

การสร้างโมเดลขั้นตอนวิธีวิเคราะห์และแสดงผลพารามิเตอร์ของละอองลอย
จากข้อมูลเครื่องไคตารการกระเจิงแบบมี

ปริญญานิพนธ์
ของ
สุทธิพันธุ์ จันทราศรี

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ตุลาคม 2553

การสร้างโมเดลขั้นตอนวิธีวิเคราะห์และแสดงผลพารามิเตอร์ของละอองลอย
จากข้อมูลเครื่องไต่ดาวการกระเจิงแบบมี

ปริญญานิพนธ์
ของ
สุทธิพันธุ์ จันทราศรี

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ตุลาคม 2553
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การสร้างโมเดลขั้นตอนวิธีวิเคราะห์และแสดงผลพารามิเตอร์ของละอองลอย
จากข้อมูลเครื่องไต่ดาวการกระเจิงแบบมี

บทคัดย่อ
ของ
สุทธิพันธุ์ จันทราศรี

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ตุลาคม 2553

สุทธิพันธุ์ จันทราศรี. (2553). การสร้างโมเดลขั้นตอนวิธีวิเคราะห์และแสดงผลพารามิเตอร์ของ
ละอองลอยจากข้อมูลเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี. ปริญญาโท กศ.ม. (ฟิสิกส์).
กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม:
รองศาสตราจารย์อรุณีย์ อินทสร, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์.

ซอฟต์แวร์ APRA (Aerosol Parameters Retrieval Algorithm) ถูกเขียนขึ้นโดยโปรแกรม
MATLAB R2008a โดยที่ APRA มีความเป็นไปได้ในการค้นหาไฟล์แนวดิ่งของชั้นบรรยากาศโทร
โพสเฟียร์ ได้แก่ ค่าสัญญาณการแก้ไขพิสัย (range corrected signals) ค่าอัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน
(depolarization ratios) ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย (aerosol volume
backscattering coefficients) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากละอองลอย (aerosol volume
extinction coefficients) ได้จากการคำนวณชุดข้อมูลของเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี ซึ่งได้ทำการ
ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของซอฟต์แวร์จากการทดลองกับชุดข้อมูลเทียม และชุดข้อมูลจริงที่
เก็บโดยเครื่องมือไลดาร์จากสถานีวิจัยชั้นบรรยากาศ อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา พบว่าผลการ
วิเคราะห์ที่ได้จากซอฟต์แวร์มีความละเอียดสอดคล้องกับผลได้จากการคำนวณด้วยมือโดยใช้โปรแกรม
excel เมื่อใช้ข้อมูลชุดเดียวกัน โดยที่ APRA ใช้เวลาในการประมวลผล น้อยเพียง 3 นาที ต่อ 1 ไฟล์

MODELING OF AEROSOL PARAMETER RETRIEVAL ALGORITHM BASED
ON MIE SCATTERING LIDAR DATA: (APRA)

AN ABSTRACT
BY
SUTHIPAN CHANTHRASRE

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Educational Degree in Physics
at Srinakharinwirot University
October 2010

Suthipan Chanthrasre. (2010). *Modelling of Aerosol Parameter Retrieval Algorithm based on Mie Scattering Lidar Data : (APRA)*. Master thesis, M.Ed. (Physics). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Assoc.Prof. Arunee Intasorn, Assitant.Prof. Siriluk Ruangrungrrote.

The software package of APRA (Aerosol Parameters Retrieval Algorithm) was written in MATLAB R2008a. It allows the possibilities to determine the vertical profiles of tropospheric range corrected signals, depolarization ratios, aerosol volume backscattering coefficients and aerosol volume extinction coefficients from the measured dataset of Mie Scattering Lidar. In order to monitor the program efficiency, both pseudo and real data were used for the program demonstration, and finally the retrieved results from raw data of Mie Scattering Lidar measurement in Phimai district, Nakhon Ratchasima province of Thailand were performed and subsequently compared to the previous results retrieved manually from the same data. Finally, both results show good agreement for APRA reliability with a running time less than 3 min/file.

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยดีด้วยเพราะผู้วิจัยได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจากผู้ให้การสนับสนุนทั้งสองฝ่ายได้แก่ รองศาสตราจารย์ อรุณีย์ อินทศร ประธานกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์ กรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ อาจารย์ประจำคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ท่านทั้งสองได้มอบทั้งคำปรึกษาและคำแนะนำในการดำเนินการทำงานวิจัยทุกขั้นตอน ทำให้ผู้วิจัยได้รับประสบการณ์ในการทำงานวิจัยทั้งการวางแผนการทำงาน และการคิดวิเคราะห์ นอกจากนี้ยังให้คำแนะนำแนวทางในการทำงานเพื่อเป็นครูที่ดีโดยที่ท่านทั้งสองได้เป็นแบบอย่างของอาจารย์ที่ทุ่มเทให้กับศิษย์และงานด้านวิชาการอย่างที่สุด และขอขอบคุณภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้คำแนะนำในการเขียนโปรแกรม และให้ความสนับสนุนด้านข้อมูลที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณบริษัท Techsource ด้วย ที่ให้ความอนุเคราะห์โปรแกรม MATLAB เวอร์ชันสำหรับสถาบันการศึกษา

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ ให้ความช่วยเหลือต่างๆ และให้คำแนะนำกับผู้วิจัยในการศึกษาตามหลักสูตรการศึกษามหาบัณฑิต ซึ่งทำให้ผู้วิจัยรู้ว่าการศึกษานั้นจะเกิดผลดี และมีประสิทธิภาพสูงสุดนั้นต้องมีการค้นคว้าหาความรู้อยู่เสมอ มีความกล้าคิด และทดลองทำอย่างไม่สิ้นสุดแล้วความรู้นั้นจะเจริญออกมาตามปรัชญาของมหาวิทยาลัย เมื่อมีความรู้ก็ต้องรู้จักนำความรู้นั้นไปสร้างประโยชน์ให้กับคนในสังคมต่อไปจึงจะสมตามเจตนารมณ์ของหลักสูตรและมหาวิทยาลัยอย่างแท้จริง

ท้ายสุดผู้วิจัยขอขอบพระคุณ พ่อ แม่ พี่ น้อง และเพื่อน ๆ ทุกคนที่เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือ และคอยสร้างกำลังใจให้กำลังใจอย่างที่สุดอยู่ตลอดระยะเวลาที่ศึกษาและทำงานวิจัย

สุทธิพันธุ์ จันทราศรี

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย	3
ขอบเขตของการวิจัย	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย	4
นิยามศัพท์เฉพาะ	4
2 ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง	5
บรรยากาศของโลก (atmosphere)	5
ละอองลอย (aerosol)	8
คุณสมบัติเชิงแสง (optical properties)	9
โพลาไรเซชันของแสง (polarization of light)	16
การกระเจิงของแสง (scattering of light)	22
เลเซอร์ (laser)	25
ไลดาร์: เครื่องมือ ทฤษฎี และการประยุกต์ (lidar : instrumatation, theory and applications)	31
ความรู้พื้นฐานโปรแกรม MATLAB	41
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	52
3 วัสดุอุปกรณ์ และวิธีดำเนินงานวิจัย	55
วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	55
สถานที่ดำเนินงานวิจัย	56
ศึกษาข้อมูลและการคำนวณพื้นฐานเกี่ยวกับการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงของ ละอองลอย	56
การสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์	57
การทดสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์	62
การดำเนินการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล	63

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 (ต่อ)	
เปรียบเทียบการทำงานด้วยวิธีปกติกับวิธีที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ APRAM ...	64
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์	65
การแสดงผลโปรแกรม APRA	65
ผลการทดสอบโปรแกรม APRA ด้วยข้อมูลเทียม (pseudo data)	71
ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลของโปรแกรม APRA กับ ผลของ อัมพร รุ่งแจ้ง..	72
ผลการทดลองกับข้อมูลในปี 2007	82
5 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย	84
สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย	84
ข้อเสนอแนะ	85
บรรณานุกรม	86
ภาคผนวก	89
ภาคผนวก ก	90
ภาคผนวก ข	92
ประวัติย่อผู้วิจัย	98

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ส่วนประกอบต่าง ๆ ในบรรยากาศที่ระดับต่ำกว่า 25 กิโลเมตร	6
2 ตารางแสดงคุณสมบัติเฉพาะของไลดาร์	34
3 การแบ่งอนุภาคตามร้อยละของค่าอัตราส่วนดีโพลาริเซชัน (δ)	39
4 อักขระสำหรับกำหนดคุณลักษณะของกราฟ	46
5 การกำหนดรูปแบบการแสดงผลตัวเลข	50
6 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลละอองลอย ในวันที่ 18 มกราคม พ.ศ.2547 ณ สถานีวิจัยตรวจวัดการแผ่รังสีในชั้นบรรยากาศ อำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัยที่ คำนวณจาก APRA	70
7 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลละอองลอย ในวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2548 ณ สถานีวิจัยในชั้นบรรยากาศ อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมาที่คำนวณจาก APRA	71
8 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณจากโปรแกรม excel (ช่องสีขาบ) และ จากโปรแกรม APRA (ช่องสีเทา) ของข้อมูลละอองลอยที่วัดด้วยเครื่องไลดาร์การ กระเจิงแบบมี ในวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2547 เวลา 01.00 น. ณ สถานีวิจัย ตรวจวัดการแผ่รังสีในชั้นบรรยากาศอำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย	73
9 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณจากโปรแกรม excel (ช่องสีขาบ) และ จากโปรแกรม APRA (ช่องสีเทา) ของข้อมูลละอองลอยที่วัดด้วยเครื่องไลดาร์การ กระเจิงแบบมี ในวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2548 เวลา 06.00 น. ณ สถานีวิจัยใน ชั้นบรรยากาศ อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา	75
10 ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากโมเลกุล ($\beta_m(z)$) ของวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2547 และวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2548 ที่แสดงใน excel และแสดงใน APRA	77
11 ตารางเปรียบเทียบขั้นตอนการทำงาน และเวลาระหว่าง 2 โปรแกรม	81
12 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลละอองลอย ในวันที่ 8 มกราคม พ.ศ. 2550 เวลา 02.00น. ณ สถานีวิจัยในชั้นบรรยากาศ อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ที่ คำนวณจาก APRA	82
13 ข้อมูลจริง (*.txt) ของวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2547 เวลา 01.00 น.	91

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 โครงสร้างชั้นบรรยากาศ	8
2 ละอองในบรรยากาศ ขนาดต่างๆ และจากแหล่งที่มาและกระบวนการต่างกัน	9
3 (a) คลื่นระนาบสะท้อนบางส่วนและหักเหบางส่วนที่ขอบเขตระหว่างตัวกลาง 2 ตัว ในกรณีนี้คืออากาศกับกระจก (b) แสดงคลื่นในอากาศภายนอกและภายในแก้ว ด้วยรังสี (c) แสดงรังสีตกกระทบ รังสีสะท้อน และรังสีหักเห	12
4 การสะท้อนภายในกลับหมด (total internal reflection)	14
5 การกระจายของแสงโดยปริซึม เรียกแถบสีว่าสเปกตรัม	15
6 ภาพแทนสนามที่ $t = 0$ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระนาบรูปไซน์ซึ่งถูกโพลาไรซ์เชิงเส้น	16
7 ส่วนประกอบของ $\vec{E}$ ที่ตั้งฉากกับแกนโพลาไรซ์ถูกดูดกลืนด้วยแผ่นกรองแสงทำให้ แสงที่ผ่านไปผ่านเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น	18
8 เมื่อแสงตกกระทบบนผิวสะท้อนที่มุมโพลาไรซ์แสงสะท้อนเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น	19
9 เมื่อแสงตกกระทบที่มุมโพลาไรซ์รังสีสะท้อนและรังสีหักเหทำมุมฉาก	19
10 การหักเหสองแนวเมื่อแสงเดินทางผ่านวัสดุหักเหสองแนว	20
11 แหล่งกำเนิดแสงอยู่ภายในวัสดุหักเหสองแนวที่จุด S โดยให้น้ำคลื่นวงกลมในกรณี เป็นรังสีปกติ (o-ray) และวงรีในกรณีเป็นรังสีพิเศษ (e-ray)	21
12 น้ำคลื่นในตัวกลางหักเหสองแนว	22
13 แสดงรายละเอียดบางส่วนของกระบวนการกระเจิง แสงแดดที่ไม่โพลาไรซ์มาจาก ด้านซ้ายตามแกน x และผ่านเหนือผู้สังเกตซึ่งกำลังมองขึ้นในแนวตั้งตามแกน	22
14 อันตรกิริยาระหว่างแสงเลเซอร์ กับโมเลกุลหรืออนุภาคที่ตกกระทบ (a) แบบเรย์ลีห์ (b) แบบมี และ (c) แบบรามาน	25
15 แสดงการเปลี่ยนชั้นพลังงานของอะตอมจากสถานะกระตุ้น (E_1) ลงไปสถานะพื้น (E_0) แล้วทำให้เกิด การปล่อยแสงแบบเกิดขึ้นเอง (spontaneous emission)	27
16 แสดงกระบวนการเกิดแสงเลเซอร์ ตั้งแต่เริ่มต้นตัวกลางเลเซอร์มีอะตอมอยู่ใน สถานะพื้น พอตัวกลางเลเซอร์ได้รับพลังงานทำให้อะตอมเริ่มถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ ที่สถานะกระตุ้น จากนั้นอะตอมในสถานะกระตุ้นไม่เสถียรจึงลงมาอยู่ที่สถานะพื้น เกิดปล่อยแสงแบบเกิดขึ้นเอง แสงดังกล่าวเป็นตัวที่ทำให้อะตอมเกิดการปล่อย แสงโดยการถูกกระตุ้น เกิดขึ้นตอนจาก 2 มา 3 ขึ้นหลายครั้งจนในที่สุดก็ได้แสง เลเซอร์ออกมา	29

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
17 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดเลเซอร์ชนิด Nd:YAG Laser	30
18 โครงสร้างส่วนประกอบของ Mie scattering lidar	32
19 แสดงภาพของระบบของไลดาร์	33
20 กราฟรูปไขว้ซอยด์	44
21 กราฟรูปไขว้ซอยด์ที่มีการตกแต่งเพิ่มเติม	45
22 กราฟรูปไขว้ซอยด์เป็นจุดดาวห้าแฉกสีแดง	47
23 ตัวอย่างการกำหนดช่วงการแสดงผลของกราฟเอง	48
24 รายละเอียดแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานเพื่อเตรียมสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ..	58
25 ภาพรวมการทำงานของโปรแกรม	59
26 แสดงผังงานโปรแกรม ส่วนการรับข้อมูล	60
27 แสดงผังงานโปรแกรม ส่วนการคำนวณ	61
28 แสดงผังงานโปรแกรม ส่วนแสดงผลลัพธ์	62
29 โพรไฟล์ตามแนวตั้งของค่าสัญญาณการแกว่งพิสัย ($X(z)$) และค่าอัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน (δ) ของวันที่ 18 มกราคม พ.ศ.2547 ณ สถานีวิจัยตรวจวัดการแผ่รังสีในชั้นบรรยากาศ อำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย ที่ได้จากโปรแกรม APRA (a) เวลา 01.00 น. และ (b) เวลา 20.00 น. ตามลำดับ	66
30 โพรไฟล์ตามแนวตั้งของค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย (aerosol backscattering coefficient : $\beta_a(z)$) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากละอองลอย (aerosol attenuation coefficient : $\alpha_a(z)$) ของวันที่ 18 มกราคม พ.ศ.2547 ณ สถานีวิจัยตรวจวัดการแผ่รังสีในชั้นบรรยากาศ อำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย ที่ได้จากโปรแกรม APRA (a) เวลา 01.00 น. และ (b) เวลา 20.00 น. ตามลำดับ	67
31 โพรไฟล์ตามแนวตั้งของค่าสัญญาณการแกว่งพิสัย ($X(z)$) และค่าอัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน (δ) ของวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2548 ณ สถานีวิจัยในชั้นบรรยากาศ อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ที่ได้จากโปรแกรม APRA (a) เวลา 06.00 น. และ (b) เวลา 07.00 น. ตามลำดับ	68

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
32 โพรไฟล์ตามแนวตั้งของค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย (aerosol backscattering coefficient : $\beta_a(z)$) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากละอองลอย (aerosol attenuation coefficient : $\alpha_a(z)$) ของวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2548 ณ สถานีวิจัยในชั้นบรรยากาศ อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ที่ได้จากโปรแกรม APRA (a) เวลา 06.00 น. และ (b) เวลา 07.00 น. ตามลำดับ	69
33 กราฟสัญญาณการแก่งพิสัย ($X(z)$) กราฟอัตราส่วนดีโพลาริเซชัน (δ) กราฟสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย ($\beta_a(z)$) ของวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2547 เวลา 01.00 น. (a) กราฟจากโปรแกรม APRA (b) กราฟจากโปรแกรม Excel	78
34 กราฟสัญญาณการแก่งพิสัย ($X(z)$) กราฟอัตราส่วนดีโพลาริเซชัน (δ) กราฟสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย ($\beta_a(z)$) ของวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2547 เวลา 06.00 น. (a) กราฟจากโปรแกรม APRA (b) กราฟจากโปรแกรม Excel	79
35 โพรไฟล์ตามแนวตั้งของ (a) ค่าสัญญาณการแก่งพิสัย ($X(z)$) (b) ค่าอัตราส่วนดีโพลาริเซชัน (δ) (c) ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย ($\beta_a(z)$) (d) ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากละอองลอย ($\alpha_a(z)$) ของวันที่ 8 มกราคม พ.ศ.2550 เวลา 02.45 น. ณ สถานีวิจัยในชั้นบรรยากาศ อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ที่ได้จากโปรแกรม APRA	83
36 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม MATLAB ที่ถูกเปิดขึ้น	95
37 แสดงจุดบันทึกกราฟ	96
38 แสดงหน้าต่างของการบันทึก	97

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในสถานการณ์สภาพแวดล้อมโลกปัจจุบันที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ในน้ำ ใต้ดิน บนดิน จนกระทั่งถึงบนท้องฟ้า ซึ่งส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตบนโลกโดยเฉพาะมนุษย์ จากงานวิจัยต่างๆ ทั่วโลกที่การศึกษาเกี่ยวกับสภาพการเปลี่ยนแปลงด้านต่างๆ เช่น การศึกษาการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำอุ่นและกระแสน้ำเย็น การเคลื่อนตัวของเปลือกโลก การเปลี่ยนแปลงของมลภาวะในอากาศ¹ และได้ทำนายถึงผลที่น่ากลัวที่เกิดขึ้นกับโลกในอนาคต ด้วยเหตุนี้จึงเกิดการตื่นตัว และเห็นความสำคัญในการศึกษาโลกศาสตร์ (earth science) อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะการศึกษาเกี่ยวกับสภาพบรรยากาศโลกที่ปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก สังเกตได้จากจำนวนผู้ป่วยด้วยโรคเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจ² โรคเกี่ยวกับระบบหมุนเวียนเลือด ตลอดจนโรคเกี่ยวกับความบกพร่องของภูมิคุ้มกันร่างกายที่เพิ่มจำนวนสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากอากาศมีการปนเปื้อนอยู่ในปริมาณที่สูง โดยเฉพาะฝุ่นละออง สิ่งปนเปื้อนเหล่านี้ เรียกว่า มลภาวะทางอากาศ (air pollution) โดยมีทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ได้แก่ ภูเขาไฟระเบิด ไฟป่า ทะเล และมหาสมุทร ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของละอองเกลือ และที่เกิดขึ้นจากการกระทำของมนุษย์ ได้แก่ รถยนต์ เรือยนต์ เครื่องบิน การก่อสร้างที่ทำให้เกิดฝุ่นละออง โรงงานอุตสาหกรรม ที่ก่อสารมลพิษจากการเผาไหม้และกระบวนการการผลิตต่างๆ เช่น โรงงานอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ³ เตาเผาซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการก่อให้เกิดพลังงานความร้อน (เตาเผาเพิ่มความร้อน เตาเผากำจัดของเสีย) นอกจากจะทำให้เกิดเขม่า SO₂ NO_x และ CO แล้วบางครั้งก็ยังมีไฮโดรคาร์บอน ไฮโดรเจนคลอไรด์ และไดออกซินเกิดขึ้นอีกด้วย ซึ่งละอองต่างๆ เหล่านี้จะลอยค้างอยู่ในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (troposphere) อยู่เป็นเวลานาน จึงเป็นอันตรายต่อสุขภาพร่างกายเมื่อมนุษย์หายใจเข้าไป นอกจากนี้ภาวะดังกล่าวยังเป็นตัวก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ ปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) และภัยธรรมชาติต่างๆ อีกด้วย

¹C.-Y. Lin; et al. (2006). *Long-range transport of Asian dust and air pollutants to Taiwan: observed evidence and model simulation*. Atmospheric Chemistry and Physics, 7, 423-434, 2007

²กระทรวงสาธารณสุข. (2551). *วารสารสาธารณสุขไทย*. 2548-2550. หน้า 223.

³นพภาพร พานิช; และคณะ. (2550). *ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ*.

ในประเทศไทย การศึกษาและวิจัยด้านภูมิอากาศวิทยา (climatology) เริ่มมีการตื่นตัว และได้รับความสนใจมากขึ้น โดยภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้ร่วมมือพร้อมสนับสนุนเครื่องมือที่ใช้เก็บข้อมูลด้านโลกศาสตร์จากประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมีการติดตั้งเครื่องไลดาร์กระเจิงแบบมี (Mie scattering lidar) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540 ณ สถานีวิจัยชั้นบรรยากาศอำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย จนกระทั่งเมื่อปี พ.ศ. 2548 ได้มีการย้ายสถานีวิจัยมาตั้งที่ อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา

ไลดาร์⁴ หรือ เลเซอร์ไลดาร์เป็นเครื่องมือยิงพัลส์ของแสงเลเซอร์ไปที่ชั้นบรรยากาศ และบันทึกการกระเจิงกลับของแสง (backscattered light) เนื่องจากละอองลอย และเมฆ เพื่อสังเกตการแจกแจงของละอองลอยและเมฆในชั้นบรรยากาศ โดยสังเกตโพรไฟล์แนวตั้ง (vertical profile) ของสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับ หรือสัมประสิทธิ์การลดทอน ทำให้สามารถบอกถึงความแตกต่างของก้อนเมฆที่เป็นน้ำและก้อนเมฆที่เป็นน้ำแข็งได้ และตรวจวัดประเภทของละอองลอยได้ ไลดาร์ที่ใช้ในสถานีวิจัยชั้นบรรยากาศ นี้คือ NIES Compact Mie Scattering Lidar โดยใช้ Nd:YAG เลเซอร์ ที่มีความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร เป็นแหล่งกำเนิด โดยยิงสัญญาณลักษณะเป็นพัลส์แสงเลเซอร์ไปยังชั้นบรรยากาศในแนวตั้ง สัญญาณจะทำอันตรกิริยากับละอองลอย และอนุภาคที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศ แล้วเกิดการกระเจิง (scattering) ของแสง ซึ่งสามารถบันทึกสัญญาณจากการกระเจิงกลับนี้เป็นข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงของละอองลอยต่อไป

เนื่องจากสัญญาณที่ถูกบันทึกนั้นถูกเก็บในรูปแบบของไฟล์นามสกุล *.tar.gz ซึ่งไม่สามารถนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงของได้ในทันที จำเป็นต้องมีการแปลงไฟล์นั้นให้อยู่ในรูปแบบไฟล์นามสกุล *.txt เสียก่อนจึงจะนำมาใช้คำนวณได้ จึงนับได้ว่าการแปลงไฟล์ส่วนนี้เป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้นักวิจัยสภาพบรรยากาศสามารถนำข้อมูลเหล่านั้นมาใช้ และขยายผลต่อได้ นอกจากนั้นข้อมูลดิบที่วัดได้จากเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมีนั้น มีค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงของข้อมูลหลายตัวแปรด้วยกัน ทั้งข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงของละอองลอยยังมีจำนวนข้อมูลจำนวนมาก กล่าวคือในการเก็บข้อมูลไลดาร์ ณ เวลาใดเวลาหนึ่งนั้นไลดาร์จะเก็บข้อมูลโดยใช้หัววัด (detector) ที่เรียกว่าหลอดโฟโตมัลติพลีเออร์ (photomultiplier tube) สองหลอด หัววัดแรกใช้วัดโพลาไรเซชันในแนวตั้งฉาก หัววัดที่สองใช้วัดโพลาไรเซชันในแนวขนานเทียบกับแสงโพลาไรซ์ที่เครื่องไลดาร์ยิงขึ้นไป แต่ละหัววัดจะทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 6 เมตร เริ่มตั้งแต่ 6 ถึง 24,000 เมตร มีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 4,000 ข้อมูลต่อหนึ่งหัววัด ซึ่งเมื่อนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติ

⁴ N. Sugimoto. (2001). *NIES Compact Mie Scattering Lidar (532nm, dual polarization). User manual.* p1.

เชิงแสงของละอองลอยให้เห็นถึงการประทุติตัวของละอองลอยในวัน จำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากทั้งสองหัววัด และเก็บค่าทุกๆ ชั่วโมงรวม 24 ชั่วโมง ดังนั้นชุดข้อมูลที่ได้จะมีจำนวนถึง 192,000 ข้อมูลต่อหนึ่งวัน นอกจากนั้นในการคำนวณของชุดข้อมูล ณ เวลาหนึ่งนั้นต้องการการคำนวณในลักษณะที่เหมือนกัน ซึ่งยุ่งยากและใช้เวลานานต่อการคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการนำความรู้ด้านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และด้านฟิสิกส์มาใช้ในการเขียนโปรแกรมคำนวณ และแสดงผลค่าพารามิเตอร์ของละอองลอยจากข้อมูลดิบ เพื่อนำไปสู่การวิจัยข้อมูลที่รวดเร็ว และทันกับสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงของสภาพบรรยากาศที่เป็นปัจจุบันมากขึ้น

ความมุ่งหมายของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

1. เพื่อสร้างโปรแกรมคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์และแสดงผลพารามิเตอร์ของละอองลอย
2. เพื่อสร้างคู่มือของโปรแกรมคำนวณหาค่าพารามิเตอร์
3. เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ของละอองลอยในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ของประเทศไทยด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาเกี่ยวกับบรรยากาศ ละอองลอย หลักการทำงานของเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี (Mie scattering lidar) หลักการอ่านข้อมูล และแปลงข้อมูลของเครื่องไลดาร์
2. ศึกษาสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และวิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ของละอองลอยได้แก่ สัญญาณการแก้ไขพิสัย (range corrected signal) อัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน (depolarization ratio) และสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับ (backscattering coefficient) ด้วยวิธีการแบบเฟร์นัลด์ - เคลทท์ (Fernald - Klett method) เพื่อใช้ในการสร้างโปรแกรมคำนวณหาค่าพารามิเตอร์
3. เขียนโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม MATLAB รุ่น R2008a คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และสร้างกราฟทั้งสามกราฟ นำผลที่ได้จากการใช้โปรแกรมใน MATLAB ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการกระทำเป็นขั้นตอนในโปรแกรม excel
4. ทดสอบโปรแกรมกับข้อมูลเทียมที่ถูกกำหนดค่าขึ้น และทดสอบโปรแกรมกับข้อมูลดิบที่ได้จากเครื่องไลดาร์ เริ่มตั้งแต่ การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สร้างกราฟทั้งสาม และนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงของละอองลอยในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. ได้โปรแกรมที่อำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ข้อมูลโพर्फิรฟ์แวนดิง ที่วัดได้โดยได้แนวทางการคำนวณค่าสัญญาณการแก้ไขพิสัย (range corrected signal) ค่าอัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน (depolarization ratio) ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย (aerosol backscattering coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากละอองลอย (aerosol attenuation coefficient) ในระดับความสูงต่างๆ ของบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์
2. ได้ทดสอบและแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของโปรแกรม เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมให้มีความเหมาะสม และมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น
3. ได้นำความรู้หลักการของการเขียนโปรแกรม และทางฟิสิกส์ไปใช้ประโยชน์ในการอธิบายผลจากการวิจัย ก่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับสภาพภูมิอากาศ

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ละอองลอย (aerosols) หมายถึง อนุภาคขนาดเล็กที่ลอยค้างอยู่ในอากาศ มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.001 – 10 ไมโครเมตร
2. เครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี (Mie scattering lidar) หมายถึง เครื่องไลดาร์ที่ใช้สำหรับวัดข้อมูลเกี่ยวกับละอองลอยโดยใช้ทฤษฎีการกระเจิงแบบมี
3. ความสูงวิกฤติ (critical height) หมายถึง ระดับความสูงในบรรยากาศที่ตั้งสมมติฐานให้เห็นถึงความสูงตรงระดับนี้ขึ้นไปไม่มีละอองลอย ซึ่งในงานวิจัยนี้คือที่ระดับ 15,000 เมตร
4. วิธีการแบบเฟอร์นัลด์ - เคลทท์ (Fernald - Klett method) วิธีการแก้สมการแบบผกผันของเฟอร์นัลด์ นั้นสมมติความสัมพันธ์ $\beta(z) = \alpha(z)$ และในวิธีเดียวกันเคลทท์ (Klett) ได้ คิดว่าละอองลอยส่วนมากอยู่หนาแน่นเหนือพื้นดินในกิโลเมตรแรก
5. ข้อมูลเทียม (pseudo data) หมายถึง เป็นข้อมูลที่ถูกสร้างขึ้นมาเป็นตัวทดสอบความถูกต้องในการคำนวณของโปรแกรม APRA ซึ่งมีลักษณะเป็นค่าคงที่ที่ระดับความสูงต่างๆ ตามแบบของข้อมูลจริง ได้แก่ชุดข้อมูลเลข 0 เลข 1 และเลข 10000000

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. บรรยากาศของโลก (atmosphere)
2. ละอองลอย (aerosol)
3. คุณสมบัติเชิงแสง (optical properties)
4. โพลาไรเซชันของแสง (polarization of light)
5. การกระเจิงของแสง (scattering of light)
6. เลเซอร์ (laser)
7. ไลดาร์: เครื่องมือ ทฤษฎี และการประยุกต์ (lidar : instrumentation, theory and applications)
8. ความรู้พื้นฐานโปรแกรม MATLAB
9. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บรรยากาศของโลก (atmosphere)^{1, 2, 3}

โลกมีชั้นของบรรยากาศที่เป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้สิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ดำรงชีวิตอยู่ได้ ชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มอยู่โดยรอบโลกนั้นหนาประมาณ 15 กิโลเมตร ชั้นบรรยากาศดังกล่าวนี้ประกอบด้วย แก๊สไนโตรเจน (N_2) แก๊สออกซิเจน (O_2) ฝุ่นละอองไอน้ำ และเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ ซึ่งในจำนวนแก๊สเหล่านี้ แก๊สที่สำคัญที่สุดต่อการดำรงอยู่ของสิ่งมีชีวิตในโลก คือ แก๊สออกซิเจน และชั้นของบรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจนเพียงพอต่อการดำรงชีวิตมีความหนาเพียง 5 - 6 กิโลเมตรเท่านั้น ซึ่งปกติในชั้นบรรยากาศจะมีส่วนประกอบของแก๊สต่าง ๆ ค่อนข้างคงที่ คือ แก๊สไนโตรเจน 78.08% แก๊สออกซิเจน 20.98% แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สเฉื่อย 0.94% ในปริมาณคงที่ของแก๊สดังกล่าวนี้

¹ Guy P. Brasseur; Ronald G. Prinn; & Alexander A.P. Pszenny. (2003). *Atmospheric Chemistry in a Changing World*. pp. 1-17.

² McGraw-Hill. (2004). *Concise Encyclopedia of Science and Technology*. pp. 200-202.

³ J. Buchdahl. (1999). *Global Climate Change Student Guide: A review of contemporary and prehistoric global climate change*. p. 4.

ถือว่าเป็นอากาศบริสุทธิ์ แต่เมื่อใดก็ตามที่ส่วนประกอบของอากาศเปลี่ยนแปลงไปมีปริมาณ ของฝุ่น ละออง แก๊ส กลิ่น หมอกควัน ไอ ไอน้ำ เขม่าและกัมมันตภาพรังสีอยู่ในบรรยากาศมากเกินไป อากาศที่ได้นั้นก็กลายเป็น “อากาศเสีย” ที่มีมลพิษทางอากาศ ได้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตอย่างมาก

ตาราง 1 ส่วนประกอบต่าง ๆ ในบรรยากาศที่ระดับต่ำกว่า 25 กิโลเมตร

Component	Chemical Abbreviation	Volume % (dry air)
Nitrogen	N ₂	78.08
Oxygen	O ₂	70.98
Argon ^l	Ar	0.93
Carbon dioxide	Co ₂	0.035
Neon ^l	Ne	0.0018
Helium ^l	He	0.0005
Hydrogen	H	0.00006
Krypton ^l	Kr	0.0011
Xenon ^l	Xe	0.00009
Methane	Ch ₄	0.0017
Ozone ^T	O ₃	0.00006

ที่มา: J. Buchdahl. (1999). *Global Climate Change Student Guide: A review of contemporary and prehistoric global climate change.* p.2.

