10.246	13.874	17.150
82	9.269	13.580	13.314
83	16.266	15.667	15.722
84	12.671	17.843	19.719
85	20.256	11.963	18.432
86	28.155	24.393	23.098
87	23.137	20.651	19.582
88	23.619	20.507	19.956
89	21.595	21.535	22.749
90	26.974	23.431	21.557
91	25.157	17.267	23.090
92	19.822	16.244	18.342
93	17.118	17.604	17.346
94	27.700	24.281	20.478
95	18.183	21.876	19.011
96	18.926	21.548	19.142
97	15.004	19.272	18.670
98	18.964	16.974	21.228
99	15.760	16.713	20.821
100	21.826	20.276	22.551

2008	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
101	14.469	21.867	19.397
102	12.991	22.546	21.871
103	20.408	24.991	23.974
104	13.574	24.817	22.267
105	26.585	21.848	23.521
106	27.2	25.119	22.883
107	23.374	19.35	19.542
108	19.977	16.132	19.527
109	22.755	17.373	18.893
110	24.308	14.573	19.095
111	19.148	17.757	19.248
112	12.297	14.581	17.44
113	12.966	10.995	16.191
114	9.479	13.379	14.656
115	8.931	13.014	16.299
116	14.328	14.398	12.736
117	10.702	13.893	14.513
118	10.805	12.635	15.539
119	12.718	15.887	21.17
120	10.402	8.808	13.537
121	10.372	8.001	9.405
122	20.595	13.211	17.187
123	15.795	13.085	16.977
124	2.31	1.816	3.725
125	6.682	10.329	10.009

2009	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
101	20.450	21.203	19.349
102	16.808	23.177	19.469
103	9.792	15.037	15.445
104	16.296	16.773	19.757
105	15.128	17.761	15.602
106	9.256	14.544	19.965
107	10.789	21.723	17.859
108	2.716	7.068	16.156
109	16.893	23.952	23.528
110	12.921	19.319	23.545
111	21.405	18.740	20.829
112	23.971	23.756	19.643
113	23.891	25.004	22.128
114	11.766	17.145	18.062
115	10.084	13.787	21.241
116	3.545	3.328	2.582
117	8.676	11.347	17.787
118	8.438	9.814	22.393
119	16.933	16.134	18.527
120	12.788	14.295	16.282
121	15.716	16.782	19.508
122	12.118	17.901	15.928
123	13.884	11.203	16.622
124	11.494	11.269	15.305
125	17.287	15.251	19.645

2008	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
126	19.305	13.273	20.104
127	14.049	24.628	17.748
128	9.231	18.821	18.463
129	13.369	19.238	16.727
130	14.596	15.043	19.975
131	9.922	14.43	18.479
132	15.075	15.523	20.794
133	6.352	10.943	13.696
134	2.521	2.96	11.346
135	3.818	2.712	5.872
136	5.606	4.273	9.278
137	8.055	8.636	12.389
138	4.177	7.414	10.496
139	3.544	5.348	9.145
140	12.04	15.004	15.458
141	11.048	8.298	14.919
142	22.917	15.469	20.099
143	15.14	19.961	18.511
144	12.241	15.291	22.599
145	15.988	13.997	17.759
146	11.504	16.432	22.015
147	16.27	20.779	19.396
148	20.705	22.064	20.745
149	10.192	15.736	14.695
150	8.327	13.648	15.587

2009	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
126	13.059	14.744	19.232
127	19.702	18.480	19.905
128	20.264	15.607	18.942
129	13.288	17.485	21.040
130	12.271	13.820	19.327
131	13.328	19.077	20.763
132	13.222	18.291	20.868
133	9.538	15.845	14.812
134	7.686	7.907	12.452
135	9.925	8.725	9.573
136	15.622	10.769	11.361
137	22.861	23.691	20.325
138	19.511	23.500	22.491
139	14.763		20.766
140	16.605	1.963	17.234
141	23.550	24.454	24.141
142	17.294	22.095	22.468
143	13.205	18.968	20.761
144	18.878	15.268	14.002
145	18.018	21.387	18.018
146	21.957	17.992	19.138
147	15.703	17.850	18.369
148	10.746	14.425	18.573
149	9.277	7.802	12.824
150	10.062	9.028	12.933

2008	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
151	14.503	21.438	16.943
152	9.372	16.384	14.68
153	18.067	19.548	17.092
154	1.92	12.942	16.048
155		8.253	10.567
156		12.624	14.999
157		15.486	14.064
158		14.069	13.172
159		11.938	15.667
160		14.642	14.711
161		19.158	20.189
162		19.447	19.155
163		18.564	17.266
164		20.23	14.259
165		16.186	14.226
166		13.999	12.235
167		8.923	8.326
168		7.772	9.379
169		4.929	10.384
170		11.505	14.371
171		15.638	15.753
172		16.266	17.87
173		19.6	16.786
174		20.701	19.977
175		22.142	20.193

2009	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
151	12.464	12.198	14.697
152	8.361	8.703	13.037
153	6.225	10.536	17.804
154	12.651	19.198	18.496
155	12.212	12.430	16.141
156	8.327	9.292	12.487
157	5.181	9.360	8.122
158	1.999	4.430	8.289
159	2.026	4.080	6.543
160	20.360	23.356	20.860
161	12.034	15.732	16.997
162	18.670	20.873	19.763
163	11.478	13.090	13.670
164	16.145	13.754	16.802
165	12.126	16.820	16.357
166	13.165	16.134	20.384
167	11.643	14.862	16.371
168	9.836	7.537	8.669
169	7.598	8.077	6.997
170	10.462	11.712	15.075
171	11.373	20.195	16.456
172	14.327	17.729	15.429
173	13.833	16.133	13.692
174	14.549	8.315	15.099
175	20.996	12.474	13.402

2008	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
176		18.944	19.101
177		15.771	14.807
178		18.306	16.888
179	13.111	18.795	17.738
180	10.47	13.879	16.177
181	6.847	8.181	10.094
182	10.706	10.182	8.775
183	11.602	18.706	17.681
184	10.632	10.684	13.575
185	5.987	8.209	9.092
186	10.54	12.942	16.129
187	12.334	15.714	13.775
188	11.4	10.089	14.726
189	7.393		12.71
190	6.936		10.873
191	16.437		17.42
192	8.402		14.247
193	9.377		16.794
194	14.874		16.909
195	6.712		12.016
196	4.722		9.79
197	6.337	10.735	14.531
198	4.386	14.783	12.993
199	3.282	9.09	7.178
200	3.636	6.607	6.846

