

การจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองด้วยสเปกโทรสโกปีแบบสั่น



นางสาวสมฤดี สกุธรัตน์

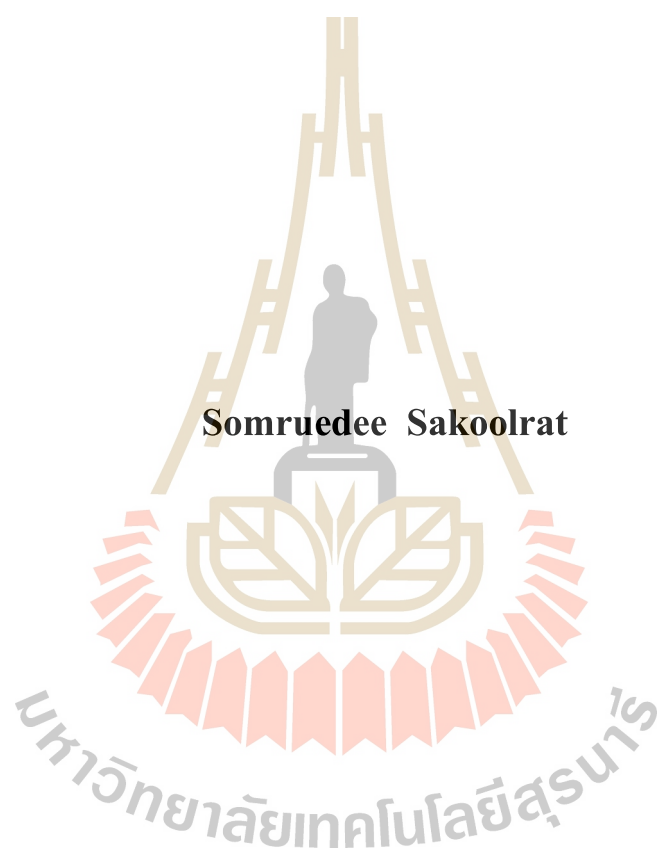
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชามลพิษสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2560

**CHEMICAL CHARACTERIZATION OF PARTICULATE
MATTER BY VIBRATIONAL SPECTROSCOPY**



Somruedee Sakoolrat

**Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science in Environmental Pollution and Safety**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2017

การจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองด้วยสเปกโทรสโกปีแบบสั้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ดร. อมรพล ช่างสุวรรณ)

ประธานกรรมการ



(รองศาสตราจารย์ ดร. นเรศ เชื้อสุวรรณ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รองศาสตราจารย์ ดร. วิสิทธิ์ แจวสูงเนิน)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ศาสตราจารย์ ดร. สันติ แม้นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(อาจารย์ ดร. ชลาลัย หาญเจนลักษณ์)

คณบดีสำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์

สมฤดี สกุลรัตน์ : การจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองด้วยสเปกโทรสโกปีแบบ
สั่น (CHEMICAL CHARACTERIZATION OF PARTICULATE MATTER BY VIBRATIONAL
SPECTROSCOPY) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. นเรศ เชื้อสุวรรณ, 193 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองจากแหล่งกำเนิดด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีแบบสั่น ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี และรามานสเปกโทรสโกปี โดยเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตรด้วย Cascade Impactor ชนิด 8 ชั้น พบว่าฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากเครื่องยนต์เบนซินและดีเซลของยานพาหนะ, การเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร, การเผาไหม้จากกิจกรรมปิ้งย่าง และอนุภาคฝุ่นดิน มีค่าเฉลี่ยผลรวมของฝุ่นละออง 98.48 ± 27.76 , 459.74 ± 90.47 , $1.44 \times 10^5 \pm 1.04 \times 10^4$, $3.85 \times 10^3 \pm 1.90 \times 10^2$ และ $2.63 \times 10^3 \pm 5.86 \times 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ ส่วนฝุ่นละออง จากบรรยากาศทั่วไปและพื้นที่บริเวณริมถนนมีค่าเฉลี่ยผลรวมของฝุ่นละออง 18.87 ± 1.81 และ $53.86 \pm 3.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ การกระจายตัวของฝุ่นละอองแต่ละแหล่งกำเนิดในเทอมของลอกกาลิทึม มี 2 รูปแบบ คือ 1) การกระจายตัวแบบ 3 กลุ่ม (Modes) พบเฉพาะในฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันเบนซินและดีเซล โดยพบการกระจายตัวสูงในช่วงขนาด 9.00-10.00 ไมโครเมตร และ 2) การกระจายตัวแบบ 2 กลุ่ม โดยฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และการเผาไหม้จากกิจกรรมปิ้งย่างพบการกระจายตัวสูงในช่วงขนาด 0.43-0.65 ไมโครเมตร ในขณะที่อนุภาคฝุ่นดิน, บรรยากาศทั่วไป และพื้นที่บริเวณริมถนนพบการกระจายตัวสูงในช่วงขนาด 9.00-10.00 ไมโครเมตร การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองด้วยฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FTIR) ร่วมกับกล้องไมโครสโคป (Hyperion microscope) ด้วยโหมดการวิเคราะห์ ATR-FTIR ที่ Resolution = 4 cm^{-1} ในช่วงเลขคลื่น (Wavenumber) $600-4000 \text{ cm}^{-1}$ ข้อมูลสเปกตรัมที่ได้นำไปเทียบกับสเปกตรัมอ้างอิง (Larkin, 2011; Smith, 1999) พบว่าองค์ประกอบที่พบในฝุ่นละอองแบ่งเป็นกลุ่มของสารอินทรีย์ (อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน, อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน, คาร์บอนิล, และสารอินทรีย์ไนโตรเจน) และไอออนของสารอนินทรีย์ (แอมโมเนียมไอออน, ซัลเฟตไอออน, ซิลิเกตไอออน, และไอน้ำ) ส่วนการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองด้วยฟูเรียทรานส์ฟอร์มรามานสเปกโทรสโกปีพบว่าสเปกตรัมจากการวิเคราะห์มีลักษณะกว้าง (Broad) อันเนื่องมาจากการเกิด Thermal effect จากตัวอย่างฝุ่นละอองที่มีลักษณะทางกายภาพเป็นสีดำ (Bruker Optic GmbH, 2014) ทำให้ไม่สามารถแยกความแตกต่างของแต่ละสเปกตรัมที่เกิดขึ้นได้

สาขาวิชามลพิษสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย
ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา สมฤดี สกุลรัตน์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา [ลายมือ]

SOMRUADEE SAKOOLRAT : CHEMICAL CHARACTERIZATION OF
PARTICULATE MATTER BY VIBRATIONAL SPECTROSCOPY.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. NARES CHUERSUWAN, Ph. D. 193 PP.

VIBRATIONAL SPECTROSCOPY/ ATTENUATED TOTAL REFLECTANCE FORTIER
TRANSFORM INFRARED/ ORGANIC COMPOUND/ INORGANIC IONS

This study investigate the chemical composition of particulate matter (PM) emitted from difference sources with vibrational spectroscopy. The PM samples were collected by 8 stages cascade impactor, cut – off diameter of 0.43 – 10.00 μm . The average PM concentrations emitted from gasoline and diesel engine, agricultural waste burning, grilling, and soil particle were 98.48 ± 27.76 , 459.74 ± 90.47 , $1.44 \times 10^5 \pm 1.04 \times 10^4$, $3.85 \times 10^3 \pm 1.90 \times 10^2$ and $2.63 \times 10^3 \pm 5.86 \times 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. The average PM concentrations from ambient and roadside area were 18.87 ± 1.81 and $53.86 \pm 3.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. The particle size distribution of samples in terms of logarithm had 2 patterns ; Trimodal distribution was found only PM from gasoline and diesel engine, with high distribution at 9.00 – 10.00 μm . Bimodal distribution with high distribution at 0.43 – 0.65 μm , was found in agricultural waste burning and grilling. High distribution in the range of 9.00 – 10.00 μm was found in soil particle and roadside area. Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) coupled with Hyperion microscope and attenuated total reflectance mode at 4 cm^{-1} resolution in wavenumber between 600 and 4000 cm^{-1} were used to analyze chemical composition. The spectra wavenumber was classified compared with reference infrared spectrum (Larkin, 2011; Smith, 1999). The result indicated that the spectra wavenumbers were related to organic


functional group like aliphatic hydrocarbon, aromatic hydrocarbon, carbonyl, and organic nitrogen, and inorganic ions such as ammonium ion, sulfate ion, silicate ion, and water. Analytical of chemical composition of PM with Fourier transform raman spectrometer (FT-Raman) showed broad spectrum resulting from the thermal effect of the black body (Bruker optic GmbH, 2014), unable to distinguish the spectrum.



School of Environmental Pollution and Safety

Academic Year 2017

Student's Signature สมฤดี สกลรัตน์

Advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ให้ความกรุณาแนะนำ สั่งสอน และให้คำปรึกษาทั้งด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัยจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร. นเรศ เชื้อสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้การอบรม ชี้แนะในด้านวิชาการ และให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์ ช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ยังกรุณาให้ข้อคิด และทักษะในการปฏิบัติงาน ตลอดจนอบรมสั่งสอนทั้งการดำเนินชีวิตและการทำงาน อันเป็นประโยชน์ยิ่งต่อผู้วิจัย

ดร. อมรพล ช่างสุพรรณ ประธานกรรมการ และรองศาสตราจารย์ ดร. วิสิทธิ์ แวสูงเนิน กรรมการ ที่ให้ความกรุณาในการเป็นที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำทางวิชาการ และช่วยตรวจทาน แก้ไขเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และบุคลากรที่ให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนแนะนำการใช้เครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการอนามัยสิ่งแวดล้อม และอาชีวอนามัยและความปลอดภัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการยืมอุปกรณ์และเครื่องมือ ตลอดจนการให้ความรู้และคำแนะนำในการใช้งานสำหรับการทำวิจัย

ขอบคุณคณาจารย์, บุคลากร, รุ่นพี่, รุ่นน้อง และเพื่อน ในสาขาวิชามลพิษสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจที่ดีมาโดยตลอด

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่ชายและบุคคลในครอบครัวที่ให้การอุปการะเลี้ยงดู สนับสนุนส่งเสริมการศึกษา รวมถึงทุนการศึกษาในการวิจัยครั้งนี้ และให้กำลังใจเสมอมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

สมฤดี สกุรัตน์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ปรีक्षणวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ฝุ่นละออง (Particulate matter).....	5
2.1.1 ความหมายและคำนิยาม.....	5
2.1.2 ประเภทฝุ่นละออง.....	7
2.1.2.1 ฝุ่นละอองปฐมภูมิ.....	7
2.1.2.2 ฝุ่นละอองทุติยภูมิ.....	7
2.1.3 แหล่งกำเนิดฝุ่นละออง.....	8
2.1.3.1 แหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ (Natural sources)	8
2.1.3.2 แหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Anthropogenic sources)...	9
2.1.4 ลักษณะทางกายภาพ.....	11
2.1.4.1 ขนาดอนุภาค (Particles size)	11
2.1.4.2 การกระจายขนาดอนุภาค (Particles size distribution)	12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.1.5	องค์ประกอบทางเคมี.....	15
2.1.5.1	กลุ่มของซัลเฟต (Sulphur species)	15
2.1.5.2	กลุ่มของไนโตรเจน (Nitrogen species)	15
2.1.5.3	กลุ่มของคาร์บอน (Carbonaceous species)	15
2.1.6	ผลกระทบของฝุ่นละออง.....	16
2.1.6.1	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและภูมิอากาศ.....	16
2.1.6.2	ผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์.....	17
2.1.7	การจำแนกองค์ประกอบทางเคมี.....	19
2.1.7.1	สารอินทรีย์ (Organic speciation)	22
2.1.7.2	ธาตุปริมาณน้อย (Trace elements)	22
2.2	เทคนิคสเปกโทรสโกปี.....	23
2.2.1	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	24
2.2.2	การเกิดอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนกับสาร.....	25
2.2.3	สเปกโทรสโกปีที่อาศัยหลักการดูดกลืนคลื่นแสง.....	25
2.2.4	สเปกโทรสโกปีที่อาศัยหลักการกระเจิงแสง.....	27
2.2.5	สเปกโทรสโกปีที่อาศัยหลักการคายคลื่นแสง.....	28
2.3	การจำแนกลักษณะทางเคมีของฝุ่นละอองโดยเทคนิคสเปกโทรสโกปีแบบสั้น...28	
2.3.1	รูปแบบการสั่นแบบพื้นฐาน.....	29
2.3.1.1	การสั่นแบบยืดหรือหด (Stretching vibration, ν)	29
2.3.1.2	การสั่นแบบงอ (Bending vibration, δ)	29
2.3.2	เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	30
2.3.2.1	หลักการของเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	30
2.3.2.2	กฎการเลือกของอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	31
2.3.3	เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี.....	31
2.3.3.1	หลักการของเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี.....	31
2.3.3.2	การกระเจิงแสงแบบรามาน.....	32
2.3.3.3	กฎการเลือก.....	33