การแบ่งชั้นบรรยากาศ โดยแบ่งตามลักษณะและระดับความสูง แบ่งได้ 6 ระดับ คือ

1. โทรโพสเฟียร์ (troposphere) คือ บรรยากาศชั้นล่างสุด สูงจากพื้นโลก 8 - 10 กิโลเมตร มีอิทธิพลต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมมากที่สุด อากาศที่มนุษย์หายใจเข้าไปคืออากาศชั้นนี้ รวมถึงการเกิดปรากฏการณ์ทางธรรมชาติต่าง เช่น เมฆ พายุ ฝน และลักษณะอากาศต่าง ๆ เกิดขึ้นในบรรยากาศชั้นนี้ นอกจากนี้อากาศในชั้นนี้มีการเคลื่อนที่ทั้งในแนวราบและแนวตั้ง อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงบ่อยครั้งและรวดเร็วกว่าบรรยากาศชั้นอื่น ๆ โดยอุณหภูมิลดลงตามความสูง โดยเฉลี่ย

กิโลเมตรละ 65 องศาเซลเซียส แนวขอบเขตบนสุดของชั้นโทรโพสเฟียร์ที่เชื่อมต่อกับชั้นที่อยู่ถัดไป เรียกว่า โทรโปพอส (tropopause)

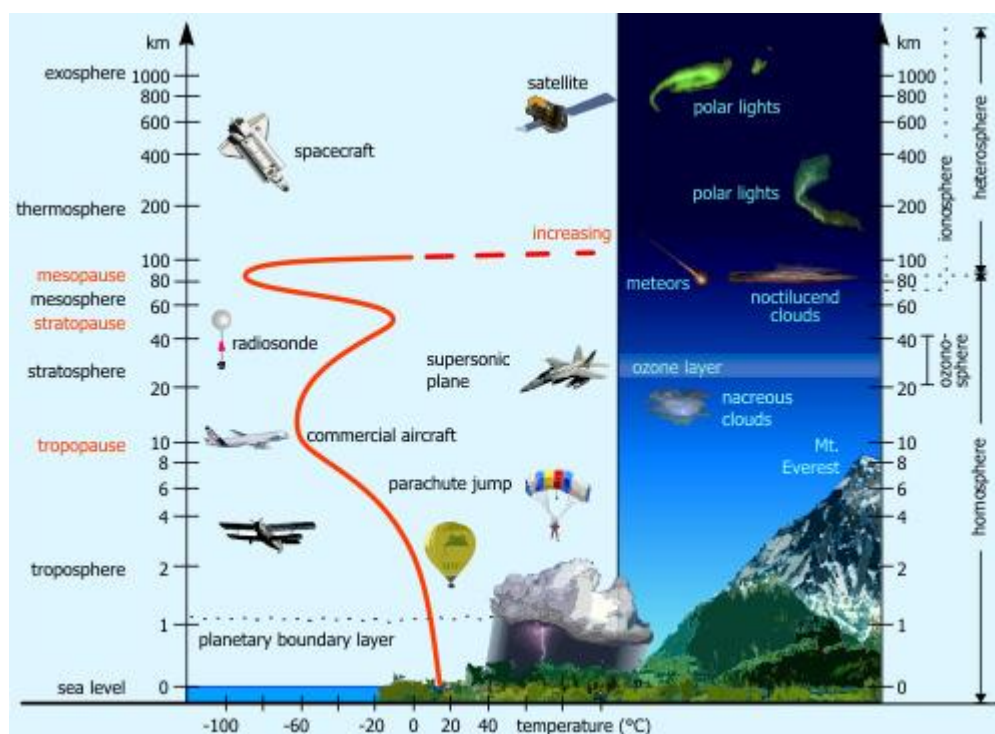
2. สตราโตสเฟียร์ (stratosphere) ความสูง 10 - 50 กิโลเมตร บรรยากาศชั้นนี้มีแก๊สโอโซน อยู่ในระดับความสูงประมาณ 19 - 34 กิโลเมตร เป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย และแก๊สโอโซนนี้เองที่ทำให้ หน้าที่ถูกดูดซับรังสีเหนือม่วง (ultraviolet) จากดวงอาทิตย์ ซึ่งเป็นรังสีอันตรายต่อผิวหนังของมนุษย์และ พืช ไม่ให้ส่องลงมาระทบถึงพื้นโลก แก๊สชนิดนี้เกิดจากการที่โมเลกุลของแก๊สออกซิเจนแตกตัว และ จัดรูปแบบขึ้นใหม่เมื่อถูกรังสีจากดวงอาทิตย์ช่วยดูดซับรังสีเหนือม่วง (ultraviolet) ของแสงอาทิตย์ทำให้บรรยากาศอุ่นขึ้น อุณหภูมิของชั้นสตราโตสเฟียร์จึงมีการเปลี่ยนแปลง 3 ลักษณะ คือ ที่ระดับโทร โพพอสจนถึงระดับความสูงประมาณ 20 กิโลเมตร อุณหภูมิจะค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตาม ความสูง เรียกว่า ชั้นไอโซเทอร์มอล (isothermal layer) ที่ระดับความสูง 20 กิโลเมตรขึ้นไปอุณหภูมิ จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งความสูง 32 กิโลเมตรอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามระดับความสูง ที่เพิ่มขึ้น เครื่องบินไอพ่นจะบินในชั้นนี้เนื่องจากมีทัศนวิสัยดี ขอบบนสุดของชั้นสตราโตสเฟียร์ที่ เชื่อมต่อกับชั้นถัดไป เรียกว่า สตราโตพอส (stratopause)

3. มีโซสเฟียร์ (mesosphere) สูงจากพื้นดิน 50 - 90 กิโลเมตร ขอบบนสุดของชั้นนี้ เรียกว่า มีโซพอส (mesopause) เนื้อชั้นโอโซนอุณหภูมิจะลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้นโดยอาจต่ำได้ถึง 83 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหรือชั้นส่วนหินจากอวกาศที่ตกลงมามักถูกเผาไหม้ในชั้นนี้ การส่งคลื่นวิทยุ ทั่วๆ ไปก็ส่งในชั้นนี้เช่นกัน

4. เทอร์โมสเฟียร์ (thermosphere) สูง 90 - 200 กิโลเมตร ความหนาแน่นของอากาศจะ ลดลงอย่างรวดเร็วแต่อุณหภูมิจะสูงขึ้นมาก โดยอุณหภูมิจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกแล้วอัตราการ สูงขึ้นจะลดลง อุณหภูมิจะอยู่ระหว่าง 227-1727 องศาเซลเซียส โดยชั้นนี้มีความหนาแน่นของอนุภาค ต่างๆ จางมาก แต่แก๊สต่างๆ ในชั้นนี้จะอยู่ในลักษณะที่เป็นอนุภาคที่เป็นประจุไฟฟ้าเรียกว่า ไอออน สามารถสะท้อนคลื่นวิทยุได้ โดยส่งสัญญาณจากพื้นโลกให้คลื่นสะท้อนกับชั้นไอออนของแก๊ส ไนโตรเจนและออกซิเจน ซึ่งดูดกลืนรังสีแกมมา รังสีเอ็กซ์ และรังสีเหนือม่วง (ultraviolet) ทำให้แตก ตัวให้อิเล็กตรอนอิสระหลุดออกมาเคลื่อนที่ ทำให้บริเวณนั้นมีสภาพนำไฟฟ้าสูง

5. เอ็กโซสเฟียร์ (exosphere) บรรยากาศชั้นนี้สูงจากพื้นโลกประมาณ 200 - 1000 กิโลเมตร มีแก๊สอยู่น้อยมาก มนุษย์อวกาศจะต้องควบคุมบรรยากาศให้มีความดันเท่ากับความดันภายในร่างกาย ต้องสวมใส่ชุดที่มีแก๊สออกซิเจนเพื่อช่วยในการหายใจ ดาวเทียมพยากรณ์อากาศจะโคจรรอบโลกในชั้น นี้

6. แมกเนโตสเฟียร์ (magnetosphere) ชั้นนี้มีความสูงมากกว่า 1000 กิโลเมตร ไม่มีแก๊สใดๆ อยู่เลย



ภาพประกอบ 1 โครงสร้างชั้นบรรยากาศ

ที่มา: <http://www.kowoma.de/en/gps/additional/atmosphere.htm>. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2553. (2010). *Earth's Atmosphere showing Vertical Structure of the Atmosphere*. (Online).

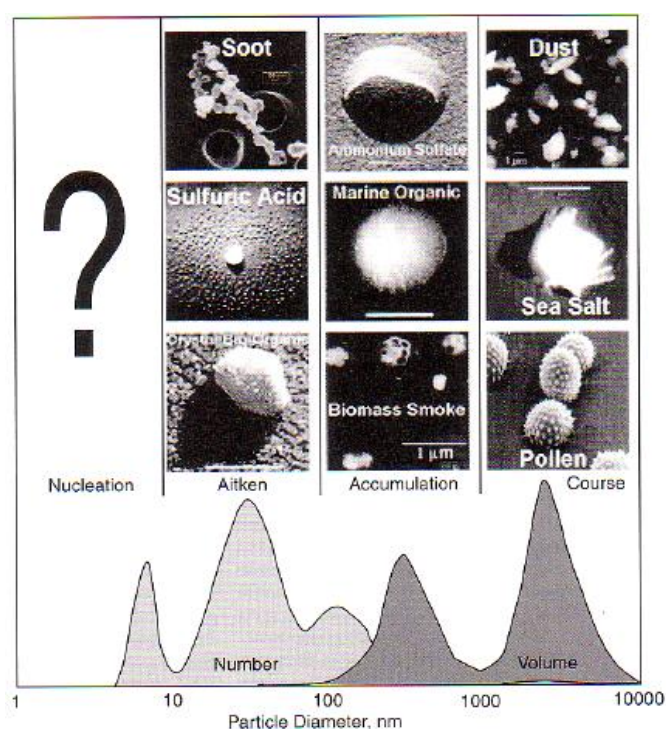
ละอองลอย (aerosols) ^{4, 5}

ละอองลอยในบรรยากาศ หรือ แอโรซอล หมายถึงอนุภาคของเหลว หรือของแข็งที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศ และละอองในบรรยากาศมีผลโดยตรงต่อพลังงานรังสีจากดวงอาทิตย์ (direct radiative forcing) เพราะละอองลอยในบรรยากาศสามารถดูดกลืน (absorb) และกระเจิง (scatter) แสงอาทิตย์ และรังสีอินฟราเรด (infrared radiation) ในบรรยากาศ ซึ่งเป็นตัวอธิบายความขุ่นมัวของบรรยากาศ และเชื่อมโยงกับละอองลอยในบรรยากาศที่บอกถึง มลภาวะทางอากาศ (pollution, air pollution) ละอองลอยในบรรยากาศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.001 - 10

⁴ McGraw-Hill. (2004). *Concise Encyclopedia of Science and Technology*. pp. 36-37.

⁵ G.P. Brasseur; R.G. Prinn; & A.P. Pszenny. (2003). *Atmospheric Chemistry in a Changing World*. p. 125-137.

ไมโครเมตร (Particulate Matters $<10\ \mu\text{m}$, PM₁₀) ตามภาพประกอบ 2 มีรูปร่างต่างๆกัน แล้วแต่ชนิดของละอองลอย และอายุในบรรยากาศ ซึ่งสามารถเข้าสู่ทางเดินหายใจโดยไม่ผ่านการคัดกรอง และถ้าเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร (PM_{2.5}) สามารถเข้าไปสะสมอยู่ในถุงลมในปอด



ภาพประกอบ 2 ละอองในบรรยากาศ ขนาดต่างๆ และจากแหล่งที่มาและกระบวนการต่างกัน

ที่มา: G.P. Brasseur; R. G. Prinn; & A. P. Pszenny. (2003). *Atmospheric Chemistry in a Changing World*. p. 137.

การจำแนกละอองลอยตามแหล่งกำเนิด หรือกระบวนการเกิด สามารถจำแนกละอองลอยได้ 2 ประเภท คือ

1. ละอองลอยปฐมภูมิ (primary aerosols) ในบรรยากาศ เป็นอนุภาคของแข็งหรือของเหลว ตั้งแต่เข้าสู่บรรยากาศ เช่น ฝุ่นจากทะเลทราย หรือผิวดินที่แห้งแล้งปราศจากสิ่งปกคลุม คาร์บอนไฟฟ้านที่เป็นเขม่าดำ

การปลดปล่อยละอองลอยปฐมภูมิ (primary emissions) ในบรรยากาศ

1.1 ละอองฝุ่นจากดินและจากอุตสาหกรรม (soil-derived and industrial dust) ส่วนใหญ่ของละอองในบรรยากาศที่ปลดปล่อยจากภาคพื้นดิน เกิดจากกระแสลมที่พัดพาผิวดินขึ้นไปในอากาศ ส่วนพื้นดินของโลกส่วนที่เป็นแหล่งใหญ่ของฝุ่นคือทะเลทราย พื้นดินที่จับตัวแข็งในฤดูหนาว

เมื่อถึงฤดูใบไม้ผลิจะแตกตัวเป็นฝุ่นขนาดเล็กกว่า 20 ไมโครเมตร ที่ถูกลมพัดไปไกลจากจีนถึงเกาหลี ญี่ปุ่น และสหรัฐอเมริกา องค์ประกอบของดินเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่จะทำให้มีการเคลื่อนที่ของฝุ่นขึ้นในอากาศ

1.2 ละอองจากทะเลและมหาสมุทร เป็นแหล่งกำเนิดปฐมภูมิของอนุภาคเกลือทะเล (sea salt particles or sea spray) ได้จากการแตกตัวของฟองคลื่นที่มีมากตามบริเวณชายฝั่ง และบริเวณที่มีกระแสน้ำและคลื่นลมแรง อนุภาคเกลือทะเลจะมีสิ่งมีชีวิต และสารอินทรีย์ติดปนมาด้วย ละอองลอยชีวภาพ (biogenic aerosols) นอกจากจุลชีพ ยังมีชีวโมเลกุล เช่น กรดไขมัน (fatty acids) แอลกอฮอล์ เอสเทอร์ โปรตีนที่ละลายน้ำได้

2. ละอองลอยในบรรยากาศทุติยภูมิ (secondary aerosols) ขณะที่ถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศเป็นแก๊ส และไอของสารระเหย และเปลี่ยนสภาพเป็นอนุภาคของแข็ง หรือของเหลวเมื่อมีความเข้มข้นเกินความสมดุลของความดันไอระเหย (equilibrium vapour pressure)

การปลดปล่อยสารต้นตอของละอองลอยในบรรยากาศ

2.1 ไดเมทิลซัลไฟด์ (dimethylsulfide, DMS) การปลดปล่อยไดเมทิลซัลไฟด์ (DMS) จากมหาสมุทร คือแหล่งที่มาหลักของซัลเฟอร์ในบรรยากาศ ในบริเวณชายฝั่งทะเล (marine boundary layer) และฟรีโทรโปสเฟียร์ (free troposphere) โดยมีปริมาณขึ้นกับฤดูกาล และวัฏจักรการเจริญของสิ่งมีชีวิตในทะเล และความเร็วการถ่ายโอนจากทะเลสู่อากาศ (sea-to-air transfer velocity) สารเหล่านี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่หลากหลาย ส่วนใหญ่เป็นออกซิเดชันได้เป็น ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (dimethyl sulfoxide : DMSO) และไดเมทิลซัลฟอน (dimethylsulfone : DMSO₂) กระบวนการเคมีที่เริ่มจากสถานะแก๊สคือ DMS และได้ผลผลิตเป็นละอองในบรรยากาศคือ กรดซัลฟูริก (H₂SO₄) และมีเทนซัลโฟเนต (methanesulfonate : MSA) อุณหภูมิคือปัจจัยสำคัญของการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของ DMS ในบรรยากาศ

2.2 การปลดปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulfur dioxide : SO₂) จากภูเขาไฟ ภูเขาไฟเป็นแหล่งธรรมชาติหลักอีกประเภทหนึ่งของสารประกอบซัลเฟอร์ในบรรยากาศ ภูเขาไฟเหล่านี้พ่นแก๊สไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และกำมะถันในรูปของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulfur dioxide : SO₂) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide : H₂S) และซัลเฟตไอออน (sulfate : SO₄²⁻) ในสัดส่วนต่างๆกัน แล้วแต่ชนิดของแมกมา แก๊ส SO₂ เป็นสารต้นตอของละอองซัลเฟตในบรรยากาศโดยเฉพาะในสถานะร้อนขึ้น ซัลเฟตจากภูเขาไฟระเบิดมีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกเพราะหมอกควันพวยพุ่งขึ้นสูงถึงชั้นโทรโพสเฟียร์ และสตราโตสเฟียร์

2.3 การปลดปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจนและแอมโมเนีย ออกไซด์ของไนโตรเจนมีความสำคัญในเคมีของบรรยากาศเนื่องจากมีสถานะเป็นตัวทำให้เกิดการรวมตัวกับออกซิเจน และเป็นสารต้นตอของละอองกรดไนตริก ซึ่งนอกจากมีความดันไอสูงแล้วยังสามารถ เกาะกับอนุภาคอยู่ใน

ภาวะของละอองและเกิดสมดุลเคมีกับแก๊ส แอมโมเนียมีความสำคัญในการทำให้เป็นกลาง ละอองกรดซัลฟูริกในบรรยากาศ และยังมีส่วนในการสร้างละอองของแข็งขึ้นใหม่ด้วย สมดุลระหว่างสภาวะของแข็ง ของเหลว แก๊ส ของ แอมโมเนีย กรดไนตริก ไนเตรท กรดซัลฟูริก ซัลเฟตและน้ำ เป็นเรื่องที่สำคัญในการศึกษาเคมีของบรรยากาศ

2.4 คาร์บอนอินทรีย์และเขม่าดำ (organic carbon and black carbon) มีสองแหล่งใหญ่ของละอองลอยในบรรยากาศที่มาจากการเผาไหม้คือ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล (fossil fuel burning) และการเผาไหม้ของชีวมวล (biomass burning) การเกิดละอองลอยในบรรยากาศขึ้นกับสภาวะที่เกิดการเผาไหม้ เช่น อุณหภูมิ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ และชนิดของเชื้อเพลิง แหล่งของการเผาไหม้ชีวมวล เช่น ไฟป่า ที่มีหลายแบบ เช่น ป่าดิบเขตร้อนในลุ่มน้ำอเมซอน ป่าซาวานาในแอฟริกา ป่าดิบแล้ง การเผาชีวมวลที่เกี่ยวข้องการเกษตร เช่น การเผาฟางหลังเก็บเกี่ยวข้าว การเผาซากพืชไร่ และการเผาไม้ฟืนเพื่อหุงหาอาหาร การเผาขยะเพื่อกำจัดของเสีย ทั้งหมดนี้ล้วนให้คาร์บอนอินทรีย์และเขม่าดำในอัตราต่างๆกัน

2.5 สารอินทรีย์ระเหย (volatile organic compounds, VOC) สารอินทรีย์ระเหย (VOC) ถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศจากแหล่งชีวภาพ และแหล่งที่มาจากกิจกรรมมนุษย์ VOC ที่เป็ แก๊สและพัฒนาไปเป็นละอองลอยในบรรยากาศได้ คือสารไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวน คาร์บอนอะตอมมากกว่า 6 อะตอม ละอองลอยในบรรยากาศที่ได้จาก VOC เรียกว่า “ละอองลอยสารอินทรีย์ทุติยภูมิ” (secondary organic aerosols, SOA)

คุณสมบัติของแสง

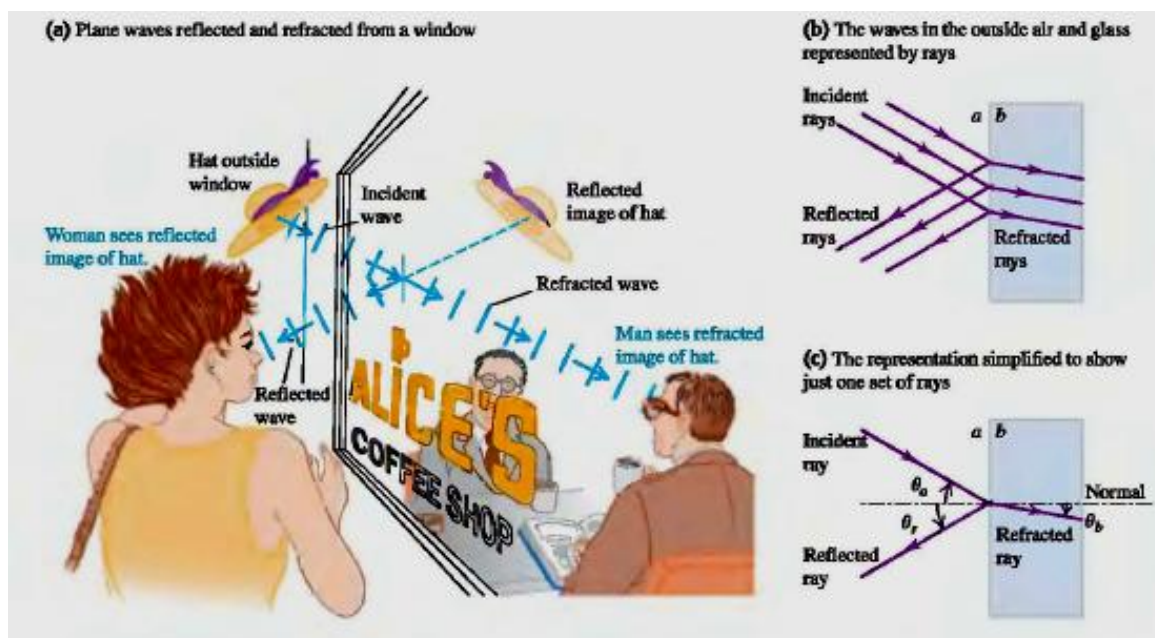
แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง และมีการเคลื่อนที่ในตัวกลางชนิดอื่น ๆ ซึ่งการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางแต่ละชนิดนั้นมีความเร็วที่ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวกลาง คือแสงจะมีความเร็วในการเคลื่อนที่แปรผกผันกับความหนาแน่นของตัวกลาง โดยแสงมีคุณสมบัติที่สำคัญ ได้แก่

การสะท้อน (reflection) และการหักเห (refraction)⁶

เมื่อคลื่นแสงตกกระทบผิวเรียบซึ่งแยกวัสดุโปร่งใสสองชิ้น (เช่น อากาศและแก้ว หรือน้ำและแก้ว) โดยทั่วไปคลื่นบางส่วนถูกสะท้อนบางส่วนถูกหักเห เข้าไปในวัสดุที่สอง ดังภาพประกอบ 3 (a) เมื่อมองเข้าไปในหน้าต่างตาดูอาคารจากถนน จะเห็นการสะท้อนของภาพถนน แต่คนในร้านมองผ่าน

⁶Hugh D. Young; Roger Freedman. (2008). *University Physics with Modern Physics*. แปลโดย ปิยพงษ์ สิริทิดง. กรุงเทพฯ: เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า. หน้า 1055 - 1063.

หน้าต่างไปที่ภาพเดียวกันได้เพราะแสงไปถึงเขาโดยการหักเห ซึ่งการบรรยายทิศทางของรังสีตกกระทบ สะท้อน และหักเห (ส่งผ่าน) ที่ผิวรอยต่อระหว่างวัสดุสองชิ้น ในรูปของมุมที่รังสีทำกับเส้นแนวฉาก (normal line) กับผิวที่จุดตกกระทบ ดังภาพประกอบ 3 (b) และ 3 (c)



ภาพประกอบ 3 (a) คลื่นระนาบสะท้อนบางส่วนและหักเหบางส่วนที่ขอบเขตระหว่างตัวกลาง 2 ตัว ในกรณีนี้คืออากาศกับกระจก (b) แสดงคลื่นในอากาศภายนอกและภายในแก้วด้วยรังสี (c) แสดงรังสีตกกระทบ รังสีสะท้อน และรังสีหักเห

ที่มา: Hugh D. Young; Roger Freedman. (2008). *University Physics with Modern Physics*. p 1124.

ดัชนีของการหักเหของวัสดุของแสงหรือดัชนีหักเห (refractive Index) ซึ่งแทนด้วย n มีบทบาทสำคัญในทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของอัตราเร็วของแสง c ในสุญญากาศต่ออัตราเร็ว v ในวัสดุ แสงเดินทางในวัสดุช้ากว่าในสุญญากาศเสมอ ดังนั้นค่า n ในวัสดุอื่นใดนอกจากสุญญากาศมีค่าสูงกว่าหนึ่งเสมอ สำหรับสุญญากาศ $n = 1$ เนื่องจาก n เป็นอัตราส่วนของอัตราเร็วสองปริมาณ จึงเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย

$$n = \frac{c}{v} \quad (2-1)$$

จากการทดลองเกี่ยวกับทิศของรังสีตกกระทบ รังสีสะท้อน และรังสีหักเหที่ผิวเรียบระหว่างวัสดุแสงสองชั้นทำให้ได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

1. รังสีตกกระทบ รังสีสะท้อน และรังสีหักเห และเส้นแนวฉากที่ผิว ต่างอยู่ในระนาบเดียวกัน โดยระนาบของรังสีทั้งสามตั้งฉากกับระนาบของผิวขอบเขตระหว่างวัสดุทั้งสอง
2. มุมสะท้อน θ_r มีค่าเท่ากับมุมตกกระทบ θ_a สำหรับทุกความยาวคลื่นและสำหรับคู่วัสดุใดๆ นั่นคือ ในภาพประกอบ 3 c

$$\theta_r = \theta_a \quad (\text{กฎการสะท้อน}) \quad (2-2)$$

เรียกความสัมพันธ์นี้รวมกับข้อสังเกตที่ว่า รังสีตกกระทบและรังสีสะท้อน และเส้นแนวฉากทั้งหมดอยู่ในระนาบเดียวกันว่า กฎการสะท้อน

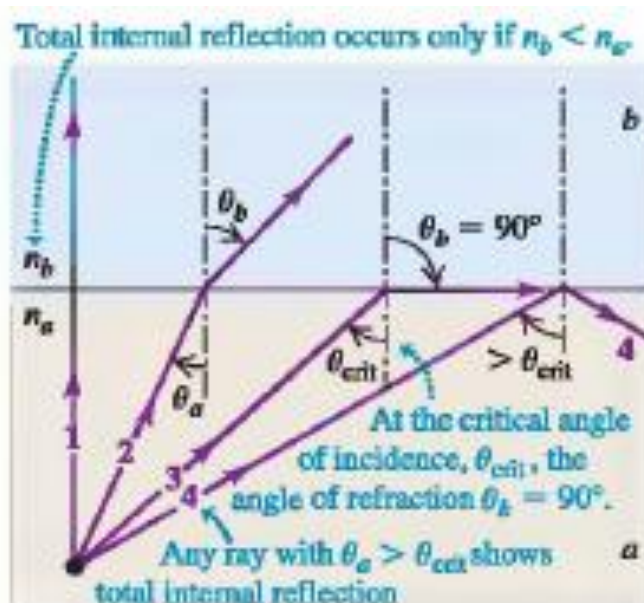
1. สำหรับแสงสีเดียวและสำหรับคู่วัสดุใดๆ a และ b ซึ่งอยู่บนด้านตรงกันข้ามของรอยต่อ อัตราส่วนของค่าไซน์ของมุม θ_a และ θ_b เมื่อ θ_b คือมุมของรังสีหักเห โดยที่มุมทั้งสองวัดจากเส้นแนวฉากกับรังสี มีค่าเท่ากับส่วนกลับของอัตราส่วนของดัชนีหักเหทั้งสอง

$$\frac{\sin \theta_a}{\sin \theta_b} = \frac{n_b}{n_a} \quad (2-3)$$

หรือ

$$n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b \quad (2-4)$$

เรียกผลการทดลองนี้รวมกับข้อสังเกตที่ว่า รังสีตกกระทบ และรังสีหักเห และเส้นแนวฉากทั้งหมดอยู่ในระนาบเดียวกันว่า กฎการหักเห หรือ กฎของสเนลล์



ภาพประกอบ 4 การสะท้อนภายในกลับหมด (total internal reflection)

ที่มา: Hugh D. Young; Roger Freedman. (2008). *University Physics with Modern Physics*. p 1130.

นอกจากการที่แสงตกกระทบลงบนรอยต่อระหว่างวัสดุสองชนิดที่มีดัชนีหักเหแตกต่างกันทำให้เกิดแสงสะท้อนบางส่วน และแสงหักเหบางส่วนที่รอยต่อของสองวัสดุนั้นแล้ว ภายใต้สถานการณ์บางอย่าง แสงทั้งหมดสามารถสะท้อนกลับจากรอยต่อได้โดยไม่มีแสงส่งทะลุผ่านเลย แม้วัสดุที่สองจะเป็นวัสดุโปร่งใส ภาพประกอบ 4 แสดงให้เห็นว่าเหตุการณ์นี้เกิดขึ้นได้อย่างไร รูปแสดงรังสีหลายเส้นแผ่จากแหล่งจุด P ในวัสดุ a ที่มีดัชนีหักเห n_a รังสีตกกระทบผิวของวัสดุที่สอง b ที่มีดัชนีหักเห n_b โดยที่ $n_a > n_b$ จากกฎการหักเหของสเนลล์

$$\sin \theta_b = \frac{n_a}{n_b} \sin \theta_a \quad (2-5)$$

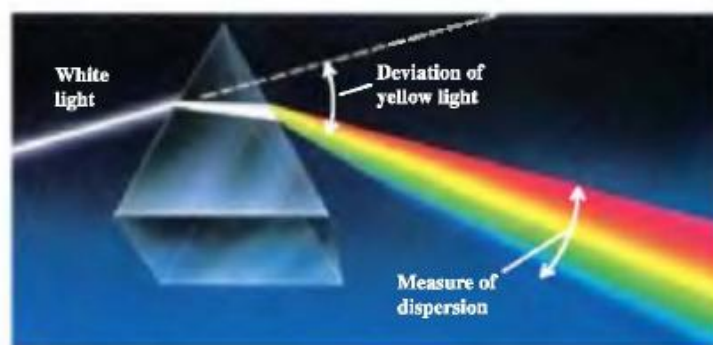
เนื่องจาก n_a / n_b มีค่ามากกว่าหนึ่ง $\sin \theta_b$ จึงมีค่ามากกว่า $\sin \theta_a$ หมายความว่ารังสีถูกหักเหออกจากเส้นแนวฉาก ดังนั้นต้องมีค่า θ_b น้อยกว่า 90° ค่าหนึ่งที่กฎของสเนลล์ให้ $\sin \theta_b = 1$ ($\theta_b = 90^\circ$) ซึ่งแสดงด้วยรังสีที่ 3 ดังภาพประกอบ 4 จะพบว่าแสงที่หักเหจะขนานกับผิวพอดีที่มุมหักเหเท่ากับ 90°

มุมตกกระทบที่ทำให้รังสีหักเหขนานกับผิวรอยต่อเรียกว่ามุมวิกฤต และแทนด้วย θ_{crit} ถ้ามุมตกกระทบมีค่ามากกว่ามุมวิกฤต ค่าไซน์ของมุมหักเหที่คำนวณจากกฎของสเนลล์มีค่ามากกว่าหนึ่ง ซึ่งเป็นไปไม่ได้ ที่มุมตกกระทบใดก็ตามที่มุมวิกฤต รังสีไม่สามารถผ่านเข้าไปในวัสดุบนได้ รังสีถูกกักอยู่ในวัสดุล่างและสะท้อนกลับหมดที่ผิวรอยต่อ สถานการณ์นี้เรียกกันว่า การสะท้อนภายในกลับหมด สามารถหามุมวิกฤตสำหรับวัสดุที่กำหนดสองชนิดได้โดยการให้ $\theta_b = 90^\circ$ ($\sin \theta_b = 1$) ในกฎของสเนลล์จะได้

$$\sin \theta_{crit} = \frac{n_b}{n_a} \quad (\text{มุมวิกฤตสำหรับการสะท้อนภายในกลับหมด}) \quad (2-6)$$

การกระจาย (dispersion)⁷

แสงขาวธรรมดาเป็นการซ้อนทับของคลื่นที่มีความยาวคลื่นคลุมตลอดสเปกตรัมที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ อัตราเร็วของแสงในสุญญากาศมีค่าเดียวกันกับทุกความยาวคลื่น แต่อัตราเร็วในสารวัสดุมีค่าต่างกันสำหรับความยาวคลื่นที่ต่างกัน ดังนั้นดัชนีหักเหของวัสดุจึงขึ้นกับความยาวคลื่นด้วย



ภาพประกอบ 5 การกระจายของแสงโดยปริซึม เรียกแถบสีว่าสเปกตรัม

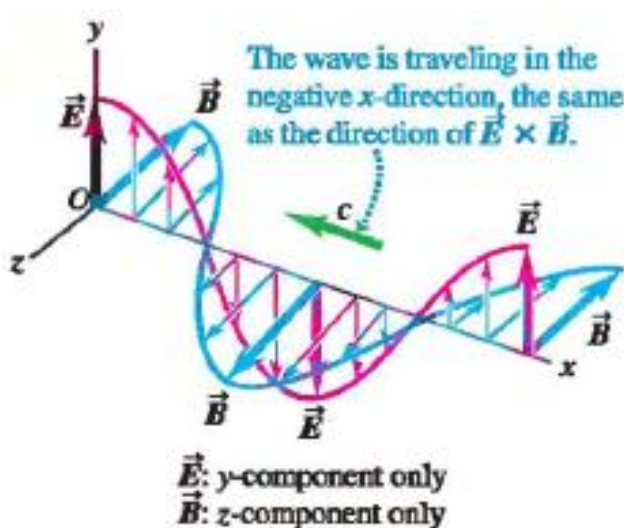
ที่มา : Hugh D. Young; Roger Freedman. (2008). *University Physics with Modern Physics*. P. 1133.

⁷ Hugh D. Young; Roger Freedman. (2008). *University Physics with Modern Physics*. แปลโดย ปิยพงษ์ สิทธิคง. กรุงเทพฯ: เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า. หน้า 1063.

ภาพประกอบ 5 แสดงรังสีแสงขาวตกกระทบปริซึม การกระจาย⁸ (dispersion) ที่เกิดจากปริซึมเพิ่มตามดัชนีหักเห (รังสีแสงสีแดงมีดัชนีหักเหน้อยกว่ารังสีแสงสีม่วง) ทำให้แสงสีม่วงเลี้ยวเบนไปมากที่สุด และแสงสีแดงเลี้ยวเบนไปน้อยที่สุด แสงสีอื่นอยู่ในตำแหน่งกลาง เมื่อแสงออกมาจากปริซึม แสงกระจายออกเป็นลูปพัดดังที่แสดง เรียกว่า แสงกระจายตัวออกเป็นสเปกตรัม ปริมาณการกระจายขึ้นกับ ผลต่างระหว่างดัชนีหักเหของแสงสีม่วงและแสงสีแดง

โพลาไรเซชันของแสง⁹ (polarization of light)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวาง ตามภาพประกอบ 6 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กซึ่งมีค่าผันผวนขึ้นลงมีทิศตั้งฉากกันและตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ไปในทิศ $-x$ ซึ่งนิยามทิศของโพลาไรเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้เป็นทิศของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า ไม่ใช่ทิศของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงสามารถเขียนด้วยสมการ



ภาพประกอบ 6 ภาพแทนสนามที่ $t = 0$ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระนาบรูปไซน์ซึ่งถูกโพลาไรซ์เชิงเส้น

ที่มา : Hugh D. Young; Roger Freedman. (2008). *University Physics with Modern Physics*. p 1124.

⁸ Gordon; Raymond A. Serway; Serway. (2005). *College Physics*. p 737.

⁹ Hugh D. Young; Roger Freedman. (2008). *University Physics with Modern Physics*. แปลโดย ปิยพงษ์ สิทธิคง. กรุงเทพฯ: เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า. หน้า 1064.

$$\begin{aligned}\vec{E}(x,t) &= E_{\max} \hat{j} \sin(\omega t - kx) \\ \vec{B}(x,t) &= B_{\max} (-\hat{k}) \sin(\omega t - kx)\end{aligned}\quad (2-7)$$

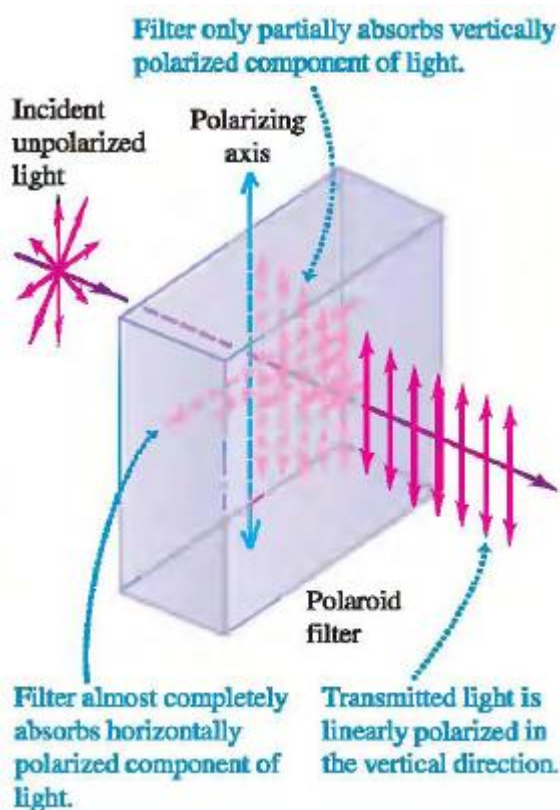
E, B	แทน สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กตามลำดับ
$\hat{j}, \hat{k}$	แทน เวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector)
ω	แทน ความถี่เชิงมุม (angular frequency)
k	แทน ค่าคงที่ของคลื่น (wave constant)

จากภาพประกอบ 6 สนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีทิศโพลาไรซ์ในทิศทาง y เพราะว่าสนามไฟฟ้ามีส่วนประกอบตามแกน y เท่านั้น

เนื่องจากแสงธรรมชาติเป็นแสงไม่โพลาไรซ์ การสร้างแสงโพลาไรซ์จากธรรมชาติจึงต้องอาศัยกระบวนการที่ทำให้เกิดโพลาไรเซชัน คือ

โพลาไรเซชันโดยการเลือกดูดกลืน (polarization by selective absorption)

ตัวกรองโพลาไรซ์ที่รู้จักกันที่สุดสำหรับแสงที่มองเห็นได้คือ โพลารอยด์ซึ่งใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับแว่นกันแดด และตัวกรองแสงสำหรับเลนส์กล้องถ่ายรูป ภาพประกอบ 7 ตัวกรองโพลารอยด์ผ่านความเข้มของคลื่นซึ่งโพลาไรซ์ขนานกับแกนหนึ่งในวัสดุที่เรียกว่าแกนโพลาไรซ์ 80% หรือมากกว่า แต่ผ่านคลื่นซึ่งโพลาไรซ์ตั้งฉากกับแกนนี้เพียง 1% หรือน้อยกว่า

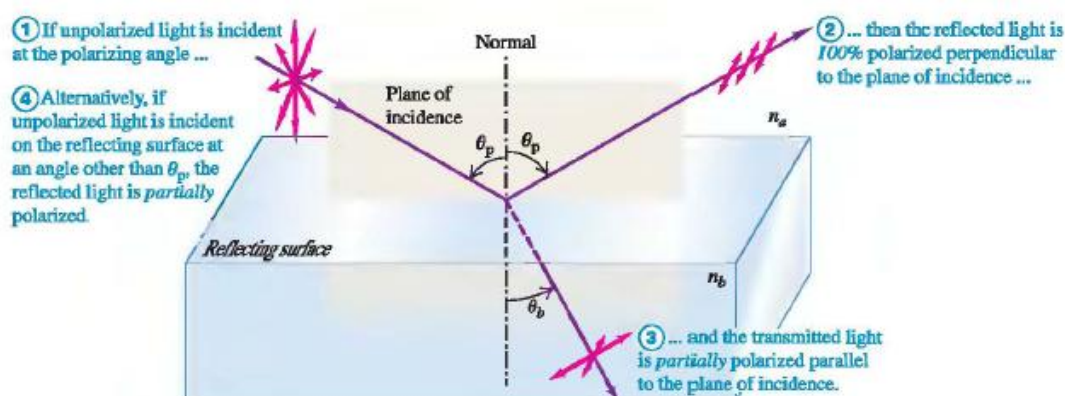


ภาพประกอบ 7 ส่วนประกอบของ $\vec{E}$ ที่ตั้งฉากกับแกนโพลาไรซ์ถูกดูดกลืนด้วยแผ่นกรองแสงทำให้แสงที่ผ่านไปผ่านเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น

ที่มา: Hugh D. Young; Roger Freedman. (2008). *University Physics with Modern Physics*. P.1136.

