

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัยและผล

ในโครงการนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาโอโซนในบรรยากาศของประเทศไทย โดยแบ่งงานออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ 1) การศึกษาปริมาณโอโซนจากข้อมูลภาคพื้นดิน 2) การศึกษาปริมาณโอโซนจากข้อมูลดาวเทียมและการจัดทำฐานข้อมูลโอโซน 3) การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณโอโซน และ 4) การศึกษาการกระจายตัวตามความสูงของโอโซนในบรรยากาศ (ozone profile) โดยรายละเอียดของแต่ละส่วนมีดังนี้

3.1 การศึกษาปริมาณโอโซนรวมจากข้อมูลภาคพื้นดิน

ในโครงการนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาปริมาณโอโซนรวมในประเทศไทยจากข้อมูลความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ได้จากเครื่องมือวัดภาคพื้นดิน โดยอาศัยแนวคิดของ Dobson (1931) ซึ่งได้เสนอวิธีการคำนวณค่าปริมาณโอโซนรวมจากสัดส่วนความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ 2 ความยาวคลื่น ซึ่งถูกโอโซนดูดกลืนแตกต่างกัน เนื่องจากรังสีอาทิตย์ที่ถูกโอโซนดูดกลืนจะมีเพียงบางช่วงความยาวคลื่น (220-340 nm) ดังนั้นจึงต้องมีการเลือกคู่คลื่นที่เหมาะสม โดยคู่คลื่นที่เหมาะสมนั้นต้องมีความยาวคลื่นหนึ่งที่ถูกโอโซนดูดกลืนได้สูง ขณะที่อีกความยาวคลื่นหนึ่งจะไม่ถูกโอโซนดูดกลืนหรือถูกดูดกลืนน้อยมาก โดยในงานนี้ ผู้วิจัยใช้ข้อมูลความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ได้จากสถานีวัดภาคพื้นดินจำนวน 5 สถานี ได้แก่ สถานีนครปฐม สถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีกรุงเทพฯ และสถานีสงขลา โดยรายละเอียดของตำแหน่งสถานี เครื่องมือที่ใช้ และกระบวนการหาปริมาณโอโซนรวม มีดังนี้

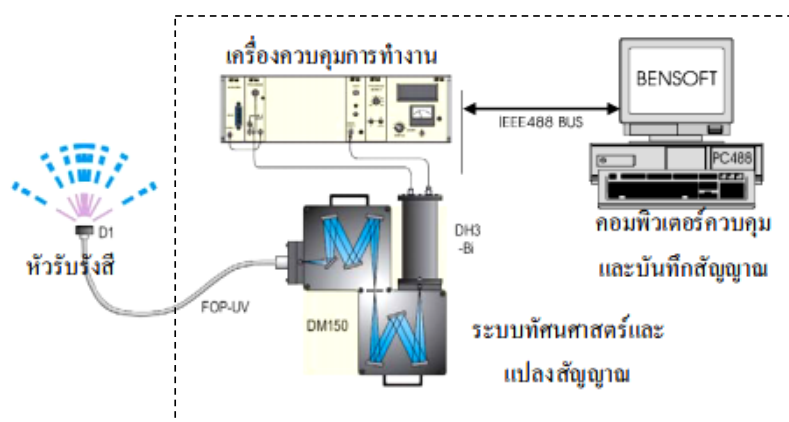
3.1.1 สถานีนครปฐม

ในโครงการนี้ ผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลจากเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Solar UV spectroradiometer) รุ่น DMC150 ผลิตโดยบริษัท Bentham Instrument ซึ่งติดตั้งที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม (13.82°N, 100.04°E) เครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ตสามารถวัดรังสีอัลตราไวโอเล็ตในช่วงความยาวคลื่น 260-420 nm มีความกว้างของช่องสัญญาณ 1 nm เครื่องวัดดังกล่าวจะประกอบด้วยหัวรับรังสี สายใยแก้วนำแสง (optic fiber) monochromator เครื่องตรวจจับสัญญาณ (detector) และระบบควบคุม (control system) ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ต รุ่น DMc150 ผลิตโดยบริษัท Bentham Instrument ติดตั้งที่อาคารฟ้าชั้น 10 อาคารวิทยาศาสตร์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม

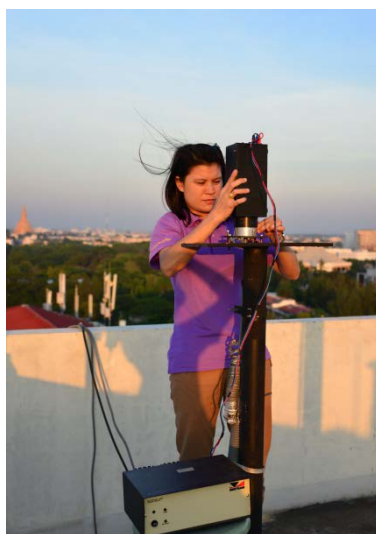
เครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะรับรังสีที่ตกกระทบบนหัวรับรังสี (รูปที่ 3.1(a)) จากนั้นรังสีอาทิตย์จะเดินทางผ่านใยแก้วนำแสง (รูปที่ 3.1(b)) มาที่ monochromator เพื่อแยกรังสีอาทิตย์ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต (260-420 nm) ที่แต่ละความยาวคลื่นออกมา และวัดจำนวนโฟตอนด้วยอุปกรณ์วัดที่อยู่ภายในกล่องควบคุมอุณหภูมิซึ่งมีระบบควบคุมการทำงาน (รูปที่ 3.1(c)) จากนั้นจะบันทึกข้อมูลลงในเครื่องคอมพิวเตอร์และประมวลผลข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Benwin+ ที่พัฒนาโดยบริษัท Bentham Instrument แผนภูมิการทำงานของเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 โดยผู้วิจัยได้ทำการตั้งค่าโปรแกรม BenWin+ ให้ทำการวัดทุกๆ 10 นาที เริ่มตั้งแต่เวลา 05.00-19.00 น.



รูปที่ 3.2 แผนภูมิแสดงการทำงานของเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ต รุ่น DMc150

การตรวจวัดความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ต จำเป็นต้องทำการตรวจสอบความแม่นยำในการวัดความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่นต่างๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลวัดที่มีความถูกต้อง ซึ่งควรดำเนินการตรวจสอบเป็นประจำ ในโครงการนี้ ผู้วิจัยได้ทำการสอบเทียบความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่แต่ละความยาวคลื่นในช่วง 260-420 nm ทุกเดือน โดยใช้หลอดกำเนิดแสงมาตรฐานชนิดคิวทีเรียม (deuterium lamp) ในการสอบเทียบ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1) นำหลอดกำเนิดแสงมาตรฐานและแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าขึ้นไปยังตำแหน่งที่ติดตั้งหัวรับรังสี โดยวางหลอดกำเนิดแสงมาตรฐานทิ้งไว้จนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม จากนั้นนำหลอดกำเนิดแสงมาตรฐานที่ต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าครอบบนหัวรับรังสีของเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ต และขันน็อตให้แน่นเพื่อยึดให้หลอดกำเนิดแสงติดอยู่กับหัวรับรังสี และป้องกันมิให้แสงจากภายนอกเข้าไปรบกวน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.3

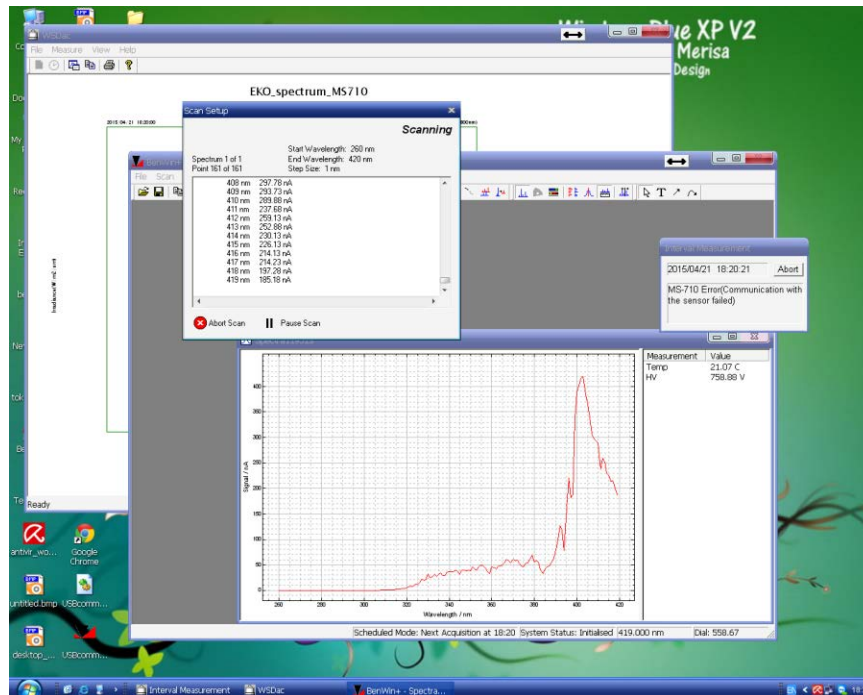


รูปที่ 3.3 การสอบเทียบเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ต

2) เปิดแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าของหลอดกำเนิดแสงมาตรฐานประมาณ 1 นาที เพื่อให้ความเข้มแสงที่ปล่อยออกมาจากหลอดกำเนิดแสงมีความเสถียร โดยสังเกตได้จากการเปลี่ยนสีของหลอดไฟ LED ที่แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าของหลอดกำเนิดแสงมาตรฐาน ซึ่งจะเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีเขียว

3) ทำการสอบเทียบเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยการตั้งค่าโปรแกรม BenWin+ ซึ่งติดตั้งไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ต

โดยจะใช้เวลาในการสอบเทียบประมาณ 2 นาที/รอบ (สอบเทียบประมาณ 8 รอบ/ครั้ง) ข้อมูลที่ได้เป็นค่าสัญญาณกระแสไฟฟ้า (nA) ที่แต่ละความยาวคลื่น ดังตัวอย่างแสดงไว้ในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 หน้าจอแสดงผลของโปรแกรม BenWin+

ค่าที่ได้จากการสอบเทียบเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะถูกบันทึกและเก็บไว้ในไฟล์ตระกูล .BEN ซึ่งสามารถนำไปใช้หาค่า sensitivity ของเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดังสมการ

$$R_{\lambda} = \frac{V_{\lambda}}{E_{\lambda}} \quad (3.1)$$

โดยที่ E_{λ} เป็นค่าสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ตของหลอดกำเนิดแสงมาตรฐาน [mW/m²·nm]

V_{λ} เป็นค่าสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แต่ละความยาวคลื่นที่ได้จากการวัด [nA]

R_{λ} เป็นค่า sensitivity ที่แต่ละความยาวคลื่น [nA/(mW/m²·nm)]

ในที่นี้จะยกตัวอย่างการหาค่า sensitivity ที่ได้จากการสอบเทียบเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ตในเดือนมีนาคม 2015 (รูปที่ 3.5) โดยค่าสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่แต่ละความยาวคลื่นของหลอดกำเนิดแสงมาตรฐานจะได้จากการสอบเทียบหลอดกำเนิดแสงมาตรฐานที่ส่งไปสอบเทียบบริษัท Bentham Instrument ประเทศอังกฤษ โดยเก็บไว้ในไฟล์ตระกูล .BCF

Wavelength (nm)	Irradiance (mW m ⁻² nm ⁻¹)	signal (nA)									sensitivity nA/(mW m ⁻² nm ⁻¹)
		1	2	3	4	5	6	7	8	avg	
260	2.208274866	2.2458	2.203	2.2799	2.3165	2.228	2.223	2.2707	2.2491	2.252	1.019794924
261	2.184099368	2.3778	2.3185	2.4699	2.2995	2.3165	2.295	2.3847	2.3691	2.3539	1.077726835
262	2.15212468	2.5003	2.434	2.4074	2.4225	2.35	2.4805	2.4452	2.4946	2.4418	1.134599693
263	2.113458701	2.6123	2.5785	2.5379	2.5995	2.567	2.5105	2.4697	2.5111	2.5483	1.205748661
.
.
.
.
.
.
.
.
.
.
.
.
.
398	0.433189225	4.8563	4.8685	4.8239	4.8295	4.7995	4.789	4.8322	4.7856	4.8231	11.13381802
399	0.423639143	5.3538	5.41	5.3174	5.3575	5.416	5.363	5.3547	5.3171	5.3612	12.65505111
400	0.409689744	5.4253	5.4075	5.4054	5.488	5.52	5.48	5.4212	5.4531	5.4501	13.30287146

รูปที่ 3.5 ตัวอย่างค่า sensitivity ที่แต่ละความยาวคลื่น ซึ่งคำนวณได้จากการสอบเทียบเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ตในเดือนมีนาคม 2015

ค่า sensitivity ที่แต่ละความยาวคลื่นที่ได้จากการสอบเทียบเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ตด้วยหลอดกำเนิดแสงมาตรฐานในแต่ละเดือนสามารถนำไปใช้ในการคำนวณค่าสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ โดยใช้สมการ

$$I_{\lambda} = \frac{V_{\lambda}}{R_{\lambda}} \quad (3.2)$$

- โดยที่ I_{λ} เป็นค่าสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ต [mW/m²·nm]
 V_{λ} เป็นค่าสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แต่ละความยาวคลื่นซึ่งได้จากการวัด [nA]
 R_{λ} เป็นค่า sensitivity ที่แต่ละความยาวคลื่น ซึ่งได้จากการสอบเทียบด้วยหลอดกำเนิดแสงมาตรฐาน [nA/(mW/m²·nm)]

จากนั้นผู้วิจัยจะนำข้อมูลความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ตตั้งแต่ปี ค.ศ. 2010-2015 มาคำนวณหาปริมาณโอโซนรวม โดยใช้เทคนิคการหาปริมาณโอโซนรวมจาก look up table ที่ได้จากแบบจำลองการถ่ายเทรังสีในบรรยากาศที่เรียกว่า UVSPEC (Radiative Transfer Model UVSPEC/libRadtran) (Mayer et al., 1997) ซึ่งในการหาปริมาณโอโซนรวมจากเทคนิคดังกล่าวจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้

1) อัตราส่วนความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ 2 ความยาวคลื่น (N-value) จากเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ต ในงานนี้จะเลือกใช้ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 305 และ 340 nm (WMO, 2008a) มาหาค่า N ดังสมการ

$$N = \frac{I_{340}}{I_{305}} \quad (3.3)$$

โดยที่ I_{305} เป็นค่าความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 305 nm ที่ได้จากเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ต [$\text{mW}/\text{m}^2 \cdot \text{nm}$]

I_{340} เป็นค่าความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 340 nm ที่ได้จากเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ต [$\text{mW}/\text{m}^2 \cdot \text{nm}$]

2) ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (aerosol optical depth) ที่ความยาวคลื่น 340 nm (AOD_{340}) ซึ่งได้จากการวัดด้วยเครื่องซันโฟโตมิเตอร์ (sunphotometer) รุ่น CE-318 ผลิตโดยบริษัท Cimel เครื่องวัดดังกล่าวติดตั้งไว้ที่สถานีนครปฐมเช่นเดียวกัน (รูปที่ 3.6) โดยค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองที่ความยาวคลื่น 340 nm มีผลต่อการลดทอนรังสีอาทิตย์ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Iqbal, 1983)



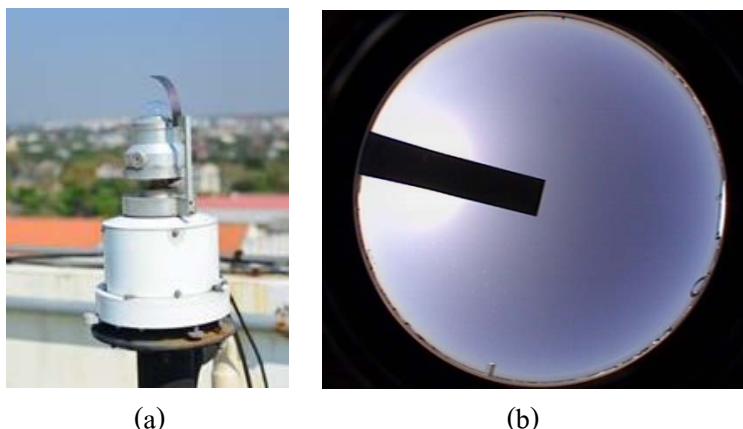
รูปที่ 3.6 เครื่องชันโฟโตมิเตอร์ซึ่งติดตั้งไว้ที่ตาดฟ้าชั้น 10 อาคารวิทยาศาสตร์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม

3) มุมเซนนิชของดวงอาทิตย์ (solar zenith angle; SZA) ที่แต่ละชั่วโมง ณ ตำแหน่งสถานี นครปฐม ซึ่งเป็นค่าจากการคำนวณ (Iqbal, 1983)

4) สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวโลก (surface albedo; A_g) ที่ตำแหน่งสถานี นครปฐม ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการวัดภาคพื้นดิน (สุมามาลย์ บรรเทึง, 2548)

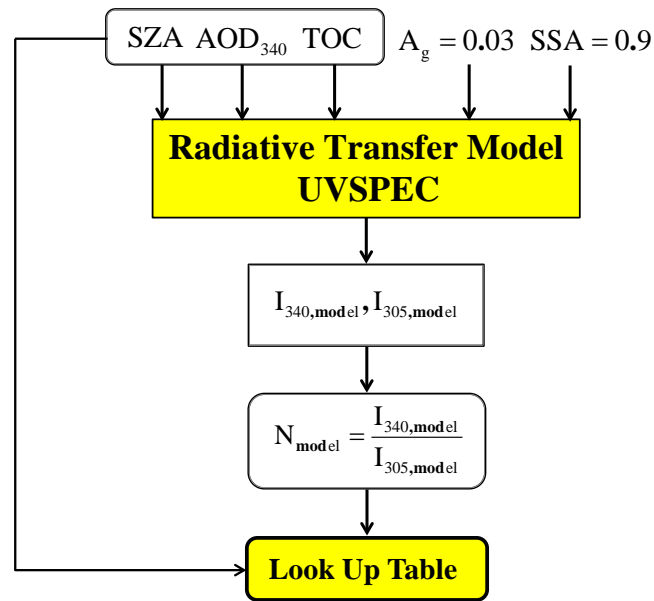
5) สัมประสิทธิ์การกระเจิงครั้งแรกของฝุ่นละออง (single scattering albedo; SSA) ได้จากการวัดด้วยเครื่องชันโฟโตมิเตอร์ซึ่งติดตั้งที่สถานี นครปฐม (รูปที่ 3.6)

การหาปริมาณโอโซนรวมโดยใช้แบบจำลอง UVSPEC สามารถใช้ได้เฉพาะกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆเท่านั้น ดังนั้นในงานนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกชั่วโมงที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆในช่วงวันที่ 1 มกราคม 2010-31 ธันวาคม 2015 จากภาพถ่ายท้องฟ้าที่วัดด้วยเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า (sky view) รุ่น PSV-100 ผลิตโดยบริษัท Prede ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งติดตั้งที่ตาดฟ้าชั้น 10 อาคารวิทยาศาสตร์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม (รูปที่ 3.7(a)) โดยเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าจะทำการถ่ายภาพท้องฟ้าทุก 5 นาที และบันทึกภาพถ่ายลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ ตัวอย่างข้อมูลภาพถ่ายท้องฟ้าที่ปราศจากเมฆในวันที่ 11 กรกฎาคม 2015 เวลา 09.30 น. แสดงไว้ในรูปที่ 3.7(b)



