

การวิเคราะห์ความลึกเชิงแสงของละอองลอยในชั้นโทรโพสเฟียร์และสตราโตสเฟียร์



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสุรนารีเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

มกราคม 2560

การวิเคราะห์ความลึกเชิงแสงของละอองลอยในชั้นโทรโพสเฟียร์และสตราโตสเฟียร์



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

มกราคม 2560

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การวิเคราะห์ความลึกเชิงแสงของละอองลอยในชั้นโทรโพสเฟียร์และสตราโตสเฟียร์



บทคัดย่อ

ของ

ปราณี พรหมบุตร

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

มกราคม 2560

ปราณี พรหมบุตร. (2559). การวิเคราะห์ความลึกเชิงแสงของละอองลอยในชั้นโทรโพสเฟียร์และ

สตราโตสเฟียร์. ปริญญาานิพนธ์ กศ.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์

ความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่สามารถอธิบายการแจกแจงของละอองลอยที่อยู่ในชั้นบรรยากาศซึ่งอยู่บริเวณพื้นผิวโลกไปจนถึงด้านบนของชั้นบรรยากาศ ละอองลอย ผุ่น ควัน สามารถป้องกันรังสีจากดวงอาทิตย์ได้โดยการดูดกลืน หรือการกระเจิงแสงทำให้เกิดผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อสมดุลการแผ่รังสีของโลก วิธีการหาค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยสามารถทำได้โดยใช้ข้อมูลดิบจากไลดาร์มาทำการวิเคราะห์หาค่าและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ แบบจำลอง Bird และ แบบจำลอง CSR เพื่อคำนวณหาความลึกเชิงแสงของละอองลอยในชั้นโทรโพสเฟียร์และชั้นสตราโตสเฟียร์ในอำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย ( $17^{\circ} 9' 53'' \text{N}$ ,  $99^{\circ} 51' 43'' \text{E}$ ) โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลต่อเนื่อง 14 วัน ของเดือนมกราคม 2547 ผลที่ได้พบว่าในชั้นโทรโพสเฟียร์ค่าเฉลี่ยความลึกเชิงแสงของละอองลอยอยู่ในช่วง 0.475-1.447 โดยการคำนวณจากข้อมูลไลดาร์ 1.663-1.734 จากแบบจำลอง Bird และ 1.771-1.848 จากแบบจำลอง CSR ให้ค่า RMSE และ MBD เท่ากับ 1.074 และ 1.145 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง Bird ค่า RMSE และ MBD เท่ากับ 1.199 และ 1.280 เมื่อเปรียบเทียบกับ แบบจำลอง CSR สำหรับชั้นสตราโตสเฟียร์ค่าเฉลี่ยความลึกเชิงแสงของละอองลอยอยู่ในช่วง 1.611-1.719 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณจากข้อมูลไลดาร์ ให้ค่า RMSE และ MBD เท่ากับ 0.538 และ 0.014 เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง Bird ค่า RMSE และ MBD เท่ากับ 0.648 และ 0.078 เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง CSR

ANALYSIS OF AEROSOL OPTICAL DEPTH IN TROPOSPHERE AND STRATOSPHERE



Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Master of Education Degree in Physics  
at Srinakharinwirot University  
January 2017

Pranee Prombut. (2017). *Analysis of Aerosol Optical Depth in the Troposphere and Stratosphere*. Master's thesis, M.Ed. (Physics). Bangkok: Graduate school, Srinakharinwirot University.

Advisor Committee: Assist. Prof. Dr.Siriluk Ruangrungrote.

Aerosol Optical Depth (AOD) is one of the most important parameters for explaining the distribution of aerosols within a column of air from the surface the Earth to the top of the atmosphere. Aerosols, dust, smoke and pollution can block the solar radiation by either absorbing or scattering sunlight, causing direct and indirect effects on balance of radiation on the Earth. There were two different methods carried out in order to calculate the AOD such as the analysis of obtainable data from Mie lidar measurement and the computational modeling with mathematical assumptions such as Bird model and CSR model. As a result, the analysis of AOD in the troposphere and in the stratosphere was achieved for Sukhothai Province, Thailand ( $17^{\circ} 9' 53''$  N,  $99^{\circ} 51' 43''$  E). The analytical results of fourteen consecutive days in January 2004 were considered. In the troposphere, the average AOD are in the range of 0.475-1.447 ,1.663-1.734 and 1.771-1.848 with the RMSE and MBD of 1.074, 1.145, 1.199 and 1.280 from the analytical results of the Mie lidar data Bird model and CSR model, respectively. While the stratospheric average AOD were in the range of 1.611-1.719 with the RMSE and MBD of 0.538, 0.014 with the Bird model, 0.648 and 0.078 for the CSR model.

งานวิจัยนี้ได้รับทุนประเภทเงินอุดหนุนการเข้าร่วมประชุมและเสนอผลงานของนิสิตบัณฑิตศึกษา

จาก

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ไปนำเสนองานที่

International Research Symposium on Engineering and Technology (IRSET 2016)

ณ ประเทศสิงคโปร์ ระหว่างวันที่ 13 – 16 กันยายน 2559

ปริญญาานิพนธ์

เรื่อง

การวิเคราะห์ความลึกเชิงแสงของละอองลอยในชั้นโทรโพสเฟียร์และสตราโตสเฟียร์

ของ

ปราณี พรหมบุตร

ได้รับการอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

วันที่.....เดือน มกราคม พ.ศ. 2560

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ที่ปรึกษา .....ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภเดช สุจินทรัพย์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริ สิริสินกุล)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์)

## ประกาศคุณูปการ

ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดีเป็นเพราะผู้วิจัยได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์ ประธานควบคุมปริญญาานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และตรวจทานแก้ไข ตลอดจนช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดระยะเวลาการทำวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภเดช สุจินทรัพย์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริ สิรินิลกุล ที่กรุณาร่วมเป็นกรรมการสอบปากเปล่า และให้คำแนะนำต่างๆ ที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสถาบัน NIES (National Institute for Environment) ประเทศญี่ปุ่น ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลในการทำวิจัยครั้งนี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่มอบทุนในการเข้าร่วมประชุมและเสนอผลงานแก่ผู้วิจัย

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้แก่ผู้วิจัยในการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ซึ่งทำให้เห็นว่าการศึกษาในทุกระดับนั้นต้องมีคนคอยชี้แนะเพื่อนำไปสู่เป้าหมาย และนอกจากการศึกษาในตำราก็มีการศึกษาสิ่งต่างๆรอบตัวอย่างไม่สิ้นสุด

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณะครู โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ บดินทรเดชา ตลอดจนพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ นิสิตปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอโน้มรำลึกพระคุณของบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในการศึกษาของข้าพเจ้า จนสามารถทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ปราณี พรหมบุตร

# สารบัญ

บทที่	หน้า
1	บทนำ..... 1
	ภูมิหลัง..... 1
	ความมุ่งหมายของการวิจัย..... 2
	ขอบเขตของการวิจัย..... 2
	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย..... 3
	นิยามศัพท์เฉพาะ..... 3
2	ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง..... 4
	บรรยากาศของโลก (Atmosphere)..... 4
	ละอองลอย (Aerosol)..... 10
	การกระเจิงแสง (Light scattering)..... 13
	โพลาไรเซชันของแสง (Polarization of light)..... 17
	ไลดาร์และการวิเคราะห์ข้อมูล..... 23
	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... 28
	การวิเคราะห์ทางสถิติ..... 33
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 34
3	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย..... 37
	การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล..... 39
	คำนวณหาค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ที่บรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) และสตราโตสเฟียร์ (Stratosphere) ข้อมูลจากไลดาร์..... 39
	คำนวณหาค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) โดยการประมาณค่าด้วยสมการทางคณิตศาสตร์..... 41

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....45
	ผลการทดลอง.....45
	ผลการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือโดยการทดสอบทางสถิติ.....67
5	สรุป อภิปรายและข้อเสนอแนะ.....68
	สรุปผลการทดลอง.....68
	อภิปรายผลการทดลอง.....69
	ข้อเสนอแนะ.....70
บรรณานุกรม.....	71
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	75



## บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 องค์ประกอบของแก๊สหลักในบรรยากาศโลก.....	5
2 องค์ประกอบของแก๊สที่ผันแปรในบรรยากาศโลก.....	6
3 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย ( $\beta_a(z)$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของละอองลอย ( $\alpha_a$ ) ในชั้นโทรโพสเฟียร์ (LT) วันที่ 16 มกราคม พ.ศ. 2547 เวลา 14.00 น. ....	46
4 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย ( $\beta_a(z)$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของละอองลอย ( $\alpha_a$ ) ในชั้นสตราโทสเฟียร์ (LS) วันที่ 16 มกราคม พ.ศ. 2547 เวลา 14.00 น. ....	47
5 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD: $\tau_a$ ) โดย ใช้ข้อมูลไลดาร์แบบ 24 ชั่วโมงในชั้นโทรโพสเฟียร์ (LT) และชั้นสตราโทสเฟียร์ (LS) วันที่ 16 มกราคม พ.ศ. 2547.....	52
6 แสดงค่ามุมวัน (B) และ มุมเดคลิเนชัน ( $\delta$ ) แบบรายวัน ของวันที่ 10 – 23 มกราคม 2547.....	54
7 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD: $\tau_a$ ) โดยการประมาณค่าด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ โดยใช้แบบจำลอง วันที่ 16 มกราคม พ.ศ.2547.....	55
8 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายวันของความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยการทดสอบทางสถิติ RMSE และ MBD.....	65
9 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายวันของความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ในชั้นบรรยากาศสตราโตสเฟียร์ โดยการทดสอบทางสถิติ RMSE และ MBD.....	66

## บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 แสดงโครงสร้างชั้นบรรยากาศ.....	8
2 A ภาพเหตุการณ์ไฟไหม้ป่า B การปล่อยควันออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรม.....	11
3 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของรังสีดวงอาทิตย์.....	14
4 การกระเจิงของแสง เมื่อแสงเคลื่อนที่ตกกระทบอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก.....	15
5 การกระเจิงแสงแบบมี.....	16
6 ลักษณะของคลื่นแสง ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	17
7 แสงไม่โพลาไรซ์.....	18
8 แสงโพลาไรซ์ความเข้มแสงลดลงครึ่งหนึ่ง.....	18
9 Wire-grid polarizer.....	19
10 โพลาไรซ์เซชันโดยการดูดกลืนของผลึกไดโครอิก.....	20
11 ความเข้มแสงที่แผ่นโพลาไรซ์ 2 แผ่น เป็นไปตามกฎของมาลุส.....	21
12 กระบวนการโพลาไรซ์โดยการสะท้อน มุมตกกระทบเท่ากับมุมบรีวสเตอร์.....	21
13 แสงที่ไม่โพลาไรซ์ ผ่านผลึกแคลไซต์ เกิดการหักเห 2 แนว.....	22
14 แสดงระบบการทำงานของเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี.....	24
15 แสดงมุมซัวโมง ( $\omega$ ) เมื่อ $Q$ เป็นตำแหน่งของผู้สังเกต และ $\phi$ เป็นตำแหน่งละติจูด.....	31
16 กราฟแสดงค่าโพไรไฟล์ตามแนวตั้งของค่าสัญญาณแก้เชิงพิสัย (Range corrected signal) ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย (Aerosol backscattering coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของละอองลอย (Aerosol extinction coefficient) วันที่ 18 มกราคม 2547 (a)เวลา 8.00 น. และ (b)เวลา 12.00 น.....	48
17 กราฟแสดงค่าโพไรไฟล์ตามแนวตั้งของค่าสัญญาณแก้เชิงพิสัย (Range corrected signal) ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย (Aerosol backscattering coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของละอองลอย (Aerosol extinction coefficient) วันที่ 19 มกราคม 2547 (c)เวลา 8.00 น. และ (d)เวลา 12.00 น.....	49

## บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
18 กราฟแสดงค่าโพโพล์ตามแนวตั้งของค่าสัญญาณแก้ไขพิสัย (Range corrected signal) ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย (Aerosol backscattering coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของละอองลอย (Aerosol extinction coefficient) (e)วันที่ 22 และ (f)วันที่ 23 มกราคม 2547 เวลา 10.00 น.....	50
19 กราฟแสดงค่าโพโพล์ตามแนวตั้งของค่าสัญญาณแก้ไขพิสัย (Range corrected signal) ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย (Aerosol backscattering coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของละอองลอย (Aerosol extinction coefficient) (g)วันที่ 22 และ (h)วันที่ 23 มกราคม 2547 เวลา 12.00 น.....	51
20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ของชั้นโทรโพสเฟียร์ส่วนล่าง (Lower troposphere) ที่ได้จากการคำนวณจากการใช้ข้อมูลไลดาร์ที่กับเวลา (LCT) วันที่ 10 -23 มกราคม 2547 ช่วงเวลา 8.00 – 16.00 น.....	57
21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ของชั้นสตราโตสเฟียร์ส่วนล่าง (Lower stratosphere) ที่ได้จากการคำนวณจากการใช้ข้อมูลไลดาร์ที่กับเวลา (LCT) วันที่ 10 -23 มกราคม 2547 ช่วงเวลา 8.00 – 16.00 น.....	58
22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ที่ได้จากการคำนวณจาก แบบจำลอง Bird กับเวลา (LCT) วันที่ 10 -23 มกราคม 2547 ตลอด 24 ชั่วโมง.....	59
23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ที่ได้จากการคำนวณจาก แบบจำลอง CSR กับเวลา (LCT) วันที่ 10 -23 มกราคม 2547 ตลอด 24 ชั่วโมง.....	60
24 กราฟเปรียบเทียบค่าของความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ที่คำนวณจากข้อมูลไลดาร์ และจากแบบจำลอง Bird และ แบบจำลอง CSR กับช่วงเวลา (LCT) 8.00 – 16.00 น. วันที่ 10 -15 มกราคม 2547.....	62

## บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

### ภาพประกอบ

### หน้า

- 25 กราฟเปรียบเทียบค่าของความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD)  
ที่คำนวณจากข้อมูลไลดาร์ และจากแบบจำลอง Bird และ แบบจำลอง CSR  
กับช่วงเวลา (LCT) 8.00 – 16.00 น. วันที่ 16 -21 มกราคม 2547.....63
- 26 กราฟเปรียบเทียบค่าของความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD)  
ที่คำนวณจากข้อมูลไลดาร์ และจากแบบจำลอง Bird และ CSR  
กับช่วงเวลา (LCT) 8.00 – 16.00 น. วันที่ 22 -23 มกราคม 2547.....64



## รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
(AOD: $\tau_a$ )	ความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD: $\tau_a$ )
$\beta_a$	สัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย ( $m^{-1}sr^{-1}$ )
$\alpha_a$	สัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากละอองลอย ( $m^{-1}$ )
$\beta_m$	สัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากโมเลกุล ( $m^{-1}sr^{-1}$ )
LT	ชั้นโทรโพสเฟียร์ส่วนล่าง (Lower Troposphere)
LS	ชั้นสตราโตสเฟียร์ส่วนล่าง (Lower Stratosphere)
$z_c$	ความสูงวิกฤต (m)
LCT	เวลาท้องถิ่น (Local Time)
B	มุมวัน (องศา)
$\delta$	มุมเดคลิเนชัน (องศา)
RMSE	รากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (Root Mean Squared Error)
MBD	ความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ย (Mean Bias Difference)

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1. ภูมิหลัง

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของโลก การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ (Solar radiation) เป็นการถ่ายพลังงานที่สำคัญต่อระบบนิเวศต่างๆ และการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตบนโลก ชั้นบรรยากาศของโลกเป็นส่วนที่ห่อหุ้มโลกเอาไว้ ภายในชั้นบรรยากาศ มีโมเลกุลของอนุภาคต่างๆ รวมทั้งละอองลอย (Aerosol) ซึ่งเป็นสารแขวนลอยมีสถานะเป็นทั้งของแข็งและของเหลว มีขนาดเล็กกระจายอยู่ในชั้นบรรยากาศ

ปริมาณพลังงานจากแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านมายังพื้นโลกมีความไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ซึ่งละอองลอยเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ เมื่อรังสีของดวงอาทิตย์ผ่านชั้นบรรยากาศแล้วตกกระทบกับละอองลอย จะเกิดการกระเจิงและการดูดกลืนแสงของละอองลอย ซึ่งเป็นสมบัติเชิงแสงของละอองลอย เนื่องจากละอองลอยมีขนาดเล็ก และบางครั้งก็มีค่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่นแสงที่มาตกกระทบจะทำให้แสงเกิดการกระเจิงมาก เมื่อแสงเกิดการกระเจิงมากกว่าปกติ จะส่งผลให้สมดุลในการแผ่รังสีเปลี่ยนไป เพราะแสงจะกระเจิงขึ้นบนหรือออกนอกชั้นบรรยากาศมากกว่าปกติ ชั้นบรรยากาศด้านบนจะร้อนขึ้นส่งผลให้บรรยากาศด้านล่างมีอุณหภูมิเย็นลงกว่าปกติ แต่หากละอองลอยดูดกลืนแสงมากกว่าปกติ แสงที่จะกระเจิงออกนอกบรรยากาศมีน้อยลงก็จะส่งผลให้บรรยากาศชั้นล่างร้อนขึ้น เหมือนปรากฏการณ์เรือนกระจก

ละอองลอยในบรรยากาศมีปริมาณมากน้อยเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล รวมทั้งกิจกรรมและเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนโลกก็จะส่งผลต่อปริมาณของละอองลอย ซึ่งละอองลอยสามารถเกิดขึ้นได้จากการกระทำของมนุษย์ เช่น การเผาป่า เผาไหม้ชีวมวล การเผาไหม้เชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น และละอองลอยที่เกิดจากกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น ไฟป่าที่เกิดจากฟ้าผ่า การระเบิดของภูเขาไฟ เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้ปริมาณของละอองลอยเพิ่มมากขึ้นกว่าปกติ

ละอองลอยมีอยู่ในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) และชั้นสตราโตสเฟียร์ (Stratosphere) ซึ่งมีผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศ ละอองลอยที่แขวนลอยอยู่ในชั้นสตราโตสเฟียร์จะ

มีช่วงเวลาอยู่ในอากาศนานกว่าละอองลอยที่อยู่ในชั้นโทรโพสเฟียร์ ดังนั้นในการศึกษาสมบัติเชิงแสงของละอองลอยจึงควรศึกษาในบรรยากาศทั้งสองชั้น

ปัจจุบันการศึกษาสมบัติเชิงแสงของละอองลอยมีการศึกษาอย่างกว้างขวาง โดยมีการศึกษาจากการเก็บข้อมูลของละอองลอยโดยการใช้เครื่องมือที่หลากหลาย แล้วนำผลที่ได้จากเครื่องมือมาทำการวิเคราะห์ แต่จำนวนเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดละอองลอยอาจมีอยู่อย่างจำกัด ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งในการศึกษาสมบัติของแสงที่เกิดจากละอองลอย เพื่อเป็นการอธิบายหรือทำนายแนวโน้มที่อาจเกิดขึ้นจากข้อมูลที่มีอยู่จริงกับสิ่งที่อาจเกิดขึ้น ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้สนใจศึกษาสมบัติของแสงที่เกิดจากละอองลอย ข้อมูลที่ได้นำมาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้เป็นข้อมูลดิบที่ได้จากสถานีวิจัยรังสีในบรรยากาศ อำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย เป็นข้อมูลของแสงโพลาไรซ์ในแนวขนานและแนวตั้งฉาก โดยนำมาศึกษาหาค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย และได้ทำการศึกษาความลึกเชิงแสงของละอองลอยโดยการใช้การประมาณค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมด้วย

## 2. ความมุ่งหมายของการวิจัย

2.1 เพื่อหาความลึกเชิงแสงของละอองลอยของบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์และชั้นสตราโตสเฟียร์จากข้อมูลไลดาร์ และจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.2 เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์และเปรียบเทียบความลึกเชิงแสงของละอองลอยที่ได้จากข้อมูลไลดาร์ และจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

## 3. ขอบเขตของการวิจัย

3.1 นำข้อมูลดิบที่ได้จากสถานีวิจัยรังสีในชั้นบรรยากาศ อำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย เป็นข้อมูลแสงโพลาไรซ์ในแนวขนานและแนวตั้งฉากของเดือนมกราคม พ.ศ.2547 โดยเลือกวิเคราะห์ข้อมูลต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 7 วัน

3.2 คำนวณค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย ( $\tau_p$ ) ที่ได้จากข้อมูลไลดาร์ และจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้แบบจำลอง Bird และแบบจำลอง CSR ของบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์และชั้นสตราโตสเฟียร์

3.3 เปรียบเทียบค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยระหว่างข้อมูลจากไลดาร์และจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และตรวจสอบความน่าเชื่อถือโดยใช้วิธีการทางสถิติ

#### 4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

4.1 ได้ผลความลึกเชิงแสงของละอองลอย ณ บริเวณประเทศไทย จากข้อมูลไลดาร์และจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ สำหรับบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์และชั้นสตราโตสเฟียร์

4.2 ได้นำทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ และความรู้ทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องมาประยุกต์ใช้ในการอธิบายด้านวิทยาศาสตร์บรรยากาศ

#### 5. นิยามศัพท์เฉพาะ

5.1 ความลึกเชิงแสงของละอองลอย (Aerosol optical depth: AOD) หมายถึง ค่าที่บอกถึงปริมาณแสงที่หายไปจากลำแสงโดยเกิดการลดทอนของแสง ระหว่างที่แสงนั้นผ่านละอองลอย

5.2 ละอองลอย (Aerosol) หมายถึง อนุภาคซึ่งเป็นของแข็งและของเหลวขนาดเล็ก รวมทั้งการผสมกันของอนุภาคทั้งของแข็งและของเหลวที่แขวนลอยอยู่ในอากาศ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย  $10^{-4}$  ถึง 10 ไมโครเมตร

5.3 ชั้นโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) หมายถึง ชั้นบรรยากาศที่มีความสูงจากผิวโลกขึ้นไปจนถึงที่ระดับความสูง 10 กิโลเมตร ในงานวิจัยนี้เลือกพิจารณาช่วงความสูง 0.5 – 4 กิโลเมตร

5.4 ชั้นสตราโตสเฟียร์ (Stratosphere) หมายถึง ชั้นบรรยากาศที่มีความสูงถัดจากชั้นโทรโพสเฟียร์ที่ระดับความสูง 11 - 50 กิโลเมตรในงานวิจัยนี้เลือกพิจารณาช่วงความสูง 11 – 15 กิโลเมตร

5.5 ความสูงวิกฤต (Critical height:  $Z_c$ ) หมายถึง ระดับความสูงในชั้นบรรยากาศที่ตั้งสมมติฐาน ให้เหนือความสูงระดับนี้ขึ้นไปไม่มีละอองลอย ความสูงวิกฤตของชั้นโทรโพสเฟียร์เท่ากับ 15 กิโลเมตร และความสูงวิกฤตของชั้นสตราโตสเฟียร์เท่ากับ 20 กิโลเมตร

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. บรรยากาศของโลก (Atmosphere)
2. ละอองลอย (Aerosol)
3. การกระเจิงของแสง (Light scattering)
4. โพลาไรเซชันของแสง (Polarization of light)
5. ไลดาร์ และการวิเคราะห์ข้อมูล
6. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
7. การวิเคราะห์ทางสถิติ
8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 1. บรรยากาศของโลก (Atmosphere)<sup>(1)</sup>

ผิวโลกเหมือนถูกห่อหุ้มไว้ด้วยแก๊ส ไอน้ำ และอนุภาคลอยอยู่โดยรอบ เรียกว่า บรรยากาศ เป็นส่วนที่มีความสำคัญต่อสิ่งแวดล้อมโลก ช่วยปรับอุณหภูมิโลกให้เหมาะสม มีแก๊สออกซิเจนที่จำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต ช่วยป้องกันโลกจากรังสีอันตรายของดวงอาทิตย์ บรรยากาศเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างผิวโลกกับอวกาศ ทำให้เกิดสภาพอากาศ (Weather) ลม ฝน เมฆ และปรากฏการณ์ต่างๆทางอุตุนิยมวิทยา

##### 1.1 องค์ประกอบของบรรยากาศ<sup>(2)</sup>

บรรยากาศเป็นของผสม มีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

1.1.1 แก๊สต่างๆ อากาศจัดอยู่ในสถานะแก๊ส ถือเป็นองค์ประกอบหลักของบรรยากาศ เป็นสารเนื้อเดียวประเภทสารละลาย ประกอบด้วยตัวทำละลายคือ ไนโตรเจน ( $N_2$ ) มีปริมาณร้อยละ 78.08 โดยปริมาตร ส่วนตัวละลายได้แก่ ออกซิเจน ( $O_2$ ) มีปริมาณร้อยละ 20.95 แก๊สอาร์กอน (Ar) มี

<sup>1</sup>วินิดา จินศาสตร์. (2551). *มลพิษอากาศและการจัดการคุณภาพอากาศ*. หน้า 4.

<sup>2</sup>นิพนธ์ ตั้งคณานุกรักษ์ และ คณิตา ตั้งคณานุกรักษ์. (2552) *เคมีบรรยากาศ*. หน้า 88-90.