โพลาไรเซชันโดยการสะท้อน (polarization by reflection)

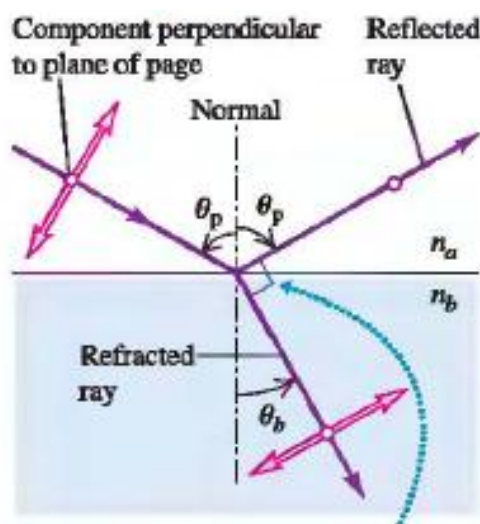
การทำให้แสงไม่โพลาไรซ์เป็นแสงโพลาไรซ์บางส่วนหรือทั้งหมดโดยการสะท้อน จากภาพประกอบ 2-8 แสงธรรมชาติไม่โพลาไรซ์ตกกระทบบนผิวสะท้อนระหว่างวัสดุแสงโปร่งใสสองชั้น ซึ่งเรียก ระนาบที่มีรังสีตกกระทบบ รังสีสะท้อน และเส้นแนวฉาก (normal) กับผิวว่า ระนาบของการตกกระทบบ (plane of incidence) สำหรับมุมตกกระทบบส่วนใหญ่ คลื่นที่มีสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ ตั้งฉากกับระนาบการตกกระทบบ (ขนานกับผิวตกกระทบบ) ถูกสะท้อนได้ดีกว่าคลื่นที่มี $\vec{E}$ อยู่ในทิศทางอื่น ในกรณีนี้แสงสะท้อนเป็นแสงโพลาไรซ์บางส่วนในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของการตกกระทบบ



ภาพประกอบ 8 เมื่อแสงตกกระทบบนผิวสะท้อนที่มุมโพลาไรซ์แสงสะท้อนเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น

ที่มา: Hugh D. Young; Roger Freedman. (2008). *University Physics with Modern Physics*. p 1139.

แต่ที่มุมตกกระทบมุมหนึ่งที่เรียกว่ามุมโพลาไรซ์ θ_p แสงที่มี $\vec{E}$ อยู่ในระนาบของการตกกระทบบนผิวสะท้อนเลย แต่หักเหหมด ที่มุมตกกระทบเดียวกันนี้ แสงที่มี $\vec{E}$ ตั้งฉากกับระนาบของการตกกระทบบนผิวสะท้อนบางส่วนและหักเหบางส่วน ดังนั้นแสงสะท้อนจึงโพลาไรซ์ตั้งฉากกับระนาบของการตกกระทบบนผิวสะท้อน ดังในภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 เมื่อแสงตกกระทบบนผิวสะท้อนที่มุมโพลาไรซ์รังสีสะท้อนและรังสีหักเหทำมุมฉากกัน

ที่มา: Hugh D. Young; Roger Freedman. (2008). *University Physics with Modern Physics*. P.1139.

แสงหักเหเป็นแสงโพลาไรซ์บางส่วนในทิศที่ขนานกับระนาบนี้ แสงหักเหเป็นส่วนผสมของส่วนที่ขนานกับระนาบของการตกกระทบซึ่งถูกหักเหหมดกับส่วนที่เหลือของส่วนประกอบตั้งฉาก และเมื่อมุมตกกระทบเท่ากับมุมโพลาไรซ์ θ_p รังสีสะท้อนและรังสีหักเหทำมุมฉากกัน ดังภาพประกอบ 9 ในกรณีนี้มุมหักเห θ_b กลายเป็นมุมประกอบของ θ_p ดังนั้น $\theta_b = 90^\circ - \theta_p$ จากกฎการหักเห

$$n_a \sin \theta_p = n_b \sin \theta_b \quad (2-8)$$

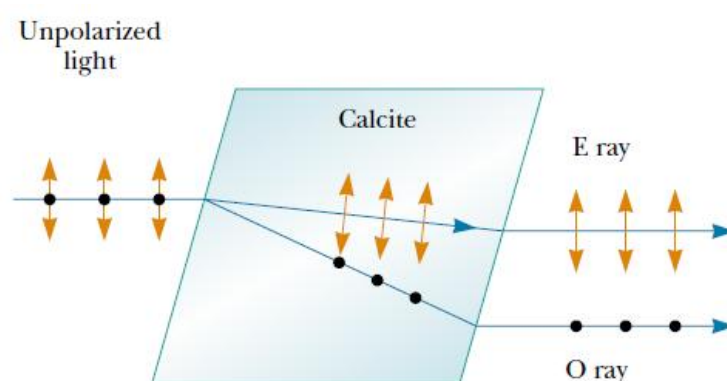
ดังนั้นพบว่า

$$n_a \sin \theta_p = n_b \sin(90^\circ - \theta_p) = n_b \cos \theta_p \quad (2-9)$$

$$\tan \theta_p = \frac{n_b}{n_a} \quad (\text{กฎของบรีวสเตอร์ (Brewster's law) สำหรับมุมโพลาไรซ์}) \quad (2-10)$$

โพลาไรเซชันโดยการหักเหสองแนว¹⁰ (polarization by double refraction)

เมื่อแสงตกกระทบเดินทางผ่านวัสดุออสัญฐาน (amorphous materials) เช่น แก้ว แสงจะเดินทางด้วยความเร็วที่เท่ากันในทุกทิศทาง เพราะแก้วมีดัชนีหักเหของแสงเพียงค่าเดียว แต่วัสดุออสัญฐานบางชนิด เช่น แคลไซต์ ควอตซ์ ความเร็วของแสงจะไม่เท่ากันในทุกทิศทาง เพราะวัสดุเหล่านี้มีดัชนีหักเหของแสงสองค่า แสงที่ตกกระทบวัสดุประเภทนี้จึงมีแสงหักเหออกมาสองแนว เรียกวัสดุชนิดนี้ว่า วัสดุหักเหสองแนว (double-refraction materials หรือ birefringent materials)

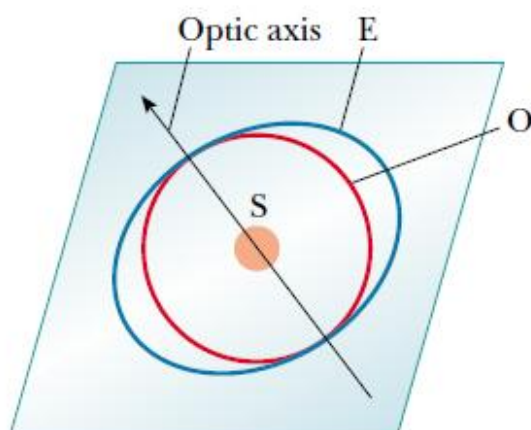


ภาพประกอบ 10 การหักเหสองแนวเมื่อแสงเดินทางผ่านวัสดุหักเหสองแนว

ที่มา: Serway; Jewett. (2008). *Physics for Scientists and Engineers*. P.1229.

¹⁰ Serway; Jewett. (2008). *Physics for Scientists and Engineers*. P.1229.

ภาพประกอบ 10 กำหนดให้ลำแสงไม่โพลาไรซ์ตกกระทบบั้ววัสดุหักเหสองแนว ในที่นี้คือ แคลไซต์พบว่าลำแสงแยกออกมาเป็นสองแนว ซึ่งมีความเร็วต่างกัน โดยรังสีหักเหของแสงทั้งสองเป็นแสงโพลาไรซ์ทั้งคู่ และมีทิศของโพลาไรเซชันตั้งฉากกัน โดยมีรังสีหนึ่งเรียกว่า รังสีปกติ (ordinary ray : o-ray) มีดัชนีหักเหของแสงที่มีค่าคงตัวเป็น n_o ไม่ขึ้นกับทิศทางการแผ่ของคลื่น กล่าวคือถ้านำแหล่งกำเนิดแสงไปไว้ในวัสดุรังสีปกติที่เกิดขึ้นจะให้หน้าคลื่นวงกลมออกมาดังภาพประกอบ 11



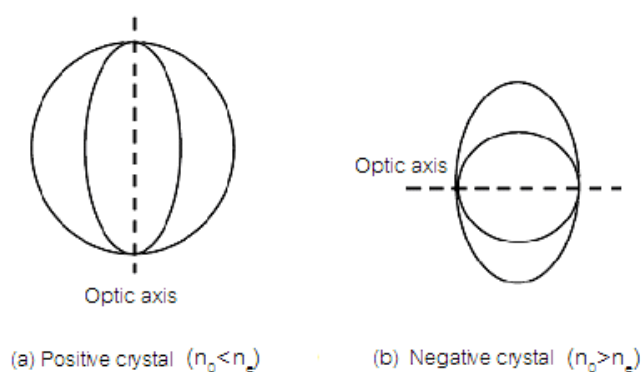
ภาพประกอบ 11 แหล่งกำเนิดแสงอยู่ภายในวัสดุหักเหสองแนวที่จุด S โดยให้หน้าคลื่นวงกลมในกรณีเป็นรังสีปกติ (o-ray) และวงรีในกรณีเป็นรังสีพิเศษ (e-ray)

ที่มา: Serway; Jewett. (2008). *Physics for Scientists and Engineers*. P.1229.

ส่วนรังสีหักเหอีกเส้นหนึ่งเรียกว่า รังสีพิเศษ (extraordinary ray : e-ray) เดินทางด้วยความเร็วของแสงในแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน ดัชนีหักเหแสงมีค่าเป็น n_e ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามทิศการแผ่ของคลื่น กล่าวคือถ้านำแหล่งกำเนิดแสงไปไว้ในวัสดุรังสีพิเศษที่เกิดขึ้นจะให้หน้าคลื่นวงรีออกมา

ในกรณีที่ n_o และ n_e มีค่าเท่ากันในทิศทางหนึ่ง ทำให้รังสีปกติและรังสีพิเศษมีอัตราเร็วเท่ากัน เรียกทิศทางนั้นว่า แกนทัศน (optic axis) โดยทิศที่ตั้งฉากกับแกนทัศนจะมีค่า n_o และ n_e ต่างกันมากที่สุด ซึ่งแสดงว่าความเร็วของรังสีทั้งสองมีความแตกต่างกันมากที่สุดในแนวนี้ ค่า $n_o - n_e$ จะเป็นค่าบวกหรือลบขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวกลางแต่ละชนิด

จากภาพประกอบ 12 (a) แสดงหน้าคลื่นในตัวกลางหักเหสองแนวที่มีค่า $n_o < n_e$ ทุกทิศทาง ยกเว้นแกนทัศน ความเร็วของรังสีปกติจะมากกว่าความเร็วของรังสีพิเศษ เรียกผลึก ของตัวกลางที่มีลักษณะเช่นนี้ว่า ผลึกบวก (positive crystal) ส่วนตัวกลางหักเหสองแนวที่มีค่า $n_o > n_e$ ทุกทิศทาง ยกเว้นแกนทัศน ความเร็วของรังสีพิเศษจะมากกว่าความเร็วของรังสีปกติ เรียกผลึกของตัวกลางที่มีลักษณะเช่นนี้ว่า ผลึกลบ (negative crystal) มีหน้าคลื่นดังภาพประกอบ 12 (b)

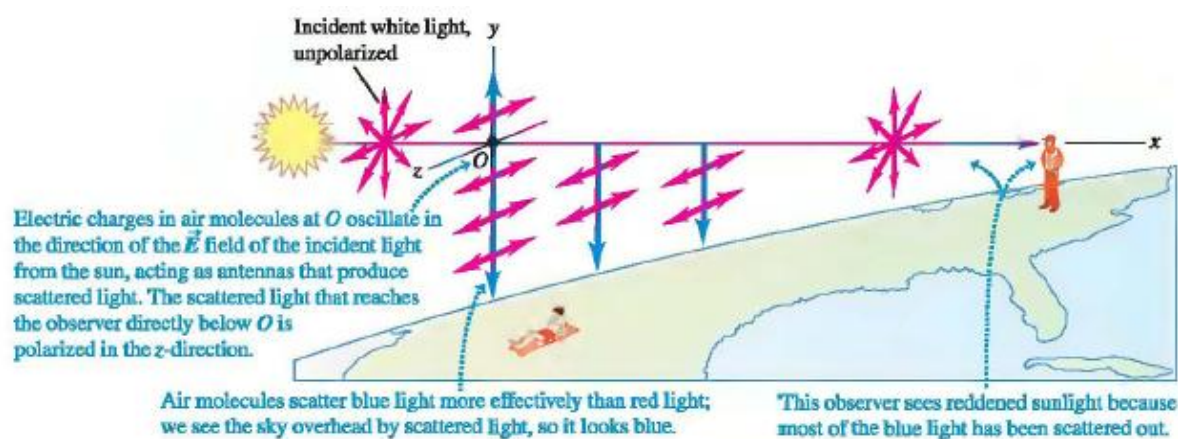


ภาพประกอบ 12 หน้าคลื่นในตัวกลางหักเหสองแนว

ที่มา: *Polarization*. (1998). GAG. p 7.

การกระเจิงของแสง (scattering of light)

เมื่อทำการมองท้องฟ้าตอนกลางวัน แสงที่เห็นคือแสงแดดที่ถูกดูดกลืน และแผ่ออกมาใหม่ในทิศทางต่างๆ กัน ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าการกระเจิง (scattering)



ภาพประกอบ 13 แสดงรายละเอียดบางส่วนของการกระเจิงของแสงแดดที่ไม่โพลาไรซ์มาจากด้านซ้ายตามแกน x และผ่านเหนือผู้สังเกตซึ่งกำลังมองขึ้นในแนวดิ่งตามแกน y

ที่มา: Hugh D. Young; Roger Freedman. (2008). *University Physics with Modern Physics*. P.1143.

จากภาพประกอบ 13 แสดงกระบวนการการกระเจิงของแสง เนื่องจากประจุไฟฟ้าในโมเลกุลของอากาศเกิดการสั่นในทิศทางของสนามไฟฟ้าของแสงตกกระทบที่มาจากดวงอาทิตย์ แสงที่ถูก

กระเจิงมีทิศทางของการโพลาไรซ์ในแนวแกน z โมเลกุลของอากาศกระเจิงแสงสีฟ้าได้มากกว่าแสงสีแดง ทำให้ผู้สังเกตที่อยู่ด้านล่างใต้จุด O เห็นท้องฟ้ามีสีฟ้า และเนื่องจากแสงสีฟ้าถูกกระเจิงออกจึงทำให้ผู้สังเกตที่อยู่ในแนวระดับมองเห็นท้องฟ้าเป็นสีแดง

การกระเจิงของแสง (scattering of light) เป็นกระบวนการที่เกิดเมื่อคลื่นแสงเคลื่อนที่ตกกระทบโมเลกุลหรืออนุภาคต่างๆ ในบรรยากาศ แล้วเกิดการกระเจิงออกมา โดยแสงที่กระเจิงออกมาจำนวนมากหรือน้อยขึ้นกับขนาดของโมเลกุลหรืออนุภาคที่คลื่นแสงตกกระทบ โดยแบ่งลักษณะของการกระเจิงของแสงได้ 2 ประเภท คือ

1. การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) คือ การกระเจิงที่ความถี่ของแสงตกกระทบเท่ากับความถี่ของแสงหลังเกิดการกระเจิง

2. การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (non-elastic scattering) คือ การกระเจิงที่ความถี่ของแสงตกกระทบ และความถี่ของแสงหลังเกิดการกระเจิงมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องมาจากการสูญเสียพลังงานบางส่วนให้กับโมเลกุลหรืออนุภาคที่แสงตกกระทบ ซึ่งทำให้แสงที่ถูกกระเจิงออกมามีความถี่เปลี่ยนไป

การกระเจิงของแสงเนื่องจากโมเลกุลหรืออนุภาคในชั้นบรรยากาศยังสามารถบอกคุณสมบัติของโมเลกุลหรืออนุภาคในชั้นบรรยากาศได้ โดยจำแนกตามอันตรกิริยาเชิงแสงเนื่องจากแสงเลเซอร์กับโมเลกุลหรืออนุภาคที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ ดังนี้

การกระเจิงแบบเรย์ลีย์ (Rayleigh scattering)

การกระเจิงแบบเรย์ลีย์เป็นการกระเจิงแบบยืดหยุ่น เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลหรืออนุภาคทรงกลมที่แสงจะถูกกระเจิงมีขนาดรัศมี (r) น้อยกว่าความยาวคลื่นของแสงตกกระทบ โดยการกระเจิงแบบเรย์ลีย์นั้นขึ้นอยู่กับสมการด้านล่าง

$$S_{\perp}(\theta) = -\alpha^3 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right) \quad \text{สำหรับโพลาไรเซชันในแนวตั้งฉาก} \quad (2-11)$$

$$S_{\parallel}(\theta) = -\alpha^3 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right) \cos(\theta) \quad \text{สำหรับโพลาไรเซชันในแนวขนาน} \quad (2-12)$$

เมื่อ $\alpha = kr = \frac{2\pi r}{\lambda}$

ถ้า r คือ รัศมีของโมเลกุลหรืออนุภาค

λ คือ ความยาวคลื่นของแสงในสุญญากาศ

n คือ ดัชนีของการหักเหของโมเลกุลหรืออนุภาค

ดังนั้นความเข้มของแสงที่ถูกกระเจิง คือ

$$I_{\perp} = I_{\perp o} \frac{(S_{\perp}(\theta))^2}{k^2 d^2} = I_{\perp o} \frac{16\pi^4 r^6 \left(\frac{n^2-1}{n^2+2}\right)^2}{\lambda^4 d^2} \text{ สำหรับโพลาริเซชันในแนวตั้งฉาก} \quad (2-13)$$

$$I_{\parallel} = I_{\parallel o} \frac{(S_{\parallel}(\theta))^2}{k^2 d^2} = I_{\parallel o} \frac{16\pi^4 r^6 \left(\frac{n^2-1}{n^2+2}\right)^2 \cos^2(\theta)}{\lambda^4 d^2} \quad (2-14)$$

สำหรับโพลาริเซชันในแนวขนาน

d คือ ระยะทางระหว่างโมเลกุลหรืออนุภาค กับจุดที่ทำการสังเกต (observing point)

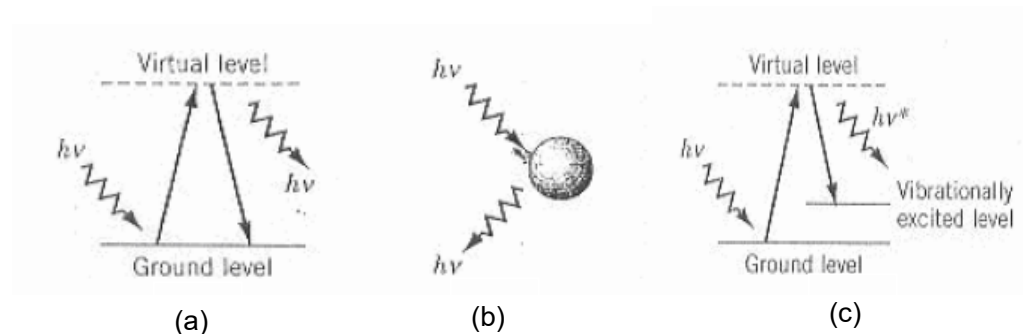
เมื่อ n และ d เป็นค่าคงที่ จะสังเกตได้ว่าความเข้มของแสงจากการกระเจิงแบบเรย์ลีนั้น เป็นสัดส่วนผกผันกับกำลังสี่ของความยาวคลื่น และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังหกของรัศมีของโมเลกุลหรืออนุภาคที่แสงตกกระทบ

การกระเจิงแบบมี (Mie scattering)

การกระเจิงแบบมีเป็นการกระเจิงแบบยืดหยุ่น ซึ่งมีสัญญาณที่กระเจิงกลับมาจากชั้นบรรยากาศจะมีขนาดของความยาวคลื่น และความถี่ของการกระเจิงไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นและความถี่ของแสงที่ปล่อยออกไปจากแหล่งกำเนิด

การกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering)

การกระเจิงแบบรามานเป็นการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น ที่มีความถี่เปลี่ยนแปลงไปหลังการกระเจิง ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปมากหรือน้อยขึ้นกับลักษณะของโมเลกุล ความแตกต่างของพลังงานระหว่างโฟตอนที่ตกกระทบกับโฟตอนที่คายออกมาขึ้นกับโมเลกุลที่แสงตกกระทบ และสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงในระดับของควอนตัม ในการศึกษารามานสเปกตรัมได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษามลพิษ เช่น การกระเจิงที่เกิดจากการยิงแสงเลเซอร์เข้าไปในกลุ่มควันของโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อนำไปวิเคราะห์จะแสดงให้เห็นถึงขนาดของโมเลกุลของสิ่งที่ปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น



ภาพประกอบ 14 อันตรกิริยาระหว่างแสงเลเซอร์ กับโมเลกุลหรืออนุภาคที่ตกกระทบ (a) แบบเรย์ลีห์ (b) แบบมี และ (c) แบบรามาน

ที่มา: Schoulepnikoff, L.; Van Den Bergh, H.; & Calpini, B. (1990). *Tropospheric air pollution monitoring lidar*. P.4878.

เลเซอร์ (laser)

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเลเซอร์

เรื่องราวเกี่ยวกับเลเซอร์¹¹ เหมือนว่าจะกลายเป็นเรื่องของเทคโนโลยีไปแล้ว ไม่มีฟิสิกส์ใหม่ ๆ ให้ตื่นเต้น แต่ทุกครั้งที่มาพิจารณา ก็เห็นว่าประกอบไปด้วยฟิสิกส์อย่างมากมาย แสงเลเซอร์มีลักษณะที่พิเศษต่างไปจากแสงแหล่งอื่นหลายประการ การทำความเข้าใจในฟิสิกส์ของเลเซอร์ นับเป็นโอกาสอันดี ที่จะได้มองภาพของฟิสิกส์ จากแง่มุมของเทคโนโลยีที่สำคัญอันหนึ่งของศตวรรษที่ 21 และการเข้าใจในฟิสิกส์ของเลเซอร์ จะเป็นกลไกสำคัญอันหนึ่ง ที่ทำให้สามารถนำเลเซอร์ไปใช้งานให้เกิดประโยชน์ได้อย่างเต็มที่

หลายคนนิยมที่จะเริ่มเรื่องเลเซอร์ด้วยชื่อเต็มของมัน คำว่าเลเซอร์¹² มาจากภาษาอังกฤษว่า L.A.S.E.R. ซึ่งย่อมาจาก Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation ถ้าแปลเป็นภาษาไทยตามตัวเลย จะได้ว่า “การขยายแสงโดยการปล่อยแสงแบบถูกกระตุ้น” คำว่าการขยายแสงก็คือ การเพิ่มจำนวนของโฟตอน หรืออาจจะหมายถึงการเพิ่มความเข้มแสงให้มากขึ้นก็ได้ ส่วนคำว่า emission of radiation ก็คือการปล่อยแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั่นเอง และมักจะเรียกสั้น ๆ ว่า

¹¹ กลุ่มวิจัย ทัศนศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2553. *ความรู้เบื้องต้นเรื่องเลเซอร์*. (Online).

¹² ขวัญ อารยะธนิตกุล; และคณะ. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2553. *เรียนรู้หลักการฟิสิกส์จากเลเซอร์*. (Online).

emission ส่วนคำว่า stimulated ที่ขยายอยู่ด้านหน้าของ emission ก็บ่งว่าเป็นการปล่อยแสงแบบที่ถูกกระตุ้น ซึ่งแตกต่างจากคำที่หลาย ๆ คนรู้จักคือการปล่อยแสงแบบที่เกิดขึ้นเอง (spontaneous emission) แสงเลเซอร์เป็นแสงที่มีสมบัติพิเศษแตกต่างจากแสงทั่ว ๆ ไป สมบัติดังกล่าวประกอบด้วย

- เป็นแสงสีเดียว (monochromaticity)
- มีความอาพันธ์ (coherence)
- มีทิศทางที่แน่นอน (directionality) และ
- มีความเข้ม (Intensity หรือ Brightness) สูงมาก

ด้วยสมบัติพิเศษเหล่านี้ ทำให้แสงเลเซอร์ถูกนำมาใช้ประโยชน์มากมาย เช่นทางด้านการสื่อสาร การทหาร บันทึกลง อุตสาหกรรมการแพทย์

การเกิดของแสงเลเซอร์

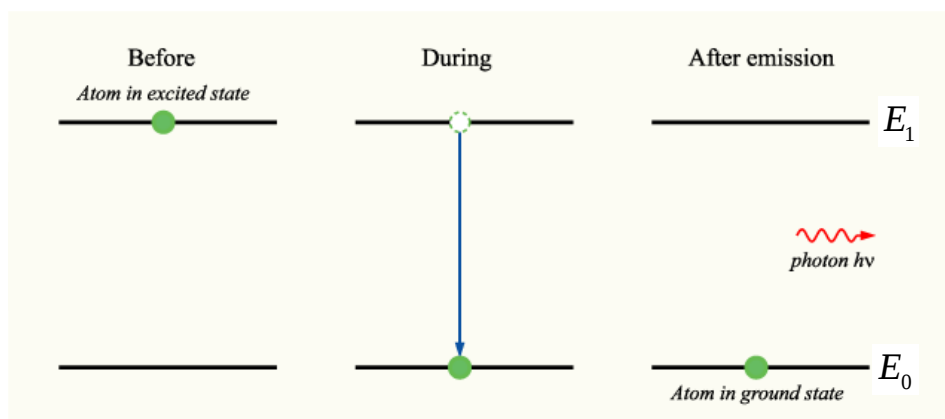
เพื่อจะเข้าใจการกำเนิดแสงเลเซอร์ ต้องเริ่มทำความเข้าใจตั้งแต่โครงสร้างของอะตอม ซึ่งเป็นหน่วยย่อยของธาตุหรือสสาร นักฟิสิกส์ได้เสนอแบบจำลองอะตอมว่าประกอบด้วยนิวเคลียสอยู่ตรงกลาง ซึ่งมีประจุบวก และมีอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบโคจรรอบ การอยู่หรือการจัดวางของอิเล็กตรอนในอะตอมทำให้อะตอม มีพลังงานค่าหนึ่ง ซึ่งอะตอมจะมีพลังงานได้เพียงบางค่าเท่านั้น ขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนและประจุบวกที่อยู่ในนิวเคลียสของอะตอมนั้น

ถ้าอะตอมได้รับพลังงานกระตุ้นที่เหมาะสม จะมีผลทำให้อะตอมมีพลังงานสูงขึ้น แต่โดยธรรมชาติแล้ว เมื่อเวลาผ่านไปอย่างรวดเร็ว อะตอมจะคายพลังงานส่วนเกินที่ได้รับออกมา เพื่อให้มีพลังงานต่ำลง อะตอมที่มีพลังงาน E_0 เป็นอะตอมที่อยู่ในสถานะพื้น (ground state) แต่ถ้าอะตอมที่มีพลังงานสูงขึ้นไป จะอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited states) ในสภาวะสมดุลความร้อน เมื่อพิจารณาอะตอมหนึ่งอะตอม จะมีพลังงานอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งจะสามารถอยู่ในชั้นพลังงานใดชั้นพลังงานหนึ่งได้ แต่ในธรรมชาติ ธาตุและสารประกอบจะประกอบด้วยอะตอมจำนวนมาก ดังนั้นในชั้นพลังงานของอะตอมสำหรับธาตุหรือสารประกอบจึงมีอะตอมหรือประชากรอะตอมกระจายอยู่ในจำนวนที่แตกต่างกัน ซึ่งโดยมากแล้ว ประชากรอะตอมในชั้นพลังงานต่ำจะมีมากกว่าประชากรอะตอมในชั้นพลังงานสูง

การเปลี่ยนชั้นพลังงานของประชากรอะตอมสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีพลังงานจากภายนอกมากระตุ้น เช่น การกระตุ้นโดยโฟตอน (อนุภาคของแสง) ที่มีพลังงานเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานพอดี กล่าวคือ ถ้าต้องการกระตุ้นอะตอมที่เดิมอยู่ในสถานะพื้น ให้ไปอยู่ในสถานะกระตุ้นที่ 1 โฟตอนแสงที่ไปกระตุ้นต้องมีพลังงานเท่ากับขนาดของผลต่าง $E_0 - E_1$

การเปลี่ยนชั้นพลังงานของอะตอมที่เกิดขึ้นโดยการดูดกลืนโฟตอนแสง เป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การดูดกลืนแสง (light absorption) แต่อะตอมที่อยู่ในชั้นพลังงาน E_1 จะไม่เสถียร เมื่อเวลาผ่านไปอย่างรวดเร็ว อะตอมจะกลับมาอยู่ในชั้นพลังงาน E_0 เช่นเดิม โดยปลดปล่อยพลังงานส่วนเกิน

ออกมาในรูปของโฟตอนแสง ที่มีพลังงานเท่ากับ $E_1 - E_0$ ปรากฏการณ์ปลดปล่อยโฟตอนโดยธรรมชาตินี้เรียกว่า การปล่อยแสงแบบเกิดขึ้นเอง (spontaneous emission)



ภาพประกอบ 15 แสดงการเปลี่ยนชั้นพลังงานของอะตอมจากสถานะกระตุ้น (E_1) ลงไปสถานะพื้น (E_0) แล้วทำให้เกิด การปล่อยแสงแบบเกิดขึ้นเอง (spontaneous emission)

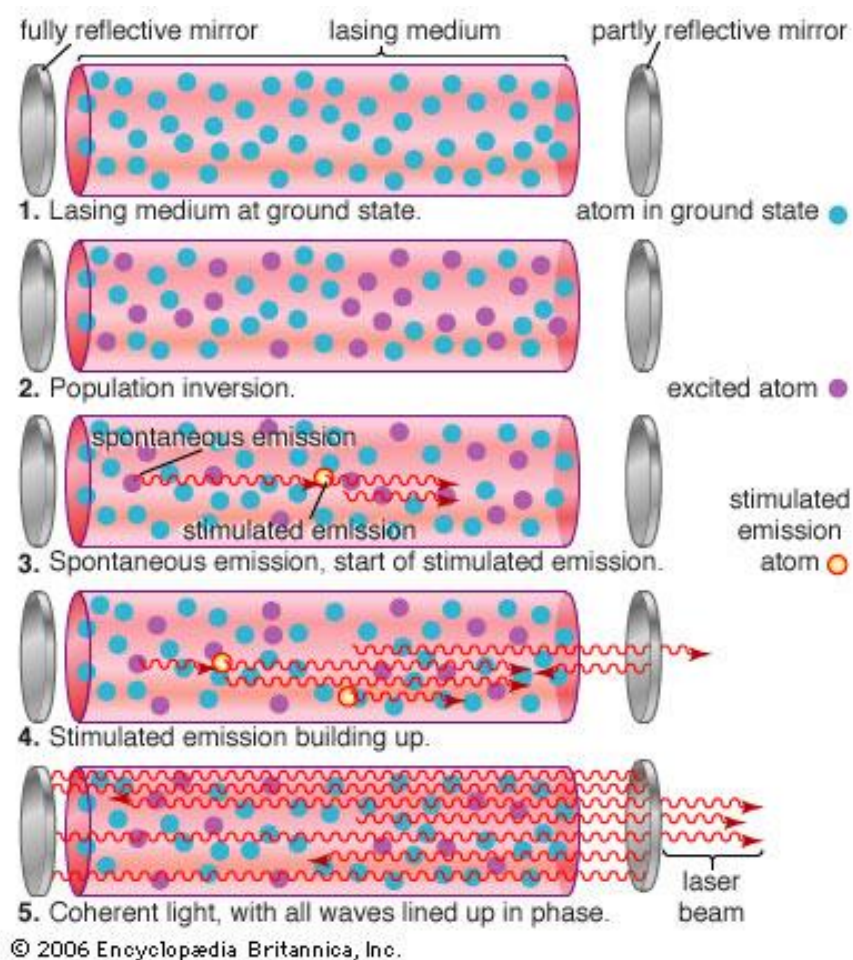
ที่มา: <http://www.answers.com/topic/spontaneous-emission>. สืบค้นเมื่อวันที่ 27

พฤษภาคม 2553. *Spontaneous emission*. (Online).

นอกเหนือจากปรากฏการณ์ปล่อยแสงแบบเกิดขึ้นเองแล้ว ยังสามารถทำให้เกิดการปล่อยแสงโดยการถูกกระตุ้น (stimulated emission) ได้ด้วย ซึ่งการปล่อยแสงโดยการถูกกระตุ้นนี้เป็นกลไกหลักในการกำเนิดแสงเลเซอร์ กล่าวคือ ในขณะที่อะตอมอยู่ในสถานะกระตุ้น เช่น อยู่ในชั้นพลังงาน E_1 ถ้ามีโฟตอนแสงจากภายนอกที่มีพลังงานเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงาน $E_1 - E_0$ เข้ามาชน จะทำให้อะตอมที่อยู่ในชั้นพลังงาน E_1 นี้ ถูกกระตุ้นให้ลงมายังชั้นพลังงาน E_0 โดยมีการคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับ $E_1 - E_0$ เนื่องจากโฟตอนแสงที่มาชนไม่ถูกดูดกลืนโดยอะตอมที่ถูกชน ทำให้จำนวนโฟตอนเพิ่มขึ้นเป็นสองอนุภาค (โฟตอนที่มากระตุ้น บวกกับโฟตอนที่ได้จากการเปลี่ยนสถานะของอะตอม) โฟตอนทั้งสองนี้มีพลังงานเท่ากัน มีความถี่เดียวกัน มีเฟสตรงกัน มีโพลาไรเซชันเหมือนกัน และเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน ซึ่งถ้าพิจารณาในมุมมองของคลื่นแล้ว จะพบว่าเมื่อแสงสองขบวนมีความถี่ตรงกัน มีเฟสตรงกัน เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน สามารถที่จะรวมกันในลักษณะที่เสริมกันได้ ทำให้ได้คลื่นรวมที่มีขนาดโตขึ้น เกิดเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การขยายสัญญาณแสง (light amplification) ขึ้น ถ้าสามารถทำให้เกิดการขยายสัญญาณแสงในลักษณะนี้กับอะตอมเป็นจำนวนมาก ๆ ได้ ก็จะทำให้ได้สัญญาณแสงที่มีความเข้มสูงออกมา

จากที่กล่าวมา พบว่าปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการที่จะทำให้เกิดการขยายแสงโดยการกระตุ้นได้มากๆ คือการทำให้มีประชากรอะตอมในสถานะกระตุ้นมาก ๆ ซึ่งในธรรมชาติเป็นไปได้ จึงต้องมีการหาวิธีการที่จะทำให้ประชากรอะตอมในสถานะกระตุ้น E_1 มากกว่าสถานะพื้น E_0

ปรากฏการณ์ที่ทำให้จำนวนประชากรอะตอมในชั้นพลังงานสูงมีมากกว่าประชากรในชั้นพลังงานต่ำ เรียกว่า ประชากรผกผัน (population inversion) ในทางปฏิบัติสามารถทำให้เกิดประชากรผกผันได้โดยการใช้พลังงานจากภายนอกปริมาณหนึ่งที่เพียงพอจะทำให้ประชากรอะตอมมีสถานะเปลี่ยนไปจากสถานะพื้น E_0 ไปยังสถานะกระตุ้น E_1 และทำให้การกระตุ้นประชากรอะตอมในสถานะกระตุ้นให้ตกกลับมายังสถานะพื้น เพื่อให้ประชากรอะตอมปลดปล่อยโฟตอนแสงเป็นจำนวนมากออกมา อย่างไรก็ตามการกระตุ้นประชากรอะตอมเพื่อให้มีการปล่อยแสงเพียงครั้งเดียวยังไม่สามารถทำได้แสงเลเซอร์ออกมา เนื่องจากในความเป็นจริง ในขณะที่เดียวกับที่เกิดการปล่อยแสงโดยการถูกกระตุ้น ก็จะมีการดูดกลืนแสงเกิดขึ้นด้วยโดยประชากรอะตอมในสถานะพื้น ทำให้ความเข้มแสงที่ได้มีปริมาณลดลง ดังนั้นเพื่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเข้มของสัญญาณแสง จึงต้องทำให้เกิดปรากฏการณ์ปล่อยแสงโดยการถูกกระตุ้นอย่างต่อเนื่อง โดยการทำให้โฟตอนแสงที่ได้จากการปลดปล่อยของประชากรอะตอม มากระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยแบบถูกกระตุ้นซ้ำแล้วซ้ำอีก จนกระทั่งสัญญาณแสงมีความเข้มสูงขึ้นจนถึงจุดเลเซอร์ (lasing point) หรือจุดออสซิลเลตของเลเซอร์ (laser oscillating point) แสงที่ได้ออกมาจึงมีสมบัติเป็นแสงเลเซอร์



ภาพประกอบ 16 แสดงกระบวนการเกิดแสงเลเซอร์ ตั้งแต่เริ่มต้นตัวกลางเลเซอร์มีอะตอมอยู่ในสถานะพื้น พอตัวกลางเลเซอร์ได้รับพลังงานทำให้อะตอมเริ่มถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ที่สถานะกระตุ้น จากนั้นอะตอมในสถานะกระตุ้นไม่เสถียรจึงลงมาอยู่ที่สถานะพื้นเกิดปล่อยแสงแบบเกิดขึ้นเอง แสงดังกล่าวเป็นตัวที่ไปทำให้อะตอมเกิดการปล่อยแสงโดยการถูกกระตุ้น เกิดขึ้นตอนจาก 2 มา 3 ขึ้นหลายครั้งจนในที่สุดก็ได้แสงเลเซอร์ออกมา

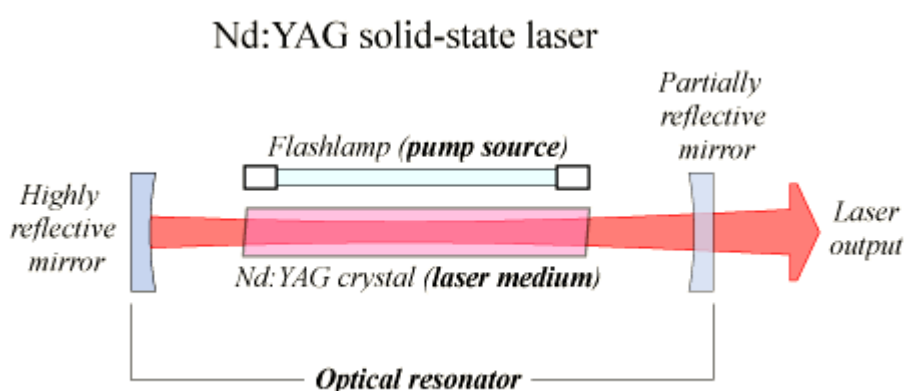
ที่มา: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/566401/stimulated-emission>.