2009	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
176	17.534	22.937	18.239
177	5.486	9.305	12.389
178	8.050	13.800	14.042
179	6.435	16.294	13.925
180	4.035	9.277	10.665
181	6.960	11.065	11.893
182	4.910	5.617	8.174
183	8.757	13.232	11.814
184	11.669	14.259	17.783
185	8.544	10.147	13.895
186	2.963	4.477	3.765
187	2.857	3.846	3.257
188	5.382	16.204	11.760
189	13.122	16.883	16.943
190	18.159	18.969	14.274
191	19.261	23.890	19.113
192	12.304	18.160	21.010
193	11.557	16.684	18.315
194	7.977	8.379	9.939
195	4.824	9.335	11.425
196	6.905	12.690	15.715
197	12.439	15.754	15.568
198	12.298	22.096	18.508
199	13.006	12.936	13.227
200	9.804	19.641	14.987

2008	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
201	8.338	12.235	12.342
202	8.799	9.296	11.434
203	10.881	15.943	17.516
204	8.637	10.166	12.931
205	6.169	8.73	9.456
206	16.856	16.215	12.192
207	16.051	9.333	13.207
208	17.91	10.011	18.447
209	15.529	13.161	16.138
210	17.421	20.197	12.692
211	9.788	16.824	14.435
212	13.317	23.544	15.734
213	18.261	19.852	16.514
214	10.851	14.711	13.086
215	18.294	17.249	18.298
216	16.445	17.468	19.174
217	18.152	20.378	15.59
218	7.473	3.469	9.494
219	6.801		13.41
220	8.469		12.039
221	5.718	8.203	11.037
222	3.845	3.769	7.894
223	5.837	6.316	12.147
224	4.532	5.926	8.178
225	7.007	9.661	11.686

2009	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
201	3.567	6.765	9.628
202	10.188	14.739	10.754
203	12.383	19.607	15.608
204	9.928	17.168	19.478
205	18.226	18.958	20.085
206	10.133	10.773	12.992
207	4.452	5.431	7.109
208	5.098	10.828	9.632
209	7.010	18.520	10.323
210	5.842	9.879	8.468
211	4.162	7.128	9.705
212	5.756	12.944	11.916
213	10.837	16.274	12.227
214	18.489	23.584	19.182
215	11.015	18.061	14.094
216	9.955	13.925	14.617
217	3.878	6.385	9.540
218	11.297	16.007	14.470
219	3.752	6.406	6.487
220	3.594	15.477	10.747
221	6.233	11.092	10.322
222	13.079	17.699	16.396
223	11.940	14.342	18.043
224	10.016	15.951	14.086
225	10.584	13.373	13.498

2008	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
226	8.244	10.868	10.389
227	14.718	13.87	13.235
228	16.339	23.154	20.602
229	13.198	16.78	14.494
230	8.81	12.736	12.493
231	9.901	11.377	12.624
232	8.046	15.958	21.693
233	12.85	16.102	19.128
234	10.516	9.468	12.219
235	15.403	13.447	20.071
236	13.705	13.388	20.252
237	19.115	22.835	20.672
238	11.481	15.439	15.913
239	14.805	16.01	14.358
240	9.24	10.688	10.32
241	14.785	13.862	17.655
242	16.471	22.449	23.299
243	15.637	20.867	20.375
244	11.785	16.21	18.849
245	11.218	7.512	
246	20.871	19.767	
247	18.618	18.403	
248	20.115	21.815	
249	5.689	8.951	
250	7.59	9.648	

2009	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
226	8.176	15.111	11.555
227	12.922	13.928	13.472
228	9.034	10.676	10.805
229	10.527	13.115	12.009
230	11.494	13.964	17.075
231	20.963	26.727	23.851
232	20.144	25.463	22.951
233	13.867	22.307	19.149
234	6.824	10.833	9.001
235	16.932	18.778	16.396
236	8.651	9.461	13.921
237	24.796	22.391	21.823
238	12.970	20.658	21.200
239	13.587	17.518	23.965
240	18.095	17.452	21.794
241	20.262	20.385	19.276
242	8.213	8.868	12.715
243	15.282	11.129	13.715
244	10.504	8.869	11.379
245	9.856	8.174	17.689
246	15.349	21.783	17.769
247	12.146	21.489	19.878
248	11.617	23.445	19.703
249	10.713	10.320	20.057
250	11.719	12.919	19.386

2008	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
251	13.554	11.009	
252	12.776	11.195	
253	14.698	15.975	
254	13.066		
255	6.339	11.147	12.842
256	2.68	6.17	10.376
257	7.146	10.517	12.478
258	8.115	11.632	14.478
259	11.439	15.55	18.178
260	7.694	12.485	15.606
261	14.168	14.624	21.284
262	12.946	11.05	10.506
263	10.4	23.223	20.008
264	10.15	13.074	14.597
265	13.588	18.986	19.039
266	10.837	15.001	16.779
267	15.325	15.435	17.712
268	13.15	17.31	18.264
269	6.239	10.428	14.018
270	4.612	5.755	10.052
271	12.383	14.535	20.146
272	13.186	11.714	23.09
273	9.923	15.062	21.611
274	8.986	13.179	17.336
275	7.578	4.102	3.368

2009	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
251	13.366	13.983	18.197
252	8.197	12.375	21.119
253	14.059	19.360	24.234
254	14.151	17.313	22.412
255	13.027	15.281	20.650
256	13.482	16.405	15.749
257	10.956	13.714	15.419
258	11.269	19.384	17.828
259	12.050	14.000	16.175
260	10.121	11.451	11.537
261	8.738	11.181	11.062
262	9.141	16.505	16.071
263	17.965	22.537	20.655
264	17.663	24.338	21.130
265	8.440	9.374	11.721
266	20.016	14.763	22.022
267	9.672	19.607	21.807
268	11.796	13.752	15.159
269	2.500	1.787	5.523
270	6.611	3.053	7.149
271	11.418	11.272	15.465
272	8.209	19.497	21.523
273		18.421	20.394
274	1.877	2.286	6.270
275	1.647	1.150	4.302

2008	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
276	9.132	8.346	13.39
277	17.747	14.635	14.489
278	10.723	15.558	21.219
279	9.601	13.258	18.628
280	6.722	8.319	11.096
281	9.835	8.643	14.808
282	13.602	14.936	19.469
283	7.725	7.742	12.351
284	12.007	13.067	20.999
285	10.142	17.799	20.074
286	14.257	18.554	20.829
287	18.863	20.254	21.419
288	16.17	19.457	19.523
289	21.351	17.157	22.038
290	11.424	10.698	16.133
291	8.251	14.204	17.793
292	7.627	15.056	19.048
293	8.532	10.93	15.067
294	11.588	12.127	14.277
295	14.593	10.623	12.712
296	9.035	8.832	17.214
297	13.517	13.451	19.05
298	10.815	8.575	14.049
299	3.227	4.067	11.078
300	1.865	1.813	5.82