ปริมาณร้อยละ 0.93 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) มีปริมาณร้อยละ 0.03 และแก๊สอื่นๆ มีปริมาณร้อยละ 0.01 โดยปริมาตร

1.1.2 ไอน้ำ ปริมาณไอน้ำในอากาศเกิดจากการระเหยของน้ำจากแหล่งน้ำต่างๆ เช่น แม่น้ำ คลอง บึง หนอง ทะเล มหาสมุทร รวมทั้งการคายน้ำของพืช การระเหยของน้ำจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิพื้นที่ผิวหน้าและปริมาณไอน้ำในอากาศ ในอากาศทั่วไปที่อยู่รอบตัวมีไอน้ำปนอยู่ ถ้าอากาศอยู่ในสภาพที่ไม่สามารถรับไอน้ำได้อีกแล้ว แสดงว่าอากาศในขณะนั้นอิ่มตัวด้วยไอน้ำ หรืออยู่ในสภาวะที่อากาศมีความชุ่มชื้นมากที่สุด ไอน้ำเป็นตัวการที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ในบรรยากาศ เช่น เมฆ หมอก ฝน เป็นต้น

1.1.3 อนุภาคที่เป็นของแข็ง ได้แก่ ฝุ่นละออง คาร์บอนไฟ ละอองเกสร ซึ่งอนุภาคต่างๆ ในบรรยากาศ อาจแยกได้เป็นอนุภาคที่เกิดขึ้นและแพร่กระจายสู่บรรยากาศจากแหล่งกำเนิดโดยตรง เช่น เกิดจากการระเบิดการทำเหมืองแร่ การไหม้หิน การเผาขยะมูลฝอย เป็นต้น และอนุภาคซึ่งเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาต่างๆ ในบรรยากาศ

ตาราง 1 องค์ประกอบของแก๊สหลักในบรรยากาศโลก

ชนิดของแก๊ส	ร้อยละโดยปริมาตร
ไนโตรเจน (N <sub>2</sub> )	78.08
ออกซิเจน (O <sub>2</sub> )	20.95
อาร์กอน (Ar)	0.93
นีออน (Ne)	0.02
ฮีเลียม (He)	0.0005
คริปตรอน (Kr)	0.0001
ซีนอน (Xe)	0.00009
ไฮโดรเจน (H)	0.00005

ตาราง 2 องค์ประกอบของแก๊สที่ผันแปรในบรรยากาศโลก

ชนิดของแก๊ส	ร้อยละโดยปริมาตร
ไอน้ำ(H <sub>2</sub> O)	0.25
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )	0.038
โอโซน (O <sub>3</sub> )	0.01

แก๊สที่เป็นองค์ประกอบหลักในบรรยากาศ

- ไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) ทำให้ออกซิเจนที่อยู่ในอากาศไม่เข้มข้น ทำให้เกิดการสันดาปซึ่งเป็นปฏิกิริยาทางเคมีลดความเร็วลง ไนโตรเจนในอากาศบางส่วนจะถูกแบคทีเรียที่อยู่ในดิน ในรากพืชบางชนิด ตรึงไว้เพื่อประโยชน์ของพืช และเมื่อพืชและสัตว์ตายลงจะสลายตัวใช้ในไนโตรเจนกลับสู่อากาศอีกครั้ง

- ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) เป็นส่วนประกอบสำคัญในการสันดาป พืชและสัตว์ต้องใช้ออกซิเจนในการหายใจ และออกซิเจนเกิดมาจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช

- แก๊สเฉื่อย (Iner gas) เป็นแก๊สที่ไม่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีใดๆ เช่น

อาร์กอน (Ar) มีอยู่ในอากาศมากสุดในกลุ่มของแก๊สเฉื่อยด้วยกัน นำไปใช้ในการทำหลอดไฟฟ้าเรืองแสง เพราะพบว่า ถ้านำเอาอาร์กอนกับไนโตรเจนใส่ลงในหลอดไฟฟ้า โขของอาร์กอนจะทำให้หลอดไฟเกิดการเรืองแสงขึ้นได้

นีออน (Ne) เป็นแก๊สที่เปล่งแสงได้สวยงามเมื่อกระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านนิยมนำมาทำป้ายโฆษณาตอนกลางคืน

ฮีเลียม (He) เป็นแก๊สที่มีความหนาแน่นต่ำ นำไปใช้ในการบินของเรือเหาะในยุคก่อน ซึ่งปัจจุบันไม่มีแล้ว

คริปตรอน (Kr) และซีนอน (Xe) เป็นแก๊สที่มีน้อยที่สุดในกลุ่มของแก๊สเฉื่อยในอากาศ นำมาใช้ทำประโยชน์ในการทำไฟโฆษณา

นอกจากแก๊สต่างๆซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก มีปริมาณคงที่ ยังมีองค์ประกอบอื่นๆ ที่มีปริมาณแปรผันขึ้นอยู่กับสถานที่และเวลา จะมีจำนวนเล็กน้อยแต่ก็ส่งผลกระทบต่อสภาพอากาศและภูมิอากาศเป็นอันมาก

- ไอน้ำ ( $H_2O$ ) เป็นแก๊สเรือนกระจก ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากโลก เมื่อไอน้ำกลั่นตัวเป็นละอองน้ำหรือ เมฆ มีความสามารถในการสะท้อนแสงอาทิตย์ และแผ่รังสีอินฟราเรดทำให้โลกไม่ร้อนและหนาวเกินไป

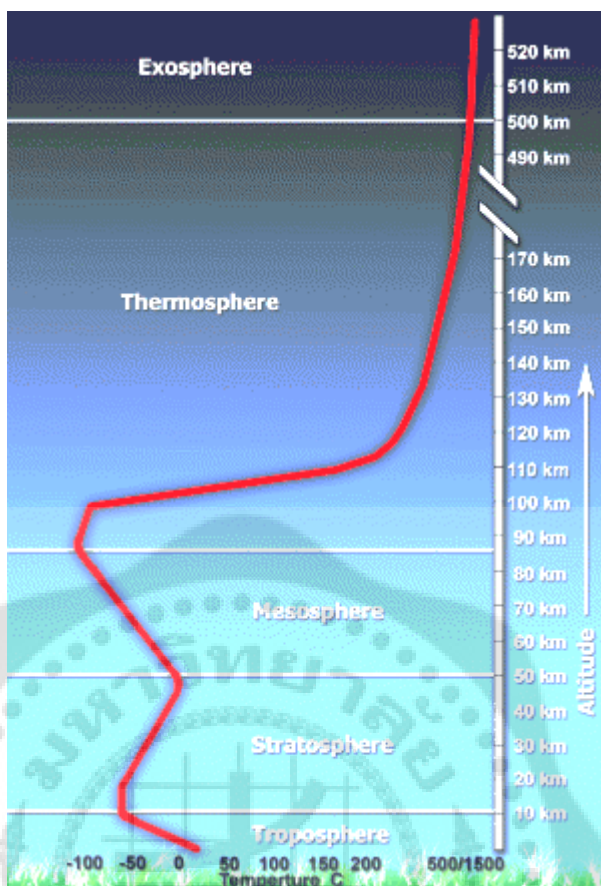
- แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) เป็นแก๊สเรือนกระจก แม้มีอยู่ในบรรยากาศไม่มาก แต่เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิต มีคุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากโลก ทำให้โลกอบอุ่น อุณหภูมิของกลางวันและกลางคืนไม่แตกต่างกันไป นอกจากนี้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ยังเป็นแหล่งอาหารของพืช

- โอโซน ( $O_3$ ) เกิดจากการที่แก๊สออกซิเจนแตกตัวเป็นออกซิเจนอะตอม เนื่องจากการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ แล้วรวมตัวกับแก๊สออกซิเจนอีกทีหนึ่ง กลายเป็นแก๊สซึ่งมีโมเลกุลของออกซิเจน 3 อะตอม เรียกว่าโอโซน สะสมตัวเป็นชั้นบางๆ ที่ระยะสูงประมาณ 50 กิโลเมตร โอโซนมีประโยชน์ในการกรองรังสีอัลตราไวโอเล็ต ไม่ให้ลงมาทำอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

## 1.2 โครงสร้างบรรยากาศ<sup>(1)</sup>

บรรยากาศแบ่งออกเป็นชั้นต่างๆ ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะความสูง แรงแม่เหล็กมีส่วนสำคัญต่อการเกิดชั้นชั้นบรรยากาศในการดึงดูดอากาศให้อยู่ที่ผิวโลก มวลอากาศส่วนมาก อยู่ต่ำกว่า 32 กิโลเมตร

<sup>1</sup>วนิดา จินศาสตร์. (2551). มลพิษอากาศและการจัดการคุณภาพอากาศ. หน้า 11-14.



ภาพประกอบ 1 แสดงโครงสร้างชั้นบรรยากาศ

ที่มา: <http://www.ces.fau.edu/nasa/module-2/atmosphere/earth.php>, Retrieved

August 18, 2015.

ภาพประกอบ 1 แสดงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงระดับความสูงต่างๆ โครงสร้างบรรยากาศแบ่งออกเป็น 5 ชั้นใหญ่ๆ คือ โทรโพสเฟียร์ สตราโตสเฟียร์ มีโซสเฟียร์ เทอร์โมสเฟียร์ และแมกเนโตสเฟียร์ ในแต่ละชั้นมีลักษณะและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นแตกต่างกันดังนี้

1.2.1 โทรโพสเฟียร์ (Troposphere) อยู่ใกล้ผิวโลกมากที่สุด มีอากาศผสมและแปรปรวนมากกว่าบรรยากาศชั้นอื่น โทรโพสเป็นภาษากรีกแปลว่า การหมุนหรือการเปลี่ยน ชั้นโทรโพสเฟียร์มีระดับความสูงประมาณ 10 กิโลเมตร อุณหภูมิมีลดลงเมื่อระยะความสูงเพิ่มขึ้นด้วยอัตราค่อนข้างคงที่ 9.7 เคลวินต่อกิโลเมตร ขอบบนของชั้นนี้เรียกว่า โทรโปพอส (Tropopause) อุณหภูมิมีลดลงจนถึงค่าเฉลี่ยประมาณ 217 เคลวิน มีอุณหภูมิต่ำกว่าที่อัตราลดลงของอุณหภูมิต่ำกว่า 2 เคลวินต่อ

การลดลงของอุณหภูมิตามระยะความสูงที่เพิ่มขึ้นในบรรยากาศชั้นนี้ เนื่องจากเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นรังสีความร้อนที่แผ่ออกจากโลกลดลง ชั้นโทรโพสเฟียร์แบ่งเป็นสองส่วน คือส่วนชั้นอากาศใกล้พื้นโลก (Planetary boundary layer) มีระดับความสูงประมาณ 1.5 กิโลเมตร ขึ้นไปจากผิวโลก มีปริมาณแก๊สในบรรยากาศส่วนใหญ่ประมาณ 80% รวมทั้งมลพิษอากาศผสมและแพร่กระจายมากที่สุด ส่วนที่สูงขึ้นไปจากเส้นแบ่งเขต (Boundary layer) คือชั้นโทรโพสเฟียร์อิสระ (Free troposphere) บริเวณชั้นบนมีกระแสอากาศลมแรงพัดไปทางตะวันออก เรียกว่ากระแสการบิน (Jet stream) เครื่องบินพาณิชย์บินได้สูงที่ระดับความสูงประมาณ 12 กิโลเมตร

1.2.2 สตราโตสเฟียร์ (Stratosphere) อยู่สูงขึ้นไปถัดจากชั้นโทรโพสเฟียร์ ที่ระดับความสูงประมาณ 11 – 50 กิโลเมตร ชื่อสตราโตสเฟียร์มาจากภาษาละติน สตราทัม แปลว่า ชั้น ในส่วนแรกของสตราโตสเฟียร์ 12 - 20 กิโลเมตร อุณหภูมิค่อนข้างคงที่ประมาณ  $-60^{\circ}\text{C}$  หลังจากนั้นอุณหภูมิจึงสูงขึ้นเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 20 - 50 กิโลเมตร ในชั้นนี้มีกลุ่มแก๊สไอโซนที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีแสง (Photochemical reaction) ของออกซิเจนในบรรยากาศ เมื่อได้รับพลังงานจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) ของดวงอาทิตย์ การดูดกลืนรังสี UV ยังทำให้อุณหภูมิส่วนบนของชั้นนี้สูงขึ้นมีค่าสูงสุดได้ถึง 271 เคลวิน ที่แนวขอบเขตของชั้นสตราโตสเฟียร์เรียกว่า สตราโตพอส (Stratopause) ไอโซนในชั้นสตราโตสเฟียร์มีความสำคัญมาก ช่วยป้องกันโลกจากรังสีดวงอาทิตย์

1.2.3 มีโซสเฟียร์ (Mesosphere) มีระยะสูงจากผิวโลกในช่วง 50 – 80 กิโลเมตร อุณหภูมิลดลงไปเรื่อยๆจนถึง  $-100^{\circ}\text{C}$  บรรยากาศชั้นนี้มีอุณหภูมิต่ำสุดในบรรยากาศทั้งหมดและมีลักษณะค่อนข้างคงตัว ที่ระยะความสูงประมาณ 80 กิโลเมตรจะเริ่มมีอุณหภูมิจึงที่ เข้าสู่แนวระดับที่เป็นขอบเขตของบรรยากาศชั้นนี้เรียกว่า มีโซพอส (Mesopause) ชั้นนี้มีอุณหภูมิต่ำสุดช่วยป้องกันโลกจากวัตถุในอากาศที่มีความร้อนสูง

1.2.4 เทอร์โมสเฟียร์ (Thermosphere) เป็นชั้นบรรยากาศชั้นนอก จากแนวเขตมีโซพอสประมาณ 85 กิโลเมตร สูงขึ้นไปได้ถึง 1,000 กิโลเมตร แต่บรรยากาศชั้นเทอร์โมสเฟียร์ไม่มีขอบเขตระยะความสูงของชั้นบนสุดที่แน่นอน มีมวลแก๊สน้อย อากาศเบาบางมาก อุณหภูมิสูงขึ้นตามระดับความสูง บรรยากาศได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน อาจมีอุณหภูมิจึงมากกว่า  $1,000^{\circ}\text{C}$  ในชั้นนี้จัดเป็นจุดเริ่มต้นของเขตอวกาศ ภายในเทอร์โมสเฟียร์ยังแบ่งชั้นตามลักษณะสมบัติของแก๊สองค์ประกอบเป็น 2 ส่วนคือ ไอโอโนสเฟียร์ และเอ็กโซสเฟียร์

1.2.4.1 ไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) เป็นส่วนล่างของเทอร์โมสเฟียร์ที่อยู่ถัดจากมีโซสเฟียร์ระยะความสูง 80 – 400 กิโลเมตร มีกลุ่มแก๊สดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตและรังสีเอ็กซ์เมื่อได้รับรังสีอนุภาคแก๊สจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนอนุภาคอิสระหรือประจุไฟฟ้า ในชั้นนี้เป็นบริเวณที่สะท้อนคลื่นวิทยุกลับสู่โลกซึ่งช่วยในการติดต่อสื่อสารทางวิทยุ

1.2.4.2 เอ็กโซสเฟียร์ (Exosphere) เป็นส่วนบนของชั้นเทอร์โมสเฟียร์ อยู่ที่ระดับความสูงจากผิวโลก 400 – 1,000 กิโลเมตร ชั้นนี้อากาศเบาบางมาก แก๊สที่มีพลังงานมากพอจะพ้นจากแรงโน้มถ่วงของโลกและออกสู่อวกาศได้ ซึ่งจะมีการส่งดาวเทียมขึ้นไปโคจรรอบโลกที่ชั้นเอ็กโซสเฟียร์ด้วย

1.2.5 แมกเนโตสเฟียร์ (Magnetosphere) สูงกว่า 1,000 กิโลเมตรขึ้นไป เป็นส่วนนอกบรรยากาศของโลก มีสนามแม่เหล็กในชั้นนี้ทำให้เกิดประจุไฟฟ้าบวกและลบไว้สำหรับจับอนุภาคที่มาจากดวงอาทิตย์แล้วรวมตัวกันเป็นชั้น ซึ่งโดยรวมเรียกว่า เข็มขัดการแผ่รังสีแวนแอลเลน (van allen radiation belt) ช่วยดักจับรังสีอันตราย บางครั้งอนุภาคเกิดการเคลื่อนที่ชนกันเกิดเป็นแสงเรืองออโรราในเขตขั้วโลก (Polar light)

## 2. ละอองลอย (Aerosol)<sup>(1)</sup>

ในชั้นบรรยากาศของโลกไม่ได้มีเฉพาะแค่เมฆเท่านั้นแต่ยังมีอนุภาคอีกหลายชนิด เช่น หมอกควัน เถ้า และฝุ่นที่ลอยอยู่ในชั้นบรรยากาศ โดยที่ชั้นบรรยากาศของโลกก็ยังคงประกอบด้วยอนุภาคซึ่งเป็นของแข็งและของเหลวขนาดเล็ก รวมทั้งการผสมกันของอนุภาคทั้งของแข็งและของเหลว เรียกว่า ละอองลอย นิยามได้ว่า เป็นอนุภาคที่อยู่ในสถานะที่เป็นของแข็งหรือของเหลวที่แขวนลอยอยู่ในอากาศ โดยไม่รวมถึงละอองน้ำในก้อนเมฆและฝน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย  $10^{-4}$  ถึง  $10^0$  ไมโครเมตร ละอองลอยมีแหล่งที่มาจากรธรรมชาติ ซึ่งมาจากไฟป่า (Forest fires) ละอองน้ำทะเล การกัดเซาะดินโดยลม การระเบิดของภูเขาไฟ เป็นต้น และจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น ละอองลอยที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรม กระบวนการเผาไหม้จากการทำเกษตรกรรม การจราจร เป็นต้น

<sup>1</sup>S. Ruangrungrote. (2012). *The Feasibility study of retrieval algorithm of tropospheric continental aerosol investigation in Thailand*. pp. 14-15. Dissertation, Ph.D.(Physics). Graduate School, King Mongkut's University of Technology Thonburi.



A



B

ภาพประกอบ 2 A ภาพเหตุการณ์ไฟไหม้ป่า B การปล่อยควันออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรม

ที่มา: [http://www.panmai.com/Calendar/Feb\\_24.shtml](http://www.panmai.com/Calendar/Feb_24.shtml), Retrieved August 19,2015.

[http://www.promma.ac.th/main/chemistry/boonrawd\\_site/air\\_pollution.htm](http://www.promma.ac.th/main/chemistry/boonrawd_site/air_pollution.htm), Retrieved August 19,2015.

## 2.1 ผลกระทบโดยตรงและโดยอ้อมของละอองลอยที่มีต่อสภาพภูมิอากาศ (Direct and indirect effects of aerosol on climate)<sup>(1)</sup>

2.1.1 ผลกระทบโดยตรง (Direct effect) การทำให้รังสีดวงอาทิตย์ที่ผ่านบรรยากาศมายังพื้นโลกเปลี่ยนแปลงไป การระเหยของน้ำ การสังเคราะห์แสงของพืช และอุณหภูมิของพื้นโลกจากการคำนวณสมดุลของพลังงานพบว่าละอองลอยประเภทสารอินทรีย์คาร์บอน มีผลทำให้อุณหภูมิของบรรยากาศลดลง แต่ละอองลอยที่เป็นคาร์บอนดำสามารถดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ ทำให้อุณหภูมิของบรรยากาศเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้อุณหภูมิของผิวโลกลดลง ผลกระทบโดยตรงที่เกิดจากละอองลอยของอุณหภูมิพื้นผิวขึ้นอยู่กับตำแหน่ง เนื่องจากละอองลอยจะมีส่วนประกอบที่เปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งที่ปรากฏ เช่น ละอองลอยที่อยู่ในเมืองชายฝั่งทะเล ก็จะได้รับอิทธิพลส่วนประกอบของอินทรีย์คาร์บอน โลหะที่มาจากฝุ่นถนน และโซเดียมคลอไรด์ที่มาจากละอองทะเล

2.1.2 ผลกระทบโดยอ้อม (Indirect effect) มีผลกระทบต่อเมฆ เพราะโดยทั่วไปละอองลอยในบรรยากาศทำหน้าที่เป็นแกนกลางการกลั่นตัวเป็นไอน้ำของเมฆ (Cloud condensation

<sup>1</sup> M.Z. Jacobson. (1999). *Fundamentals of atmospheric modeling*. p. 402.

nuclei) การเพิ่มขึ้นของละอองลอยในบรรยากาศ ทำให้มีอนุภาคละอองลอยเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจทำให้ปริมาณฝนเพิ่มขึ้น

## 2.2 พารามิเตอร์เชิงแสงของละอองลอย<sup>(1,2,3)</sup>

เมื่อแสงตกกระทบกับอนุภาคของละอองลอย แสงจะกระเจิงในทุกทิศทุกทาง และมีบางส่วนกระเจิงกลับ (Backscattering) มายังตัวรับแสงซึ่งอยู่ด้านเดียวกับแหล่งกำเนิดแสงที่ส่งลำแสงผ่านไปยังละอองลอย หากพิจารณาสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับของแสง (Backscattering coefficient) คือ เมื่อแสงผ่านความหนาของบรรยากาศและแสงที่กระเจิงกลับขึ้นกับมุมของเครื่องมือที่ทำการวัด เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับของแสงเนื่องจากละอองลอย (Aerosol backscattering coefficient) มีค่าอยู่ในช่วงไม่เกิน  $10^{-5} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$  เป็นการแสดงถึงโพลาไรซ์แนวตั้งของการแบ่งประเภทของละอองลอย

การกระเจิงและการดูดกลืนแสงของละอองลอยอธิบายได้โดยการลดทอนของแสงที่ตกกระทบ (Extinction) กับอนุภาคของละอองลอย ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของแสงเนื่องจากละอองลอย (Aerosol extinction coefficient) มีค่าอยู่ในช่วงไม่เกิน  $10^{-3} \text{ m}^{-1}$  เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของแสงจะค่าเท่ากับ สัมประสิทธิ์การกระเจิงแสงรวมกับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง แสดงความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\alpha_a = \alpha_s + \alpha_{\text{abs}} \quad (1)$$

เมื่อ  $\alpha_a$  แทน สัมประสิทธิ์การลดทอนของแสง (Extinction coefficient) ( $\text{m}^{-1}$ )

$\alpha_s$  แทน สัมประสิทธิ์การกระเจิงของแสง (Scattering coefficient) ( $\text{m}^{-1}$ )

$\alpha_{\text{abs}}$  แทน สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง (Absorption coefficient) ( $\text{m}^{-1}$ )

<sup>1</sup> T. Zielinski; et al. (2014). *Insight on environmental change: where the world is heading*. pp. 52-53.

<sup>2</sup> O. Boucher. (2015). *Atmospheric aerosols: properties and climate impacts*. pp. 43-44.

<sup>3</sup> S. Ruangrungrrote. (2012). *op. cit.* p. 49.

ซึ่งค่า  $\alpha_a$ ,  $\alpha_s$  และ  $\alpha_{abs}$  เป็นคุณสมบัติของชั้นบรรยากาศในแต่ละที่ ขึ้นกับตำแหน่งและละติจูด การพิจารณาของค่าของสัมประสิทธิ์การลดทอนตลอดช่วงในแนวตั้ง ตลอดความสูง  $z$  ที่พิจารณา เรียกว่า ความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD:  $\tau_a$ )

$$\tau_a = \int_0^z \alpha_a(z) dz \quad (2)$$

เมื่อ  $\tau_a$  แทน ความลึกเชิงแสงของละอองลอย (Aerosol optical depth)

$\alpha_a(z)$  แทน สัมประสิทธิ์การลดทอนของแสง (Extinction coefficient) ที่ความสูงระหว่าง 0 ถึง  $z$  ( $m^{-1}$ )

ความลึกเชิงแสงของละอองลอยเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับ ความหนาแน่นของละอองลอย ขนาดและองค์ประกอบทางเคมีของละอองลอยที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ ค่าความลึกของละอองลอยบอกถึงปริมาณแสงที่หายไปจากลำแสงโดยเกิดการลดทอนของแสง ระหว่างที่แสงนั้นผ่านละอองลอย โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2 - 0.4 สำหรับบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ หากค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยมีค่ามากเป็นการแสดงให้เห็นว่าในอากาศมีละอองลอยอยู่มาก

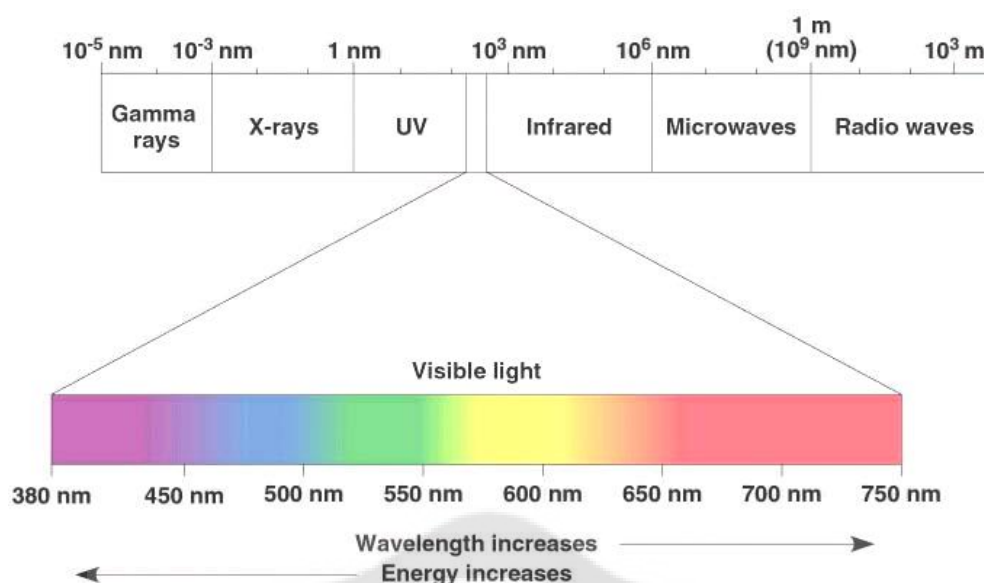
### 3. การกระเจิงแสง (Light scattering)<sup>(1,2,3)</sup>

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของโลก รังสีของดวงอาทิตย์ที่แผ่ออกมามีลักษณะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ภาพประกอบ 3 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของรังสีดวงอาทิตย์แผ่มายังโลก ประกอบด้วยช่วงคลื่นต่างๆ ตั้งแต่รังสีแกมมา (Gamma rays) ที่มีความยาวคลื่นสั้นที่สุดจนถึงคลื่นวิทยุ (Radio waves) ที่มีความยาวคลื่นยาวที่สุด สำหรับช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (Visible light) มีความยาวคลื่นประมาณ 380 - 750 นาโนเมตร

<sup>1</sup> เสริม จันทร์ฉาย. (2548). *คู่มือมาตรฐานด้านภูมิอากาศและแสงอาทิตย์สำหรับใช้งานด้านพลังงานทดแทน*. หน้า 19.