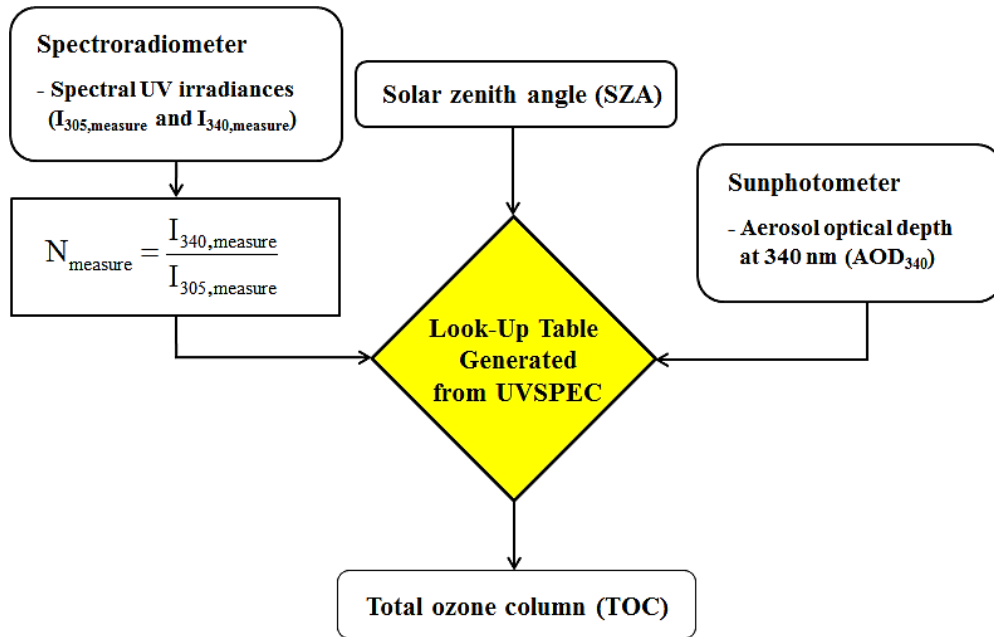
รูปที่ 3.7 (a) เครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า รุ่น PSV-100 ผลิตโดยบริษัท Prede ซึ่งติดตั้งที่ตาดฟ้าชั้น 10 อาคารวิทยาศาสตร์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม และ (b) ภาพถ่ายท้องฟ้ากรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆในวันที่ 11 กรกฎาคม 2015 เวลา 09.30 น

สำหรับการหาค่าปริมาณ โอโซนรวมโดยอาศัยแบบจำลอง UVSPEEC ผู้วิจัยจะทำการสร้าง look up table โดยป้อนข้อมูลอินพุต (input) ของตัวแปรที่มีผลต่อค่าความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตเข้าไปในแบบจำลอง UVSPEEC ได้แก่ มุมเซนธิ์ของดวงอาทิตย์ (SZA) มีค่าอยู่ในช่วง 0° - 70° ค่าปริมาณโอโซนรวม (TOC) ในช่วง 200-400 DU ค่าความถี่เชิงแสงของฝุ่นละอองที่ความยาวคลื่น 340 nm (AOD_{340}) ระหว่าง 0.05-4.75 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวโลก (surface albedo; A_g) เท่ากับ 0.03 และค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงครั้งแรกของฝุ่นละออง (SSA) เท่ากับ 0.9 (ค่าเฉลี่ยรายปี) ดังแสดงในแผนภูมิรูปที่ 3.8 โดยเอาที่พิกัดที่ออกมาจะอยู่ในรูป look up table ที่ประกอบด้วยตัวแปรอินพุตและค่า $N(340:305)$

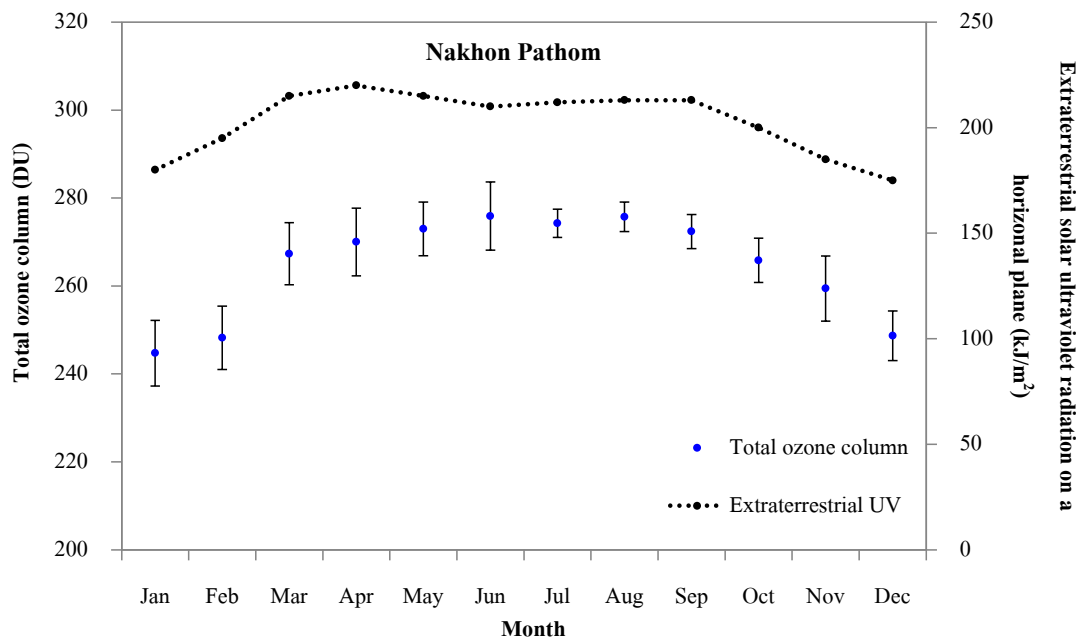


รูปที่ 3.8 ไคอะแกรมการสร้าง look up table โดยใช้โปรแกรม UVSPEC สำหรับคำนวณหาปริมาณโอโซนรวมจากเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ต

ในการหาปริมาณโอโซนรวม ผู้วิจัยจะนำค่า N ที่ได้จากข้อมูลสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 305 และ 340 nm จากเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ SZA และ AOD_{340} ของชั่วโมงที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ มาเปรียบเทียบกับค่า N ที่ได้จาก look up table ที่ค่า SZA และ AOD_{340} เดียวกัน ถ้าค่า N ทั้งสองมีค่าเท่ากัน (มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1%) ที่ค่าปริมาณโอโซนรวมใน look up table ค่าใด ค่าดังกล่าวจะถือเป็นค่าปริมาณโอโซนรวมที่แท้จริง (รูปที่ 3.9) จากนั้นผู้วิจัยจะหาค่าเฉลี่ยรายเดือนของปริมาณโอโซนรวมแล้วนำมาเขียนกราฟกับเวลาในรอบปี ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 กระบวนการหาปริมาณโอโซนรวมจากการเปรียบเทียบค่า N จาก look up table กับค่า N ที่ได้จากเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ต



รูปที่ 3.10 ปริมาณโอโซนรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่วัดด้วยเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ต และความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตนอกบรรยากาศโลกบนระนาบในแนวระดับที่สถานี นครปฐม

จากรูปที่ 3.10 จะพบว่าปริมาณ โอโซนรวมจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากเดือนมกราคมจนถึงเดือนเมษายน จากนั้นจะเปลี่ยนไม่มาก และจะค่อยๆ ลดลงจากเดือนกันยายนจนถึงเดือนธันวาคม การแปรตามเดือนต่างๆ ในรอบปีของปริมาณ โอโซนรวมจะสอดคล้องกับการแปรค่าของความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลตนอกบรรยากาศโลก ทั้งนี้เพราะรังสีอัลตราไวโอเลตมีอิทธิพลสำคัญต่อการเกิดโอโซน

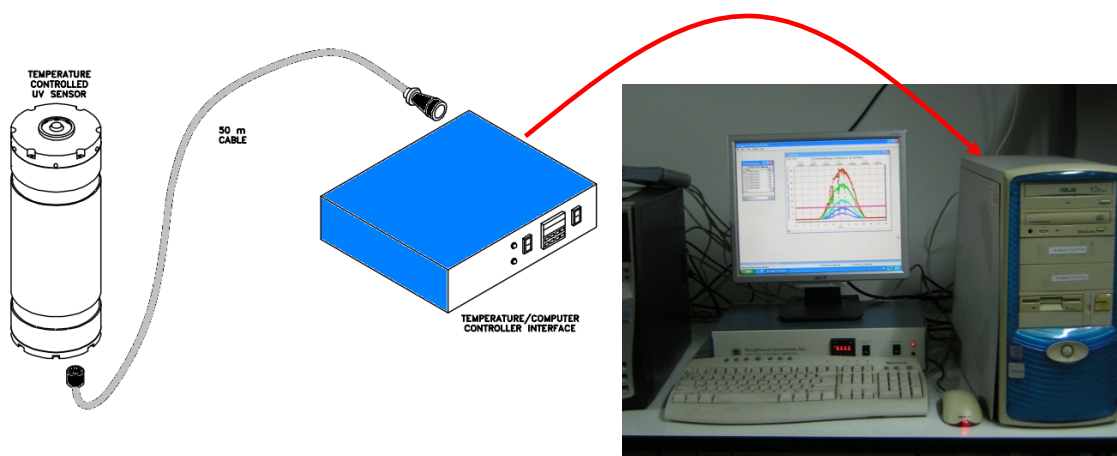
3.1.2 สถานีเชียงใหม่

ในงานนี้ ผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลตที่วัดด้วยเครื่องวัดรังสีอัลตราไวโอเลตแบบหลายช่องสัญญาณ (Ground-based Ultraviolet Radiometer) รุ่น GUV-2511 ผลิตโดยบริษัท Biospherical Instrument มีช่องสัญญาณรังสีอัลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่น 305 313 320 340 380 และ 395 nm ซึ่งความกว้างของแต่ละช่องสัญญาณเท่ากับ 10 nm โดยเครื่องวัดดังกล่าวติดตั้งไว้ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ (18.78°N, 98.98°E) (ดังรูปที่ 3.11)

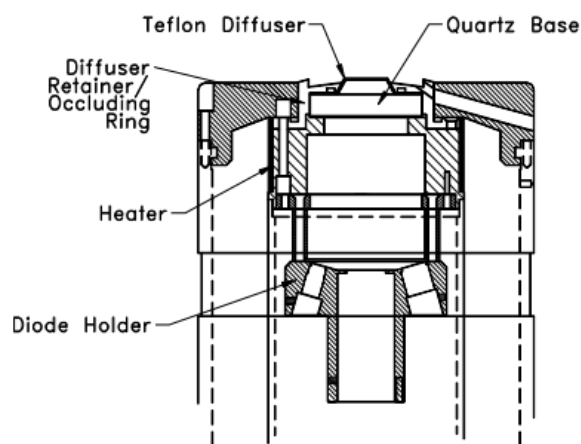


รูปที่ 3.11 เครื่องวัดรังสีอัลตราไวโอเลตแบบหลายช่องสัญญาณ รุ่น GUV-2511 ผลิตโดยบริษัท Biospherical Instrument ซึ่งติดตั้งที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่

เครื่องวัดรังสีอัลตราไวโอเลตแบบหลายช่องสัญญาณประกอบด้วย หัววัด และ Temperature/computer controller interface โดย controller interface จะต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งมีโปรแกรมควบคุมการทำงานและการบันทึกข้อมูลของเครื่องดังรูปที่ 3.12 สำหรับส่วนที่เป็นหัวรับรังสีอาทิตย์จะแสดงได้ดังรูปที่ 3.13



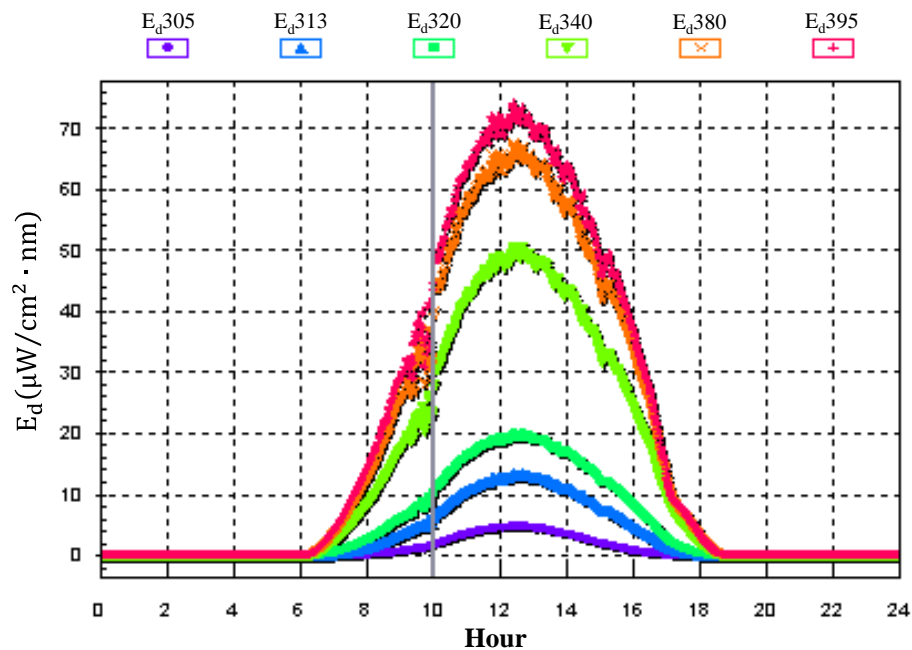
รูปที่ 3.12 เครื่องวัดรังสีอัลตราไวโอเล็ตแบบหลายช่องสัญญาณ ซึ่งมี controller interface ต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งติดตั้งโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องมือ



รูปที่ 3.13 ลักษณะภายในของเครื่องวัดรังสีอัลตราไวโอเล็ตแบบหลายช่องสัญญาณที่ผลิตโดยบริษัท Biospherical Instrument

ในการตรวจวัด ผู้วิจัยได้ทำการตั้งค่าโปรแกรมเพื่อทำการแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นค่าความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยโปรแกรมดังกล่าวจะกำหนดให้คอมพิวเตอร์รับสัญญาณจากเครื่องวัดทุก 1 วินาที จากนั้นจะนำมาหาค่าเฉลี่ยทุก 1 นาที แล้วบันทึกค่าเฉลี่ยลงในไฟล์ Microsoft access database หรือไฟล์ตระกูล .MDB ซึ่งในงานนี้ ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่วัดได้จากสถานีเชียงใหม่ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2006-2010 เนื่องจากข้อมูลที่ได้อาจมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้จากสาเหตุต่างๆ เช่น การตั้งค่าการรับสัญญาณไม่ถูกต้อง การบันทึก หรือการผิดพลาดจากอุปกรณ์การวัด ซึ่งจะส่งผลให้ข้อมูลที่ได้อาจมีความผิดพลาด ดังนั้นจึงจำเป็นต้อง

ตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลที่บันทึกได้หรือที่เรียกทั่วไปว่า “การควบคุมคุณภาพข้อมูล” โดยทั่วไปสามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ การตรวจสอบทั่วไปและการตรวจสอบอย่างละเอียด โดยการตรวจสอบทั่วไปสามารถดูได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีการแสดงผลโดยตรงจากเครื่องคอมพิวเตอร์ (รูปที่ 3.14)




รูปที่ 3.14 ตัวอย่างการแปรค่าตามเวลาในรอบวันของความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ต (E_d) ซึ่งทำการวัดด้วยเครื่องวัดรังสีอัลตราไวโอเล็ตแบบหลายช่องสัญญาณ โดยแสดงผลผ่านหน้าจคอมพิวเตอร์ที่สถานีเชียงใหม่

การตรวจสอบทั่วไป สามารถทำได้โดยการสังเกตข้อมูลที่ทำกรวัดว่ามีค่าอยู่ในระดับปกติหรือไม่ หรือมีค่าไม่มากเกินไป หรือมีค่าติดลบ สำหรับการควบคุมคุณภาพของข้อมูลอย่างละเอียด ผู้วิจัยจะทำการเปรียบเทียบความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ ซึ่งได้จากการวัดและความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้แบบจำลอง UVSPEC

การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลอย่างละเอียดมีขั้นตอนการตรวจสอบดังนี้ ในลำดับแรก ผู้วิจัยจะเลือกข้อมูลความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ จากนั้นจะนำข้อมูลตัวแปรต่างๆ ทางบรรยากาศที่จำเป็นมาใช้เป็นอินพุต (input) ในโปรแกรม UVSPEC ซึ่งเป็นค่าของวัน เวลา และสถานีเดียวกัน ที่สำคัญได้แก่ ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง ปริมาณโอโซนรวม และตำแหน่งดวงอาทิตย์ จากนั้นคำนวณค่าความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตด้วยโปรแกรม UVSPEC แล้ว

นำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด ถ้าค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดแสดงว่าข้อมูลจากการวัดมีความละเอียดถูกต้องในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ในกรณีที่มีการตรวจสอบแล้วพบว่าข้อมูลมีความผิดปกติ ผู้วิจัยจะทำการตัดข้อมูลนั้นออกไม่นำมาใช้ในงานนี้

เครื่องวัดรังสีอัลตราไวโอเล็ตแบบหลายช่องสัญญาณ เมื่อติดตั้งใช้งานต่อเนื่องกลางแจ้งเป็นเวลานานๆ จะมีการเสื่อมสภาพ โดยค่า sensitivity (หรือ responsibility) ที่ใช้แปลงค่าสัญญาณทางไฟฟ้าให้เป็นค่าความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะเปลี่ยนแปลงจากค่าเดิม ดังนั้นหลังจากที่เครื่องวัดถูกใช้งานไปแล้วจะต้องทำการสอบเทียบเป็นระยะๆ เพื่อให้ข้อมูลจากการวัดมีความถูกต้องแม่นยำ เมื่อเครื่องวัดรังสีอัลตราไวโอเล็ตแบบหลายช่องสัญญาณถูกใช้งานไปแล้วประมาณ 2 ปี ผู้วิจัยจะทำการส่งเครื่องวัดรังสีอัลตราไวโอเล็ตแบบหลายช่องสัญญาณไปสอบเทียบยังบริษัท Biospherical Instrument ซึ่งหลังผ่านการสอบเทียบแล้ว ผู้วิจัยจะได้ใบรายงานผลการสอบเทียบ (certificate) ของหัววัด (รูปที่ 3.15) ซึ่งใบรายงานผลการสอบเทียบนี้จะให้ค่า sensitivity ของแต่ละช่องสัญญาณของหัววัดรังสีค่าใหม่ เพื่อนำมาใช้ในการแปลงค่าสัญญาณไฟฟ้าเป็นค่าความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่วัดได้จากเครื่องวัดรังสีอัลตราไวโอเล็ตแบบหลายช่องสัญญาณ



Biospherical Instruments Inc.

System Calibration Certificate

THE INSTRUMENTS REFERENCED BELOW WERE FACTORY TESTED AND CALIBRATED BY

BIOSPHERICAL INSTRUMENTS INC.
5340 Riley Street
San Diego, California 92110 USA

Instruments: GUV-2511 No 25111207134

Optical Calibrations:
NIST Traceability. For wavelengths longer than 313 nm, the specific instruments cited here were calibrated using a 1000W FEL V-034(3/7/12) following procedures and standards traceable to NIST Standard of Spectral Irradiance F616. Traceability paths and all procedures for all calibrated lamps and associated apparatus (shunts, power supplies, DMMS, etc) are maintained following calibration methodologies per National Bureau of Standards (US) (NBS) Special Publication 250-20 Spectral Irradiance Calibrations (1987) and NBS Publication 594-13 Optical Radiation Measurements: The 1973 Scale of Spectral Irradiance (1977).

Solar Calibrations. Lamp calibrations are problematic for solar UV measurements (wavelengths below 320 nm) because the solar spectrum is radically different from the lamp spectrum and changes greatly as a function of wavelength. Solar calibrations are achieved through direct comparison with measurements of a high resolution scanning spectroradiometer in San Diego (SUV-100), which is part of the National Science Foundation's UV Monitoring Network. The SUV-100 instrument has a bandwidth of 1 nm. Calibrated filter radiometer data therefore report spectral irradiance at the channel's nominal wavelengths with a bandwidth of 1 nm. Solar calibrations are typically accurate to within $\pm 10\%$ for solar zenith angles smaller than 75° . At larger solar zenith angles, UV channels have a greater uncertainty due to the rapid change of the solar UV spectrum.

Note that this certificate contains a subset of the information delivered in the calibration database **25111207134v3.mdb**. This database is required for operation of this system using Biospherical Instruments Inc.'s Logger® software.



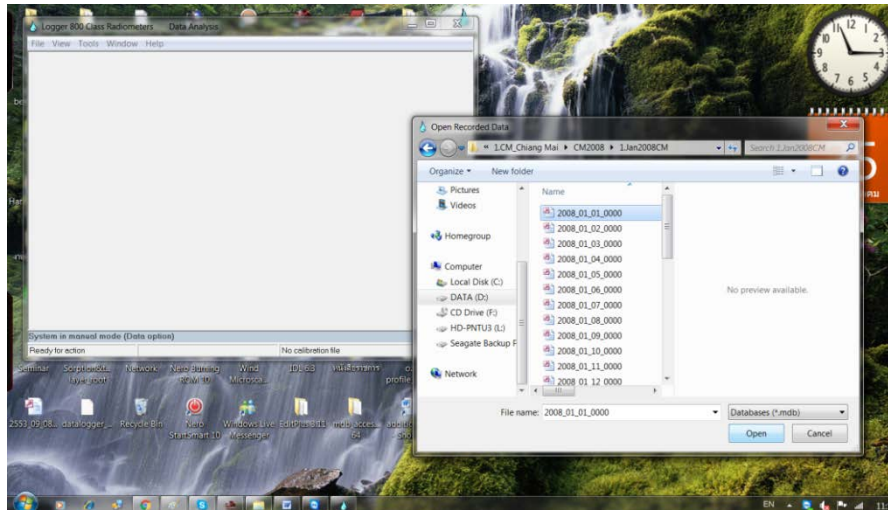
Biospherical Instruments Inc.