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.4	เครื่องมือทางสเปกโทรสโกปี.....	34
2.3.4.1	เครื่องสเปกโทรมิเตอร์.....	34
2.3.4.2	แหล่งผลิตคลื่นแสงความเข้มสูง.....	36
2.3.4.3	ระบบใส่สารตัวอย่าง.....	36
2.3.4.4	เลนส์และตัวกรองแสง (Lenses and filters).....	37
2.3.4.5	โมนโครเมเตอร์.....	37
2.3.4.6	ตัววัดสัญญาณ.....	37
2.3.5	การวิเคราะห์โดยเทคนิคสเปกโทรสโกปีแบบสั้น.....	38
2.3.5.1	การวิเคราะห์โดยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี.....	38
2.3.5.2	การวิเคราะห์โดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	44
2.4	อินฟราเรดและรามานไมโครสโกปี.....	48
2.4.1	หลักการของ Chemical Imaging.....	49
2.4.2	อินฟราเรดไมโครสโกปี.....	49
2.4.3	รามานไมโครสโกปี.....	50
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	51
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	55
3.1	การเก็บตัวอย่างฝุ่นละออง.....	56
3.1.1	การเตรียมอะคูมินัมฟอยด์.....	57
3.1.2	การเตรียมอุปกรณ์เก็บตัวอย่าง.....	58
3.1.2.1	การทำความสะอาดเครื่องมือเก็บตัวอย่าง.....	58
3.1.2.2	การปรับเทียบอุปกรณ์เก็บตัวอย่างและปั๊ม.....	59
3.1.3	การเตรียม Chamber สำหรับเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเครื่องยนต์.....	60
3.1.3.1	การวัดความเร็วลมของไอเสียที่ถูกปล่อยออกจากปลายท่อ.....	60
3.1.3.2	การคำนวณหาอัตราการไหลของไอเสีย.....	61
3.1.3.3	การทำ Chamber สำหรับเก็บตัวอย่างฝุ่นละออง.....	61
3.1.4	การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองจากแหล่งกำเนิด.....	62

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.4.1	การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะ.....	62
3.1.4.2	การเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร.....	63
3.1.4.3	การเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง.....	64
3.1.4.4	อนุภาคฝุ่นดิน.....	64
3.1.4.5	การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองจากบรรยากาศ.....	65
3.2	การวิเคราะห์เชิงปริมาณ.....	65
3.2.1	การคำนวณหาความเข้มข้นของฝุ่นละออง (Particle concentration)	65
3.2.1.1	การคำนวณหาปริมาตรอากาศ.....	65
3.2.1.2	การคำนวณความเข้มข้นฝุ่นละออง.....	66
3.2.2	การคำนวณหาการกระจายขนาดของฝุ่นละออง (Particle size distribution).....	66
3.3	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองโดยเทคนิคสเปกโทรสโกปีแบบสัน.....	67
3.3.1	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองโดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	71
3.3.2	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองโดยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี.....	69
3.3.3	การระบุองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองด้วยการเทียบกับสเปกตรัมอ้างอิง.....	71
4	ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	75
4.1	ปริมาณฝุ่นละอองและการกระจายตัวของขนาด.....	75
4.1.1	ระดับความเข้มข้นฝุ่นละอองจากแหล่งกำเนิดและบรรยากาศ.....	75
4.1.1.1	การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะ.....	75
4.1.1.2	การเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร.....	77
4.1.1.3	การเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง.....	78
4.1.1.4	อนุภาคฝุ่นดิน.....	79

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.1.5	บรรยากาศทั่วไป.....	80
4.1.1.6	บริเวณริมถนนที่มีการจราจร.....	81
4.1.2	การกระจายขนาดของฝุ่นละออง.....	83
4.1.2.1	การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะ.....	83
4.1.2.2	การเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร.....	84
4.1.2.3	การเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง.....	86
4.1.2.4	อนุภาคฝุ่นดิน.....	87
4.1.2.5	บรรยากาศทั่วไป.....	88
4.1.2.6	บริเวณริมถนนที่มีการจราจร.....	89
4.2	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละออง.....	89
4.2.1	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	89
4.2.1.1	การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะที่มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมันเบนซิน.....	90
4.2.1.2	การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะที่มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมันดีเซล.....	95
4.2.1.3	การเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร.....	100
4.2.1.4	การเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง.....	104
4.2.1.5	อนุภาคฝุ่นดิน.....	109
4.2.1.6	บรรยากาศทั่วไป.....	113
4.2.1.7	บริเวณริมถนนที่มีการจราจร.....	117
4.2.2	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี.....	127
5	บทสรุป.....	129
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	129
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	131
5.2.1	ข้อเสนอแนะสำหรับการใช้ผลงานวิจัย.....	131

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.2	ข้อเสนอในการวิจัยต่อไป.....	131
	รายการอ้างอิง.....	133
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. น้ำหนักฝุ่นละอองจากการเก็บตัวอย่าง.....	142
	ภาคผนวก ข. น้ำหนักฝุ่นละอองจากการเก็บตัวอย่าง.....	158
	ภาคผนวก ค. สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละออง.....	163
	บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	191
	ประวัติผู้เขียน.....	193



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	คำนิยามและความหมายของอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศ.....6
2.2	วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองและกระบวนการเตรียมตัวอย่าง.....20
2.3	ช่วงคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....24
2.4	เทคนิคการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปีที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงาน.....25
2.5	เทคนิคการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปีที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงาน.....26
2.6	เลขคลื่นที่เป็นค่าจำเพาะของสารประกอบเกลืออนินทรีย์.....41
2.7	เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันที่พบในรามานสเปกตรัม.....42
2.8	เลขคลื่นของสารประกอบในฝุ่นละออง.....43
2.9	เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัม.....47
2.10	เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองด้วย FTIR.....48
2.11	เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ และเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มรามานสเปกโตรมิเตอร์.....50
3.1	ขนาดของอนุภาคที่ถูกแยกบนแผ่นรองรับแยกตามชั้น.....57
3.2	เลขคลื่น (Wavenumber, cm^{-1}) ที่เป็นค่าจำเพาะของหมู่ฟังก์ชันที่ใช้เป็นสเปกตรัมอ้างอิง..71
4.1	ค่าสถิติของความเข้มข้นฝุ่นละออง ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันเบนซิน แยกตามขนาดฝุ่นละออง (0.43-10.00 ไมโครเมตร).....76
4.2	ค่าทางสถิติของความเข้มข้นฝุ่นละออง ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซล แยกตามขนาดฝุ่นละออง (0.43-10.00 ไมโครเมตร)77
4.3	ค่าทางสถิติของความเข้มข้นฝุ่นละออง ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) จากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการ เกษตรแยกตามขนาดฝุ่นละออง (0.43-10.00 ไมโครเมตร)78
4.4	ค่าทางสถิติของความเข้มข้นฝุ่นละออง ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) จากกิจกรรมการปิ้งย่างแยกตามขนาด ฝุ่นละออง (0.43-10.00 ไมโครเมตร)79
4.5	ค่าทางสถิติของความเข้มข้นฝุ่นละออง ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) จากอนุภาคฝุ่นดินแยกตามขนาดฝุ่น- ละออง (0.43-10.00 ไมโครเมตร)80
4.6	ค่าทางสถิติของความเข้มข้นฝุ่นละออง ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) จากบรรยากาศทั่วไปแยกตามขนาด ฝุ่นละออง (0.43-10.00 ไมโครเมตร).....81

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.7	ค่าทางสถิติของความเข้มข้นฝุ่นละออง ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) จากบริเวณริมถนนที่มีการจราจรแยกตามขนาดฝุ่นละออง (0.43-10.00 ไมโครเมตร)82
4.8	ค่าเฉลี่ยผลรวมของฝุ่นละอองขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตรแยกตามแหล่งกำเนิด.....82
4.9	สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สโซลีนที่เกิดขึ้นในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตร.....92
4.10	สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซลที่เกิดขึ้นในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตร.....96
4.11	หมู่ฟังก์ชันที่พบในฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สโซลีนและดีเซล.....99
4.12	สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่เกิดขึ้นในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตร.....101
4.13	สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของฝุ่นละอองจากกิจกรรมการปิ้งย่างที่เกิดขึ้นในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตร.....106
4.14	สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของอนุภาคฝุ่นดินที่เกิดขึ้นในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตร.....110
4.15	สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของฝุ่นละอองในบรรยากาศทั่วไปที่เกิดขึ้นในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตร.....114
4.16	สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของฝุ่นละอองจากบริเวณริมถนนที่มีการจราจรที่เกิดขึ้นในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตร.....119
4.17	สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของฝุ่นละอองที่พบในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตร แบ่งตามแหล่งกำเนิด.....122
4.18	เลขคลื่น (Wavenumber, cm^{-1}) ที่เป็นค่าจำเพาะของหมู่ฟังก์ชันจากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของฝุ่นละอองที่ได้จากการศึกษา.....126

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	วัฏจักรของฝุ่นละอองในบรรยากาศ.....5
2.2	การกระจายขนาดของอนุภาคและกลไกการเกิดฝุ่นละออง.....13
2.3	องค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคหยาบและอนุภาคละเอียดบริเวณเขตเมือง.....14
2.4	ขนาดของฝุ่นละออง (เก็บตัวอย่างด้วย Cascade impactor ชนิด 8 ชั้น) ที่เข้าสู่ร่างกายผ่านระบบทางเดินหายใจ.....19
2.5	การเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานของการกระทบ (R), ระดับพลังงานของการสั่น (V) และระดับพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ (E) ของโมเลกุลจากการดูดกลืนคลื่นแสง.....27
2.6	เส้นสเปกตรัมที่เกิดจากการกระเจิงแบบสโตกส์รามาน, แบบเรย์ลี, และแบบแอนติสโตกส์รามาน.....33
2.7	ส่วนประกอบของเครื่องอินฟราเรดและรามานสเปกโตรมิเตอร์.....36
2.8	ส่วนประกอบของสเปกโตรมิเตอร์ระบบไม่กระจายแสง (ฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม).....36
2.9	รามานสเปกตรัมของอนุภาคโซเดียมซัลเฟตในสถานะที่แตกต่างกันคือ (a) หยดของสารละลาย (b) ระหว่างการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวของแข็งและ (c) อนุภาคผลึก.....40
2.10	การสะท้อนในผลึก ATR.....45
3.1	ภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย.....55
3.2	เครื่องมือเก็บตัวอย่างฝุ่นละออง Cascade impactor ที่ใช้ในการศึกษา.....56
3.3	อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตรียมอะลูมิเนียมฟอยด์ (ก) อะลูมิเนียมฟอยด์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 81 มม. (ข) ดับบลิวพลาสติก (ค) grease oil (ง) เครื่องชั่งทศนิยม 5 ตำแหน่ง (จ) ตู้ดูดความชื้น (ฉ) isopropanol.....58
3.4	(ก) เครื่องอัลตราโซนิค (ข) Impaction plate.....59
3.5	อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการปรับเทียบอัตราการไหลของเครื่อง Cascade impactor (ก) บั๊มดูดอากาศ (ข) เครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาตรฐานปฐมภูมิ (ค) แผนภาพการต่ออุปกรณ์สำหรับปรับเทียบอัตราการไหล.....60
3.6	อุปกรณ์สำหรับวัดความเร็วลมปลายท่อ (Air velocity meter)61
3.7	Chamber สำหรับเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองจากท่อไอเสีย.....62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.8	ชุดทดสอบการเผา.....64
3.9	ตะแกรงที่ใช้สำหรับการบึ่งย่าง65
3.10	ฮีส โตรแกรมแสดงการกระจายขนาดของฝุ่นละออง.....67
3.11	เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....68
3.12	ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์.....69
3.13	เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มรามานสเปกโทรมิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....70
3.14	ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ของสารประกอบ คาร์บอนที่ต่างชนิดกัน.....71
4.1	การกระจายขนาดของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันเบนซิน.....84
4.2	การกระจายขนาดของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซล.....84
4.3	การกระจายขนาดของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร.....85
4.4	การกระจายขนาดของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการบึ่งย่าง.....86
4.5	การกระจายขนาดของฝุ่นละอองจากอนุภาคฝุ่นดิน.....87
4.6	การกระจายขนาดของฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไป.....88
4.7	การกระจายขนาดของฝุ่นละอองจากพื้นที่บริเวณริมถนนที่มีการจราจร.....89
4.8	แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซิน (ก) ช่วงขนาดของฝุ่นละออง 2.10-3.30 ไมโครเมตร และ (ข) ช่วงขนาดของ ฝุ่นละออง 0.43-0.65 ไมโครเมตร.....91
4.9	แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซินแยกตาม ขนาดฝุ่นละอองเป็น 8 ช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร)93
4.10	แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซล (ก) ช่วงขนาดของฝุ่นละออง 9.00-10.00 ไมโครเมตร และ (ข) ช่วงขนาดของ ฝุ่นละออง 0.65-1.10 ไมโครเมตร.....95
4.11	แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซลแยกตาม ขนาดฝุ่นละอองเป็น 8 ช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร)97
4.12	แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (ก) ช่วงขนาดของฝุ่นละออง 3.30-4.70 ไมโครเมตร และ (ข) ช่วงขนาดของ

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ฝุ่นละออง 0.65-1.10 ไมโครเมตร.....	100
4.13 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร แยกตามขนาดฝุ่นละอองเป็น 8 ช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร)	102
4.14 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง (ก) ช่วงขนาดของฝุ่นละออง 0.43-0.65 ไมโครเมตร และ(ข) ช่วงขนาดของ ฝุ่นละออง 1.10-2.10 ไมโครเมตร.....	105
4.15 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง แยกตามขนาดฝุ่นละอองเป็น 8 ช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร)	107
4.16 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ที่เกิดจากอนุภาคฝุ่นดิน ช่วงขนาดของฝุ่นละออง 9.00-10.00 ไมโครเมตร.....	109
4.17 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการอนุภาคฝุ่นดินแยกตามขนาด ฝุ่นละอองเป็น 8 ช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร)	111
4.18 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไป (ก) ช่วงขนาดของฝุ่นละออง 5.80-9.00 ไมโครเมตร และ (ข) ช่วงขนาดของ ฝุ่นละออง 0.43-0.65 ไมโครเมตร.....	113
4.19 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไปแยกตามขนาด ฝุ่นละอองเป็น 8 ช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร)	115
4.20 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากบริเวณริมถนนที่มีการจราจร (ก) ช่วงขนาดของฝุ่นละออง 5.80-9.00 ไมโครเมตร และ(ข) ช่วงขนาดของ ฝุ่นละออง 0.43-0.65 ไมโครเมตร.....	117
4.21 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากบริเวณริมถนนที่มีการจราจรแยกตาม ขนาดฝุ่นละอองเป็น 8 ช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร)	120
4.22 แถบรามานสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร.....	128
4.23 (ก) ลักษณะของตัวอย่างที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-Raman (ข) แถบรามานสเปกตรัมที่เกิด Thermal effect.....	128