<sup>2</sup> J.P. Peixoto; & A.H. Oort. (1992). *Physics of climate*. pp. 102-103.

<sup>3</sup> P. Kulkarni; P. A. Baron; & K. Willeke. (2011). *Aerosol measurement : principles, techniques, and applications*. pp. 351-353.



ภาพประกอบ 3 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของรังสีดวงอาทิตย์

ที่มา: [http://www.kruton.org/media\\_obec53/sc/sc40\\_021/e-0light/Light/Light01.htm](http://www.kruton.org/media_obec53/sc/sc40_021/e-0light/Light/Light01.htm),

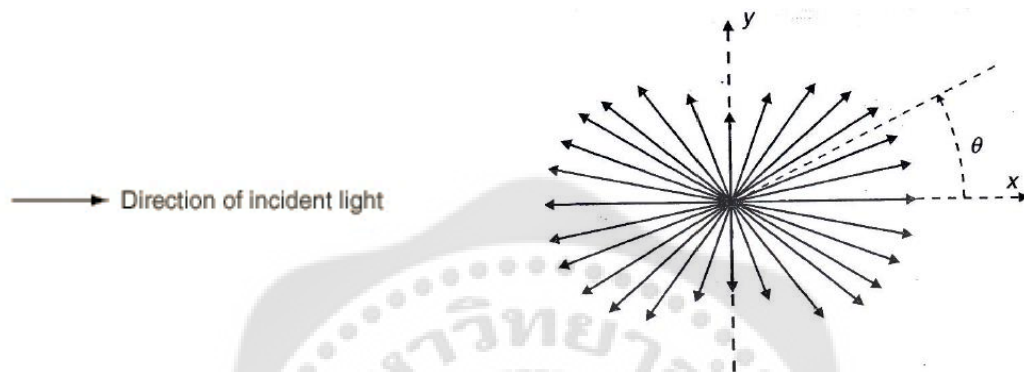
Retrieved September 2, 2015.

เมื่อรังสีดวงอาทิตย์ แผ่มายังชั้นบรรยากาศของโลกจะถูกดูดกลืน (Absorption) และถูกกระเจิง (Scattering) โดยโมเลกุลของอากาศ ไอน้ำ ฝุ่นละออง และละอองลอย ที่พุ่งกระจายอยู่ในบรรยากาศ

ละอองลอยที่อยู่ในชั้นบรรยากาศมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยมาก ทำให้แสงที่ตกกระทบกับละอองลอยเกิดการกระเจิงของแสง เมื่อความยาวคลื่นของแสงที่กระเจิงออกมาหลังจากชนกับอนุภาคมีความยาวคลื่นเท่าเดิม ไม่เปลี่ยนแปลงกับคลื่นแสงที่ตกกระทบ การกระเจิงแบบนี้เรียกว่าการกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) ซึ่งประกอบด้วยการกระเจิงแบบเรย์ลีห์ (Rayleigh scattering) และการกระเจิงแบบมี (Mie scattering) ในขณะที่การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) คลื่นแสงที่กระเจิงมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยทั่วไปแล้วการกระจายของการกระเจิงของคลื่นแสงขึ้นอยู่กับ ขนาดรูปร่างของอนุภาค ความยาวคลื่นที่ตกกระทบ ดัชนีหักเหของอนุภาครวมทั้งสภาพแวดล้อมที่ล้อมรอบ

### 3.1 การกระเจิงแบบเรย์ลีห์ (Rayleigh scattering)

การกระเจิงแบบเรย์ลีห์ เป็นการอธิบายลักษณะของการกระเจิงของคลื่นแสงที่เกิดจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากๆ ซึ่งขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคจะมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นที่มาตกกระทบ ซึ่งจะมีการกระเจิงคลื่นแสงในทุกทิศทางแสดงให้เห็นดังภาพประกอบ 4 ประมาณของการกระเจิงเป็นสัดส่วนผกผันกับความยาวคลื่นยกกำลังสี่ ( $\sim \lambda^{-4}$ )



ภาพประกอบ 4 การกระเจิงของแสง เมื่อแสงเคลื่อนที่ตกกระทบอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก

ที่มา: R.J.D. Tilley. (2011). *Colour and the optical properties of materials*. p. 178.

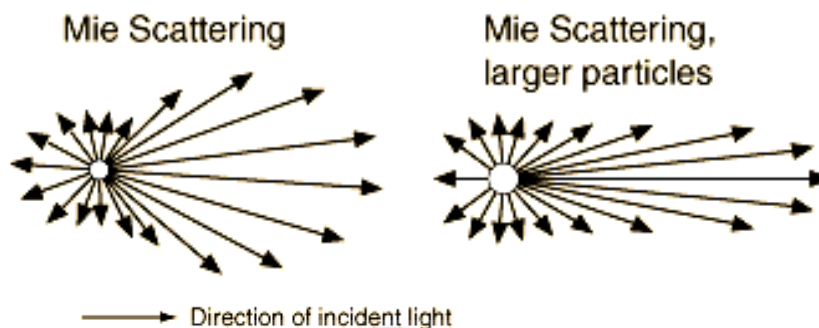
การกระเจิงแบบเรย์ลีห์ที่เห็นชัดเจนคือ การที่ท้องฟ้ามีสีน้ำเงินในตอนกลางวัน หมายความว่าสีน้ำเงินเกิดการกระเจิง โดยโมเลกุลของอากาศในบรรยากาศซึ่งมีขนาดเล็กมากได้ดีกว่าแสงสีแดงที่มีความยาวคลื่นยาว แต่แท้จริงแล้วนั้น แสงสีม่วงมีความยาวคลื่นสั้นที่สุดของคลื่นแสงที่มองเห็น ทำไมจึงไม่เห็นท้องฟ้าเป็นสีม่วงแทน เหตุผลก็คือ แสงสีน้ำเงินมีมากกว่าแสงสีม่วงในแสงอาทิตย์ และตาของเรามีความไวต่อแสงสีน้ำเงินมากกว่าแสงสีม่วง

### 3.2 การกระเจิงแบบมี (Mie scattering)<sup>(1)</sup>

การกระเจิงแบบมี เป็นการกระเจิงที่เกิดกับอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับรังสีที่ตกกระทบ (0.1-1.0 ไมโครเมตร) แต่อนุภาคจะมีขนาดใหญ่กว่าการกระเจิงแบบเรย์ลีห์ ซึ่งเมฆอนุภาคที่เป็นมลภาวะ หรือหยดน้ำที่อยู่ในบรรยากาศ การกระเจิงแบบมีแสดงให้เห็นดังภาพประกอบ

<sup>1</sup> P. Kulkarni; P. .A. Baron; & K. Willeke. (2011). *op. cit.* p. 352.

5 ซึ่งจะเห็นว่าการกระเจิงเกือบทั้งหมดมีทิศทางไปข้างหน้า การกระเจิงนั้นเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับขนาดของอนุภาคและความยาวคลื่นของรังสี



ภาพประกอบ 5 การกระเจิงแสงแบบมี

ที่มา: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html>, Retrieved September 2, 2015.

การกระเจิงแสงในชั้นบรรยากาศมีมากกว่าปกติจะส่งผลให้สมดุลการแผ่รังสีเปลี่ยนไป เพราะรังสีจะกระเจิงขึ้นบนหรือออกนอกบรรยากาศมากกว่าปกติ ชั้นบรรยากาศด้านบนร้อนขึ้นแต่บรรยากาศด้านล่างหรือต่ำกว่ากลุ่มละของลอยลงมามีอุณหภูมิเย็นกว่าปกติ

### 3.3 การดูดกลืนแสง (Light absorption)<sup>(1)</sup>

ละอองลอยที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศของโลก จะดูดกลืนพลังงานของดวงอาทิตย์ ทำให้ปริมาณการแผ่รังสีที่มาถึงผิวโลกมีค่าลดลง เมื่อรังสีในบรรยากาศถูกดูดกลืนมากกว่าปกติ รังสีจะกระเจิงออกนอกบรรยากาศน้อยลง ส่งผลให้บรรยากาศชั้นล่างร้อนขึ้น เหมือนกับปรากฏการณ์เรือนกระจก

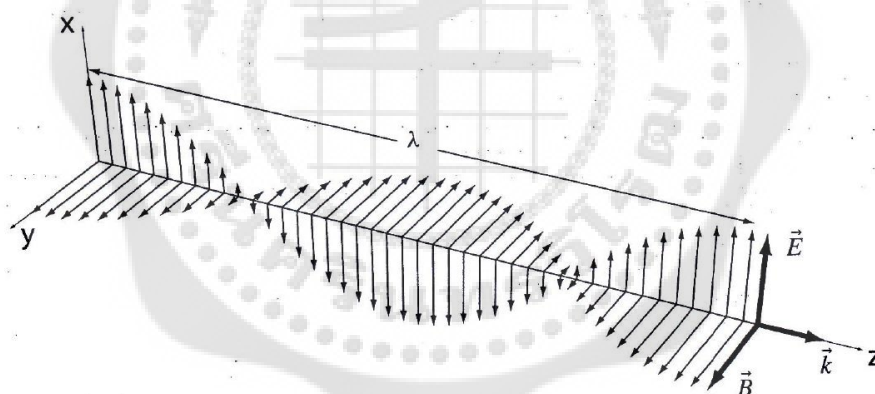
สเปกตรัมของแสงอาทิตย์บางส่วนถูกดูดกลืนในชั้นบรรยากาศของดวงอาทิตย์เอง และการดูดกลืนอื่นๆ ที่มาจากแก๊สที่อยู่ในชั้นบรรยากาศของโลก ซึ่งแก๊สหลักในบรรยากาศที่ดูดกลืนรังสีของดวงอาทิตย์ คือ ไอน้ำ (H<sub>2</sub>O) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) โอโซน (O<sub>3</sub>) ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) และมีเทน (CH<sub>4</sub>)

<sup>1</sup>J.P. Peixoto; & A.H. Oort. (1992). *op. cit.* pp. 101-102.

การแผ่รังสีที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า 0.3 ไมโครเมตร ส่วนใหญ่จะถูกดูดกลืนในชั้นบรรยากาศที่สูงขึ้นไปเหนือ 20 กิโลเมตร โดยการดูดกลืนของ  $O_3$ ,  $O_2$  และ  $N_2$  และจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) เนื่องจากมีรังสีอัลตราไวโอเล็ตและรังสีเอ็กซ์อยู่มากที่สุด ซึ่งอยู่ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ที่ระดับต่ำกว่า 40 กิโลเมตรในชั้นบรรยากาศชั้นสตราโทสเฟียร์ การดูดกลืนของรังสีดวงอาทิตย์ถูกดูดกลืนโดย  $O_2$  และ  $O_3$

#### 4. โพลาริเซชันของแสง (Polarization of light)<sup>(1,2)</sup>

แสงจากแหล่งกำเนิดต่างๆ เกือบทั้งหมดแสงไม่โพลาไรซ์ (Unpolarized light) เนื่องจากต้นกำเนิดแสงส่วนใหญ่เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอม และอิเล็กตรอนแต่ละอะตอมก็เป็นอิสระกัน แสงแต่ละอะตอมจึงไม่มีทิศทางเดียวกัน ผลที่เกิดขึ้นก็คือแสงโดยทั่วไปรวมถึงแสงจากดวงอาทิตย์จะมีการสั่นในทุกระนาบ



ภาพประกอบ 6 ลักษณะของคลื่นแสง ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

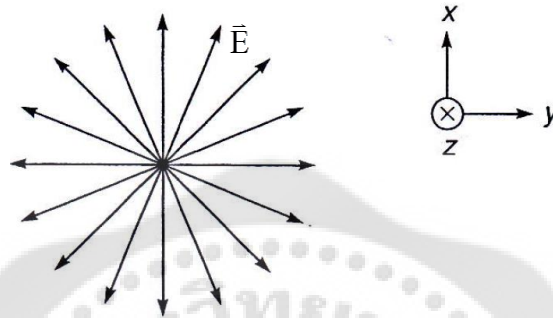
ที่มา : C.A. Bennet. (2008). *Principles of physical optics*. p.432.

<sup>1</sup> สุชาติ สุภาพ. (2557). ฟิสิกส์ 2 สำหรับวิทยาศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์. หน้า 313-325.

<sup>2</sup> สุรศักดิ์ เขียงกา. (2557). *ทัศนศาสตร์เบื้องต้น*. หน้า 293-307.

คลื่นแสงโดยทั่วไปจะประกอบด้วยคลื่นในภาพประกอบ 6 จำนวนมากมายมหาศาล และมีทิศและเฟสต่างๆกัน ดังนั้นเมื่อมองแสงจากแหล่งกำเนิดใดๆ จะพบว่าแสงเหล่านั้นเป็นแสงที่ไม่โพลาไรซ์ เนื่องจากการสั่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในทุกทิศทุกทาง

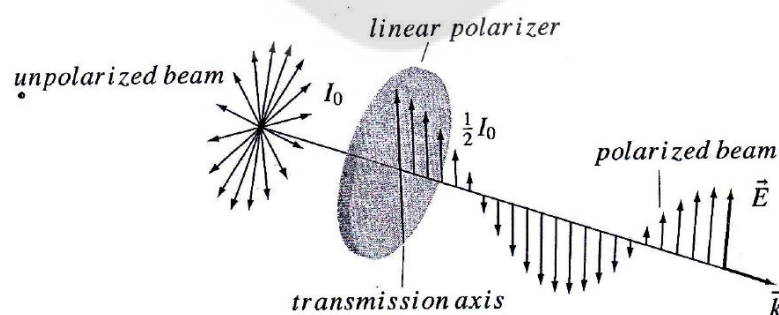
สนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) ของคลื่นแสงเกิดจากการสั่นของอะตอมหรือโมเลกุลของแหล่งต้นทางแสง มีการเปลี่ยนแปลงตามทิศต่างๆ ซึ่งอยู่ในระนาบตั้งฉากกับทิศการแผ่รังสีของคลื่นแสง



ภาพประกอบ 7 แสงไม่โพลาไรซ์

ที่มา : A. Ghatak. (2005). *Optics*. p. 19.6.

ภาพประกอบ 7 แสดงให้เห็นว่าแสงไม่โพลาไรซ์เป็นแสงที่มีสนามไฟฟ้าในทุกแนวแกน เนื่องจากสนามไฟฟ้าต่างๆ สามารถแตกลงไปแนวแกน x และแนวแกน y ได้ โดยสนามไฟฟ้าในแนวแกนทั้งสองมีขนาดเท่ากัน หรือกล่าวได้ว่าสนามไฟฟ้าในแนวแกน x มีขนาดเท่ากับ  $I_0/2$  และสนามไฟฟ้าในแนวแกน y มีขนาดเท่ากับ  $I_0/2$  ด้วยเหตุนี้จึงทำให้แสงไม่โพลาไรซ์ เมื่อผ่านแผ่นโพลาไรซ์ในอุดมคติ ความเข้มแสง ( $I_0$ ) จะลดลงครึ่งหนึ่ง



ภาพประกอบ 8 แสงโพลาไรซ์ความเข้มแสงลดลงครึ่งหนึ่ง

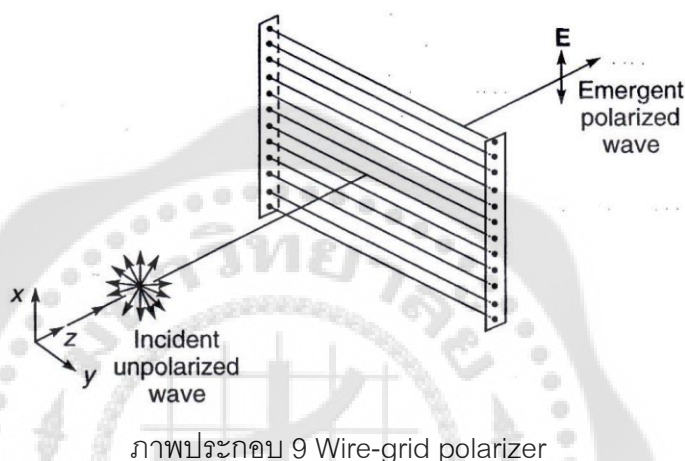
ที่มา : C.A. Bennet. (2008) *Principles of physical optics*. p.433.

เนื่องจากแสงในธรรมชาติเป็นแสงไม่โพลาไรซ์ จึงต้องอาศัยการทำแสงไม่โพลาไรซ์ให้เป็นแสงโพลาไรซ์ สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

#### 4.1 การทำแสงโพลาไรซ์โดยการดูดกลืนเฉพาะแนว

แสงเมื่อผ่านเข้าไปในอุปกรณ์บางอย่างแล้ว องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าแนวหนึ่งจะถูกดูดกลืน ทำให้แสงผ่านออกมาเป็นแสงโพลาไรซ์ อุปกรณ์ดังกล่าวได้แก่

##### 4.1.1 Wire-grid polarizer



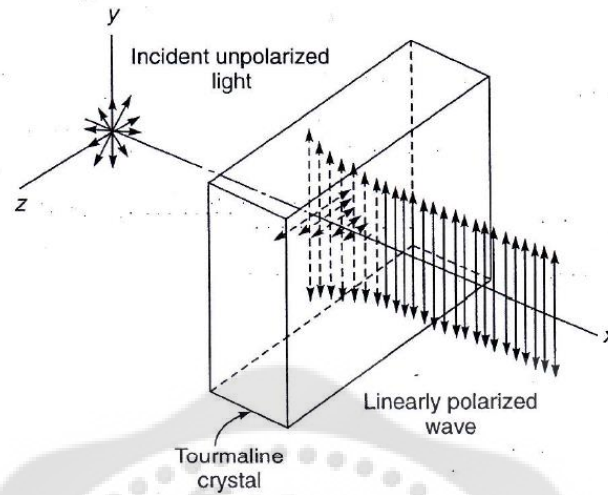
ที่มา : A. Ghatak. (2005). *Optics*. p. 19.6.

Wire-grid polarizer ประกอบด้วย เส้นลวดตัวนำจำนวนมากซึ่งให้ขนานกัน เมื่อแสงที่ไม่โพลาไรซ์ส่องผ่าน (สนามไฟฟ้าของแสงดังกล่าว แยกได้เป็นสนามไฟฟ้าย่อย 2 สนามแนวตั้งฉากกัน) สนามไฟฟ้าย่อยที่มีทิศขนานกับเส้นลวดจะถูกดูดกลืนไว้ ส่วนสนามไฟฟ้าย่อยที่มีทิศตั้งฉากกับเส้นลวดจะผ่านออกไปได้

##### 4.1.2 ผลึกไดคอลลอก เช่น ผลึกทัวมาลีน

ผลึกทัวมาลีนมีสมบัติในการดูดกลืนสนามไฟฟ้าของแสงในทิศทางหนึ่งมากกว่าสนามไฟฟ้าในอีกทิศทางหนึ่ง และจะส่งผ่านแสงที่มีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับทิศของการดูดกลืน ซึ่งเป็นทิศทางเฉพาะขึ้นอยู่กับโครงสร้างอะตอมของวัสดุที่ใช้ทำแสงโพลาไรซ์ดังภาพประกอบ 10 เรียกทิศทางส่งผ่านแสงของตัวทำแสงโพลาไรซ์ว่า แกนส่งผ่าน (Transmission axis) ทำให้เมื่อแสง

โพลาไรซ์ผ่านผลึกทัวมาลีน จึงกลายเป็นแสงโพลาไรซ์ได้ แสงที่ผ่านตัวทำแสงโพลาไรซ์อุดมคติ จะเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linearly polarized) ในทิศทางเดียวกันกับแกนส่งผ่าน



ภาพประกอบ 10 โพลาไรซ์เชิงเส้นโดยการดูดกลืนของผลึกไดโครอิก

ที่มา : A. Ghatak. (2005). *Optics*. p. 19.8.

#### 4.1.3 แผ่นโพลาไรซ์

ในปี ค.ศ. 1928 E. H. Land ได้ผลิตแผ่นโพลาไรซ์จากผลึกของสารไดโครอิก ทำให้การทำแสงโพลาไรซ์สะดวกขึ้น แผ่นโพลาไรซ์มีลักษณะเป็นพลาสติกบาง ซึ่งมีสารโมเลกุลยาวๆ ฝังอยู่ ในกระบวนการผลิตจะทำการยืดแผ่นพลาสติกเพื่อให้โมเลกุลดังกล่าวเรียงตัวเป็นเส้นขนานกัน เมื่อแสงผ่านแผ่นโพลาไรซ์องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่อยู่ในระนาบเดียวกับโมเลกุลจะผ่านออกมาได้ ส่วนองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากจะถูกดูดกลืนไว้

เนื่องจากสนามไฟฟ้าในทิศใดๆ สามารถแตกให้อยู่ใน 2 แนว ที่ตั้งฉากกันได้ และแผ่นโพลาไรซ์แต่ละแผ่นก็ยอมให้แสงที่มีสนามไฟฟ้าในแนวเดียวเท่านั้นที่ผ่านได้ ดังนั้นแสงเมื่อผ่านแผ่นโพลาไรซ์จึงมีความเข้มลดลงครึ่งหนึ่ง (ไม่คิดการดูดกลืนของแผ่นโพลาไรซ์)

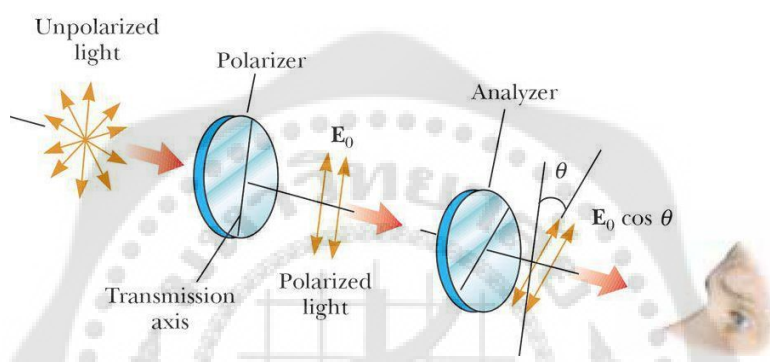
ถ้าให้แสงไม่โพลาไรซ์ผ่านแผ่นโพลาไรซ์ ความเข้มแสงที่ผ่านออกมาจะลดลงครึ่งหนึ่ง จากนั้นแสงโพลาไรซ์ผ่านแผ่นโพลาไรซ์แผ่นที่ 2 แสงก็จะมีค่าความเข้มลดลงอีก โดยความเข้มจะลดลงตามกฎของมาลุส (Malus' s law)<sup>(1)</sup> คือ

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (3)$$

เมื่อ  $I$  แทน ความเข้มของแสงที่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์ที่ 2

$I_0$  แทน ความเข้มของแสงที่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์ที่ 1

$\theta$  แทน มุมของแกนโพลาไรซ์ ของแผ่นโพลาไรซ์ทั้งสองทำมุมกัน



ภาพประกอบ 11 ความเข้มแสงที่แผ่นโพลาไรซ์ 2 แผ่น เป็นไปตามกฎของมาลุส

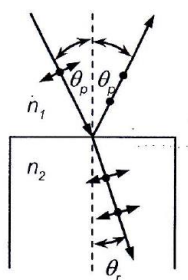
ที่มา : [http://images.slideplayer.in.th/8/2090988/slides/slide\\_32.jpg](http://images.slideplayer.in.th/8/2090988/slides/slide_32.jpg) Retrieved

October 30,2015.

#### 4.2 การทำแสงโพลาไรซ์โดยการสะท้อน

การทำให้แสงสะท้อนเป็นแสงโพลาไรซ์ คือ เมื่อรังสีสะท้อนทำมุม 90 องศา กับมุมหักเห แสงไม่โพลาไรซ์ตกกระทบบนผิวรอยต่อของตัวกลาง โดยมุมตกกระทบบไม่เท่ากับมุมบรีวสเตอร์ แสงสะท้อนเป็นแสงโพลาไรซ์บางส่วน และภาพประกอบ 12 แสดงแสงไม่โพลาไรซ์ตกกระทบบนผิวรอยต่อของตัวกลาง โดยมุมตกกระทบบเท่ากับมุมบรีวสเตอร์ แสงสะท้อนจะเป็นแสงโพลาไรซ์

<sup>1</sup> สุรศักดิ์ เขียงกา. (2557). *เล่มเดิม*. หน้า 295.



ภาพประกอบ 12 กระบวนการโพลาไรซ์โดยการสะท้อน มุมตกกระทบเท่ากับมุมบรีวสเตอร์

ที่มา : สุรศักดิ์ เชียงกา. (2557). *ทัศนศาสตร์เบื้องต้น*. หน้า 297.

มุมตกกระทบที่ทำให้ลำแสงสะท้อนมีโพลาไรซ์เชิงเส้นแบบสมบรูณ์ เรียกว่า มุมโพลาไรซ์  $\theta_p$  หรือมุมบรีวสเตอร์ (Brewster's angle) จากกฎของสเนลล์<sup>(1)</sup> จะได้

$$n_1 \sin \theta_p = n_2 \sin \theta_r \quad (4)$$

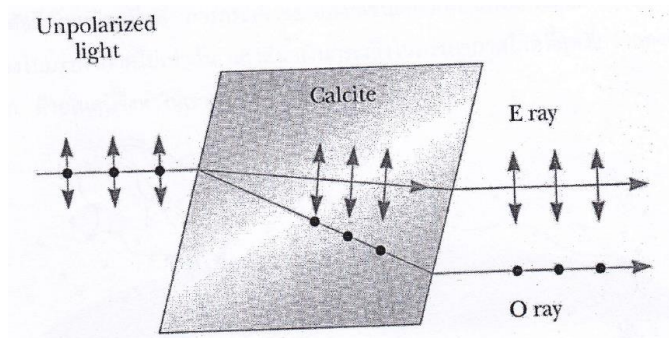
เนื่องจาก  $\theta_r = 90 - \theta_p$  และความสัมพันธ์ของตรีโกณมิติ จะได้กฎของบรีวสเตอร์

$$\theta_p = \tan^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right) \quad (5)$$

#### 4.3 การทำแสงโพลาไรซ์โดยการหักเห 2 แนว

การหักเห 2 แนว เกิดจากแก้วหรือวัสดุโปร่งใสทั่วไปของแข็งอัญฐาน การจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นแบบสุ่ม เมื่อแสงเดินทางผ่านในทิศทางต่างๆ จะมีอัตราเร็วแสงเท่ากัน เพราะการเดินทางในทิศทางใดก็จะเดินทางผ่านอะตอมในลักษณะที่เหมือนกัน แต่วัสดุที่มีลักษณะเป็นผลึกอะตอมจะจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ดังนั้นเมื่อแสงเดินทางเข้ามาในทิศทางที่ต่างกันก็จะเดินทางผ่านอะตอมในลักษณะที่ต่างกัน นอกจากนั้นแสงที่มีแกนโพลาไรซ์ต่างกัน ก็จะมีดัชนีหักเหต่างกัน เนื่องจากแสงทั่วไปเป็นแสงไม่โพลาไรซ์ ดังนั้นเมื่อแสงเดินทางเข้ามาในผลึกจึงมีการหักเห 2 แนว

<sup>1</sup>D. Meschede. (1999). *Optical light and laser*. p. 69.