2009	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
276	3.863	2.590	4.367
277	10.813	10.429	17.339
278	13.353	12.561	17.926
279	17.663	11.127	18.442
280	12.110	17.062	20.965
281	10.804	14.131	20.975
282	17.943	19.841	20.732
283	9.902	13.864	22.528
284	12.429	9.400	16.199
285	17.240	16.135	19.145
286	9.899	10.029	16.554
287	6.872	6.701	11.580
288	14.435	13.630	17.550
289	12.026	14.079	19.569
290	11.081	13.285	20.161
291	11.196	12.728	18.736
292	10.684	14.637	18.738
293	8.600	12.428	16.986
294	6.712	7.646	17.937
295	11.689	12.185	15.948
296	6.629	7.034	15.973
297	13.101	10.758	16.943
298	8.632	10.404	9.428
299	20.125	14.356	17.253
300	17.760	17.457	20.946

2008	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
301	2.91	5.135	6.972
302	3.269	4.153	6.176
303	8.577	7.63	16.257
304	10.574	8.544	19.569
305	6.571	5.579	8.686
306	4.487	1.908	3.759
307	11.905	8.45	13.372
308	17.689	11.315	19.229
309	20.624	14.099	20.792
310	10.71	11.494	16.473
311	10.783	8.28	14.183
312	9.526	10.444	17.536
313	11.784	12.219	17.772
314	23.135	20.517	20.022
315	23.054	20.017	20.059
316	23.549	20.344	20.201
317	24.2	20.803	20.8
318	23.896	14.147	19.885
319	22.94	19.867	20.046
320	22.277	19.762	19.937
321	22.301	18.61	20.002
322	17.612	18.338	4.062385
323	15.562	12.596	18.95413
324	4.066	4.601	9.460085
325	12.515	11.003	16.2748

2009	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
301	19.054	22.088	20.793
302	18.724	18.100	20.320
303	16.852	19.451	20.712
304	22.234	20.772	20.572
305	5.768		15.569
306	14.736		19.299
307	12.389		18.959
308	5.257		13.980
309	23.398		13.344
310	22.470		20.199
311	23.925		19.742
312	21.633		20.007
313	19.340		19.824
314	19.842		18.883
315	22.631		20.168
316	13.634		20.222
317	12.464		19.467
318	22.060		19.915
319	19.647		18.152
320	16.871		19.366
321	16.037		19.605
322	20.594		16.442
323	19.134		13.884
324	20.919		18.534
325	20.743		14.247

2008	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
326	14.332	2.168	8.035477
327	10.432	13.027	13.29113
328	16.454	18.316	17.82351
329	11.277	11.129	17.70828
330	14.777	12.878	17.61298
331	17.236	16.146	17.89857
332	22.856	19.262	19.70117
333	22.729	19.162	18.60295
334	22.841	17.075	18.50583
335	22.646	19.01	19.1838
336	22.657	19.7	19.99578
337	22.289	19.285	19.58834
338	21.969	18.777	19.16363
339	22.135	15.218	18.62
340	16.69	16.708	18.033
341	14.657	11.197	18.122
342	20.38	2.143	17.092
343	14.203	14.418	17.404
344	13.422	6.661	12.854
345	20.745	11.371	14.877
346	19.04	9.209	15.618
347	21.616	10.472	14.912
348	21.883	18.448	18.274
349	22.079	14.807	16.623
350	21.845	9.098	16.37

2009	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
326	21.783		5.166
327	16.298		18.295
328	18.998		19.471
329	21.898		19.788
330	22.598		19.321
331	22.562		19.116
332	22.280		19.419
333	22.240		18.858
334	22.378		17.932
335	20.516	18.224	12.010
336	21.837	19.143	17.103
337	20.360	18.299	17.789
338	22.391	12.994	18.231
339	20.231	8.538	15.318
340	21.333	10.705	17.481
341	20.582	9.728	16.944
342	20.055	8.486	17.188
343	20.093	10.899	16.789
344	19.491	7.423	14.986
345	19.746	7.973	15.237
346	21.390	15.956	18.252
347	21.035	18.311	16.679
348	21.412	14.570	17.850
349	20.234	4.451	17.565
350	21.690	11.876	18.168

2008	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
351	21.994	13.622	17.739
352	21.959	17.66	18.237
353	22.436	17.199	17.235
354	20.827	13.025	16.442
355	22.239	13.633	17.241
356	22.27	17.04	17.253
357	21.883	12.209	18.341
358	19.735	7.724	18.637
359	21.876	11.436	15.559
360	18.543	14.008	16.456
361	7.53	4.921	3.99
362	16.311	4.191	14.376
363	21.924	12.19	12.679
364	20.974	14.534	18.405
365	22.187	11.368	19.231
366	15.68	13.256	19.124

2009	H (MJ/m²-day)		
date	Radar	Office	Maeklang
351	20.417	9.567	17.458
352	18.482	14.229	16.353
353	15.365	12.239	16.587
354	16.597	14.499	16.805
355	14.038	18.486	16.326
356	14.897	18.267	17.454
357	20.090	17.955	17.782
358	20.906	17.660	17.819
359	17.721	17.877	18.238
360	21.578	17.962	18.555
361	21.414	17.583	18.782
362	21.303	17.995	18.770
363	21.781	12.965	19.253
364	22.292	14.817	19.320
365	20.250	12.481	18.407

ภาคผนวก ข.

บทความที่แสดงในการประชุมวิชาการนักวิจัยรุ่นใหม่พบเมธีวิจัยอาวุโส
เมื่อวันที่ 13 ตุลาคม 2549 ที่ อ. ชะอำ จ. เพชรบุรี

เรื่อง

“Assessment of a Satellite – Based Solar Radiation Model
Using 25 Ground Reference Stations in the Tropics”

Assessment of a Satellite – Based Solar Radiation Model
Using 25 Ground Reference Stations in the Tropics.