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ATR	= Attenuated total reflectance
CH ₂	= Methylene
CH ₃	= Methyl
dN	= Particle concentration
Dp	= Particle diameter
IR	= Infrared
PM	= Particulate matter
SiO ₄ ⁴⁻	= Silicate ion
SO ₂	= Sulphur dioxide
SO ₄ ²⁻	= Sulfate ion
FTIR	= ฟิวรีयरานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์
FT-Raman	= ฟิวรีयरานส์ฟอร์มรามานสเปกโทรมิเตอร์
g	= กรัม
L/min	= ลิตรต่อนาที
m/s	= เมตรต่อวินาที
m ²	= ตารางเมตร
m ³ /s	= ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
mW	= มิลลิวัตต์
NH ₄ ⁺	= แอมโมเนียมไอออน
nm	= นาโนเมตร
PM _{2.5}	= ฝุ่นละอองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 2.5 ไมโครเมตร
PM ₁₀	= ฝุ่นละอองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 10 ไมโครเมตร
µm	= ไมโครเมตร
µg/m ³	= ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ฝุ่นละอองหรืออนุภาคมลสาร (Particulate matter; PM) เป็นอนุภาคของแข็งหรือของเหลวที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศ มีแหล่งกำเนิดทั้งจากธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ ฝุ่นละอองที่แขวนลอยอาจถูกกำจัดออกจากบรรยากาศด้วยการตกลงสู่พื้นผิวโลกด้วยแรงโน้มถ่วง (Dry deposition) หรือถูกชะลงมากับฝน หิมะ หรือลูกเห็บ (Pöschl, 2005)

ฝุ่นละอองที่แขวนลอยในบรรยากาศเป็นปัญหามลพิษทางอากาศที่สำคัญของเมืองใหญ่ จากรายงานของกรมควบคุมมลพิษ (2556) พบว่าฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมโครเมตร (PM_{10}) เป็นปัญหาในบางพื้นที่ในประเทศไทย การที่มีฝุ่นละอองจำนวนมากในบรรยากาศก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดลอมและสุขภาพอนามัยของมนุษย์ นอกจากนี้ ฝุ่นละอองที่แขวนลอยในบรรยากาศมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะภูมิอากาศ เนื่องจากฝุ่นละอองมีความสามารถในการดูดกลืน (Absorb) และกระเจิง (Scatter) แสงจากดวงอาทิตย์ในบรรยากาศ (Ramanathan, Crutzen, Keihl, and Rosenfeld, 2001) ทำให้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวโลกมีค่าลดลง (Tai, Mickley, and Jacob, 2010) ส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวโลกลดลง ในขณะที่ชั้นบรรยากาศมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ฝุ่นละอองที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศยังส่งผลให้ทัศนวิสัยในการมองเห็น (visibility) ผ่านอากาศลดลง บดบังการมองเห็น (Liacos, Kam, Delfino Schauer and Sioutas, 2012; Steven, James, Sverre and Michael, 2009) และจากการศึกษาทางระบาดวิทยาพบว่า อาการของโรคทางเดินหายใจมีความสัมพันธ์กับปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก โดยพบว่าค่าเฉลี่ยของจำนวนผู้ป่วยที่เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลในช่วงที่ระดับฝุ่นเกินมาตรฐานมีค่ามากกว่าจำนวนผู้ป่วยในช่วงวันที่ระดับฝุ่นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (Langkulsen, Jinsart, Karita and Yano, 2006a; Langkulsen, Jinsart, Karita and Yano, 2006b; World Health Organization, 2013) ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมโครเมตร เมื่อเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจอาจก่อให้เกิดการระคายเคืองและอาจทำลายเนื้อเยื่อของอวัยวะได้ เพิ่มโอกาสในการเกิดโรคเกี่ยวกับทางเดินหายใจและหลอดเลือด ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร อาจเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนล่างได้ ทั้งนี้ การเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจขึ้นอยู่กับขนาด ความหนาแน่น และองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละออง (วนิดา จินศาสตร์, 2551)

องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองเป็นตัวบ่งชี้แหล่งกำเนิดของฝุ่นละออง โดยแหล่งกำเนิดแต่ละประเภทมีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน แหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ เช่น การผุกร่อนของดินหรือ

หิน ฝุ่นควันจากการปะทุของภูเขาไฟ ฟ้าผ่า และแหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งจากยานพาหนะและโรงงานอุตสาหกรรม การทำเหมืองแร่ เหมืองหิน และการเผาไหม้ชีวมวล ซึ่งการเลือกใช้เทคนิคในการการจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่ต้องการวิเคราะห์ Solomon and Sioutas. (2008) ได้แบ่งองค์ประกอบหลักของอนุภาคฝุ่นละอองออกเป็น 4 กลุ่มคือ 1) อนุภาคประจุบวก เช่น แอมโมเนียม โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียมและ แมกนีเซียม, 2) อนุภาคประจุลบ เช่น ซัลเฟต ไนเตรต คลอไรด์, 3) สารประกอบประเภทคาร์บอน และ 4) ธาตุปริมาณน้อย เทคนิคที่ใช้อย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละออง (Solomon, Fraser, and Herckes, 2011) ได้แก่ Ion chromatography, X-ray fluorescence, Inductively coupled plasma mass spectrometry, และ Gas chromatography mass spectrometry นอกจากนี้ เทคนิคด้านสเปกโทรสโกปียังนำมาใช้เพื่อศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละออง (Signorell and Reid, 2011) เช่น Infrared spectroscopy, Raman spectroscopy และ UV-Visible spectroscopy โดยเป็นการศึกษาคุณสมบัติของอนุภาคในการดูดกลืนหรือสะท้อนคลื่นแสงที่มีค่าเฉพาะ เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละออง

เทคนิคสเปกโทรสโกปีแบบสั่น (Vibrational spectroscopy) เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการวิเคราะห์โดยการวัดการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดที่ทำให้เกิดการแทรกซึมของการสั่นของโมเลกุล แบ่งออกเป็น 2 เทคนิค คือ 1) อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (IR) และ 2) รามานสเปกโทรสโกปี (Raman) ซึ่งทั้งสองเทคนิคมีความสามารถในการจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละออง (Allen et al., 1994; Coury and Dillner, 2008; Schweiger, 1999; and Escribano, Sloan, Siddique, Szw and Dudev, 2001) โดยแสดงผลออกมาในรูปแบบสเปกตรัมที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้ม (Intensity) และเลขคลื่น (Wavenumber, cm^{-1}) ซึ่งสามารถใช้ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพทั้งสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และสารชีวโมเลกุล

ฟูเรียรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) เป็นระบบสเปกโทรมิเตอร์แบบไม่กระจายแสง (Fourier Transform) โดยมีการใช้งานร่วมกับกล้องไมโครสโคป เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ตัวอย่างฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็ก ซึ่งมีแหล่งกำเนิดแสงคือแสงอินฟราเรดย่านกลาง (MIR) ในการวิเคราะห์ใช้โหมด MIR-ATR (Attenuated Total Reflectance) ซึ่งใช้หลักการสะท้อนของคลื่นแสงเมื่อตกกระทบกับโมเลกุล และให้ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพในรูปแบบของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของฝุ่นละออง (Coury and Dillner, 2008; Anil, Golcuk, and Karaca, 2014)

ฟูเรียรานส์ฟอร์มรามานเรดสเปกโทรสโกปี (FT-Raman) เป็นการวัดการกระเจิงของคลื่นแสงหลังจากชนกับโมเลกุลที่กำลังสั่นและหมุนอยู่ ซึ่งการชนกันของคลื่นแสงและโมเลกุลเป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) ได้คลื่นแสงที่กระเจิงหลังจากการชนเรียกว่า การกระเจิงแบบ

รามาน (Raman scattering) สามารถประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันสูตร โครงสร้างโมเลกุล และพันธะเคมีของฝุ่นละอองได้ (Harpale, Ralegankar, Jadhav, and Dhole., 2006)

การวิเคราะห์หาล่องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีแบบสั่น มีข้อดีคือไม่ทำลาย ตัวอย่างขณะวิเคราะห์ (Non-destructive) สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างฝุ่นละอองที่อยู่บนกระดาษกรอง ได้โดยตรง ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างไม่ยุ่งยาก และยังสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบอินทรีย์ สารประกอบอนินทรีย์ และสารชีวโมเลกุล ที่อยู่ในรูปของของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส จัดเป็นวิธีวิเคราะห์ที่สะดวกและรวดเร็ว ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ทดสอบทั่วไป แต่ในประเทศไทยการนำมาใช้งานด้านนี้ยังไม่แพร่หลาย ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาการหา องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองจากแหล่งกำเนิดและในบรรยากาศด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีแบบสั่น ผลการวิเคราะห์ที่ได้นำมาเทียบกับสเปกตรัมอ้างอิง (Larkin, 2011; Smith, 1999) เพื่อ จำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละออง และแสดงข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ในรูปของเลข คลื่นที่เกี่ยวข้องกับหมู่ฟังก์ชันที่พบในตัวอย่างฝุ่นละออง

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ศึกษาระดับความเข้มข้นและการกระจายขนาดของฝุ่นละอองที่ถูกปล่อยออกมาจาก แหล่งกำเนิดและในบรรยากาศ

1.2.2 จำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีแบบสั่น

1.2.3 ประเมินความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองจากแหล่งกำเนิดและจาก บรรยากาศทั่วไปด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีแบบสั่น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เก็บตัวอย่างฝุ่นละอองแบบแยกขนาดด้วยเครื่องเก็บตัวอย่าง Andersen Cascade Impactor ชนิด 8 ชั้น (stage) ร่วมกับปั๊มดูดอากาศที่อัตราการไหล 28.3 ลิตรต่อนาที ใช้อะลูมิเนียมฟอยด์ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 81 มิลลิเมตรที่เคลือบด้วย grease oil เป็นวัสดุในการดักจับฝุ่นละออง ซึ่งน้ำหนัก อะลูมิเนียมฟอยด์ก่อนและหลังเก็บตัวอย่างเพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นและกระจาย ขนาดของฝุ่นละออง

1.3.2 ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีแบบสั่นในการจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองจาก แหล่งกำเนิดที่แตกต่างกันคือ 1) ฝุ่นละอองที่เก็บตัวอย่างจากแหล่งกำเนิดโดยตรง ได้แก่ การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะที่ใช้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมันเบนซินและดีเซล, การเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร, การเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง และอนุภาคฝุ่นดิน และ 2) การเก็บ ตัวอย่างจากบรรยากาศทั่วไป

1.3.3 นำตัวอย่างฝุ่นละอองที่ถูกดักจับบนอะลูมิเนียมฟอยล์มาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์และเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มรามานสเปกโตรมิเตอร์ ผลการวิเคราะห์ที่ได้ในรูปแบบสเปกตรัมที่แสดงเลขคลื่น (Wavenumber, cm^{-1}) ของแถบสเปกตรัม และนำเลขคลื่นที่ได้จากการวิเคราะห์เทียบกับสเปกตรัมอ้างอิง (Larkin, 2011; Smith, 1999) เพื่อระบุองค์ประกอบที่สำคัญของฝุ่นละออง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละอองและการกระจายขนาดของฝุ่นละอองที่ถูกปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกัน

1.4.2 ทราบองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองที่แสดงผลในรูปแบบของห่อฟังก์ชัน ก็ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีแบบสั้น

1.4.3 ทราบองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละออง (ในรูปแบบฟังก์ชัน) ของแหล่งกำเนิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์ดีเซล, การเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร, การเผาไหม้ที่มาจากกิจกรรมการปิ้งย่าง และอนุภาคฝุ่นดิน ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่ใช้ในการระบุแหล่งกำเนิดของฝุ่นละออง

1.4.4 ทำให้ทราบความสามารถ (Application) ในการใช้งานของเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์และเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มรามานสเปกโตรมิเตอร์ในการนำมาประยุกต์ประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ทางเคมี โดยเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพเพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองที่อยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในฝุ่นละออง

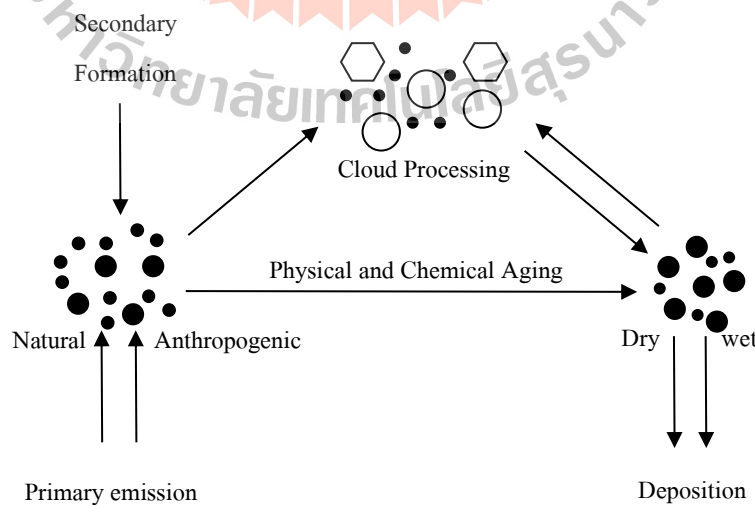
บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฝุ่นละออง (Particulate matter)