GUV-2511 Calibration Certificate										
System Serial Number		25111207134				Date of Calibration		12/8/2014		
Calibration database		25111207134v3.mdb				Date of Certificate		12/8/2014		
DASSN		0140				Standard of Spectral Irradiance		V-034		
Microprocessor Tag Number		2				Operator		TC		
Monochromatic		Wavelength	Responsivity	ScaleSmall	ScaleMedium	ScaleLarge	OffsetSmall	OffsetMedium	OffsetLarge	Measurement
Channels	Address	[nm]	[Amps per $\mu\text{W}/(\text{cm}^2\text{-nm})$]	[Volts per $\mu\text{W}/(\text{cm}^2\text{-nm})$]	[Volts per $\mu\text{W}/(\text{cm}^2\text{-nm})$]	[Volts per $\mu\text{W}/(\text{cm}^2\text{-nm})$]	[volts]	[volts]	[volts]	Units
Ed0305	2	305	1.2900E-10	1.3124E-05	3.8348E-03	1.2943E+00	-4.2200E-04	-4.2000E-04	1.7810E-03	$\mu\text{W}/(\text{cm}^2\text{-nm})$
Ed0313	6	313	2.6500E-10	2.7074E-05	7.9007E-03	2.6662E+00	-9.8200E-04	-9.8600E-04	-1.4930E-03	$\mu\text{W}/(\text{cm}^2\text{-nm})$
Ed0320	8	320	2.9409E-10	2.9982E-05	8.7732E-03	2.9477E+00	-1.0300E-04	-9.5000E-05	3.6580E-03	$\mu\text{W}/(\text{cm}^2\text{-nm})$
Ed0340	10	340	2.1997E-10	2.2463E-05	6.5580E-03	2.2045E+00	-2.5700E-04	-2.5500E-04	2.3800E-03	$\mu\text{W}/(\text{cm}^2\text{-nm})$
Ed0380	12	380	6.9226E-11	7.0538E-06	2.0623E-03	6.5123E-01	2.1000E-05	2.9000E-05	4.9640E-03	$\mu\text{W}/(\text{cm}^2\text{-nm})$
Ed0395	13	395	3.5847E-10	3.6722E-05	1.0679E-02	3.6112E+00	-2.0100E-04	-1.9300E-04	3.6920E-03	$\mu\text{W}/(\text{cm}^2\text{-nm})$
Broadband		Wavelength	Responsivity	ScaleSmall	ScaleMedium	ScaleLarge	OffsetSmall	OffsetMedium	OffsetLarge	Measurement
Channels	Address	[nm]	[Amps per $\mu\text{E}/(\text{cm}^2\text{-s})$]	[Volts per $\mu\text{E}/(\text{cm}^2\text{-s})$]	[Volts per $\mu\text{E}/(\text{cm}^2\text{-s})$]	[Volts per $\mu\text{E}/(\text{cm}^2\text{-s})$]	[volts]	[volts]	[volts]	Units
Ed0PAR	18	400-700	2.5543E-05	2.6027E+00	7.6319E+02	2.5857E+05	7.0000E-06	1.1000E-05	4.1760E-03	$\mu\text{E}/(\text{cm}^2\text{-sec})$
Auxiliary		Wavelength	Responsivity	ScaleS	ScaleM	ScaleL	OffsetS	OffsetM	OffsetL	Measurement
Channels	Address									Units
Ed0Temp	22	0	1	0.01	0.01	0.01	0	0	0	$^\circ\text{C}$
Ed0Vin	27	0	1	-0.25	-0.25	-0.25	0	0	0	V

รูปที่ 3.15 ตัวอย่างใบรายงานผลการสอบเทียบของเครื่องวัดรังสีอัลตราไวโอเล็ตแบบหลายช่องสัญญาณ s/n: 25111207134 ที่ส่งไปสอบเทียบยังบริษัท Biospherical Instrument

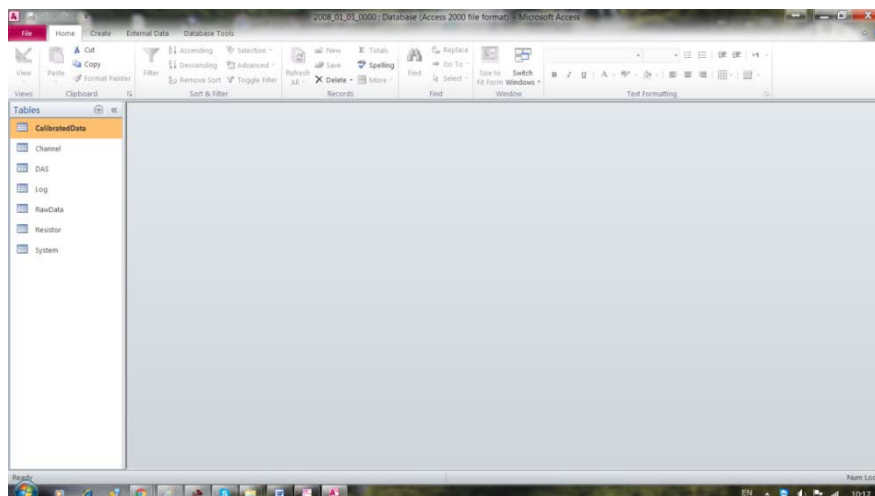
ในด้านข้อมูลความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่บันทึกลงในไฟล์ Microsoft access database หรือไฟล์ตระกูล .MDB ผู้วิจัยจะทำการแปลงไฟล์ข้อมูลให้เป็นไฟล์ Microsoft Excel โดยใช้โปรแกรม Logger ซึ่งมีขั้นตอนการแปลงดังนี้

- 1) เลือกเปิดไฟล์ตระกูล .MDB ที่ต้องการใช้งาน โดยใช้โปรแกรม Logger



รูปที่ 3.16 การเปิดไฟล์ .MDB ที่ต้องการใช้งานด้วยโปรแกรม Logger

- 2) เลือกเปิดไฟล์ตระกูล .MBD ที่ผ่านการเปิดไฟล์ด้วยโปรแกรม Logger ซึ่งจะปรากฏผลดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การเปิดไฟล์ตระกูล .MBD ที่ผ่านการเปิดไฟล์ด้วยโปรแกรม Logger

3) เลือกตัวเลือกจาก Table → CalibratedData จากนั้นจะปรากฏข้อมูลดังแสดงในรูปที่

3.18

Time	Ed0Gnd	Ed0305	Ed0313	Ed0320	Ed0340	Ed0380	Ed0395	Ed0PAR	Ed0Temp	Ed0Vin	ElapsedTime
1/1/2008 12:00	-0.000145	-0.000328590	8.724699E-05	-1.18000E-05	-0.0021848	-0.000462181	-0.000314416	1.384151E-07	40.1609	18.21749	
1/1/2008 12:01	-0.000145	-0.000322398	8.681554E-05	-1.33334E-05	-0.00213839	-0.000473668	-0.000315653	1.369477E-07	40.1585	18.21756	
1/1/2008 12:02	-0.000145	-0.000322398	8.336615E-05	-0.0001407	-0.00214835	-0.000478774	-0.000316647	1.362991E-07	40.1821	18.21766	
1/1/2008 12:03	-0.000145	-0.000322398	8.897124E-05	-1.44383E-05	-0.0021848	-0.000487708	-0.000315158	1.408188E-07	40.2065	18.21779	
1/1/2008 12:04	-0.000145	-0.000305605	9.543842E-05	-1.22284E-05	-0.00118363	-0.000469839	-0.000314169	1.475579E-07	40.2051	18.21779	
1/1/2008 12:05	-0.000145	-0.000303508	9.285158E-05	8.17823E-06	-0.00118861	-0.000450693	-0.000315406	1.555998E-07	40.1872	18.21794	
1/1/2008 12:06	-0.000145	-0.000314002	9.414503E-05	-7.44016E-06	-0.00115377	-0.000469839	-0.000311944	1.572071E-07	40.1766	18.2179	
1/1/2008 12:07	-0.000145	-0.000311903	9.242043E-05	-1.11234E-05	-0.00213839	-0.000469839	-0.000310707	1.42805E-07	40.1754	18.21781	
1/1/2008 12:08	-0.000145	-0.000314002	9.371388E-05	-1.18600E-05	-0.00118861	-0.000467286	-0.000311449	1.455087E-07	40.1648	18.2178	
1/1/2008 12:09	-0.000145	-0.00029931	9.630073E-05	-1.22284E-05	-0.00117866	-0.00045197	-0.00031318	1.330766E-07	40.141	18.21776	
1/1/2008 12:10	-0.000144	-0.000307705	8.810899E-05	-0.0001407	-0.00210852	-0.000457075	-0.000312933	1.318889E-07	40.1334	18.21766	
1/1/2008 12:11	-0.000145	-0.000320299	9.06584E-05	-1.14917E-05	-0.00216826	-0.000456628	-0.000309965	1.276206E-07	40.1299	18.21761	
1/1/2008 12:12	-0.000145	-0.000307705	8.767794E-05	-1.18600E-05	-0.00210354	-0.000450693	-0.00031202	1.214674E-07	40.102	18.21756	
1/1/2008 12:13	-0.000146	-0.000319200	8.767794E-05	-1.51749E-05	-0.00117368	-0.000436653	-0.000310707	1.184637E-07	40.0662	18.21745	
1/1/2008 12:14	-0.000145	-0.000312893	8.379794E-05	-1.55433E-05	-0.00118363	-0.000446854	-0.000306751	1.200811E-07	40.3388	18.21722	
1/1/2008 12:15	-0.000144	-0.000345485	8.810899E-05	-1.22284E-05	-0.00114879	-0.000439236	-0.000306009	1.250811E-07	39.9669	18.21715	
1/1/2008 12:16	-0.000145	-0.000370674	8.164188E-05	-1.14917E-05	-0.00117368	-0.000439236	-0.000305267	1.176409E-07	39.9584	18.21696	
1/1/2008 12:17	-0.000145	-0.00039796	7.95172E-05	-1.99032E-05	-0.00115377	-0.000441758	-0.000305762	1.167572E-07	39.9317	18.21686	
1/1/2008 12:18	-0.000145	-0.000419554	7.431232E-05	-2.43831E-05	-0.00119359	-0.000443035	-0.000305267	1.174017E-07	39.924	18.2168	
1/1/2008 12:19	-0.000145	-0.000410554	7.17252E-05	-2.36464E-05	-0.0021848	-0.000457075	-0.000306751	1.178557E-07	39.9378	18.21682	
1/1/2008 12:20	-0.000146	-0.000402158	6.698283E-05	-2.6593E-05	-0.00214317	-0.000455799	-0.000310213	1.17112E-07	39.9584	18.2169	
1/1/2008 12:21	-0.000145	-0.000387465	6.794513E-05	-2.54881E-05	-0.00216826	-0.000463457	-0.00031046	1.15714E-07	39.9897	18.21711	
1/1/2008 12:22	-0.000145	-0.00038267	7.345001E-05	-2.51197E-05	-0.00219812	-0.0004691	-0.000311696	1.12817E-07	40.0272	18.21794	
1/1/2008 12:23	-0.000144	-0.000376971	7.215657E-05	-2.75414E-05	-0.0021713	-0.000468563	-0.000310707	1.101395E-07	40.0591	18.21753	
1/1/2008 12:24	-0.000145	-0.000345485	7.862378E-05	-1.84899E-05	-0.00215312	-0.000488553	-0.00031046	1.08381E-07	40.075	18.21775	
1/1/2008 12:25	-0.000144	-0.000349684	7.000032E-05	-2.03315E-05	-0.00219359	-0.000471115	-0.000313427	1.07049E-07	40.0852	18.21781	

รูปที่ 3.18 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการเลือก Table ที่เป็น CalibratedData

ผู้วิจัยทำการเฉลี่ยข้อมูลความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ได้ให้เป็นข้อมูลรายชั่วโมง จากนั้นนำข้อมูลความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตมาคำนวณหาปริมาณ โอโซนรวม โดยในงานนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้วิธีการของ Dahlback (1996) ซึ่งเป็นวิธีการหาปริมาณ โอโซนรวมจากความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตเพียงบางช่องสัญญาณ วิธีการดังกล่าวเป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง 2 ความยาวคลื่น ที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกันแต่มีการดูดกลืน โอโซนที่แตกต่างกัน โดยให้ช่องสัญญาณหนึ่งอยู่ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตบี (มีความไวต่อโอโซน) และอีกช่องสัญญาณหนึ่งอยู่ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตเอ (ไม่มีความไวต่อโอโซน) จากนั้นนำมาเปรียบเทียบในรูปของสัดส่วน ดังสมการ

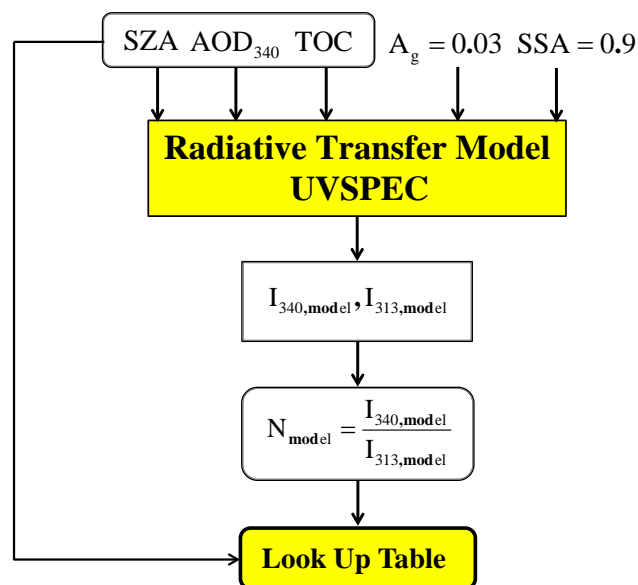
$$N = \frac{I_i}{I_j} = \frac{\sum_{\lambda=0}^{\infty} R_{i\lambda}}{\sum_{\lambda=0}^{\infty} R_{j\lambda}} \quad (3.4)$$

เมื่อ N เป็นค่าสัดส่วน [-]
 V เป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องวัดรังสีอัลตราไวโอเล็ตแบบหลายช่องสัญญาณ [V]

- R เป็นค่า absolute spectral responsivity ของแต่ละช่องสัญญาณของเครื่องวัดรังสีอัลตราไวโอเล็ตแบบหลายช่องสัญญาณ [$V/(\mu W/cm^2 \cdot nm)$]
- I เป็นค่าความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตแต่ละช่องสัญญาณ [mW/m^2]
- i และ j เป็นลำดับที่ของช่องสัญญาณของเครื่องวัดรังสีอัลตราไวโอเล็ตแบบหลายช่องสัญญาณที่มีการดูดกลืนโอโซนที่แตกต่างกัน

วิธีการคำนวณหาปริมาณโอโซนรวมจากข้อมูลความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะคล้ายคลึงกับในหัวข้อ 3.1.1 แต่จะใช้ความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน โดยในที่นี้ผู้วิจัยเลือกใช้ความยาวคลื่น 313 และ 340 nm ในการคำนวณหาปริมาณโอโซนรวม

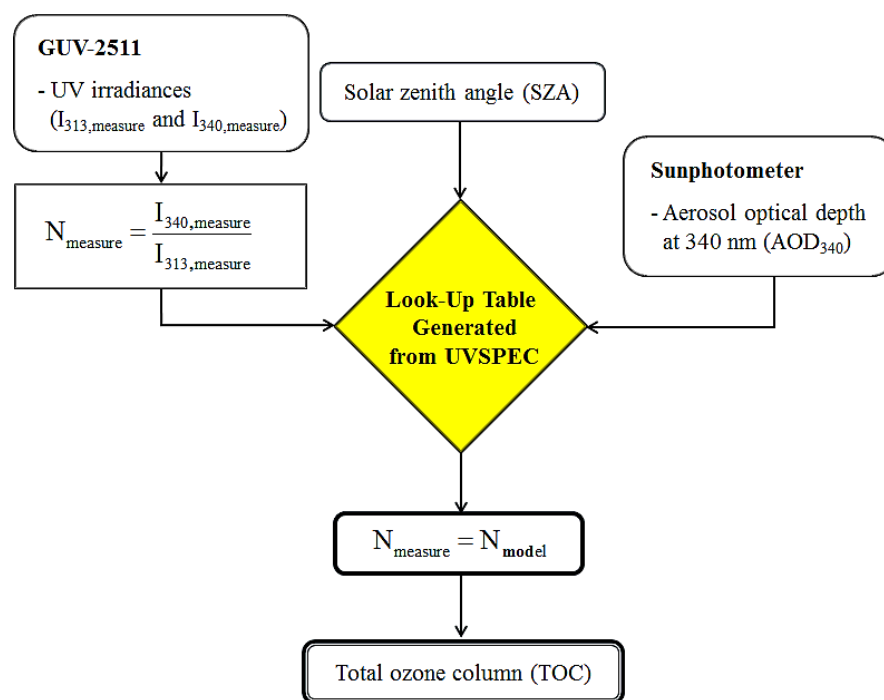
สำหรับวิธีการสร้าง look up table จะใช้วิธีการเดียวกับวิธีการในหัวข้อที่ 3.1.1 โดยผู้วิจัยจะใช้ค่า SZA ($0^\circ-80^\circ$) TOC (200-400 DU) AOD_{340} (0.05-4.75) A_g (0.03) และ SSA (0.9) เป็นตัวแปรอินพุทของแบบจำลอง UVSPEC ดังแสดงในแผนภูมिरูปที่ 3.19 โดยเอาที่พุทที่ออกมาจะอยู่ในรูป look up table ที่ประกอบด้วยตัวแปรอินพุทและค่า N (340:313)



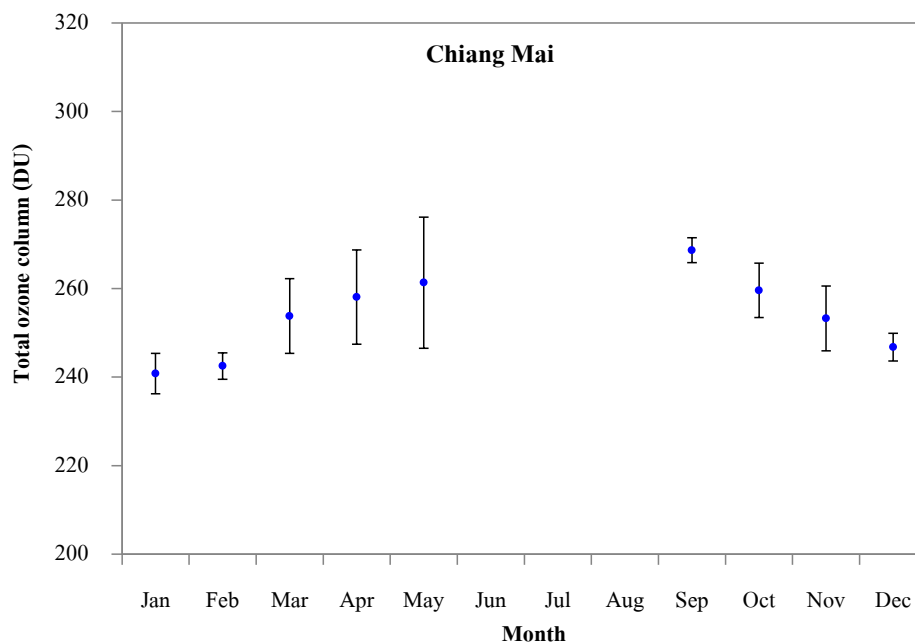
รูปที่ 3.19 แผนภูมิจากการสร้าง look up table โดยใช้โปรแกรม UVSPEC สำหรับใช้คำนวณหาปริมาณโอโซนรวมจากเครื่องวัดรังสีอัลตราไวโอเล็ตแบบหลายช่องสัญญาณ

เมื่อได้ look up table แล้ว ผู้วิจัยจะนำค่า N ที่ได้จากข้อมูลความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ช่องสัญญาณ 313 และ 340 nm (สมการ (3.4)) ของเครื่องวัดรังสีอัลตราไวโอเล็ตแบบหลาย