¹ Sungseng Liengjindathaworn, ² Serm Janjai

¹Department of Physics, Faculty of Science, Ubon Ratchathani university
Ubon Ratchathani 34190, Thailand

²Laboratory of Atmospheric Physics, Department of Physics, Faculty of Science,
Silpakorn university Nakhon Pathom 73000, Thailand

Abstract

The performance of a satellite-based solar radiation model was investigated. This model relates the earth-atmospheric albedo detected from the GMS 5 satellite to the absorptance and reflectance of various atmospheric constituents which can be used to calculate incident solar radiation on the earth's surface. To examine its performance, the model was used to calculate monthly average solar radiation at 25 solar monitoring stations in Thailand. The values of monthly average daily radiation calculated from the model were compared with those obtained from the measurements. It found that the discrepancy is in terms of RMSD and MBD between the measured and the calculated radiation are 7.2 % and -0.2 %, respectively.

1. Introduction

Information on intensity and spatial distribution of solar radiation incident on the earth's surface are very important data for solar energy applications. In general, these data are obtained from solar radiation monitoring stations where different components of solar radiation are routinely measured. However, numbers of the stations are usually insufficient for providing these data, due to high equipment costs and long-term management of the stations. An alternative solution to this problem is to derive solar radiation data from meteorological satellite data using a satellite-based solar radiation model.

During the last 20 years, a number of satellite-based solar radiation models have been developed [1-15] and used for many parts of the world. For a tropical environment, Nunez [16] proposed a simple satellite-based model for a retrieval of solar radiation in the tropical western Pacific Ocean. Janjai et al. [17] has improved the method for deriving its model parameters and used it to generate solar radiation maps of Thailand from GMS 4 and GMS 5 data. After the generation of these maps, a new solar radiation monitoring network was created for this country. The network consists of 25 pyranometer stations covering all main parts of the country. The locations of the stations include several types of terrains such as coastal area, high land and mountainous area. The objective of this paper is to assess the performance of this model using solar radiation from these new 25 pyranometer stations as references.

2. Description of the model

The model originally by Nunez [16] and improved by Janjai et al. [17], which was subjected to this investigation, is based on the radiative budget schematically show in Fig 1.

According to the model, the effect of the atmospheric reflection by clouds and gases is represented in one term denoted as ρ'_A . The satellite receives the reflection from clouds and gases (ρ'_A) and atmospheric aerosols ρ'_{aer} . Therefore, the transmission of downward solar radiation depleted by the atmospheric reflection due to clouds, gases and aerosols is $(1 - \rho'_A - \rho'_{aer})$. This radiation is further absorbed by water vapour (α'_w) ozone (α'_o) and aerosols (α'_{aer}). The absorption by gases is include in the water vapour absorption term. Thus, the transmission at the surface is $(1 - \rho'_A - \rho'_{aer})(1 - \alpha'_o - \alpha'_w - \alpha'_{aer})$. At the surface, it is reflected by ground (ρ'_g) and is further depleted by the atmospheric reflection ($\rho'_A + \rho'_{aer}$). No further absorption is estimated as it is assumed that the spectral irradiance in the absorption band of ozone, water vapour and gases has been all absorbed during the downward travel of the solar radiation. With these processes, the earth-atmospheric reflectivity as seen by the satellite is given by

$$\rho'_{EA} = \rho'_A + \rho'_{aer} + (1 - \rho'_A - \rho'_{aer})^2 (1 - \alpha'_o - \alpha'_w - \alpha'_{aer}) \rho'_g \quad (1)$$

Solving for ρ'_A from eq(1), yields the equation for calculating the atmospheric albedo, as follows:

$$\rho'_A = \frac{-(1 - 2CB) \pm \sqrt{(1 - 2CB)^2 - 4C(A + CB)^2}}{2C} \quad (2)$$

where $A = \rho'_{aer} - \rho'_{EA}$

$$B = 1 - \rho'_{aer}$$

$$C = (1 - \alpha'_o - \alpha'_w - \alpha'_{aer}) \rho'_g$$

From eq (2), ρ'_{EA} is obtained from satellite data, α'_o is calculated from ozone data, α'_w is estimated from precipitable water and α'_{aer} and ρ'_{aer} can be computed by visibility data. Knowing all these data, we can calculate the value of satellite-band atmospheric albedo, ρ'_A from eq.(2). The detail of the calculation of these model parameters is explained in Janjai et al. (2005).

The next step is to convert the satellite-band atmospheric albedo ρ'_A into broad-band atmospheric albedo (0.3-3.0 μm) ρ_A using a statistical relation developed by Janjai et al. (2005) for GMS 5 satellite expressed as :

$$\rho_A = -0.0768 + 1.4846\rho'_A \quad (3)$$

Then the value of the broad-band atmospheric albedo (ρ_A) obtained from eq.(3) is used to calculate the daily broad-band atmospheric transmittance (τ) written in the following equation : (see Fig 1.)

$$\tau = \frac{(1 - \rho_A - \rho_{aer})(1 - \alpha_w - \alpha_o - \alpha_{aer})}{1 - (\rho_A + \rho_{aer})\rho_g} \quad (4)$$

The unprimed quantities in equation (4) represent the same parameters as in eq. (1), but their values are in the broad-band spectrum (0.3-3.0 μm). The calculation of these parameters is similar to that of the satellite band. The denominator of eq. (4) denotes the contribution from multiple scattering between the surface and the atmospheric.

Finally, the value of daily global radiation (H) is obtained from the following equation

$$H = \tau H_0 \quad (5)$$

where H_0 is daily extraterrestrial radiation.

3. Method

3.1 Preparation of solar radiation data

The solar radiation data used for the comparison was from a solar radiation measuring network of Thailand. This network was established by our Laboratory for the Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, Thailand in the year 2002. The positions of the stations are uniformly distributed over Thailand, a tropical country in Southeast Asia. The location of the stations are in a wide range of local environments, eg. Coastal environment in the South, Mountainous environment in the North and high land in the Northeast.

Each station consists of a pyranometer of Kipp&Zonen (model CM 11) and a data logger of Yokokawa (model DC 100). The data logger of each station was programmed to collect the voltage from the pyranometer every 1 second. This voltage is averaged every 10 minutes. The 10-minute average value is record in the memory of the data logger. These values are loaded into a diskette and send to our Laboratory either attached files to an email or by regular mail at the end of each month. At the Laboratory the voltage data are converted into hourly, daily and monthly average of daily solar radiation in MJ/m². For the quality control of the data, a program in IDL (Interactive Data Language) was developed to screen the data. In this work, only the monthly average of daily global solar radiation collected during January to December, 2002 was used for investigating the performance of the model.

3.2 Calculation of solar radiation from the model

The locations of monitoring stations were set to be target areas of the model testing. As the model is emphasized on the calculation of monthly average of daily radiation, all model parameters were computed in monthly average of daily values.