สืบค้นเมื่อวันที่ 5 สิงหาคม 2553. *Stimulated emission*. (Online).

องค์ประกอบของเลเซอร์¹³

เมื่อนำปัจจัยที่กล่าวมาทั้งหมดในหัวข้อที่แล้วมาพิจารณา จะพบว่าในทางปฏิบัติ โครงสร้างของเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์จะต้องมีองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ

1. ตัวกลางเลเซอร์ (laser medium) เป็นวัสดุที่ถูกกระตุ้นแล้วให้แสงเลเซอร์ออกมา ซึ่งอาจเป็นแก๊ส ของแข็ง ของเหลว หรือสารกึ่งตัวนำ
2. ออปติคัลเรโซเนเตอร์ (optical resonator) เป็นส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดเลเซอร์ที่ทำให้เกิดการปล่อยแสงแบบถูกกระตุ้นซ้ำแล้วซ้ำอีกจนถึงจุดเลเซอร์ ซึ่งประกอบด้วยกระจก 2 แผ่น วางหันหน้าเข้าหากัน โดยระหว่างกลางมีตัวกลางเลเซอร์อยู่
3. แหล่งกำเนิดพลังงาน (energy source หรือ pump source) เป็นตัวกระตุ้นให้อะตอมอยู่ในสภาวะที่เป็นประชากรผกผัน



ภาพประกอบ 17 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดเลเซอร์ชนิด Nd:YAG Laser

ที่มา: http://www.absoluteastronomy.com/topics/Laser_construction. สืบค้นเมื่อวันที่ 27 พฤษภาคม 2553. *Laser Construction*. (Online).

กระจกที่ทำหน้าที่เป็นออปติคัลเรโซเนเตอร์สองบานนั้น มีความสามารถในการสะท้อนแสงได้ต่างกันเล็กน้อย กล่าวคือ กระจกแผ่นหลังตัวกลางเลเซอร์สามารถสะท้อนแสงได้หมด ในขณะที่กระจกแผ่นหน้าสะท้อนแสงได้เกือบหมด โดยมีปริมาณแสงบางส่วนทะลุผ่านไปได้ แสงที่ทะลุผ่านออกไปก็คือแสงเลเซอร์นั่นเอง

¹³ กลุ่มวิจัย ทัศนศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2553. *ความรู้เบื้องต้นเรื่องเลเซอร์*. (Online).

ชนิดของเลเซอร์

สามารถแบ่งชนิดของเลเซอร์ตามลักษณะของตัวกลางเลเซอร์ได้ดังนี้

1. Gas Laser: สารตัวกลางเลเซอร์มีลักษณะเป็นแก๊ส เช่น CO₂ Laser, Argon Laser, Xenon Laser, He-Ne Laser
2. Solid State Laser: ใช้สารตัวกลางเลเซอร์ที่เป็นแท่งผลึกแข็ง เช่น Nd:YAG Laser, Ruby Laser
3. Dye Laser: สารตัวกลางมีลักษณะเป็นของเหลว เช่น Rhodamin 6G Laser
4. Semiconductor Laser: เป็นเลเซอร์ที่ใช้สารตัวกลางเลเซอร์เป็นสารกึ่งตัวนำ เช่น Diode Laser ชนิดต่าง ๆ

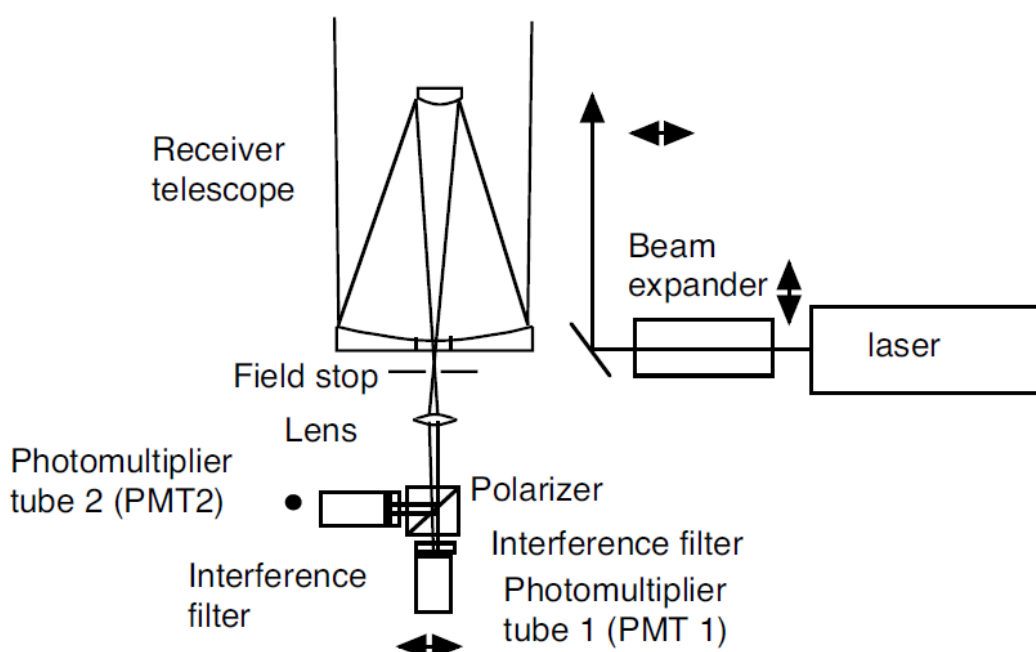
เลเซอร์ที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ได้แก่ He-Ne Laser, Argon-Ion Laser, Carbon dioxide Laser, Ruby Laser, Nd:YAG Laser, Semiconductor Laser และ Excimer Laser

ไลดาร์: เครื่องมือ ทฤษฎี และการประยุกต์ (lidar : instrumatation, theory and applications)

เครื่องมือ (instrumatation)

ไลดาร์¹⁴ หรือ เลเซอร์เลดาร์เป็นเครื่องมือยิงพัลส์ของแสงเลเซอร์ไปที่ชั้นบรรยากาศ และบันทึกแสงที่ถูกกระเจิงกลับ (backscattered light) เนื่องจากละอองลอย และเมฆ เพื่อสังเกตการแจกแจงของละอองลอยและเมฆในชั้นบรรยากาศ โดยสังเกตโครงสร้างของสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับ หรือสัมประสิทธิ์การลดทอน ทำให้สามารถบอกถึงความแตกต่างของก้อนเมฆที่เป็นน้ำและก้อนเมฆที่เป็นน้ำแข็งได้ และตรวจวัดประเภทของละอองลอยได้ ไลดาร์ที่ใช้ในการวัดครั้งนี้คือ NIES Compact Mie Scattering Lidar ซึ่งเป็นไลดาร์ที่มีหัววัดโพลาไรเซชันทั้ง 2 ทิศทางดังภาพประกอบ 2-18

¹⁴ N. Sugimoto. (2001). *NIES Compact Mie Scattering Lidar (532nm, dual polarization)*. User manual.



ภาพประกอบ 18 โครงสร้างส่วนประกอบของ Mie scattering lidar

ที่มา: N. Sugimoto. (2001). *NIES Compact Mie Scattering Lidar (532nm, dual polarization)*. User manual. p.1.

NIES Compact Mie Scattering Lidar ใช้ Nd:YAG เลเซอร์ ที่มีความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร และ 1064 นาโนเมตร และมีทิศทางของการวัดตั้งฉากกับแนวราบของขอบฟ้า ลำแสงเลเซอร์ที่ถูกส่งไปเป็นลำแสงที่มีโพลาไรเซชันในแนวนอน (ตั้งฉากกับแสงที่ออกจากแหล่งกำเนิด) ภายหลังจากผ่านกล่องขยายลำแสง (beam expander) และแสงที่ถูกกระเจิงก็ถูกรับแสงด้วยกล้องโทรทรรศน์ชนิดชมิทแคสซีเกรน (Schmidt Cassegrain telescope) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร แสงที่รับมาจะเข้ามายังกล้องรับแสง และถูกแยกเป็นโพลาไรเซชันในแนวตั้งและในแนวนอนเทียบกับโพลาไรเซชันของแสงที่ยังออกไปยังชั้นบรรยากาศ โดยตัวทำแสงโพลาไรซ์ (polarizer) โพลาไรเซชันที่ถูกแยกจะถูกส่งไปยังหลอดโฟโตมัลติพลีเออร์ (PMT : photomultiplier tube) ทั้งสองอันคือ PMT1 และ PMT2

สัญญาณที่ไลดาร์ตรวจพบนั้นถูกบันทึกโดยเครื่องดิจิทัลลอจิสติกส์ แล้วส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์รับข้อมูล (data acquisition computer) สุดท้ายข้อมูลจะถูกเฉลี่ย และถูกเก็บบนฮาร์ดดิสก์



ภาพประกอบ 19 แสดงภาพของระบบของไลดาร์

ที่มา: อัมพร รุ่งแจ้ง. (2552). *ความน่าเชื่อถือของการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเชิงปริมาตรของละอองลอยในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์โดยเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี*. หน้า 45.

จากภาพประกอบ19 ซึ่งไม่ได้แสดงในส่วนของตัวส่งกำลังเลเซอร์ และส่วนของคอมพิวเตอร์ ได้แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของไลดาร์ 5 ส่วนคือ

1. ส่วนหัวไลดาร์ (lidar head)
2. ตัวส่งกำลังเลเซอร์
3. เครื่องดิจิทัลออสซิลโลสโคป
4. คอมพิวเตอร์รับข้อมูล (data acquisition computer)
5. คอมพิวเตอร์วิเคราะห์ข้อมูล

โดยคุณสมบัติของเครื่องไลดาร์มีดังนี้

ตาราง 2 ตารางแสดงคุณสมบัติเฉพาะของไลดาร์

Laser	Flashlamp pumped Nd:YAG laser	
	Output power	532 nm 30 mJ/pulse (1064 nm 20 mJ/pulse)
	Repetition rate	10 pps
Telescope	Schmidt Cassegrain	
	Diameter	20 cm
	Field of view	1 mrad
Detector	Photomultiplier tubes (532 nm dual polarization)	
Data acquisition	Digital oscilloscope	

ที่มา: N. Sugimoto. (2001). *NIES Compact Mie Scattering Lidar (532nm, dual polarization)*. User manual. p.2.

ส่วนหัวไลดาร์ ประกอบด้วย เลเซอร์, กล้องขยายลำแสงเลเซอร์, เครื่องส่งเชิงแสง (transmitter optics), กล้องรับแสง (receiver telescope), กระจกเบนแสง (turning mirror), ตัวทำแสงโพลาไรซ์ (polarizer), ตัวกรองแสงรบกวน (interference filter), หลอดโฟโตมัลติพลีเออร์ (photomultiplier tube), ตัวปรับหลอดโฟโตมัลติพลีเออร์ (PMT adjuster) และตัวส่งกำลังให้หลอดโฟโตมัลติพลีเออร์ (PMT power supply)

เลเซอร์ที่ใช้ในระบบไลดาร์นั้นเป็น Quantel model Brilliant Ultra ซึ่งมีคุณสมบัติผลิตฮาร์โมนิกที่สอง แสงเลเซอร์ที่ออกมา มีพลังงาน 30 มิลลิจูล ที่ 532 นาโนเมตร และ 20 มิลลิจูล ที่ 1064 นาโนเมตรที่เวลาเดียวกัน มีพัลส์ของอัตราส่วนการปล่อยแสงซ้ำสูงสุด 20 เฮิร์ตซ์ แต่ในระบบนี้ถูกใช้งานเพียง 10 เฮิร์ตซ์ พัลส์ของการปล่อยแสงอย่างต่อเนื่องประมาณ 10 นาโนวินาที ลำแสงเลเซอร์ที่ออกมาถูกทำให้ขนานโดยผ่านกล้องขยายลำแสง 5 ครั้ง และถูกทำให้แสงอยู่ในแนวตั้งที่ตั้งฉากกับขอบฟ้า พร้อมทั้งจะทำการส่ง โดยกระจกส่งผ่าน (transmitter mirror) มีทิศทางของโพลาไรเซชันของแสงเลเซอร์ที่ออกมาอยู่ในแนวตั้งที่ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร

กล้องรับแสงที่กระเจิงกลับมานั้นเป็นกล้องโทรทรรศน์ชนิดชมิทแคสซีเกรน (Schmidt Cassegrain telescope) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร สนามของการสังเกต (field of view) ของกล้องรับแสงขึ้นกับการปรับตำแหน่งของช่องที่อยู่บริเวณระนาบโฟกัสของกล้อง โดยปกติอยู่ที่ 1 มิลลิเรเดียน มีความยาวโฟกัสเชิงคร่าวๆ ของกล้องคือ 2 เมตร และมีขนาดของช่องดังกล่าวคือ 2 มิลลิเมตร

แสงที่รับกลับมาเป็นแสงขนานเข้ามายังเลนส์ (ความยาวโฟกัส 100 นาโนเมตร) และตรงไปยังปริซึมที่ใช้ทำแสงโพลาไรซ์ (polarizer prism) เพื่อแยกแสงโพลาไรซ์ทั้งสองแนวออกจากกัน จากนั้นแสงโพลาไรซ์ทั้งสองก็พุ่งตรงไปยังหลอดโฟโตมัลติพลีเออร์ทั้งสองอัน ซึ่งมีตัวกรองแสงรบกวน (interference filter) มีหน้าที่ลบแสงที่มาจากการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ออก หลอดทั้งสองเป็นรุ่น Hamamatsu H6780 ภายในหลอดนั้นมีวงจรแรงดันไฟฟ้าสูง ภายนอกหลอดมีตัวปรับหลอดโฟโตมัลติพลีเออร์ที่ประกอบด้วย โปเทนชิโอมิเตอร์ (potentiometer) ซึ่งเป็นตัวต้านทานที่สามารถปรับค่าได้ชนิดหนึ่งเพื่อใช้ควบคุมแรงดันไฟฟ้าของหลอดโฟโตมัลติพลีเออร์

คอมพิวเตอร์ที่ใช้รับข้อมูลถูกติดตั้งด้วยตัวปฏิบัติการลินุกซ์ โดยตัวซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวัดของไลดาร์นั้นถูกเขียนด้วยภาษาซี โดยมีฟังก์ชันหลักคือการเก็บข้อมูลตลอดเวลา, การควบคุมการทำงานของเลเซอร์ (อุ่นเครื่อง เริ่ม และหยุดเลเซอร์) , การควบคุมการทำงานของเครื่องดิจิทัลออสซิลโลสโคป (ตัวเริ่มต้นการทำงาน, การตั้งค่าตัวแปร, การบันทึกข้อมูล, การย้ายข้อมูลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์), การบันทึกข้อมูลลงบนฮาร์ดดิสก์

คอมพิวเตอร์วิเคราะห์ข้อมูลถูกเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์รับข้อมูลผ่านทางระบบอินเทอร์เน็ต ซึ่งถูกติดตั้งด้วยตัวปฏิบัติการวินโดวส์ 98 ฮาร์ดดิสก์ของเครื่องคอมพิวเตอร์รับข้อมูลถูกแลกเปลี่ยน (โดยใช้ซอฟต์แวร์ Samba ของลินุกซ์) ข้อมูลที่ได้สามารถอ่านได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูล (ฮาร์ดดิสก์ได้ถูกบรรจุอยู่ในเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้เก็บข้อมูล)

ทฤษฎี และการประยุกต์ (theory and applications)

ไลดาร์สำหรับการตรวจวัดละอองลอย¹⁵ มีการบันทึกการกระเจิงกลับของแสงจากบรรยากาศเนื่องจากโมเลกุลและอนุภาค โดยสัญญาณที่กลับมาถึงหัววัดทำให้สามารถหาอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับของละอองลอยต่อโมเลกุลของแก๊สที่ความยาวคลื่นค่าหนึ่ง และการวัดค่าดีโพลาไรเซชัน (depolarization) ทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับการแจกแจงขนาดของละอองลอย และองค์ประกอบของละอองลอย

สมการไลดาร์เป็นสมการที่ใช้หาจำนวนโฟตอนที่วัดได้ด้วยระบบไลดาร์ ซึ่งพิจารณาทั้งพารามิเตอร์ของเครื่องมือและปริมาณเชิงธรณีฟิสิกส์ สมการไลดาร์ทั่วไปประกอบด้วยการกระเจิงทุกรูปแบบที่สามารถใช้คำนวณความแรงของสัญญาณสำหรับระบบไลดาร์ใดๆ โดยจำนวนโฟตอนที่วัดได้ก็คือจำนวนพัลส์ที่ออกมาจากหัววัดต่อเลเซอร์พัลส์ ในกรณีนี้จะกล่าวถึงเพียงไลดาร์แบบ

¹⁵ ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์; และอรุณีย์ อินทศร. (2550). *การศึกษาไฟโรไฟล์แนวตั้งของละอองลอยในประเทศไทยด้วยเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี*. รายงานการวิจัย. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

โมโนสแตติกแกนเดียว¹⁶ ถ้าให้ P_0 เป็นสัญญาณเลเซอร์ที่ปล่อยออกไป และ $P(z)$ เป็นสัญญาณกระเจิงกลับที่วัดได้ จะได้

$$P(z) = P_0 k \frac{ct}{2} \frac{A}{z^2} \beta(z) T^2(z) \quad (2-15)$$

ในที่นี้ k คือ ประสิทธิภาพของเครื่องมือที่เป็นฟังก์ชันคงตัว ct หมายถึงระยะทางในการเดินทางของเลเซอร์พัลส์ในบรรยากาศ (แฟกเตอร์ 2 แสดงการเดินทางของพัลส์ที่ไปและกลับ) A/z^2 คือมุมตัน (solid angle) ของการรวบรวมสัญญาณภายในพื้นที่ A ของกล้องโทรทรรศน์ ดังนั้นในการยิงเลเซอร์พัลส์ออกไป ระยะทาง z ในบรรยากาศที่ทำการวัดสัมพันธ์โดยตรงกับเวลาที่พัลส์ออกไปและเดินทางกลับยังหัววัดนับเวลาทั้งหมดของการเดินทางเป็นเวลา 2 เท่าของการเดินทางได้ระยะทาง z ดังนั้นแต่ละ 10 ns หลังจากปล่อยเลเซอร์พัลส์ออกไประยะทางที่พัลส์เดินทางขึ้นไปบนท้องฟ้าคือ 1.5 m เทอม $\beta(z)$ คือสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเชิงปริมาตร (volume backscattering coefficient) ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณโฟตอนที่กระเจิงกลับเมื่อลำแสงผ่านความหนาของบรรยากาศ มีหน่วยเป็น $\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$ เมื่อจำนวนโฟตอนที่กระเจิงกลับขึ้นกับมุมของเครื่องมือที่รวบรวมโฟตอน และเทอม $T(z)$ หมายถึงความสามารถในการส่งผ่าน (transmissibility) หรือแฟกเตอร์ของการผ่านไปได้ในการที่โฟตอนเดินทางผ่านบรรยากาศจากพื้นดินไปได้ระยะทาง z ในสมการ (2-15) เทอมนี้ยกกำลังสองเนื่องจากโฟตอนเดินทางออกไปและกลับมาจากระยะทาง z โดยปกติเทอมของการลดทอนนี้ (attenuation) มักแสดงอยู่ในรูปเอ็กโพเนนเชียลที่เป็นค่าลบ (negative exponential) ตามกฎของบูเกอร์ – แลมเบิร์ต (Bouguer – Lambert law) นั่นคือ

$$T(z) = e^{-\tau(z)} = \exp\left(-\int_0^z \alpha(z') dz'\right) \quad (2-16)$$

ในที่นี้ $\tau(z)$ หมายถึงความลึกเชิงแสง (optical depth) ของบรรยากาศตลอดความสูง z และเรียก $\alpha(z)$ ว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (linear attenuation coefficient) หรือสัมประสิทธิ์ของการสิ้นสุดเชิงปริมาตร (volume extinction coefficient) ของบรรยากาศที่ความสูงระหว่าง 0 ถึง z มีหน่วยเป็น m^{-1} ซึ่งสัมประสิทธิ์นี้รวมการสูญหายไปของแสงเนื่องจากทั้งการกระเจิงและการดูดกลืนโดยสมการ (2-16) นี้เป็นที่ยอมรับเมื่อลำแสงเลเซอร์ผ่านบรรยากาศที่ค่อนข้างโปร่งแสง

¹⁶ Biral, A.R. (2002). *Analysis of the 2002 Malargue LIDAR Data Through Fernald's method*, Report 2003.

สมการ (2-15) มีหลายเทอมที่เป็นค่าคงตัว ดังนั้นอาจแสดงสมการในเทอมของสัญญาณการแก้ไขพิสัย (range corrected signal) (หรือสัญญาณที่ภาวะปกติเชิงพิสัย (range normalized signal)) ดังนี้

$$X(z) = P(z) * z^2 = C\beta(z) \exp(-2 \int_0^z \alpha(z') dz') \quad (2-17)$$

สัญญาณการแก้ไขพิสัย $X(z)$ เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับ 2 ตัวแปร $\beta(z)$ และ $\alpha(z)$ และจากทฤษฎีการกระเจิงของแสง สามารถแสดงความสัมพันธ์ของ α_m และ β_m เมื่อ m คือโมเลกุล ได้ดังนี้

$$S_m = \frac{\alpha_m}{\beta_m} = \frac{8\pi}{3} \text{ sr} \quad (2-18)$$

โดย อัตราส่วนไลดาร์ (lidar ratio) S_m นี้ไม่ขึ้นกับความสูง สำหรับละอองลอยความสัมพันธ์ที่คล้ายกันนี้ยังไม่ทราบค่า แต่อย่างไรก็ตามเฟร์นัลด์ (Fernald)¹⁷ ได้เสนอความสัมพันธ์

$$S_a = \frac{\alpha_a(z)}{\beta_a(z)} \quad (2-19)$$

เมื่อ a คือละอองลอย เรียก S_a นี้ว่าอัตราส่วนไลดาร์ (lidar ratio) ซึ่งขึ้นกับรูปแบบของละอองลอย ที่กำหนดว่ามีค่าอยู่ในพิสัย $10 \text{ sr} < S_a < 100 \text{ sr}$ บรรยากาศที่สะอาดจะมีค่า S_a อยู่ใกล้ค่าจำกัดต่ำสุด บรรยากาศที่มีมลภาวะมีค่า S_a มากกว่า 40 sr โดย S_m และ S_a มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$S = S_a + S_m \quad (2-20)$$

ความลึกเชิงแสงของละอองลอย (aerosol optical depth : AOD)

จากสมการ 2-16 ความลึกเชิงแสงของละอองลอยมีสมการคือ

¹⁷ Biral, A.R. (2002). *Analysis of the 2002 Malargue LIDAR Data Through Fernald's method*, Report 2003.

$$\tau_a = \int_0^z \alpha(z') dz' \quad (2-21)$$

ค่า AOD นี้อาจหาได้จากเครื่องวัดการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ (solar radiometer) แต่มีขีดจำกัดที่ว่าเครื่องวัดการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์นี้ทำให้ได้ค่า AOD ของบรรยากาศที่รวบรวมจากพื้นดินจนถึงบรรยากาศบนสุด ขณะที่ไลดาร์ทั่วไปวัดได้ในช่วงเพียงหลาย ๆ กิโลเมตรขึ้นไปเท่านั้น

ภาคตัดขวางการกระเจิงของเมฆมีค่าสูงมากแต่ความลึกเชิงแสงหรือความหนาเชิงแสง (optical thickness) มีค่ามากพอต่อการลดทอนสัญญาณไลดาร์ที่กลับมาได้อย่างสมบูรณ์ในระยะทางไม่กี่ร้อยเมตร ขณะที่เกิดการกระเจิงทวีคูณ (multiple scattering) จากเมฆหมอกน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้ แต่การกระเจิงทวีคูณมีผลมากในเมฆ ลักษณะสัญญาณไลดาร์ที่เกิดจากเมฆมีความแตกต่างจากของละอองลอยในบรรยากาศมาก

อัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน (depolarization ratio)

ในการวัดค่าดีโพลาไรเซชันของบรรยากาศด้วยไลดาร์สามารถนำมาใช้แสดงความแตกต่างระหว่างเฟสที่เป็นของเหลวและของแข็งของน้ำในบรรยากาศได้ ปริมาณที่แสดงความเป็นโพลาไรเซชันคือ อัตราส่วนดีโพลาไรเซชันเชิงแสง

$$\delta = \frac{P_{\perp}}{P_{\parallel}} \quad (2-22)$$

ในที่นี้ $P_{\perp}$ และ $P_{\parallel}$ คือ ความเข้มของสัญญาณกระเจิงกลับที่วัดได้ที่เป็นสัญญาณโพลาไรซ์ตั้งฉาก และขนานตามลำดับเทียบกับแกนโพลาไรซ์ของสัญญาณโพลาไรซ์ที่ปล่อยออกไป สัญญาณที่มีโพลาไรซ์เชิงเส้นของลำเลเซอร์ที่กระเจิงกลับจากอนุภาคทรงกลมจะเป็นโพลาไรซ์เชิงเส้นทั้งหมด ทำให้ $\delta = 0$ อนุภาคที่สามารถสมมติให้มีรูปร่างทรงกลมได้ในกรณีที่เป็น เมฆ หมอก และหยดน้ำฝนเล็ก ๆ ค่าดีโพลาไรเซชันของโมเลกุลบริสุทธิ์มีค่าไม่เป็นศูนย์ เนื่องจากความไม่สมมาตร (anisotropy) ของอากาศ ถ้าอนุภาคมีลักษณะไม่เป็นทรงกลม หรือสัญญาณกระเจิงกลับประกอบด้วยการกระเจิงทวีคูณสัญญาณที่กลับมาก็จะประกอบด้วยองค์ประกอบของการโพลาไรซ์ที่มีสองแบบ ($0 < \delta < 1$) การเปลี่ยนแปลงน้ำแข็งไปเป็นน้ำจะแสดงการลดลงของอัตราส่วนดีโพลาไรเซชันเชิงเส้น ผลของการกระเจิงทวีคูณทำให้อัตราส่วนดีโพลาไรเซชันเชิงเส้นมีค่าเพิ่มขึ้น ถ้าค่านี้มากกว่าอัตราส่วนดีโพลาไรเซชันเชิงเส้นของผลึกน้ำแข็ง ก็ไม่สามารถสังเกตความแตกต่างของน้ำแข็งและน้ำได้ ข้อมูลละเอียดใน

การกำหนดค่าอัตราส่วนดีโพลาร์ไรเซชันเป็นค่าร้อยละ ในการพิจารณารูปร่างของอนุภาคตามค่าอัตราส่วนดีโพลาร์ไรเซชันโดยแบ่งได้ดังตาราง

ตาราง 3 การแบ่งอนุภาคตามร้อยละของค่าอัตราส่วนดีโพลาร์ไรเซชัน (δ)

ร้อยละของค่าอัตราส่วนดีโพลาร์ไรเซชัน (δ)	รูปร่างของอนุภาค
0	อนุภาคทรงกลม (Spherical particle)
0 – 10	อนุภาคนาโนขนาดเล็กมาก มีรูปร่างใกล้เคียงทรงกลม เช่น ละอองลอยมลพิษทางอากาศ เป็นต้น
10 – 30	อนุภาคที่มีรูปร่างไม่เป็นทรงกลม เช่น ฝุ่น ละอองลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวล ผลึกน้ำแข็ง เป็นต้น
30 ขึ้นไป	อนุภาคที่ทำให้เกิดการกระเจิงทวีคูณ (Multiple Scattering) เช่น เมฆ

วิธีการแก้สมการไลดาร์¹⁸

การแก้สมการไลดาร์ (2-17) อาจสมมติว่าแฟกเตอร์ C ของระบบเป็นค่าคงที่ทราบค่า ก็จะได้เหลือ 2 แฟกเตอร์ที่ไม่ทราบค่าต่อการวัดค่าหนึ่ง ซึ่งแก้ปัญหตามหลักคณิตศาสตร์ไม่ได้ถ้าไม่มีการใช้สมมติฐาน วิธีการแก้สมการแบบผกผันของเฟอร์นันด์ ที่สมมติความสัมพันธ์ $\beta(z) = \alpha(z)$ (ถ้าคิดว่าไม่มีกระบวนการการดูดกลืนแสง) ดังนี้

$$X(z) = C\alpha(z) \exp(-2 \int_0^z \alpha(z') dz') \quad (2-23)$$

เพื่อให้การแก้สมการนี้สมบูรณ์ ในเบื้องต้นควรทราบค่า β และ α ที่ตำแหน่งหนึ่งในบรรยากาศนั้นคือที่ตำแหน่งความสูงวิกฤต (critical height) Z_c ที่เป็นค่าเชิงเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition value) ซึ่งวิธีการแก้สมการแบบผกผันนี้ เคลทท์ (Klett) ได้เสนอความสูงวิกฤตให้เป็นตำแหน่งที่สูงมาก ๆ ในบรรยากาศ ที่เคลทท์เรียกว่า การแก้แบบที่ไกลสุดของเคลทท์ (Klett's Far-end solution) โดยคิดว่าละอองลอยส่วนมากอยู่หนาแน่นเหนือพื้นดินในกิโลเมตรแรก ๆ ดังนั้นที่

¹⁸ Reagan, J.A. et al. (1989). *Lidar Sensing of Aerosols and Clouds in the Troposphere and Stratosphere*, Proc.of the IEEE, 77(3), 433-445.

ความสูงวิกฤต Z_c ค่า β และ α ของละอองลอยมีค่าประมาณศูนย์ ดังนั้นในการแก้แบบที่ใกล้เคียงสุดของเคลทท์สำหรับ $Z < Z_c$ จะได้

$$\beta_a(z) + \beta_m(z) = \frac{X(z)C(z)}{\frac{X(z_c)}{\beta_a(z_c) + \beta_m(z_c)} + 2S_a \int_z^{z_c} X(z')C(z')dz'} \quad (2-24)$$

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

โดยที่ m และ a แสดงโมเลกุลและละอองลอยตามลำดับ

จากสมมติฐานให้บรรยากาศเป็นเอกพันธ์ของงานวิจัยของไอโอกิเบะ¹⁹ (Iokibe และคณะ) ได้กำหนดให้ $\beta_a(z_c) = 0 \text{ (m}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{)}$ และ S_a เป็นค่าคงตัวเท่ากับ 35 sr งานวิจัยของศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์ และคณะ²⁰ ได้ค่าความสูงวิกฤตคือ 15,000 เมตร และค่า $\beta_m(z) = \beta_m(z_c)$ คำนวณได้จากสมการ

$$\ln X(z_c) = \ln \beta_m(z_c) - 2S_z \beta_m(z_c) \quad (2-25)$$

เมื่อ $X(z_c)$ คือ ค่าสัญญาณแก๊งเชิงพิสัยที่ความสูงวิกฤต

S คือ อัตราส่วนไลดาร์โดย $S = S_a + S_m$

¹⁹ Iokibe, K., Toyota, Y., Wada, O.; & Koga, R. (2005). *A Scheme to Classify Clouds with the Depolarization Ratio and Backscattering Coefficient Measured by Lidar*, Memoirs of the Faculty of Engineering, Okayama University, Vol.39, pp. 93-101.

²⁰ Ruangrungrate, S.; Intason, A.; & Chabangbon, A. (2008). *Tropospheric Aerosol Volume Backscattering Coefficients Determination Using Mie lidar at Phimai District, Thailand*. Proceedings of the International Symposia on Geoscience Resources and Environments of Asian Terranes (GREAT 2008). p 544.