ช่องสัญญาณที่แต่ละค่าของ SZA และ AOD_{340} เฉพาะช่วงเวลาที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ใน look up table ถ้าค่า N ทั้งสองมีค่าเท่ากัน (มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1%) ก็จะได้ค่าปริมาณโอโซนรวมที่แท้จริง (รูปที่ 3.20) เนื่องจากปริมาณโอโซนรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (ค.ศ. 2006-2010) ที่คำนวณได้จากเครื่องวัดรังสีอัลตราไวโอเล็ตแบบหลายช่องสัญญาณที่สถานีเชียงใหม่ สามารถหาได้เฉพาะกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆเท่านั้น จึงทำให้ข้อมูลปริมาณโอโซนรวมที่ได้มีค่อนข้างน้อย ผู้วิจัยจึงได้นำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยรายเดือน แล้วนำมาเขียนกราฟกับเวลาในรอบปี ผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.20 กระบวนการหาปริมาณ โอโซนรวมจากการเปรียบเทียบค่า N จาก look up table กับค่า N ที่ได้จากเครื่องวัดรังสีอัลตราไวโอเล็ตแบบหลายช่องสัญญาณ

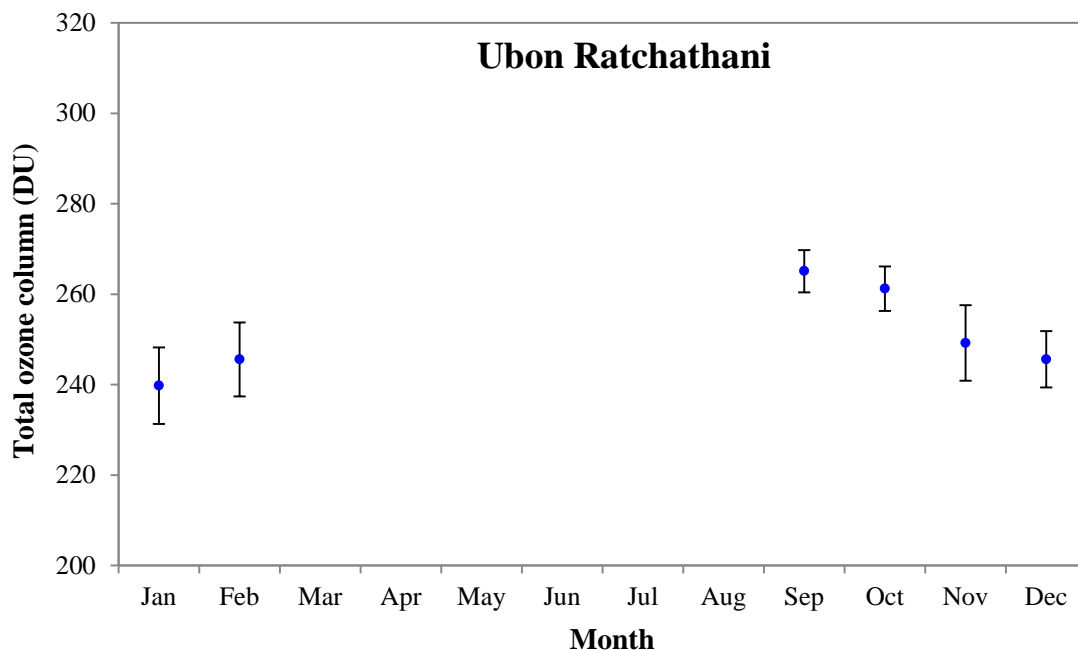


รูปที่ 3.21 ปริมาณโอโซนรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่คำนวณได้จากเครื่องวัดรังสีอัลตราไวโอเล็ตแบบหลายช่องสัญญาณในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ ที่สถานีเชียงใหม่

จากรูปที่ 3.21 จะเห็นว่าปริมาณ โอโซนรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดือนมกราคม และมีค่าลดลงจนถึงเดือนธันวาคมคล้ายกับกรณีของสถานีนครปฐม

3.1.3 สถานีอุบลราชธานี

ในทำนองเดียวกับสถานีเชียงใหม่ ผู้วิจัยได้ทำการหาปริมาณโอโซนรวมจากข้อมูลความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ต ที่ได้จากเครื่องวัดรังสีอัลตราไวโอเล็ตแบบหลายช่องสัญญาณ รุ่น GUV-2511 ผลิตโดยบริษัท Biospherical Instrument ในช่วงปี 2009-2010 ผู้วิจัยได้นำค่าเฉลี่ยรายเดือนมาเขียนกราฟกับเวลาในรอบปี ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ปริมาณ โอโซนรวมรายวันเฉลี่ยต่อที่คำนวณได้จากเครื่องวัดรังสีอัลตราไวโอเล็ตแบบหลายช่องสัญญาณในกรณีห้องฟ้าปราศจากเมฆ ที่สถานีอุบลราชธานี

เนื่องจากข้อมูลโอโซนที่หาได้มีค่อนข้างน้อย อย่างไรก็ตามจากจุดของกราฟ (รูปที่ 3.22) คาดหมายว่าจะมีลักษณะคล้ายกับของสถานีนครปฐมและเชียงใหม่

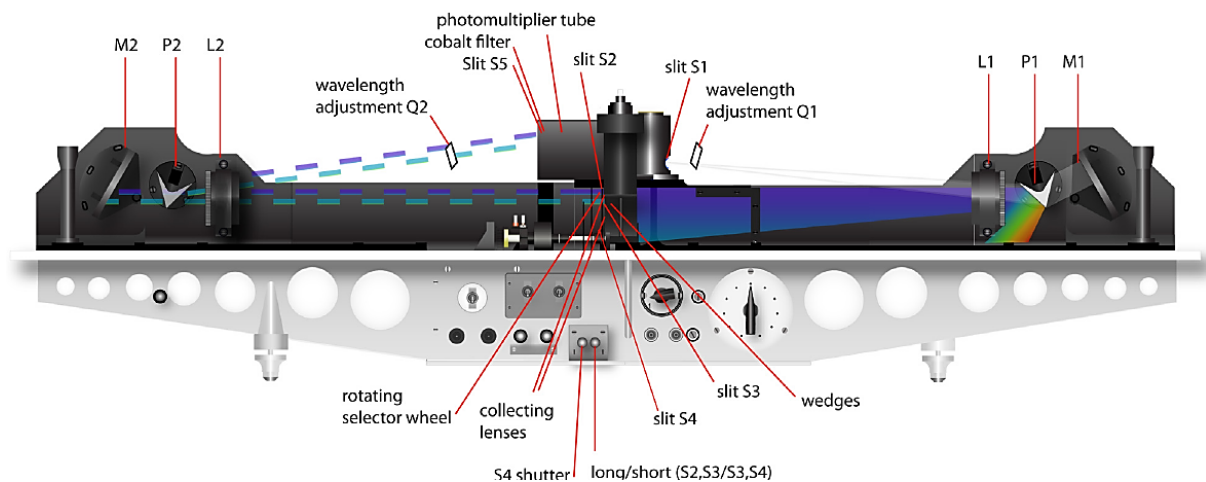
3.1.4 สถานีกรุงเทพฯ

ในงานนี้ ผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลปริมาณโอโซนรวมที่วัดด้วยเครื่อง Dobson spectrophotometer ซึ่งติดตั้งที่กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา (13.67°N, 100.62°E) (รูปที่ 3.23) เครื่องมือดังกล่าวเป็นของกรมอุตุนิยมวิทยาและใช้ในการวัดโอโซนในงานของกรมอุตุนิยมวิทยา ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1979 ถึงปัจจุบัน



รูปที่ 3.23 เครื่อง Dobson spectrophotometer ซึ่งติดตั้งที่กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา

เครื่อง Dobson spectrophotometer ประกอบด้วย monochromator ชนิดลำแสงคู่ (double beam monochromator) (รูปที่ 3.24) รังสีอาทิตย์จะผ่าน Window (A) ไปตกกระทบบนสลิต S_1 รังสีที่ผ่านออกมาจากสลิต S_1 จะไปตกบนแผ่นควอดซ์ Q_1 แล้วแยกออกเป็น 2 ทาง (ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต ($\lambda < 380 \text{ nm}$)) จากนั้นรังสีทั้งสองจะผ่านไปตกกระทบเลนส์ L_1 เพื่อปรับให้เป็นรังสีขนาน เมื่อรังสีขนานตกกระทบบนปริซึม P_1 ซึ่งสามารถหมุนมุมเพื่อให้ได้รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นที่ต้องการออกมาจะกระเจิงรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นที่ต้องการไปบนกระจก M_1 จากนั้นจะสะท้อนออกมาและถูกโฟกัสลงบนสลิต S_1 และ S_2 ก่อนที่รังสีอัลตราไวโอเล็ตจะผ่านไปยังสลิต S_2 และ S_3 จะถูก optical wedge (W) ลดความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นยาวกว่า (มีความเข้มสูงกว่า) ให้เท่ากับรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า (ความแตกต่างของความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับศูนย์) ซึ่งจะทำการวัดด้วยหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube; M_p) รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ผ่านเข้าไปยัง M_p จะมีเพียง 1 คู่ ดังนั้นจึงต้องมีตัวเลือกความยาวคลื่นด้วย chopper wheel ภายในเครื่อง เพื่อทำหน้าที่เลือกจะให้รังสีอัลตราไวโอเล็ตจากสลิต S_2 และ S_3 ผ่านเข้าไปยัง M_p เพื่อทำการวัดค่าความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ต การนำ double monochromator มาใช้ จะช่วยลดการกระเจิงของรังสีอัลตราไวโอเล็ตภายในของเครื่องวัด ดังนั้น Dobson spectrophotometer จึงสามารถวัดความแตกต่างของความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ 2 ความยาวคลื่น และความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตในแต่ละความยาวคลื่นได้



รูปที่ 3.24 ระบบทัศนศาสตร์ของ Dobson spectrophotometer (WMO, 2008)

เครื่อง Dobson spectrophotometer มีโหมดการวัดที่แตกต่างกัน 3 โหมด คือ direct sun (DS) zenith sky (ZS) และ Umkehr ซึ่งทั้ง 3 โหมดจะถูกใช้งานในลักษณะที่แตกต่างกัน โดยใช้ความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน 4 คู่คลื่น ได้แก่ คู่คลื่น A (305.5 nm และ 325.4 nm) คู่คลื่น B (308.8 nm และ 329.1 nm) คู่คลื่น C (311.45 nm และ 332.4 nm) และคู่คลื่น D (317.6 nm และ 339.8 nm) (บางเครื่องอาจมีคู่คลื่น E (332.4 nm และ 453.6 nm) ร่วมด้วย) ในการคำนวณหาปริมาณโอโซนรวมโดยใช้ Dobson spectrophotometer นิยมใช้ 2 คู่คลื่น คือ คู่คลื่น A และ D โดยอาศัยหลักการพื้นฐานของการคำนวณค่าปริมาณโอโซนรวมจากข้อมูลความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตตามสมการ

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-\alpha(\lambda)(x\mu - \beta(\lambda)(p/p_0)m - \delta(\lambda)\sec(SZA)) \quad (3.5)$$

- โดยที่ X เป็นปริมาณโอโซนรวมในหน่วย DU
 $I(\lambda)$ เป็นความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่น λ ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก
 $I_0(\lambda)$ เป็นความเข้มรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก
 $\alpha(\lambda)$ เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโอโซน (ozone absorption coefficient) ที่ความยาวคลื่น λ
 μ เป็นมวลอากาศที่รังสีอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่านชั้นโอโซน ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\mu = \frac{(R + h)}{\sqrt{(R + h)^2 - (R + r)^2 \sin^2(SZA)}} \quad (3.6)$$

เมื่อ	R	เป็นค่ารัศมีเฉลี่ยของโลก (6,371.229 km)
	r	เป็นระดับความสูงของสถานีวัด จากระดับน้ำทะเล
	h	เป็นระดับความสูงของชั้น โอโซนซึ่งวัดจากสถานีวัดเทียบกับระดับน้ำทะเล
	SZA	เป็นมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์
	$\beta(\lambda)$	เป็นสัมประสิทธิ์การกระเจิงของโมเลกุลอากาศ (Rayleigh scattering coefficient) ที่ความยาวคลื่น λ
	p	เป็นความดันบรรยากาศที่สถานีวัด เทียบกับระดับน้ำทะเล
	p_0	เป็นความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเลมีค่าเท่ากับ 1,013.25 hPa
	m	เป็นมวลอากาศสัมพัทธ์ที่ไม่คิดกระเจิงของ โมเลกุลอากาศ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}
 m = & \sec(SZA) - 0.0018167x[\sec(SZA) - 1] \\
 & - 0.002875x[\sec(SZA) - 1]^2 \\
 & - 0.0008083x[\sec(SZA) - 1]^3
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

เมื่อ $\delta(\lambda)$ เป็นความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (aerosol optical depth)

การคำนวณหาปริมาณ โอโซนรวมจาก Dobson spectrophotometer สามารถคำนวณได้จาก คู่คลื่น A, B, C หรือ D โดยสามารถลดรูปสมการ (3.5) เป็นดังสมการ

$$X = \frac{\left[N - (\beta - \beta') \frac{mp}{p_0} - (\delta - \delta') \cdot \sec(SZA) \right]}{(\alpha - \alpha')\mu} \tag{3.8}$$

$$\text{โดยที่ } N = L_o - L = \log \frac{I_o}{I'} - \log \frac{I}{I}$$

หมายเหตุ สัญลักษณ์ ' แทนความยาวคลื่นที่มีค่ามากกว่า

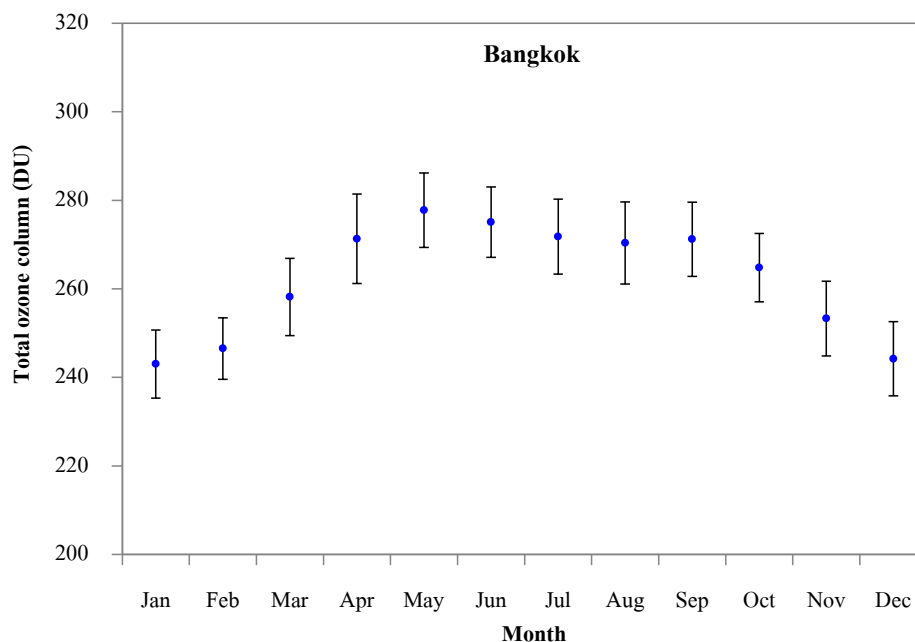
หรืออาจคำนวณหาปริมาณโอโซนรวมจากคู่คลื่น 2 คู่ เช่น คู่คลื่น AD, คู่คลื่น BD, คู่คลื่น CD หรือคู่คลื่น AC ดังสมการ

$$X_{12} = \frac{(N_1 - N_2) - [(\beta - \beta')_1 - (\beta - \beta')_2] \frac{mp}{p_0} - [(\delta - \delta')_1 - (\delta - \delta')_2] \sec(SZA)}{[(\alpha - \alpha')_1 - (\alpha - \alpha')_2] \mu} \quad (3.9)$$

เมื่อตัวห้อยเลข 1 และ 2 แทนคู่คลื่นที่ 1 และ 2 เช่น คู่คลื่น AD ตัวห้อยเลข 1 แทนคู่คลื่น A ส่วนตัวห้อยเลข 2 แทนคู่คลื่น D เป็นต้น และในที่นี้จะกำหนดให้ $(\delta - \delta')_1 - (\delta - \delta')_2 = 0$

Dobson spectrophotometer สามารถวัดค่าปริมาณโอโซนรวมได้ตลอดวัน (ยกเว้นในช่วงเวลากลางวัน) เนื่องจากเครื่องวัดดังกล่าวมีโหมมการวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ดังนี้ กรณีที่มีแสงแดด จะทำการตรวจวัดด้วยโหมม DS (direct sun) ขณะไม่มีแสงแดดจะตรวจวัดด้วยโหมม ZB (zenith blue) และขณะมีเมฆจะทำการตรวจวัดด้วยโหมม ZC (zenith cloud)

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลปริมาณโอโซนรวมรายวันตั้งแต่ปี ค.ศ. 1986-2015 ที่กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา มาทำการเฉลี่ยเป็นค่าปริมาณโอโซนรวมรายเดือนระยะยาว ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 ปริมาณโอโซนรวมเฉลี่ยรายเดือนระยะยาวซึ่งวัดด้วย Dobson spectrophotometer ที่กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา

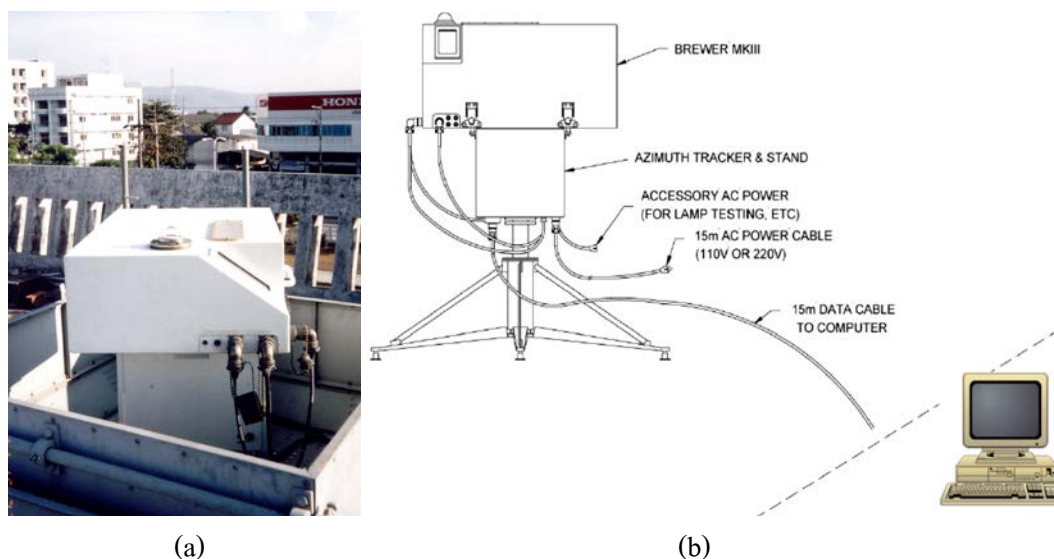
จากรูปที่ 3.25 พบว่าปริมาณ โอโซนรวมมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดือนมกราคมจนถึงเดือนเมษายน จากนั้นจะค่อนข้างคงที่ และจะลดลงจากเดือนกันยายนจนถึงเดือนธันวาคม ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับกรณีสถานีนครปฐม เชียงใหม่ และอุบลราชธานี

3.1.5 สถานีสงขลา

ในงานนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้ข้อมูลปริมาณ โอโซนรวมที่ตรวจวัดได้จากเครื่อง Brewer spectrophotometer รุ่น MKIV ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา (7.20°N, 100.60°E) (รูปที่ 3.26(a)) โดยเครื่องมือดังกล่าวเป็นของกรมอุตุนิยมวิทยา เครื่องวัดนี้มี resolution เท่ากับ 0.6 nm โครงสร้างภายในจะประกอบด้วยเกรตติงแบบฮาโลกราฟฟิก (halographic grating) 1 อัน สามารถกระจายรังสีอาทิตย์ที่ผ่านเข้ามายังสลิตโดยอาศัยหลักการพื้นฐานเหมือนกับ Dobson spectrophotometer

Brewer spectrophotometer รุ่น MKIV สามารถวัดปริมาณ โอโซน (O_3) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง โดยอาศัยข้อมูลสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ต (306.3 310.1 313.5 316.8 และ 320.1 nm) ซึ่งวัดออกมาในรูปของจำนวน โฟตอนและยังสามารถวัดความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ในช่วงสเปกตรัมรังสีที่ตามองเห็น (430-450 nm) ได้ด้วย