ภาพประกอบ 13 แสงที่ไม่โพลาไรซ์ ผ่านผลึกแคลไซต์ เกิดการหักเห 2 แนว

ที่มา : สุชาติ สุภาพ. (2557). ฟิสิกส์ 2 สำหรับวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม. หน้า 323.

#### 4.4 การทำแสงโพลาไรซ์โดยการกระเจิงของแสง

เมื่อแสงอาทิตย์ผ่านเข้ามาในบรรยากาศของโลก แสงจะกระทบโมเลกุลของอากาศหรืออนุภาคของน้ำในอากาศ อิเล็กตรอนในอะตอมจะดูดกลืนพลังงานของแสงที่ตกกระทบนั้น แล้วปลดปล่อยแสงออกมาอีกครั้งในทุกทิศทุกทาง ซึ่งแสงที่กระเจิงออกมาส่วนใหญ่เป็นแสงที่ไม่โพลาไรซ์ แต่แสงที่กระเจิงออกมาตั้งฉากกับต้นกำเนิดจะเป็นแสงโพลาไรซ์

### 5. ไลดาร์และการวิเคราะห์ข้อมูล

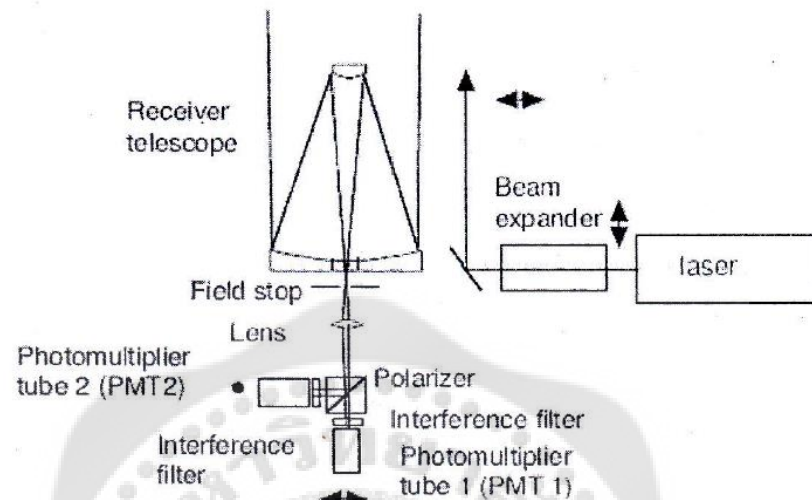
ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลจากการเก็บข้อมูลของ ไลดาร์ (Lidar : Light Detection And Ranging) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาการกระจายของอนุภาคในบรรยากาศ

#### 5.1 ไลดาร์ (Lidar)<sup>(1)</sup>

เป็นเครื่องมือที่ยิงพัลส์ของแสงเลเซอร์ไปยังชั้นบรรยากาศ และบันทึกแสงที่ถูกกระเจิงกลับ (Backscattered light) เนื่องจากละอองลอย และเมฆ เพื่อจะสังเกตการณ์แจจของละอองลอยและเมฆที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศ โดยการสังเกตโครงร่างของสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับ

<sup>1</sup> สุทธิพันธุ์ จันทร์าศรี. (2553). การสร้างโมเดลชั้นตอนวิเคราะห์และแสดงผลพารามิเตอร์ของละอองลอยในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์โดยเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี. หน้า 31-35. ปริญญาโทบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

(Backscattering coefficient) หรือสัมประสิทธิ์การลดทอน (Extinction coefficient) ทำให้สามารถบอกความแตกต่างระหว่างก้อนเมฆที่เป็นน้ำและก้อนเมฆที่เป็นน้ำแข็งได้ และตรวจวัดประเภทของละอองลอยได้



ภาพประกอบ 14 แสดงระบบการทำงานของเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี

ที่มา : N. Sugimoto; et al. (2001) NIES Compact Mie Scattering Lidar (532 nm, dual polarization). p.1.

เครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี ใช้ Nd:YAG เป็นแหล่งผลิตเลเซอร์ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร รับและส่งสัญญาณแนวตั้งจากกับพื้นโลก ลำเลเซอร์จะส่งผ่านตัวขยายลำแสง (Laser beam expander) เพื่อขยายสัญญาณแสงแล้วส่งขึ้นไปสู่บรรยากาศ เมื่อลำเลเซอร์กระทบกับอนุภาคที่ปนอยู่ในอากาศ สัญญาณแสงเลเซอร์จะกระเจิงกลับมาที่กล้องโทรทรรศน์ชนิดชมิทแคสซีเกรน (Schmidt cassegrain telescope) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร จากนั้นสัญญาณแสงจะถูกแยกด้วยตัวทำแสงโพลาไรซ์ (Polarizer) แยกสัญญาณแสงโพลาไรซ์เป็น 2 แนว คือ แนวตั้งฉากและแนวขนานกับโพลาไรซ์ของแสงที่ส่งออกไปตอนเริ่มต้น ผ่านหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier tube:PMT) เพื่อเปลี่ยนสัญญาณแสงที่ได้เป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วส่งข้อมูลต่อไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อทำการบันทึกสัญญาณ

การวัดข้อมูลสัญญาณการกระเจิงกลับพัลส์เลเซอร์เนื่องจากอนุภาคในบรรยากาศ เครื่องจะวัดทุกๆ 15 นาที ตลอด 24 ชั่วโมง ทำการบันทึกสัญญาณทุกช่วงความสูง 6 เมตร ถึง 24,000 เมตร

## 5.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากไลดาร์<sup>(1,2,3)</sup>

ในการใช้เครื่องไลดาร์ โดยมีการส่งสัญญาณแบบพัลส์เลเซอร์ขึ้นไปในชั้นบรรยากาศ เนื่องจากในบรรยากาศมีโมเลกุล และอนุภาคต่างๆอยู่ ทำให้สัญญาณพัลส์เลเซอร์ที่ส่งออกไปตกกระทบกับโมเลกุล และอนุภาคเกิดการกระเจิงกลับของสัญญาณ และสัญญาณกระเจิงกลับมาเข้าสู่หัววัด โดยสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ของสัญญาณพัลส์เลเซอร์ที่ส่งออกไปกับสัญญาณพัลส์เลเซอร์ที่กระเจิงกลับ ในกรณีนี้จะกล่าวถึง ไลดาร์แบบแกนเดี่ยว โดยให้  $P(z)$  เป็นสัญญาณพัลส์เลเซอร์ที่กระเจิงกลับ ที่วัดได้จากความสูง  $z$  และ  $P_0$  เป็นสัญญาณพัลส์เลเซอร์ที่ส่งออกไป เขียนเป็นสมการแสดงดังนี้

$$P(z) = P_0 k \frac{c\tau}{2} \frac{A}{z^2} \beta(z) T^2(z) \quad (6)$$

เมื่อ  $k$  แทน ค่าคงที่ของประสิทธิภาพของเครื่องมือที่ได้จากการทดลอง

$c$  แทน ความเร็วของพัลส์เลเซอร์ (m/s)

$\tau$  แทน ระยะเวลาที่พัลส์เลเซอร์ใช้ (s)

$A/z^2$  แทน มุมตันของการรวมสัญญาณภายในพื้นที่  $A$  ของกล้องโทรทรรศน์ (sr)

$z$  แทน แทนความสูงของชั้นบรรยากาศเหนือพื้นดิน (m)

<sup>1</sup> ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์ และ อรุณีย์ อินทร. (2553). การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนไลดาร์ต่อสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับของละอองลอยและเมฆในประเทศไทย ด้วยเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี. หน้า 8-12.

<sup>2</sup> อัมพร รุ่งแจ้ง. (2552). ความน่าเชื่อถือของการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเชิงปริมาตรของละอองลอยในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี. หน้า 36-39. ปรินูญานันท์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

<sup>3</sup> A.R. Biral. (2003). Analysis of the 2002 malargue LIDAR data through Fernald's method. research report. UNICAMP. Brazil. pp.5-8.

$\beta(z)$  แทน สัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับของจำนวนโฟตอนที่กระเจิงกลับมา ณ  
ความสูง  $z$  ( $\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$ )

$T(z)$  แทน ความสามารถในการผ่านในบรรยากาศ (Transmissibility) จากพื้นดินถึง  
ระยะความสูง  $z$

พิจารณาเทอมของ  $T(z)$  เมื่อโฟตอนผ่านบรรยากาศจากพื้นดินเป็นระยะ  $z$  โดยปกติ  
เทอมของการลดทอนนี้สามารถกำหนดให้อยู่ในรูปของเอ็กโพเนนเชียลที่เป็นค่าลบ ตามกฎของบงเกอร์  
แลมเบิร์ต (Bouguer – Lambert Law) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความลึกเชิงแสง ดังสมการ

$$T(z) = \exp(-\tau(z)) = \exp\left[-\int_0^z \alpha(z') dz'\right] \quad (7)$$

เมื่อ  $\tau(z)$  แทน ความลึกเชิงแสง (Optical depth) ซึ่งเกี่ยวกับความขุ่นมัวของ  
บรรยากาศตลอดความสูง  $z$

$\alpha(z')$  แทน ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear extinction coefficient)  
ของสัญญาณบรรยากาศที่ความสูงระหว่าง 0 ถึง  $z$  ( $\text{m}^{-1}$ )

หลายเทอมของสมการ (6) เป็นค่าคงตัว หากการลดลงของสัญญาณเชิงเรขาคณิต  
ขึ้นกับความสูงยกกำลังสอง ( $z^2$ ) สมการสามารถนำเสนอนิยามสัญญาณการแก้ไขพิสัย (Range  
corrected signal) ดังสมการ

$$X(z) = P(z) * z^2 = C\beta(z)\exp\left(-2\int_0^z \alpha(z') dz'\right) \quad (8)$$

เมื่อ  $X(z)$  แทน สัญญาณการแก้ไขพิสัย ( $\text{m}^2$ )

$C$  แทน ค่าคงที่เครื่องมือ ( $\text{m}^3/\text{sr}^{-1}$ )

จากสมการ (8) สัญญาณการแก้ไขพิสัย มีความสัมพันธ์ที่ขึ้นกับ 2 ตัวแปร คือ  
สัมประสิทธิ์การกระเจิง ( $\beta(z)$ ) และสัมประสิทธิ์การลดทอน ( $\alpha(z')$ ) และจากทฤษฎีการกระเจิงของ  
แสงค่าอัตราส่วนไวดาร์ของโมเลกุล ( $S_m$ ) มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากโมเลกุล  
( $\alpha_m$ ) และสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากโมเลกุล ( $\beta_m$ ) แสดงความสัมพันธ์ได้ตามสมการ

$$S_m = \frac{\alpha_m(z)}{\beta_m(z)} = \frac{8\pi}{3} \text{ สเตอเวเดียน (sr)} \quad (9)$$

โดยอัตราส่วนไคร์ของโมเลกุล ( $S_m$ ) นี้ไม่ขึ้นกับความสูงและสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ของละอองลอยอย่างไม่ทราบได้ อย่างไรก็ตามเฟอรัลด์ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากละอองลอย ( $\alpha_a$ ) และสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย ( $\beta_a$ ) เรียกว่าอัตราส่วนไคร์ของละอองลอย แสดงความสัมพันธ์ได้ตามสมการ

$$S_a = \frac{\alpha_a(z)}{\beta_a(z)} \quad (10)$$

ค่าอัตราส่วนไคร์ของละอองลอยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 10 sr-100 sr และเมื่อมีค่ามากกว่า 40 sr แสดงให้เห็นว่าอากาศในบริเวณนั้นมีความเป็นมลภาวะอยู่มาก

จากงานของอัมพร รุ่งแจ้ง ได้ใช้วิธีการแก้สมการการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับของละอองลอย ( $\beta_a$ ) แบบวิธีของเฟอรัลด์ (Fernald method) ตามสมการ

$$\beta_a(z) + \beta_m(z) = \frac{X(z)C(z)}{\frac{X(z_c)}{\beta_a(z_c) + \beta_m(z_c)} + 2S_a \int_z^{z_c} X(z')C(z')dz'} \quad (11)$$

$$\text{โดย } C(z) = \exp \left[ 2(S_a - S_m) \int_z^{z_c} \beta_m(z')dz' \right] \quad (12)$$

เมื่อ  $S_a$  แทน อัตราส่วนไคร์สำหรับละอองลอย (sr)

$S_m$  แทน อัตราส่วนไคร์สำหรับโมเลกุล (sr)

$z_c$  แทน ความสูงวิกฤต (Critical height) โดยตั้งสมมติฐานว่า เหนือความสูงตรง

ระดับนี้ขึ้นไปไม่มีละอองลอย (m) ในงานวิจัยนี้ความสูงวิกฤตของชั้น

โทร โฟสเฟียร์เท่ากับ 15 กิโลเมตร และความสูงวิกฤตของ

ชั้นสตราโตสเฟียร์เท่ากับ 20 กิโลเมตร

### 5.3 อัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน (Depolarization ratio)<sup>(1)</sup>

อนุภาคต่างๆ โมเลกุล รวมทั้งละอองลอยที่แขวนลอยอยู่ในชั้นบรรยากาศ มีรูปร่างหลากหลายทั้งเป็นทรงกลม และไม่เป็นทรงกลม อัตราส่วนดีโพลาไรเซชันสามารถอธิบายรูปร่างของอนุภาคต่างๆ ที่แสงตกกระทบและกระเจิงกลับมา พิจารณาโพลาไรเซชันของแสงมีทิศกระเจิงกลับมาในแนวขนาน และโพลาไรเซชันของแสงมีทิศกระเจิงกลับมาในแนวตั้งฉากเมื่อเทียบกับแนวโพลาไรซ์ของแสงที่ส่งออกไป แสดงความสัมพันธ์ด้วยสมการ

$$\rho = \frac{P_{\perp}}{P_{\parallel}} \quad (13)$$

เมื่อ  $\rho$  แทน อัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน

$P_{\perp}$  แทน ความเข้มของสัญญาณแสงโพลาไรซ์ที่กระเจิงในแนวตั้งฉากกับแนวโพลาไรซ์ของแสงที่ส่งออกไป

$P_{\parallel}$  แทน ความเข้มของสัญญาณแสงโพลาไรซ์ที่กระเจิงในแนวขนานกับแนวโพลาไรซ์ของแสงที่ส่งออกไป

ค่าอัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน แสดงการแจกแจงขนาด (Size distribution) ของอนุภาคที่เป็นทรงกลม มีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 1 ถ้าเป็นละอองลอยขนาดเล็กมากๆ จนนับได้ว่ามีรูปร่างเป็นทรงกลม ก็จะมีค่าอัตราส่วนดีโพลาไรเซชันต่ำมาก จนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

## 6. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์วิเคราะห์ หาค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย ซึ่งแบบจำลองคำนวณค่ารังสีตรงของดวงอาทิตย์ มีสมการที่เกี่ยวข้องกับ ค่าการส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ อันเนื่องมาจากการดูดกลืนของละอองลอย (Aerosol transmittance:  $T_a(z)$ ) เป็นปริมาณที่สัมพันธ์กับความลึกเชิงแสงของละอองลอย โดยพิจารณาความสัมพันธ์ สมการ (2) และสมการ (7) ซึ่งหากพิจารณาของละอองลอย

<sup>1</sup> D.N. Sathyanarayana. (2007). *Vibrational spectroscopy: theory and application*. p. 310.

$$T_a(z) = \exp(-\tau_a) = \exp\left(-\int_0^z \alpha_a(z) dz\right)$$

$$\tau_a = -\ln T_a(z) \quad (14)$$

ดังนั้นในการใช้แบบจำลองด้วยสมการทางคณิตศาสตร์จึงมีความน่าสนใจในการเปรียบเทียบกับค่าความลึกเชิงแสงที่คำนวณได้จากข้อมูลที่วัดได้จากไลดาร์ โดยใช้แบบจำลอง Bird และ แบบจำลอง CSR

### 6.1 แบบจำลอง Bird<sup>(1)</sup>

แบบจำลองนี้มีสมการที่สามารถหาค่าการส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์อันเนื่องมาจากการดูดกลืนของละอองลอย ( $T_a(z)$ ) โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$T_a(z) = \exp\left[-L_{oa}^{0.873} (1 + L_{oa} - L_{oa}^{0.7808}) m_{air}^{0.9108}\right] \quad (15)$$

เมื่อ  $L_{oa}$  แทน The broadband aerosol optical depth

โดย  $L_{oa}$  ที่สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$L_{oa} = \beta_1 \left[0.695 + (0.016 + 0.066\beta_1 (0.7)^{-\beta_2}) m_{air}\right]^{-\beta_2} \quad (16)$$

เมื่อ  $\beta_1$  แทน อังสตรอมเอ็กโพเนนท์ (Angstrom exponent)

$\beta_2$  แทน สัมประสิทธิ์ความขุ่นมัวของอังสตรอม (Angstrom turbidity coefficient)

และ  $m_{air}$  แทน มวลอากาศที่ความดันบรรยากาศ ณ ตำแหน่งใดๆ

---

<sup>1</sup> O. Behar; A. Khellaf; & K. Mohammedi. (2015). *Comprison of solar radiation models and their validation under Algerian climate-The case of direct irradiance*. Energy Conversion and Management. 98:240-241, 250.

โดยที่  $m_{air}$  สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$m_{air} = m_r \frac{P}{P'} \quad (17)$$

เมื่อ  $P$  แทน ความดันบรรยากาศ ณ ตำแหน่งต่างๆ (mbar)

$P'$  แทน ความดันบรรยากาศมาตรฐาน (1013 mbar)

$m_r$  แทน มวลอากาศ

โดยที่  $m_r$  สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$m_r = [\cos\theta_z + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253}]^{-1} \quad (18)$$

## 6.2 แบบจำลอง CSR<sup>(1)</sup>

แบบจำลอง CSR มีสมการที่สามารถคำนวณหาค่าการส่งผ่านรังสีของดวงอาทิตย์ เนื่องจากการดูดกลืนของละอองลอย ( $T_a(z)$ ) โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$T(z) = \exp[-m_{air} L_{aa}] \quad (19)$$

เมื่อ  $L_{aa}$  แทน The broadband aerosol optical depth มีค่าเดียวกับสมการ (16)

แบบจำลอง Bird และ แบบจำลอง CSR มีการนำข้อมูลทางดาราศาสตร์มาใช้ในการพิจารณา ซึ่งปริมาณทางดาราศาสตร์ที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

### มุมเดคลิเนชัน (Declination angle: $\delta$ )

มุมเดคลิเนชันเป็นผลกระทบจากการเอียงของแกนหมุนของโลก เป็นมุมที่แสดงตำแหน่งเชิงมุมของดวงอาทิตย์ที่เวลาเที่ยงสุริยะ (Solar noon) เมื่อเทียบกับระนาบของเส้นศูนย์สูตร มีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง +23.45 ถึง -23.45 องศา โดยจะคำนวณได้จากสมการ

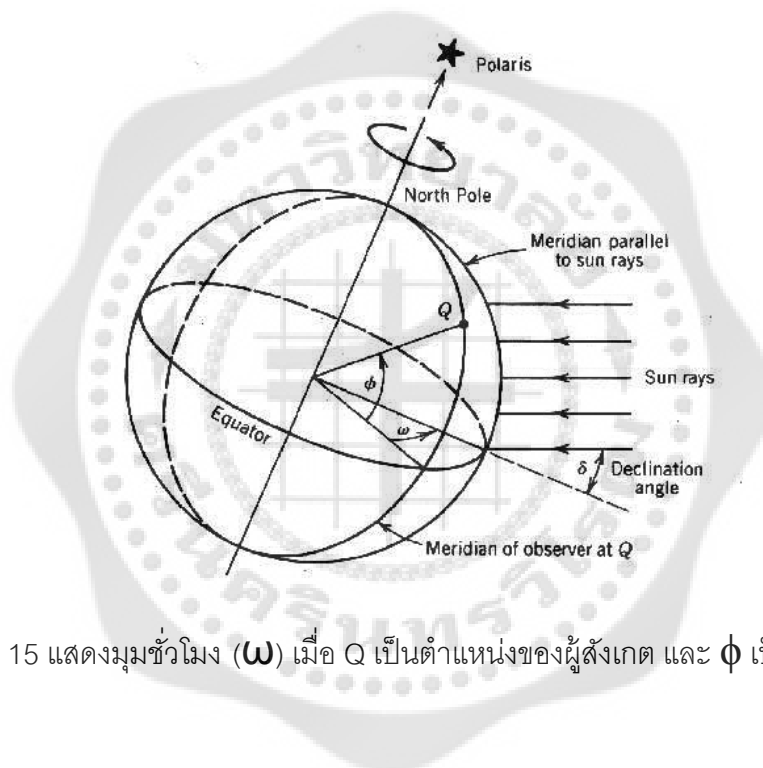
<sup>1</sup> O. Behar; A. Khellaf; & K. Mohammedi. (2015). *op. cit.* pp. 238-242, 241-242

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n_j}{366}\right) \quad (20)$$

เมื่อ  $n_j$  แทน วันในรอบปี โดยที่  $n_1 = 1$  สำหรับวันที่ 1 มกราคม

### มุมชั่วโมง (Hour angle: $\omega$ )

มุมชั่วโมงใช้บอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าในช่วงเวลาต่างๆ โดยวัดจากเส้นเมริเดียนท้องฟ้าในทิศตามเข็มนาฬิกา (ทิศเดียวกับการหมุนของท้องฟ้า) ไปตามเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้า จนถึงวงกลมชั่วโมง หรือวัดจากเส้นเมริเดียนของตำแหน่งสถานที่ตั้งไปยังเส้นเมริเดียนที่ขนานกับรังสีจากดวงอาทิตย์ ดังแสดงในภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 แสดงมุมชั่วโมง ( $\omega$ ) เมื่อ Q เป็นตำแหน่งของผู้สังเกต และ  $\phi$  เป็นตำแหน่งละติจูด

ที่มา: <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter03/Image58.jpg>, Retrieved October 18, 2015.

เนื่องจากการหมุนรอบตัวเองของโลก 1 รอบ (360 องศา) ใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง หรือเคลื่อนที่ 1 องศา ใช้เวลา 4 นาที ซึ่งมุมชั่วโมง มีค่าอยู่ระหว่าง -180 ถึง +180 องศา สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$\omega = 15^\circ (ST - 12) \quad (21)$$

เมื่อ ST แทน เวลาดวงอาทิตย์ (ชั่วโมง)

**เวลาดวงอาทิตย์ (Solar time: ST )**

เวลาดวงอาทิตย์หรือเวลาสุริยคติปรากฏมีค่าแตกต่างจากเวลาท้องถิ่น (Standard time) สำหรับประเทศไทยสามารถใช้เวลาจากการจับนาฬิกา ซึ่งยังสัมพันธ์กับผลต่างระหว่างเส้นลองจิจูดมาตรฐานและเส้นลองจิจูดของผู้สังเกต สามารถคำนวณเวลาดวงอาทิตย์ได้ตามสมการ

$$ST = SDT + 4(L_{st} - L_{bc}) + E \quad (22)$$

สมการ (22) มีหน่วยเป็นนาฬิกา เมื่อคำนวณหาค่า ST จะต้องแปลง SDT ให้มีหน่วยเป็นนาฬิกาแล้วเปลี่ยนเป็นชั่วโมง

เมื่อ SDT แทน เวลาท้องถิ่นสำหรับประเทศไทย (ชั่วโมง)

$L_{st}$  แทน เส้นลองจิจูด (Longitude) มาตรฐานท้องถิ่น สำหรับประเทศไทยอยู่ที่  
จังหวัดอุบลราชธานี มีค่าเท่ากับ 105 องศาตะวันออก

$L_{bc}$  แทน เส้น Local ลองจิจูด (Longitude) ของตำแหน่งที่พิจารณา (องศา)

E แทน สมการเวลา (นาฬิกา)

โดยที่สมการเวลา E หาได้จากสมการ

$$E = 229.2(75 \times 10^{-6} + 186 \times 10^{-6} \sin B - 0.03207 \sin B - 0.014615 \sin 2B - 0.04089 \sin 2B) \quad (23)$$

โดยที่ค่า B สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$B = \frac{360(n_j - 1)}{366} \quad (24)$$

เมื่อ  $n_j$  แทน วันในรอบปี โดยที่  $n_j = 1$  สำหรับวันที่ 1 มกราคม

มุมเซนนิธดวงอาทิตย์ (Solar zenith angle:  $\theta_z$ )

มุมเซนนิธดวงอาทิตย์ เป็นมุมที่อยู่ระหว่างผู้สังเกตกับดวงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (25)$$

เมื่อ  $\delta$  แทน มุมเดคลิเนชัน (องศา)

$\phi$  แทน ละติจูดของตำแหน่งที่พิจารณา (องศา)

$\omega$  แทน มุมซั้วโมง (องศา)

## 7. การวิเคราะห์ทางสถิติ

### 7.1 รากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (RMSE)<sup>(1)</sup>

RMSE (Root mean squared error) เป็นวิธีการทางสถิติที่นิยมใช้วัดค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ได้ทั้งในทางคุณภาพอากาศ หรือแม้แต่การศึกษาทางอุตุนิยมวิทยา และด้านอื่นๆอีก โดยเป็นการวัดความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าที่ได้จากแบบจำลอง ซึ่งหาก RMSE มีค่าน้อยแสดงว่าแบบจำลองที่ใช้ศึกษาสามารถประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับค่าจริง และหากมีค่าเท่ากับศูนย์ จะหมายความว่าไม่เกิดความคลาดเคลื่อนในแบบจำลอง แต่ค่าที่ยอมรับได้อยู่มีค่าระหว่าง 1 ถึง 2 เมื่อตัวอย่างที่ศึกษามีจำนวน  $n$  ตัวอย่าง RMSE สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - \tau_i)^2} \quad (26)$$

เมื่อ  $n = 1, 2, 3, \dots, n$

และ  $T_i$  แทน ความลึกเชิงแสงของละอองลอยที่ได้จากการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์

$\tau_i$  แทน ความลึกเชิงแสงของละอองลอยที่ได้จากการคำนวณของข้อมูลไลดาร์

<sup>1</sup> T. Chai; & K. R.R. Draxler. (2014). *Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MEA)?- argument against avoiding RMSE in the literature.* Geoscientific Model Development. 7: 1247-1250.