2.1.1 ความหมายและคำนิยาม

ฝุ่นละออง (Particulate matter; PM) เป็นอนุภาคของแข็ง (เช่น เขม่าควันจากท่อไอเสียรถยนต์, ฝุ่นละออง) หรือของเหลว (เช่น ไอของกรดหรือสารเคมี, ละอองไอของสารกำจัดศัตรูพืช) ที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.001-100 ไมโครเมตร (Kulkarni, Baron, and Willeke, 2011) มีแหล่งกำเนิดทั้งจากธรรมชาติ (Natural sources) และกิจกรรมของมนุษย์ (Anthropogenic sources) อาจแบ่งออกตามลักษณะการเกิดเป็น 2 ลักษณะคือ 1) ฝุ่นละอองปฐมภูมิ (Primary particle) เป็นฝุ่นละอองที่ถูกปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดโดยตรงและ 2) ฝุ่นละอองทุติยภูมิ (Secondary particle) เป็นฝุ่นละอองที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีในบรรยากาศของสารตั้งต้น (Precursor) เกิดเป็นฝุ่นละอองทุติยภูมิที่มีคุณสมบัติแตกต่างไปจากเดิม ฝุ่นละอองปฐมภูมิและฝุ่นละอองทุติยภูมิสามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีหรือทางกายภาพและเกิดการเปลี่ยนแปลงในบรรยากาศทำให้ขนาด, โครงสร้าง, และองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม และตกลงสู่พื้นด้วยแรงดึงดูดของโลก (Dry deposition) หรือถูกชะลงมากับฝน (Wet deposition) ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 วัฏจักรของฝุ่นละอองในบรรยากาศ (Pöschl, 2005)

ฝุ่นละอองที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศโดยทั่วไปมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 100 ไมโครเมตร (จำแนกจากการเก็บตัวอย่างด้วยเครื่องมือ) ซึ่งฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่อาจแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศได้ในชวงนาที่ แต่ฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กอาจแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศได้นานและเคลื่อนที่ได้ไกลกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งช่วงเวลาที่อนุภาคแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศ (Life times) อาจกินเวลาเป็นชั่วโมงถึงสัปดาห์ (Williams, Reus, Krejci, Fischer, and Ström, 2002). Kulkarni et al. (2011) ได้ให้คำนิยามและความหมายทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คำนิยามและความหมายของอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศ

(Kulkarni et al., 2011)

อนุภาคที่แขวนลอยใน บรรยากาศ	คำจำกัดความ
ละอองลอยชีวภาพ (Bioaerosol)	ละอองที่มีแหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ เช่น ไวรัส, แบคทีเรีย, สปอร์ของแบคทีเรียหรือเชื้อรา, และละอองเกสรดอกไม้
เมฆ (Cloud)	อนุภาคที่มีความหนาแน่น แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศและสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า
หมอก (Fog or Mist)	อนุภาคของเหลวที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศ สามารถเปลี่ยนรูปโดยการควบแน่นของไอหรือแก๊สบางชนิดในภาวะอิ่มตัวยิ่งยวดเป็นของเหลวในรูปละอองไอลึก ๆ
ไอควัน หรือฟุ้ง (Fume)	อนุภาคที่เกิดจากการควบแน่นของไอและรวมตัวในภายหลังโดยทั่วไปมีขนาดเล็กกว่า 0.05 ไมโครเมตร ฟุ้งมักจะเกิดจากกระบวนการเผาไหม้หรือกระบวนการอื่น ๆ ที่มีอุณหภูมิสูง
เมฆหมอก (Haze)	อนุภาคขนาดเล็กที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า เป็นอนุภาคที่ทำให้การมองเห็นในบรรยากาศลดลง
อนุภาค (Particulate)	อนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศ เช่น ฝุ่นละออง
หมอกควัน (Smog)	ละอองลอยที่เกิดจากการรวมตัวของอนุภาคของแข็งและของเหลวขนาดเล็ก เป็นสภาวะที่ใช้เรียกการเกิดร่วมกันระหว่าง Smoke และ
ควัน (Smoke)	Fog ละอองของของแข็งหรือของเหลว เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง หรือเกิดจากการกลั่นตัวของไอระเหยในภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด

ตารางที่ 2.1 คำนิยามและความหมายของอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศ (ต่อ)

(Kulkarni et al., 2011)

อนุภาคที่แขวนลอยใน บรรยากาศ	คำจำกัดความ
ละอองของเหลว (Spray)	หยดของละอองลอยที่เกิดจากกระบวนการที่ทำให้ของเหลวแตกตัว เป็นละอองเล็ก ๆ

2.1.2 ประเภทฝุ่นละออง จำแนกตามแหล่งกำเนิดแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

2.1.2.1 ฝุ่นละอองปฐมภูมิ (Primary particles) เป็นฝุ่นละอองที่ถูกปล่อยออกสู่อากาศโดยตรงจากแหล่งกำเนิดไม่ถูกเปลี่ยนรูปโดยปฏิกิริยาเคมี และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมี หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออยู่ในบรรยากาศ ได้แก่

1) ฝุ่นละอองจากดิน (Soil dust) เป็นส่วนของละอองในบรรยากาศที่ถูกปลดปล่อยจากภาคพื้นดิน เกิดจากกระแสลมที่พัดพาผิวดินขึ้นไปในบรรยากาศ

2) ฝุ่นละอองจากอุตสาหกรรม (Industrial dust) เช่น ฝุ่นละอองที่เกิดจากกระบวนการผลิตจากเหมืองแร่ เหมืองหิน หรือฝุ่นจากโรงงานผลิตปูนซีเมนต์

3) ฝุ่นละอองจากทะเลและมหาสมุทร (Sea salt particles) เกิดจากการแตกตัวของฟองคลื่นตามบริเวณชายฝั่ง และบริเวณที่มีกระแสน้ำและคลื่นลมแรง

2.1.2.2 ฝุ่นละอองทุติยภูมิ (Secondary particles) เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้น (Precursor) ที่ถูกปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดในสถานะแก๊สหรือไอของสารระเหย และถูกเปลี่ยนรูปในบรรยากาศโดยปฏิกิริยาทางเคมีและฟิสิกส์ไปอยู่ในรูปของอนุภาค (Gas-to-particles conversion) สารตั้งต้นหลักของฝุ่นละอองลอยในบรรยากาศอาทิ

1) แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide, SO_2) มีแหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการปะทุของภูเขาไฟ โดยการปะทุดังกล่าวจะพ่นสารประกอบซัลเฟอร์ในรูปของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ซึ่งแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นสารตั้งต้นของละอองซัลเฟตในบรรยากาศ

2) ไดมethylซัลไฟด์ (Dimethylsulfide, DMS) ทะเลและมหาสมุทรเป็นแหล่งกำเนิดหลักของซัลเฟอร์ในบรรยากาศ เกิดขึ้นมากในทะเล (Marine boundary) และฟรีโทรโปสเฟียร์ (Free troposphere) มีปริมาณมากขึ้นอยู่กับฤดูกาล และวัฏจักรการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตในทะเลและความเร็วจากการเคลื่อนย้ายจากทะเลสู่อากาศ เมื่อถูกปลดปล่อยสู่อากาศส่วนใหญ่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดเป็น ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl sulfoxide, DMSO) และไดเมทิลซัลโฟน (Dimethylsulfone, DMSO_2) โดยมีสารตั้งต้นคือไดเมทิลซัลไฟด์ และได้ผลผลิตเป็นละออง

ในบรรยากาศคือ กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และมีเทนซัลโฟเนต (Methanesulfonate, MSA) ปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีคืออนุมูล

3) ออกไซด์ของไนโตรเจนและแอมโมเนีย โดยออกไซด์ของไนโตรเจนเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ หรือเครื่องจักร เช่น ไนตริกออกไซด์ (NO), ไนตริสออกไซด์ (N_2O) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ซึ่งออกไซด์ของไนโตรเจนที่อยู่ในบรรยากาศมีความสำคัญต่อองค์ประกอบทางเคมีของบรรยากาศ จากความสามารถที่รวมตัวกับออกซิเจนได้ และเป็นสารตั้งต้นของละอองกรดไนตริก มีส่วนในปฏิกิริยาทางเคมี เป็นสารตั้งต้นของการเกิดแก๊สโอโซนในโทรโพสเฟียร์ ส่วนแหล่งกำเนิดหลักที่ปลดปล่อยแอมโมเนีย คือ การปลดปล่อยจากการเดินการแพร่ของแก๊สแอมโมเนียของปุ๋ยในดิน และของเสียจากสัตว์ เป็นต้น

4) คาร์บอนอินทรีย์และผงฝุ่นเขม่าดำ (Organic carbon and Black carbon) มีแหล่งที่มาจากการเผาไหม้ทั้งจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuel burning), การเผาไหม้เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์, การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง (ไม้ ฟืน และถ่าน) และการเผาไหม้เศษวัสดุชีวมวล (Biomass burning) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคคาร์บอนที่มีขนาดเล็กระหว่างการเผาไหม้ การเกิดฝุ่นละอองขึ้นอยู่กับสถานะในขณะเผาไหม้ เช่น อนุมูล ชนิกของเชื้อเพลิง และประสิทธิภาพการเผาไหม้

5) สารอินทรีย์ระเหย (Volatile organic compound, VOC) ถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศจากกิจกรรมของมนุษย์และธรรมชาติ สารอินทรีย์ระเหยอยู่ในสถานะแก๊สและสามารถเปลี่ยนรูปในบรรยากาศไปอยู่ในสถานะที่เป็นอนุภาคได้ คือสารไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 6 อะตอม ฝุ่นละอองลอยในบรรยากาศที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ระเหย เรียกว่า ละอองลอยอินทรีย์ทุติยภูมิ (Secondary organic aerosol, SOA)

2.1.3 แหล่งกำเนิดฝุ่นละออง

2.1.3.1 แหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ (Natural sources) แหล่งกำเนิดที่เกิดจากธรรมชาติแบ่งเป็น 5 ประเภทหลักคือ (Calvo et al., 2013)

1) ฝุ่นแร่ (Mineral dust) เป็นอนุภาคปฐมภูมิที่เกิดจากการผุกร่อนของดิน หินแร่ หรือส่วนของผิวเปลือกโลก (Crustal fraction) เกิดจากอิทธิพลของลมเป็นส่วนใหญ่ ทำให้เกิดเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่กระจายไปตามกระแสลม อนุภาคมีรูปร่างไม่แน่นอน (Irregular shape) มีขนาดอยู่ในช่วง 1-100 ไมโครเมตร แหล่งกำเนิดส่วนใหญ่มาจากพื้นที่กึ่งแห้งแล้ง (Semi-arid surfaces) รวมทั้งพื้นที่ทะเลทราย, ทะเลสาบแห้ง (Dry lake) โดยทั่วไปอนุภาคฝุ่นแร่จะเกิดจากแคลไซต์, ควอตซ์, โดโลไมต์, เกลอไลต์, อิลไลต์, เฟลด์สปาร์ และอนุภาคขนาดเล็กของแคลเซียมซัลเฟต และเหล็กออกไซด์ (Klaver et al., 2011) ฝุ่นละอองประเภทนี้กลายเป็นแกนกลางในการกลั่นตัว (Condensation nuclei) ของไอน้ำในบรรยากาศ ทำให้เกิดการก่อตัวของเมฆและฝนได้

2) ฝุ่นเกลือจากละอองน้ำทะเล (Sea spray aerosols) เป็นอนุภาคของเกลือ (Sea salt aerosol) จากการแตกฟองของน้ำทะเลบริเวณผิวเกิดเป็นอนุภาคของเกลือ จัดเป็นฝุ่นละอองชนิดหยาบ (Coarse aerosol) (อนุภาคมีขนาด 2.5-10 ไมโครเมตร) เกิดจากกระบวนการทางชีววิทยา ทางเคมี หรืออิทธิพลของลม โดยทั่วไปองค์ประกอบของละอองจากน้ำทะเลจะเป็นเกลือโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งสามารถดูดกลืนและคายความชื้นได้ นอกจากนี้ผิวหน้าของทะเลและมหาสมุทรจะพบแพลงก์ตอนพืช (Phytoplankton) ซึ่งสามารถปลดปล่อยสารประกอบอินทรีย์บางชนิด เช่น ไดเมทิลซัลไฟด์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของการเกิดซัลเฟตในบรรยากาศบริเวณมหาสมุทร (Mészáros, 1999; Yang, Zhang, Zhou, and Yang, 2011)

3) ละอองอินทรีย์ (Biogenic emission) มีแหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ โดยพืชหรือจุลินทรีย์บางชนิดสามารถปลดปล่อยละอองลอยชนิดปฐมภูมิและทุติยภูมิได้ ละอองลอยชีวภาพปฐมภูมิ (Primary biogenic aerosols) จะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศโดยตรง เช่น เกสรของพืช สปอร์ของเฟิร์นและเชื้อรา รวมไปถึงอนุภาคอื่นๆ ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 100 ไมโครเมตร ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรจะเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กที่มาจากพืช สัตว์ แบคทีเรีย และไวรัส เป็นต้น (Pöschl, 2005)