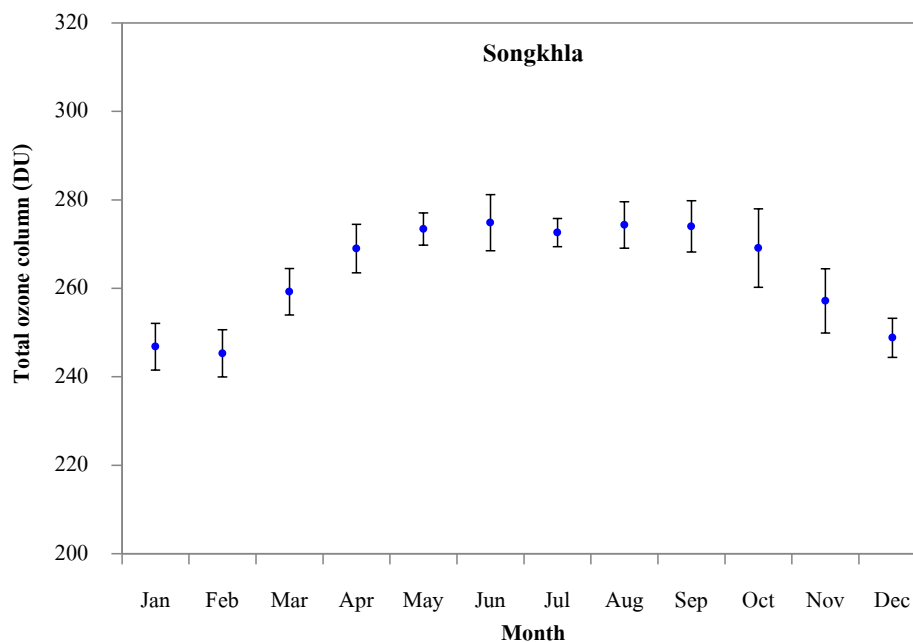
Brewer spectrophotometer สามารถวัดรังสีตรงจากดวงอาทิตย์ ทั้งนี้เพราะเครื่องวัดดังกล่าวถูกติดตั้งไว้บนเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ (sun tracker) (รูปที่ 3.26(b)) ซึ่งสามารถหมุนตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ได้ และยังสามารถวัดรังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ เนื่องจากมีโหมดการวัดแบบ zenith sky (ZS) เช่นเดียวกับเครื่อง Dobson spectrophotometer ทำให้สามารถวัดค่าปริมาณ โอโซนรวมได้ในทุกสภาพท้องฟ้า โดย Brewer spectrophotometer มีคุณสมบัติที่พิเศษกว่า Dobson spectrophotometer กล่าวคือสามารถทำการวัดได้แบบอัตโนมัติโดยอาศัยโปรแกรมควบคุมการทำงานผ่านการเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ ในขณะที่ Dobson spectrophotometer จะดำเนินการวัดด้วยมือ (manual)



รูปที่ 3.26 (a) Brewer spectrophotometer รุ่น MKIV ที่ติดตั้งที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา และ (b) แผนภูมิการทำงานของ Brewer spectrophotometer

การหาปริมาณโอโซนรวมจาก Brewer spectrophotometer สามารถคำนวณได้จากความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตของคู่คลื่น MS4 (306.3 และ 316.8 nm) หรือคู่คลื่น MS5 (310.1 และ 316.8 nm) หรือคู่คลื่น MS6 (313.5 และ 316.8 nm) หรือคู่คลื่น MS7 (320.1 และ 316.8 nm) โดยอาศัยสมการการคำนวณเช่นเดียวกับ Dobson spectrophotometer ตัวอย่างข้อมูลปริมาณโอโซนรวมที่วัดด้วย Brewer spectrophotometer ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา

ในโครงการนี้ ผู้วิจัยจะนำข้อมูลปริมาณโอโซนรวมที่วัดด้วย Brewer spectrophotometer ในช่วงปี ค.ศ. 1997-2015 ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา มาทำการหาค่าเฉลี่ยรายเดือน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 ปริมาณโอโซนรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาวซึ่งวัดด้วย Brewer spectrophotometer ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา

จากรูปที่ 3.27 พบว่า ปริมาณ โอโซนรวมจะมีค่าต่ำในช่วงต้นปี จากนั้นจะมีค่าค่อยๆ สูงขึ้น จนถึงเดือนเมษายน หลังจากนั้นจะมีการแปรค่าไม่มากนัก และจะค่อยๆ ลดลงจากเดือนกันยายน จนถึงเดือนธันวาคม เช่นเดียวกับกรณีของทั้ง 4 สถานีที่กล่าวมาแล้ว

3.2 การศึกษาปริมาณโอโซนรวมจากข้อมูลดาวเทียม

เนื่องจากปริมาณ โอโซนรวมที่หาได้จากเครื่องมือวัดภาคพื้นดินมีค่อนข้างจำกัดและเป็น ข้อมูลเฉพาะสถานีวัด ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาปริมาณโอโซนรวมจากข้อมูลดาวเทียม พร้อมทั้งจัดทำแผนที่และฐานข้อมูลปริมาณ โอโซนรวมในประเทศไทยด้วย

3.2.1 ข้อมูลปริมาณโอโซนรวมจากดาวเทียม

การวัดปริมาณ โอโซนรวมด้วยดาวเทียมเป็นการวัดด้วยเซ็นเซอร์ระยะไกลเหนือชั้นบรรยากาศโลก ประโยชน์ของการตรวจวัดด้วยดาวเทียมคือ ให้ข้อมูลเชิงพื้นที่ที่ดีและช่วยให้ทราบ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ในอดีตที่ผ่านมา มีดาวเทียมต่างๆ ที่ทำการวัดปริมาณ โอโซนรวมดังนี้ (รูปที่ 3.28)

1) ดาวเทียม Nimbus-4 เริ่มดำเนินการตรวจวัดตั้งแต่วันที่ 8 เมษายน 1970 ดาวเทียมนี้ติดตั้ง หัววัด Backscatter-Ultraviolet spectrometer (BUV) สำหรับวัดการกระจายตัวของ โอโซนตามความ

สูงและปริมาณโอโซนรวมรายวันซึ่งครอบคลุมพื้นที่ทั่วโลก ยกเว้นบริเวณขั้วโลกในบางช่วงที่ไม่ได้รับรังสีอาทิตย์ซึ่งไม่สามารถวัดปริมาณโอโซนรวมได้ ดาวเทียมดังกล่าวมีวงโคจรสูงจากพื้นผิวโลก 1,100 km หัววัด BUUV ของดาวเทียม Nimbus-4 สามารถวัดค่าได้ดีเฉพาะในช่วง 2.5 ปีแรก หลังจากนั้นหัววัดดังกล่าวมีปัญหาในด้านการอ่านค่า ทำให้ได้ค่าปริมาณโอโซนรวมที่มีความคลาดเคลื่อนสูง ดาวเทียม Nimbus-4 สิ้นสุดการทำงานเมื่อวันที่ 18 กันยายน 1980

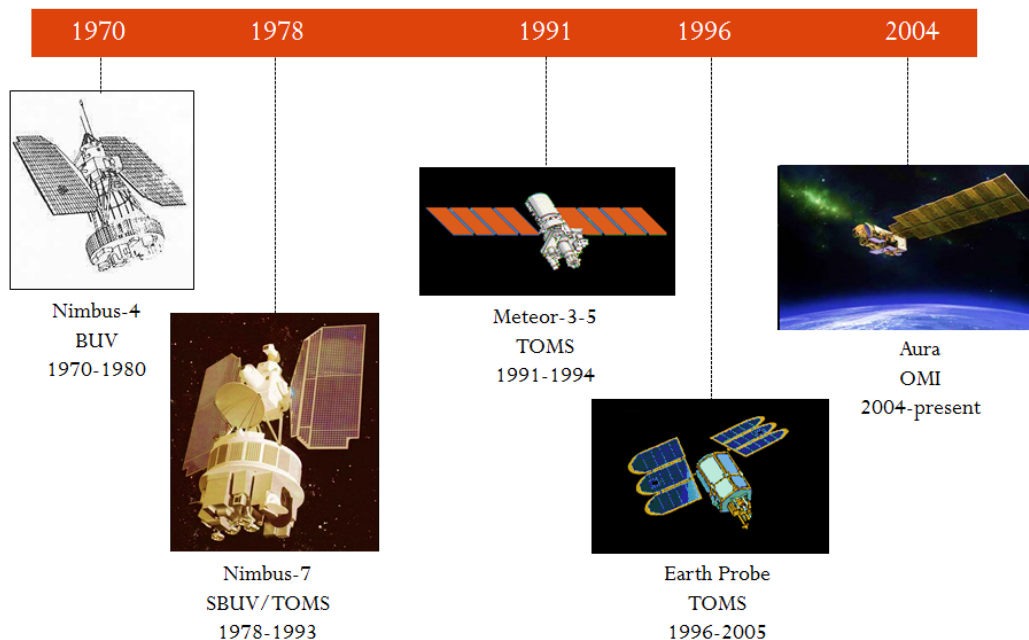
2) ดาวเทียม Nimbus-7 เริ่มดำเนินการตรวจวัดเมื่อวันที่ 23 ตุลาคม 1978 ดาวเทียมนี้โคจรอยู่สูงจากพื้นผิว 955 km และติดตั้งหัววัด 2 ตัว คือ หัววัด Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) และ Solar Backscatter Ultraviolet spectrometer (SBUV) โดยหัววัด SBUV เป็นหัววัดที่พัฒนามาจากหัววัด BUUV ซึ่งใช้สำหรับวัดปริมาณโอโซนรวมและโปรไฟล์ของโอโซนจากพื้นผิวโลกจนถึงที่ระดับความสูง 50 km ส่วนหัววัด TOMS นั้นจะดำเนินการวัดปริมาณโอโซนรวมรายวันทั่วโลก โดยมีความละเอียดเชิงพื้นที่ (spatial resolution) เท่ากับ 1 องศาละติจูด \times 1.25 องศา ลองจิจูด ดาวเทียม Nimbus-7 สิ้นสุดการทำงานเมื่อวันที่ 6 พฤษภาคม 1993

3) ดาวเทียม Meteor-3 เริ่มดำเนินการตรวจวัดเมื่อวันที่ 15 สิงหาคม 1991 ดาวเทียมดวงนี้โคจรสูงจากพื้นผิวโลก 1,230 km ติดตั้งหัววัด TOMS เพื่อใช้ตรวจวัดปริมาณโอโซนรวมรายวันทั่วโลก ดาวเทียม Meteor-3 สิ้นสุดการทำงานเมื่อเดือนธันวาคม 1994

4) ดาวเทียม Earth Probe เริ่มดำเนินการตรวจวัดในเดือนกรกฎาคม 1996 โดยได้ติดตั้งหัววัด TOMS บนดาวเทียม เพื่อใช้วัดปริมาณโอโซนรวมรายวันทั่วโลก ดาวเทียมดังกล่าวมีวงโคจรสูงจากพื้นผิว 500 km ซึ่งต่างจากความสูงที่กำหนดไว้ตอนเริ่มแรก (950 km) จากนั้นได้ทำการปรับวงโคจรใหม่เป็น 740 km ในเดือนมิถุนายน 1997 และสิ้นสุดการทำงานเมื่อปี 2005

5) ดาวเทียม Aura เริ่มดำเนินการตรวจวัดครั้งแรกเมื่อปี 2004 และยังคงถูกใช้งานจนถึงปัจจุบัน ดาวเทียมนี้ติดตั้งหัววัดปริมาณโอโซนรวมรายวันทั่วโลกใหม่ชื่อว่า Ozone Monitoring Instrument (OMI) โดยหัววัด OMI จะมีหลักการทำงานที่คล้ายคลึงกับหัววัด TOMS แต่หัววัด OMI ได้รับการพัฒนาและปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นกว่าหัววัด TOMS

**Daily total column ozone from
Polar-Orbiting Weather Satellites of NASA**



รูปที่ 3.28 ดาวเทียมต่างๆ ที่ทำการตรวจวัดปริมาณโอโซนรวมรายวันตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 จนถึงปัจจุบัน (www.nasa.gov and <http://directory.eoportal.org>)

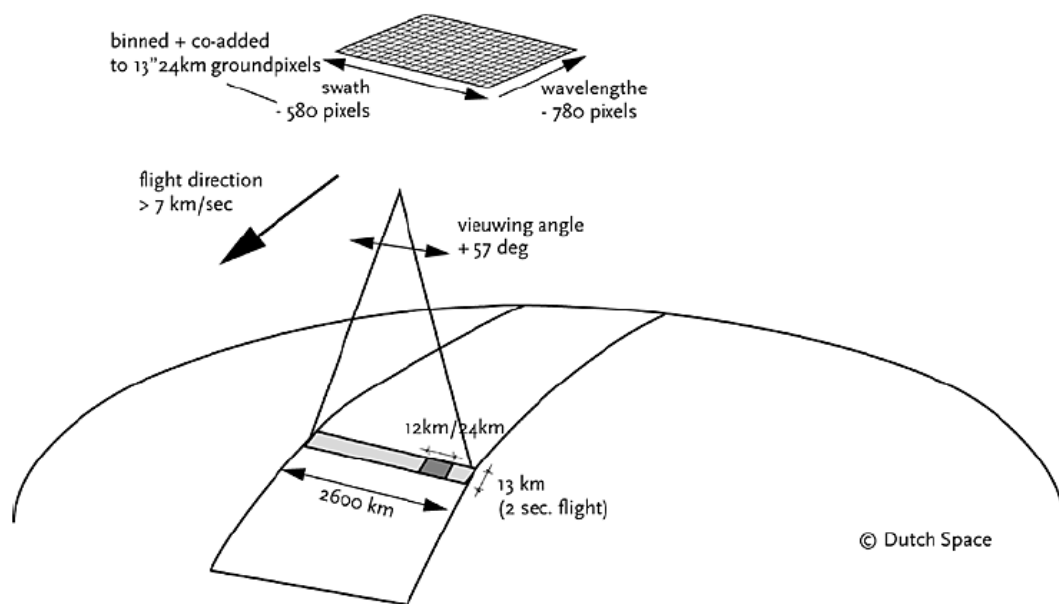
หัววัด OMI มีมุมมองกว้าง โดยสามารถวัดการกระเจิงของรังสีอาทิตย์ขณะใดๆ (solar backscattered irradiance) ได้เป็นระยะทางตามแนวนอน 2,600 km มี spatial resolution เท่ากับ 1 องศาละติจูด \times 1 องศาลองจิจูด หัววัดมีลักษณะเป็นกล้องโทรทรรศน์ที่มี across-track 115° (รูปที่ 3.29) เซ็นเซอร์ภายในเป็นแบบ CCD (charge couple device) ทำหน้าที่รับแสงแล้วแปลงเป็นสัญญาณอนาล็อก (analog) รังสีอาทิตย์ที่หัววัดรับได้มีช่วงความยาวคลื่นที่กว้างกว่า TOMS กล่าวคือ หัววัด OMI จะแบ่งช่องสัญญาณรับรังสีอาทิตย์เป็น 3 ช่องสัญญาณ ได้แก่ ช่อง UV-1 (264-311 nm) UV-2 (307-383 nm) และ VIS (349-504 nm) ในส่วนของการทำงานของหัววัดจะแบ่งเป็น 3 โหมด ได้แก่ 1) Global mode 2) Spatial zoom-in mode และ 3) Spectral zoom-in mode โดยในการวัดปริมาณโอโซนรวมจะใช้โหมดการทำงานแบบ spatial zoom-in ใน level 2 ตามวิธีการ TOMS version 8 ซึ่งเป็นการนำความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ 2 ความยาวคลื่น มาหาค่าสัดส่วน โดยเลือกความยาวคลื่นหนึ่งที่มีการดูดกลืนของโอโซนน้อย (331.2 nm) และอีกความยาวคลื่นหนึ่งที่มีการดูดกลืนของโอโซนมาก (317.5 nm) และตั้งสมมติฐานว่า ประสิทธิภาพการสะท้อนแสง (effective reflectivity หรือ cloud fraction) ไม่มีผลต่อรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่น 331.2 และ 317.5 nm สำหรับในการหาค่าสัดส่วนของความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ 2 ความยาวคลื่นจะใช้

หลักการพื้นฐานเช่นเดียวกับกรณีของ Dobson spectrophotometer ขณะที่ขั้นตอนการคำนวณปริมาณโอโซนรวมของห้วงวัด OMI จะทำการปรับปรุงกระบวนการของ Dave และ Mateer (1967) ใหม่ โดยพัฒนากระบวนการการถ่ายภาพรังสีอัลตราไวโอเล็ตให้ดีขึ้น รวมทั้งเพิ่มการตรวจสอบความสอดคล้องภายในห้วงวัด และนำข้อมูลที่ได้จากดาวเทียมไปเปรียบเทียบกับข้อมูลภาคพื้นดิน เพื่อปรับปรุงให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้องดียิ่งขึ้น ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวมีการตั้งสมมติฐาน 2 ข้อ ได้แก่

1) กรณีรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่สะท้อนจากพื้นผิวดวงกลับเข้าสู่ห้วงวัดมีความยาวคลื่นมากกว่า 310 nm ให้ใช้ฟังก์ชันของปริมาณโอโซนจากชุดข้อมูลโพรไฟล์แบบ climatology

2) ค่าสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่กระเจิงเข้าสู่ห้วงวัดที่ได้จากแบบจำลองการถ่ายภาพรังสีแบบง่าย เป็นค่าที่ได้จากการสมมติค่าเมฆ ผุ่นละออง และการสะท้อนที่พื้นผิวแบบ Lambertian เข้าไปในแบบจำลอง

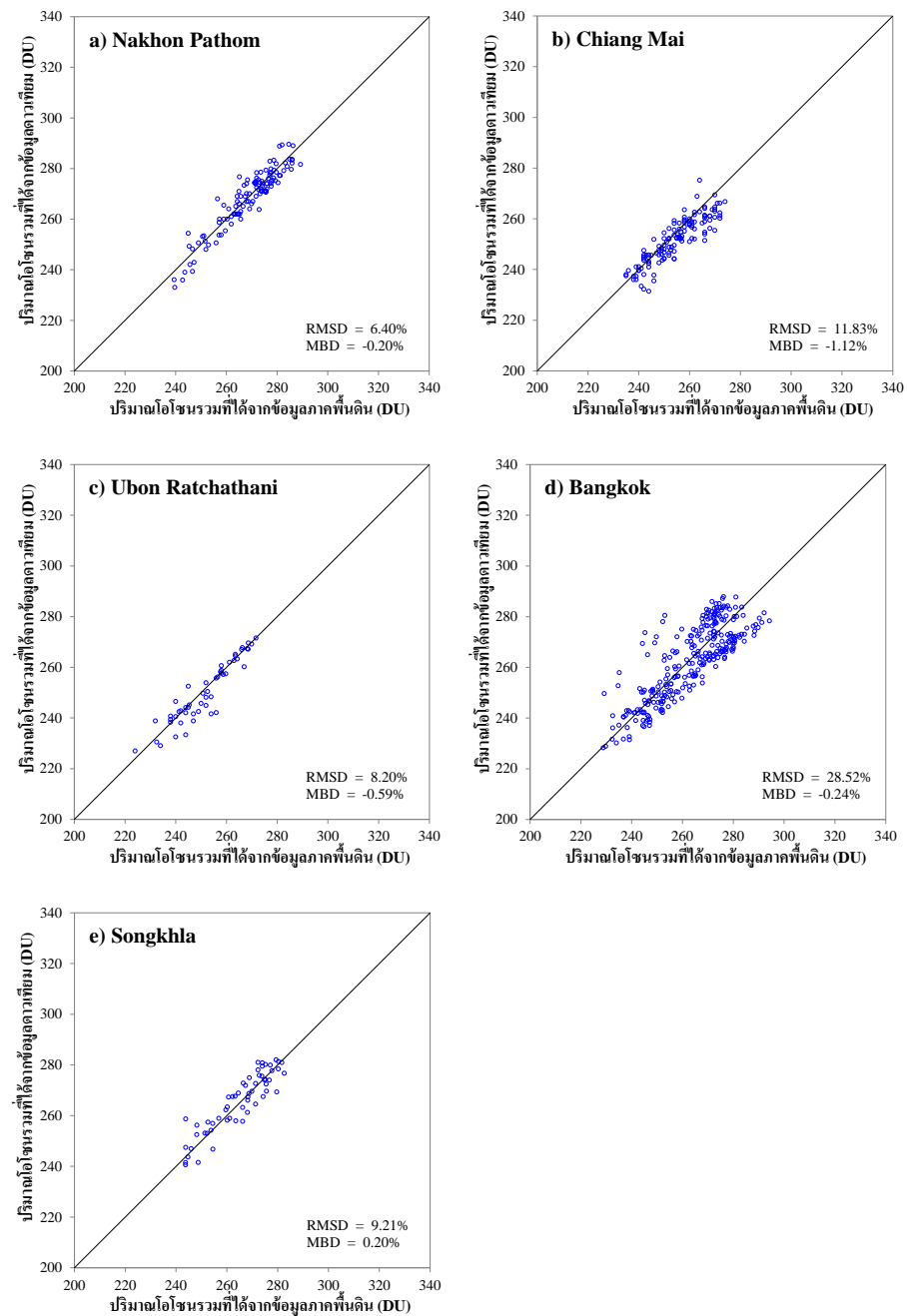
นอกจากนี้ห้วงวัด OMI ยังสามารถวัด trace gas ที่สำคัญๆ ซึ่งมีผลต่อปฏิกิริยาทางเคมีของโอโซนและคุณภาพอากาศ เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ได้ด้วย