ความรู้พื้นฐานโปรแกรม MATLAB

MATLAB²¹ เป็นโปรแกรมที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับงานทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ โครงสร้างพื้นฐานการคำนวณของโปรแกรม MATLAB อยู่ในรูปของเวกเตอร์หรือเมทริกซ์ ซึ่งเป็นที่มาของชื่อโปรแกรมด้วย กล่าวคือ MATLAB เป็นคำย่อสองคำในภาษาอังกฤษคือ MATrix LABoratory จุดเด่นของโปรแกรม MATLAB คือการที่มีชุดคำสั่งจำนวนมากสำหรับการประมวลผลข้อมูลที่บรรจุอยู่ในเมทริกซ์ครอบคลุมทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ทั้งที่เป็นพื้นฐานและการประยุกต์อย่างกว้างขวางที่สำคัญสามารถใช้งานโปรแกรมในการแก้ปัญหาต่างๆ ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงมาก นอกจากนี้ MATLAB ยังได้พัฒนา GUI (graphical user Interface) ที่เป็นระบบระเบียบทำให้การสร้างโปรแกรมประยุกต์เฉพาะตามที่ต้องการสามารถทำได้โดยง่าย คุณสมบัติที่ดีเยี่ยมเหล่านี้ทำให้ในปัจจุบันมีการนำ MATLAB มาใช้เป็นเครื่องมือในการเรียนการสอนหรือนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยอย่างแพร่หลาย

การเรียนรู้วิธีใช้งานโปรแกรม MATLAB ในระดับพื้นฐานจัดว่าเป็นเรื่องที่ไม่ยากนัก และโดยทั่วไปจะพบว่านิสิตนักศึกษาหรือนักวิชาการสามารถใช้งาน MATLAB ขั้นพื้นฐานได้ทันทีหลังจากที่ได้ทดลองใช้งานด้วยตนเองตามตัวอย่างที่อธิบายในส่วนนี้ ดังนั้น รูปแบบการอธิบายในส่วนนี้จึงเน้นการใช้ตัวอย่างเป็นหลัก เพื่อให้ผู้อ่านสามารถทราบถึงแนวทางการใช้ประโยชน์จากโปรแกรม MATLAB ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิผล แนวทางการอ่านเพื่อทำความเข้าใจในส่วนนี้จึงตรงไปตรงมา คือ ให้ผู้เรียนทดลองพิมพ์คำสั่งตามตัวอย่างไปที่ละบรรทัดจนครบทั้งหมดของส่วนนี้เพราะ การลงมือพิมพ์คำสั่งเองเป็นปัจจัยหลักที่จะช่วยให้ผู้อ่านสามารถทำความเข้าใจและเข้าใจหลักการพื้นฐานของ MATLAB ได้อย่างรวดเร็ว เนื้อหาที่จะกล่าวถึงต่อไปมีการเรียงลำดับดังนี้ การใช้คำสั่งสำหรับการสร้างตัวแปรในรูปของเวกเตอร์หรือเมทริกซ์ ฟังก์ชันพื้นฐานสำหรับการสร้างเมทริกซ์ ฟังก์ชันการวาดกราฟ การบวกลบคูณหารอย่างง่าย และการกำหนดรูปแบบการแสดงผลตัวเลข

การสร้างตัวแปรเวกเตอร์และเมทริกซ์

การคำนวณต่างๆ ในโปรแกรม MATLAB อยู่บนพื้นฐานของตัวแปรที่กำหนดในรูปของเวกเตอร์ (vector) และเมทริกซ์ (matrix) เป็นหลัก ดังนั้นการเรียนรู้โปรแกรม MATLAB เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้ใช้งานจำเป็นต้องเข้าใจหลักการและวิธีสร้างตัวแปรเหล่านี้ก่อน

ในลำดับแรกจะแสดงวิธีการสร้างตัวแปร x ที่เป็นเวกเตอร์แถว (row vector) โดยใช้คำสั่งต่อไปนี้

²¹ ลัญฉกร วุฒิสถิทธิกุลกิจ; และคนอื่นๆ. (2551). *MATLAB การประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมไฟฟ้า*.

```
>> x = [ 1 2 3 4 ]
```

และผลลัพธ์ที่ได้คือ

```
x = 1 2 3 4
```

สังเกตว่าสมาชิกหรืออีลิเมนต์ (element) แต่ละตัวในเวกเตอร์ x จะเขียนแยกจากกันโดยใช่ช่องว่างหรืออาจจะใช้เครื่องหมาย “ , ” ได้ด้วยเช่นกัน หากต้องการเมทริกซ์ทรานส์โพส (matrix transpose) ของ x ก็สามารถทำได้ดังนี้

```
>> y = x'
```

ซึ่งจะได้ตัวแปร y ขึ้นมาใหม่ที่เป็นเมทริกซ์ทรานส์โพสของ x และผลลัพธ์ที่ได้บนจอแสดงผลคือ

```
y = 1
     2
     3
     4
```

หากต้องการกำหนดเมทริกซ์ที่มีขนาด 3x4 ขึ้นมาใช้งาน ให้กระทำ ดังนี้

```
>> A = [ 1 2 3 4; 5 6 7 8; 9 10 11 12 ]
```

ซึ่งจะได้ผล ดังนี้

```
A = 1 2 3 4
     5 6 7 8
     9 10 11 12
```

สังเกตว่าเครื่องหมาย “ ; ” ใช้สำหรับระบุว่าเป็นจุดสิ้นสุดของแต่ละแถว

คำสั่งการสร้างเวกเตอร์อีกรูปแบบหนึ่งที่เป็นประโยชน์และมีการใช้งานบ่อยครั้งมาก คือ การสร้างเวกเตอร์ที่มีสมาชิกมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างเป็นระบบ เช่น ต้องการสร้างเวกเตอร์ขนาด $1 \times 1,000$ โดยบรรจุตัวเลขจำนวนเต็มเรียงลำดับตั้งแต่ 1 ถึง 1,000 การสร้างตัวแปรดังกล่าวนี้ด้วยการพิมพ์โดยตรงด้วยมือต้องใช้เวลานานมาก ในกรณีเช่นนี้ผู้ใช้สามารถพิมพ์คำสั่งสั้นๆ ดังต่อไปนี้ได้ทันที

```
>> D = 1 : 1 : 1000 ;
```

คำสั่งในลักษณะนี้สามารถนำมาใช้งานได้กว้างขวาง เช่น ต้องการเวกเตอร์แถวที่บรรจุตัวเลขจำนวนคู่เรียงตั้งแต่ 10 ถึง 20 ให้ใช้คำสั่งดังนี้

```
>> D = 10 : 2 : 20
```

```
D = 10 12 14 16 18 20
```

หากต้องการเวกเตอร์แถวที่บรรจุตัวเลขเรียงจากมากไปน้อย เริ่มต้นตั้งแต่ 20 ไปจนถึง -20 โดยลดลงทีละ 5 ให้ใช้คำสั่งดังนี้

```
>> D = 20 : -5 : -20
```

```
D = 20 15 10 5 0 -5 -10 -15 -20
```

ฟังก์ชันวาดกราฟเบื้องต้น²²

สำหรับงานทางวิทยาศาสตร์การวาดกราฟเพื่อนำเสนอผลการวิจัยหรือการทดลองเป็นเรื่องที่จำเป็นอย่างมาก โปรแกรม MATLAB มีฟังก์ชันสำหรับการวาดกราฟหลากหลายลักษณะทั้งที่เป็นสองและสามมิติ ในส่วนนี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะคำสั่งวาดกราฟ x-y สองมิติ สมมติว่ามีความต้องการวาดกราฟรูปไซน์ซวยดีให้กระทำได้ดังนี้

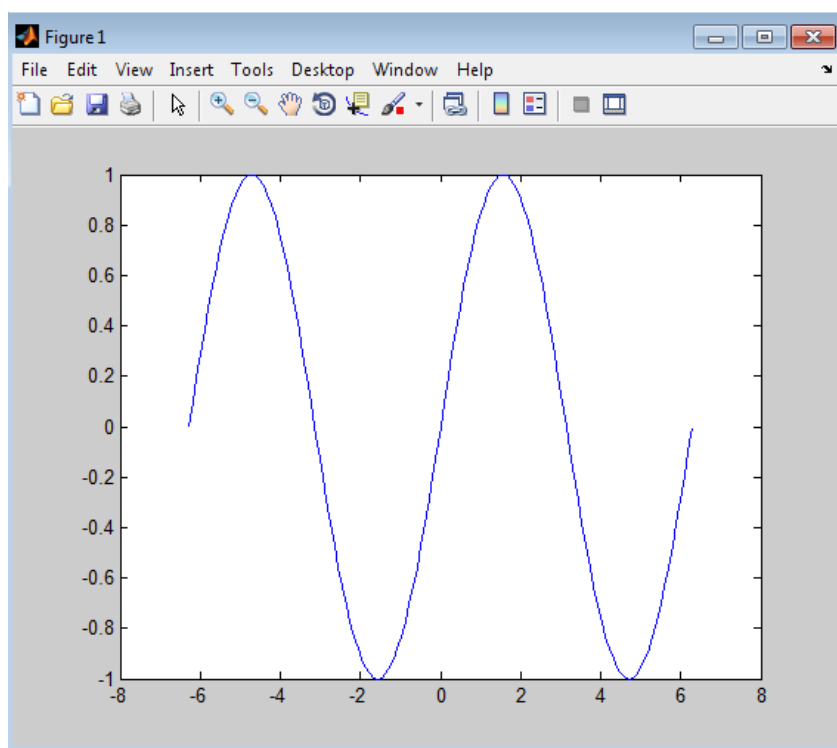
```
>> t = -2 * pi : pi/32 : 2 * pi;
```

```
>> y = sin(t);
```

```
>> plot (t , y)
```

²² ลัญฉกร วุฒิสทิทธิกุลกิจ; และคนอื่นๆ. (2551). *MATLAB การประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมไฟฟ้า*.

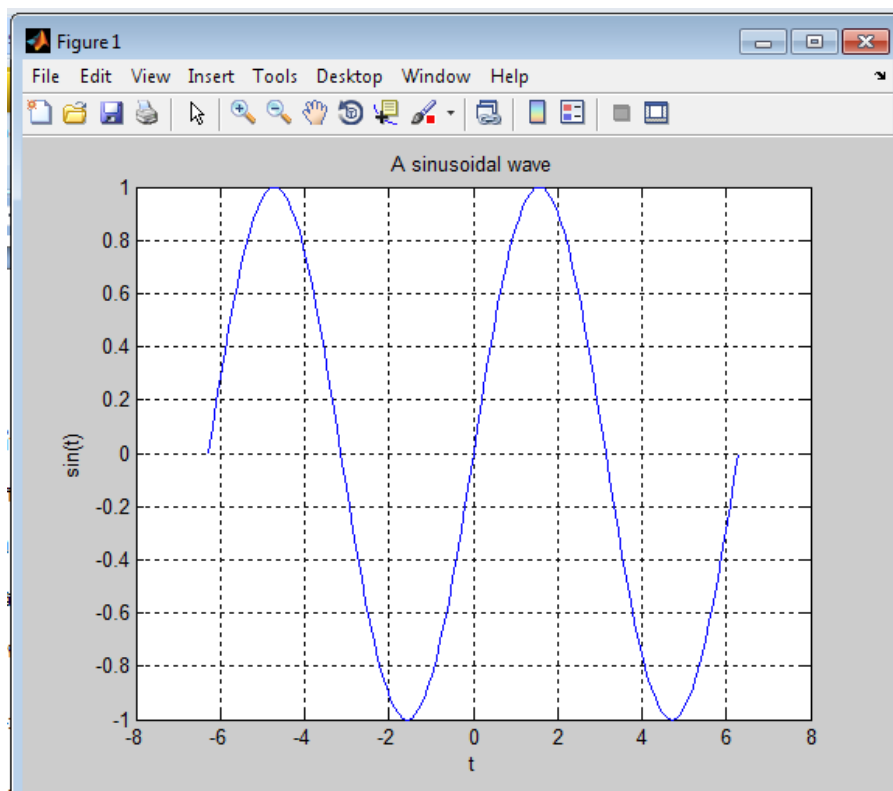
ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นกราฟดังนี้



ภาพประกอบ 20 กราฟรูปไซน์ซอยด์

คำสั่งในบรรทัดแรกเป็นวิธีการสร้างเวกเตอร์อีกลักษณะหนึ่งที่มีประโยชน์มาก ในตัวอย่างมีความหมายว่าให้สร้างเวกเตอร์ t ที่มีค่าอยู่ระหว่าง -2π ถึง 2π โดยสมาชิกแต่ละตัวที่ติดกันมีค่าห่างกันคงที่เท่ากับ $\pi/32$ ฉะนั้น เวกเตอร์ t จึงมีขนาดเท่ากับ 1×129 สามารถจัดรูปแบบการแสดงผลใส่ข้อมูลเพิ่มเติมและตกแต่งกราฟให้มีรูปลักษณะตรงตามที่ต้องการได้โดยอาศัยชุดคำสั่งต่อไปนี้

```
>> grid on
>> title (' A sinusoidal wave ')
>> xlabel (' t ')
>> ylabel (' sin(t) ')
```



ภาพประกอบ 21 กราฟรูปไซน์ซอยด์ที่มีการตกแต่งเพิ่มเติม

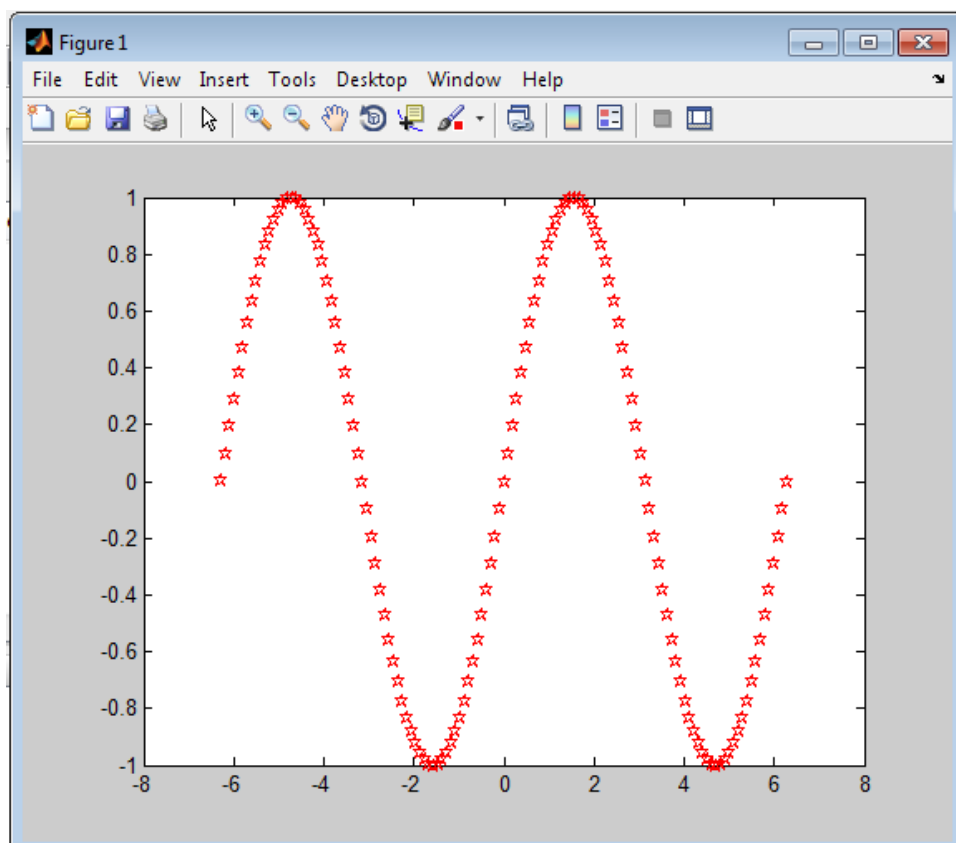
รูปแบบของเส้นกราฟสามารถกำหนดได้มากมายหลายลักษณะโดยการกำหนดค่า 'LineStyle' เพิ่มเข้าไปในคำสั่งการวาดกราฟ ซึ่งมีรูปแบบคำสั่งเป็น `plot ( x, y, 'LineStyle' )` โดยที่ 'LineStyle' เป็นอักขระหรือกลุ่มของอักขระที่เลือกจากตาราง 3

ตาราง 4 อักขระสำหรับกำหนดคุณลักษณะของกราฟ

การกำหนดลักษณะของจุดบนกราฟ	
อักขระ	ลักษณะของจุด
.	จุด (point)
o	วงกลม (circle)
x	กากบาท (x-mark)
+	บวก (plus)
*	ดาว (star)
s	สี่เหลี่ยม (square)
d	สี่เหลี่ยมรูปเพชร (diamond)
v	สามเหลี่ยมชี้ลง (triangle down)
^	สามเหลี่ยมชี้ขึ้น (triangle up)
<	สามเหลี่ยมชี้ซ้าย (triangle left)
>	สามเหลี่ยมชี้ขวา (triangle right)
p	รูปดาวห้าแฉก (pentagram)
h	รูปดาวหกมุม (hexagram)
-	เส้นทึบ (solid)
:	เส้นประแบบจุด (dotted)
--	เส้นประแบบขีด (dashed)
-.	เส้นประแบบขีดและจุดสลับกัน (dashdot)
อักขระ	สีที่ได้
b	น้ำเงิน (blue)
g	เขียว (green)
r	แดง (red)
c	ไซแอน (cyan) เกิดจากเขียวผสมน้ำเงิน
m	มาเจนตา (magenta) คล้ายม่วงแดงเข้ม
y	เหลือง (yellow)
k	ดำ (black)

ยกตัวอย่างเช่น คำสั่งวาดกราฟต่อไปนี้จะได้กราฟที่มีจุดเป็นรูปดาวห้าแฉกสีแดง

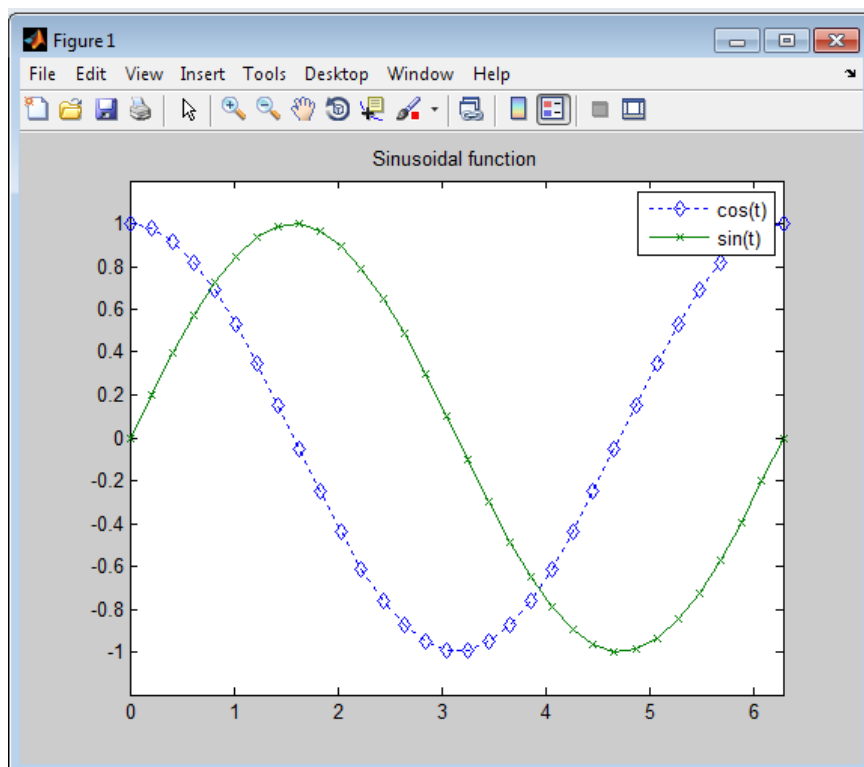
```
>> plot (t , y , ' rp ')
```



ภาพประกอบ 22 กราฟรูปไซน์ซอว์ดเป็นจุดดาวห้าแฉกสีแดง

ในกรณีที่ต้องการกำหนดช่วงของการแสดงผลบนจอภาพสำหรับแกน x หรือแกน y เอง ให้ใช้คำสั่ง `axis ([ xmin xmax ymin ymax ])` ยกตัวอย่างเช่น

```
>> axis ([ 0 2*pi -1.2 1.2 ]);
```



ภาพประกอบ 23 ตัวอย่างการกำหนดช่วงการแสดงผลของกราฟเอง

ทั้งนี้ถ้าไม่ต้องการกำหนดช่วงของ x_{min} หรือ y_{min} เอง แต่จะให้โปรแกรม MATLAB ทำให้อัตโนมัติ ให้ตั้งค่า x_{min} หรือ y_{min} เท่ากับ $-\inf$ สำหรับ x_{max} และ y_{max} ก็เช่นเดียวกัน ถ้าไม่ต้องการกำหนดเอง แต่อยากให้โปรแกรม MATLAB ตั้งให้อัตโนมัติ ก็แทนค่า x_{max} หรือ y_{max} ด้วยค่า $\inf$ หากต้องการสร้างหน้าต่างจอใหม่สำหรับการแสดงผลกราฟให้พิมพ์คำสั่ง figure โปรแกรม MATLAB ถ้าจะปิดหน้าต่างทุกจอก็ใช้คำสั่ง close all

ในบางสถานการณ์อาจมีความต้องการจะวาดกราฟหลายรูปลงบนหน้าต่างจอเดียวกัน แต่ต้องการแยกเป็นกราฟย่อยที่มีแกน x-y ที่อิสระจากกัน โปรแกรม MATLAB ได้เตรียมคำสั่ง subplot ไว้เพื่อรองรับความต้องการในส่วนนี้

การบวกลบคูณหารและการกำหนดรูปแบบการแสดงผลตัวเลข²³

การใช้ MATLAB เพื่อทำหน้าที่เหมือนเครื่องคิดเลขธรรมดาในการบวกลบคูณหารตัวเลขง่าย ๆ ได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

²³ ลัญฉกร วุฒิสทิทธิกุลกิจ; และคนอื่นๆ. (2551). MATLAB การประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมไฟฟ้า.

```
>> 1 + 8/2
```

```
ans = 5
```

สังเกตว่าการคำนวณเทียบเท่ากับ $1 + (8/2)$ นั่นคือ การหารเกิดขึ้นก่อนการบวก เพราะ MATLAB กำหนดให้โอเปอเรชันการคูณและการหารมีลำดับความสำคัญสูงกว่าโอเปอเรชันการบวกและการลบ ฉะนั้น หากต้องการให้ทำโอเปอเรชันการบวกก่อนให้พิมพ์คำสั่งดังนี้

```
>> (1 + 8)/2
```

```
ans = 4.5000
```

การใช้วงเล็บเป็นวิธีที่สามารถใช้เพื่อกำหนดลำดับการคำนวณให้เป็นไปตามลำดับที่ต้องการได้

```
>> 2^5/7
```

```
ans = 4.5714
```

ตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นว่าการยกกำลังเป็นโอเปอเรชันที่มีลำดับความสำคัญมากกว่าการหาร นั่นคือ การคำนวณในตัวอย่างนี้เทียบเท่ากับ $(2^5)/7$ ให้สังเกตด้วยการแสดงค่าตัวเลขที่ได้จากการคำนวณมีความละเอียดที่จำกัดคือแสดงเพียงทศนิยม 4 ตำแหน่งเท่านั้น สามารถเปลี่ยนรูปแบบการแสดงผลตัวเลขให้ละเอียดขึ้นได้โดยใช้คำสั่ง `format` ยกตัวอย่างเช่น

```
>> format long
```

```
>> 2^5/7
```

```
ans = 4.57142857142857
```

คำสั่ง `format long` จะกำหนดให้การแสดงผลมีความละเอียดของทศนิยมมากถึง 14 ตำแหน่ง และนับจากนี้ไปการแสดงผลของตัวเลขก็จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแบบ `format long` แต่หากประสงค์จะเปลี่ยนรูปแบบการแสดงผลกลับเป็นแบบเดิมคือเป็นค่าเริ่มต้นมาตรฐาน ก็สามารถทำได้โดยพิมพ์คำสั่ง `format` เฉยๆ หรือ `format short` ก็ได้ การแสดงผลจะกลับเป็นค่าดีฟอลต์ดังเดิมนั่นคือเป็นการแสดงทศนิยม 4 ตำแหน่ง โปรแกรม MATLAB ได้เตรียมคำสั่งสำหรับควบคุมการแสดงผลตัวเลขไว้ให้เลือกใช้หลายแบบดังในตารางต่อไปนี้

ตาราง 5 การกำหนดรูปแบบการแสดงผลตัวเลข

คำสั่ง	คำอธิบาย
format short	ทศนิยม 4 ตำแหน่งตายตัว สำหรับตัวเลขที่อยู่ในช่วง 0.001 – 1000 ตัวเลขที่มีค่าอยู่นอกช่วงดังกล่าวให้แสดงผลในรูปแบบ short e
format long	ทศนิยม 14 ตำแหน่งตายตัว สำหรับตัวเลขที่อยู่ในช่วง 0.001 – 100 ตัวเลขที่มีค่าอยู่นอกช่วงดังกล่าวให้แสดงผลในรูปแบบ long e
format short e	แสดงในรูปของเอกซ์โพเนนเชียลด้วยทศนิยม 4 ตำแหน่ง
format long e	แสดงในรูปของเอกซ์โพเนนเชียลด้วยทศนิยม 15 ตำแหน่ง
format bank	ใช้ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
format +	แสดงเครื่องหมายของตัวเลขว่าเป็น + หรือ - และกรณีที่ตัวเลขเป็นศูนย์จะแสดงด้วยการใช้อักษรว่างเปล่า

ดูตัวอย่างการแสดงผลตัวเลขด้วยรูปแบบที่ต่างกันต่อไปนี้

```
>> format short;
```

```
>> 858/58
```

```
ans = 14.7931
```

```
>> 0.07
```

```
ans = 0.0700
```

```
>> 1000.2
```

```
ans = 1.0002e + 003
```

```
>> 12345.6789
```

```
ans = 1.2346e + 004
```

จะเห็นว่าเมื่อใช้ format short ตัวเลขที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.001 – 1000 จะแสดงผลด้วยตัวเลขทศนิยม 4 ตำแหน่งตายตัวเสมอ สำหรับตัวเลขที่มีค่านอกเหนือช่วงดังกล่าวจะแสดงผลในรูปแบบของเอกซ์โพเนนเชียลโดยใช้ทศนิยม 4 ตำแหน่งตายตัว

```
>> format short;
>> 858/58
ans = 14.79310344827586

>> 0.07
ans = 0.070000000000000

>> 100.23456
ans = 1.002345600000000e + 002
```

จะเห็นว่าเมื่อใช้ format long ตัวเลขที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.001 – 100 จะแสดงผลด้วยตัวเลขทศนิยม 14 ตำแหน่งตายตัวเสมอ สำหรับตัวเลขที่มีค่านอกเหนือช่วงดังกล่าวจะแสดงผลในรูปแบบของเอกซ์โพเนนเชียลโดยใช้ทศนิยม 15 ตำแหน่งตายตัว

```
>> format short e;
>> 858/58
ans = 1.4793e + 001

>> format long e;
>> 858/58
ans = 1.479310344827586e + 001
```

การกำหนดด้วย format short e หรือ format long e เป็นการบังคับให้ MATLAB แสดงผลตัวเลขในรูปแบบของเอกซ์โพเนนเชียลโดยใช้ทศนิยม 4 และ 15 ตำแหน่งตายตัวตามลำดับ

```
>> format bank;
>> 858/58
ans = 14.79
```

```
>> 0.004
```

```
ans = 0.00
```

การใช้ format bank เป็นการกำหนดให้ MATLAB แสดงผลตัวเลขโดยใช้ทศนิยม 2 ตำแหน่งเสมอ

```
>> format +
```

```
>> A = [-4 2 0 0.01 -10.5]
```

```
A = - + + -
```

การใช้ format + เป็นการกำหนดให้ MATLAB แสดงผลเฉพาะเครื่องหมายของตัวเลขว่าเป็น + หรือ - และกรณีที่ตัวเลขเป็นศูนย์จะแสดงด้วยการใช้อักษรว่างเปล่า

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พ.ศ. 2552 ลูกัส ออสเตอร์โล และคณะ (Lukas Osterloh; et al. 2009) ได้เสนอซอฟต์แวร์สำหรับแก้ไขการแจกแจงเชิงปริมาตรของละอองลอย โดยใช้คุณสมบัติทางไมโครฟิสิกส์ของละอองลอยในชั้น สตราโตสเฟียร์ และโทรโพสเฟียร์ จากข้อมูลที่วัดด้วยเครื่องไลดาร์ ได้ใช้เทคนิคการลดเวลาตามทฤษฎี search space ซึ่งทำการทดลองบนเครื่องซูเปอร์คอมพิวเตอร์ MareNostrum ผลที่ได้ทำให้เวลาในการคำนวณ และการทำงานลดลง โดยยังคงรักษาผลลัพธ์ที่ยอมรับได้

ในประเทศไทยปี พ.ศ. 2551 ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์ และคณะ (Ruangrungrrote, S.; et al. 2008) ได้แสดงผลของสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเชิงปริมาตร (volume backscattering coefficient) สำหรับละอองลอย และเมฆในประเทศไทย โดยการใช้วิธีของเฟอร์นัลด์ (Fernald method) กับสมมติฐานให้ $S_a = 35 \text{ sr}$, $S_m = 8\pi/3 \text{ sr}$ และ $\beta_m(z) = \beta_m(z_c)$ เมื่อ z_c เท่ากับ 15 กิโลเมตร โดยมีระดับความสูงห่างกัน 6 เมตร ทำการวิเคราะห์โพลาไรซ์แนวตั้งของสัญญาณการแก้ไขพิสัย (range corrected signals) อัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน (depolarization) และสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเชิงปริมาตรเนื่องจากละอองลอย (aerosol volume backscattering coefficient) จากข้อมูลที่วัดจากเครื่องมือไลดาร์ที่ อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา

ในปีเดียวกัน อัมพร รุ่งแจ้ง ได้มีการหาโพลาไรซ์แนวตั้งของสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเชิงปริมาตรเนื่องจากละอองลอยในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ในจังหวัดสุโขทัย และจังหวัดนครราชสีมา ด้วย 2 วิธี คือ วิธีแบบความชันตัดแปลงและวิธีแบบเฟอร์นัลด์โดยใช้สมมติฐาน $S_a = 35 \text{ sr}$,

$S_m = \frac{8\pi}{3}$ sr และ $\beta_m(z) = \beta_m(z_c)$ เมื่อ z_c คือความสูงวิกฤตที่ 15,000 เมตร (ระดับที่ปราศจากละอองลอย) โดย $\beta_m(z)$ มีค่าคงที่ทุกความสูง 6 เมตร ผลที่ได้พบว่าด้วยค่าสมมติฐานข้างต้นค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเชิงปริมาตรเนื่องจากละอองลอยที่หาด้วยวิธีความชันดัดแปลงสูงกว่าค่าที่หาได้จากวิธีแบบเฟอร์นันด์ประมาณ 10^2 เท่า และวิธีแบบเฟอร์นันด์ยังคงเป็นที่ยอมรับได้และมีประสิทธิภาพมากกว่าเนื่องจากสามารถบ่งชี้แนวโน้มของละอองลอยและเมฆได้อย่างชัดเจน

ปี พ.ศ. 2550 ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์ และคณะ (Ruangrungrote, S.; et al. 2007: 25-30) ได้รายงานผลการศึกษเกี่ยวกับสัญญาณการกระเจิงกลับของพัลส์เลเซอร์เนื่องจากอนุภาคในบรรยากาศที่วัดด้วยเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี ฦ สถานีตรวจวัดการแผ่รังสีในชั้นบรรยากาศอำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย พบว่าสามารถแยกสัญญาณการกระเจิงกลับของพัลส์เลเซอร์เนื่องจากเมฆกับละอองลอยได้ โดยวิเคราะห์จากค่าอัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน (δ) สอดคล้องกับรายงานผลการวิจัยของโมโตเอคิ และคณะ (Motoaki, Y.; et al. 2005: 149-171) ซึ่งรายงานผลการสังเกตการณ์ของไลดาร์บริเวณเมืองชะปอเตา (Shapotou) ในเขตทะเลทราย ประเทศจีน พบว่าค่าอัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน (δ) แสดงรูปร่างของอนุภาค ถ้ามีค่ามาก อนุภาคที่พบมีรูปร่างไม่เป็นทรงกลม เช่น ฝุ่นจากแร่ธาตุ เป็นต้น หรือเป็นค่าที่เกิดจากการกระเจิงทวิคูณ (Multiple Scattering) ในเมฆ ถ้ามีค่าน้อยเข้าใกล้ศูนย์อนุภาคที่พบมีรูปร่างเป็นทรงกลมขนาดเล็กมาก เช่น หยดน้ำ ละอองลอยมลพิษทางอากาศ เป็นต้น นอกจากนี้ค่าสัญญาณการแก่งพิสัย ($X(z)$) ยังมีความสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับ (β) ซึ่งแปรตามความหนาแน่นของละอองลอย ทำให้สามารถแยกสัญญาณที่เกิดจากเมฆและละอองลอยได้ โดยค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับ (β) ที่มีค่ามากจะแสดงสัญญาณที่เกิดจากการกระเจิงทวิคูณจากเมฆ และค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับ (β) ที่มีค่าน้อยแสดงสัญญาณที่เกิดจากละอองลอย

พ.ศ. 2550 เงินหยวนหลิน และคณะ (C.-Y. Lin.; et al. 2007) ได้บรรยายการเดินทางเป็นระยะทางไกลของฝุ่นละอองในทวีปเอเชีย และมลพิษทางอากาศ ซึ่งเป็นเรื่องที่หน่วยงานที่เกี่ยวข้องธรรมชาติที่ไต้หวันให้ความสนใจในช่วงที่มีลมมรสุมฤดูหนาว ตรวจวัด ณ สถานีตรวจสุขภาพทางอากาศ Taiwan Environmental Protection Administration (TEPA) ด้วยเครื่อง Lidar และ insitu IC พบว่าการเคลื่อนย้ายเป็นระยะทางไกลของฝุ่นละอองในทวีปเอเชีย และมลพิษทางอากาศเมื่อวันที่ 18 มีนาคม 2005 ค่าความเข้มข้นของ PM_{10} (ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน) CO และ SO_2 ขึ้นกับระดับความรุนแรงของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือในวันที่ 18 มีนาคม ถูกสังเกตได้จากสถานี Wanli ซึ่งมีค่าความเข้มข้นอยู่ที่ $170 \mu g m^{-3}$, 1.0 ppm และ 14 ppb ตามลำดับ และพบว่ามวลอากาศของมลพิษ และฝุ่นละอองในทวีปเอเชียนั้นเคลื่อนที่แยกจากกันและมาผสมรวมกันเมื่อมาถึงไต้หวัน ผลจากการคำนวณแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของละอองลอย ปฏิกิริยาการของการ

แยกจากกันของอากาศระหว่างมลพิษทางอากาศกับฝุ่นละอองในทวีปเอเชียที่เคลื่อนที่ไปได้หวั่นนั้น เกี่ยวข้องกับเส้นทางการเคลื่อนที่และความแห้งของสภาพอากาศ

พ.ศ. 2541 เฮส และคณะ (M. Hess, P. Koepke; & I. Schult. 1998) ได้ผลิตซอฟต์แวร์ OPAC (optical properties of aerosols and clouds) ขึ้น ที่เขียนโดยใช้ภาษาฟอร์แทรน เป็นโปรแกรมที่สามารถอธิบายชนิดของอนุภาคละอองลอย และชนิดของเมฆที่อยู่ผสมรวมกันในชั้นบรรยากาศ โดยซอฟต์แวร์ประกอบด้วยชุดข้อมูลสมบัติเชิงแสงของเมฆ และส่วนประกอบละอองลอยที่อยู่รวมกันในบรรยากาศ และช่วงสเปกตรัมของอนุภาคในชั้นบรรยากาศ ข้อมูลดังกล่าวถูกเก็บเป็นไฟล์รหัสอักษร หรือที่เรียกว่า แอสกี (ASCII) ก่อนถูกนำมาคำนวณ ซอฟต์แวร์ OPAC เป็นเครื่องมือสำหรับนักวิทยาศาสตร์ที่ต้องการบรรยายสมบัติเชิงแสงของชั้นบรรยากาศ เพื่อจุดมุ่งหมายที่จะจำลองสภาพภูมิอากาศ

พ.ศ. 2540 แอคเกอร์มานน์ (Jorg Ackermann. 1997) ได้เสนอเกี่ยวกับการประเมินค่าที่แน่นอนสำหรับละอองลอยในอากาศ โดยที่อัตราส่วนระหว่างการลดทอนกับการกระเจิงกลับ (S) มีความสำคัญสำหรับการแก้ปัญหาขั้นสุดท้าย ในการศึกษาครั้งนี้อัตราส่วนระหว่างการลดทอนกับการกระเจิงกลับ ของไลดาร์ที่ใช้ Nd:YAG เป็นตัวกำเนิดแสงเลเซอร์ถูกคำนวณบนพื้นที่ลักษณะแตกต่างกัน คือ ละอองลอยบนพื้นทวีป, ละอองลอยบริเวณทะเล และละอองลอยในทะเลทราย ซึ่งสอดคล้องกับส่วนประกอบของละอองลอยที่เปลี่ยนแปลงไปภายใต้ความแตกต่างของอัตราส่วนของจำนวนอนุภาคที่รวมตัวกันในธรรมชาติในแต่ละพื้นที่ สำหรับละอองลอยภายในพื้นทวีป S เพิ่มขึ้น โดยสัมพันธ์กับค่าของค่าความขึ้นสัมพันธ์ f ระหว่าง 40 - 80 sr ละอองลอยบริเวณทะเล S อยู่ระหว่าง 15 - 30 sr สำหรับ 355 และ 532 นาโนเมตร และระหว่าง 25 - 50 sr ที่ 1064 นาโนเมตร

ความเบาบางของละอองลอยในพื้นที่ทะเลทรายนั้น S ขึ้นกับ f โดยมีค่าระหว่าง 42 - 48 sr สำหรับ 355 นาโนเมตร และระหว่าง 17 - 25 sr สำหรับ 532 และ 1064 นาโนเมตร ค่าของอัตราส่วนไลดาร์ S ถูกคำนวณจากการพิทโดยการกระจายอนุกรมกำลัง (power series expansion) ที่ขึ้นกับ f

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังนี้

1. วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
2. สถานที่ดำเนินงานวิจัย
3. ศึกษาข้อมูลดิบ และวิธีการคำนวณเกี่ยวกับการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงของละอองลอย
4. การสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์
5. การทดสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์
6. ดำเนินการทดลองวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงของข้อมูล
7. เปรียบเทียบผลวิเคราะห์ด้วยวิธีปกติกับวิธีที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลดิบที่วัดจากเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี (Mie scattering lidar) ซึ่งเป็นไลดาร์ที่ได้รับการพัฒนาโดย National Institute of Environment (NIES) ประเทศญี่ปุ่น และได้ให้ความร่วมมือพร้อมอนุเคราะห์เครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมีแก่ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540 เป็นต้นมา ในปี พ.ศ. 2548 ได้มีการจัดตั้งสถานีวิจัยในชั้นบรรยากาศ อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา โดยเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมีเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่ได้รับการติดตั้งและใช้งานจริง

ไลดาร์ดังกล่าวใช้ Nd:YAG เลเซอร์ ที่มีความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร และ 1064 นาโนเมตร และมีทิศทางของการวัดตั้งฉากกับแนวราบของขอบฟ้า ลำแสงเลเซอร์ที่ถูกส่งไปเป็นลำแสงที่มีโพลาไรเซชันในแนวขนาน (ตั้งฉากกับแสงที่ออกจากแหล่งกำเนิด) ภายหลังจากผ่านกล่องขยายลำแสง (beam expander) และแสงที่ถูกกระเจิงกลับก็ถูกรับแสงด้วยกล้องโทรทรรศน์ชนิดสมิทแคสซีเกรน (Schmidt Cassegrain telescope) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร แสงที่รับมาเป็นแสงที่ประกอบไปด้วยแสงที่มีโพลาไรเซชันทั้งสองแนวเข้ามายังกล้องรับแสง และถูกแยกเป็นโพลาไรเซชันในแนวตั้งและในแนวนอนโดยตัวทำแสงโพลาไรซ์ (polarizer) โพลาไรเซชันที่ถูกแยกจะถูกส่งไปยังหลอดโฟโตมัลติไพล์เออร์ (PMT : photomultiplier tube) ทั้งสองอันคือ PMT1 และ PMT2 สัญญาณที่ไลดาร์ตรวจพบนั้นถูกบันทึกโดยเครื่องดิจิตอลลอจิสติกส์โคป แล้วส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์รับข้อมูล (data acquisition computer) เพื่อบันทึกลงบนฮาร์ดดิสก์