To compute the solar radiation, we first calculate the earth-atmospheric albedo from the satellite digital image obtained from the visible channel o the GMS 5 satellite. Nine pixels centered at the monitoring station were cut from the hourly image. The resolution of each pixel is 3x3 km. The gray level of these pixels was converted into the value of the earth-atmospheric albedo using a calibration table provided by Marshall [18]. The hourly values of this earth-atmospheric albedo were average over a day to obtain their daily mean values. These mean values were again averaged over a month and over the nine pixels to obtain monthly mean of daily earth-atmospheric albedo of the target station. Then, we calculate the other parameters of the model. For relative humidity temperature and visibility use for calculating absorption coefficient due to water vapour (α_w) and absorption and scattering coefficient due to aerosols ($\alpha_{aer} \cdot \rho_{aer}$), they were obtained from the measurements at the same monitoring stations or nearby stations.

Finally, with all the values of the input parameters of the model, the monthly average of daily solar radiation at each station were calculated in the period of January to December, 2002.

4. Results and discussion

The values of monthly average daily radiation calculates from the model was plotted against that obtained from the measurement for each station are shown in Fig 2.-4. and the comparison of whole data is predicted in Fig 5. The root mean square different (RMSD) and mean bias different (MBD) are listed in Table 1. From the graphs in Fig 2-4 is observed that the data points are clustered along the diagonal line. For Chanthaburi, the value of RMSD and MBD are relatively high. This is may be due to the fact that the ground-based data such as relative humidity, temperature and visibility were taken from local meteorological stations located 20 km away from the solar radiation measuring station, causing error in the calculation of the radiation. However, if we compare the monthly average radiation obtained from the measurement and that calculated from the model from all stations (Fig 5.), the values of RMSD and MBD are 7.2 % and -0.2 %. That means the model slightly under estimates the solar radiation.

5. Conclusion

The performance of a satellite-based solar radiation model have been investigated Global radiation measured at 25 solar monitoring stations in Thailand was used as reference for the investigation. The model was used to calculate solar radiation at these stations employing the satellite data centred at the location of the stations. The valued of solar radiation obtained from the measurement were compared with those calculated from the model. It is found that for must station, the values of RMSD and MBD are less than 10 % and 5%, respectively. The accuracy of the model is sufficient for solar energy applications.

Acknowledgements

The authors are grateful to the Thailand Research Fund (TRF) for the generous financial support to this research work. The authors are also grateful to the Laboratory of Atmospheric Physics Department of Physics Faculty of Science Silpakorn university and

Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, Thailand. Also thank to Mr. Parinya Srisavat the research assistant.

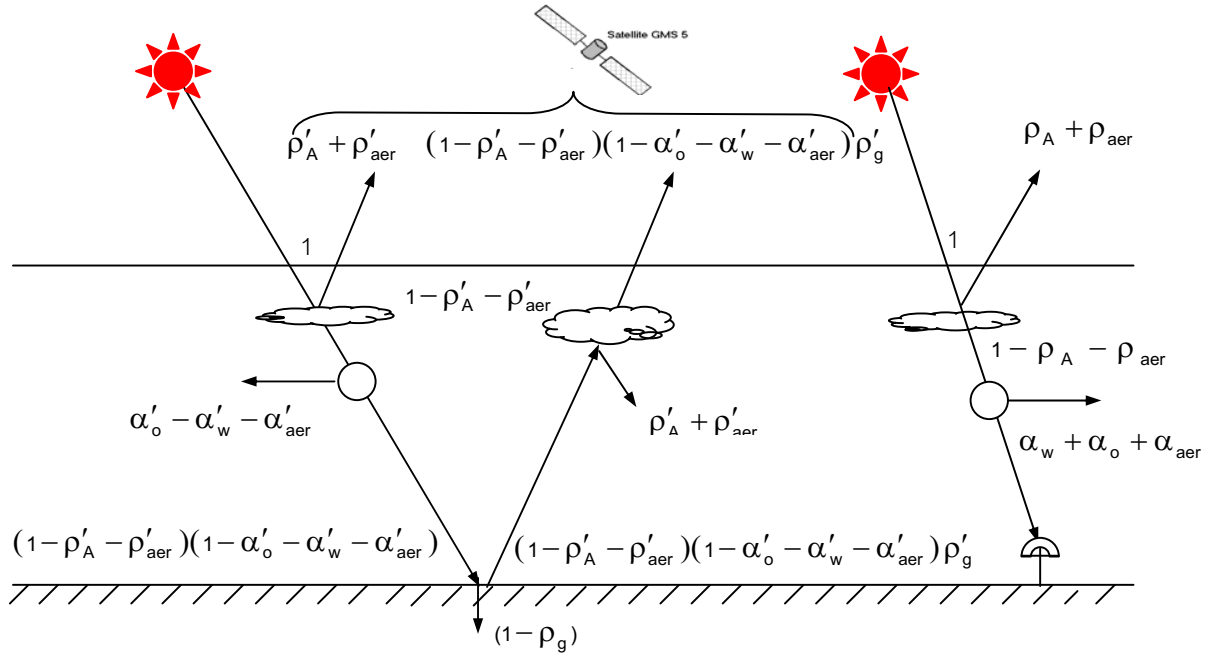


Fig 1. Schematic diagram of the radiative budget of the model under this investigation.