รูปที่ 3.29 มุมมองการวัดของห้วงวัด OMI (Levelt et al., 2006)

3.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลดาวเทียม

ก่อนนำข้อมูลดาวเทียมมาใช้งานนั้น ผู้วิจัยจะทำการเปรียบเทียบปริมาณโอโซนรวมที่ได้จากสถานีวัด 5 แห่ง (ตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.1) กับข้อมูลปริมาณโอโซนรวมจากดาวเทียม ผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 การเปรียบเทียบข้อมูลปริมาณ ไนโตรเจนรวมที่ได้จากข้อมูลดาวเทียมกับข้อมูลภาคพื้นดิน ที่สถานี a) นครปฐม b) เชียงใหม่ c) อุบลราชธานี d) กรุงเทพฯ และ e) สงขลา

จากการเปรียบเทียบปริมาณ ไนโตรเจนรวมจากสถานีต่างๆ กับข้อมูลดาวเทียม พบว่ามีค่า root mean square difference (RMSD) และ mean bias difference (MBD) อยู่ในช่วง 6.4-28.5% และ -1.12-0.20%

3.2.3 การจัดทำแผนที่ปริมาณไอโซนรวมระยะยาวของประเทศไทย

จากผลการเปรียบเทียบข้อมูลปริมาณไอโซนรวมที่วัดได้จากเครื่องมือวัดภาคพื้นดินและจากดาวเทียมพบว่า ข้อมูลส่วนใหญ่มีความสอดคล้องกัน ดังนั้นในโครงการนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ข้อมูลจากดาวเทียมระหว่างปี ค.ศ. 1986-2015 มาใช้งาน เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวตามพื้นที่ของปริมาณไอโซนรวมระยะยาวของประเทศไทยโดยนำเสนอในรูปของแผนที่ปริมาณไอโซนรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาวและรายวันเฉลี่ยต่อปีระยะยาวของประเทศไทย โดยวิธีการสร้างแผนที่นี้

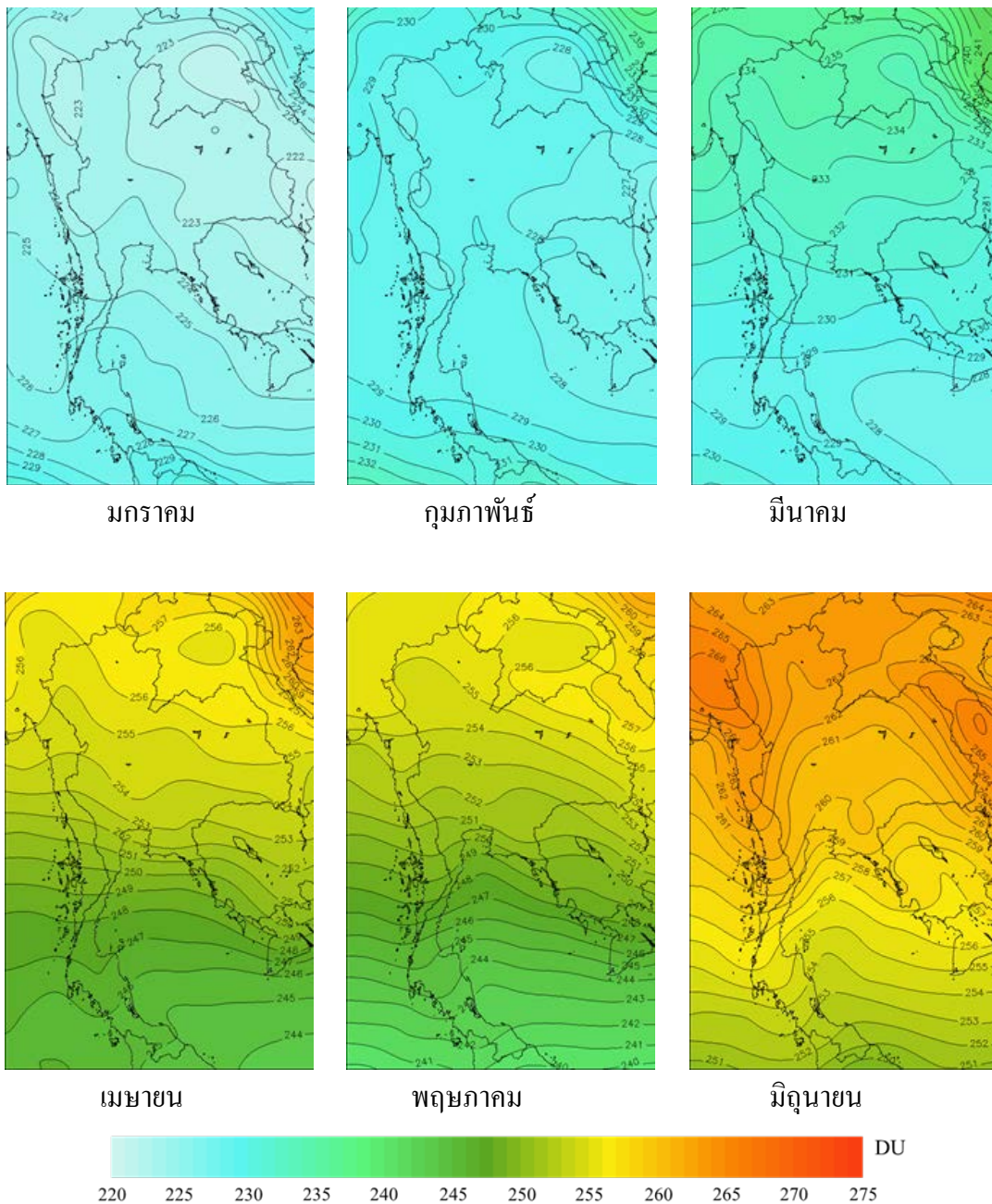
1) ดาวน์โหลดข้อมูลปริมาณไอโซนรวมจากดาวเทียม 4 ดวง (Nimbus-7 Meteor-3 Earth Probe และ Aura) ตั้งแต่เดือนมกราคม 1986 จนถึงเดือนธันวาคม 2015 จากเว็บไซต์ขององค์การ NASA (<http://avdc.gsfc.nasa.gov/>)

2) เขียนโปรแกรมภาษา IDL เพื่ออ่านข้อมูลปริมาณไอโซนรวมที่ครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทยตั้งแต่ละติจูดที่ 5.0°N - 25.0°N และที่ลองจิจูด 95.0°E - 110.0°E โดยจะทำการแปลงพิกเซลของดาวเทียมทั้ง 4 ดวงให้มีขนาดเท่ากัน (1 องศาตามละติจูด \times 1 องศาตามลองจิจูด)

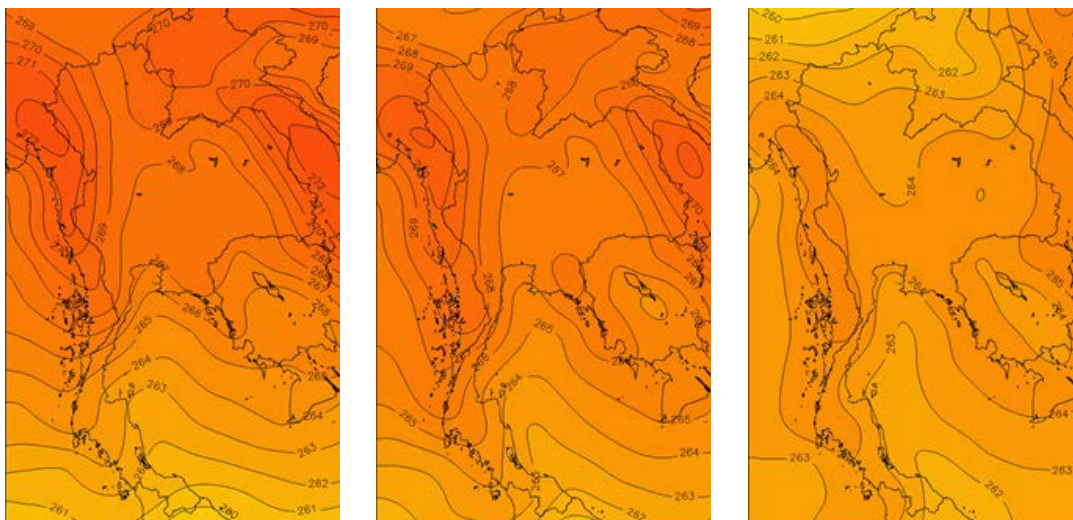
3) นำค่าปริมาณไอโซนรวมรายวันของแต่ละพิกเซลมาหาค่ารายวันเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาว (ค.ศ. 1986-2015) และค่ารายวันเฉลี่ยต่อปีระยะยาว (ค.ศ. 1986-2015) และทำการ interpolation ข้อมูลปริมาณไอโซนรวมของประเทศไทยด้วย เนื่องจากข้อมูลดาวเทียมมี resolution ต่ำ

4) นำค่าปริมาณไอโซนรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาว และค่าปริมาณไอโซนรวมรายวันเฉลี่ยต่อปีระยะยาว มาแสดงเป็นรหัสสีบนแผนที่ปริมาณไอโซนรวมระยะยาวของประเทศไทย

ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 3.31 จากรูปจะเห็นการกระจายตามพื้นที่ของปริมาณไอโซนรวมในบรรยากาศของประเทศไทย ซึ่งค่าปริมาณไอโซนรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาวของประเทศไทยมีค่าประมาณ 221-270 DU โดยปริมาณไอโซนรวมจะมีค่าต่ำในฤดูแล้ง (ธันวาคม-กุมภาพันธ์) และจะมีค่าสูงในฤดูฝน (มิถุนายน-กันยายน) กล่าวคือ ปริมาณไอโซนรวมจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากต้นปีจนถึงค่าสูงสุดในช่วงกลางปี และจะค่อยๆ ลดลงจนถึงค่าต่ำสุดในช่วงปลายปี ซึ่งสอดคล้องกับค่าปริมาณไอโซนรวมที่วัดได้จากเครื่องวัดภาคพื้นดิน นอกจากนี้ยังพบการแปรค่าปริมาณไอโซนรวมตามละติจูดด้วย โดยปริมาณไอโซนรวมจะมีค่าลดลงเมื่อละติจูดเพิ่มขึ้นในเดือนมกราคม-กุมภาพันธ์ และเดือนตุลาคม-ธันวาคม ขณะที่ในระหว่างเดือนมีนาคม-กันยายน ปริมาณไอโซนรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าละติจูดที่สูงขึ้น



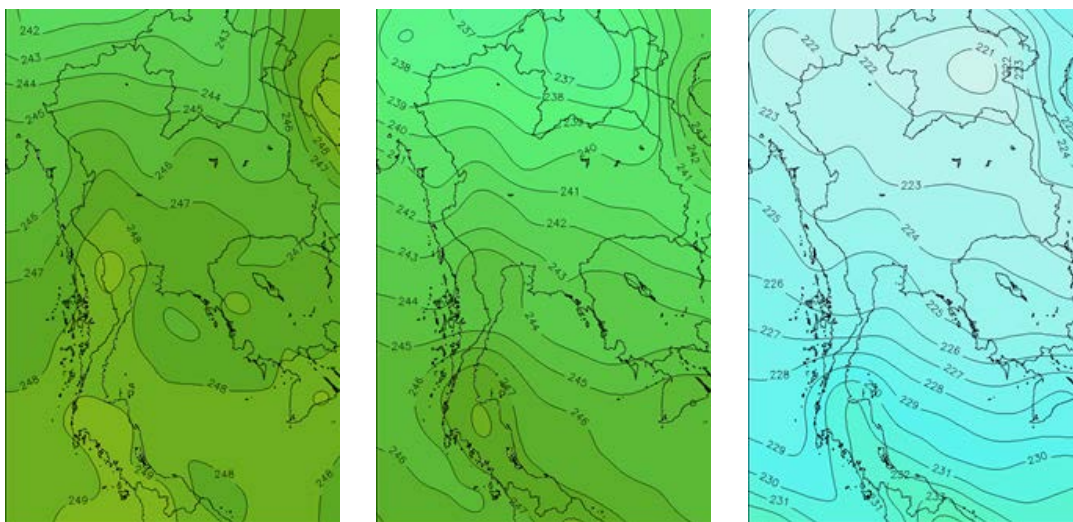
รูปที่ 3.31 แผนที่ปริมาณ โอโซนรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาวบริเวณประเทศไทย



กรกฎาคม

สิงหาคม

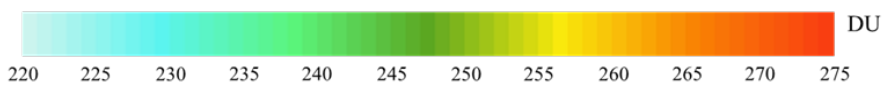
กันยายน



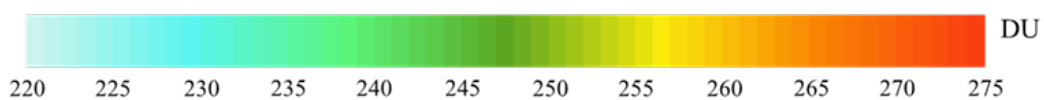
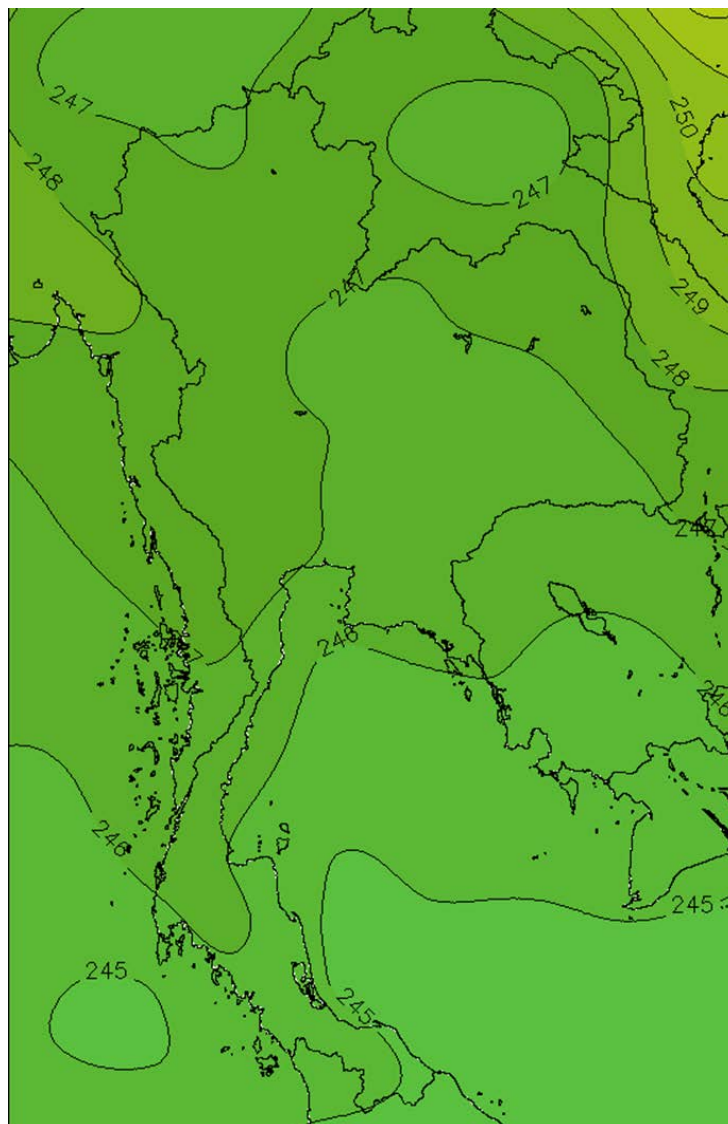
ตุลาคม

พฤศจิกายน

ธันวาคม



รูปที่ 3.31 แผนที่ปริมาณ โอ โชนรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาวบริเวณประเทศไทย (ต่อ)



รูปที่ 3.32 แผนที่ปริมาณโอโซนรวมรายวันเฉลี่ยต่อปีระยะยาวบริเวณประเทศไทย

จากรูปที่ 3.32 พบว่าปริมาณ โอโซนรวมรายวันเฉลี่ยต่อปีระยะยาวของประเทศไทยมีค่าสูงปานกลางคือ 245-250 DU และปริมาณโอโซนรวมมีการแปรค่าตามละติจูดด้วยโดยมีค่าเพิ่มตามค่าละติจูดที่สูงขึ้น

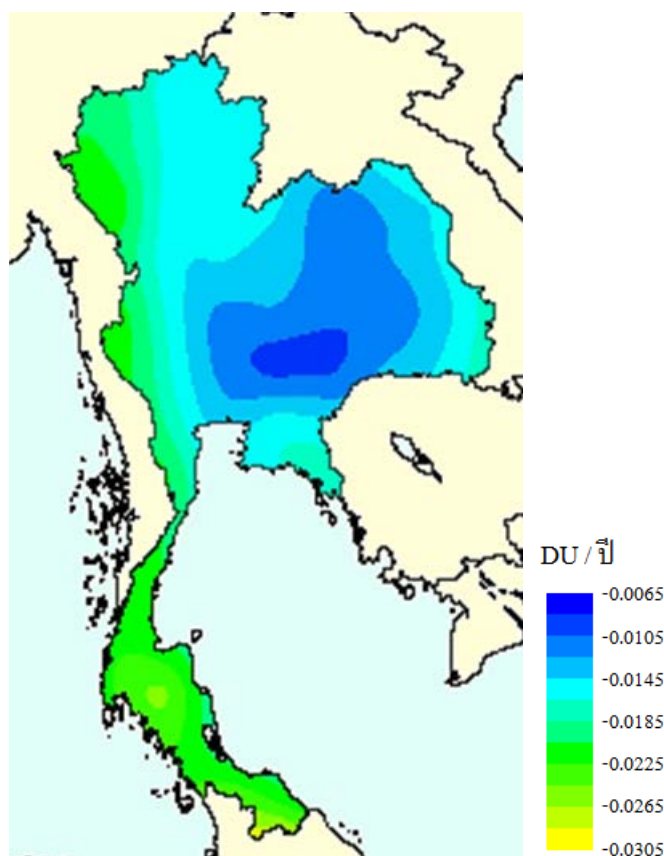
ในด้านการจัดทำฐานข้อมูลปริมาณโอโซนรวมสำหรับประเทศไทย ผู้วิจัยได้แนบ CD ไว้ท้ายเล่ม และอธิบายรายละเอียดการใช้งานไว้ในภาคผนวกที่ 1

3.3 การวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณโอโซนของประเทศไทย

ในโครงการนี้ ผู้วิจัยจะนำข้อมูลปริมาณ โอโซนรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาว (ค.ศ. 1986-2015) ที่ได้จากการวัดด้วยดาวเทียมมาทำการวิเคราะห์แนวโน้มปริมาณโอโซนรวมสำหรับประเทศไทย โดยผู้วิจัยได้ทำการเขียนโปรแกรมภาษา IDL เพื่อหาแนวโน้มปริมาณโอโซนรวมบริเวณประเทศไทยในช่วง 30 ปีที่ผ่านมา วิธีการหาแนวโน้มปริมาณโอโซนรวมมีดังนี้

1) นำข้อมูลปริมาณโอโซนรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนในปี ค.ศ. 1986-2015 ที่เก็บไว้ในไฟล์ .TXT ซึ่งได้มาจากการจัดทำแผนที่ในหัวข้อที่ 3.2.3

2) เขียนโปรแกรมภาษา IDL เพื่อหาแนวโน้มปริมาณ โอโซนรวมสำหรับประเทศไทยจากข้อมูลปริมาณโอโซนรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ตั้งแต่ละติจูด 5.0°N - 25.0°N และที่ลองจิจูด 95.0°E - 110.0°E ในการหาแนวโน้มจะพิจารณาค่าปริมาณโอโซนรวมที่ทุกพิกเซล โดยผู้วิจัยจะเขียนกราฟระหว่างปริมาณโอโซนรวมที่แต่ละพิกเซลกับเวลาและพิกัดกราฟ จากนั้นจะนำค่าความชันมาแสดงในรูปแผนที่ (รูปที่ 3.33) ถ้าความชันเป็นบวก แสดงว่าปริมาณ โอโซนมีค่าเพิ่มขึ้น และเป็นลบ แสดงว่าปริมาณโอโซนมีค่าลดลง