## 7.2 ความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ย (MBD)<sup>(1)</sup>

MBD (Mean bias difference) เป็นตัวชี้วัดทางสถิติที่บอกความแตกต่างเฉลี่ย ระหว่าง ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากค่าจริง ค่า MBD อาจมีค่า เป็นบวกหรือลบก็ได้ หากค่าเป็นบวกแสดงว่าข้อมูลมีความเอนเอียงไปในด้านที่ค่าจากการคำนวณ จากแบบจำลองมากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจากค่าจริง แต่หากค่าเป็นลบ แสดงว่าข้อมูลมีความ เอนเอียงไปในด้านที่ค่าที่ได้จากการคำนวณจากค่าจริงมากกว่าค่าจากการคำนวณจากแบบจำลอง ค่า MBD ที่ดีต้องมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ หมายความว่าผลจากการคำนวณจากแบบจำลองไม่มีความเอนเอียง ไปทางใดทางหนึ่งมากนัก เมื่อข้อมูลที่ศึกษามีจำนวน  $n$  ข้อมูล MBD สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$MBD = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n (c_i - m_i) \quad (27)$$

เมื่อ

$\bar{m}$  แทน ค่าเฉลี่ยของความลึกเชิงแสงของละอองลอยที่ได้จากการคำนวณ ของข้อมูลไลดาร์

$n$  แทน จำนวนข้อมูลทั้งหมด

$c_i$  แทน ความลึกเชิงแสงของละอองลอยที่ได้จากการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์

$m_i$  แทน ความลึกเชิงแสงของละอองลอยที่ได้จากการคำนวณของข้อมูลไลดาร์

## 8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พ.ศ. 2546 Gerasopoulos และคณะ (E. Gerasopoulos; et al. 2003: 2025-2029) ได้ ศึกษาทางอุตุนิยมวิทยาถึงผลกระทบของคุณสมบัติเชิงแสงของละอองลอยทางตอนเหนือของประเทศ กรีก ซึ่งได้ทำการศึกษา ความลึกเชิงแสงของละอองลอย (Aerosol optical depth) สัมประสิทธิ์การ และสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับ (Backscattering coefficients) โดยพบว่าค่าเฉลี่ยของความลึกเชิง แสงของละอองลอยที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตรมีค่าเท่ากับ 0.23 ซึ่งจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นในช่วงฤดู

<sup>1</sup> H. David; et al. (2006). *Approaches to modeling potato leaf appearance rate*. American Society of Agronomy. 98: 522-528.

ร้อนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 0.5 และมากขึ้น 0.7 ถึง 0.8 ในช่วงบางเวลา ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $65 \pm 40 \text{ Mm}^{-1}$  และหากพิจารณาละอองลอยตามความสูงจะอยู่ที่ 0.5-1 กิโลเมตรในช่วงฤดูหนาวและเพิ่มเป็น 2.5 - 3 กิโลเมตรในช่วงฤดูร้อน

ในปีเดียวกัน (พ.ศ. 2546) Balis และคณะ (D. S. Balis; et al. 2003: 4529-4538 ) ได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของละอองลอย เนื่องจากการเผาไหม้ชีวมวล (Biomass burning) ที่เมือง Thessaloniki ประเทศกรีซ โดยการใช้ไลดาร์วัดข้อมูลทั้งหมดของค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (Aerosol optical depth) ที่ 355 นาโนเมตร มีค่าเท่ากับ 1.35 เมื่อในขณะนั้นไม่มีเมฆปกคลุม อัตราส่วนไลดาร์มีค่า 60sr ที่ 355 นาโนเมตร และ 50 sr ที่ 532 นาโนเมตร

พ.ศ. 2551 Kulkarni และคณะ (K. Kulkarni; et al. 2008: 1-11) ได้ศึกษาลักษณะเด่นของละอองลอยในชั้นโทรโพสเฟียร์ส่วนบน (Upper troposphere) และชั้นสตราโตสเฟียร์ส่วนล่าง (Lower stratosphere) โดยใช้ไลดาร์ (532 nm Nd:YAG lidar) ทำการศึกษาที่เมือง Gadanki ประเทศอินเดีย โดยศึกษาที่ระดับความสูง 10-15 กิโลเมตรสำหรับชั้นโทรโพสเฟียร์ส่วนบน (Upper troposphere) และ 18-30 กิโลเมตรสำหรับชั้นสตราโตสเฟียร์ส่วนล่าง (Lower stratosphere) โดยใช้ความสูงวิกฤตเท่ากับ 35 กิโลเมตร ผลการศึกษาพบว่าในช่วงความสูง 10 ถึง 30 กิโลเมตรค่าการลดทอนของแสงเนื่องจากละอองลอยมีค่าอยู่ในช่วง  $0.5-6 \times 10^{-3}$  ต่อกิโลเมตร และค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) มีค่าประมาณ 0.6 แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของละอองลอยในชั้นบรรยากาศทั้งสอง มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

พ.ศ. 2553 Bitar และคณะ (L. Bitar; et al. 2010: 1-10 ) ได้ศึกษาผลของละอองลอยที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ Kasatochi ซึ่งอยู่ทางตอนกลางของเกาะ Aleutian อาลาสกา ในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์และชั้นสตราโตสเฟียร์ โดยการใช้ไลดาร์ ผลจากการระเบิดของภูเขาไฟเกิดมีละอองลอยอยู่ที่บรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์และส่วนล่างของชั้นสตราโตสเฟียร์ ทำให้วัดค่าการกระเจิงกลับของละอองลอยได้  $8 \times 10^{-5} \text{ sr}^{-1}$  ที่ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตรและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่  $0.60 \pm 0.07$  เคลวินต่อวัน

พ.ศ. 2555 Sawamura และคณะ (P. Sawamura; et al. 2012: 1-9) ได้ศึกษาความลึกเชิงแสงของละอองลอยในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ ซึ่งเกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ Nabro ในประเทศเอธิโอเปีย เมื่อวันที่ 13 มิถุนายน 2011 การระเบิดของภูเขาไฟในครั้งนี้ทำให้เกิดละอองลอย

กระจายลอยไปอยู่ในชั้นสตราโตสเฟียร์ โดยค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยมีค่าอยู่ในช่วง 0.003 ถึง 0.004 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $0.018 \pm 0.009$

ในปีเดียวกัน (พ.ศ. 2555) Jian Wu และคณะ (J. Wu; et al. 2012: 659-671) ได้ศึกษาโดยการจำลองแบบถึงผลกระทบโดยตรงของละอองลอยในบรรยากาศชั้น Tropopause จากการศึกษาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น Tropopause มีความสำคัญกับบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์และชั้นสตราโตสเฟียร์ ซึ่งการมีละอองลอยอยู่ในชั้นบรรยากาศมีผลกระทบต่ออุณหภูมิของชั้นบรรยากาศ

ในประเทศไทย พ.ศ. 2557 วินัส ต่วนเครือ และ นิพนธ์ ตั้งธรรม ได้ศึกษาผลกระทบของละอองลอยในบรรยากาศที่เกิดจากไฟฟ้า และการเผาชีวมวลต่อลักษณะฝนบริเวณภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย ผลการศึกษาพบว่า ค่าการสลัวของแสงจากละอองลอยในบรรยากาศ (Aerosol optical thickness: AOT) มีค่าสูงสุดในฤดูก่อนมรสุมโดยเฉพาะในเดือนมีนาคมบริเวณจังหวัด เชียงราย พะเยา และแพร่ เฉลี่ยประมาณ 0.5 นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงฤดูฝนจะพบละอองลอยขนาดใหญ่เป็นส่วนใหญ่ แต่ช่วงฤดูก่อนมรสุมละอองลอยจะเป็นอนุภาคขนาดเล็กเกือบทั้งหมด ซึ่งมาจากเขม่าควันไฟที่เกิดจากการเผาชีวมวลในช่วงนั้น และยังพบว่าปริมาณน้ำฝนมีความสัมพันธ์กับปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า และมีความสัมพันธ์อย่างมากกับค่าการสลัวของแสงจากละอองลอยในอากาศ

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังนี้

3.1 การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล

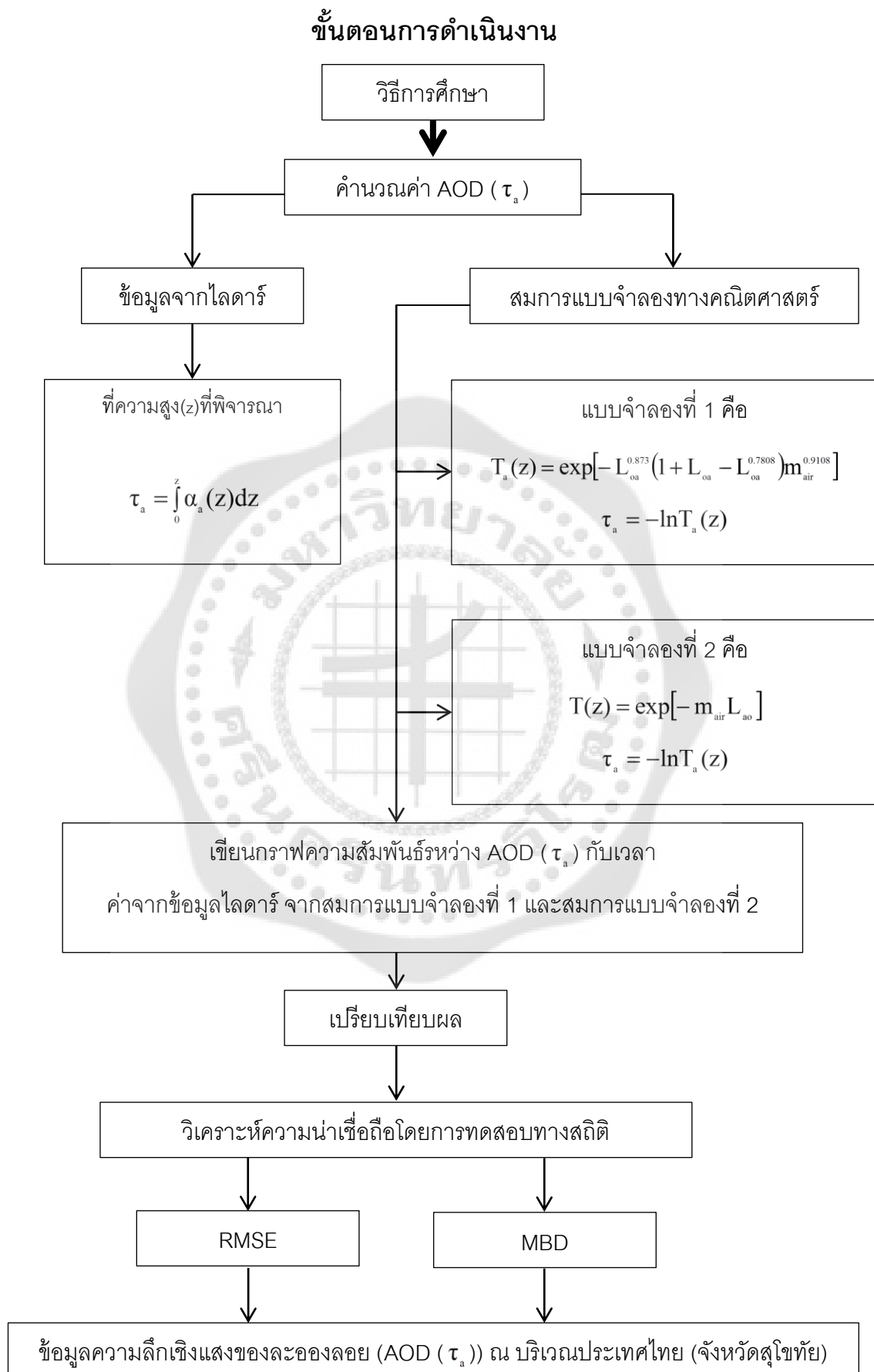
3.2 คำนวณหาค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ที่บรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) และชั้นสตราโตสเฟียร์ (Stratosphere) ข้อมูลจากไลดาร์

3.3 คำนวณหาค่าความลึกเชิงแสงของของละอองลอย (AOD) โดยการประมาณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

3.4 เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกเชิงแสงของละอองลอยที่ได้จากข้อมูลไลดาร์ และได้จากการแทนค่าโดยการประมาณค่าด้วยสมการคณิตศาสตร์กับเวลา ของวันที่ทำการศึกษา ต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 7 วัน ข้อมูลของเดือนมกราคม 2547 เป็นข้อมูลจากสถานีวิจัยตรวจวัดการแผ่รังสีในชั้นบรรยากาศ อำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย

3.5 เปรียบเทียบผลที่ได้กับช่วงเวลาที่สัมพันธ์สอดคล้องกันกับค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยที่เป็นข้อมูลจากไลดาร์ และจากแบบจำลองคณิตศาสตร์

3.6 วิเคราะห์ค่าของความลึกเชิงแสงของละอองลอยจากข้อมูลไลดาร์มีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากแบบจำลองมากน้อยแค่ไหน และในช่วงเวลาใดบ้าง โดยใช้การทดสอบทางสถิติ คือ RMSE (Root mean squared error) และ MBD (Mean bias difference)



## 1. การศึกษา และเก็บรวบรวมข้อมูล

ศึกษาวิธีการเก็บข้อมูลของไลดาร์ ข้อมูลได้รับความอนุเคราะห์เป็นข้อมูลดิบจากภาคธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นข้อมูลที่สามารถนำมาวิเคราะห์ศึกษา เพื่อตรวจสอบหาละอองลอยในบรรยากาศ และศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของละอองลอย การศึกษาครั้งนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน หลักๆ ดังนี้

1.1 ข้อมูลดิบสัญญาณแสงโพลาไรซ์ที่กระเจิงในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับแนวโพลาไรซ์ของแสงที่ส่งออกไป นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์คำนวณหาค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยของบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) และชั้นสตราโตสเฟียร์ (Stratosphere) โดยใช้สมการที่เกี่ยวข้องในการคำนวณหา ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงแสงของละอองลอยอื่นๆ ด้วยที่คำนวณได้ เพื่อมาใช้หาความลึกเชิงแสงของละอองลอย

1.2 ศึกษาสมการคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้วัดค่ารังสีของดวงอาทิตย์ สมการย่อยของสมการแบบจำลองสามารถนำมาคำนวณหาค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยได้ ซึ่งโดยจะใช้ข้อมูลของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลทางดาราศาสตร์มีการพิจารณาผลการคำนวณตลอด 24 ชั่วโมง

## 2. คำนวณหาค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ของบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ และชั้นสตราโตสเฟียร์ข้อมูลจากไลดาร์

2.1 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย (Aerosol backscattering coefficient:  $\beta_a(z)$ ) ตามสมการ (11) และสมการ (12)

$$\beta_a(z) + \beta_m(z) = \frac{X(z)C(z)}{\frac{X(z_c)}{\beta_a(z_c) + \beta_m(z_c)} + 2S_a \int_z^{z_c} X(z')C(z')dz'}$$

โดย

$$C(z) = \exp\left[2(S_a - S_m) \int_z^{z_c} \beta_m(z')dz'\right]$$

สมมติให้ค่าความสูงวิกฤต (Critical height:  $z_c$ )<sup>(1)</sup> เท่ากับ 15,000 เมตร สำหรับบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ และความสูงวิกฤตเท่ากับ 20,000 เมตร สำหรับบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ นั่นคือไม่มีละอองลอยเหนือความสูงวิกฤตนี้ขึ้นไป ( $\beta_a(z) = 0$ ) ทำให้มีสัญญาณพัลส์เลเซอร์ที่กระเจิงกลับเนื่องจากโมเลกุลของอากาศเท่านั้น ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากโมเลกุลในบรรยากาศ ( $\beta_m$ ) ได้จากสมการ (8)

$$X(z) = P(z) * z^2 = C\beta(z)\exp(-2\int_0^z \alpha(z') dz')$$

$$\ln X(z) = \ln \beta(z) - 2\int_0^z \alpha(z') dz'$$

$$\ln X(z_c) = \ln \beta_m(z_c) - 2S z_c \beta_m(z_c) \quad (28)$$

เมื่อ  $\alpha = S\beta$  และ  $S$  คืออัตราส่วนไครดาร์ของบรรยากาศ มีค่าเท่ากับ  $S = S_a + S_m$  โดยที่  $S_m$  คือ อัตราส่วนไครดาร์ของโมเลกุลมีค่าเท่ากับ  $\frac{8\pi}{3}$  สเตอเรเดียน (sr) และ  $S_a$  คืออัตราส่วนไครดาร์ของละอองลอย เพื่อความสะดวกและง่ายต่อการคำนวณ เลือกใช้อัตราส่วนไครดาร์ของละอองลอยคงที่ตลอดความสูงมีค่าเท่ากับ<sup>(2)</sup> 49.409 sr ใช้สมการ (28) คำนวณหา  $\beta_m$  และตั้งสมมติฐานให้มีค่าคงที่ทุกๆ ระดับความสูงสำหรับค่า  $\beta_m$  เมื่อนำไปแทนค่าในสมการ (11) และ (12)

2.2 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนแสงของละอองลอย ( $\alpha_a$ ) จากความสัมพันธ์ของสมการ (10) และนำค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย ( $\beta_a$ ) ที่ได้จากสมการ (11)

$$\alpha_a = S_a \beta_a$$

<sup>1</sup> S. Ruangrungrote; A. Intason; & A. Chabangbon. (2007). *Observation of tropospheric aerosol using mie scattering lidar at Srisamrong Sukhothai province*. NU Science Journal 2007. 23(5): 26.

<sup>2</sup> ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์ และ อรุณีย์ อินทร .(2553). *การศึกษามลกระทบของอัตราส่วนไครดาร์ต่อสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับของละอองลอยและเมฆในประเทศไทย ด้วยเครื่องไครดาร์การกระเจิงแบบมี*. หน้า 52.

2.3 คำนวณค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD:  $\tau_a$ ) ของบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ และชั้นสตราโตสเฟียร์ ตามสมการ (2)

$$\tau_a = \int_0^z \alpha_a(z) dz$$

### 3. คำนวณหาค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) โดยการประมาณค่าด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

ความลึกเชิงแสงของละอองลอย หาได้จากการใช้สมการ (14)

$$\tau_a = -\ln T_a(z)$$

จากสมการ (14) จะต้องคำนวณค่า  $T_a(z)$  จากแบบจำลอง Bird และแบบจำลอง CSR ก่อน โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

#### 3.1 แบบจำลอง Bird

หาค่า  $T_a(z)$  ของแต่ละชั่วโมงตลอดทั้ง 24 ชั่วโมง ใน 1 วัน ของเดือนมกราคม 2547 ตามสมการ (15)

$$T_a(z) = \exp\left[-L_{oa}^{0.873} (1 + L_{oa} - L_{oa}^{0.7808}) m_{sr}^{0.9108}\right]$$

โดยที่  $L_{oa}$  สามารถคำนวณได้ตามสมการ (16)

$$L_{oa} = \beta_1 [0.695 + (0.016 + 0.066\beta_1 (0.7)^{-\beta_2}) m_{sr}]^{-\beta_2}$$

โดยค่า  $\beta_1 = 1.3$  (จากทฤษฎี) และ  $\beta_2 = 0.1308$  จากงานของภูวกฤต ไจหอม<sup>(1)</sup> สำหรับเดือนมกราคม และ  $m_{sr}$  สามารถคำนวณได้ตามสมการ (17)

<sup>1</sup> ภูวกฤต ไจหอม .(2553). ความลึกเชิงแสงของลอยที่ขึ้นกับความยาวคลื่นในปี 2546 ณ อำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย. หน้า 129. ปรินต์นิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

$$m_{\text{air}} = m_r \frac{P}{P'}$$

สำหรับอำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย  $P = 1008.8$  mbar (จากงานของภูวกฤต ไจหอม<sup>(1)</sup>) และ  $P' = 1013$  mbar ตามสมการ (17) ต้องหา  $m_r$  แทน มวลอากาศ

โดยที่  $m_r$  สามารถคำนวณได้ตามสมการ (18)

$$m_r = [\cos\theta_z + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253}]^{-1}$$

ต้องนำค่า  $\theta_z$  จากสมการ (25) มาแทนค่าในสมการ (18) จะทำให้ได้ค่ามวลอากาศของแต่ละวันในเดือนมกราคม และจะได้ค่ามวลอากาศที่ความดันบรรยากาศที่เกิดขึ้น ณ อำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย รายชั่วโมงของแต่ละวัน

### 3.2 แบบจำลอง CSR

หาค่า  $T_a(z)$  ของแต่ละชั่วโมงตลอดทั้ง 24 ชั่วโมง ใน 1 วัน ของเดือนมกราคม 2547 ตามสมการ (19)

$$T(z) = \exp[-m_{\text{air}} L_{\text{oa}}]$$

เมื่อ  $L_{\text{oa}}$  มีค่าเดียวกับสมการ (16)

แบบจำลอง Bird และ แบบจำลอง CSR ต้องมีการนำข้อมูลทางดาราศาสตร์มาใช้ในการพิจารณา โดยต้องคำนวณหา มุมเดคลิเนชัน (Declination angle:  $\delta$ ), มุมชั่วโมง (Hour angle:  $\omega$ ), เวลาดวงอาทิตย์ (Solar time:  $ST$ ) และมุมเซนิตดวงอาทิตย์ (Solar zenith angle:  $\theta_z$ ) ซึ่งพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์เหล่านี้จะทำให้สามารถคำนวณหา  $T_a(z)$  ได้

มุมเดคลิเนชัน (Declination angle:  $\delta$ ) คำนวณหามุม  $\delta$  ของแต่ละวันของเดือนมกราคม ตามสมการ (20)

<sup>1</sup> ภูวกฤต ไจหอม .(2553). เล่มเดิม. หน้า 129.

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n_j}{366}\right)$$

เมื่อ  $n_j$  แทนวันในรอบปี โดยที่  $n_1 = 1$  สำหรับวันที่ 1 มกราคม โดยจะนับต่อเรื่อยๆจนครบ 1 ปี คือวันที่ 31 ธันวาคม ( $n_{366} = 366$ ) แทนค่าของวันที่ต้องการข้อมูลลงในสมการ (20) จะได้ค่ามุมเดคลิเนชันของแต่ละวัน

มุมชั่วโมง(Hour angle:  $\omega$ ) คำนวณหามุม  $\omega$  ของแต่ละวันสำหรับเดือนมกราคม โดยเวลาที่คำนวณใช้ตลอด 24 ชั่วโมง คือ 00.00 – 23.00 น. ตามสมการ (21)

$$\omega = 15^\circ (ST - 12)$$

เมื่อ ST คือ เวลาดวงอาทิตย์ คำนวณหา ST ของแต่ละวันสำหรับเดือนมกราคม โดยเวลาที่คำนวณใช้ตลอด 24 ชั่วโมง คือ 00.00 – 23.00 น. ตามสมการ (22)

$$ST = SDT + 4(L_{st} - L_{loc}) + E$$

เมื่อ SDT เป็นเวลาท้องถิ่นสำหรับประเทศไทยรายชั่วโมงที่ต้องการข้อมูลอ่านได้จากนาฬิกา ดังนั้นค่า SDT ของแต่ละวันมีค่า 0 – 23,  $L_{st}$  สำหรับประเทศไทยอยู่ที่จังหวัดอุบลราชธานี มีค่าเท่ากับ 105 องศา และ  $L_{loc}$  เส้น Local ลองจิจูด (Longitude) ของจังหวัดสุโขทัยมีค่าเท่ากับ 99.8619 องศา สมการ (22) ต้องหาค่า E ซึ่งแทนค่าสมการเวลา โดย E สามารถคำนวณตามสมการ (23)

$$E = 229.2(75 \times 10^{-6} + 186 \times 10^{-6} \sin B - 0.03207 \sin B - 0.014615 \sin 2B - 0.04089 \sin 2B)$$

และสมการ (23) B สามารถคำนวณตามสมการ (24)

$$B = \frac{360(n_j - 1)}{366}$$

จะได้เวลาดวงอาทิตย์ เมื่อแทนค่า SDT และ E จากสมการ (22) และ (23) โดยเป็น เวลาของดวงอาทิตย์รายชั่วโมงของแต่ละวัน มุมชั่วโมงในสมการ (21) ก็จะได้ค่ามุมชั่วโมงที่ต้องการ มุมเซนิตดวงอาทิตย์ (Solar zenith angle:  $\theta_z$ ) คำนวณหามุม  $\theta_z$  ของแต่ละวันในเดือน มกราคมตามสมการ (25)

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega$$

โดยแทนค่า  $\delta$  ที่ได้จากสมการ (20) ,  $\phi$  คือละติจูดของอำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย มีค่าเท่ากับ 17.1647 องศา และค่า  $\omega$  ที่ได้จากสมการ (21) แทนลงในสมการ (25) จะได้มุมเซนิตดวงอาทิตย์

เมื่อกำหนดได้ค่ามุมเดคลิเนชัน (Declination angle:  $\delta$ ), มุมชั่วโมง (Hour angle:  $\omega$ ), เวลาดวงอาทิตย์ (Solar time: ST) และมุมเซนิตดวงอาทิตย์ (Solar zenith angle:  $\theta_z$ ) ทำให้สามารถ คำนวณหาค่า  $T_a(z)$  ของแบบจำลอง Bird และแบบจำลอง CSR1 ได้ จากนั้นแทนค่า  $T_a(z)$  ตามสมการ (14) และได้ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยรายชั่วโมง

3.4 เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกเชิงแสงของละอองลอยที่ได้จากข้อมูลไลดาร์ และได้จากการแทนค่าโดยการประมาณค่าด้วยสมการคณิตศาสตร์กับเวลา ของวันที่ทำการศึกษา ต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 7 วัน ข้อมูลของเดือนมกราคม 2547 เป็นข้อมูลจากสถานีวิจัยตรวจวัดการแผ่รังสี ในชั้นบรรยากาศ อำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย

3.5 เปรียบเทียบผลที่ได้กับช่วงเวลาที่สัมพันธ์สอดคล้องกันกับค่าความลึกเชิงแสงของ ละอองลอยที่เป็นข้อมูลจากไลดาร์ และจากแบบจำลองคณิตศาสตร์

3.6 วิเคราะห์ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยจากข้อมูลไลดาร์ โดยเปรียบเทียบกับ ข้อมูลที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และใช้วิธีทดสอบทางสถิติ คือ RMSE และ MBD เพื่อแสดงความน่าเชื่อถือของผลที่ได้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

#### 1. ผลการทดลอง

ผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ของบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ และชั้นสตราโตสเฟียร์ด้วยข้อมูลจากไลดาร์ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย (Aerosol backscattering coefficient :  $\beta_a(z)$ ) ที่ทำการคำนวณ ณ สถานีวิจัยตรวจวัดการแผ่รังสีในบรรยากาศ อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย โดยวิธีของเฟร์นัลด์ (Fernald method)<sup>(1)</sup> ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของละอองลอย (Aerosol extinction coefficient :  $\alpha_a$ ) และค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD:  $\tau_a$ ) ปรากฏผลตามตาราง 3 ถึง 5 โดยได้ตั้งสมมติฐานให้ชั้นโทรโพสเฟียร์ค่าความสูงวิกฤต (Critical height:  $z_c$ )<sup>(2)</sup> เท่ากับ 15,000 เมตร และความสูงวิกฤตเท่ากับ 20,000 เมตร สำหรับชั้นสตราโตสเฟียร์ นั่นคือไม่มีละอองลอยอยู่เหนือระดับความสูงวิกฤตที่ได้ตั้งสมมติฐาน ซึ่งครอบคลุมบริเวณโทรโพพอส (Tropopause) และสตราโตพอส (Stratopause)

---

<sup>1</sup> อัมพร รุ่งแจ้ง .(2552). ความน่าเชื่อถือของการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเชิงปริมาตรของละอองลอยในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยเครื่องไลดาร์กระเจิงแบบมี. หน้า 35 ปรินทอานันท์ บัณฑิตวิทยาลัย . มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

<sup>2</sup> S. Ruangrungrote; A. Intason; & A. Chabangbon. (2007). Observation of tropospheric aerosol using mie scattering lidar at Srisamrong Sukhothai province. NU Science Journal 2007. 23(5): 26.