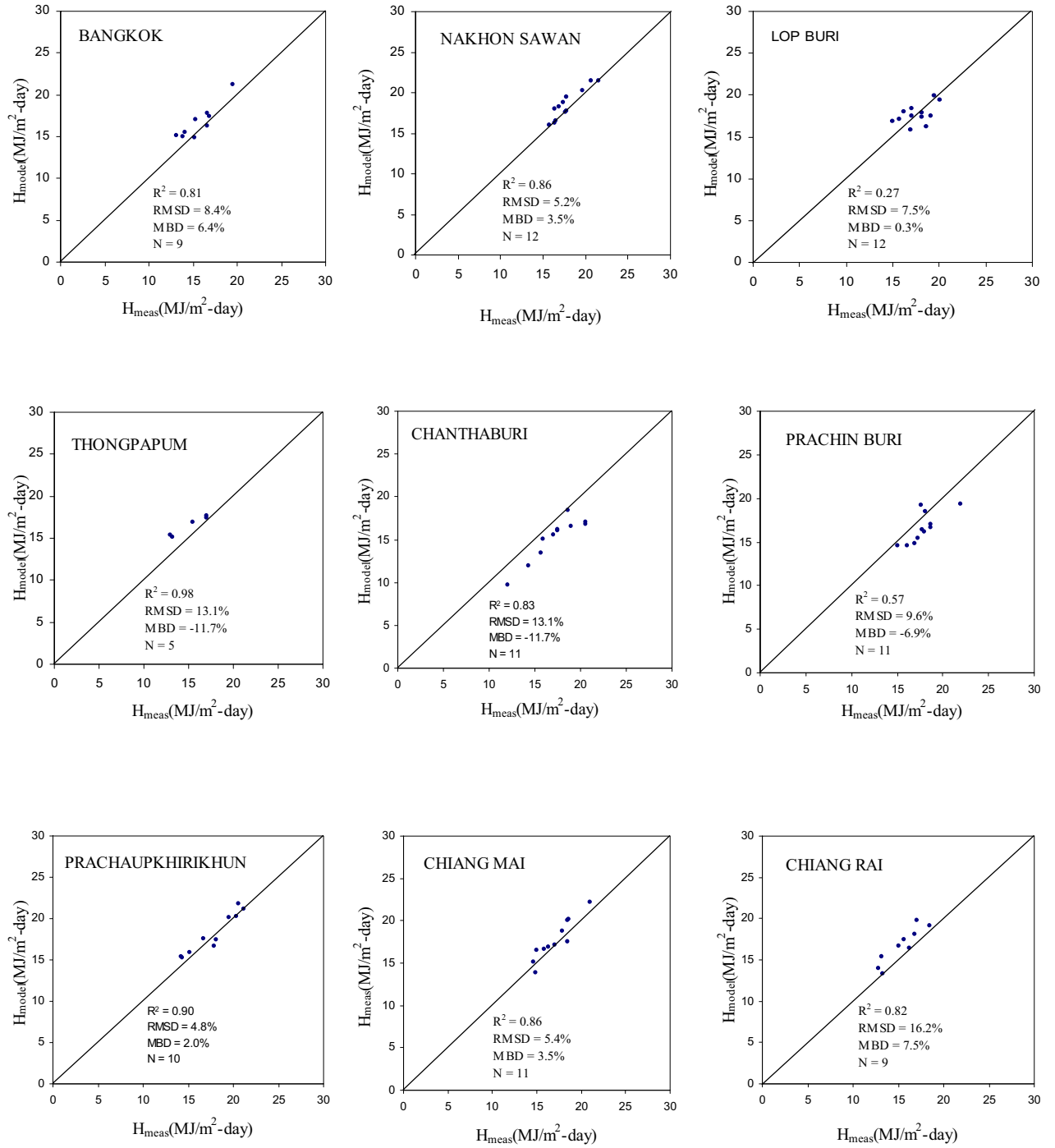


Fig 2. Plots of calculated monthly average daily radiation (H_{mod}) against measured monthly average daily radiation (H_{meas}). The diagonal line represents 1 : 1 line

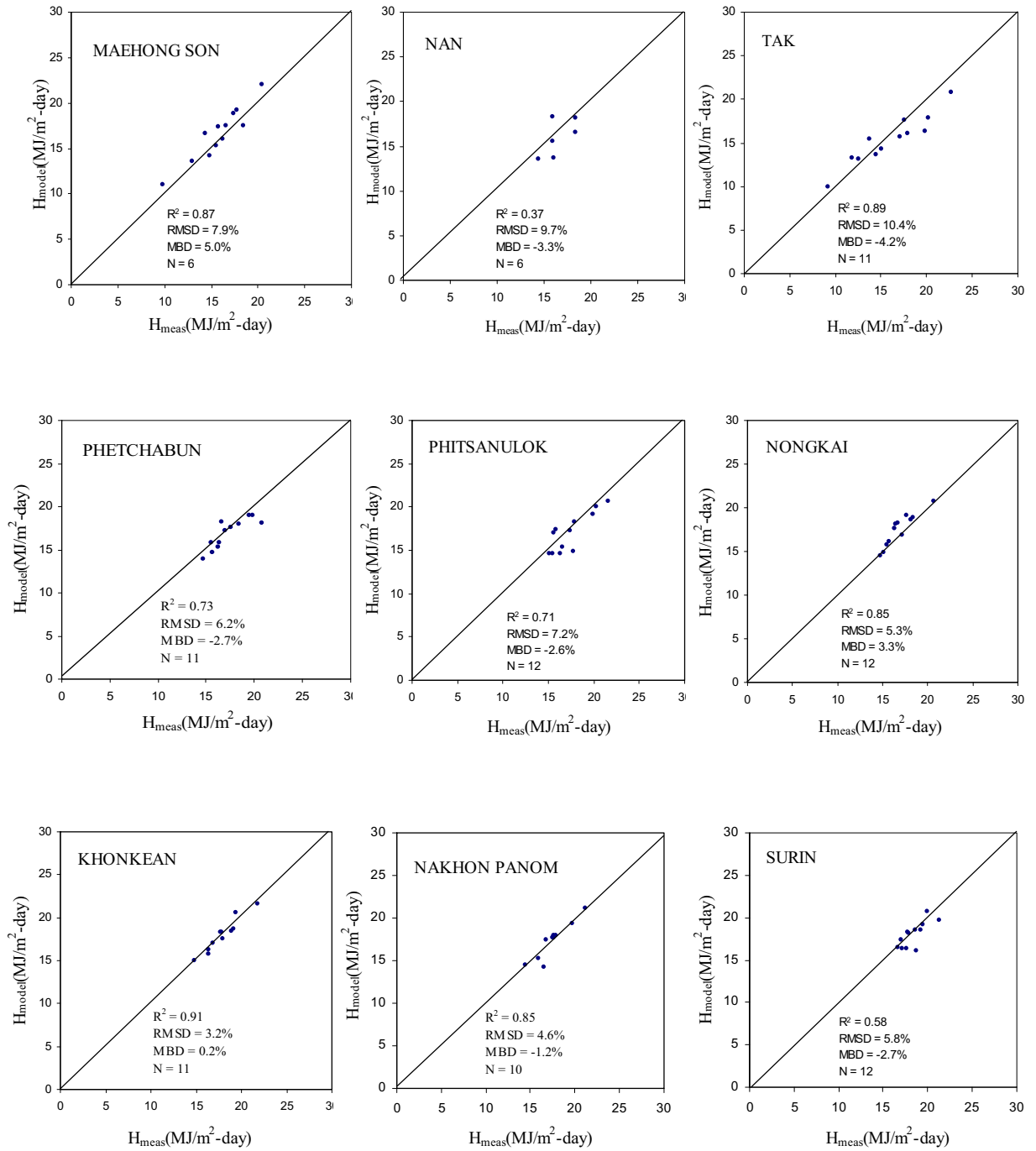


Fig 3. Plots of calculated monthly average daily radiation (H_{mod}) against measured monthly average daily radiation (H_{meas}). The diagonal line represents 1 : 1 line