รูปที่ 3.33 แผนที่แนวโน้มปริมาณโอโซนรวมระยะยาวของประเทศไทย (1986-2015)

จากรูปที่ 3.33 พบว่าแนวโน้มปริมาณโอโซนรวมระยะยาวของประเทศไทยมีค่าเฉลี่ยโดยรวมทั้งประเทศเท่ากับ -0.018 DU/ปี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sahai และคณะ (2000) ที่พบว่าปริมาณโอโซนรวมของประเทศบราซิลซึ่งอยู่ในเขตร้อน มีแนวโน้มลดลงในช่วงปี ค.ศ. 1994-1997 โดยมีค่าแนวโน้มเท่ากับ $-2.0 \pm 1.2\%$ ที่สถานี Cachoeira Paulista (22.7°S , 45.0°W) สำหรับที่สถานี Natal (5.8°S , 35.8°W) ปริมาณโอโซนรวมในช่วงปี ค.ศ. 1978-1997 มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน โดยมีค่าแนวโน้มเท่ากับ $-0.8 \pm 0.8\%$

แนวโน้มปริมาณโอโซนรวมระยะยาวของประเทศไทยมีค่าต่ำสุดบริเวณภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง โดยเฉพาะในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งมีแนวโน้มเท่ากับ -0.0065 DU/ปี หรือราว 0.2 DU ในช่วงเวลา 30 ปี ขณะที่บริเวณภาคใต้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนตอนล่างของจังหวัดยะลา นราธิวาส จะมีค่าแนวโน้มการลดลงที่สูงสุดเท่ากับ -0.0305 DU/ปี โดยบริเวณภาคใต้ฝั่งตะวันออก (อ่าวไทย) มีแนวโน้มการลดลงของปริมาณโอโซนรวมที่น้อยกว่าบริเวณภาคใต้ฝั่งตะวันตก การลดลงดังกล่าวเป็นไปตามแนวโน้มการลดลงของปริมาณโอโซนในซีกโลกใต้ (Proffitt et al., 1990) การที่ปริมาณโอโซนรวมระยะยาวทางภาคใต้มีการลดลงที่มากกว่าบริเวณอื่นๆ ของประเทศไทยนั้นจะส่งผลให้ค่าความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยเฉพาะรังสีอัลตราไวโอเล็ตบีที่ตกกระทบพื้นผิวโลกมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนในพื้นที่และนักท่องเที่ยวที่เดินทางไปท่องเที่ยวในบริเวณดังกล่าว โดยมีความเสี่ยงเป็นผิวหนังไหม้แดด โรคมะเร็งผิวหนัง และโรคต่อกระดูกสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวัดปริมาณรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่สถานีวัดบริเวณภาคใต้ของประเทศไทยที่พบว่า ปริมาณรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่วัดได้ในเวลาที่เที่ยงวันของวันที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆในช่วงฤดูร้อนมีค่าดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV index) มากกว่า 12 ซึ่งมีค่าสูงมาก (Buntoung et al., 2012)

3.4 กรณีศึกษาโอโซนที่กรุงเทพฯ

3.4.1 โพรไฟล์ของโอโซน

โดยทั่วไป โอโซนในบรรยากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงตามความสูงโดยขึ้นอยู่กับสถานะของบรรยากาศ การแปรค่าตามความสูงของโอโซนหรือข้อมูลโพรไฟล์ของโอโซนเป็นข้อมูลที่สำคัญต่อการศึกษาสภาวะบรรยากาศ ปัจจุบันข้อมูลดังกล่าวสำหรับประเทศไทยยังมีน้อยมาก ดังนั้น ในโครงการนี้ผู้วิจัยจึงเสนอที่จะทำการหาโพรไฟล์ของโอโซนโดยใช้ ozonesonde ติดไปกับบอลลูนปล่อยสู่บรรยากาศ ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถวัดปริมาณโอโซนได้โดยตรง อย่างไรก็ตาม การปล่อย ozonesonde ไปในบรรยากาศเพื่อตรวจวัดปริมาณโอโซนนั้นจำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ผู้วิจัยจึงได้เลือกทำการศึกษาที่กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา (13.67°N , 100.62°E)

ซึ่งตั้งอยู่ในเมืองใหญ่ มีทางด่วนและมอเตอร์เวย์ตัดผ่านหลายสาย มีโรงงานอุตสาหกรรมทั้งทางด้านทิศตะวันออกเฉียงใต้และทิศเหนือ และทางด้านหน้าสถานีเป็นถนนที่มีการจราจรหนาแน่น ส่งผลให้มีมลพิษทางอากาศค่อนข้างสูง โดยจากผลการตรวจวัดมลพิษทางอากาศในพื้นที่เขตกรุงเทพฯ ของกรมควบคุมมลพิษ ตรวจพบสารประกอบอินทรีย์ระเหย (volatile organic compounds; VOCs) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในปริมาณที่สูงมาก (ตารางที่ 3.1) สารทั้งสามตัวนี้ถือเป็นสารที่มีอิทธิพลต่อการเกิดโอโซนที่สำคัญ

ตารางที่ 3.1 การประเมินอัตราการปล่อยมลพิษทางอากาศในพื้นที่เขตกรุงเทพฯ ปี ค.ศ. 1997

Pollutants	Emission loads (tons/year)			
	Point source	Mobile source	Area source	Total
NO _x	6,553	164,737	6,434	177,724
CO	909	249,320	4,467	254,696
VOC	382	171,086	8,468	179,936

ที่มา : PCD (2000) และได้รับการปรับปรุงโดย Zhang และ Kim Oanh (2002)

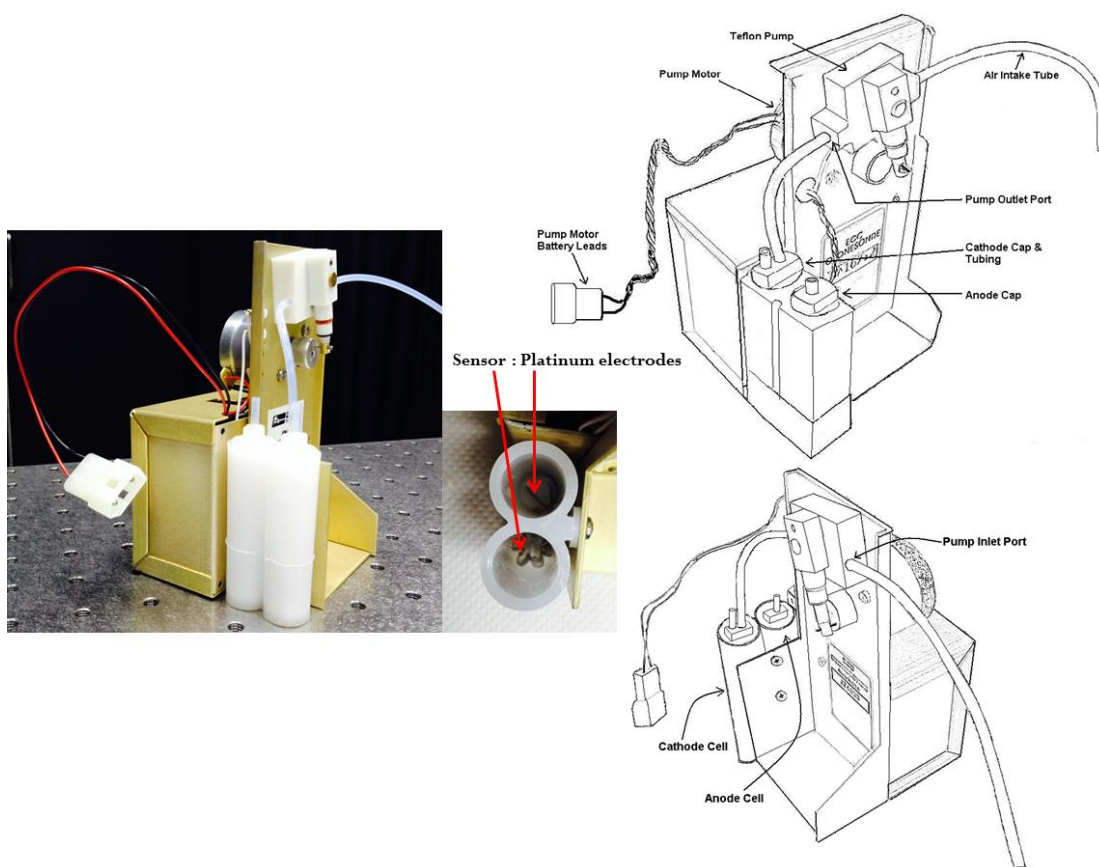
นอกจากสภาพอากาศบริเวณโดยรอบสถานีจะมีผลต่อโอโซนแล้ว สภาพภูมิอากาศตามฤดูกาลยังส่งผลต่อโอโซนด้วย ทั้งนี้เนื่องจากประเทศไทยได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงใต้และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโอโซน ในการวิเคราะห์โปรไฟล์โอโซน ผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องรู้ข้อมูลความเร็วลม ทิศทางลม อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ความเข้มข้นโอโซน และสารตั้งต้นโอโซนที่พื้นผิว รวมถึงข้อมูลฝุ่นละออง ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ ผู้วิจัยได้รับความเอื้อเฟื้อจากกรมอุตุนิยมวิทยา บางนา และกรมควบคุมมลพิษ

ในโครงการนี้ ผู้วิจัยจะเลือกใช้เครื่องตรวจวัดโอโซน (ozonesonde) ที่ผูกติดไปกับบอลลูน เพื่อตรวจวัดปริมาณโอโซนที่ระดับความสูงต่างๆ จนถึงที่ระดับความสูงประมาณ 30-37 km จากพื้นผิว ผู้วิจัยได้เริ่มดำเนินการตรวจวัดโปรไฟล์ของโอโซนตั้งแต่เดือนพฤษภาคม 2014 - เมษายน 2015 โดยทำการตรวจวัดเดือนละ 1 ครั้ง ในช่วงเวลา 09.00 น. ยกเว้นในเดือนมีนาคมและเมษายน 2015 ที่ได้ดำเนินการตรวจวัดหลายช่วงเวลา กล่าวคือ ในวันที่ 10 มีนาคม 2015 จะทำการตรวจวัดที่เวลา 06.00 09.00 16.00 และ 20.00 น. และในวันที่ 7 เมษายน 2015 จะทำการตรวจวัดที่เวลา 06.00 13.00 และ 16.00 น. ดังแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เวลาที่ทำการตรวจวัดโปรไฟล์ของโอโซนด้วย ozonesonde ระหว่างเดือนพฤษภาคม 2014 - เมษายน 2015 ที่กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา

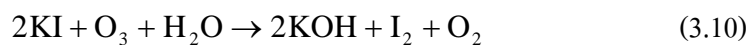
วัน เดือน ปี	เวลาที่ทำการตรวจวัด				
	06.00 น.	09.00 น.	13.00 น.	16.00 น.	20.00 น.
21 พฤษภาคม 2014	-	✓	-	-	-
13 มิถุนายน 2014	-	✓	-	-	-
15 กรกฎาคม 2014	-	✓	-	-	-
8 สิงหาคม 2014	-	✓	-	-	-
10 กันยายน 2014	-	✓	-	-	-
28 ตุลาคม 2014	-	✓	-	-	-
25 พฤศจิกายน 2014	-	✓	-	-	-
9 ธันวาคม 2014	-	✓	-	-	-
20 มกราคม 2015	-	✓	-	-	-
20 กุมภาพันธ์ 2015	-	✓	-	-	-
10 มีนาคม 2015	✓	✓	-	✓	✓
7 เมษายน 2015	✓	-	✓	✓	-

Ozonesonde ที่จะนำมาใช้หาปริมาณโอโซนในบรรยากาศตามความสูงเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical concentration cell; ECC) รุ่น 2ZV7 ซึ่งผลิตโดยบริษัท EN-SCI Corporation โดย ozonesonde ดังกล่าวประกอบด้วย 1) เซ็นเซอร์อิเล็กโทรด 2 ตัว อยู่ในแอโนดและแคโทดของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ที่มีความเข้มข้นของสารละลายต่างกัน 2) ช่องอากาศเข้าซึ่งทำงานร่วมกับปั๊มอากาศ ทำหน้าที่ดูดอากาศจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่เซ็นเซอร์ นอกจากนี้ยังมีส่วนเชื่อมต่อสัญญาณไฟฟ้าและแบตเตอรี่สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วย (รูปที่ 3.34) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในแต่ละเซลล์ ECC ozonesonde ประกอบด้วย สารโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) และสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีความเข้มข้นเท่ากัน ECC ozonesonde นี้จะให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าขนาด 0.13 V ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่ขั้วแคโทดและขั้วแอโนด



รูปที่ 3.34 เซ็นเซอร์สำหรับวัดปริมาณโอโซน

เมื่อโอโซนที่ปะปนอยู่ในอากาศถูกดูดเข้าสู่เซ็นเซอร์ของ ECC ozonesonde จะทำปฏิกิริยาเคมีกับโพแทสเซียมไอโอไดด์ ทำให้ได้ไอโอดีน (I_2) ออกมา ดังสมการ



จากนั้นไอโอดีนจะเปลี่ยนไปเป็นไอออนของไอโอไดด์ ดังสมการ



อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหล โดยปริมาณกระแสไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับปริมาณโอโซน จากค่ากระแสไฟฟ้าและอัตราการไหลของโอโซนเข้าสู่เซ็นเซอร์จะสามารถคำนวณหาปริมาณโอโซนได้ดังสมการ

$$P_{O_3} = 4.307 \times 10^{-3} (i_m - i_b) T_p t \quad (3.12)$$

โดยที่	P_{O_3}	เป็นความดันย่อยของโอโซน [nbar]
	i_m	เป็นค่ากระแสไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ [μA]
	i_b	เป็นค่ากระแสไฟฟ้าต่ำสุด (background current) ของเซ็นเซอร์ [μA]
	T_p	เป็นค่าอุณหภูมิของปั๊ม [K]
	t	เป็นเวลาที่ใช้ปั๊มดึงอากาศให้ไหลผ่านเซ็นเซอร์ [s]

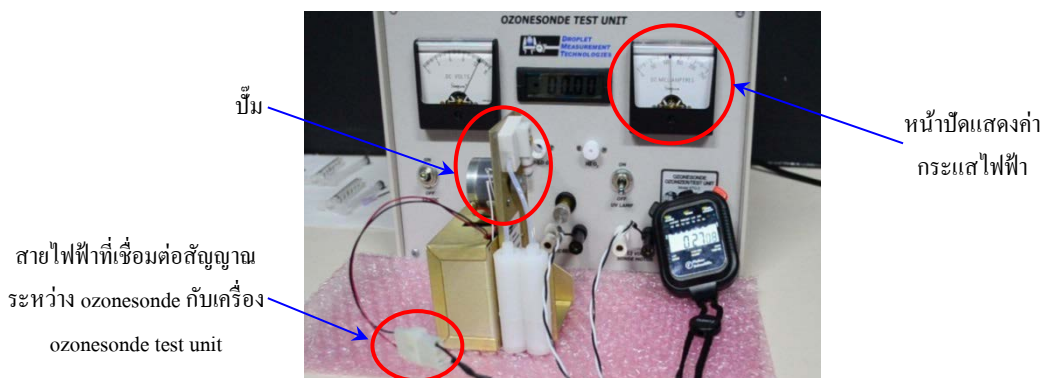
สำหรับการตรวจวัดปริมาณโอโซนที่ระดับความสูงต่างๆ ทำได้โดยการนำ ozonesonde และ radiosonde ผูกติดไปกับบอลลูนแล้วปล่อยขึ้นสู่บรรยากาศ ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดที่ระดับความสูงต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย ข้อมูลกระแสไฟฟ้าจาก ozonesonde และข้อมูลอุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม ทิศทางลม ความดันบรรยากาศ และตำแหน่งของการวัดจาก radiosonde จะถูกส่งกลับมายังเครื่องรับภาคพื้นดิน โดยอาศัยคลื่นวิทยุ จากนั้นสัญญาณที่ได้รับจะถูกประมวลผลและบันทึกค่าด้วยคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดโปรไฟล์ของโอโซน

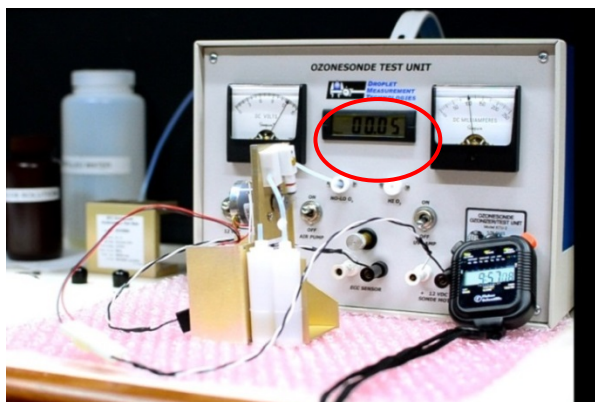
ก่อนที่ผู้วิจัยจะดำเนินการวัดโปรไฟล์ของโอโซน ผู้วิจัยต้องทำการทดสอบการทำงานของ ozonesonde ก่อน ซึ่งขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

1) หากกระแสไฟฟ้าและความดันของปั๊มของ ozonesonde เป็นเวลาประมาณ 10-30 นาที โดยเชื่อมต่อสายไฟฟ้าของ ozonesonde ที่ยังไม่ได้ทำการเติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ในเซลล์แคโทดและแอโนดเข้ากับเครื่อง ozonesonde test unit โดยเปิดสวิตช์ 12 VDC และเปิดสวิตช์ air pump ดังแสดงในรูปที่ 3.36 กระแสไฟฟ้าของปั๊มควรจะน้อยกว่า 100 mA จึงจะสามารถนำไปใช้งานได้



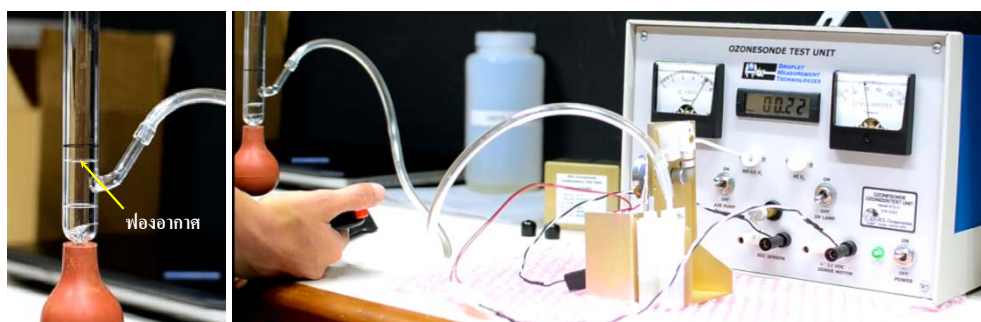
รูปที่ 3.36 วิธีการหาค่ากระแสไฟฟ้าของปั๊มของ ozonesonde

2) หาค่ากระแสไฟฟ้าต่ำสุดของเซลล์ไฟฟ้าเคมีของ ozonesonde โดยทำการเติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์เข้มข้น 0.05% ในเซลล์แคโทดจำนวน 3 cc และสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์อิ่มตัวจำนวน 1.5 cc ในเซลล์แอโนด จากนั้นเชื่อมต่อสายไฟฟ้าของ ozonesonde เข้ากับเครื่อง ozonesonde test unit เปิดสวิตช์ 12 VDC และเปิดสวิตช์ air pump และจับเวลาประมาณ 10 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3.37 ค่ากระแสไฟฟ้าต่ำสุดที่ได้จะนำไปแทนในสมการ (3.12)



รูปที่ 3.37 การหาค่ากระแสไฟฟ้าต่ำสุดที่ได้จากการทดสอบ ozonesonde ด้วยเครื่อง ozonesonde test unit

3) หาเวลาที่ฟองอากาศใช้ในการไหลผ่านหลอดแก้วขนาด 100 ml โดยใช้นาฬิกาจับเวลา เมื่อฟองอากาศเคลื่อนที่ผ่านเส้นเริ่มต้นและเส้นสุดท้ายที่ทำเครื่องหมายไว้บนหลอดแก้ว (เส้นสีดำ) ดังรูปที่ 3.38 ซึ่งเวลาดังกล่าวจะนำไปใช้คำนวณค่าความดันย่อยของโอโซนที่ระดับความสูงต่างๆ ตามสมการ (3.12)