4) การปะทุของภูเขาไฟ (Volcanic eruptions) ทำให้เกิดการแพร่กระจายของแก๊สเรือนกระจกคือ ซัลเฟอร์ และฝุ่นละออง ซึ่งส่งผลกระทบต่อภูมิอากาศและทำให้เกิดฝนกรด การปะทุของภูเขาไฟทำให้เกิดอนุภาคปฐมภูมิและอนุภาคทุติยภูมิ จากการศึกษาของ Thomas, Watson, Kearney, Carn, and Murray (2009) พบว่าอนุภาคทุติยภูมิของซัลเฟตเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีอยู่ในบรรยากาศจำนวนมากระหว่างการปะทุของภูเขาไฟ

5) การเกิดฟ้าแลบ/ฟ้าผ่า (Lightning) เป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญของไนตริกออกไซด์ (NO) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดอนุภาคทุติยภูมิของไนเตรต (Schumann and Huntrieser, 2007)

2.1.3.2 แหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Anthropogenic sources) เป็นแหล่งกำเนิดที่มาจากการทำงานของมนุษย์ หรือกิจกรรมที่มนุษย์เข้ามาเกี่ยวข้อง คือ (วนิดา จินศาสตร์, 2551)

1) แหล่งกำเนิดที่เคลื่อนที่ได้ (Mobile sources or line sources) ได้แก่ ยานยนต์ รวมถึงการจราจรและการคมนาคมขนส่ง ซึ่งปล่อยไอเสียจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง รวมถึงฝุ่นดิน/ทรายบนถนนที่ฟุ้งกระจายในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ เช่น

- ยานพาหนะทางบก ได้แก่ รถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซล โดยฝุ่นละอองที่ถูกระบายออกมาจะอยู่ในรูปควันดำ เป็นอนุภาคของคาร์บอนจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของน้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ และรถจักรยานยนต์สองจังหวะ ระบายฝุ่นละอองออกมาในรูปของควันขาวที่เป็นละอองไอของน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งอนุภาคฝุ่นละอองมีขนาดและองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่าง

กันขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องยนต์ โดยจากการศึกษาของ Kittelson (1998) พบว่าฝุ่นละอองที่ถูกปล่อยออกมาจากยานพาหนะของเครื่องยนต์ดีเซลมีค่าสูงกว่าการปล่อยจากเครื่องยนต์เบนซิน ประมาณ 10-100 เท่า

- การบรรทุกและขนส่งวัสดุในการก่อสร้าง และกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างทุกชนิด เช่น การบรรทุกและขนส่งดิน หิน ที่ไม่มีการปกคลุมส่วนที่บรรทุกให้มิดชิด

การจราจรบนถนนโดยเฉพาะในเขตเมือง เป็นแหล่งกำเนิดหลักของฝุ่นละอองปฐมภูมิและทุติยภูมิที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ ฝุ่นละอองที่ถูกปลดปล่อยออกมามีความแตกต่างกันทั้งขนาดและองค์ประกอบทางเคมี ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องยนต์และปัจจัยอื่น ๆ นอกจากนี้ ยังพบว่าการจราจรในเขตเมืองยังเป็นแหล่งที่มาของไนโตรเจนออกไซด์อีกด้วย

2) แหล่งกำเนิดอยู่กับที่ (Stationary sources or point sources) ได้แก่การหุงต้มจากครัวเรือน การเผาไหม้เชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม โรงไฟฟ้า และสถานประกอบการ เช่น

- การก่อสร้างหรือการรื้อถอนอาคารและสิ่งปลูกสร้าง เช่น การก่อสร้างอาคาร บ้านเรือน การทำถนน ระบบขนส่งมวลชนตลอดจนระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ การก่อสร้างหลายประเภทมักมีการเปิดหน้าดิน ซึ่งทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่นดินและทราย รวมไปถึงการฟุ้งกระจายของฝุ่นจากปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการก่อสร้างด้วย

- โรงงานอุตสาหกรรม, โรงไฟฟ้า และสถานประกอบการ ซึ่งจะทำให้เกิดฝุ่นละอองหรือแก๊สจากสองขั้นตอน คือการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น น้ำมันเตา, ถ่านหิน และฟืน เพื่อนำพลังงานไปใช้ในกระบวนการผลิต หากเกิดการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์หรือกำจัดอย่างไม่ถูกวิธี จะก่อให้เกิดแก๊สและฝุ่นละอองลอยออกสู่บรรยากาศ เช่น เถ้าลอย (Fly ash) จากโรงไฟฟ้า เป็นต้น กระบวนการผลิต เช่น การผลิตเซรามิก อิฐและปูน โรงหล่อ การทำเหมืองแร่และเหมืองหิน ซึ่งมีขั้นตอนการขุดเจาะหรือการระเบิด การขนส่ง การบดขยี้ การแยกแร่ และการทำให้แห้ง แต่ละขั้นตอนจะทำให้เกิดฝุ่นละอองฟุ้งกระจายในบรรยากาศ

3) แหล่งกำเนิดแบบพื้นที่ (Area sources) หมายถึง แหล่งกำเนิดที่พิจารณาในรูปของพื้นที่ มาจากจุดพิคัดขนาดเล็กเช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากชีวมวลทางการเกษตร เพื่อปรับพื้นที่เพาะปลูกในที่กลางแจ้ง การเผาขยะ เกิดเขม่าและจีเถ้าฟุ้งกระจายไปในอากาศ พบว่าสารอินทรีย์และสารคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักของอนุภาคฝุ่นละอองที่ถูกปลดปล่อยจากการเผาไหม้ไม้ ปริมาณสารอินทรีย์และคาร์บอนจะแปรผันตามประเภทของแหล่งกำเนิด ระยะเวลาของการเผาไหม้ รวมทั้งชนิดของเชื้อเพลิง (Steven, 1985)

โดยทั่วไปฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์จะประกอบด้วยเขม่าที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และสามารถเกิดปฏิกิริยาในบรรยากาศเปลี่ยนจากแก๊สไปเป็นอนุภาคได้ ซึ่งฝุ่นละอองประเภทนี้ไม่เป็น

แกนกลางในการกลั่นตัวที่ดี จึงมักไม่เหนียวนำไปเกิดฝนตก แต่จะดูตกคืนรังสีจากดวงอาทิตย์ ทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจกได้ (Kock, Bond, Streets, Unger, and Van Der Werf, 2007; Quinn et al., 2008)

2.1.4 ลักษณะทางกายภาพ

ฝุ่นละอองที่กระจายตัวอยู่ในบรรยากาศมีแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกัน ทำให้มีคุณสมบัติแตกต่างกันทั้งขนาด รูปร่าง โครงสร้าง ความหนาแน่น องค์ประกอบทางเคมี และการเกาะตัวกัน (Cohesiveness) นอกจากนี้ กระบวนการที่เกิดในบรรยากาศยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปของอนุภาค ฝุ่นละออง ทำให้เกิดความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ฝุ่นละอองที่ฟุ้งกระจายในบรรยากาศสามารถเคลื่อนที่จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้โดยอาศัยลมพัดพาไป ดังนั้น สภาพลักษณะภูมิประเทศ ภูมิอากาศและสภาพทางอุตุนิยมวิทยาจึงเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนย้ายหรือแพร่กระจายของฝุ่นละออง

โดยทั่วไปคุณสมบัติและลักษณะทางกายภาพของอนุภาคฝุ่นละอองที่นิยามวัด คือ ความเข้มข้นเชิงมวล (Mass concentration), จำนวนอนุภาค (Number concentration), ขนาดของอนุภาค (Particles size) และการกระจายขนาดของอนุภาค (Particles size distribution) โดยทั่วไปฝุ่นละอองจะมีขนาดแตกต่างกันกระจายอยู่ในบรรยากาศ

2.1.4.1 ขนาดอนุภาค (Particles size)

ขนาดของอนุภาคหมายถึงเส้นผ่าศูนย์กลาง (Diameter) อนุภาค โดยคุณสมบัติของอนุภาคจะขึ้นกับขนาดของอนุภาค อนุภาคที่เป็นของแข็งมักอยู่ในรูปร่างที่ซับซ้อน และมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม โดยรอบและลักษณะของอนุภาค การกำหนดขนาดมักจะอนุมานว่าอนุภาคมีรูปร่างเป็นทรงกลม และกำหนดขนาดของอนุภาคตามความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลม หน่วยเป็นไมโครเมตร (10^{-6} เมตร) แต่โดยทั่วไปอนุภาคมีรูปร่างหลายลักษณะนอกจากทรงกลม ดังนั้นอนุภาคที่ไม่เป็นทรงกลมมักบอกขนาดที่เป็น Equivalent Diameter โดยเทียบกับ Projected Area พื้นที่ผิว ปริมาตร มวล เป็นต้น นอกจากนี้อาจบอกลักษณะของขนาดอนุภาคที่วัดภายใต้กล้องจุลทรรศน์ได้ดังนี้

1) Martin's Diameter เป็นความกว้างของอนุภาคในแนวขนานกับ Microscope scan ซึ่งแบ่งครึ่งอนุภาคให้มีขนาดเท่ากัน

2) Feret's Diameter เป็นความยาวระหว่างเส้นสัมผัส 2 เส้นบนด้านตรงกันข้ามของอนุภาค ซึ่งตั้งฉากกับ Microscope scan

3) Equivalent Diameter เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมที่มีพื้นที่เท่ากับ Projected Area ของอนุภาค

4) Aerodynamic Diameter เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลมที่มีความหนาแน่น 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีความเร็วตกในอากาศ (Setting velocity) เท่ากับของอนุภาค ค่า

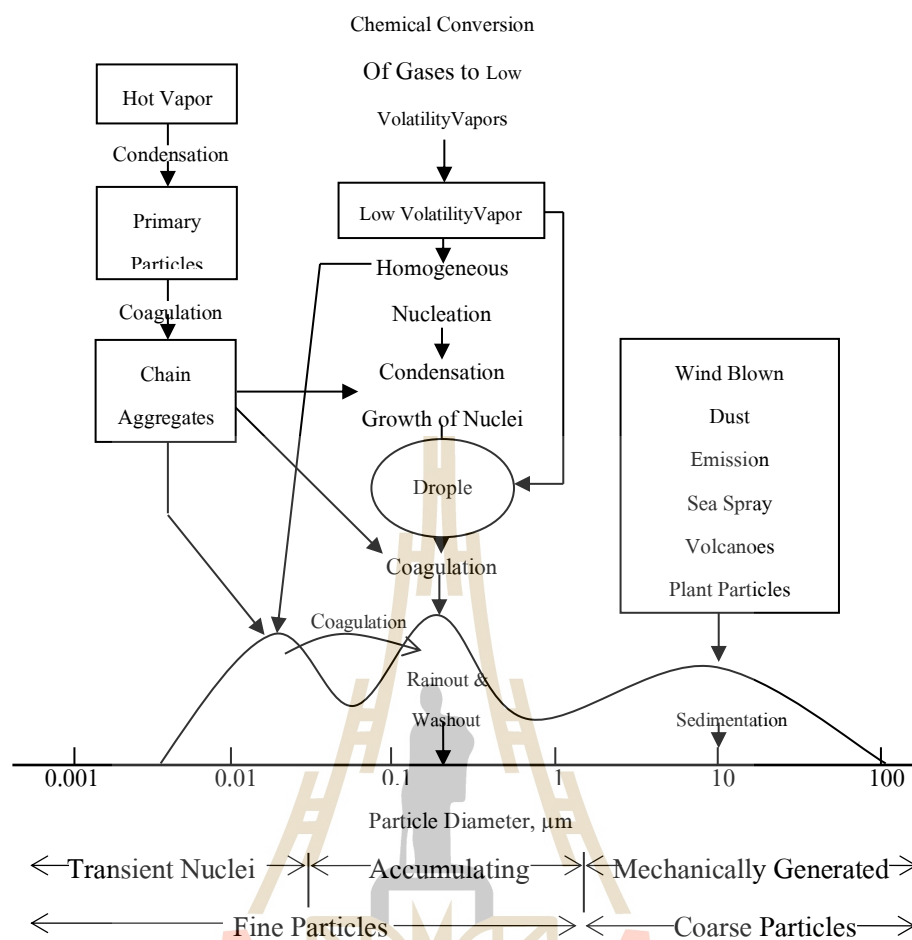
Aerodynamic Diameter ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค รูปร่าง และความหนาแน่นของอนุภาค

Aerodynamic Diameter หาได้จากเครื่องมือเก็บตัวอย่างฝุ่นด้วยแรงเฉื่อย เช่น Cascade Impactor ขนาดของอนุภาคที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคในของไหลนั้นมักใช้ค่า Aerodynamic Diameter

2.1.4.2 การกระจายขนาดอนุภาค (Particles size distribution)

ฝุ่นละอองที่เกิดจากกระบวนการหรือกิจกรรมต่าง ๆ หรือที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมักประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดต่างกัน ค่าที่ใช้บอกลักษณะของการกระจายขนาดของอนุภาคได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่ามัธยฐาน (Median) และค่าฐานนิยม (Mode) วิธีการแสดงการกระจายของขนาดอนุภาคคือฮิสโตแกรม (Histogram) ระหว่างความถี่กับช่วงขนาดของอนุภาค หรืออาจแสดงในรูปของกราฟแจกแจงความถี่ (Frequency distribution curve) กราฟแจกแจงความถี่แสดงปริมาณของอนุภาคอาจจะเป็นมวล (Mass) หรือจำนวน (Number) ของอนุภาคในแต่ละช่วงขนาดของอนุภาค