โปรแกรมที่ใช้เป็นหลักในการเขียนในครั้งนี้คือ **MATLAB R2008a** (สามารถดาวน์โหลดจากแผ่นซีดี **demo+tutorial** ของบริษัท **Techsource** จำกัด ประเทศสิงคโปร์ และใช้โปรแกรมทดลองจาก www.techsource.com.sg) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับงานทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ โครงสร้างพื้นฐานการคำนวณของโปรแกรม **MATLAB** อยู่ในรูปของเวกเตอร์หรือเมทริกซ์ ซึ่งเป็นที่มาของชื่อโปรแกรมด้วย กล่าวคือ **MATLAB** เป็นคำย่อสองคำในภาษาอังกฤษคือ **MATrix LABoratory** จุดเด่นของโปรแกรม **MATLAB** คือการที่มีชุดคำสั่งจำนวนมากสำหรับใช้ในการประมวลผลข้อมูลที่บรรจุอยู่ในเมทริกซ์ครอบคลุมทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ทั้งที่เป็นพื้นฐานและการประยุกต์อย่างกว้างขวางที่สำคัญสามารถใช้งานโปรแกรมในการแก้ปัญหาต่างๆ ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงมาก นอกจากนี้ **MATLAB** ยังได้พัฒนา **GUI (graphical user Interface)** ที่เป็นระบบระเบียบทำให้การสร้างโปรแกรมประยุกต์เฉพาะตามที่ใช้ต้องการสามารถทำได้โดยง่าย คุณสมบัติที่ดีเยี่ยมเหล่านี้ทำให้ในปัจจุบันมีการนำ **MATLAB** มาใช้เป็นเครื่องมือในการเรียนการสอนหรือนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยอย่างแพร่หลาย

สถานที่ดำเนินงานวิจัย

ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สถานที่ดำเนินงานด้านข้อมูลดิบ

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร สถานที่ดำเนินงานวิจัย

ศึกษาข้อมูลและการคำนวณพื้นฐานเกี่ยวกับการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงของละอองลอย

1. ศึกษาลักษณะเฉพาะของข้อมูลดิบที่วัดได้จากเครื่องไลดาร์ พบว่าข้อมูลดิบที่ได้มานั้นเป็นไฟล์นามสกุล ***.tar.gz** ซึ่งยังไม่สามารถนำมาคำนวณได้ในทันที ต้องผ่านการแปลงไฟล์เป็นนามสกุล ***.txt** เสียก่อนดังภาคผนวก ก ซึ่งแต่เดิมนั้นมีโปรแกรมฟอร์แทรนที่ใช้ในการแปลงไฟล์ดังกล่าวอยู่ แต่เมื่อย้ายสถานีวิจัยชั้นบรรยากาศจากอำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย มายังอำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ทำให้ค่าของพารามิเตอร์เฉพาะต่างๆ เปลี่ยนไปโปรแกรกดังกล่าวจึงใช้การไม่ได้

2. ศึกษาการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ของละอองลอย ได้แก่ การคำนวณหาค่าสัญญาณการแก้ไขพิสัย (range corrected signal: $X(z)$) จากสมการ (2-23) โดยใช้ข้อมูลสัญญาณแสงโพลาไรซ์ในแนวนอนกับแนวโพลาไรซ์ของแสงที่ส่งออกไป ที่กระเจิงกลับมา การคำนวณหาค่า

อัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน (depolarization ratio : δ) จากสมการ (2-22) เพื่อนำไปวิเคราะห์ลักษณะความกลมของอนุภาคที่แสงเลเซอร์ตกกระทบ โดยใช้ข้อมูลที่กระเจิงกลับของแสงโพลาไรซ์ทั้งแนวขนานและตั้งฉาก การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย (aerosol backscattering coefficient : $\beta_a(z)$) โดยใช้ค่าคงที่คือ ค่าความสูงวิกฤตเท่ากับ 15,000 เมตร¹, $\beta_a(z_c) = 0 \text{ (m}^{-1} \text{sr}^{-1})$ ค่า $\beta_m(z) = \beta_m(z_c)$ และข้อมูลของสัญญาณแสงโพลาไรซ์ในแนวขนานที่ระดับความสูงต่าง ๆ มาคำนวณโดยใช้สมการ (2-24) และการคำนวณสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากละอองลอย (aerosol attenuation coefficient : $\alpha_a(z)$) จากสมการ 2-19 เมื่อค่าของอัตราส่วนไวดาร์ของละอองลอยเป็นค่าคงตัวคือ 35 sr

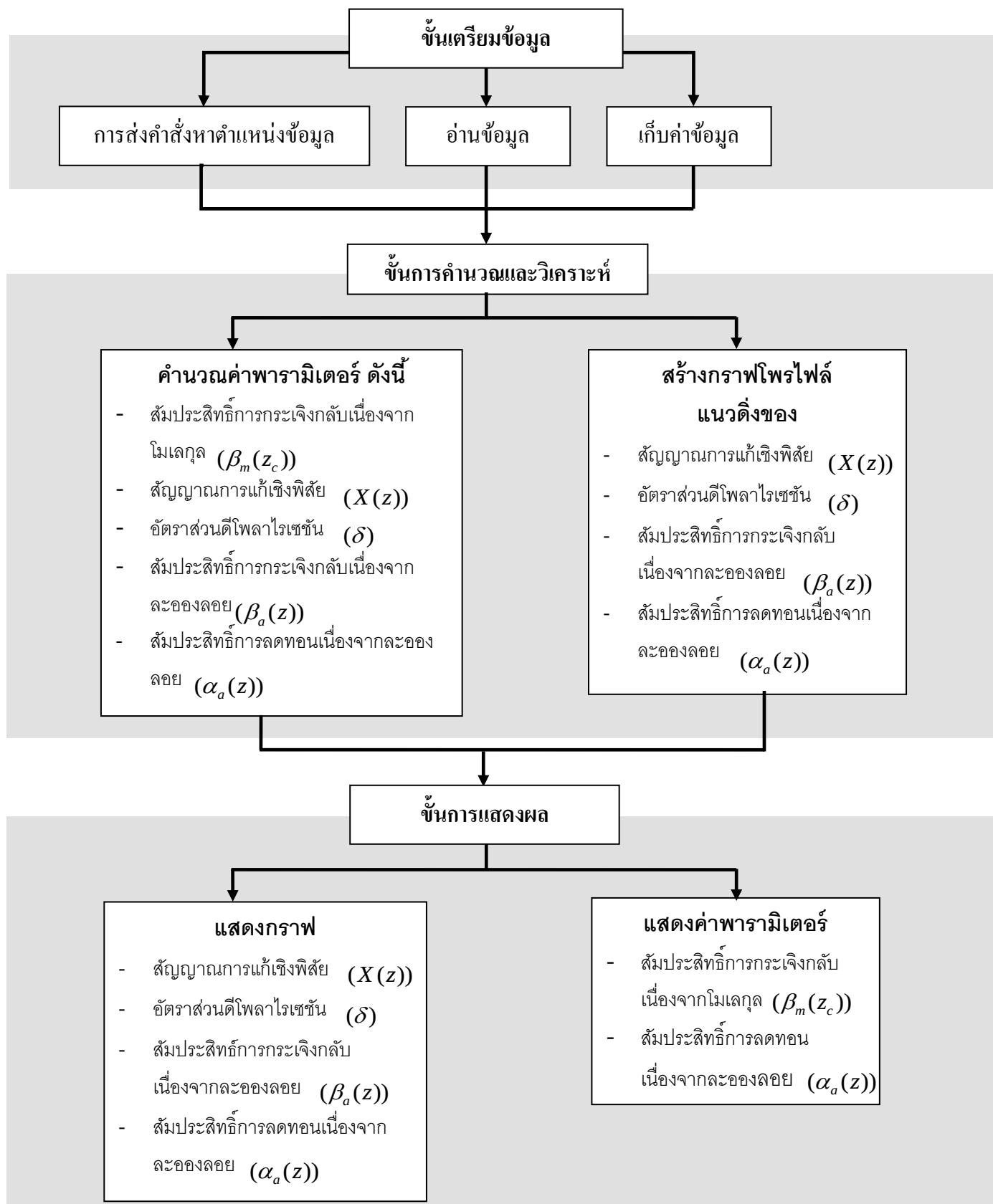
3. ศึกษาวิธีวิเคราะห์กราฟของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้กับความสูง ได้แก่ กราฟสัญญาณการแก้ไขพิสัย (range corrected signal : $X(z)$) โดยค่าของละอองลอยควรมีค่าไม่เกิน $1 \times 10^{13} \text{ m}^2$ กราฟอัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน (depolarization ratio : δ) โดยละอองลอยในพื้นที่ควรมีค่าไม่เกิน 0.1 พร้อมกับวิเคราะห์กราฟสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย (aerosol backscattering coefficient : $\beta_a(z)$) และกราฟสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากละอองลอย (aerosol attenuation coefficient : $\alpha_a(z)$) ซึ่งใช้วิธีการคำนวณแบบเฟอร์นัลด์-เคลท (Fernald - Klett method)

4. ศึกษาโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นโปรแกรมพื้นฐานที่ใช้เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อมาช่วยในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่นำไปใช้วิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงของละอองลอย ได้แก่ การสร้างตัวแปรอ่านค่าและเก็บค่าของข้อมูล การเขียนสมการการคำนวณ การสร้างกราฟ และการแสดงผล เป็นต้น

การสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์

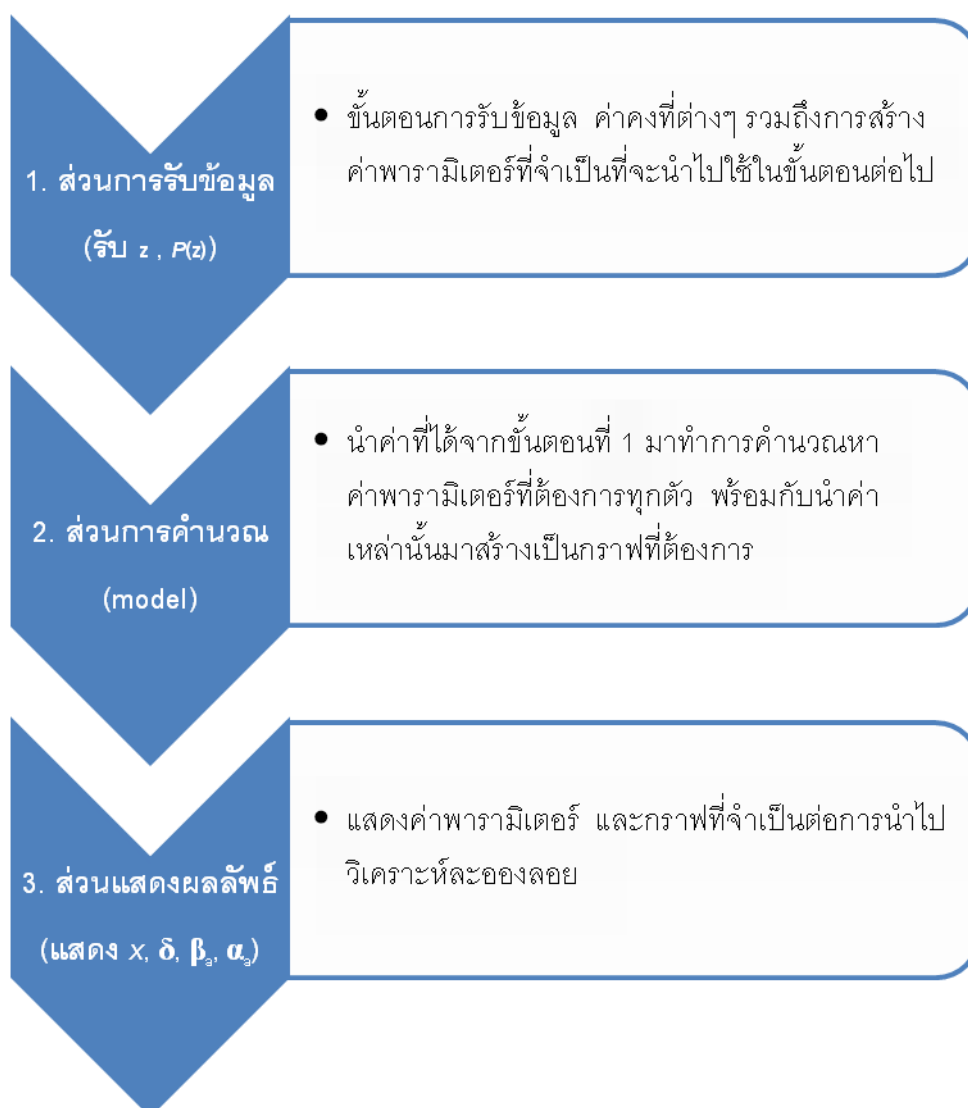
1. เขียนผังงานระบบ (system flowchart) โดยการนำรูปแบบการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และการพล็อตกราฟ มาแสดงผลที่ระดับความสูง 500 – 4,000 เมตร เนื่องจากละอองลอยที่พิจารณาจะอยู่สูงไม่เกิน 4,000 เมตร และส่วนระดับต่ำกว่า 500 เมตรถือว่าเป็นสัญญาณรบกวนสามารถเขียนผังงานแสดงขั้นตอนการทำงานของระบบในภาพรวม คือ

¹ Ruangrungrate, S.; Intason, A.; & Chabangbon, A. (2008). *Tropospheric Aerosol Volume Backscattering Coefficients Determination Using Mie lidar at Phimai District, Thailand*. Proceedings of the International Symposia on Geoscience Resources and Environments of Asian Terranes (GREAT 2008). P. 544.

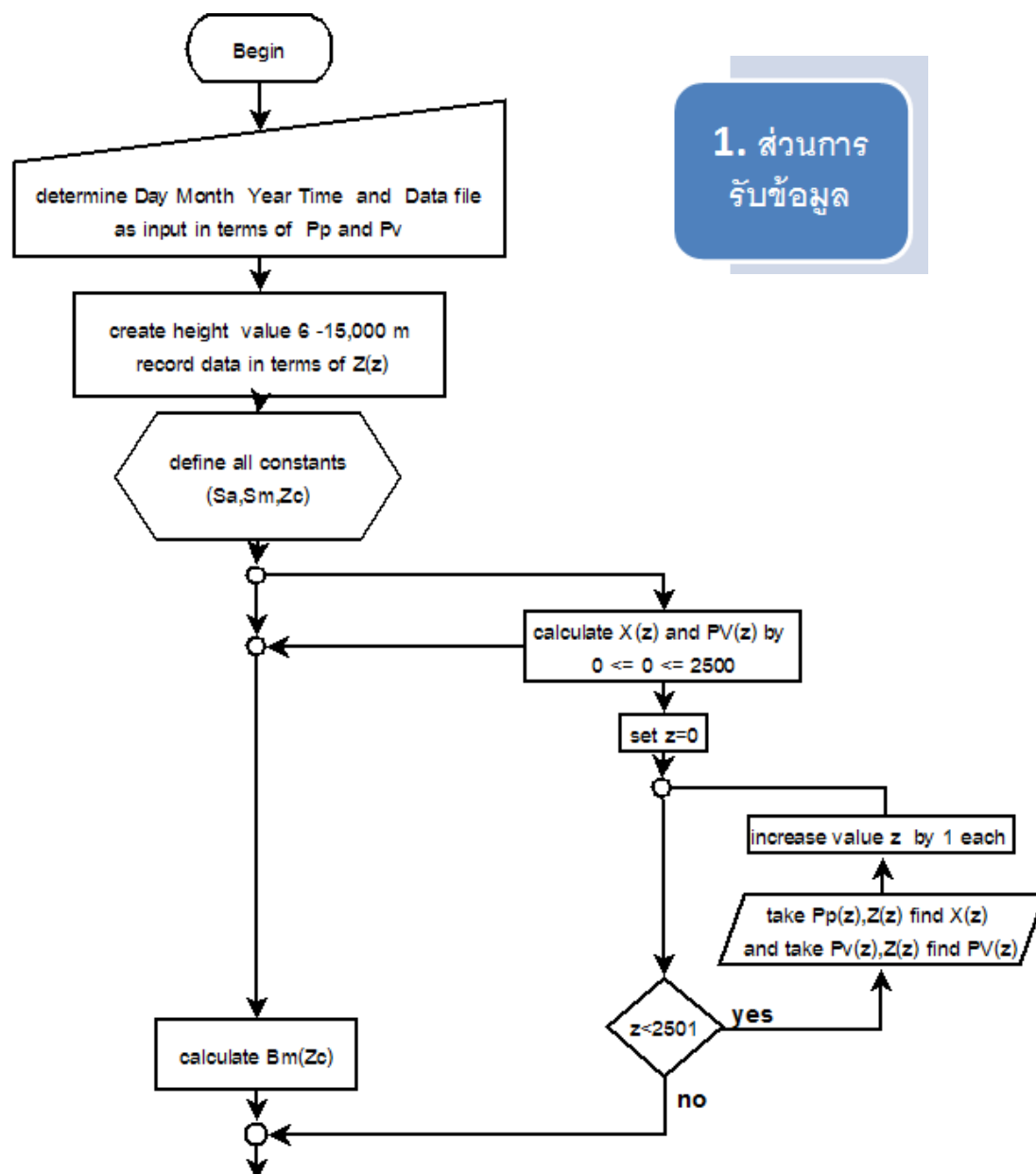


ภาพประกอบ 24 รายละเอียดแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานเพื่อเตรียมสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์

2. เขียนผังงานโปรแกรม (program flowchart) นำผังงานระบบมาขยายเป็นรายละเอียด แสดงลำดับขั้นตอนการทำงานตั้งแต่รับข้อมูล คำนวณ จนถึงแสดงผลลัพธ์ เพื่อเตรียมสร้างเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับใช้วิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงของละอองลอย ดังนี้

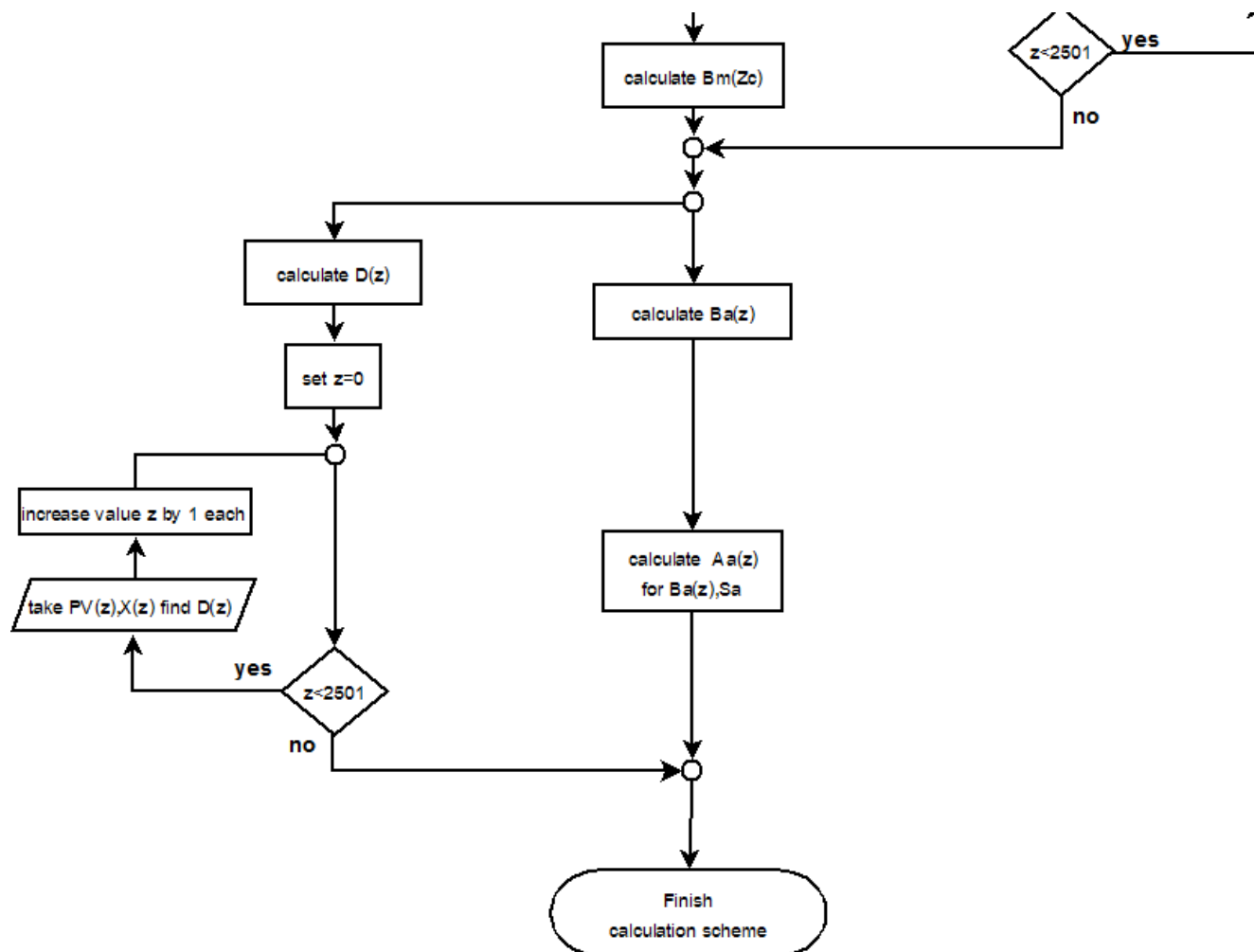


ภาพประกอบ 25 ภาพรวมการทำงานของโปรแกรม

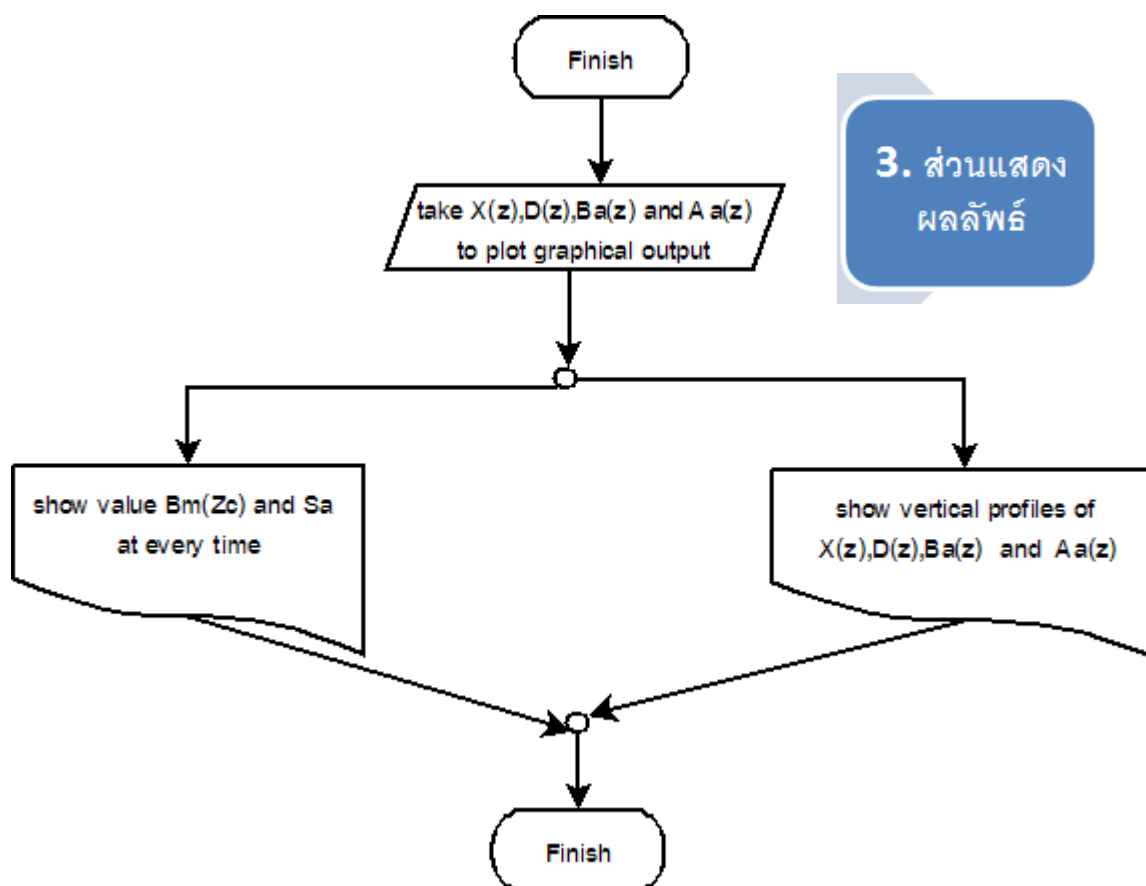


ภาพประกอบ 26 แสดงผังงานโปรแกรม ส่วนการรับข้อมูล

2. ส่วนการ คำนวณ



ภาพประกอบ 27 แสดงผังงานโปรแกรม ส่วนการคำนวณ



ภาพประกอบ 28 แสดงผังงานโปรแกรม ส่วนแสดงผลลัพธ์

3. เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ตามผังงานด้วยคำสั่งจากโปรแกรม MATLAB

การทดสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1. ใช้ข้อมูลผ่านการแปลงไฟล์เรียบร้อยแล้ว โดยเป็นข้อมูลจริงวันที่ 21 มกราคม พ.ศ. 2547 เก็บข้อมูลจากสถานีวิจัยในชั้นบรรยากาศอำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย และข้อมูลวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2548 เก็บข้อมูลจากสถานีวิจัยในชั้นบรรยากาศอำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา และใช้ข้อมูลเทียมที่ทางผู้ทำวิจัยนี้สร้างขึ้นมาเพื่อเป็นตัวทดสอบความถูกต้องในการคำนวณของโปรแกรม APRA ซึ่งมีลักษณะเป็นค่าคงที่ที่ระดับความสูงต่างๆ ตามแบบของข้อมูลจริง นำข้อมูลทั้งสองมาเป็นข้อมูลทดลอง

2. ทดลองใช้ (try-out) โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้นคำนวณ วิเคราะห์ และแสดงผลพารามิเตอร์ของละอองลอยจากข้อมูลทดลองทั้งสองชนิด (ข้อมูลจริง และข้อมูลเทียม)

3. ตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ และกราฟ ที่แสดงผลออกมา โดยนำค่าพารามิเตอร์ของข้อมูลเทียบที่ได้มาวิเคราะห์ถึงความถูกต้อง และนำค่าพารามิเตอร์ของข้อมูลจริงที่ได้จากโปรแกรมเทียบกับค่าที่ได้จากรายงานการวิจัยของอัมพร รุ่งแจ้ง² ที่ใช้ชุดข้อมูลเดียวกัน

4. แก้ไขและปรับปรุงโปรแกรมถ้าเกิดความผิดพลาดหรือไม่สมบูรณ์ก่อนนำไปใช้จริง

ดำเนินการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

1. จัดเตรียมข้อมูลที่ใช้ทดลองการคำนวณและวิเคราะห์จริงด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ข้อมูลดิบของเดือนธันวาคม พ.ศ. 2551 เก็บข้อมูลจากสถานีวิจัยในชั้นบรรยากาศอำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ได้รับความอนุเคราะห์ไฟล์ดิบจากภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. การคำนวณและวิเคราะห์ข้อมูล โดยดำเนินการดังนี้

2.1 จัดกระทำข้อมูลดิบ

ผู้วิจัยแปลงไฟล์ข้อมูลดิบดังกล่าวให้อยู่ในรูปของไฟล์นามสกุล *.txt เพื่อให้อยู่ในรูปแบบที่โปรแกรมใช้คำนวณได้

2.2 สั่งการให้โปรแกรมอ่านข้อมูลนามสกุล *.txt และเก็บค่าลงในตัวแปรใช้โปรแกรม Modelling of Aerosol Parameters Retrieval Algorithm based on Mie Scattering Lidar Data : (APRA) ที่ถูกเขียนขึ้นในโปรแกรม MATLAB อ่านและเก็บค่าข้อมูล

2.3 ประมวลผล

โปรแกรมคำนวณข้อมูลค่าโพราไรเซชัน หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สร้างกราฟ และแสดงผลออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์

2.4 ตรวจสอบผล

ตรวจสอบความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากโมเลกุล และค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย และกราฟต่าง ๆ

² อัมพร รุ่งแจ้ง. (2551). *ความน่าเชื่อถือของการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเชิงปริมาตรของละอองลอยในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์โดยเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี. ปริญญา* นิพนธ์. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

เปรียบเทียบการทำงานด้วยวิธีปกติกับวิธีที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ APRAM

1. สังเกตขั้นตอนการคำนวณและวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีปกติ และวิธีที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนขึ้น โดยสังเกตดังนี้

1.1 ระยะเวลาที่ใช้

1.2 ความซับซ้อนในการคำนวณ

1.3 ความถูกต้องของการแสดงผล

2. เปรียบเทียบผลที่ได้จากการสังเกตการคำนวณและวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีปกติ และวิธีที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนขึ้น

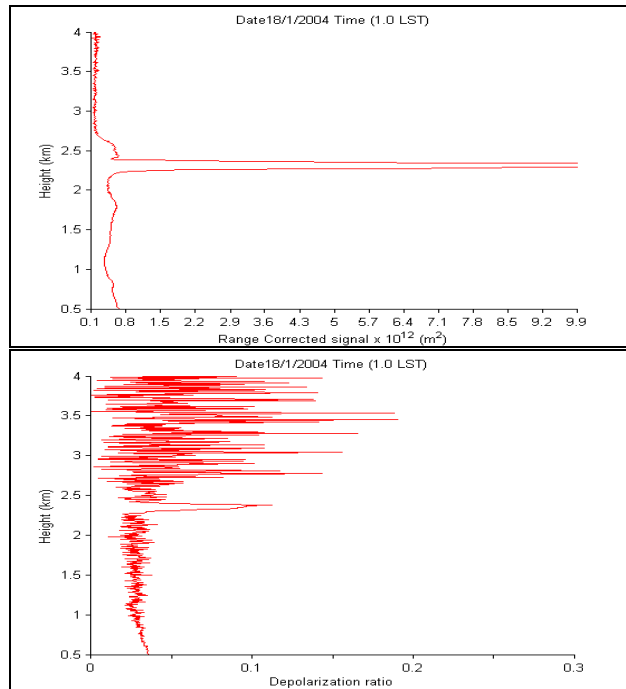
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

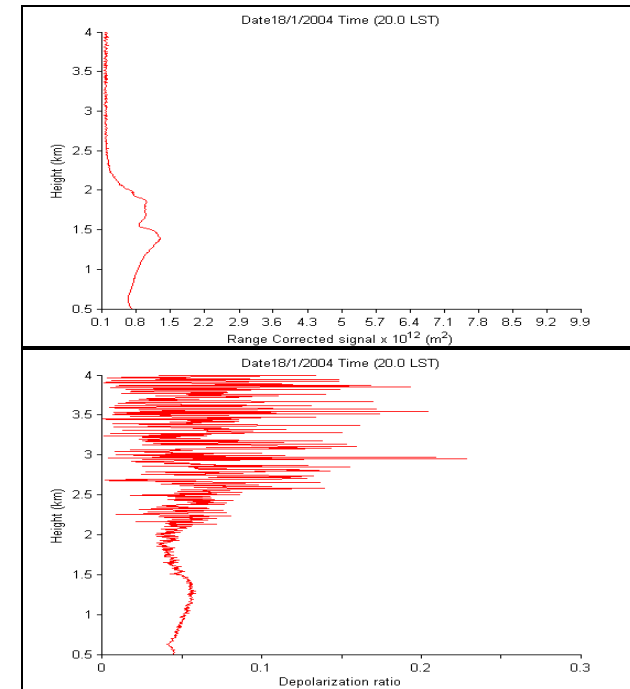
การแสดงผลของโปรแกรม APRA

ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับละอองลอยเพื่อนำไปใช้พิจารณาการกระจายตัวของละอองลอยในบรรยากาศ ได้แก่ ค่าสัญญาณการแก้ไขพิสัย (range corrected signal : $X(z)$) ค่าอัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน (depolarization ratio : δ) ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย (aerosol backscattering coefficient : $\beta_a(z)$) ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากโมเลกุล (molecule backscattering coefficient : $\beta_m(z)$) ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากละอองลอย (aerosol attenuation coefficient : $\alpha_a(z)$) ซึ่งใช้วิธีการคำนวณแบบเฟร์นัลด์ (Fernald method) โดยการสร้างโมเดลขั้นตอนวิธีวิเคราะห์และแสดงผลพารามิเตอร์ของละอองลอย (Aerosol Parameters Retrieval Algorithm : APRA) จากข้อมูลเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี

โดยการนำข้อมูลจริงที่เป็นไฟล์นามสกุล *.txt ที่ผ่านการแปลงไฟล์เรียบร้อยแล้ว สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้จากภาคผนวก ก มาคำนวณผ่านโปรแกรม APRA จากที่กล่าวมาในบทที่ 3 นับตั้งแต่การป้อนข้อมูลได้แก่ ชื่อไฟล์ข้อมูลที่เราเลือกไว้ที่ต้องการคำนวณ และค่าอัตราส่วนไลดาร์สำหรับละอองลอย (S_a) ณ เวลาดังกล่าว ให้กับโปรแกรม APRA หลังจาก 5 วินาทีโปรแกรมแสดงผลสำหรับเวลานั้น ๆ ออกมาสองส่วนด้วยกัน คือ ส่วนที่หนึ่งแสดงผลเป็นกราฟ ได้แก่ กราฟสัญญาณการแก้ไขพิสัย ($X(z)$) กราฟอัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน (δ) กราฟสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย ($\beta_a(z)$) และกราฟสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากละอองลอย ($\alpha_a(z)$) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-1 (a) และ 4-2 (a) สำหรับส่วนที่สองแสดงผลเป็นค่าของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลละอองลอย ดังแสดงในตารางที่ 4-1 โดย คอลัมน์ที่ 1 คือเวลาที่แสดงทุก ๆ หนึ่งชั่วโมงตลอดวัน คอลัมน์ที่ 2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากโมเลกุล (molecule backscattering coefficient : β_m) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-25 สำหรับค่าคงที่ของเครื่องมือ (lidar system calibration factor : C) สามารถคำนวณได้จากสมการ 2-24 เนื่องจากที่ระดับความสูงเหนือ 4,000 เมตรเป็นบริเวณที่มีสัญญาณรบกวน (noise) มาก และโดยทั่วไปละอองลอยส่วนมากอยู่หนาแน่นที่ระดับความสูงประมาณ 2,000 – 3,000 เมตร ดังนั้นในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับละอองลอยจึงแสดงที่ความสูง 500 - 4,000 เมตร

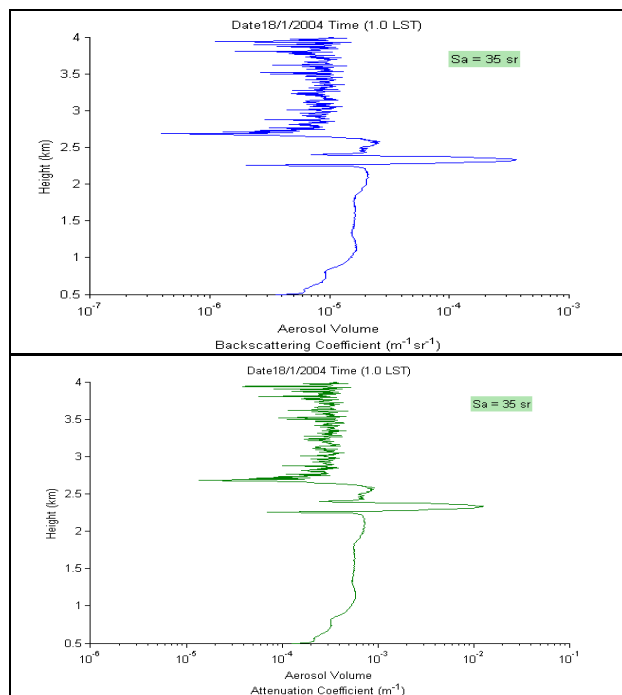


(a)

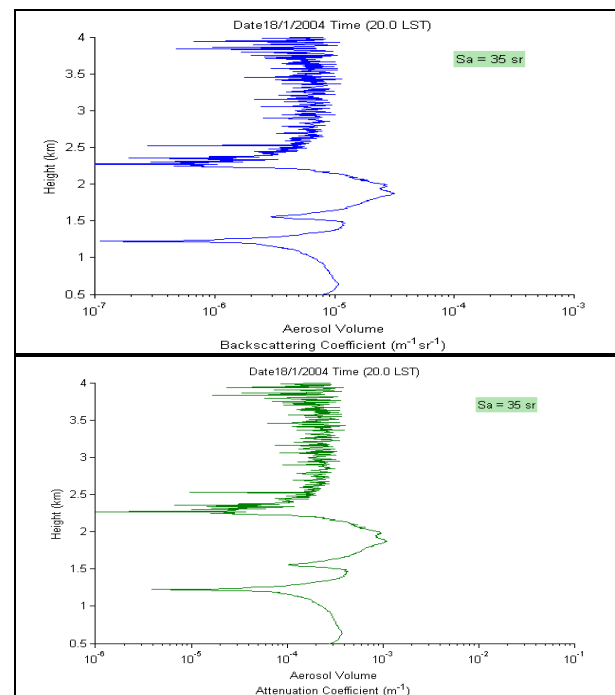


(b)