รูปที่ 3.38 การหาค่าเวลาที่ฟองอากาศใช้ในการไหลผ่านหลอดขนาด 100 ml

ในการทดสอบข้อที่ 1) และ 2) จะทำทั้งหมด 3 ครั้ง ซึ่งแต่ละครั้งจะทดสอบห่างกัน 7 วัน ในการทดสอบครั้งที่ 1 และ 2 จะทำการทดสอบเฉพาะข้อที่ 1) และ 2) เท่านั้น ส่วนในการทดสอบครั้งสุดท้าย (ครั้งที่ 3) เป็นการทดสอบก่อนนำ ozonesonde ไปใช้งานจริง ผู้วิจัยต้องทำตามขั้นตอนในข้อที่ 1)-3) ซึ่งค่าที่ได้จากข้อที่ 2) และ 3) เป็นข้อมูลอินพุตที่สำคัญของโปรแกรม O₃ ที่ใช้ประมวลผลค่าโอโซนที่วัดได้ที่แต่ละระดับความสูง

เมื่อทดสอบ ozonesonde ครั้งที่ 3 เสร็จแล้ว ผู้วิจัยจะนำ radiosonde ไปติดไว้กับ ozonesonde จากนั้นนำไปทดสอบสัญญาณกับเครื่องรับ-ส่งสัญญาณวิทยุที่ความถี่ 403.0 MHz โดยสามารถตรวจสอบการทำงานผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลดังแสดงในรูปที่ 3.39



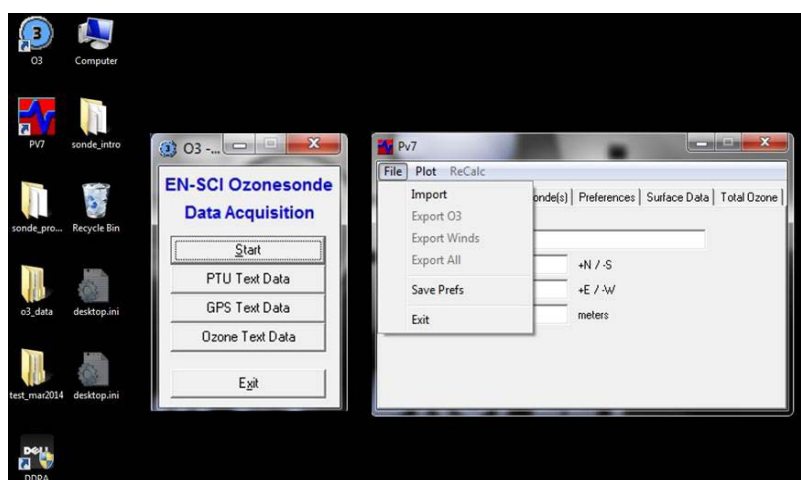
รูปที่ 3.39 การทดสอบการทำงานของ ozonesonde ที่เชื่อมต่อกับ radiosonde และเครื่องรับ-ส่งสัญญาณ

เมื่อทดสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ ozonesonde เรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยได้นำชุดอุปกรณ์ ozonesonde ที่ผ่านการทดสอบมาใช้ตรวจวัดโปรไฟล์ของโอโซนที่กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา เพื่อทำการวิเคราะห์การแปรค่าของโอโซน การวัดโปรไฟล์ของโอโซนในแต่ละครั้งจะประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้ บัลลูนขนาด 1,600 กรัมซูชิพ รอก ozonesonde และ radiosonde โดยบัลลูนแต่ละลูกจะทำการอัดด้วยก๊าซฮีเลียมขนาด 90 kg/cm^2 (ประมาณ 1,285.7 psi) (รูปที่ 3.40) ซึ่งจะให้อัตราการลอยประมาณ 5 m/s และสามารถลอยขึ้นไปได้สูงประมาณ 30-37 km จากพื้นผิว ก่อนที่บัลลูนจะแตก สำหรับในส่วนเครื่องรับ-ส่งสัญญาณภาคพื้น จะใช้ขาตั้งกล้องติดเสาอากาศวิทยุรับสัญญาณจาก radiosonde ที่ความถี่ 403.0 MHz แล้วเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางโมเด็ม โดยคอมพิวเตอร์จะติดตั้งซอฟต์แวร์สำหรับประมวลผลข้อมูลไว้ (รูปที่ 3.40) ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลโปร

ไฟล์ของโอโซนได้ทั้งขาขึ้นและลงของบัลลูน การตรวจวัดแต่ละครั้งจะใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง (ตั้งแต่เวลาประมาณ 9.00-12.00 น.)

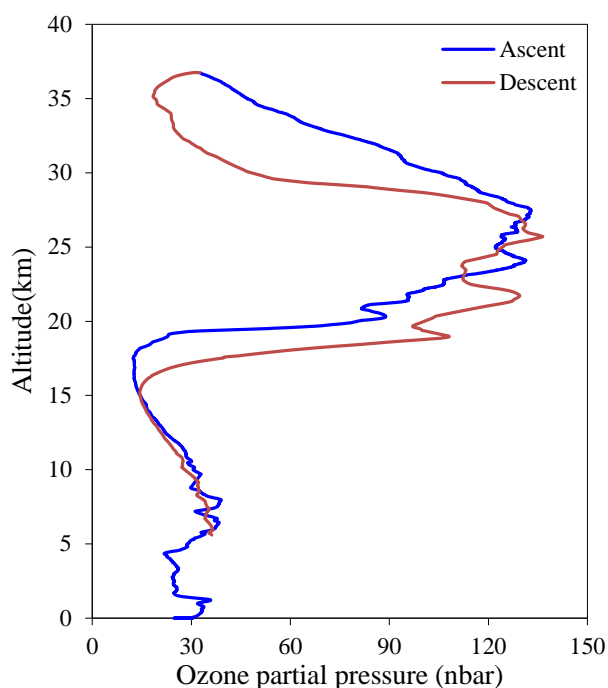


รูปที่ 3.40 การอัดก๊าซฮีเลียมเข้าไปในบัลลูนขนาด 1,600 g ที่กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา



รูปที่ 3.41 ซอฟแวร์ที่ใช้ในการประมวลผลซึ่งเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางโมเด็ม

ในที่นี้จะยกตัวอย่างผลการตรวจวัดโปรไฟล์ของโอโซนด้วย ozonesonde ในวันที่ 21 พฤษภาคม 2014 เวลา 09.00 น. ที่กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา ดังรูปที่ 3.42 จากรูปจะเห็นว่า โปรไฟล์ของโอโซนที่ได้จากการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์มีทั้งขาขึ้นและลงของบอลลูน ผู้วิจัยจะไม่นำข้อมูลขาลงมาทำการวิเคราะห์เนื่องจากในตอนขาลง บอลลูนมีการร่วงหล่นที่เร็วมากทำให้ข้อมูลที่ได้มีความผิดพลาด



รูปที่ 3.42 โปรไฟล์ของโอโซนที่วัดได้ด้วย ozonesonde ในวันที่ 21 พฤษภาคม 2014 เวลา 09.00 น. ที่กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา

เมื่อได้ข้อมูลโปรไฟล์ของโอโซนแล้ว ขั้นแรกผู้วิจัยจะทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลก่อน ซึ่งในการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลโดยทั่วไปนิยมนำไปตรวจสอบกับโปรไฟล์ของโอโซนที่วัดได้จาก Brewer spectrophotometer แต่เนื่องจาก Brewer spectrophotometer ที่กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา เสีย จึงไม่สามารถนำโปรไฟล์ของโอโซนที่วัดได้จาก ozonesonde มาเปรียบเทียบกันได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการแปลงโปรไฟล์ของโอโซนให้เป็นปริมาณโอโซนรวมแล้วนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลปริมาณโอโซนรวมที่วัดด้วย Dobson spectrophotometer และดาวเทียม Aura/OMI ณ ตำแหน่งสถานีเดียวกันและในช่วงเวลาเดียวกัน (มกราคม 2014-ธันวาคม 2015) โดยในการแปลงค่าความดันย่อยของโอโซนให้เป็นปริมาณโอโซนรวม มีขั้นตอนดังนี้

1) ความดันย่อยของโอโซนที่ระดับความสูงใดๆ (P_{O_3}) สามารถแปลงเป็นอัตราส่วนผสมโอโซน (ozone mixing ratio) ในหน่วยของอัตราส่วนหนึ่งในล้านของปริมาตรอากาศ (part per million per volume; ppmv) ได้ดังสมการ

$$O_3(\text{ppmv}) = \frac{P_{O_3}}{P} \quad (3.13)$$

โดยที่ P เป็นความดันบรรยากาศที่ระดับความสูงใดๆ [mbar]

2) แปลงความเข้มข้นโอโซนในหน่วยของ ppmv ให้เป็นปริมาณโอโซนในหน่วย DU ดังสมการ

$$O_3(\text{DU}) = 10 \left(\frac{RT_0}{g_0 P_0} \right) = \sum_{i=1}^{N-1} 0.5 [O_3(\text{ppmv})_i + O_3(\text{ppmv})_{i+1} (p_i - p_{i+1})] \quad (3.14)$$

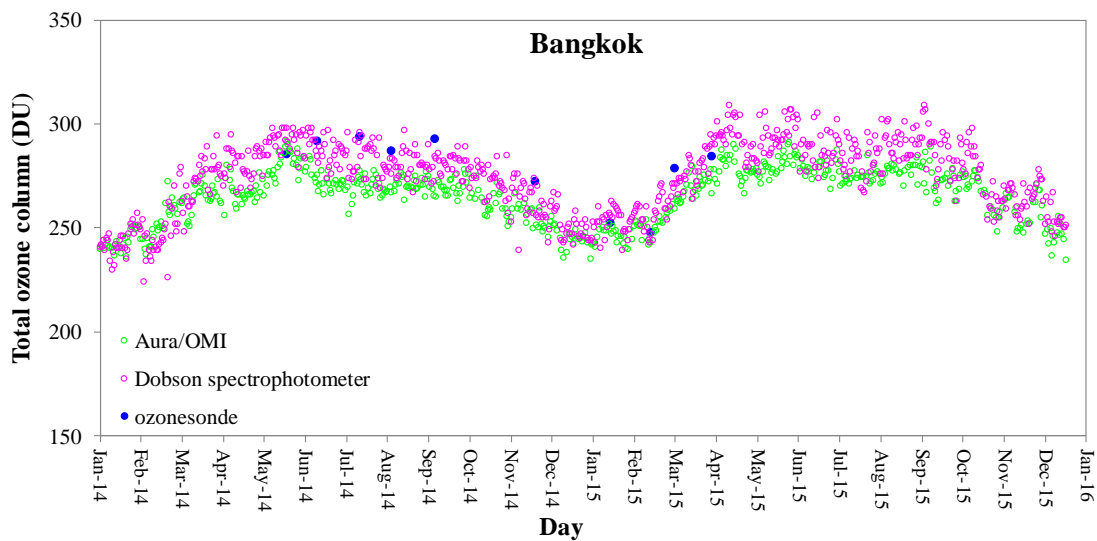
$$\text{เมื่อ } R = \frac{k_B N_A}{M_A} = 287.3 \text{ J/K}\cdot\text{kg}$$

$$T_0 = 273.15 \text{ K}$$

$$g_0 = 9.80665 \text{ m/s}^2$$

$$p_0 = 1,013.25 \text{ hPa}$$

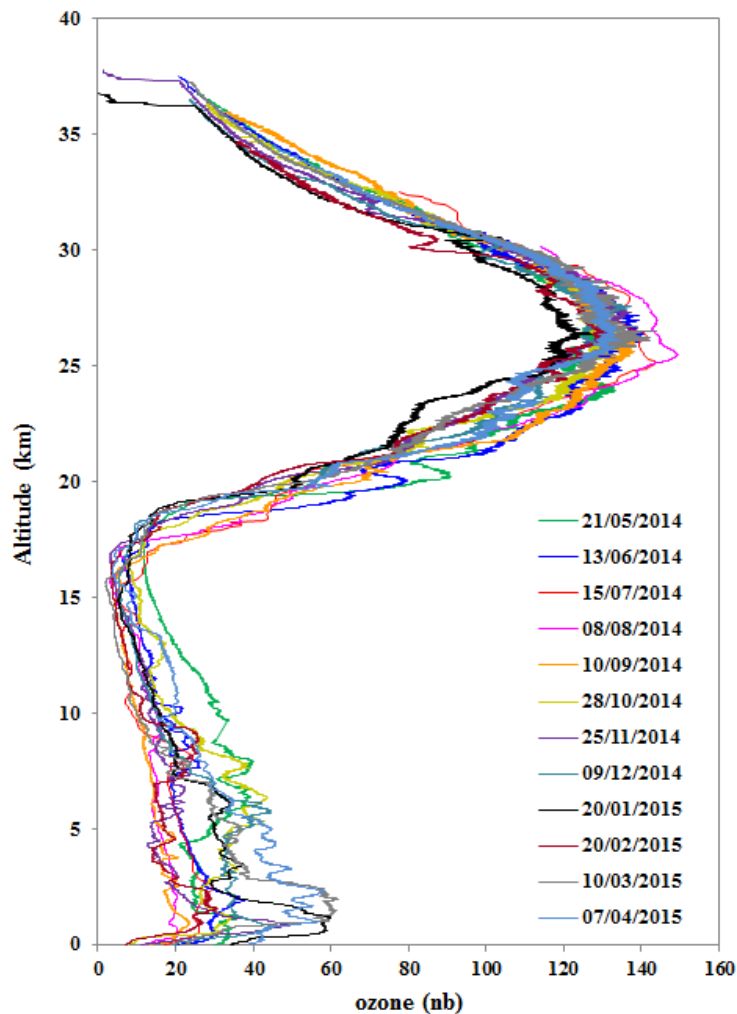
จากนั้นนำข้อมูลปริมาณโอโซนรวมที่ได้จาก ozonesonde มาเปรียบเทียบกับข้อมูลปริมาณโอโซนรวมที่ได้จากการวัดด้วย Dobson spectrophotometer และจากดาวเทียม Aura/OMI ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.43



รูปที่ 3.43 การเปรียบเทียบข้อมูลปริมาณ โอโซนรวมที่ได้จากการวัดด้วย Dobson spectrophotometer ดาวเทียม Aura/OMI และ ozonesonde ที่กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา ระหว่างปี ค.ศ. 2014-2015

จากรูปที่ 3.43 พบว่าข้อมูลส่วนใหญ่มีการแปรค่าตามฤดูกาลสอดคล้องกัน นั่นคือ ปริมาณ โอโซนรวมมีค่าต่ำสุดในช่วงเดือนมกราคม และจะค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้นจนมีค่าสูงสุดในช่วงกลางเดือน มิถุนายน จากนั้นค่าจะลดลงจนถึงค่าต่ำสุดในช่วงปลายปี แต่จากผลการวิเคราะห์ความเข้มข้น โอโซนที่พื้นผิว พบว่าความเข้มข้น โอโซนมีค่าสูงในเดือนธันวาคม-มกราคม (~50 ppbv) และต่ำสุด ในเดือนกรกฎาคม-สิงหาคม (~10 ppbv) ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้ยืนยันว่าปริมาณ โอโซนรวมส่วนใหญ่ไม่ได้เกิดจากผลของความเข้มข้น โอโซนในชั้นโทรโปสเฟียร์ แต่จะถูกควบคุมโดยการ ไหลเวียนของโอโซนทั่วโลกในชั้นสตราโตสเฟียร์ (Brewer-Dobson circulation) เป็นหลัก

สำหรับโปรไฟล์ของโอโซนที่ได้จาก ozonesonde ที่กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา ตั้งแต่เดือน พฤษภาคม 2014-เมษายน 2015 มีทั้งหมด 17 โปรไฟล์ ซึ่งผู้วิจัยจะนำมาวิเคราะห์การกระจายตัวของ โอโซนตามความสูง โดยโปรไฟล์ของโอโซนในแต่ละเดือนแสดงได้ดังรูปที่ 3.44



รูปที่ 3.44 โปรไฟล์ของโอโซนที่ได้จากวัดด้วย ozonesonde ระหว่างเดือนพฤษภาคม 2014-เมษายน 2015 ที่กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา

จากรูปที่ 3.44 จะเห็นว่าปริมาณโอโซนมีการแปรค่าตามความสูง กล่าวคือ โอโซนมีค่าผันผวนในชั้นโทรโพสเฟียร์ตอนล่างและตอนกลาง ส่วนในชั้นโทรโพสเฟียร์ตอนบนมีการแปรค่าเพียงเล็กน้อย และมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากที่โทรโพพอส สำหรับในชั้นสตราโตสเฟียร์ตอนล่างพบว่า ค่าโอโซนจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อพ้นชั้นโทรโพพอส โดยจะมีค่ามากที่สุดที่ระดับความสูงประมาณ 22-28 km เมื่อพ้นความสูงช่วงนี้ไปโอโซนจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว โดยโปรไฟล์ของโอโซนในชั้นนี้ส่วนใหญ่จะมีลักษณะการแปรค่าตามความสูงที่คล้ายคลึงกัน

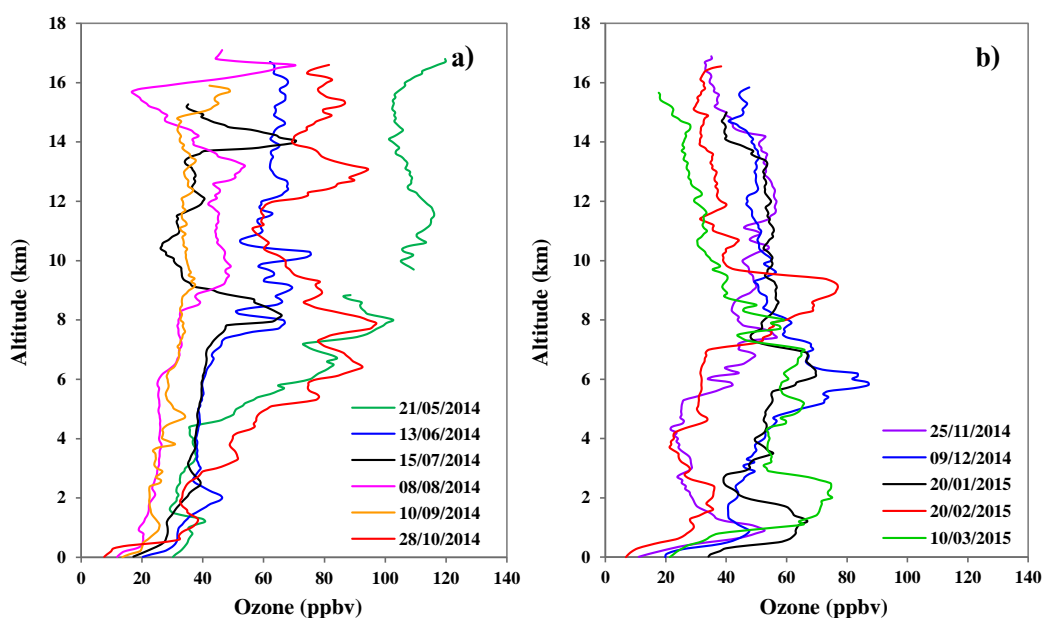
ในงานนี้ ผู้วิจัยจึงแบ่งกรณีศึกษาโปรไฟล์ของโอโซนออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กรณีศึกษาโอโซนในชั้นโทรโพสเฟียร์ และกรณีศึกษาโอโซนในชั้นสตราโตสเฟียร์ ดังนี้

3.4.2 กรณีศึกษาโอโซนในชั้นโทรโพสเฟียร์

โปรไฟล์ของโอโซนที่ผู้วิจัยวัดได้ที่กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา แสดงให้เห็นว่าโอโซนมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่ผันผวนมากในชั้นโทรโพสเฟียร์ โดยการเปลี่ยนแปลงนี้จะขึ้นกับฤดูกาลและเวลาในรอบวัน ดังนี้

3.4.2.1 การแปรค่าตามฤดูกาลของโอโซนในชั้นโทรโพสเฟียร์

ในที่นี้ ผู้วิจัยจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ฤดูกาล ได้แก่ ฤดูฝน (พฤษภาคม-ตุลาคม) และฤดูแล้ง (พฤศจิกายน-เมษายน) ดังรูปที่ 3.45 และ 3.46



รูปที่ 3.45 โปรไฟล์ของโอโซนที่กรมอุตุนิยมวิทยา a) ฤดูฝน (พฤษภาคม-ตุลาคม) และ b) ฤดูแล้ง (พฤศจิกายน-เมษายน)