ฝุ่นละอองที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศมีอนุภาคขนาดต่างกัน (ภาพที่ 2.2) การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของฝุ่นละอองมักเปลี่ยนแปลงตามขนาดอนุภาค ฝุ่นละอองที่มีสัดส่วนมากคือฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร โดยทั่วไปมักเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น อนุภาคประเภทซัลเฟต จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศ และอนุภาคฝุ่นจากไอเสียของยานพาหนะ ส่วนฝุ่นละอองที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่า 2 ไมโครเมตรส่วนใหญ่มีแหล่งกำเนิดมาจากธรรมชาติ (Committee on medical effects of air pollution; COMEAP, 1998)



ภาพที่ 2.2 การกระจายขนาดของอนุภาคและกลไกการเกิดฝุ่นละออง

(Committee on medical effects of air pollution [COMEAP], 1998)

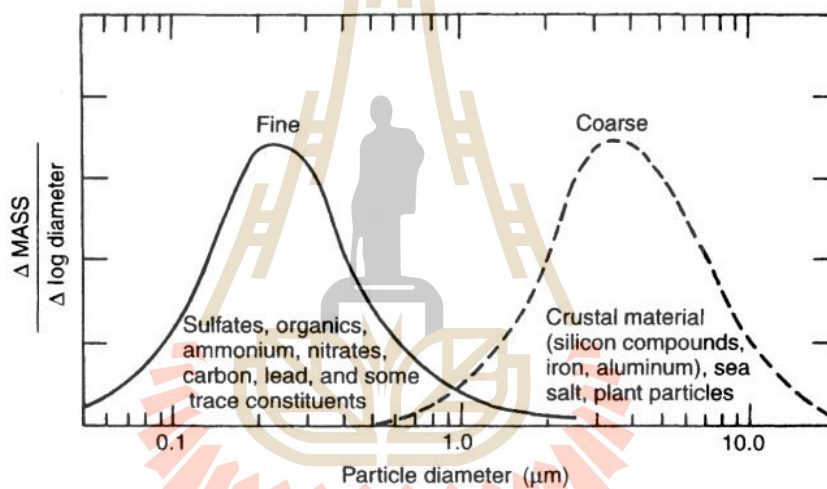
โดยทั่วไปการกระจายตัวของฝุ่นละอองในบรรยากาศมี 2 ช่วง คือ อนุภาคส่วนหยาบ (Coarse fraction particles) และอนุภาคส่วนละเอียด (Fine fraction particles) ซึ่งอนุภาคแต่ละส่วนจะมีแหล่งกำเนิด องค์ประกอบทางเคมี และพฤติกรรมในบรรยากาศที่แตกต่างกัน (วนิดา จีน ศาสตร์, 2551)

อนุภาคส่วนหยาบ (Coarse fraction particles) คืออนุภาคที่มีขนาดระหว่าง 2.5-10 ไมโครเมตร ส่วนใหญ่เกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคจากแหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ เช่น อนุภาคของฝุ่นดิน (Windblown soil dust) โดยทั่วไปมาจากเปลือกโลก การสึกกร่อนของหินหรือดินโดยการพัดพาของลม บางส่วนเกิดจากกระบวนการเชิงกล (Mechanical process) เช่น การบด การโม่ การรื้อถอนทำลาย การทำให้เป็นผงจากการก่อสร้าง หรือการระเบิดหิน

อนุภาคส่วนละเอียด (Fine fraction particle) คือ อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร ประกอบด้วยอนุภาคส่วนละเอียดปฐมภูมิ และอนุภาคส่วนละเอียดทุติยภูมิ ผสมกันอยู่

เกิดขึ้นในบรรยากาศเมื่อแก๊สต่าง ๆ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ และ สารประกอบอินทรีย์ระเหยที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงถูกเปลี่ยนรูปโดยปฏิกิริยาทางฟิสิกส์และเคมีเปลี่ยนสถานะจากแก๊สไปอยู่ในรูปอนุภาค

องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของอเมริกา (U.S. Environmental Protection Agency) (1982) ได้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและการกระจายของอนุภาคส่วนหยาบ และอนุภาคส่วนละเอียด พบว่าส่วนใหญ่อนุภาคส่วนหยาบมีองค์ประกอบเป็นผลึกออกไซด์ของโลหะ เช่น เหล็ก อะลูมิเนียม ซิลิกอน แมงกานีส และสังกะสี ส่วนอนุภาคส่วนละเอียดส่วนใหญ่ประกอบด้วยอนุภาคทุติยภูมิ ของซัลเฟต ไนเตรต แอมโมเนียม และธาตุปริมาณน้อย เช่น ตะกั่ว เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคหยาบและอนุภาคละเอียดบริเวณเขตเมือง (U.S. Environmental Protection Agency, 1982)

2.1.5 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองมีหลายชนิด แตกต่างกันไปตามชนิดของแหล่งกำเนิดช่วงเวลา สภาพอากาศ และขนาดของอนุภาค (Pöschl, 2005) ซึ่งมีผลต่อการแพร่กระจายของฝุ่นละออง ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงทั้งรูปร่าง โครงสร้าง ขนาด และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้นตลอดเวลา ส่งผลต่อการแพร่กระจายและการตกสู่พื้นดินของฝุ่นละออง องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองส่วนใหญ่ประกอบด้วย (Calvo et al., 2013)

2.1.5.1 กลุ่มของซัลเฟต (Sulphur species)

ซัลเฟตที่พบในบรรยากาศส่วนใหญ่เป็นอนุภาคทุติยภูมิ (Secondary particles) ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารตั้งต้นที่เป็นแก๊ส (เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และไดเมทิลซัลไฟด์ ($\text{CH}_3)_2\text{S}$) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีแหล่งกำเนิดทั้งจากธรรมชาติ เช่น การปะทุของภูเขาไฟ ซึ่งปลดปล่อยกำมะถันในรูปของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และจากกิจกรรมของมนุษย์ที่มีสัดส่วนถึง 70% ของการปลดปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั่วโลก (Whelpdale, Dorling, Hicks, and Summers, 1996) เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล การเผาไหม้ชีวมวล การเผาไหม้ของเสียทางการเกษตร กระบวนการผลิตกระดาษ รวมไปถึงการออกซิไดซ์ของกรดซัลฟูริกในบรรยากาศ

2.1.5.2 กลุ่มของไนโตรเจน (Nitrogen species)

อนุภาคในกลุ่มไนโตรเจนในบรรยากาศส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ ไนเตรต (NO_3^-) และแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) การเกิดอนุภาคไนเตรตเกิดจากการเปลี่ยนรูปโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารตั้งต้น เช่น ไนตริกออกไซด์ (NO), ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2), ไนตริกออกไซด์ (N_2O), แอมโมเนีย (NH_3) และกรดไนตริก (Mészáros, 1999) กิจกรรมของมนุษย์ที่ปลดปล่อยสารตั้งต้นในการเกิดไนเตรต เช่น กระบวนการเผาไหม้ที่ใช้แก๊ส, น้ำมันเตา และถ่านหิน เป็นเชื้อเพลิง รวมถึงการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูง เช่น ยานพาหนะ และ โรงไฟฟ้า นอกจากนี้ กิจกรรมทางการเกษตร เช่น การใช้ปุ๋ยเคมีในการปรับปรุงคุณภาพดินทำให้เกิดแก๊สแอมโมเนียปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ (McCubbin, Apelberg, Roe, and Divita, 2002)

สารประกอบไนโตรเจนที่มีแหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ เช่น การปลดปล่อยจากดินผ่านปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน การเกิดฟ้าผ่า (ไนตริกออกไซด์ และไนโตรเจนไดออกไซด์) เป็นต้น

2.1.5.3 กลุ่มของคาร์บอน (Carbonaceous species)

อนุภาคฝุ่นละอองที่ประกอบด้วยคาร์บอน ส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ซึ่งคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบในฝุ่นละอองแบ่งเป็น 3 กลุ่มคือ

1) สารประกอบคาร์บอเนต เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) มักพบในรูปอนุภาคขนาดเล็กที่กระจายจากพื้นดิน และแขวนลอยในบรรยากาศ

2) ธาตุคาร์บอน (Elemental carbon; EC หรือ Black carbon; BC) อนุภาคของธาตุคาร์บอนมีเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.01-0.1 ไมโครเมตร เกิดจากการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคคาร์บอนขนาดเล็กระหว่างการเผาไหม้ เช่น การหุงต้มที่ใช้ฟืน การเผาไหม้ชีวมวล และการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซล เป็นต้น และยังเป็นสารประกอบที่ใช้ติดตามตรวจสอบ (Tracer) ฝุ่นละอองที่มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซล (Fruin, Winer, and Rodas, 2004) ส่วนฝุ่นดินและฝุ่นจากละอองของน้ำทะเลมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเพียงเล็กน้อย

3) คาร์บอนอินทรีย์ (Organic carbon; OC) สารคาร์บอนอินทรีย์ที่พบในฝุ่นละออง เป็นสารประกอบของคาร์บอนมากกว่า 20 อะตอม ส่วนใหญ่ที่พบในบรรยากาศเกิดจากการเผาไหม้ ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบอินทรีย์ และสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ฝุ่นจากถนนเกิดจาก ปฏิกิริยาโฟโตเคมีคอล การปลดปล่อยจากแบคทีเรียบางชนิด และซากพืชหรือซากสัตว์ เป็นต้น

2.1.6 ผลกระทบของฝุ่นละออง

2.1.6.1 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและภูมิอากาศ

ฝุ่นละอองในบรรยากาศเป็นปัญหามลพิษทางอากาศที่สำคัญของเมืองใหญ่หลาย เมืองในประเทศไทย เนื่องจากฝุ่นละอองในบรรยากาศมีทั้งที่อยู่ในสถานะของแข็งและของเหลว สามารถดูดซับ (Absorb) และหักเหแสง (Scatter) ได้ การมีฝุ่นละอองจำนวนมากในบรรยากาศจะ บดบังทัศนวิสัยในการมองเห็น (Visibility) ไม่สามารถมองเห็นวัตถุในระยะทางไกลได้ เป็น อุปสรรคต่อการมองเห็นและเป็นอันตรายต่อการสัญจร ทั้งนี้ ความรุนแรงของปัญหาขึ้นอยู่กับขนาด ความหนาแน่น และองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละออง

จากการศึกษาของ Liacos et al. (2012) พบว่าฝุ่นขนาดเล็กในบรรยากาศของเมือง ลอสแอนเจลิส เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ความสามารถในการมองเห็นลดลง เช่นเดียวกับการ ศึกษาวิจัยของ Steven et al. (2009) ที่พบว่าฝุ่นขนาดเล็กในบรรยากาศเป็นสาเหตุหลักของทัศนวิสัย ที่ลดลงในเขตเมืองเดนเวอร์ประเทศสหรัฐอเมริกา

ฝุ่นละอองที่ตกลงมานอกจากจะทำให้เกิดความสกปรกแก่อาคาร บ้านเรือนและ สิ่งก่อสร้างแล้วยังทำให้เกิดการกัดกร่อนผิวหน้าของโลหะ หินอ่อนหรือวัตถุอื่น ๆ เช่น รั้วเหล็ก หลังคาสังกะสี และรูปปั้น เป็นต้น ในประเทศไทยพบว่าความรุนแรงของปัญหาโดยทั่วไปจะ ปรากฏชัดเจนในช่วงหน้าหนาวถึงหน้าแล้ง (ธันวาคม-เมษายน) ของทุกปีที่มีสภาวะอากาศที่แห้ง และนิ่ง ทำให้ฝุ่นละอองที่ถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิดแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศได้นาน และสำหรับ ปีที่มีฝนตกน้อย หรือเกิดภาวะแห้งแล้งการชะล้างฝุ่นละอองที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศจะเกิดขึ้น ได้น้อย (ธิดารัตน์ ผลพิบูลย์, อิศริยัฐิกา ชัยสวัสดิ์ และอนุวัตร รุ่งพิสุทธิพงษ์, 2557)

สารอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon) ที่เป็นส่วนประกอบของฝุ่นละอองจากการ เผาไหม้ชีวมวลจะกระเจิงรังสีดวงอาทิตย์ได้ถึง 90 % ส่งผลให้อุณหภูมิของบรรยากาศลดลง ส่วน ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ในเครื่องจักรของโรงงานอุตสาหกรรม และยานยนต์ส่วนใหญ่จะเป็นผง ฝุ่นเขม่าดำ (Black carbon) ซึ่งดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ได้ถึง 50 % ส่งผลให้อุณหภูมิของบรรยากาศ เพิ่มขึ้น และทำให้อุณหภูมิของพื้นผิวโลกลดลง ดังนั้น ฝุ่นละอองในบรรยากาศส่งผลต่อการ เปลี่ยนแปลงของระบบบรรยากาศทั้งด้านบวกและลบ (Hansen, Sato, and Ruedy, 1997; Ramanathan and Ramana, 2005)

2.1.6.2 ผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์

ฝุ่นละอองสามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ซึ่งอันตรายของฝุ่นละอองจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการผ่านเข้าไปยังทางเดินหายใจ ฝุ่นขนาดเล็กจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพมากกว่าฝุ่นรวม เนื่องจากสามารถผ่านเข้าไปในระบบทางเดินหายใจส่วนล่าง และมีผลต่อสุขภาพมากกว่าฝุ่นรวม US.EPA (1996) จึงได้มีการกำหนดมาตรฐานฝุ่นขนาดเล็ก 2 ชนิดคือ PM_{10} และ $PM_{2.5}$