ภาพประกอบ 29 โปรไฟล์ตามแนวดิ่งของค่าสัญญาณการแก่งเชิงโพลาไรซ์ ($X(z)$) และค่าอัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน (δ) ของวันที่ 18 มกราคม พ.ศ.2547 ณ สถานีวิจัยตรวจวัดการแผ่รังสีในชั้นบรรยากาศ อำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย ที่ได้จากโปรแกรม APRA (a) เวลา 01.00 น. และ (b) เวลา 20.00 น. ตามลำดับ

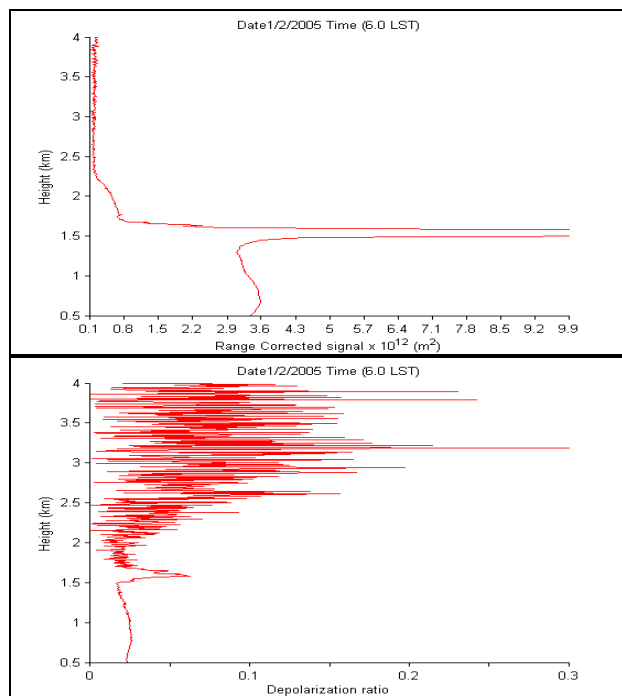


(a)

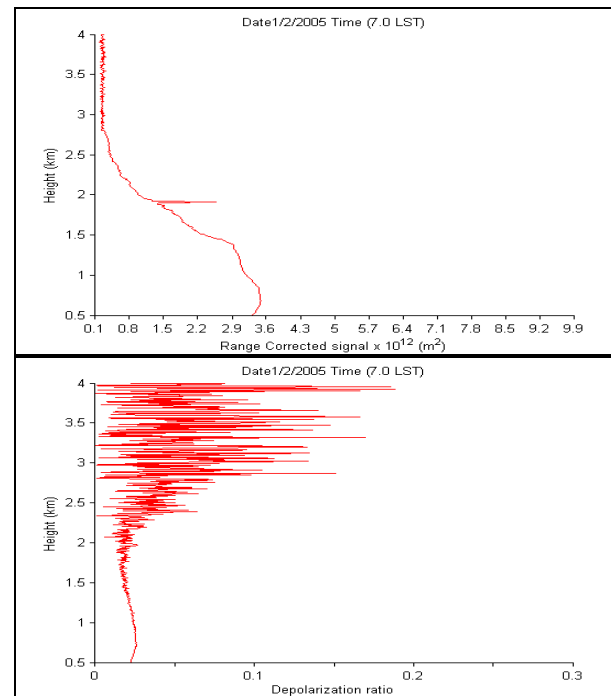


(b)

ภาพประกอบ 30 ไฟรไฟล์ตามแนวดิ่งของค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย (aerosol backscattering coefficient : $\beta_a(z)$) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากละอองลอย (aerosol attenuation coefficient : $\alpha_a(z)$) ของวันที่ 18 มกราคม พ.ศ.2547 ณ สถานีวิจัยตรวจวัดการแผ่รังสีในชั้นบรรยากาศ อำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย ที่ได้จากโปรแกรม APRA (a) เวลา 01.00 น. และ (b) เวลา 20.00 น. ตามลำดับ

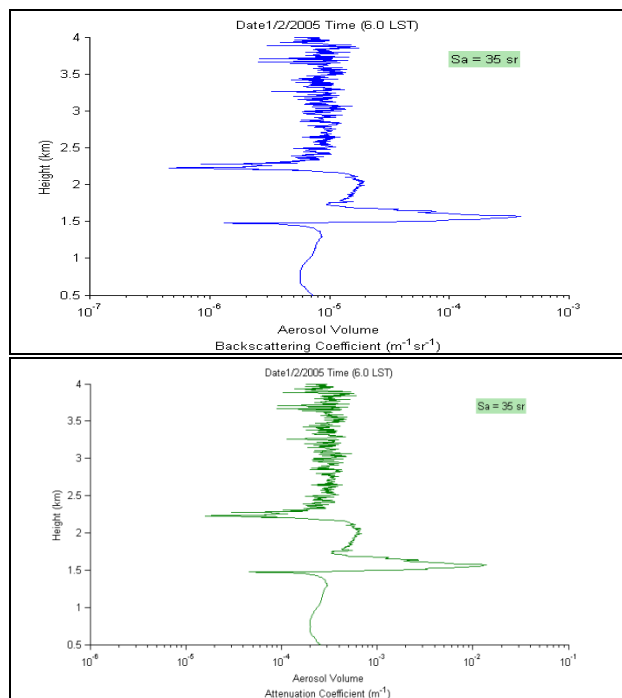


(a)

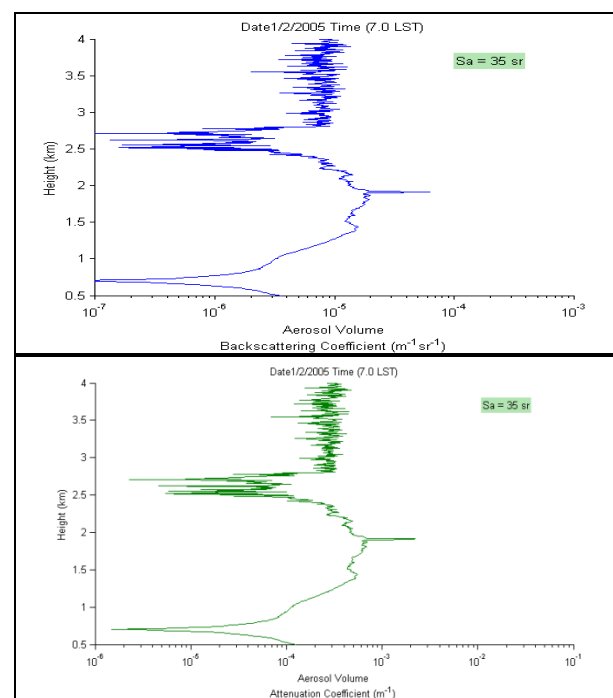


(b)

ภาพประกอบ 31 โปรไฟล์ตามแนวตั้งของค่าสัญญาณการแก่งพิสัย ($X(z)$) และค่าอัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน (δ) ของวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2548 ณ สถานีวิจัยในชั้นบรรยากาศ อำเภอฟิมมาย จังหวัดนครราชสีมา ที่ได้จากโปรแกรม APRA (a) เวลา 06.00 น. และ (b) เวลา 07.00 น. ตามลำดับ



(a)



(b)

ภาพประกอบ 32 โปรไฟล์ตามแนวตั้งของค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย (aerosol backscattering coefficient : $\beta_a(z)$) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากละอองลอย (aerosol attenuation coefficient : $\alpha_a(z)$) ของวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2548 ณ สถานีวิจัยในชั้นบรรยากาศ อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ที่ได้จากโปรแกรม APRA (a) เวลา 06.00 น. และ (b) เวลา 07.00 น. ตามลำดับ

ตาราง 6 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลละอองลอย ในวันที่ 18 มกราคม พ.ศ.2547 ณ สถานี
วิจัยตรวจวัดการแผ่รังสีในชั้นบรรยากาศ อำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัยที่คำนวณจาก APRA

เวลา	$\beta_m(z_c)$ ($\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$)	เวลา	$\beta_m(z_c)$ ($\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$)
00.00	2.6750E-05	12.00	2.8872E-05
01.00	2.6594E-05	13.00	2.8821E-05
02.00	2.8858E-05	14.00	2.7178E-05
03.00	2.7699E-05	15.00	2.8849E-05
04.00	2.8572E-05	16.00	2.8800E-05
05.00	2.7584E-05	17.00	2.7299E-05
06.00	2.8694E-05	18.00	2.7993E-05
07.00	2.7186E-05	19.00	2.8540E-05
08.00	2.8486E-05	20.00	2.7292E-05
09.00	2.5884E-05	21.00	2.8488E-05
10.00	2.7518E-05	22.00	2.7603E-05
11.00	2.8090E-05	23.00	2.8461E-05

ตาราง 7 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลละอองลอย ในวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2548 ณ สถานี
วิจัยในชั้นบรรยากาศ อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมาที่คำนวณจาก APRA

เวลา	$\beta_m(z_c)$ ($\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$)	เวลา	$\beta_m(z_c)$ ($\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$)
00.00	2.6401E-05	12.00	2.8864E-05
01.00	2.7795E-05	13.00	2.7920E-05
02.00	2.8005E-05	14.00	2.7620E-05
03.00	2.8661E-05	15.00	2.9148E-05
04.00	2.9129E-05	16.00	2.6375E-05
05.00	2.7521E-05	17.00	2.7797E-05
06.00	2.9186E-05	18.00	2.7981E-05
07.00	2.9172E-05	19.00	2.8042E-05
08.00	2.7558E-05	20.00	2.9246E-05
09.00	2.7833E-05	21.00	2.8283E-05
10.00	2.7763E-05	22.00	2.7406E-05
11.00	2.8197E-05	23.00	2.8831E-05

ผลการทดสอบโปรแกรม APRA ด้วยข้อมูลเทียม (pseudo data)

เมื่อสร้างข้อมูลเทียมแทนเวลา 3 เวลา ที่ประกอบด้วยข้อมูลที่เป็นค่าเดียวกันได้แก่ ชุดข้อมูลเทียม (pseudo data) ที่เป็นเลข 0 เลข 1 และเลข 10000000 พบว่าโปรแกรมแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ ค่าสัญญาณการแกว่งพิสัย ($X(z)$) และค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากโมเลกุล ($\beta_m(z)$) แสดงค่าเป็น 0 ทุกระดับความสูง เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ $\beta_m(z)$ นั้นขึ้นกับ $X(z)$ ซึ่งในที่นี้ข้อมูลมีค่าเท่ากันทุกระดับความสูง ตามสมการที่ 4-1 และในขั้นตอนของการคำนวณหาค่า $X(z)$ ที่ระดับความสูงต่าง ๆ นั้นต้องมีการนำสัญญาณรบกวนมาลบออกจากสัญญาณที่วัดได้จึงทำให้ค่า $X(z)$ เป็น 0 ในทุกระดับความสูง สำหรับค่าอัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน (δ) และค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย ($\beta_a(z)$) ไม่แสดงค่าได้ เนื่องจากในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมีขั้นตอนที่ตัวส่วนของสมการในการคำนวณมีค่าเป็น 0 ซึ่งผลดังกล่าวเป็นไปตามที่คาดไว้

ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลของโปรแกรม APRA กับ ผลของ อัมพร รุ่งแจ้ง

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จาก APRA ของวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2547 และ วันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2548 ไปเปรียบเทียบผลจากงานวิจัยของอัมพร รุ่งแจ้ง¹ ที่ต้องทำด้วยมือโดยใช้โปรแกรม excel คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ค่าสัญญาณการแก่งเชิงพิสัย ($X(z)$) ค่าอัตราส่วนดีโพลาริเซชัน (δ) ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย ($\beta_a(z)$) (ตาราง 8 และ 9) และค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากโมเลกุล ($\beta_m(z)$) (ตารางที่ 4-5) และกราฟทั้ง 3 กราฟ ได้แก่ กราฟสัญญาณการแก่งเชิงพิสัย ($X(z)$) กราฟอัตราส่วนดีโพลาริเซชัน (δ) กราฟสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย ($\beta_a(z)$) ดังภาพประกอบ 33 และ 34

¹ Ruangrungrate, S.; Intason, A.; & Rungjang, A. (2009). *สองวิธีสำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเชิงปริมาตรของละอองลอยชั้นโทรโพสเฟียร์โดยใช้ไลดาร์การกระเจิงแบบมี จังหวัดสุโขทัย. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 32(1): 77-87*

ตาราง 8 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณจากโปรแกรม excel (ช่องสีขา) และจากโปรแกรม APRA (ช่องสีเทา) ของข้อมูลละอองลอยที่วัดด้วยเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี ในวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2547 เวลา 01.00 น. ณ สถานีวิจัยตรวจวัดการแผ่รังสีในชั้นบรรยากาศอำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย

Height (m)	$X(z)$ (m^2)		δ (%)		$\beta_a(z)$ ($m^{-1}sr^{-1}$)	
	Excel	APRA	Excel	APRA	Excel	APRA
6	2.47282E+07	2.47282E+07	1.216538	1.216538	2.6596E-05	2.6594E-05
12	1.15941E+10	1.15941E+10	0.501901	0.501901	2.6322E-05	2.6321E-05
18	1.65563E+10	1.65563E+10	0.152604	0.152604	2.6208E-05	2.6207E-05
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
504	6.51266E+11	6.51266E+11	0.035578	0.035578	4.8113E-06	4.8104E-06
510	6.35208E+11	6.35208E+11	0.035894	0.035894	5.3336E-06	5.3327E-06
516	6.24789E+11	6.24789E+11	0.034704	0.034704	5.6725E-06	5.6715E-06
522	6.17662E+11	6.17662E+11	0.034968	0.034968	5.9043E-06	5.9033E-06
528	6.10700E+11	6.10700E+11	0.034719	0.034719	6.1328E-06	6.1318E-06
534	6.09244E+11	6.09244E+11	0.034689	0.034689	6.1788E-06	6.1778E-06
540	6.09670E+11	6.09670E+11	0.035043	0.035043	6.1621E-06	6.1611E-06
546	6.06928E+11	6.06928E+11	0.035314	0.035314	6.2515E-06	6.2505E-06
552	6.09545E+11	6.09545E+11	0.035209	0.035209	6.1620E-06	6.1610E-06
558	6.10814E+11	6.10814E+11	0.034619	0.034619	6.1169E-06	6.1159E-06
564	6.08029E+11	6.08029E+11	0.035180	0.035180	6.2074E-06	6.2064E-06
570	6.08410E+11	6.08410E+11	0.034096	0.034096	6.1925E-06	6.1915E-06
576	6.07614E+11	6.07614E+11	0.034918	0.034918	6.2169E-06	6.2159E-06
582	6.01428E+11	6.01428E+11	0.034498	0.034498	6.4224E-06	6.4214E-06
588	5.95251E+11	5.95251E+11	0.034343	0.034343	6.6293E-06	6.6283E-06
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
2004	4.22169E+11	4.22169E+11	0.018121	0.018121	2.0368E-05	2.0366E-05

ตาราง 8 (ต่อ)

Height (m)	$X(z)$ (m ²)		δ (%)		$\beta_a(z)$ (m ⁻¹ sr ⁻¹)	
	Excel	APRA	Excel	APRA	Excel	APRA
2010	4.23877E+11	4.23877E+11	0.029251	0.029251	2.0379E-05	2.0378E-05
2016	4.40677E+11	4.40677E+11	0.027142	0.027142	2.0171E-05	2.0169E-05
2022	4.40630E+11	4.40630E+11	0.021072	0.021072	2.0208E-05	2.0207E-05
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
2250	1.41633E+12	1.41633E+12	0.024652	0.024652	1.0103E-05	1.0102E-05
2256	2.11578E+12	2.11578E+12	0.021346	0.021346	1.9963E-06	1.9949E-06
2262	3.08516E+12	3.08516E+12	0.019847	0.019847	9.3422E-06	9.3435E-06
2268	4.23073E+12	4.23073E+12	0.022534	0.022534	2.3018E-05	2.3020E-05
2274	6.10828E+12	6.10828E+12	0.025171	0.025171	4.5942E-05	4.5943E-05
2280	7.80434E+12	7.80434E+12	0.032528	0.032528	6.8187E-05	6.8188E-05
2286	8.98723E+12	8.98723E+12	0.034408	0.034408	8.6117E-05	8.6118E-05
2292	1.04040E+13	1.04040E+13	0.034346	0.034346	1.0921E-04	1.0921E-04
2298	1.38551E+13	1.38551E+13	0.036007	0.036007	1.6357E-04	1.6358E-04
2304	1.72228E+13	1.72228E+13	0.042645	0.042645	2.2815E-04	2.2815E-04
2310	1.82776E+13	1.82776E+13	0.051321	0.051321	2.7358E-04	2.7358E-04
2316	1.79697E+13	1.79697E+13	0.060114	0.060114	3.0824E-04	3.0824E-04
2322	1.77423E+13	1.77423E+13	0.072450	0.072450	3.5484E-04	3.5484E-04
2328	1.54567E+13	1.54567E+13	0.081960	0.081960	3.6575E-04	3.6575E-04
2334	1.28388E+13	1.28388E+13	0.090713	0.090713	3.6030E-04	3.6030E-04
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
4002	1.80490E+11	1.80490E+11	0.078793	0.078793	9.4192E-06	9.4180E-06

ตาราง 9 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณจากโปรแกรม excel (ช่องสีเขียว) และจากโปรแกรม APRA (ช่องสีเทา) ของข้อมูลละอองลอยที่วัดด้วยเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี ในวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2548 เวลา 06.00 น. ณ สถานีวิจัยในชั้นบรรยากาศ อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา

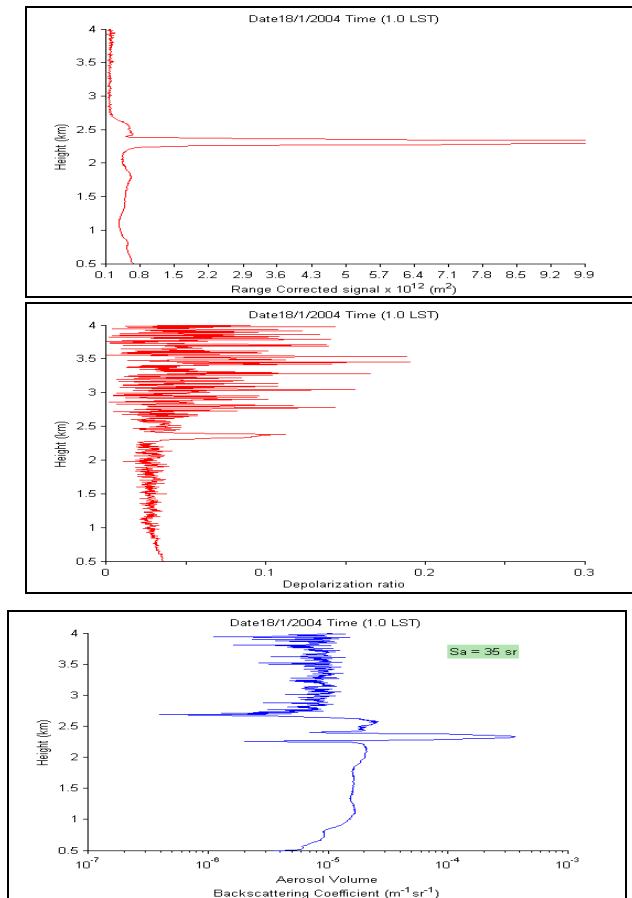
Height (m)	$X(z)$ (m^2)		δ (%)		$\beta_a(z)$ ($m^{-1}sr^{-1}$)	
	Excel	APRA	Excel	APRA	Excel	APRA
6	1.09258E+07	1.09258E+07	0.214330	0.214330	2.9185E-05	2.9186E-05
12	4.95094E+09	4.95094E+09	0.188296	0.188296	2.9139E-05	2.9139E-05
18	3.71564E+09	3.71564E+09	0.048258	0.048258	2.9151E-05	2.9151E-05
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
504	3.38888E+12	3.38888E+12	0.023075	0.023075	7.1827E-06	7.1823E-06
510	3.40372E+12	3.40372E+12	0.023003	0.023003	7.0872E-06	7.0868E-06
516	3.41814E+12	3.41814E+12	0.022862	0.022862	6.9935E-06	6.9931E-06
522	3.43069E+12	3.43069E+12	0.022778	0.022778	6.9111E-06	6.9107E-06
528	3.44281E+12	3.44281E+12	0.022804	0.022804	6.8308E-06	6.8304E-06
534	3.45769E+12	3.45769E+12	0.022732	0.022732	6.7317E-06	6.7313E-06
540	3.46807E+12	3.46807E+12	0.022746	0.022746	6.6608E-06	6.6604E-06
546	3.47437E+12	3.47437E+12	0.022831	0.022831	6.6157E-06	6.6153E-06
552	3.47840E+12	3.47840E+12	0.022706	0.022706	6.5850E-06	6.5846E-06
558	3.47963E+12	3.47963E+12	0.022881	0.022881	6.5722E-06	6.5718E-06
564	3.48248E+12	3.48248E+12	0.022994	0.022994	6.5487E-06	6.5483E-06
570	3.48428E+12	3.48428E+12	0.022980	0.022980	6.5318E-06	6.5314E-06
576	3.48818E+12	3.48818E+12	0.023032	0.023032	6.5010E-06	6.5006E-06
582	3.49527E+12	3.49527E+12	0.023186	0.023186	6.4492E-06	6.4488E-06
588	3.50150E+12	3.50150E+12	0.023162	0.023162	6.4025E-06	6.4021E-06
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
2004	5.23469E+11	5.23469E+11	0.008805	0.008805	1.7411E-05	1.7412E-05

ตาราง 9 (ต่อ)

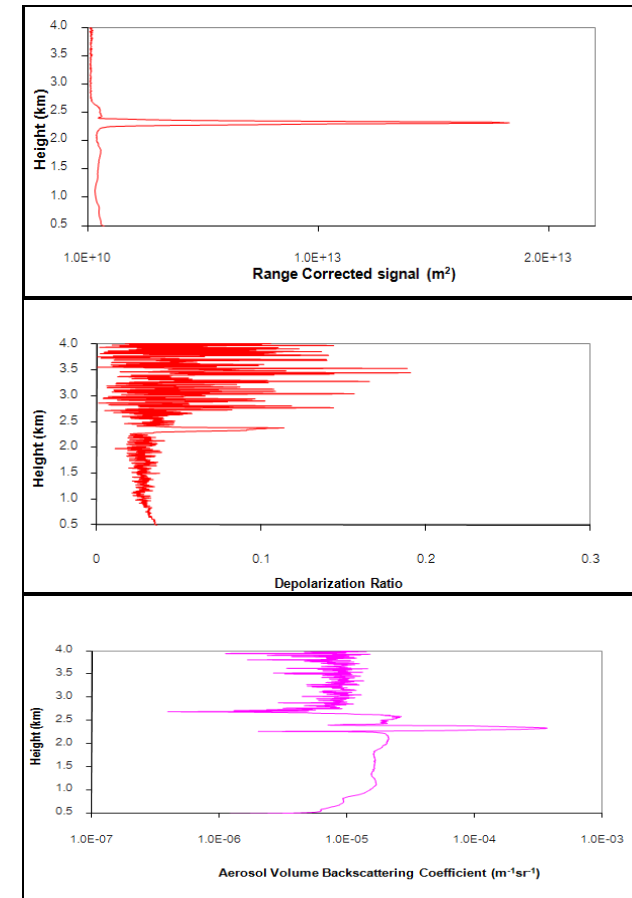
Height (m)	$X(z)$ (m ²)		δ (%)		$\beta_a(z)$ (m ⁻¹ sr ⁻¹)	
	Excel	APRA	Excel	APRA	Excel	APRA
2010	5.30317E+11	5.30317E+11	0.017017	0.017017	1.8516E-05	1.8517E-05
2016	5.20124E+11	5.20124E+11	0.016563	0.016563	1.8113E-05	1.8114E-05
2022	5.11278E+11	5.11278E+11	0.011792	0.011792	1.7810E-05	1.7812E-05
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
2250	2.19982E+11	2.19982E+11	0.024755	0.024755	1.8983E-06	1.8973E-06
2256	2.08240E+11	2.08240E+11	0.052686	0.052686	3.2978E-06	3.2969E-06
2262	2.16287E+11	2.16287E+11	0.028286	0.028286	2.2541E-06	2.2531E-06
2268	2.14319E+11	2.14319E+11	0.042594	0.042594	2.4443E-06	2.4434E-06
2274	2.16851E+11	2.16851E+11	0.017925	0.017925	2.0751E-06	2.0740E-06
2280	2.26137E+11	2.26137E+11	0.009754	0.009754	8.5382E-07	8.5273E-07
2286	1.98106E+11	1.98106E+11	0.039929	0.039929	4.2998E-06	4.2989E-06
2292	1.89377E+11	1.89377E+11	0.070284	0.070284	5.3682E-06	5.3674E-06
2298	1.98893E+11	1.98893E+11	0.035570	0.035570	4.1532E-06	4.1523E-06
2304	2.08214E+11	2.08214E+11	0.027348	0.027348	2.9474E-06	2.9464E-06
2310	1.91242E+11	1.91242E+11	0.023317	0.023317	5.0436E-06	5.0427E-06
2316	1.86894E+11	1.86894E+11	0.051622	0.051622	5.5719E-06	5.5711E-06
2322	1.92393E+11	1.92393E+11	0.006763	0.006763	4.8615E-06	4.8606E-06
2328	1.65391E+11	1.65391E+11	0.062872	0.062872	8.2555E-06	8.2548E-06
2334	1.85562E+11	1.85562E+11	0.017135	0.017135	5.7146E-06	5.7137E-06
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
4002	1.63192E+11	1.63192E+11	0.016913	0.016913	1.2752E-05	1.2751E-05

ตาราง 9 ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากโมเลกุล ($\beta_m(z)$) ของวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2547 และวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2548 ที่แสดงใน excel และแสดงใน APRA

เวลา	$\beta_m(z_c)$ ($\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$)			
	18 มกราคม พ.ศ. 2547		1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2548	
	Excel	APRA	Excel	APRA
00.00	2.68E-05	2.6750E-05	2.64E-05	2.6401E-05
01.00	2.66E-05	2.6594E-05	2.78E-05	2.7795E-05
02.00	2.89E-05	2.8858E-05	2.80E-05	2.8005E-05
03.00	2.77E-05	2.7699E-05	2.87E-05	2.8661E-05
04.00	2.86E-05	2.8572E-05	2.91E-05	2.9129E-05
05.00	2.76E-05	2.7584E-05	2.75E-05	2.7521E-05
06.00	2.87E-05	2.8694E-05	2.92E-05	2.9186E-05
07.00	2.72E-05	2.7186E-05	2.92E-05	2.9172E-05
08.00	2.85E-05	2.8486E-05	2.76E-05	2.7558E-05
09.00	2.59E-05	2.5884E-05	2.78E-05	2.7833E-05
10.00	2.75E-05	2.7518E-05	2.78E-05	2.7763E-05
11.00	2.81E-05	2.8090E-05	2.82E-05	2.8197E-05
12.00	2.89E-05	2.8872E-05	2.89E-05	2.8864E-05
13.00	2.88E-05	2.8821E-05	2.79E-05	2.7920E-05
14.00	2.72E-05	2.7178E-05	2.76E-05	2.7620E-05
15.00	2.89E-05	2.8849E-05	2.91E-05	2.9148E-05
16.00	2.88E-05	2.8800E-05	2.64E-05	2.6375E-05
17.00	2.73E-05	2.7299E-05	2.78E-05	2.7797E-05
18.00	2.80E-05	2.7993E-05	2.80E-05	2.7981E-05
19.00	2.85E-05	2.8540E-05	2.80E-05	2.8042E-05
20.00	2.73E-05	2.7292E-05	2.92E-05	2.9246E-05
21.00	2.85E-05	2.8488E-05	2.83E-05	2.8283E-05
22.00	2.76E-05	2.7603E-05	2.74E-05	2.7406E-05
23.00	2.85E-05	2.8461E-05	2.79E-05	2.8831E-05

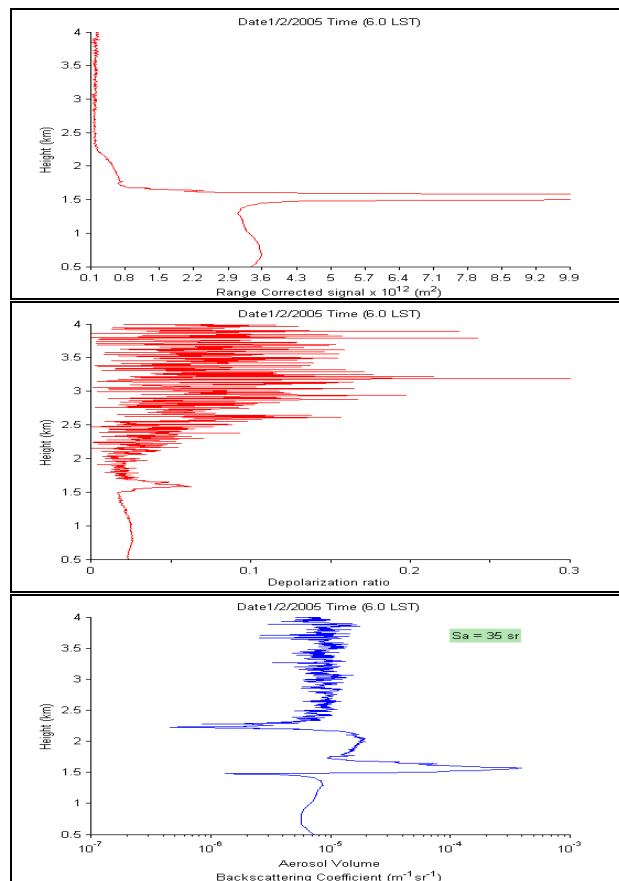


(a)

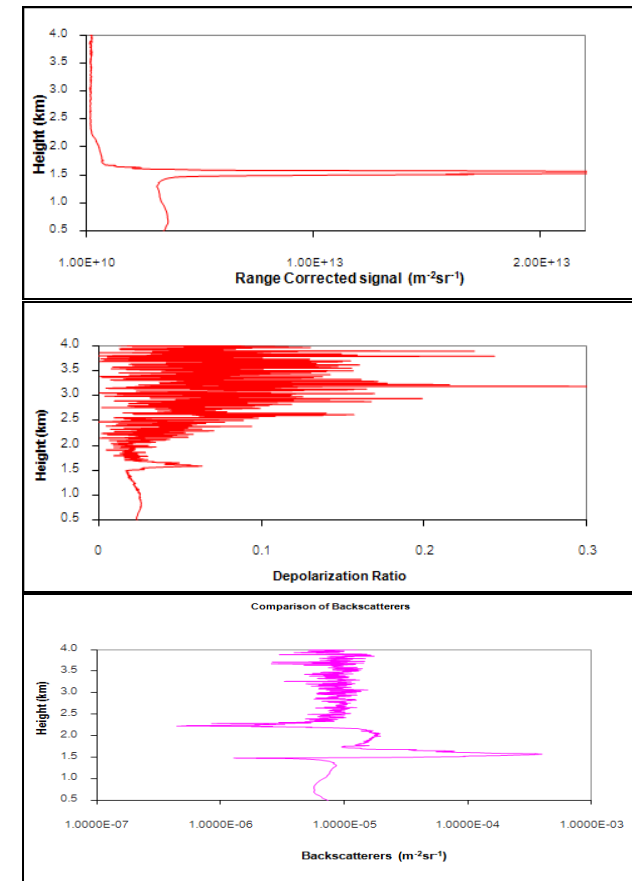


(b)

ภาพประกอบ 33 กราฟสัญญาณการแก่งเชิงพัสัย ($X(z)$) กราฟอัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน (δ) กราฟสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย ($\beta_a(z)$) ของวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2547 เวลา 01.00 น. (a) กราฟจากโปรแกรม APRA (b) กราฟจากโปรแกรม Excel



(a)



(b)

ภาพประกอบ 34 กราฟสัญญาณการแก่งเชิงพหุ ($X(z)$) กราฟอัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน (δ) กราฟสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย ($\beta_a(z)$)
 ของวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2547 เวลา 06.00 น. (a) กราฟจากโปรแกรม APRAS (b) กราฟจากโปรแกรม Excel

จากตาราง 8 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2547 เวลา 01.00 น. พบว่าค่าสัญญาณการแก่งิพิสัย ($X(z)$) ที่ได้จากโปรแกรม APRA มีค่าสอดคล้องกับค่าสัญญาณการแก่งิพิสัยที่ได้จากโปรแกรม excel ในงานวิจัยของอัมพร รุ่งแจ้ง ถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 13 ค่าอัตราส่วนดีโพลาริเซชัน (δ) มีค่าสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนดีโพลาริเซชันจากโปรแกรม excel ถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 13 และค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย ($\beta_a(z)$) ที่ได้จาก APRA มีค่าสอดคล้องกับค่าที่ได้จาก excel ถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 9

สำหรับตาราง 9 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2548 เวลา 06.00 น. พบว่าค่าสัญญาณการแก่งิพิสัย ($X(z)$) ที่ได้จากโปรแกรม APRA มีค่าสอดคล้องกับค่าสัญญาณการแก่งิพิสัยที่ได้จากโปรแกรม excel ในงานวิจัยของอัมพร รุ่งแจ้ง เช่นเดียวกันคือถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 13 ค่าอัตราส่วนดีโพลาริเซชัน (δ) มีค่าสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนดีโพลาริเซชันจากโปรแกรม excel ถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 13 และค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย ($\beta_a(z)$) ที่ได้จาก APRA มีค่าสอดคล้องกับค่าที่ได้จาก excel ถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 9 ตารางที่ 4-5 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากโมเลกุล ($\beta_m(z)$) ที่ใช้คำนวณในโปรแกรม APRA มีความละเอียดมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากโมเลกุลที่ใช้คำนวณใน excel ที่มีเลขนัยสำคัญเพียง 3 ตัว โดยค่า $\beta_m(z)$ ที่ใช้ในโปรแกรม APRA นั้นค่าดังกล่าวถูกบันทึกลงในตัวแปรที่สามารถเก็บเลขนัยสำคัญได้ถึง 16 ตัว

ภาพประกอบ 33 พบว่ากราฟของวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2547 เวลา 01.00 น. ที่ได้จากการใช้โปรแกรม APRA นั้นมีความสอดคล้องกับกราฟที่ได้จากโปรแกรม excel ของอัมพร รุ่งแจ้ง พบว่ากราฟค่าสัญญาณการแก่งิพิสัยมีค่าสูง ๆ ที่ระดับความสูง 2,000-2,500 เมตร หมายความว่า มีเมฆที่ระดับความสูง 2,000-2,500 เมตร ซึ่งสอดคล้องกับกราฟอีก 2 อัน เมื่อพิจารณากราฟของอัตราส่วนดีโพลาริเซชันพบว่าละอองลอยที่อยู่ที่ระดับความสูง 500-2,300 เมตร นั้นมีลักษณะเล็กมากใกล้เคียงทรงกลม อาจเป็นละอองลอยมลพิษทางอากาศที่เกิดจากเกษตรกรรม

ภาพประกอบ 34 พบว่ากราฟของวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2548 เวลา 06.00 น. ที่ได้จากการใช้โปรแกรม APRA นั้นมีความสอดคล้องกับกราฟที่ได้จากโปรแกรม excel ของอัมพร รุ่งแจ้ง เช่นเดียวกัน พบว่ากราฟค่าสัญญาณการแก่งิพิสัยมีค่าสูง ๆ ที่ระดับความสูง 1,500 เมตร หมายความว่า มีเมฆที่ระดับความสูง 1,500 เมตร เมื่อพิจารณากราฟของอัตราส่วนดีโพลาริเซชันและกราฟของสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอยก็มีความสอดคล้องกัน

ได้ทำการทดสอบโปรแกรม เพื่อประเมินเกี่ยวกับความสามารถของการทำงานโดยมีผู้ทดลองใช้โปรแกรมจำนวน 6 คน พบว่าผู้ทดลองใช้งานโปรแกรม APRA พบว่าโปรแกรม APRA สามารถลดขั้นตอนการทำงานที่ซับซ้อน และประหยัดเวลามากกว่าเมื่อเทียบกับการทำงานด้วยตัวเองกับ

โปรแกรม excel ซึ่งในการทำงานเดิมมีความลำบากมากในขั้นตอนต่าง ๆ ได้แก่ ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ คือ ความสูง ค่าโพลาริเซชันในแนวนอนและแนวตั้งจากที่เครื่องมือไลดาร์เก็บข้อมูลได้ ขั้นตอนการใส่สมการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ การหาค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากโมเลกุล ที่เดิมต้องใช้โปรแกรม mathematica ในการคำนวณค่าดังกล่าวออกมาซึ่งสร้างความยุ่งยากแก่ผู้ที่ไม่มีความรู้ในการใช้งานโปรแกรมที่หลากหลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการสร้างกราฟต่าง ๆ ในโปรแกรมเดิมที่ต้องกำหนดชุดข้อมูล และวางโครงสร้างส่วนประกอบต่าง ๆ ของกราฟซึ่งต้องทำกับกราฟทั้งสามกราฟ สิ่งเหล่านี้เกิดขึ้นกับข้อมูลเพียงหนึ่งชั่วโมง ในการทำงานแต่ละครั้งต้องทำการพิจารณาข้อมูลมากกว่า 1 วัน หรือ 24 ชั่วโมง ผู้ใช้ให้ข้อมูลว่าในการวิเคราะห์ข้อมูล 1 ชั่วโมงใช้เวลาในการทำงานมากกว่า 1 วัน ในขณะที่โปรแกรม APRA ใช้เวลาเพียง 3 นาทีและลดขั้นตอนการทำงานโดยใช้โปรแกรมเดียว แสดงดังตาราง 10