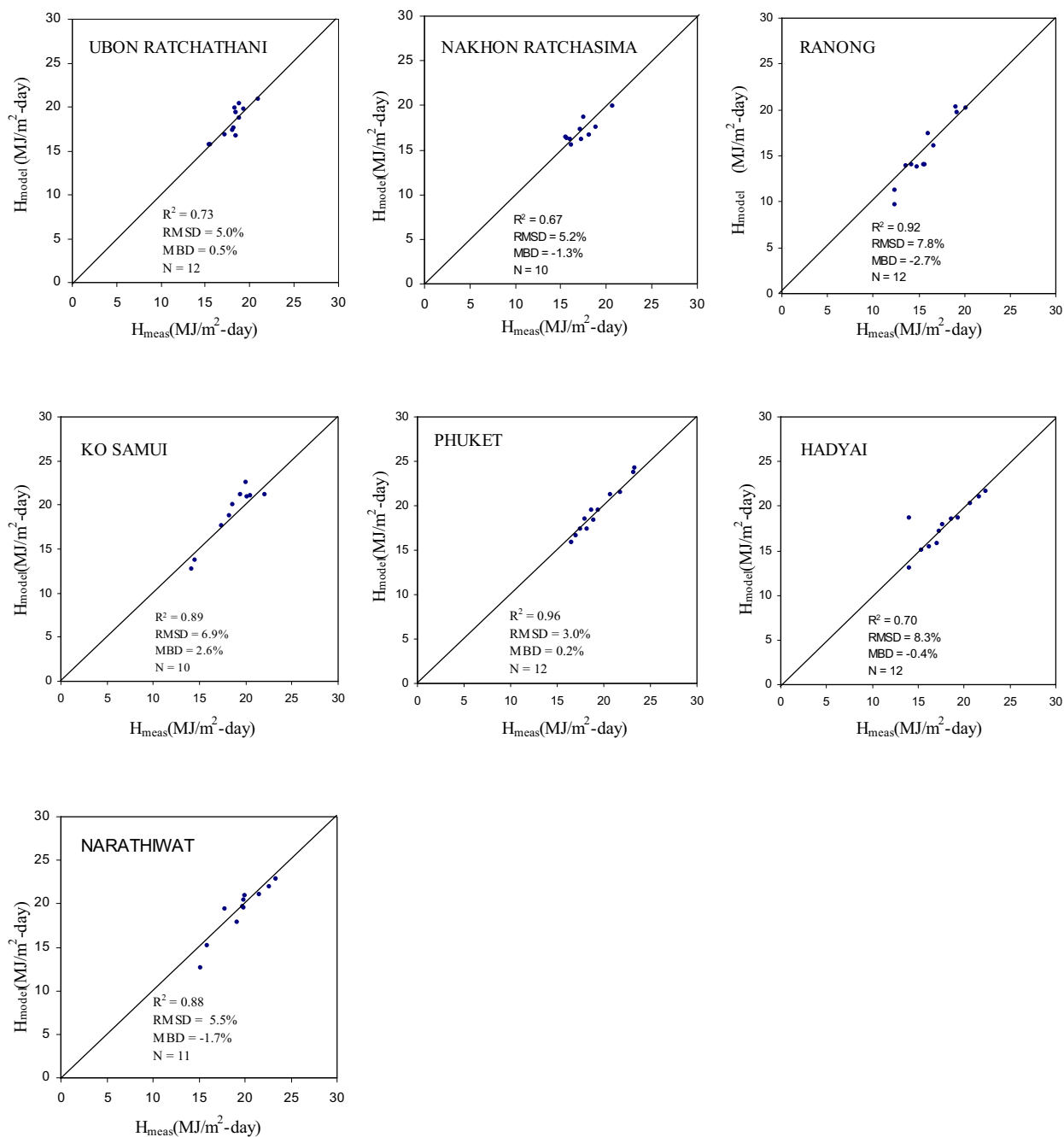


Fig 4. Plots of calculated monthly average daily radiation (H_{mod}) against measured monthly average daily radiation (H_{meas}). The diagonal line represents 1 : 1 line

Table 1. Discrepancy between monthly average of daily global radiation calculated from the model and those obtained from the measurements in term of Root Mean Square Different (RMSD), Mean Bias Different (MBD).

No.	Staion	RMSD		MBD	
		MJ/m ² -day	Percent(%)	MJ/m ² -day	Percent(%)
1	Bangkok	1.31	8.4	1.00	6.4
2	Nakhon Sawan	0.9	5.2	0.62	3.5
3	Lopburi	1.32	7.5	0.05	0.3
4	Thongpapum	1.51	10.0	1.32	8.7
5	Chanthaburi	2.25	13.1	-2.01	-11.7
6	Prachin Buri	1.70	9.6	-1.24	-6.9
7	Prachaupkhirikhun	0.85	4.8	0.29	2.0
8	Chiang Mai	0.92	5.4	0.59	3.5
9	Chiang Rai	1.58	10.2	1.32	8.6
10	Maehong Son	1.25	7.9	0.79	5.0
11	Nan	1.61	9.7	-0.55	-3.3
12	Tak	1.66	10.4	-0.67	-4.2
13	Phetchabun	1.06	6.1	-0.41	-2.3
14	Phitsanulok	1.26	7.2	-0.46	-2.6
15	Nongkai	0.90	5.3	0.56	3.3
16	Khonkean	0.57	3.2	0.04	0.2
17	Nakhon Panom	0.81	4.6	-0.22	-1.2
18	Surin	1.07	5.8	-0.50	-2.7
19	Ubon Ratchathani	0.90	5.0	0.09	0.5
20	Nakhon Ratchasima	0.89	5.2	-0.22	-1.3
21	Ranong	1.24	7.8	-0.42	-2.7
22	Ko samui	1.28	6.9	0.49	2.6
23	Phuket	0.03	3.0	0.57	0.2
24	Hat Yai	1.48	8.3	-0.07	-0.4
25	Naratiwat	1.08	5.5	-0.33	-1.7
	All Stations	1.25	7.2	-0.33	-0.2