จากรายงานการศึกษาของกรมควบคุมมลพิษพบว่า ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมโครเมตร (PM_{10}) เป็นหนึ่งในห้าของสารมลพิษหลักทางอากาศของประเทศไทย (กรมควบคุมมลพิษ, 2556) ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนในพื้นที่ที่มีปัญหาฝุ่นละออง ซึ่งฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมโครเมตร เมื่อเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ จะก่อให้เกิดการระคายเคืองและอาจทำลายเนื้อเยื่อของอวัยวะนั้น ๆ เช่น เนื้อเยื่อปอด ซึ่งหากได้รับในปริมาณมากหรือการได้รับเป็นระยะเวลานานจะสามารถสะสมในเนื้อเยื่อปอด เกิดเป็นพังผืดหรือแผลขึ้นได้ และทำให้การทำงานของปอดเสื่อมประสิทธิภาพลงทำให้หลอดลมอักเสบ เกิดหอบหืด ถุงลมโป่งพอง และโอกาสเกิดโรคเกี่ยวกับทางเดินหายใจเพิ่มมากขึ้น โดยเส้นทางของฝุ่นละอองขนาดเล็กที่เข้าสู่ทางเดินหายใจนั้นขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่างและความหนาแน่น รวมถึงลักษณะของลมหายใจร่วมด้วย (วนิดา จินศาสตร์, 2551) สิทธิชัย พิมลศรีและภักดี อารินทร์ (2553) ศึกษาปัญหาฝุ่นละอองในบรรยากาศและผลกระทบต่อสุขภาพประชาชนในจังหวัดลำปาง โดยพบว่าปัญหาฝุ่นละอองจะมีมากที่สุดในช่วงฤดูร้อน ซึ่งมีจำนวนวันของค่าเฉลี่ยรายวันที่ความเข้มข้นของ PM_{10} เกินมาตรฐานถึงร้อยละ 14-30 และพบว่าค่าเฉลี่ยจำนวนผู้ป่วยที่เข้ารับการรักษาในช่วงที่ระดับฝุ่นเกินมาตรฐานรายวันมีมากกว่าจำนวนผู้ป่วยในช่วงวันที่ระดับฝุ่นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานรายวันถึงร้อยละ 39

Langkulsen et al. (2006a) และ Langkulsen et al. (2006b) ศึกษาทางระบาดวิทยาสิ่งแวดล้อมด้วยแบบสอบถามและการตรวจวัดสมรรถภาพปอดของประชาชนในกรุงเทพมหานคร พบว่าอาการของโรกระบบทางเดินหายใจมีความสัมพันธ์กับปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM_{10} ในอากาศบริเวณริมถนนที่มีการจราจรคับคั่ง และจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติตามช่วงเวลา (Time series analysis) ในปี พ.ศ. 2545-2547 ของข้อมูลผู้ป่วยที่เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลรามาริบัติ และโรงพยาบาลศิริราช พบว่าความชุกของการเกิดโรกระบบหลอดเลือดหัวใจสัมพันธ์กับระดับฝุ่น PM_{10} ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะจำนวนผู้ป่วยที่เข้ารับการรักษาด้วยอาการของโรกระบบหลอดเลือดหัวใจที่เป็นผู้สูงอายุมีจำนวนเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.7-2.3 และผู้ป่วยด้วยอาการกล้ามเนื้อหัวใจตายเนื่องจากหลอดเลือดอุดตัน เพิ่มขึ้นร้อยละ 3.65 เมื่อ PM_{10} เพิ่มขึ้น $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$

ปกติมลพิษอากาศรวมถึงฝุ่นละอองขนาดเล็กจะเข้าสู่ร่างกายผ่านการหายใจ โดยระบบทางเดินหายใจ เช่น ขนจมูก ไม่สามารถกรองฝุ่นละอองขนาดเล็กได้ทำให้ผ่านเข้าสู่ระบบ

ทางเดินหายใจส่วนลึก ระบบทางเดินหายใจจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนบนคือ ช่องจมูกและหลอดลม และระบบทางเดินหายใจส่วนล่างคือ ท่อปอด (Bronchial tubes) และปอด ฟุ้งที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมโครเมตรจะถูกกรองโดยระบบทางเดินหายใจส่วนบน ส่วนฟุ้งที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร หรือที่เรียกว่า ฟุ้งที่หายใจเข้าไป (Respiration particulate matter) จะรอดจากการกรองเข้าไปถึงปอดได้ (วนิดา จินศาสตร์, 2551) ส่วนฟุ้งที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร จะเข้าไปถึงถุงลมปอดได้ (ภาพที่ 2.4) ฟุ้งละอองขนาดเล็กเหล่านี้ทำให้เกิดการระคายเคืองและมีผลต่ออาการและโรคทางเดินหายใจถ้าองค์ประกอบในฟุ้งเป็นโลหะหนัก ซิลิกา แอสเบสตอส หรือสารก่อมะเร็ง นอกจากนี้ พอลิเอโรเมติกส์ไฮโดรคาร์บอนบางชนิดทำให้เป็นโรคปอดชนิดต่าง ๆ รวมทั้งมะเร็งปอดได้ ทั้งนี้โรคเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจที่เกิดจากฟุ้งละอองขนาดเล็กประกอบด้วย

1) โรคหลอดลมปอดอุดกั้นเรื้อรัง (Chronic obstructive pulmonary disease, COPD) หมายถึง กลุ่มของโรคปอดซึ่งมีความผิดปกติที่สำคัญคือ มีการอุดกั้นของหลอดลมเนื่องจากโรคหลอดลมอักเสบเรื้อรัง และโรคถุงลมโป่งพอง ทำให้ผู้ป่วยขับลมออกจากปอดได้ช้ากว่าปกติหรือไม่สามารถขับลมออกจากปอดจากความจุของปอดทั้งหมดภายในเวลาที่กำหนด

2) โรคหลอดลมอักเสบเรื้อรัง (Chronic bronchitis) เป็นคำนิยามทางคลินิก หมายถึงผู้ป่วยที่มีอาการไอและมีเสมหะเรื้อรัง โดยมีอาการเป็นๆ หายๆ ปีละอย่างน้อย 3 เดือน และผู้ป่วยจะมี อาการในลักษณะนี้เป็นระยะเวลาติดต่อกันประมาณ 2 ปี หรือมากกว่านั้นโดยไม่มีสาเหตุอื่น เช่น วัณ-โรค ส่วนใหญ่เกิดจากการสูบบุหรี่ หรือได้รับควันบุหรี่ (Passive smoke) และยังสามารถเกิดได้จากการได้รับฟุ้งละอองอีกด้วย

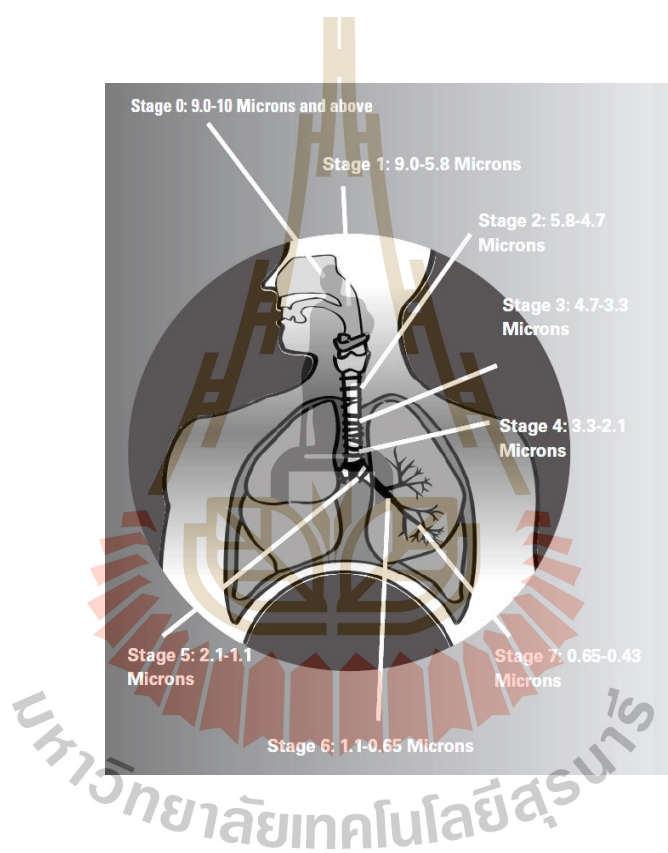
3) โรคถุงลมโป่งพอง (Emphysema) เป็นคำนิยามทางพยาธิวิทยา หมายถึง การโป่งพองของถุงลม ซึ่งมีการทำลายของผนังถุงลมร่วมด้วย ทำให้เกิดความผิดปกติขณะมีการแลกเปลี่ยนแก๊ส และการที่ถุงลมเกิดการขยายใหญ่ขึ้นจนไปกดหลอดลมขนาดเล็ก ซึ่งผู้ที่สูบบุหรี่อยู่ในกลุ่มเสี่ยงต่อการเป็นโรคนี้นี้

4) โรคปอดอักเสบ (Interspatial lung disease) ฟุ้งและมลพิษในอากาศโดยเฉพาะสถานที่ทำงานหลายแห่งมีผลทำให้เกิดการอักเสบของเนื้อเยื่อปอดแล้วกลายเป็นพังผืด เป็นโรคปอดเรื้อรังแบบชนิด Chronic restrictive lung disease โรคที่สำคัญได้แก่ Pneumoconiosis โรคปอดหิน ที่เกิดจากการได้รับฟุ้งแร่ โรค Asbestosis เนื่องจากได้รับฟุ้งแอสเบสตอส เกิดได้กับคนงานที่ทำงานในเหมืองแอสเบสตอส และแอสเบสตอสที่หลุดออกมาจากฉนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดาน และโรค Coal worker's pneumoconiosis จากการได้รับฟุ้งถ่านหิน

5) โรคหอบหืด (Asthma) คือภาวะผิดปกติที่หลอดลมแคบเล็กลง และกลับสู่ภาวะปกติในเวลาอันสั้น โดยการกำเนิดของโรคเองหรือโดยการรักษา ลักษณะอาการที่เด่นชัดของโรคหอบหืดคือ หลอดลมจะไวต่อสิ่งกระตุ้นมากกว่าหลอดลมของคนปกติ โดยสิ่งกระตุ้นไม่ได้เป็นสิ่ง

ที่จำเพาะเจาะจงต่อผู้ป่วยคนใดคนหนึ่ง ผู้ที่มีหลอดลมไวต่อสิ่งกระตุ้นจะมีหลอดลมแคบเล็ก ภายหลังจากการได้รับสิ่งกระตุ้น เช่น อากาศเย็นและแห้ง

6) การอักเสบของถุงลมปอด (Alveolar inflammation) เป็นการคั่งค้างของฝุ่นละอองขนาดเล็กมาก เกิดจากความล้มเหลวของเม็ดเลือดขาวที่จะจับและทำลายฝุ่นละอองขนาดเล็ก ฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กและไวต่อปฏิกิริยาทางเคมีจะทำให้เกิดการอักเสบของถุงลมปอดจากการกระตุ้นของฝุ่นละอองขนาดเล็ก กระบวนการอักเสบของปอดพบได้จากการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนในพลาสมาที่จะกลายเป็นไฟบรินและมีจำนวนเม็ดเลือดขาวเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.4 ขนาดของฝุ่นละออง (เก็บตัวอย่างด้วย Cascade impactor ชนิด 8 ชั้น) ที่เข้าสู่ร่างกายผ่านระบบทางเดินหายใจ (Thermo scientific, 2010)

2.1.7 การจำแนกองค์ประกอบทางเคมี

ฝุ่นละอองที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศมีความซับซ้อนทั้งในเชิงองค์ประกอบทางเคมี การกระจายตัว และการเปลี่ยนรูป อันเนื่องมาจากฝุ่นละอองมีการเคลื่อนที่และเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองจะทำให้สามารถระบุแหล่งกำเนิดของฝุ่นละอองได้ เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองจะแตกต่างกันไปตามชนิดของแหล่งกำเนิด ช่วงเวลา สภาพอากาศ และขนาดของอนุภาค (Pöschl, 2005)

การเลือกใช้เทคนิคในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคฝุ่นละอองจะขึ้นอยู่กับประเภทขององค์ประกอบที่ต้องการวิเคราะห์ โดยทั่วไปองค์ประกอบหลักของอนุภาคฝุ่นละอองจะประกอบด้วยประจุลบ (ซัลเฟต, ไนเตรต และคลอไรด์) ประจุบวก (แอมโมเนียม, โซเดียม, โพแทสเซียม, แคลเซียม และแมกนีเซียม) สารประกอบคาร์บอน (คาร์บอนอินทรีย์ และธาตุคาร์บอน) และธาตุปริมาณน้อย (Solomon and Sioutas, 2008) ซึ่งแต่ละเทคนิคจะมีวิธีการเตรียมตัวอย่างและวิธีวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองและกระบวนการเตรียมตัวอย่าง

(Kulkarni et al, 2011)

ประเภทขององค์ประกอบ	วิธีวิเคราะห์	กระบวนการเตรียมตัวอย่าง	อ้างอิง
อนุภาคประจุบวกและประจุลบ	Ion chromatography	การสกัดด้วยน้ำหรือตัวทำละลาย	Mulik and Sawicki, 1979 USEPA, 1999b
	Ion selective electrode	การสกัดด้วยน้ำ	Lodge, 1989
	X-ray fluorescence	-	Chow, 1995
	Colorimetry	การสกัดด้วยน้ำ	Lodge, 1989
	Fourier transform infrared spectroscopy	-	Allen et al, 1994
สารประกอบคาร์บอน (OC, EC, CC, TC, BC, WSOC) ¹	Thermal optical reflectance (TOR)	อบ กระ ด ว ย ก ร อ ง ค ว อ ต ซ์ ที่ อุณหภูมิสูงกว่า 1,173 K เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	Chow, Watson, Crow, Lowenthal and Merrifield, 2001
	Sunset laboratory continuous carbon analyzer	-	Chow et al, 2001
	Aethalometer	-	Hanse, Rosen and Novakov, 1984
สารประกอบคาร์บอน (OC, EC, CC, TC, BC, WSOC) ¹	Photoacoustic spectroscopy (PAS)	-	Arnott, Moosmuller, Rogers, Jin and Bruch, 1999, 2000