ตาราง 3 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย( $\beta_a(z)$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของละอองลอย( $\alpha_a$ )

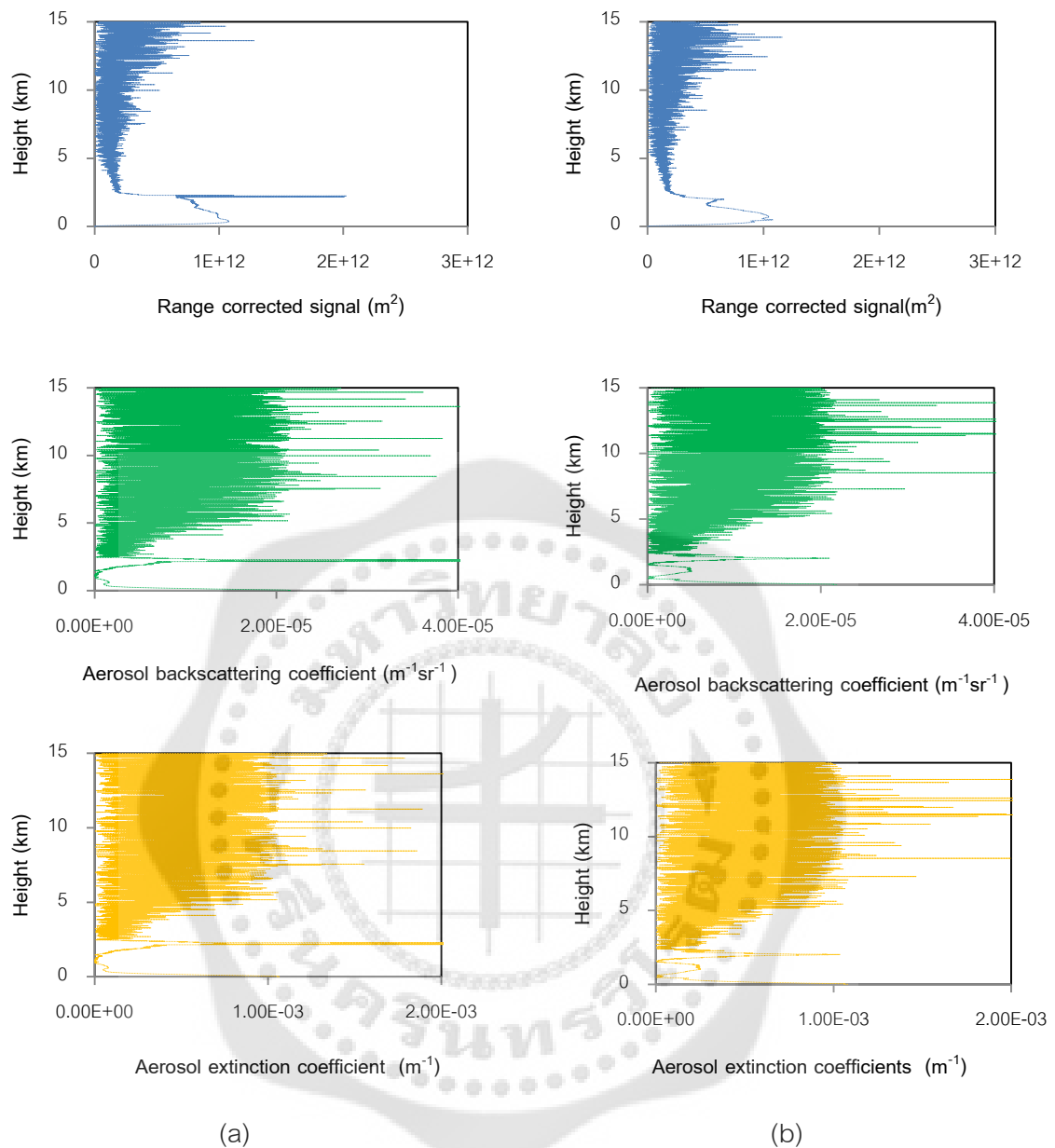
ในชั้นโทรโพสเฟียร์ (LT) วันที่ 16 มกราคม พ.ศ. 2547 เวลา 14.00 น.

Height (m)	$\beta_a(z)$ ( $m^{-1}sr^{-1}$ )	$\alpha_a$ ( $m^{-1}$ )	Height (m)	$\beta_a(z)$ ( $m^{-1}sr^{-1}$ )	$\alpha_a$ ( $m^{-1}$ )	Height (m)	$\beta_a(z)$ ( $m^{-1}sr^{-1}$ )	$\alpha_a$ ( $m^{-1}$ )	Height (m)	$\beta_a(z)$ ( $m^{-1}sr^{-1}$ )	$\alpha_a$ ( $m^{-1}$ )
498	2.88818E-06	1.43E-04	810	8.67473E-07	4.29E-05	1506	1.45159E-06	7.17E-05	3006	2.95090E-07	1.46E-05
504	3.05229E-06	1.51E-04	816	7.7189E-07	3.81E-05	1512	1.13795E-06	5.62E-05	3012	3.53156E-07	1.74E-05
510	3.20635E-06	1.58E-04	822	7.28192E-07	3.60E-05	1518	1.69078E-06	8.35E-05	3018	5.74796E-07	2.84E-05
516	3.33193E-06	1.65E-04	828	5.85192E-07	2.89E-05	1524	1.82841E-06	9.03E-05	3024	5.27493E-07	2.61E-05
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
600	1.25582E-06	6.20E-05	900	1.03632E-06	5.12E-05	2004	1.13692E-05	5.62E-04	3504	1.18374E-05	5.85E-04
606	1.50733E-06	7.45E-05	906	1.07287E-06	5.30E-05	2010	1.04483E-05	5.16E-04	3510	4.64626E-06	2.30E-04
612	1.75066E-06	8.65E-05	912	1.12093E-06	5.54E-05	2016	1.11454E-05	5.51E-04	3516	5.00411E-06	2.47E-04
618	1.83207E-06	9.05E-05	918	1.03784E-06	5.13E-05	2022	1.01434E-05	5.01E-04	3522	2.32714E-06	1.15E-04
624	1.97482E-06	9.76E-05	924	9.95423E-07	4.92E-05	2028	1.06615E-05	5.27E-04	3528	3.81694E-06	1.89E-04
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
702	1.34204E-06	6.63E-05	1002	1.29401E-06	6.39E-05	2502	2.83497E-06	1.40E-04	3852	1.09765E-06	5.42E-05
708	1.33843E-06	6.61E-05	1008	1.3623E-06	6.73E-05	2508	1.93356E-06	9.55E-05	3858	1.57668E-06	7.79E-05
714	1.25362E-06	6.19E-05	1014	1.24238E-06	6.14E-05	2514	1.18720E-06	5.87E-05	3864	6.55338E-06	3.24E-04
720	1.11098E-06	5.49E-05	1020	1.11827E-06	5.53E-05	2520	1.14787E-06	5.67E-05	3870	1.83123E-06	9.05E-05
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
804	9.27267E-07	4.58E-05	1500	1.27201E-06	6.28E-05	3000	1.26911E-06	6.27E-05	4002	1.62271E-06	8.02E-05

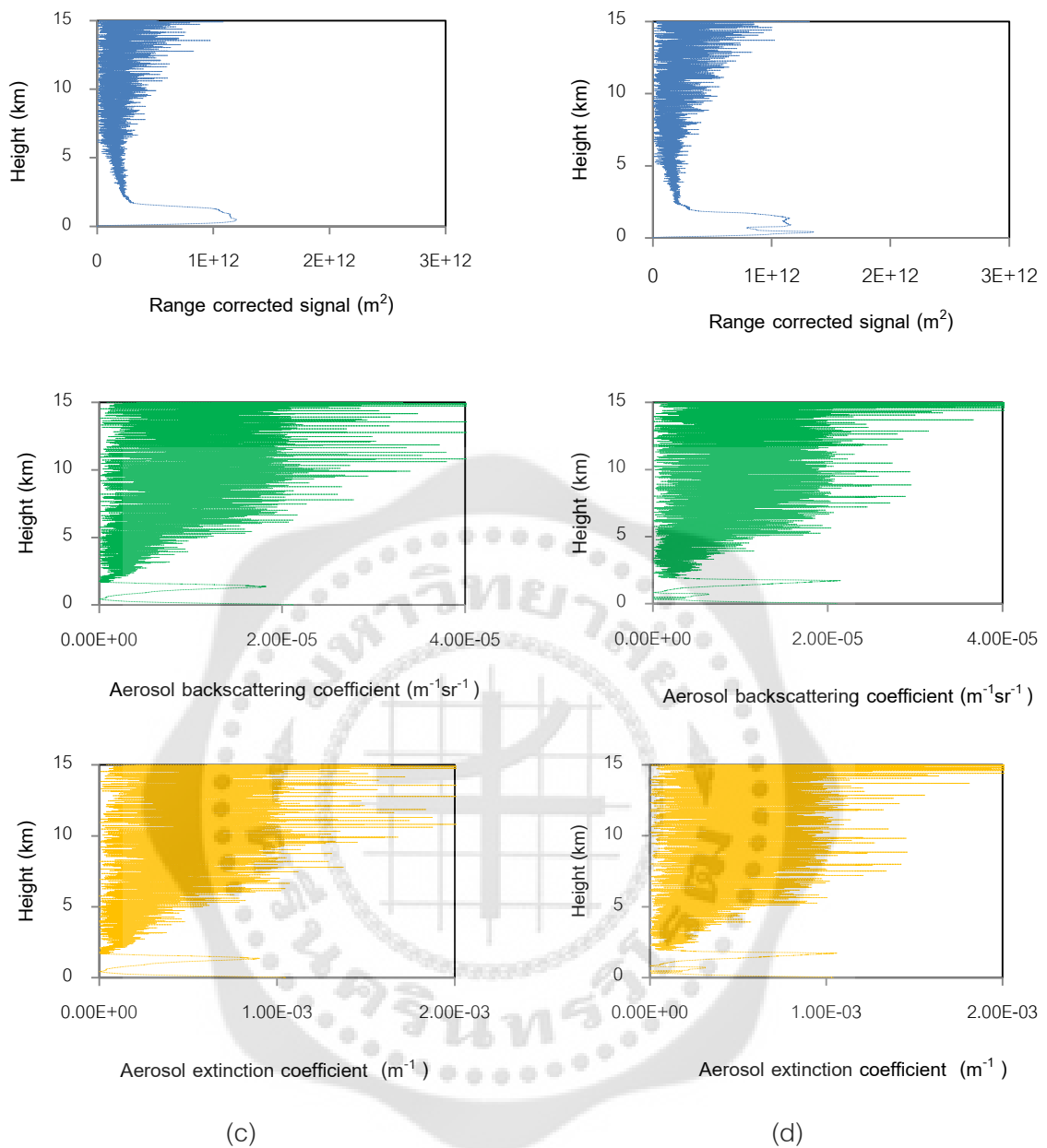
ตาราง 4 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย( $\beta_a(z)$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของละอองลอย( $\alpha_a$ )

ในชั้นสตราโตสเฟียร์ (LS) วันที่ 16 มกราคม พ.ศ. 2547 เวลา 14.00 น.

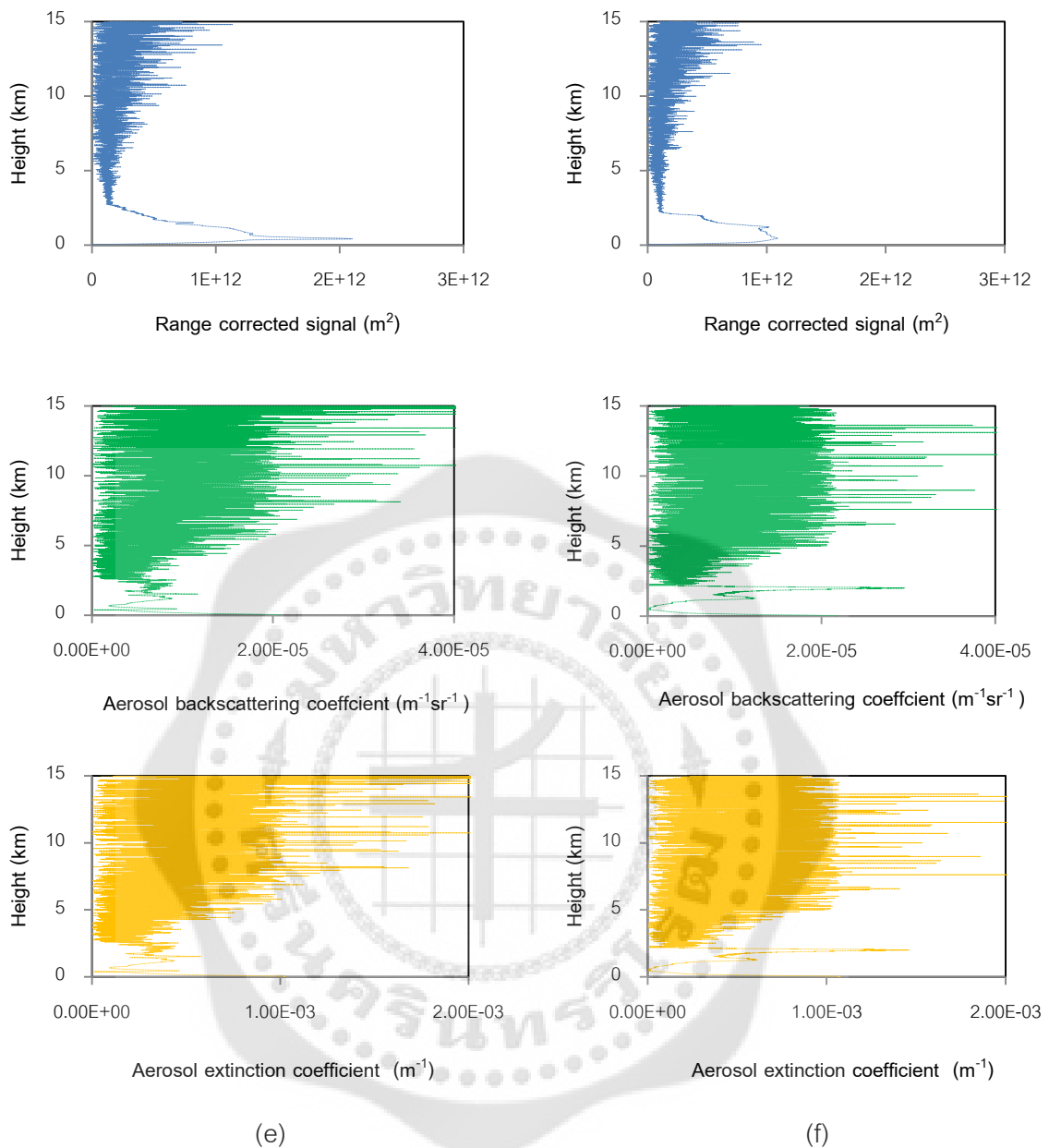
Height (m)	$\beta_a(z)$ ( $m^{-1}sr^{-1}$ )	$\alpha_a$ ( $m^{-1}$ )	Height (m)	$\beta_a(z)$ ( $m^{-1}sr^{-1}$ )	$\alpha_a$ ( $m^{-1}$ )	Height (m)	$\beta_a(z)$ ( $m^{-1}sr^{-1}$ )	$\alpha_a$ ( $m^{-1}$ )	Height (m)	$\beta_a(z)$ ( $m^{-1}sr^{-1}$ )	$\alpha_a$ ( $m^{-1}$ )
10998	2.51594E-06	0.000124	12510	6.92937E-06	0.000342	13008	5.76182E-06	0.000285	14004	6.08168E-06	0.0003
11004	1.50603E-06	7.44E-05	12516	7.38662E-06	0.000365	13014	2.15871E-05	0.001067	14010	5.89458E-07	2.91E-05
11010	5.24044E-06	0.000259	12522	1.20501E-06	5.95E-05	13020	6.93614E-06	0.000343	14016	8.63836E-06	0.000427
11016	1.53093E-05	0.000756	12528	1.14334E-05	0.000565	13026	1.01796E-05	0.000503	14022	7.94569E-06	0.000393
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
11502	1.36691E-05	0.000675	12744	1.3243E-05	0.000654	13344	9.47026E-06	0.000468	14352	3.40276E-06	0.000168
11508	6.71749E-06	0.000332	12750	1.46003E-05	0.000721	13350	2.01181E-06	9.94E-05	14358	6.09680E-06	0.000301
11514	3.04599E-06	0.00015	12756	1.42382E-05	0.000703	13356	1.04544E-05	0.000517	14364	2.38534E-05	0.001179
11520	2.35030E-06	0.000116	12762	1.37851E-05	0.000681	13362	8.41201E-06	0.000416	14370	7.56103E-06	0.000374
11526	1.48903E-05	0.000736	12768	6.97892E-06	0.000345	13368	1.12599E-06	5.56E-05	14376	1.05057E-05	0.000519
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
12000	1.44890E-05	0.000716	12894	2.82483E-06	0.000140	13500	5.54670E-06	0.000274	14874	7.45333E-06	0.000368
12006	1.16515E-05	0.000576	12900	6.85696E-06	0.000339	13506	9.90190E-06	0.000489	14880	1.63581E-06	8.08E-05
12012	1.37620E-06	6.8E-05	12906	8.58871E-06	0.000424	13512	1.76526E-06	8.72E-05	14886	6.26824E-06	0.00031
12018	4.46292E-06	0.000221	12912	6.55826E-07	3.24E-05	13518	4.84455E-06	0.000239	14892	1.21119E-05	0.000598
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
12504	1.13601E-05	0.000561	13002	6.86209E-06	0.000339	13998	6.88498E-06	0.00034	15000	6.36107E-06	0.000314



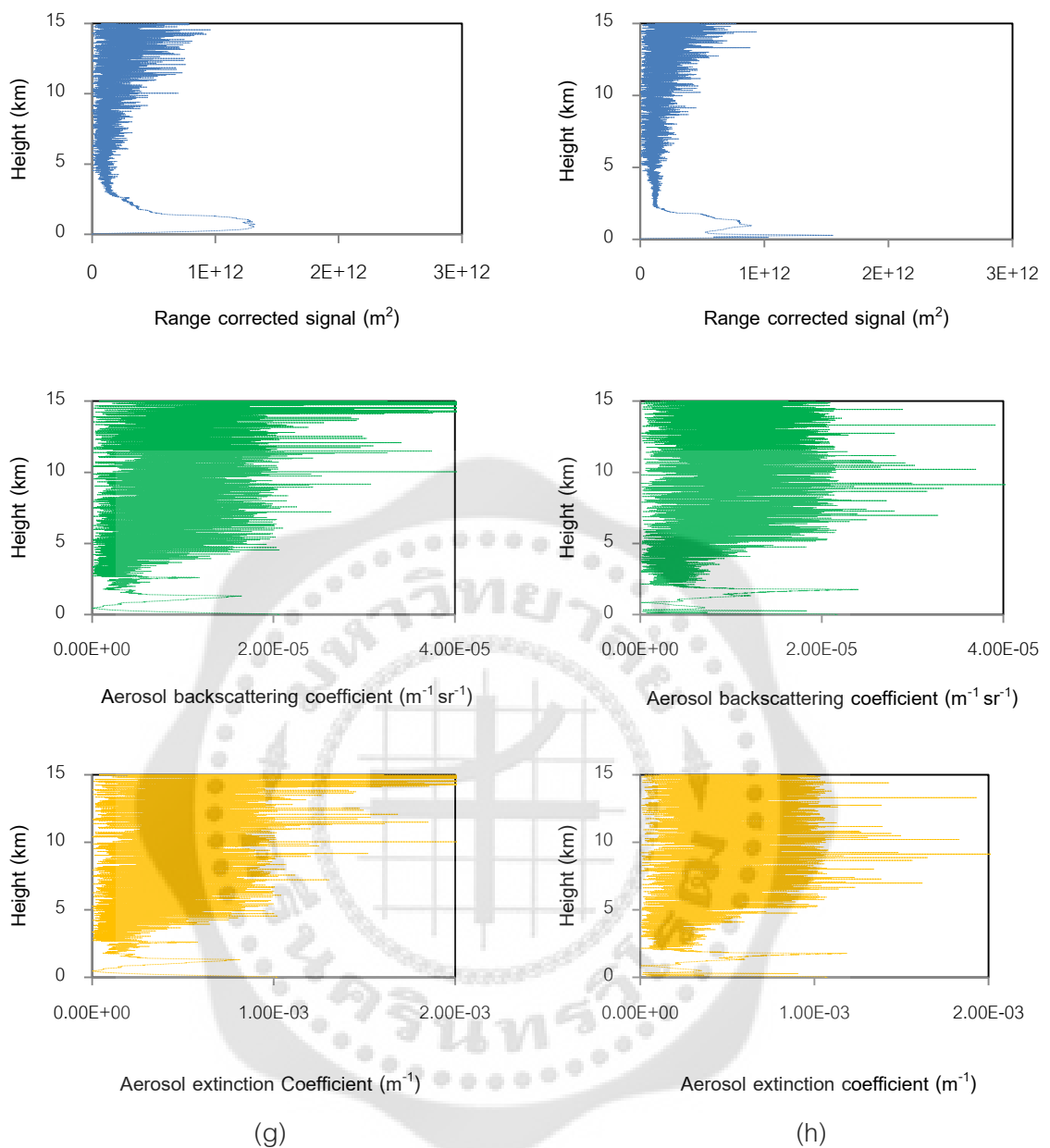
ภาพประกอบ 16 กราฟแสดงค่าไฟรไฟล์ตามแนวตั้งของค่าสัญญาณแก้ไขเชิงพิสัย (Range corrected signal) ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย (Aerosol backscattering coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของละอองลอย (Aerosol extinction coefficient) วันที่ 18 มกราคม 2547 (a)เวลา 8.00 น. และ (b)เวลา 12.00 น.



ภาพประกอบ 17 กราฟแสดงค่าโพไฟล์ตามแนวตั้งของค่าสัญญาณแก้ไขเชิงพิสัย (Range corrected signal) ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย (Aerosol backscattering coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของละอองลอย (Aerosol extinction coefficient) วันที่ 19 มกราคม 2547 (c)เวลา 8.00 น. และ (d)เวลา 12.00 น.



ภาพประกอบ 18 กราฟแสดงค่าโพรไฟล์ตามแนวตั้งของค่าสัญญาณแก้เชิงพิสัย (Range corrected signal) ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย (Aerosol backscattering coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของแสงเนื่องจากละอองลอย (Aerosol extinction coefficient) (e)วันที่ 22 และ (f)วันที่ 23 มกราคม 2547 เวลา 10.00 น.



ภาพประกอบ 19 กราฟแสดงค่าโพไฟล์ตามแนวตั้งของค่าสัญญาณแก้เชิงพิสัย (Range corrected signal) ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย (Aerosol backscattering coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของละอองลอย (Aerosol extinction coefficient) (g)วันที่ 22 และ (h)วันที่ 23 มกราคม 2547 เวลา 12.00 น.