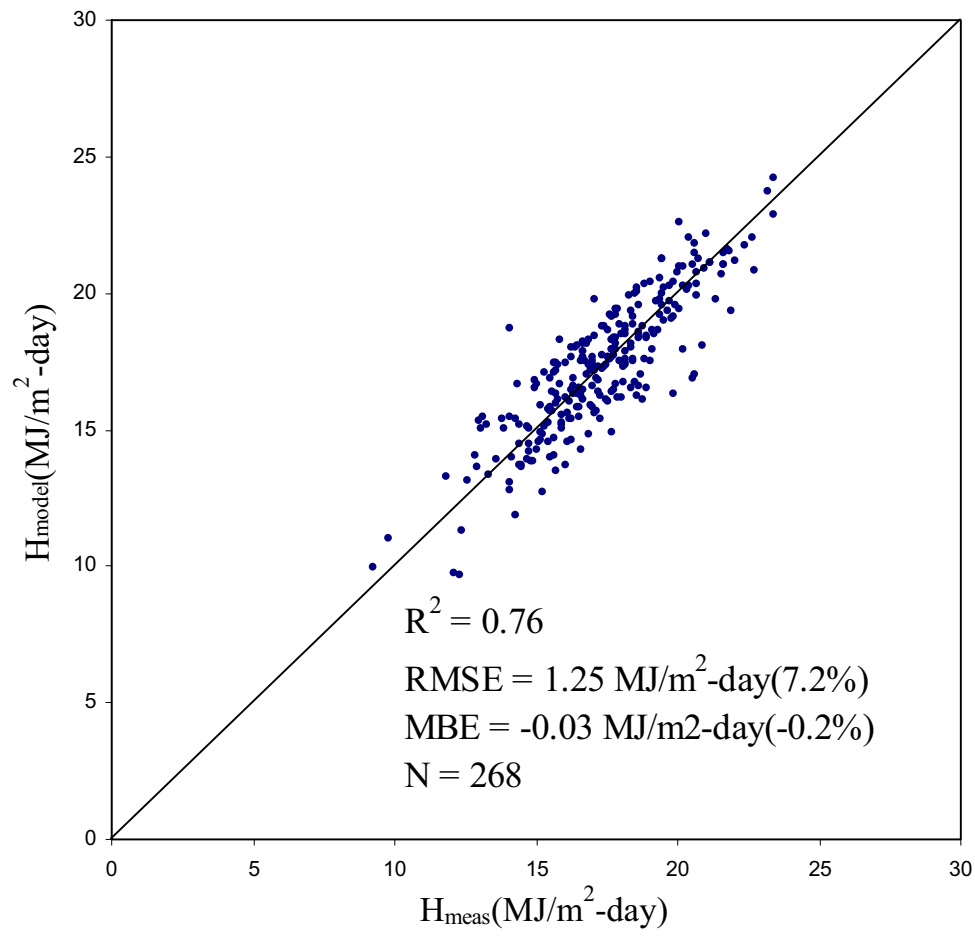


Fig 5. Plots of calculated monthly average daily radiation (H_{mod}) against measured monthly average daily radiation (H_{meas}) for all 25 stations. The diagonal line represents 1 : 1 line

References

- [1] Beyer, H. G., Costanzo, C., Heinemann, D., 1996. Modifications of the heliosat procedure for irradiance estimated from satellite images. *Solar Energy* 56, 207-212.
- [2] Cano, D., Monget, J.M., Albuissou, M., Guillard, H., Regas, N., Wald, L., 1986. A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy*, 37, 31-39.
- [3] Cole, R.J., 1976, Direct solar radiation data as input into mathematical models describing the thermal performance of buildings –II. Development of relationships, *Build. Environ.* 11, 181-186.
- [4] Czeplak, G., Noia, M., Ratto, C.F., 1991. An assessment of a statistical method to estimate solar irradiance, at the earth's surface from geostationary satellite data. *Renewable Energy* 1(5/6), 737-743.
- [5] Dedieu, G., Deschamps, P.Y., Kerr, Y.H., 1987. Satellite estimation of solar irradiance at the surface of the Earth and Surface albedo using a physical model applied to METEOSAT data. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26, 79-87.
- [6] Diabate, L., Moussu, G., Wald, L., 1989. Description of an operation tool for determining global solar radiation at ground using geostationary satellite images. *Solar Energy* 42(3), 201-207.
- [7] Diekmann, F. J., Happ, S., Reiland, M., Koln, Benesch, W., Offenbach, Czeplak, G., Kasten, F., 1988. An operational estimate of global solar irradiance at ground level from Meteosat data : results from 1985 to 1987. *Meteorol. Rdsch.* 41, 65-79.
- [8] Exell, R.H.B., 1976. The solar radiation climate of Thailand. *Solar Energy* 18, 349-354.
- [9] Exell, R.H.B., 1984. Mapping solar radiation by meteorological satellite. *Renewable Energy Review Journal*, Vol. 6, No. 1.
- [10] Frulla, L.A., Gagliardini, D.A., Gallegos, H.G., Lopardo, R., Tarpley, J.D., 1988. Incident solar radiation on Argentina from the geostationary satellite GOES: Comparison with ground measurements. *Solar Energy* 41(1), 61-69.

- [11] Frulla, L.A., Gallegos, H.G., Gagliardini, D.A., Atienza, G., 1990. Analysis of satellite measured insolation in Brazil. *Solar and Wind Technology* 7(5), 501-509.
- [12] Gautier, C., Diak G., Masse, S., 1980. A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. *Journal Applied Meteorology* 36, 1005-1012.
- [13] Hay, J.E., 1993. Satellite based estimates of solar irradiance at the earth's surface-I. Modelling approaches. *Renewable Energy* 4/5 (3), 381 – 393.
- [14] Hise, H. W., Senn, H. V., 1980. Mesoscale mapping of available solar energy at the earth's surface by use of satellite. *Solar Energy* 24, 129-141.
- [15] Ineichen, P., Perez, R., 1999. Derivation of cloud index from geostationary satellites and application to the production of solar irradiance and daylight illuminance data. *Theor. Appl. Climatol.* 64, 119-130.
- [16] Nunez, M., Hart, T.L., Kalma, J.D., 1984. Estimating solar radiation in a tropical environment using satellite data. *Journal of climatology* 4, 573-585.
- [17] Janjai, S., Laksanaboonsong, J., Nunez, M. and Thongsathitya, A., 2005. Development of a method for generating operational solar radiation maps from satellite data for a tropical environment. *Solar Energy* 78, 739-751.
- [18] Marshall, J.L., 1993. Revision of GMS Stretched-VISSR Data Format, Japan Meteorological Agency.