ตาราง 10 ตารางเปรียบเทียบขั้นตอนการทำงาน และเวลาระหว่าง 2 โปรแกรม

โปรแกรม excel	โปรแกรม APRA
ขั้นตอนการทำงาน	ขั้นตอนการทำงาน
1. เตรียมข้อมูลให้พร้อมคำนวณในโปรแกรม (ค่าโพลาริเซชันทั้งแนวนอนและตั้งฉาก)	1. เตรียมข้อมูลให้พร้อมคำนวณในโปรแกรม โดยนำไฟล์ *.txt ที่ได้จากการแปลงข้อมูลดิบมาไว้ในตำแหน่งเดียวกับโปรแกรม APRA
2. สร้างความสูงที่เพิ่มขึ้นทีละ 6 เมตร	2. รันโปรแกรม APRA
3. ใส่สูตรคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งไม่สามารถใส่สูตรทั้งหมดได้ในครั้งเดียว โดยในแต่ละคอลัมน์ต้องใส่สูตรทีละขั้นตอน	3. ใส่ค่าต่าง ๆ ตามที่โปรแกรมต้องการ
4. ใช้โปรแกรม mathematica คำนวณหาค่า $\beta_m(z)$ และนำค่าที่คำนวณได้มาใช้ในการโปรแกรมเดิมอีกครั้ง	4. รอให้โปรแกรมแสดงผล ประมาณ 5 วินาที
5. เลือกช่วงข้อมูลในการสร้างกราฟ $X(z)$	5. ผลที่ได้ คือกราฟสัญญาณการแก่งเชิงพิสัย ($X(z)$) กราฟอัตราส่วนดีโพลาริเซชัน (δ) กราฟสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย ($\beta_a(z)$) กราฟสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากละอองลอย ($\alpha_a(z)$) และค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากโมเลกุล (β_m) เวลาในการทำงาน ไฟล์ 1 ชั่วโมงใช้เวลา 60 นาที
6. วางโครงสร้างส่วนประกอบต่าง ๆ ของกราฟ	
7. ทำตามขั้นตอนที่ 5-6 อีกครั้งเพื่อสร้างกราฟ δ	
8. ทำตามขั้นตอนที่ 5-6 อีกครั้งเพื่อสร้างกราฟ $\beta_a(z)$ เวลาในการทำงาน ไฟล์ 1 ชั่วโมงใช้เวลา 60 นาที	

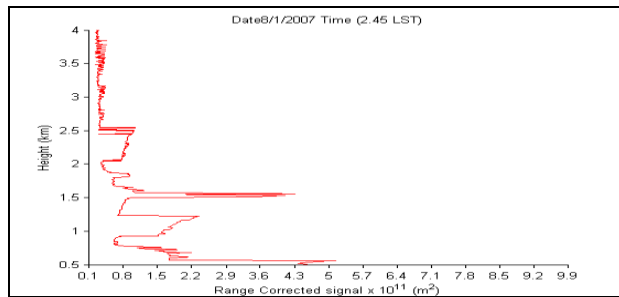
ผลการทดลองกับข้อมูลในปี 2007

ด้วยความอนุเคราะห์ข้อมูลจากภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นข้อมูลของวันที่ 8 มกราคม พ.ศ. 2550 เวลา 02.45 น. เป็นไฟล์ *.txt ที่พร้อมนำเข้าโปรแกรม APRA ได้ผลการทดลองดังนี้

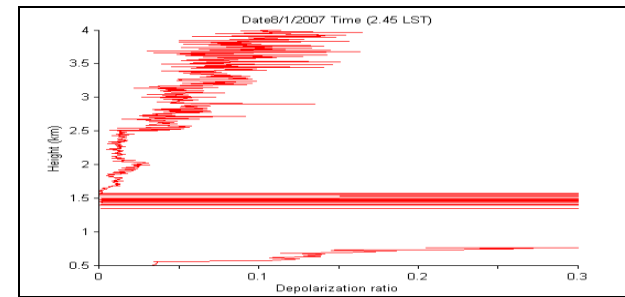
ตาราง 11 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลละอองลอย ในวันที่ 8 มกราคม พ.ศ. 2550 เวลา

02.00น. ณ สถานีวิจัยในชั้นบรรยากาศ อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ที่คำนวณจาก APRA

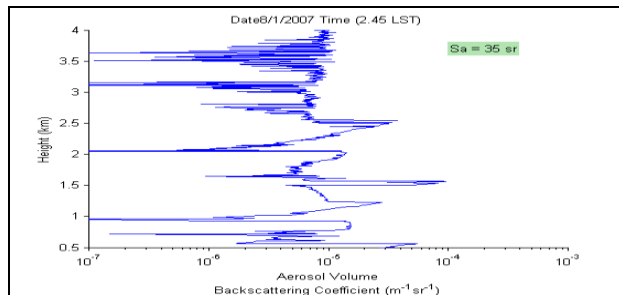
เวลา	$\beta_m(z_c)$ ($\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$)
02.45	2.6108e-005



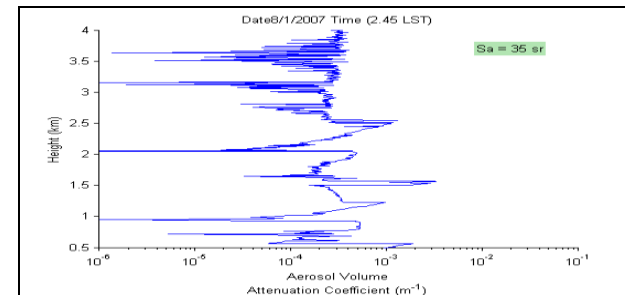
(a)



(b)



(c)



(d)

ภาพประกอบ 35 โปรไฟล์ตามแนวดิ่งของ (a) ค่าสัญญาณการแก่งพิสัย ($X(z)$) (b) ค่าอัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน (δ) (c) ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย ($\beta_a(z)$) (d) ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากละอองลอย ($\alpha_a(z)$) ของวันที่ 8 มกราคม พ.ศ.2550 เวลา 02.45 น. ณ สถานีวิจัยในชั้นบรรยากาศ อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ที่ได้จากโปรแกรม APRA

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

จากผลการทดสอบความถูกต้องในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ของ ลอยด้วยข้อมูลจริง ซึ่งเป็นข้อมูลของวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2547 และวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2548 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากงานวิจัยของอัมพร รุ่งแจ้ง ได้ผลดังนี้

1. พบว่าค่าสัญญาณการแก่งเชิงพิสัย ($X(z)$) ที่ได้จากโปรแกรม APRA มีค่าสอดคล้องกับ ค่าสัญญาณการแก่งเชิงพิสัยที่ได้จากโปรแกรม excel ในงานวิจัยของอัมพร รุ่งแจ้ง ถึงทศนิยม ตำแหน่งที่ 13

2. ค่าอัตราส่วนดีโพลาริเซชัน (δ) มีค่าสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนดีโพลาริเซชันจาก โปรแกรม excel ถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 13

3. ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย ($\beta_a(z)$) ที่ได้จาก APRA มีค่า สอดคล้องกับค่าที่ได้จาก excel ถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 9

4. ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากโมเลกุล ($\beta_m(z)$) ที่ใช้คำนวณในโปรแกรม APRA ของทั้งสองวันนั้นมีความละเอียดมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากโมเลกุลที่ นำไปใช้คำนวณใน excel ที่มีเลขนัยสำคัญเพียง 3 ตัว เนื่องจากค่า $\beta_m(z)$ ที่ใช้ใน excel นั้นเป็นค่าที่ ผู้ใช้ (user) ต้องเก็บค่าด้วยตัวเองหลังจากใช้โปรแกรม mathematica คำนวณหาค่า $\beta_m(z)$ ในแต่ละ ชั่วโมงของแต่ละวันแล้ว ซึ่งผู้ใช้ไม่สามารถเก็บค่า $\beta_m(z)$ ที่มีเลขนัยสำคัญจำนวนมากได้ แต่สำหรับ ค่า $\beta_m(z)$ ที่ใช้ในโปรแกรม APRA นั้นค่าดังกล่าวถูกบันทึกลงในตัวแปรที่สามารถเก็บเลขนัยสำคัญได้ ถึง 16 ตัว

5. ภาพประกอบ 34 ของวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2547 พบว่ากราฟที่ได้จากการใช้โปรแกรม APRA นั้นมีความสอดคล้องกับกราฟที่ได้จากโปรแกรม excel ของอัมพร รุ่งแจ้ง และภาพประกอบ 4- 5 ของวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2548 เมื่อพิจารณาในระดับความสูงเดียวกันคือในช่วง 500-4,000 เมตร กราฟทั้งสองมีความสอดคล้องเช่นเดียวกัน

6. สำหรับข้อมูลที่ยืมผลที่ออกมาเป็นไปตามสมมติฐานที่คาดการณ์ไว้ นั่นคือโปรแกรมต้อง แสดงค่าออกมาไม่ได้ ตามสมการหาค่าสัญญาณการแก่งเชิงพิสัย สมการที่ 2-17 สมการหาค่าค่า อัตราส่วนดีโพลาริเซชัน สมการที่ 2-22 สมการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากโมเลกุล สมการที่ 4-1 และสมการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย สมการที่ 2-24

7. ในการพิจารณาความแตกต่างในเรื่องของความซับซ้อน โดยมีข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบชุดเดียวกัน จากการที่ผู้ทำวิจัยและผู้ทดลองใช้คนอื่นๆ ได้ทดลองใช้งานดังผลในตารางที่ 4-6 พบว่าโปรแกรม APRA ช่วยลดทั้งความซับซ้อนในการทำงานจากปกติในการทำงานกับข้อมูลหนึ่งเวลาต้องใช้เวลาในการทำงานที่ผู้ใช้ต้องลงมือทำเองหลายขั้นตอน และใช้โปรแกรมถึง 2 โปรแกรมนั่นคือ excel และ mathematica มาเป็นการใส่ข้อมูลเพียง 5 ครั้งและใช้โปรแกรมเดียวนั่นคือ APRA

8. สำหรับเวลาในการทำงานโดยมีข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบชุดเดียวกัน จากการที่ผู้ทำวิจัยและผู้ทดลองใช้คนอื่นๆ ได้ลองเป็นผู้ใช้งานพบว่าโปรแกรม APRA มีระยะเวลาในการทำงานของข้อมูล 1 ไฟล์ ลดลงจากเดิมใช้เวลาในการทำงาน 1 ชั่วโมง ลดลงเหลือเพียง 3 นาที

ด้วยผลของการทดสอบดังกล่าวจึงกล่าวได้ว่าโปรแกรม APRA มีความน่าเชื่อถือที่จะนำมาเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ผลของลอย

ข้อเสนอแนะ

1. โปรแกรมนี้เหมาะสำหรับผู้ใช้ที่มีความรู้ในเรื่องสมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับละอองลอย และผ่านการแนะนำการใช้โปรแกรมเบื้องต้นจากผู้ที่เคยใช้มาเรียบร้อยแล้ว

2. เนื่องจากโปรแกรมายังอยู่ในขั้นพัฒนา ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นที่สุดคือผู้ใช้ควรเก็บโปรแกรมต้นฉบับไว้ต่างหาก เพราะในระหว่างการทำงานผู้ใช้อาจไปเปลี่ยนคำสั่งภายในโปรแกรมได้ ซึ่งจะทำให้โปรแกรมทำงานไม่ได้ หรือทำงานผิดพลาด

3. การใช้โปรแกรม APRA นั้นจำเป็นต้องใส่เงื่อนไขที่โปรแกรมต้องการอย่างถูกต้อง ไม่เช่นนั้นโปรแกรมจะไม่ทำงาน ดังนั้นผู้ใช้ต้องระมัดระวังในการใส่เงื่อนไขดังกล่าว

4. หลังจากที่ใช้โปรแกรมทำการรันเสร็จในแต่ละครั้ง ผู้ใช้ต้องทำการบันทึกค่าต่างๆ ที่โปรแกรมแสดงออกมาทันที ในการบันทึกภาพกราฟควรบันทึกเป็นนามสกุล *.fig เพื่อที่จะกลับมาสามารถแก้ไขกราฟได้ในภายหลัง สำหรับค่าของพารามิเตอร์ๆ ที่โปรแกรมแสดงออกมาในรูปของไฟล์นามสกุล *.txt นั้นผู้ใช้ต้องทำการบันทึกโดยทำการเปลี่ยนชื่อของไฟล์ด้วย โดยตัวไฟล์เหล่านี้อยู่ที่เดียวกับโปรแกรม APRA

5. ในการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพผู้ใช้ควรศึกษาภาษาที่ใช้เขียนโปรแกรมด้วย เพราะจะทำให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงโปรแกรมได้อย่างเต็มที่ เช่นต้องการค่าพารามิเตอร์ตัวใดเพิ่มเติมผู้ใช้อก็สามารถสั่งผ่านโปรแกรมได้

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- กระทรวงสาธารณสุข. (2551). *วารสารสาธารณสุขไทย 2548-2550*. กรุงเทพฯ: กระทรวงสาธารณสุข.
- กลุ่มวิจัยทัศนศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. (2553). *ความรู้เบื้องต้นเรื่องเลเซอร์*. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2553. จาก http://www.sc.mahidol.ac.th/scpy/Optics/basic_laser.htm.
- ขวัญ อารยะอนิตกุล; รัชภาคย์ จิตต์อารี; เชิญโชค ศรขวัญ; และนฤมล เอมะรัตต์. (2553). *เรียนรู้หลักการฟิสิกส์จากเลเซอร์*. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2553. จาก <http://www.nst.or.th/article/article005.htm>.
- นภาพร พานิช; และคณะ. (2550). *ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ*. กรุงเทพฯ: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ลัญฉกร วุฒิสถิติกุลกิจ; และคนอื่นๆ. (2551). *MATLAB การประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมไฟฟ้า*. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์; และอรุณย์ อินทศร. (2550). *การศึกษาโพรไฟล์แนวตั้งของละอองลอยในประเทศไทยด้วยเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี*. รายงานการวิจัย. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- Biral, A.R. (2003). *Analysis of the 2002 Malargue LIDAR Data Through Fernald's method*, Report 2003.
- Brasseur, G.P.; Prinn R.G.; & A.P. Pszenny. (2003). *Atmospheric Chemistry in a Changing World*.
- J. Buchdahl. (1999). *A review of contemporary and prehistoric global climate change*
- C.-Y. Lin; et al. (2006). Long-range transport of Asian dust and air pollutants to Taiwan: observed evidence and model simulation. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 7: 423-434.
- Francesca, B.; & P.G. Gian. (2003). Modelling the Aerosol Extinction versus Backscatter Relationship for Lidar Applications: Marintime and Continental Condition. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 21: 428-442.
- Gordon; Raymond, A.; & Serway; Serway. (2005). *College Physics 7th edition*.
- Hugh D. Young; Roger Freedman. (2008). *University Pysics with Modern Physics*.

- Iokibe, K; et al. (2005). *A Scheme to Classify Clouds with the Depolarization Ratio and Backscattering Coefficient Measured by Lidar*. Okayama: Memoirs of the Faculty of Engineering. Okayama University.
- Jinhuan, Q. (1995). *A Method to Determine Atmospheric Aerosol Optical Depth Usig Total Direct Solar Radiation*. Journal of The Atmospheric Sciences. 55: 744-757.
- Jorg Ackermann. (1997). *The Extinction-to-Backscatter Ratio of Tropospheric Aerosol: A Numerical Study*. Meteorologisches Institut. Universitat Munchen.
- Laser Construction*. สืบค้นเมื่อวันที่ 27 พฤษภาคม 2553.
http://ovis.ui.ac.id/wiki/Laser_construction
- Lukas Osterloh; et al. (2009). *Parallel software for retrieval of aerosol distribution from LIDAR data in the Framework of EARLINET-ASOS*. Computer Physics Communications. 180: 2095-2102.
- McGraw-Hill. (1987). *Encyclopedia of Science and Technology*. Carbon Dioxide: Information Analysis Center.
- Reagan, J.A.; et al. (1989). *Lieder Sensing of Aerosols and Clouds in the Troposphere and Stratosphere*.
- Ruangrungrrote, S.; Intason, A.; & A. Chabangbon. (2008). *Tropospheric Aerosol Volume Backscattering Coefficients Determination Using Mie lidar at Phimai District, Thailand*. Proceedings of the International Symposia on Geoscience Resources and Environments of Asian Terranes (GREAT 2008).
- Schoulepnikoff, L.; Van Den Bergh, H.; & B. Calpini. (1990). *Tropospheric air pollution monitoring lidar*.
- Serway;Jewett. (2004). *Physics for Scientists and Engineers 6th edition*.
- Sugimoto, N. (2001). *NIES Compact Mie Scattering Lidar (532nm, dual polarization)*. User manual.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลผ่านการแปลงไฟล์เรียบร้อยแล้ว

ตาราง 12 แสดงข้อมูลจริงที่ถูกแปลงเป็นไฟล์นามสกุล *.txt ของวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2547 เวลา 01.00 น.

Height (m)	$P_{\parallel}$	$P_{\perp}$	Height (m)	$P_{\parallel}$	$P_{\perp}$	Height (m)	$P_{\parallel}$	$P_{\perp}$	Height (m)	$P_{\parallel}$	$P_{\perp}$
6	43389762	40883058	2010	43971738	42548184	4008	44063982	42553824	6006	44069760	42555450
12	-36438234	-38266692	2016	43968228	42548436	4014	44062314	42557346	6012	44068338	42552294
18	-7022916	26958276	2022	43968882	42549780	4020	44063298	42554802	6018	44072880	42554988
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
504	41512776	42371886	2502	43988676	42548616	4500	44066370	42555264	6558	44072406	42553980
510	41634486	42379002	2508	43987344	42546294	4506	44068836	42551988	6564	44069940	42551952
516	41730084	42391452	2514	43986852	42545898	4512	44066796	42555192	6570	44073738	42555654
522	41809872	42395790	2520	43984404	42548082	4518	44066730	42554064	6576	44071608	42553482
528	41886072	42402210	2526	43987410	42547320	4524	44066028	42558126	6582	44071626	42553578
534	41940126	42406092	2532	43986528	42548124	4530	44069436	42554130	6588	44071908	42559686
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2004	43971534	42550512	4002	44065386	42552546	6000	44070402	42553728	8004	44073450	42556734

ภาคผนวก ข

คู่มือโปรแกรมคำนวณพารามิเตอร์ของละอองลอย
(Aerosol Parameter Retrival Algorithm : APRA)

คู่มือโปรแกรมคำนวณพารามิเตอร์ของละอองลอย (Aerosol Parameter Retrival Algorithm : APRA)

การศึกษาข้อมูลละอองลอยในชั้นบรรยากาศด้วยเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี (Mie Scattering LIDAR) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ประเทศไทยนำมาใช้เก็บข้อมูลของละอองลอย แล้วนำข้อมูลดิบที่ได้มาทำการวิเคราะห์เพื่ออธิบายการกระจายตัวของละอองลอยซึ่งมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ข้อมูลดิบที่วัดได้จากเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมีนั้นเป็นค่าของโพลาไรเซชัน (polarization) ในแนวตั้งฉาก และในแนวนอน ที่อยู่ในรูปของไฟล์ชนิด *.tar.gz ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะนำมาคำนวณหาพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ ตามวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลไลดาร์ (lidar analysis methods) เพื่อนำไปอธิบายการกระจายตัวของละอองลอย

โดยปกติเครื่องมือไลดาร์การกระเจิงแบบมีจะมีลักษณะการเก็บข้อมูลโพลาไรเซชันทั้ง 2 แนวที่ระดับความสูงทุกๆ 6 เมตรจนถึงที่ระดับความ 24 กิโลเมตร ต่อเนื่องทุกๆ 15 นาทีตลอดวัน จึงทำให้ข้อมูลดิบที่ได้มีจำนวนข้อมูลปริมาณมาก ทำให้ต้องใช้เวลานานในการคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ส่งผลให้การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่ออธิบายการกระจายตัวของละอองลอยที่วัดได้มีความล่าช้า

ด้วยเหตุนี้จึงมีการพัฒนาโปรแกรมคำนวณพารามิเตอร์ของละอองลอย (Aerosol Parameter Retrival Algorithm : APRA) เป็นไฟล์ชนิด M-file (.m) ที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB มาช่วยในการคำนวณหาพารามิเตอร์ที่ใช้นำมาอธิบายการกระจายตัวของละอองลอย และช่วยลดเวลาในการคำนวณขึ้น ซึ่งโปรแกรมนี้นี้มีหน้าที่นำข้อมูลดิบที่อยู่ในรูปของไฟล์ชนิด *.txt ที่ได้จากการแปลงไฟล์ข้อมูลดิบจากเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี มาคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และแสดงผลออกมาเป็นกราฟ ได้แก่ กราฟของสัญญาณการแก้เชิงพิสัย (range corrected signal), กราฟของอัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน (depolarization ratio) กราฟของค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย (aerosol volume backscattering coefficient) และกราฟค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากละอองลอย (aerosol volume attenuation coefficient) ที่จะนำไปวิเคราะห์การกระจายตัวของละอองลอยต่อไป

การใช้งานโปรแกรม

เนื่องจาก APRA เป็นโปรแกรมที่อำนวยความสะดวกในการคำนวณพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องที่จะนำไปอธิบายการกระจายตัวของละอองลอย การจะใช้งานโปรแกรมนี้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด จึงมีความจำเป็นอย่างมากที่ผู้ใช้งานโปรแกรมต้องมีความรู้ความเข้าใจในเรื่องต่างๆ ได้แก่ ความรู้พื้นฐานของเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับละอองลอย ความหมายของพารามิเตอร์ วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลไลดาร์ (lidar analysis methods), การแปลความหมายจากกราฟต่างๆ และรวมถึง

ความรู้พื้นฐานของโปรแกรม MATLAB เมื่อผู้ใช้งานมีความรู้ความเข้าใจดังกล่าวแล้วผู้ใช้งานจึงสามารถใช้งานโปรแกรมโดยมีขั้นตอนการปฏิบัติที่สำคัญ 2 ขั้นตอนดังนี้

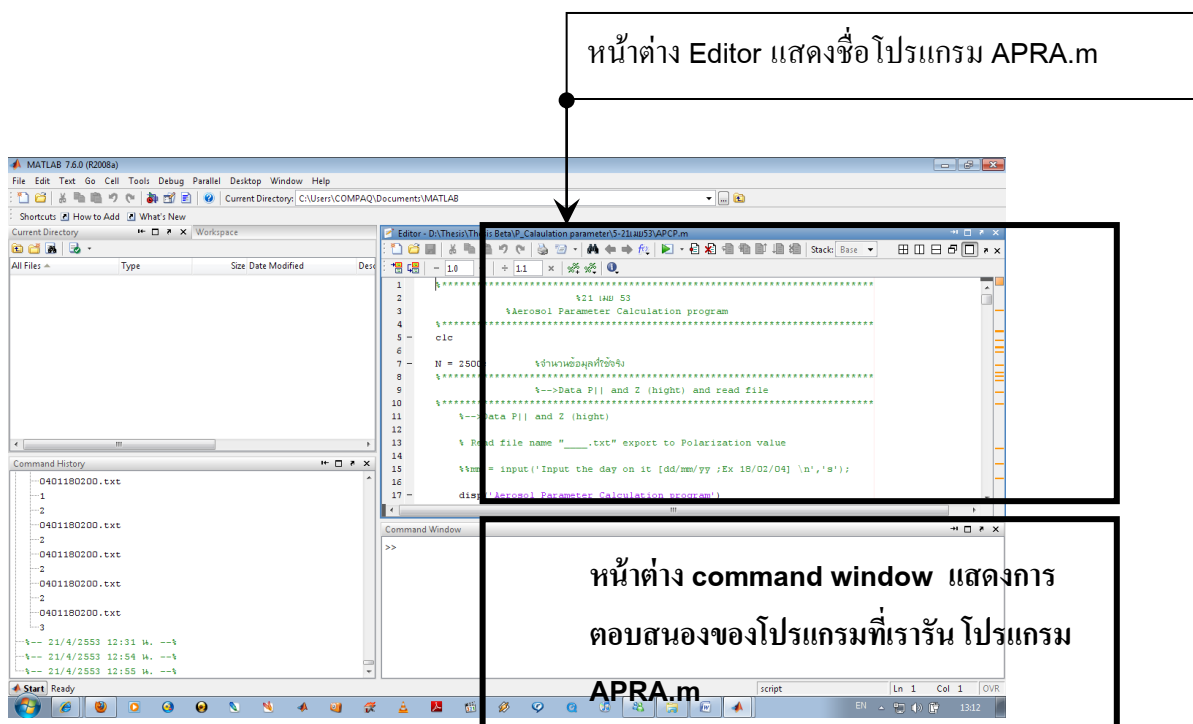
1. ขั้นตอนการเตรียมความพร้อมก่อนการใช้งาน
2. ขั้นตอนการลงมือใช้งานโปรแกรม

ขั้นตอนการเตรียมความพร้อมก่อนการใช้งาน

1. ตรวจสอบก่อนว่าเครื่องคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้ได้ติดตั้งโปรแกรม MATLAB (ในที่นี้ใช้ MATLAB รุ่น R2008a) รุ่นใดก็ได้ที่สูงกว่ารุ่น R2008a อยู่หรือไม่
2. ตรวจสอบให้แน่ใจว่าไฟล์ข้อมูลที่ได้จากการแปลงไฟล์ข้อมูลดิบ (*.tar.gz) จากเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี ที่ผู้ใช้นำมาเป็นไฟล์ชนิด *.txt หรือไม่ ซึ่งไฟล์ข้อมูลนี้จะมีชื่อไฟล์เป็นตัวเลข 10 ตัว เช่น 0401180000.txt, 0401180100.txt, 0305201200.txt เป็นต้น ตัวเลขทั้ง 10 หลักนี้มีความหมายคือ YYMMDDTTTT โดย YY คือปีคริสต์ศักราช MM คือเดือน DD คือวัน และ TTTT คือเวลาที่บอก 24 ชั่วโมงและ 60 นาที ยกตัวอย่างเช่น ไฟล์ข้อมูลชื่อ 0401180200.txt หมายความว่า เป็นข้อมูลของ ปี ค.ศ. 2004 เดือนมกราคม วันที่ 18 เวลา 02 นาฬิกา 00 นาที (02.00) เป็นต้น
3. ตรวจสอบก่อนว่าในเครื่องคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้มีโปรแกรม ชื่อ APRA.m ที่เป็นไฟล์ชนิด M-file อยู่หรือไม่

ขั้นตอนการลงมือใช้งานโปรแกรม

1. ทำการเปิดโปรแกรม APRA ขึ้นมาโดยดับเบิลคลิกที่ไฟล์ APRA.m จากนั้นเครื่องจะทำการเปิดโปรแกรม MATLAB ขึ้นมาก่อน ซึ่งมี APRA.m อยู่ในหน้าต่าง editor



ภาพประกอบ 36 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม MATLAB ที่ถูกเปิดขึ้น

1. run โปรแกรมโดยการคลิกสัญลักษณ์  ในหน้าต่าง editor สังเกตที่หน้าต่าง command window จะแสดงข้อความต่าง ๆ ตามลำดับดังนี้

Aerosol Parameter Retrieval Algorithm (แสดงชื่อโปรแกรม) จากนั้นโปรแกรมจะให้ผู้ใส่รายละเอียดของไฟล์ (*.txt) ที่ต้องการรัน ยกตัวอย่างเช่น ไฟล์ของวันที่ 18 เดือนมกราคม ปี 2004 เวลา 12.00 น. มีชื่อไฟล์ว่า 0401181200.txt

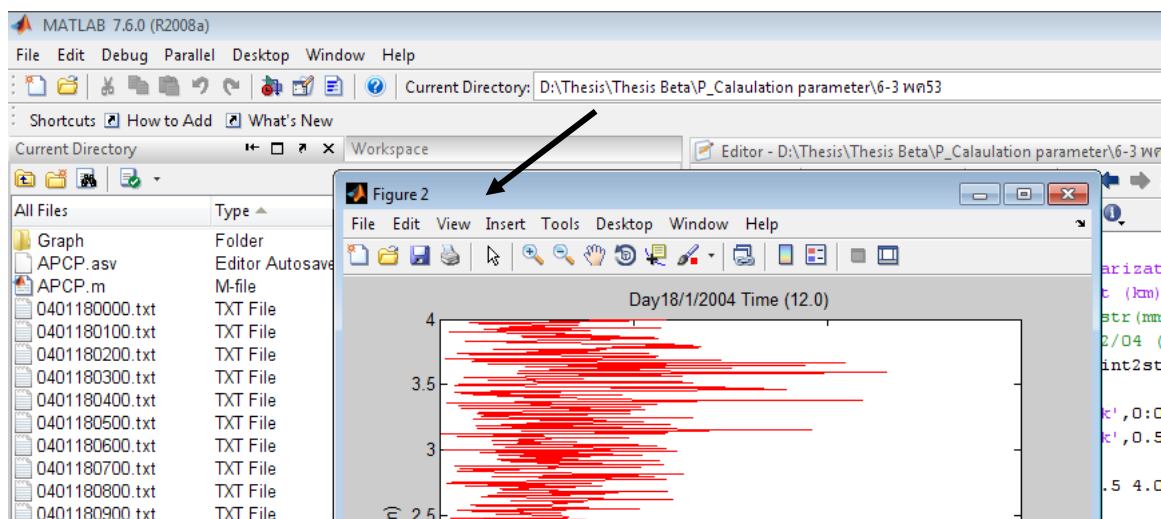
Input the Day on it [Ex day 1 = 1 , day 25 = 25] (ให้ผู้ใส่วัน) 18

(ตัวอย่าง ผู้ใส่วันที่ 18) Input the Month on it [Ex January = 1 , December = 11] (ให้ผู้ใส่เดือน) 1 (ตัวอย่าง ผู้ใส่เดือน 1 หมายถึงเดือนมกราคม) Input the Year on it [Ex 1996 = 1996 , 2008 = 2008] (ให้ผู้ใส่ปี) 2004 (ตัวอย่าง ผู้ใส่ปี 2004) Input the Hour on it [Ex 01.00 = 1 , 20.00 = 20] (ให้ผู้ใส่ชั่วโมง) 12 (ตัวอย่าง ผู้ใส่ชั่วโมงเป็น 12 หมายถึงที่เวลา 12 นาฬิกา) Input the Minute on it [Ex 00.30 = 30 , 01.45 = 45] (ให้ผู้ใส่วินาที) 00 (ตัวอย่าง ผู้ใส่วินาทีเป็น 00 หมายถึงที่นาที่ .00 นาที่) What do you want export file (_0401180000_.txt) (ให้ผู้ใส่ไฟล์ที่ต้องการรัน) 0401181200.txt (ตัวอย่าง ผู้ใส่ไฟล์ที่ต้องการ)

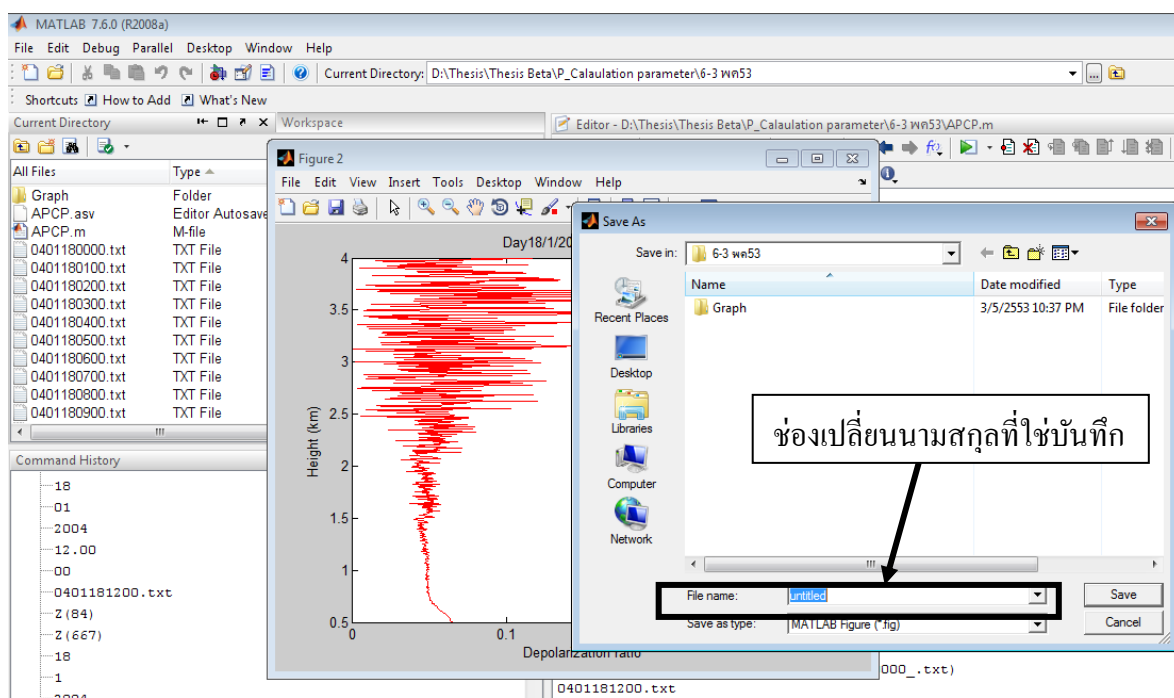
หมายเหตุ ควรตรวจสอบทุกครั้งที่ต้องใส่ข้อมูลให้โปรแกรม เพื่อป้องกันการดำเนินงานผิดพลาด

2. จากนั้นโปรแกรมจะแสดงผล ซึ่งการแสดงผลนี้โปรแกรมจะแสดงเป็น 3 ส่วนได้แก่ หน้าต่าง command window แสดงค่าของตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์ข้อมูลละอองลอยได้แก่เวลา, molecule volume backscattering coefficient ที่ระดับความสูงวิกฤต ($\beta_m(z_c)$), depolarization ratio ที่ระดับความสูง z ($\delta(z)$), ความสูง (z) แรกที่ทำให้ δ น้อยกว่า 0.1, aerosol optical depth (τ_a) และขอบเขตความสูงมากที่สุดที่นำมาพิจารณาหาค่า AOD โปรแกรม APRA.m จะสร้างไฟล์นามสกุล *.txt 3 ไฟล์ ได้แก่ ไฟล์ที่เก็บค่าของตัวแปรเช่นเดียวกับในข้อ ก. ชื่อว่า ParameterofTime.txt ไฟล์ที่เก็บค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากละอองลอยที่ระดับความสูงต่าง ๆ ชื่อไฟล์ Attenuation.txt และสร้างไฟล์ที่แจ้งค่าความลึกเชิงแสงที่ระดับความสูงน่าสงสัยที่ต้องการให้ผู้ใช้เข้าไปตรวจสอบ ทั้งสามไฟล์อยู่ในตำแหน่งที่โปรแกรม APRA.m อยู่โปรแกรม MATLAB แสดงกราฟทั้ง 4 กราฟได้แก่ Range Corrected signal, Depolarization ratio, Aerosol Volume Backscattering Coefficient และ Aerosol Volume Attenuation Coefficient

3. ในกรณีที่ผู้ใช้ต้องการบันทึกกราฟทั้ง 3 กราฟที่ได้จากการรันโปรแกรม ผู้ใช้สามารถบันทึกได้ในลักษณะเดียวกับการบันทึกงานปกติ คือคลิกที่สัญลักษณ์  ที่อยู่ในบริเวณมุมซ้ายบนของกราฟโดยนามสกุลนั้นผู้ใช้สามารถเลือกได้ว่าจะบันทึกเป็นภาพแบบไหน เช่น JPEG image (.jpg), MatLab figure (.fig) เป็นต้น ซึ่งถ้าผู้ใช้ต้องการกับมาแก้ไของค์ประกอบของกราฟก็ควรจะเป็นไฟล์นามสกุล .fig



ภาพประกอบ 37 แสดงจุดบันทึกกราฟ



ภาพประกอบ 38 แสดงหน้าต่างของการบันทึก

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายสุทธิพันธุ์ จันทราศรี
วันเดือนปีเกิด	10 กันยายน พ.ศ.2528
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดนครสวรรค์
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	432/30 หมู่ 2 ตำบลหนองปลิง อำเภอเมือง จังหวัดนครสวรรค์ 60000

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2547	การศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จาก โรงเรียนนครสวรรค์
พ.ศ.2551	การศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาฟิสิกส์ จาก มหาวิทยาลัยมหิดล
พ.ศ.2553	การศึกษาระดับปริญญาโท หลักสูตรการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