ตาราง 5 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD:  $\tau_a$ ) โดยใช้ข้อมูลไลดาร์แบบ 24 ชั่วโมง ในชั้นโทรโพสเฟียร์ (LT) และชั้นสตราโตสเฟียร์ (LT) วันที่ 16 มกราคม พ.ศ. 2547

Troposphere		Stratosphere	
Time	$\tau_a$	Time	$\tau_a$
00.00	1.184	00.00	1.629
01.00	1.183	01.00	1.611
02.00	1.055	02.00	1.739
03.00	1.166	03.00	1.655
04.00	0.912	04.00	1.753
05.00	0.985	05.00	1.713
06.00	1.154	06.00	1.597
07.00	0.722	07.00	1.691
08.00	1.042	08.00	1.636
09.00	0.605	09.00	1.717
10.00	0.551	10.00	1.694
11.00	0.484	11.00	1.598
12.00	0.387	12.00	1.641
13.00	0.623	13.00	1.695
14.00	0.647	14.00	1.532
15.00	0.552	15.00	1.772
16.00	0.777	16.00	1.777
17.00	2.229	17.00	1.730
18.00	2.650	18.00	1.805
19.00	2.366	19.00	1.763
20.00	1.444	20.00	1.747
21.00	1.798	21.00	1.678
22.00	1.574	22.00	1.705
23.00	2.514	23.00	1.745

จากตาราง 3 และ 4 เป็นตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย ( $\beta_p(z)$ ) คำนวณได้จากสมการ (11) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของละอองลอย ( $\alpha_p$ ) คำนวณได้จากสมการ (10) โดยใช้ค่าอัตราส่วนไวดาร์ของละอองลอย คงที่ตลอดช่วงความสูงที่พิจารณาของชั้นโทรโพสเฟียร์และชั้นสตราโตสเฟียร์มีค่าเท่ากับ 49.409 sr

จากภาพประกอบ 16-19 พิจารณาโพรไฟล์แนวตั้งของสัญญาณแก๊สซัลเฟอร์ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงการกระจายตัวของละอองลอยในบรรยากาศ พิจารณาในช่วงความสูง 0-15 กิโลเมตรเหนือพื้นดินสัญญาณแก๊สซัลเฟอร์ มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง  $1 \times 10^{11}$  ถึง  $1 \times 10^{12}$  m<sup>2</sup> เป็นส่วนใหญ่ซึ่งเป็นค่าสำหรับละอองลอย<sup>(1)</sup> ในแต่ละช่วงเวลาของวันเดียวกันและช่วงเวลาเดียวกันของต่างวันมีค่าแตกต่างกัน ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย ที่แสดงส่วนใหญ่มีค่าอยู่ช่วงไม่เกิน  $1 \times 10^{-5}$  m<sup>1</sup>sr<sup>-1</sup> เป็นค่าที่แสดงถึงการขนาดของละอองลอย<sup>(2)</sup> ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของละอองลอยในระยะ 10-15 กิโลเมตรมีค่าคล้ายคลึงกับงานของ Kulkarni และคณะ (K. Kulkarni; et al. 2008: 4)

จากตาราง 5 ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) คำนวณจากสมการ (2) ตลอดทั้งวัน 24 ชั่วโมง มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.387-2.650 เฉลี่ยเท่ากับ 1.194 สำหรับชั้นโทรโพสเฟียร์ และมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1.532-1.805 เฉลี่ยเท่ากับ 1.693 สำหรับชั้นสตราโตสเฟียร์

<sup>1</sup> ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์; และ อรุณีย์ อินทศร .(2553). การศึกษามลกระทบของอัตราส่วนไวดาร์ต่อสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับของละอองลอยและเมฆในประเทศไทย ด้วยเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี. หน้า 53.

<sup>2</sup>S. Ruangrungrote. (2012). *The Feasibility study of retrieval algorithm of tropospheric continental aerosol investigation in Thailand*. p. 49. Dissertion, Ph.D.(Physics). Graduate School, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

ผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) โดยการประมาณค่าด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ โดยใช้แบบจำลอง 2 แบบ คือ แบบจำลอง Bird และแบบจำลอง CSR ได้แก่ พารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ คือ มุมวัน ( $B$ ) และ มุมเดคลิเนชัน ( $\delta$ ) ปรากฏผลตามตาราง 6 ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD:  $\tau_a$ ) ปรากฏผลตามตาราง 7

ตาราง 6 แสดงค่ามุมวัน( $B$ ) และ มุมเดคลิเนชัน( $\delta$ ) แบบรายวัน ของวันที่ 10 – 23 มกราคม 2547

Date	B (degree)	$\delta$ (degree)
10/1/2547	8.852	-22.148
11/1/2547	9.836	-22.013
12/1/2547	10.819	-21.871
13/1/2547	11.803	-21.722
14/1/2547	12.787	-21.567
15/1/2547	13.770	-21.406
16/1/2547	14.754	-21.239
17/1/2547	15.738	-21.065
18/1/2547	16.721	-20.885
19/1/2547	17.705	-20.699
20/1/2547	18.688	-20.507
21/1/2547	19.672	-20.308
22/1/2547	20.655	-20.104
23/1/2547	21.639	-19.894

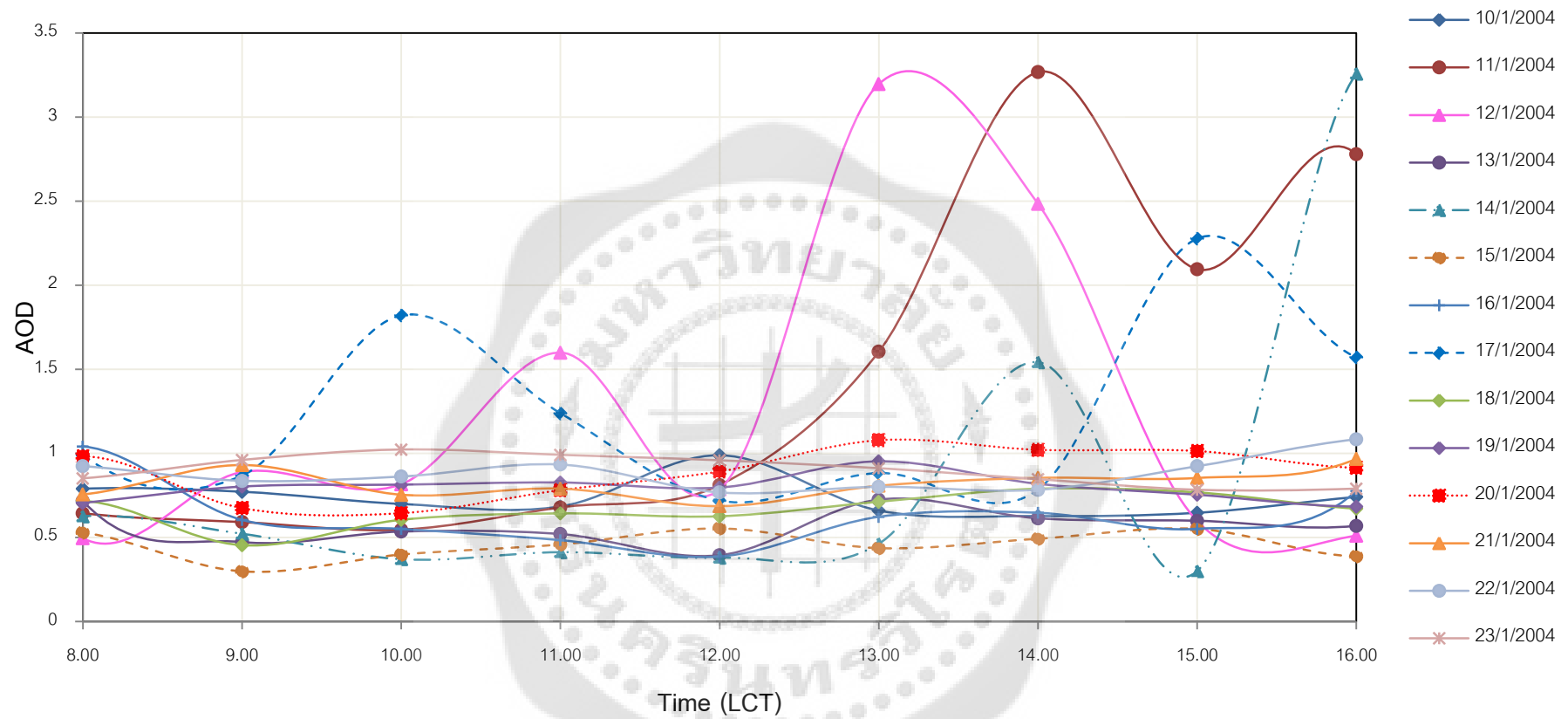
ตาราง 7 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD:  $\tau_a$ ) โดยการประมาณ  
 ค่าด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ โดยใช้แบบจำลอง วันที่ 16 มกราคม พ.ศ.2547

Bird model		CSR model	
Time	$\tau_a$	Time	$\tau_a$
00.00	0.994	00.00	0.995
01.00	1.034	01.00	1.038
02.00	1.141	02.00	1.158
03.00	1.358	03.00	1.402
04.00	1.802	04.00	1.917
05.00	2.974	05.00	3.336
06.00	1.854	06.00	1.978
07.00	4.547	07.00	5.342
08.00	2.322	08.00	2.537
09.00	1.665	09.00	1.757
10.00	1.381	10.00	1.429
11.00	1.257	11.00	1.288
12.00	1.231	12.00	1.259
13.00	1.293	13.00	1.329
14.00	1.470	14.00	1.531
15.00	1.861	15.00	1.986
16.00	2.852	16.00	3.185
17.00	8.008	17.00	10.026
18.00	5.667	18.00	6.823
19.00	2.332	19.00	2.549
20.00	1.580	20.00	1.658
21.00	1.252	21.00	1.283
22.00	1.088	22.00	1.098
23.00	1.010	23.00	1.013

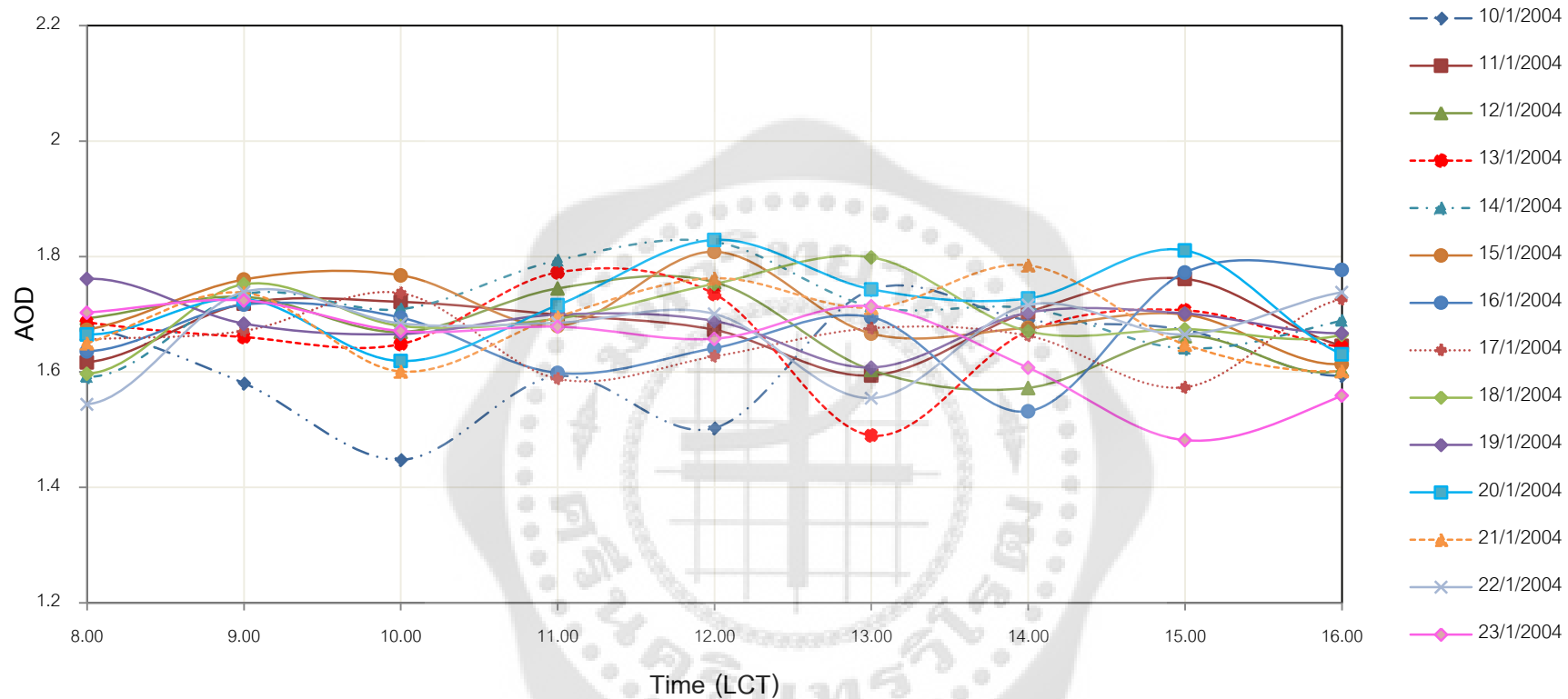
จากตาราง 6 ค่ามุมวันค่ามุมวัน (B) คำนวณจากสมการ (24) และ มุมเดคลิเนชัน ( $\delta$ ) คำนวณจากสมการ (20) เป็นค่าที่คำนวณได้เป็นรายวัน ซึ่งแสดงค่า 14 วันต่อเนื่องที่การศึกษา ค่ามุมวัน (B) มีค่าในช่วงระหว่าง 8.852-21.639 องศา และมุมเดคลิเนชัน ( $\delta$ ) ค่าในช่วงระหว่าง -19.894-22.148 องศา ตาราง 7 แสดงผลการคำนวณค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ตลอดทั้งวัน 24 ชั่วโมงจากแบบจำลอง Bird ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยมีค่าในช่วงระหว่าง 0.994-8.008 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.166 และจากแบบจำลอง CSR ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยมีค่าในช่วงระหว่าง 0.995 ถึง 10.026 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.143

ผลการแสดงค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ที่ได้จากการคำนวณจากการใช้ข้อมูลไวดาร์ที่ทำการศึกษา 14 วันต่อเนื่องเป็นข้อมูลวันที่ 10 -23 มกราคม 2547 ดังปรากฏผลตามภาพประกอบ 20 และ 21 ในช่วงเวลา 8.00-16.00 น. ของชั้นโทรโพสเฟียร์ส่วนล่าง (Lower troposphere: LT) ที่ระดับความสูง 0.5-4 กิโลเมตร และชั้นสตราโตสเฟียร์ส่วนล่าง (Lower stratosphere: LS) ที่ระดับความสูง 11-15 กิโลเมตร และค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองตลอด 24 ชั่วโมงปรากฏผลตามภาพประกอบ 22 และ 23

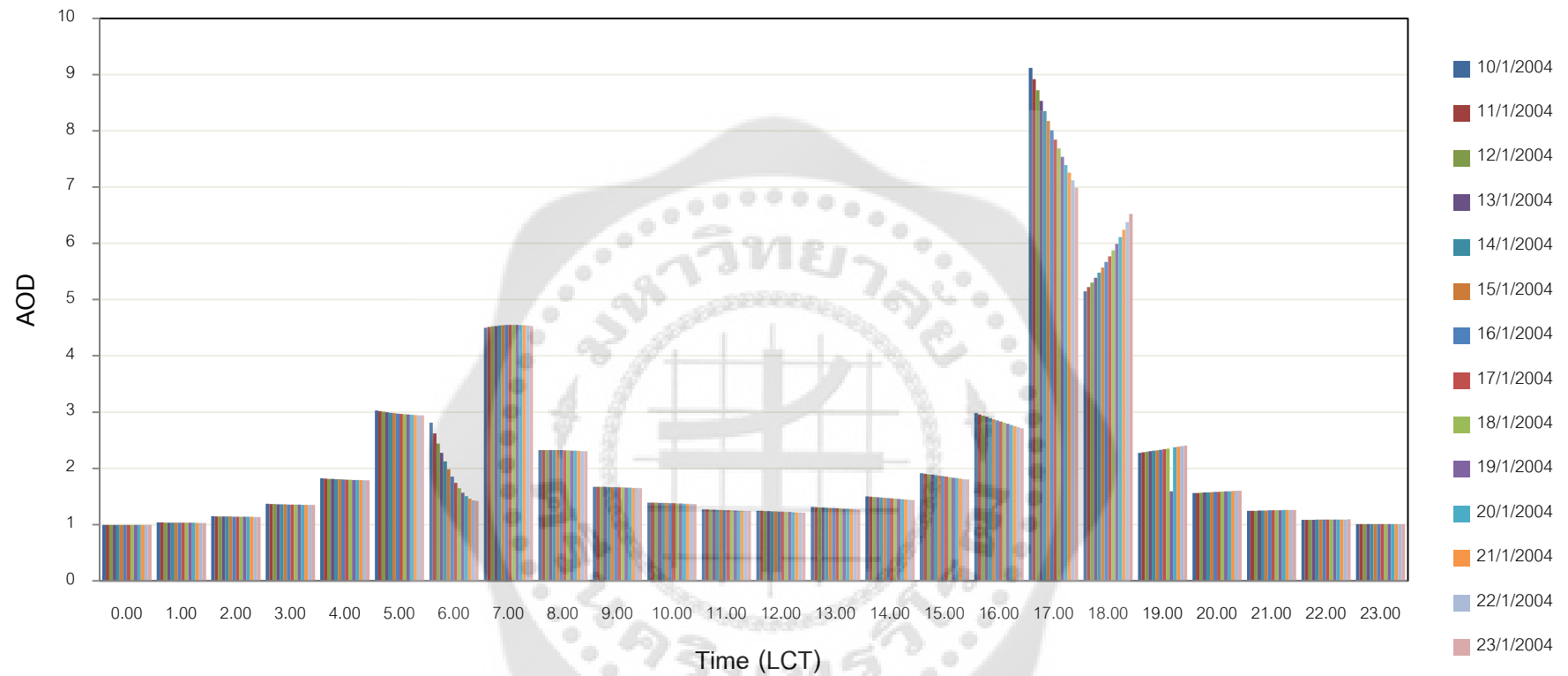
จากภาพประกอบ 20 ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ส่วนใหญ่เกาะกลุ่มอยู่ในช่วง 0.529-0.959 มีอยู่บางช่วงเวลาของบางวันที่ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) มีค่าสูงถึง 3.268 และภาพประกอบ 21 ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ส่วนใหญ่เกาะกลุ่มอยู่ในช่วง 1.588-1.830 ภาพประกอบ 22 ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ที่ได้จากแบบจำลอง Bird ภาพประกอบ 23 ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ที่ได้จากแบบจำลอง CSR ซึ่งค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ที่ได้ตลอด 24 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ของชั้นโทรโพสเฟียร์ส่วนล่าง (Lower troposphere) ที่ได้จากการคำนวณจากการใช้ข้อมูลไลดาร์ที่กับเวลา (LCT) วันที่ 10-23 มกราคม 2547 ช่วงเวลา 8.00-16.00 น.

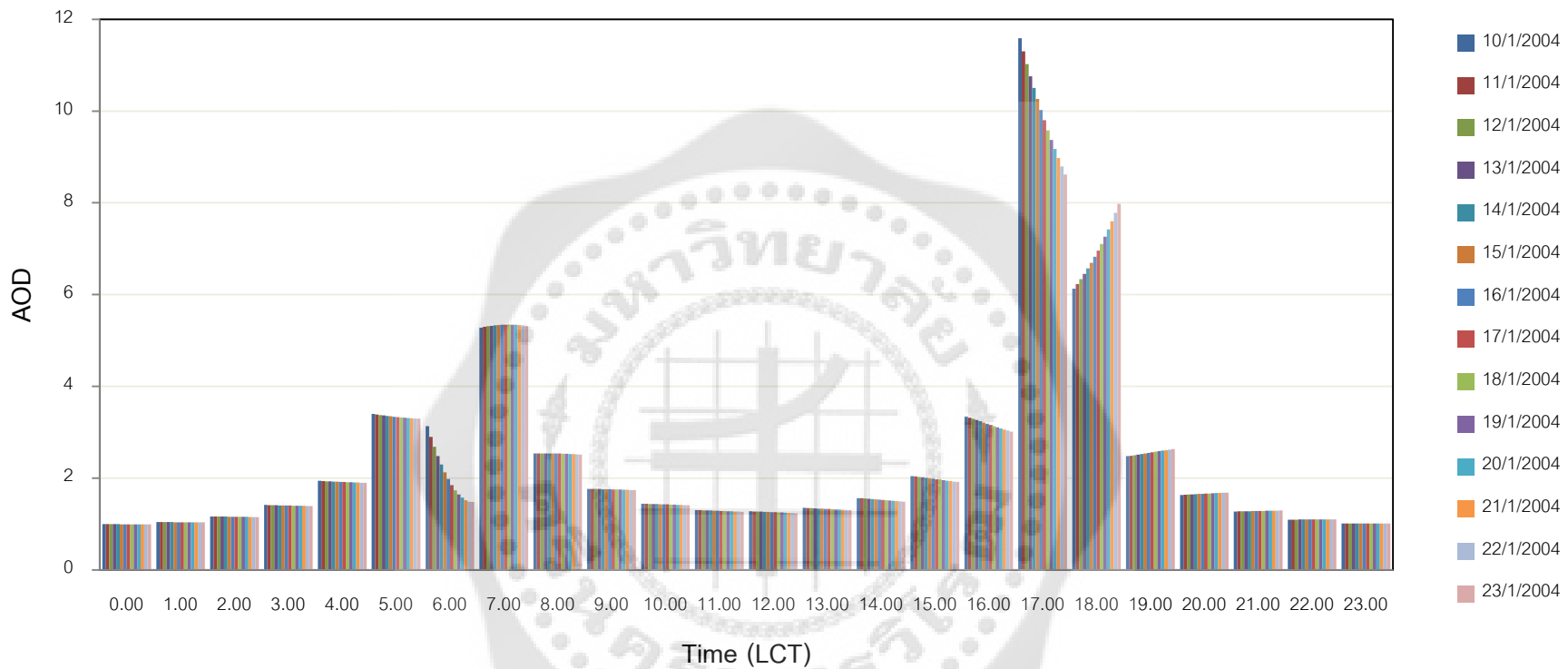


ภาพประกอบ 21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ของชั้นสตราโตสเฟียร์ส่วนล่าง (Lower stratosphere) ที่ได้จากการคำนวณจากการใช้ข้อมูลไลดาร์ที่กับเวลา (LCT) วันที่ 10-23 มกราคม 2547 ช่วงเวลา 8.00-16.00 น.



ภาพประกอบ 22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่เชิงแสงของละอองลอย (AOD) ที่ได้จากการคำนวณจาก แบบจำลอง Bird กับเวลา (LCT)

วันที่ 10-23 มกราคม 2547 ตลอด 24 ชั่วโมง

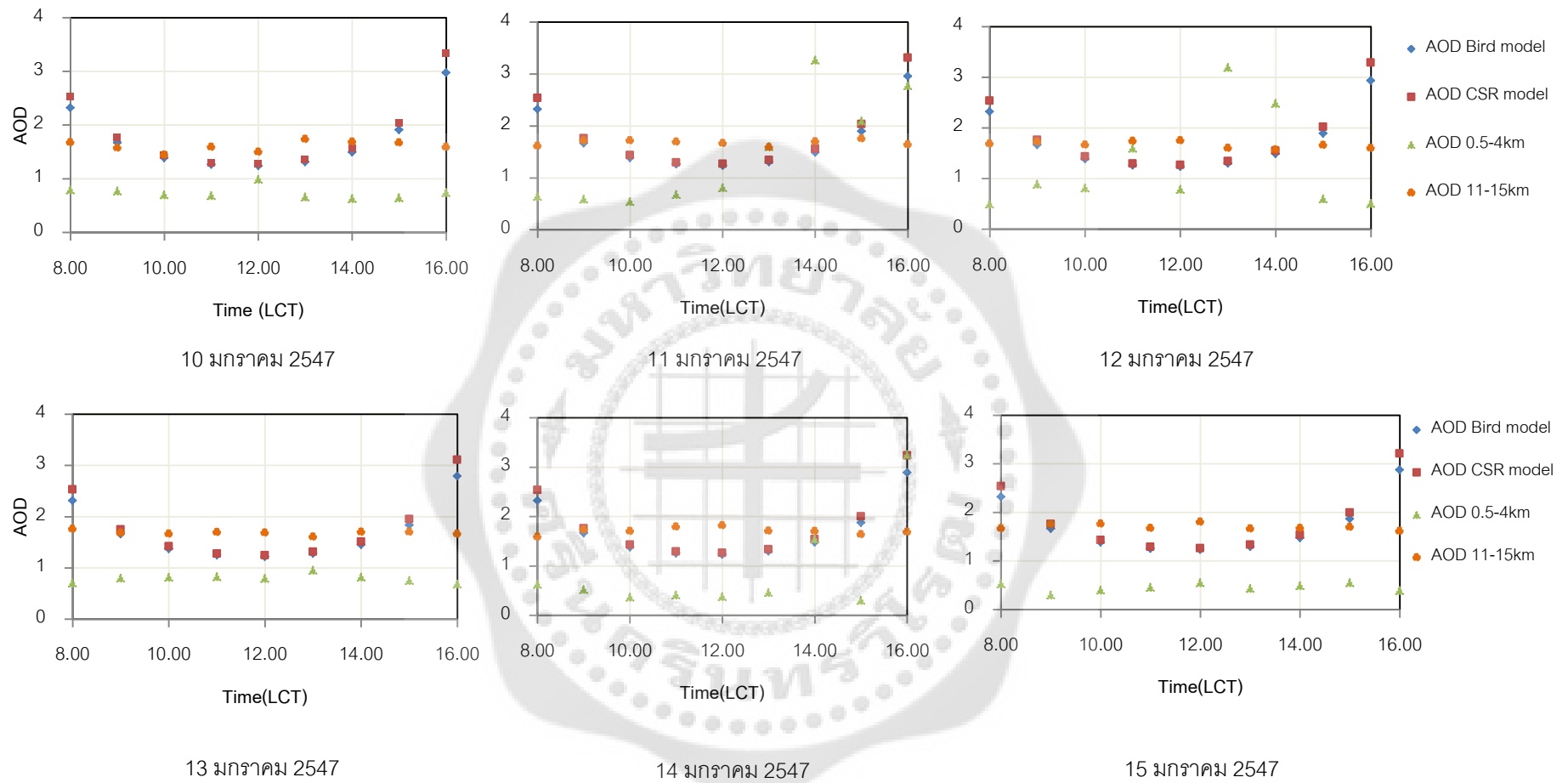


ภาพประกอบ 23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ที่ได้จากการคำนวณจาก แบบจำลอง CSR กับเวลา (LCT)

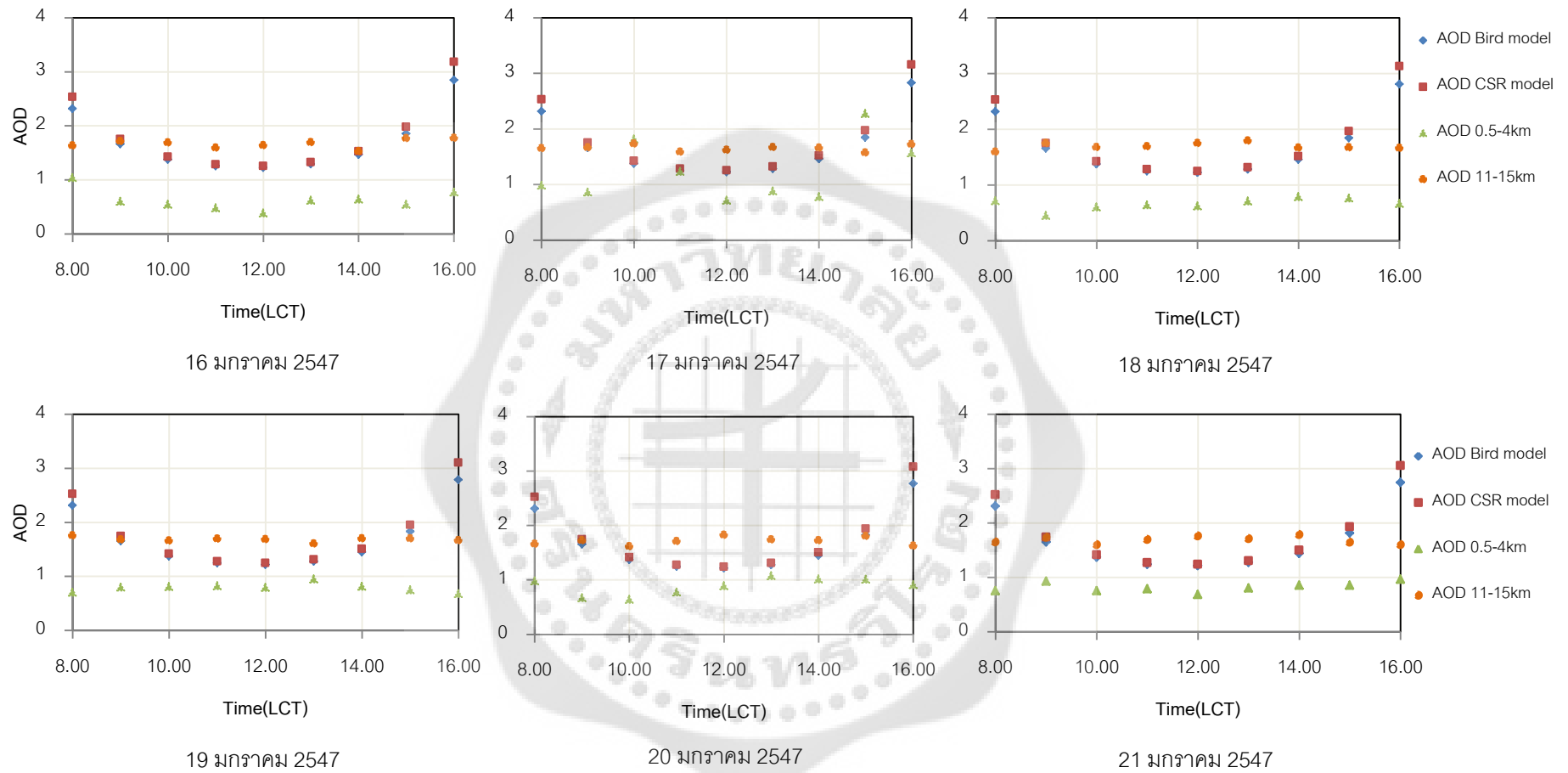
วันที่ 10-23 มกราคม 2547 ตลอด 24 ชั่วโมง

ผลการเปรียบเทียบค่าของความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ที่คำนวณจากข้อมูลไลดาร์ และจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ แบบจำลอง Bird และ แบบจำลอง CSR กับช่วงเวลา (LCT) 8.00 ถึง 16.00 น. ที่สัมพันธ์สอดคล้องกัน ปรากฏผลตามภาพประกอบ 24-26 ของวันที่ทำการศึกษานี้ 14 วันต่อเนื่อง วันที่ 10-23 มกราคม 2547 โดยค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยที่ระดับความสูง 0.5-4 กิโลเมตรเป็นของชั้นโทรโพสเฟียร์ส่วนล่าง (Lower troposphere) และที่ระดับความสูง 11-15 กิโลเมตรเป็นของชั้นสตราโตสเฟียร์ส่วนล่าง (Lower stratosphere) ตาราง 8 และ 9 แสดงค่าของความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) จากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลไลดาร์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แบบจำลอง Bird และ แบบจำลอง CSR ใช้วิธีการทดสอบทางสถิติ คือ RMSE และ MBD เพื่อแสดงความน่าเชื่อถือของผลที่คำนวณได้ โดยเลือกค่าของความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ในช่วงเวลา (LCT) 8.00-16.00 น. ที่สัมพันธ์กัน และแสดงผลเป็นค่าเฉลี่ยรายวันของค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD)

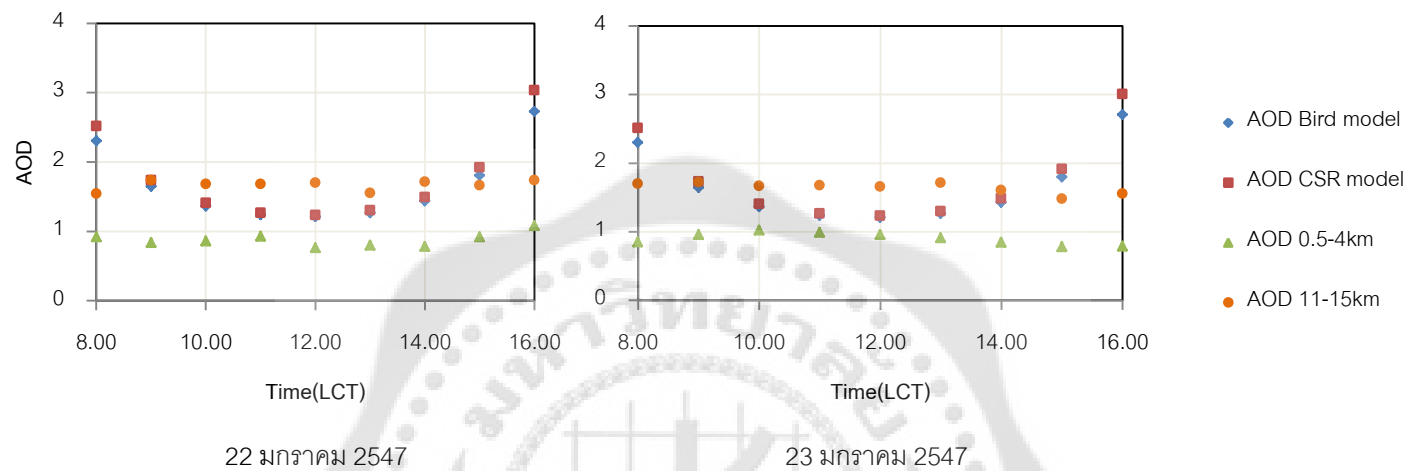




ภาพประกอบ 24 กราฟเปรียบเทียบค่าของความถี่เชิงแสงของละอองลอย (AOD) ที่คำนวณจากข้อมูลไลดาร์ และจากแบบจำลอง Bird และ แบบจำลอง CSR กับช่วงเวลา(LCT) 8.00-16.00 น. วันที่ 10-15 มกราคม 2547



ภาพประกอบ 25 กราฟเปรียบเทียบค่าของความถี่เชิงแสงของละอองลอย (AOD) ที่คำนวณจากข้อมูลไลดาร์ และจากแบบจำลอง Bird และ แบบจำลอง CSR กับช่วงเวลา(LCT) 8.00-16.00 น. วันที่ 16-21 มกราคม 2547



ภาพประกอบ 26 กราฟเปรียบเทียบค่าของความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ที่คำนวณจากข้อมูลไลดาร์ และจากแบบจำลอง Bird และแบบจำลอง CSR กับช่วงเวลา(LCT) 8.00-16.00 น. วันที่ 22-23 มกราคม 2547

ตาราง 8 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายวันของความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ในชั้น

บรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยการทดสอบทางสถิติ RMSE และ MBD

Date	Daily Average AOD		Statistical test		Daily Average AOD	Statistical test	
	lidar	Bird model	RMSE	MBD	CSR model	RMSE	MBD
10/1/2547	0.735	1.734	1.147	1.360	1.848	1.296	1.514
11/1/2547	1.447	1.729	0.974	0.195	1.842	1.035	0.273
12/1/2547	1.264	1.724	1.363	0.364	1.836	1.479	0.452
13/1/2547	0.572	1.719	1.258	2.004	1.829	1.401	2.197
14/1/2547	0.875	1.714	1.054	0.958	1.824	1.133	1.083
15/1/2547	0.457	1.709	1.365	2.743	1.817	1.505	2.981
16/1/2547	0.630	1.704	1.150	1.705	1.811	1.286	1.876
17/1/2547	1.240	1.698	0.764	0.370	1.805	0.880	0.456
18/1/2547	0.666	1.693	1.147	1.543	1.798	1.284	1.701
19/1/2547	0.795	1.687	1.059	1.121	1.791	1.198	1.252
20/1/2547	0.889	1.681	0.937	0.889	1.784	1.072	1.006
21/1/2547	0.822	1.675	0.970	1.037	1.777	1.104	1.161
22/1/2547	0.880	1.669	0.898	0.897	1.771	1.030	1.012
23/1/2547	0.903	1.663	0.943	0.843	1.764	1.076	0.954

ตาราง 9 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายวันของความถี่เชิงแสงของละอองลอย (AOD) ในชั้น

บรรยากาศสตราโตสเฟียร์ โดยการทดสอบทางสถิติ RMSE และ MBD

Date	Daily Average AOD		Statistical test		Daily Average AOD	Statistical test	
	lidar	Bird model	RMSE	MBD	CSR model	RMSE	MBD
10/1/2547	1.611	1.734	0.557	0.076	1.848	0.689	0.147
11/1/2547	1.682	1.729	0.563	0.028	1.842	0.683	0.095
12/1/2547	1.670	1.724	0.568	0.032	1.836	0.687	0.099
13/1/2547	1.668	1.719	0.548	0.031	1.829	0.666	0.097
14/1/2547	1.712	1.714	0.578	0.001	1.824	0.686	0.065
15/1/2547	1.705	1.709	0.566	0.002	1.817	0.673	0.066
16/1/2547	1.674	1.704	0.493	0.018	1.811	0.604	0.082
17/1/2547	1.657	1.698	0.509	0.025	1.805	0.620	0.088
18/1/2547	1.698	1.693	0.522	-0.003	1.798	0.654	0.059
19/1/2547	1.686	1.687	0.501	0.0004	1.791	0.604	0.062
20/1/2547	1.719	1.681	0.545	-0.022	1.784	0.639	0.038
21/1/2547	1.688	1.675	0.543	-0.007	1.777	0.641	0.053
22/1/2547	1.670	1.669	0.504	0.000	1.771	0.603	0.061
23/1/2547	1.644	1.663	0.528	0.012	1.764	0.629	0.073

## 2. ผลการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือโดยการทดสอบทางสถิติ

จากตาราง 8 ค่าเฉลี่ยรายวันของความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ในชั้นโทรโพสเฟียร์ส่วนล่าง (Lower troposphere) จากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลจากไลดาร์มีค่าอยู่ในช่วง 0.630-1.447 ซึ่งจากการทดสอบทางสถิติ RMSE อยู่ในช่วง 0.764-1.365 และ MBD อยู่ในช่วง 0.370-2.743 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยรายวันของความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ของแบบจำลอง Bird และจากการทดสอบทางสถิติ RMSE อยู่ในช่วง 0.880-1.505 และ MBD อยู่ในช่วง 0.273-2.981 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยรายวันของความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ของแบบจำลอง CSR

จากตาราง 9 ค่าเฉลี่ยรายวันของความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ในชั้นสตราโตสเฟียร์ส่วนล่าง (Lower stratosphere) จากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลจากไลดาร์มีค่าอยู่ในช่วง 1.644-1.719 ซึ่งจากการทดสอบทางสถิติ RMSE อยู่ในช่วง 0.493-0.578 และ MBD อยู่ในช่วง -0.022-0.076 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยรายวันของความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ของแบบจำลอง Bird และจากการทดสอบทางสถิติ RMSE อยู่ในช่วง 0.603-0.689 และ MBD อยู่ในช่วง 0.038-0.147 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยรายวันของความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ของแบบจำลอง CSR

## บทที่ 5

### สรุป อภิปรายและข้อเสนอแนะ

#### 1. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาและวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความลึกเชิงแสงของละอองลอยของโทรโพสเฟียร์ และชั้นสตราโตสเฟียร์จากการใช้ข้อมูลไลดาร์ และจากแบบจำลอง Bird และแบบจำลอง CSR ที่ได้ทำการศึกษาต่อเนื่อง 14 วัน คือวันที่ 10-23 มกราคม 2547 ได้ผลปรากฏดังนี้

1. ผลการคำนวณความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ของชั้นโทรโพสเฟียร์ และชั้นสตราโตสเฟียร์ด้วยการใช้ข้อมูลจากไลดาร์มาทำการศึกษาค่าเฉลี่ยรายวันของค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ของชั้นโทรโพสเฟียร์ที่พิจารณาในช่วงความสูง 0.5-4 กิโลเมตร ได้ค่าอยู่ในช่วง 0.457-1.240 และค่าเฉลี่ยรายวันของค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ของชั้นสตราโตสเฟียร์ที่ช่วงความสูง 11-15 กิโลเมตรจากพื้นดิน ได้ค่าอยู่ในช่วง 1.644-1.719

2. ผลการคำนวณค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) โดยการประมาณค่าด้วยสมการแบบจำลอง Bird ได้ค่าเฉลี่ยรายวันของค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ในช่วง 1.663-1.734 และจากแบบจำลอง CSR ได้ค่าเฉลี่ยรายวันของค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ในช่วง 1.764-1.848

3. เมื่อนำค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ที่ได้จากการคำนวณด้วยการใช้ข้อมูลไลดาร์ของทั้งสองชั้นบรรยากาศที่ได้ศึกษามาเปรียบเทียบกับแบบจำลอง Bird และแบบจำลอง CSR เพื่อดูผลที่ได้ในช่วงเวลาที่สอดคล้องสัมพันธ์กันมีแนวโน้มไปในแนวทางเดียวกัน คือช่วงเวลา 8.00-16.00 น.

4. จากการทดสอบทางสถิติด้วย RMSE และ MBD แสดงถึงแนวโน้มที่สัมพันธ์กันของค่าเฉลี่ยรายวันของความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) แบบจำลอง Bird และแบบจำลอง CSR มีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยรายวันของความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ในชั้นสตราโตสเฟียร์มากกว่าในชั้นโทรโพสเฟียร์

5. แบบจำลองทั้งสองแบบสามารถคำนวณค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) บริเวณหรือสถานที่อื่นที่สนใจได้ แต่ไม่สามารถแสดงผลความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD)

ตามความสูงได้ ส่วนค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยข้อมูลไลดาร์สามารถแสดงผลความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ตามความสูงได้ และมีการเก็บข้อมูลตลอด 24 ชั่วโมงโดยไม่ต้องอาศัยการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ แต่เนื่องด้วยไลดาร์เป็นเครื่องมือที่ต้องติดตั้ง ณ บริเวณภาคพื้นดิน ทำให้การเก็บข้อมูลจำกัดอยู่ ณ ตำแหน่งที่ตั้งของเครื่องมือเท่านั้น ทำให้การเก็บข้อมูลไม่ครอบคลุมบริเวณพื้นที่ในวงกว้าง

## 2. อภิปรายผลการทดลอง

จากผลการเปรียบเทียบค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยในแต่ละวันตลอด 24 ชั่วโมงที่ได้จากการคำนวณด้วยข้อมูลจากไลดาร์และจากแบบจำลองทั้งสองแบบ พบว่าช่วงเวลาที่สัมพันธ์ต่อเนื่องกันและมีแนวโน้มไปในแนวเดียวกันไม่สามารถพิจารณาได้ตลอดทั้ง 24 ชั่วโมง จึงได้เลือกช่วงเวลาที่สอดคล้องสัมพันธ์กัน 8 ชั่วโมงติดต่อกัน คือที่เวลา 8.00-16.00 น. เนื่องด้วยที่ช่วงเวลาอื่นของแบบจำลองจะได้ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) มีค่าแตกต่างมากจากค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยข้อมูลไลดาร์

ค่าเฉลี่ยความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ที่คำนวณด้วยการใช้ข้อมูลไลดาร์ของวันที่ทำการศึกษาทั้ง 14 วันในชั้นโทรโพสเฟียร์มีค่าเท่ากับ 0.870 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงและสอดคล้องกับค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยของ Gerasopoulos และคณะ (E. Gerasopoulos; et al. 2003: 2025-2029 ) ได้ศึกษาข้อมูลทางตอนเหนือของประเทศกรีซ พบว่าค่าเฉลี่ยของความลึกเชิงแสงของละอองลอยมีค่าเท่ากับ 0.23 ซึ่งจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นในช่วงฤดูร้อนซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 0.5 และมากขึ้น 0.7 ถึง 0.8 ในช่วงบางเวลา และจากการศึกษาของ Kulkarni และคณะ (K. Kulkarni; et al. 2008: 1-11 ) ได้ทำการศึกษาที่เมืองGadanki ประเทศอินเดีย ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD)มีค่าประมาณ 0.6 จากผลการศึกษาค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ของแต่ละสถานที่ที่มีลักษณะภูมิศาสตร์แตกต่างกันจะให้ค่าที่แตกต่างกันด้วย

จากผลการทดลองค่าเฉลี่ยรายวันของค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ของชั้นสตราโตสเฟียร์ อยู่ในช่วง1.644-1.719 มีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยรายวันของค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ที่ได้จากแบบจำลอง Bird ซึ่งอยู่ในช่วง1.663-1.734 มากกว่าแบบจำลอง CSR เมื่อพิจารณาจากการทดสอบทางสถิติโดย RMSE และ MBD และจากแบบจำลองทั้งสองแบบให้ค่าที่

สอดคล้องกับค่าเฉลี่ยรายวันของค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ในชั้นสตราโตสเฟียร์มากกว่าในชั้นโทรโพสเฟียร์ เมื่อพิจารณาจากการทดสอบทางสถิติโดย RMSE และ MBD

### 3. ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษาความลึกเชิงแสงของละอองลอยควรเปลี่ยนระดับความสูงของชั้นบรรยากาศที่ศึกษาให้มีความสูงมากขึ้น และศึกษาค่าความสูงวิกฤต (Critical height) ที่ความสูงอื่น

2. ควรมีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่นๆ เช่น แบบจำลอง Modified iqbal แบบจำลอง Atwater and ball เป็นต้น มาใช้ในการหาค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) เพื่อข้อมูลที่หลากหลายมากขึ้น หรือเปลี่ยนสถานที่ที่ใช้ในการศึกษาโดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากลักษณะภูมิประเทศที่แตกต่างกันก็จะมีผลต่อลักษณะองค์ประกอบของละอองลอยที่แตกต่างกัน ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยในแต่ละสถานที่จึงมีความแตกต่างกัน



## บรรณานุกรม

- นิพนธ์ ตั้งคณานุกรักษ์; และ คณิตา ตั้งคณานุกรักษ์. (2552). *เคมีบรรยากาศ*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ภูวกฤต ใจหอม. (2551). *ความลึกเชิงแสงของละอองลอยที่ขึ้นกับความยาวคลื่นในปี 2546 ณ อำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย*. ปรินฏยานิพนธ์ กศ.ม.(ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- รังสรรค์ อากาศัพพะกุล. (2551). *อุตุนิมิตวิทยาเบื้องต้น*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วนิดา จันาศาสตร์. (2551). *มลพิษอากาศและการจัดการคุณภาพอากาศ*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วินัส ต่วนเครือ; และ นิพนธ์ ตั้งธรรม. (2558). ผลกระทบของละอองลอยในบรรยากาศที่เกิดจากไฟป่าและการเผาชีวมวลต่อลักษณะของฝนบริเวณภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย. *วารสารวนศาสตร์*. 34(1): 1-15.
- ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์; และ อรุณีย์ อินทรสร. (2553). *การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนไคดาร์ตต่อสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับของละอองลอยและเมฆในประเทศไทย ด้วยเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี*. รายงานวิจัย. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- สุชาติ สุภาพ. (2557). *ฟิสิกส์ 2 สำหรับวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม*. กรุงเทพฯ: สานบัณฑิต.
- สุทธิพันธุ์ จันทาศรี. (2553). *การสร้างโมเดลชั้นต่อนิวเคลาะห์และแสดงผลพารามิเตอร์ของละอองลอยจากข้อมูลเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี*. ปรินฏยานิพนธ์ กศ.ม.(ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- สุรศักดิ์ เชียงกา. (2557). *ทัศนศาสตร์เบื้องต้น*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เสริม จันท์ฉาย. (2548). *คู่มือมาตรฐานด้านภูมิอากาศและแสงอาทิตย์สำหรับใช้งานด้านพลังงานทดแทน*. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.

- อัมพร รุ่งแจ้ง. (2552). *ความน่าเชื่อถือของการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเชิงปริมาตรของละอองลอยในบรรยากาศโทรโพสเฟียร์โดยเครื่องมือไลดาร์การกระเจิงแบบมี*. ปริญญาานิพนธ์ กศ.ม.(ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- A. Ghatak. (2005). *Optic*. Singapore: Tata McGraw-Hill.
- A.R. Biral. (2003). *Analysis of the 2002 malargue LIDAR data through Fernald's method*. Research report. UNICAMP. Brazil.
- C.A. Bennet. (2008). *Principles of physical optics*. United stages of American: Wiley.
- D. Meschede. (1999). *Optics, light and laser*. Germany: Tebner.
- D.N. Sathyanarayana. (2007). *Vibrational spectroscopy: theory and application*. New Delhi: New Age International.
- D.S. Balis; et al. (2003). Raman lidar and sunphotometric measurement of aerosol optical properties over Thessaloniki, Greece during a biomass burning episode. *Atmospheric Environment*. 37: 4560-4538.
- E. Gerasopoulos; et al. (2003). Climatological aspects of aerosol optical properties in northern Greece. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 3: 2025-2041.
- H. David; et al. (2006). Approaches to modeling potato leaf appearance rate. *American Society of Agronomy*. 98: 522-528.
- J.P. Peixoto; & A.H. Oert. (1992). *Physics of climate*. New York: American Institute of physics.
- L. Bitar; et al. (2010). Lidar observation of Kasatochi volcano aerosols in troposphere and stratosphere. *Journal of Geophysical Research*. 115: D00L13.
- M.Z. Jacobson. (1999). *Fundamentals of atmospheric modeling*. New York: Cambridge University.
- O. Behar; A. Khellaf; & K. Mohammedi. (2015). Comparison of solar radiation models and their validation under Algerian climate- the case of direct irradiance. *Energy Conversion and Management*. 98: 236-251.

- O. Boucher. (2015). *Atmospheric aerosols: properties and climate impacts*. New York: Springer.
- P. Kulkarni; P.A. Baron; & K. Willeke. (2011). *Aerosol measurement: principles, techniques and applications*. Hoboken: Wiley.
- P. Kulkarni; et al. (2008). Features of upper troposphere and lower stratosphere aerosols observed by lidar over Gadanki a tropical Indian station. *Journal of Geophysical Research*. 113: D17207.
- P. Sawanmura; et al. (2012). Stratospheric AOD after the 2011 eruption of Nabro volcano measured by lidars over the northern hemisphere. *Environmental Research*. 7: 034013.
- R.J.D. Tilley. (2011). *Colour and the optical properties of materials*. Singapore: Markono Print Media.
- S. Ruangrungle. (2012). *The feasibility study of retrieval algorithm of tropospheric continental aerosol investigation in Thailand*. Dissertation, Ph.D.(Physics). Graduate School, King Mongkut's University of Technology Thonburi. Photocopied.
- N. Sugimoto; et al. (2001). *NIES compact mie scattering lidar (532 nm, dual polarization) User Manual*. National Institute of Environmental Studies of Japan. Japan: pp. 1-12.
- T. Chai; and R.R. Draxler. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean (absolute error (MEA)?-arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*. 7: 1247-1250.
- T. Zielinski; et al. (2014). *Insight on environmental change: where the world is heading*. New York: Spring Science & Business Media.



ประวัติย่อผู้วิจัย

## ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวปราณี พรหมบุตร
วันเดือนปีเกิด	7 กรกฎาคม 2531
สถานที่เกิด	อำเภอปลายพระยา จังหวัดกระบี่
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	วีจ แมนชั่น 1/1 ซอยลาดพร้าว 69 ถนนลาดพร้าว แขวงสะพานสอง เขตวังทองหลาง กรุงเทพมหานคร 10310
ตำแหน่งหน้าที่การงานในปัจจุบัน	ครู คศ.1 กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ บดินทรเดชา แขวงสะพานสอง เขตวังทองหลาง กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2549	มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนปลายพระยาวิทยาคม จังหวัดกระบี่
พ.ศ. 2554	กศ.บ. วิทยาศาสตร์-ฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยทักษิณ จังหวัดสงขลา
พ.ศ. 2560	กศ.ม. ฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