ตารางที่ 2.2 วิธีวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองและกระบวนการเตรียมตัวอย่าง
(Kulkarni et al, 2011) (ต่อ)

ประเภทของ องค์ประกอบ	วิธีวิเคราะห์	กระบวนการเตรียม ตัวอย่าง	อ้างอิง
ธาตุปริมาณน้อย	X-ray fluorescence	-	Watson, Chow and Frazier, 1999 ; Yanca et al, 2006
	Inductively coupled plasma- mass spectrometry (ICP-MS)	การสกัดด้วยน้ำหรือ สารละลายกรด	Nelms, 2005; Geagea, Stille, Gauthier-Lafaye and millet, 2008
	Inductively coupled plasma- atomic emission spectroscopy (ICP-AES)	การสกัดด้วยน้ำหรือ สารละลายกรด	Karar, Gupta, Kumar and Biswas, 2006; Park and Kim, 2005
	Electro thermal evaporation atomic absorption spectroscopy (ETV-AAS)	การสกัดด้วยน้ำหรือ สารละลายกรด	Pancras, Ondov and Zeisler, 2005
	Proton induced X-ray emission (PIXE)	-	Zeng, Wu, Yao, Yang and Cahill, 1993; Salma et al, 1997

หมายเหตุ OC = organic carbon, EC = element carbon, CC = carbonate carbon, TC = total carbon,
BC = black carbon, WSOC = water-soluble organic carbon

ตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าวิธีวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่ต้องการวิเคราะห์ โดยสามารถเลือกใช้หนึ่งวิธีหรือวิเคราะห์หลายวิธีร่วมกัน บางเทคนิคไม่ต้องเตรียมตัวอย่างและไม่ทำลายตัวอย่าง ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็วเช่น X-ray fluorescence และ Fourier transform infrared spectroscopy นอกจากนี้แต่ละเทคนิคยังให้ผลการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

เทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีสำหรับการวิเคราะห์อนุภาคฝุ่นละอองที่เก็บบนกระดาษกรอง (Chow et al., 2008) จะใช้สำหรับวิเคราะห์สารอินทรีย์ และธาตุปริมาณน้อยที่เป็นองค์ประกอบของฝุ่นละออง (Solomon et al., 2011) ซึ่งโดยทั่วไปองค์ประกอบหลักของอนุภาคฝุ่นละอองจะประกอบด้วยองค์ประกอบดังนี้

2.1.7.1 สารอินทรีย์ (Organic speciation)

สารอินทรีย์คาร์บอนเป็นองค์ประกอบหนึ่งของมวลอนุภาคฝุ่นละออง (Seinfeld and Pandis, 1998) ซึ่งการตรวจสอบและวิเคราะห์ละอองอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของฝุ่นละออง จะทำให้มีความเข้าใจในเรื่องเคมีของบรรยากาศ ผลกระทบที่จะเกิดกับสุขภาพ รวมไปถึงการระบุแหล่งกำเนิดของฝุ่นละอองได้ การตรวจวัดสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของฝุ่นละออง โดยทั่วไปจะศึกษาในลักษณะของ 1) การแบ่งฝุ่นละอองตามแหล่งกำเนิด (Schauer et al., 1996; Watson, Chen, Chow, Doraiswamy, and Lowenthal, 2008) 2) การศึกษากระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในบรรยากาศ (Yu, Cocker, Griffin, Flagan, and Seinfeld, 1999; Jang and Kamens, 1999) 3) การศึกษาการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนรูปของฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นในบรรยากาศ (Simoneit, 1986; Fraser and Lakshmanan, 2000) และ 4) การประเมินความเป็นพิษของฝุ่นละอองที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ (Zielinska and Samy, 2006) โดยเทคนิคที่ใช้ในการตรวจวัดสารอินทรีย์จะแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ

1) การวิเคราะห์ด้วยการสกัด

การวิเคราะห์สารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบหนึ่งของฝุ่นละออง ใช้หลักการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Liquid extraction) อาจใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ หรือน้ำในการสกัด เพื่อแยกอนุภาคสารอินทรีย์ออกจากฝุ่นละอองบนตัวกรอง (Filter substrate) เทคนิคการวิเคราะห์ที่ใช้เช่น Gas Chromatography; GC และ Liquid Chromatography; LC (Solomon et al., 2011)

2) การวิเคราะห์ด้วยหลักการคายความร้อน

การวิเคราะห์โดยเทคนิคนี้จะใช้เครื่องมือวิเคราะห์คือ Thermal desorption Gas Chromatography Mass Spectrometry; TD-GC-MS ซึ่งจะใช้สำหรับจำแนกองค์ประกอบทางเคมี และวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในฝุ่นละออง (Lavrich and Hays, 2007) ข้อดีของการใช้เทคนิคนี้คือสามารถวิเคราะห์สารอินทรีย์ที่ระเหยได้

2.1.7.2 ธาตุปริมาณน้อย (Trace elements)

การวิเคราะห์หาธาตุปริมาณน้อยในฝุ่นละอองมีเทคนิคที่มีการใช้อย่างแพร่หลายคือ X-ray fluorescence, Mass spectrometry และ Inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) เนื่องจากสามารถวิเคราะห์หาธาตุปริมาณน้อยได้หลายชนิดทั้งในเชิงคุณภาพวิเคราะห์

และปริมาณวิเคราะห์ แต่ละเทคนิคจะมีความแตกต่างกันที่ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ

1) Destructive technique เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่ทำให้ตัวอย่างสลายไป โดยการสกัดสารที่จะวิเคราะห์ออกจากตัวกรอง (Filter substrate) ใช้การสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ หรือนำก่อนนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ ได้แก่เทคนิค Inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP- MS) , Inductively coupled plasma- atomic emission spectroscopy (ICP- AES) และ Electrothermal evaporation atomic absorption spectroscopy (ETV- AAS) วิธีดังกล่าวให้ค่า Detection limits ต่ำ แต่สามารถวิเคราะห์ธาตุได้ครอบคลุมกว่าเทคนิคประเภท Non-destructive (Solomon et al., 2011)

2) Non-destructive technique เทคนิคการวิเคราะห์ที่ไม่ทำลายตัวอย่าง เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างในขณะที่อยู่บนตัวกรองได้ทันที ซึ่งเทคนิคที่นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่เทคนิค Proton induced X-ray emission (PIXE), X-ray fluorescence และ Instrumental neutron activation analysis (INAA) แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเหล่านี้อาจจะทำให้เกิดการสลายตัวของสารที่ระเหยได้ เช่น แอมโมเนียมไนเตรด (Van, Worobiec, Stranger, and Grieken, 2008)

จากตารางที่ 2.2 พบว่าเทคนิคดังกล่าวสามารถนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบของฝุ่นละอองในรูปของสารอินทรีย์และธาตุปริมาณน้อยในฝุ่นละอองได้ ในปัจจุบันพบว่าเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีหลายเทคนิคสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบของฝุ่นละอองได้เช่นกัน (Signorell and Reid, 2011) ซึ่งได้แก่เทคนิค Infrared spectroscopy, Raman spectroscopy, UV-Vis spectroscopy และ X-ray spectroscopy ซึ่งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสาร (Matter) กับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) โดยหลักการที่ว่าอะตอม โมเลกุล หรือไอออนของสารแต่ละชนิดจะดูดกลืนหรือสะท้อนคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นเฉพาะค่าหนึ่งเท่านั้น โดยการตรวจวัดปริมาณคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนหรือสะท้อนออกมาจะทำให้ทราบองค์ประกอบของสารในฝุ่นละออง

2.2 เทคนิคสเปกโทรสโกปี

Spectroscopy หรือ Spectroscopic method เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ทางเคมีที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบของโมเลกุล ซึ่งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสาร (Matter) กับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) โดยเป็นการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางกายภาพของสารในการดูดกลืนหรือปล่อยคลื่นแสง ซึ่งอะตอม โมเลกุล หรือไอออนของสารจะดูดกลืนหรือสะท้อนคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นเฉพาะค่าหนึ่งเท่านั้น ฉะนั้นการดูดกลืนหรือสะท้อน

คลื่นแสงจึงขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสาร การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีจึงสามารถให้ข้อมูลการวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative) ของสารอินทรีย์และสาร อนินทรีย์ เทคนิคสเปกโทรสโกปีอาศัยพื้นฐานของปรากฏการณ์ต่อไปนี้คือ 1) การดูดกลืนแสง (Absorption), 2) ฟลูออเรสเซนส์ (Fluorescence), 3) ฟอสฟอเรสเซนส์ (Phosphorescence), 4) การกระเจิงแสง (Scattering), 5) การคายแสง (Emission) และ (6) เคมีลูมิเนสเซนส์ (Chemiluminescence) โดยหลักการเบื้องต้นของการวิเคราะห์โดยเทคนิคสเปกโทรสโกปีจะเกี่ยวข้องกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และการดูดกลืนหรือการสะท้อนคลื่นแสงของสาร

2.2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า (E) และสนามแม่เหล็ก (H) โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำ เช่น แสง คลื่นวิทยุ และรังสีเอ็กซ์ สามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่อาศัยตัวกลางจัดเป็นคลื่นตามขวาง มีสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าตั้งฉากกัน และตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ด้านการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปีนั้นประกอบด้วยคลื่นที่มีความถี่และความยาวคลื่นต่างกันเป็นช่วงกว้าง ตั้งแต่คลื่นวิทยุซึ่งมีพลังงานต่ำสุด (ความยาวคลื่นสูงสุด) ไปจนถึงคลื่นไมโครเวฟซึ่งมีพลังงานสูงสุด (ความยาวคลื่นต่ำที่สุด) ซึ่งเรียกว่า ช่วงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic spectrum) ช่วงคลื่นต่างๆ จะมีความยาวคลื่น, ความถี่ และเลขคลื่นดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ช่วงคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Colthup, Daly, and Wiberley, 1975)

Region	ความยาวคลื่น, λ (cm)	เลขคลื่น, $\bar{\nu}$ (cm^{-1})	ความถี่, ν (Hz)
Ultraviolet			
Far	$1 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^6 - 50,000$	$3 \times 10^{16} - 1.5 \times 10^{15}$
Near	$2 \times 10^{-5} - 3.8 \times 10^{-5}$	$50,000 - 26,300$	$1.5 \times 10^{15} - 7.9 \times 10^{14}$
Visible	$3.8 \times 10^{-5} - 7.8 \times 10^{-5}$	$26,000 - 12,800$	$7.9 \times 10^{14} - 3.8 \times 10^{14}$
Infrared			
Near	$7.8 \times 10^{-5} - 2.5 \times 10^{-4}$	$12,800 - 4,000$	$3.8 \times 10^{14} - 1.2 \times 10^{14}$
Middle	$2.5 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-3}$	$4,000 - 200$	$1.2 \times 10^{14} - 6 \times 10^{12}$
Far	$5 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-1}$	$200 - 10$	$6 \times 10^{12} - 3 \times 10^{11}$
Microwave	$1 \times 10^{-10} - 1 \times 10^2$	$10 - 0.01$	$1 \times 10^{12} - 3 \times 10^8$

2.2.2 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนกับสาร

การเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารกับกลุ่มของโฟตอนทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับสาร โดยใช้พลังงานในรูปของความร้อน พลังงานไฟฟ้า คลื่นแสง พลังงานจลน์ของอนุภาค (อิเล็กตรอน) หรือพลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาเคมี ไปกระตุ้นอะตอม หรือ โมเลกุล หรือ ไอออนของสารที่อยู่ในสถานะพื้น (ระดับพลังงานต่ำ) ทำให้เกิดการดูดกลืนพลังงานและกระโดดไปอยู่ในสถานะเร้า (ระดับพลังงานที่สูงกว่า) และกลับสู่สถานะพื้น โดยการปล่อยหรือคายพลังงานออกมา จากนั้นวัดพลังงานที่ถูกปล่อยออกมาเมื่อสารที่อยู่ในสถานะเร้ากลับสู่สถานะพื้น หรือวัดปริมาณของพลังงานที่สารดูดกลืนเพื่อทำให้เกิดการกระตุ้น

2.2.3 สเปกโทรสโกปีที่อาศัยหลักการดูดกลืนคลื่นแสง

เมื่อผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปยังสาร สารได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจากโฟตอนของคลื่นแสงและดูดกลืนคลื่นแสงไว้ส่วนหนึ่ง และให้คลื่นแสงอีกส่วนหนึ่งถูกส่งผ่านออกไปโดยที่คลื่นแสงนั้นมีความเข้มเท่าเดิม ความเข้มของคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนไว้จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนหรืออะตอมหรือโมเลกุล หรือ ไอออนของสารเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากสถานะพื้นไปยังสถานะเร้า โดยพลังงานที่สารดูดกลืนไว้จะต้องพอดีกับพลังงานที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานระหว่างสถานะเร้ากับสถานะพื้นของอิเล็กตรอนหรืออะตอม หรือ โมเลกุล หรือ ไอออนของสาร สารจึงดูดกลืนคลื่นแสงแต่ถ้าพลังงานที่สารดูดกลืนไว้ไม่พอดีกับพลังงานที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานระหว่างสถานะเร้ากับสถานะพื้นสารจะไม่ดูดกลืนคลื่นแสง ซึ่งเทคนิคการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปีที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานและที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสดงดังตารางที่ 2.4 และตารางที่ 2.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.4 เทคนิคการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปีที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงาน

(นิพนธ์ และ คณิตา ตังคณานุรักษ์, 2547)

กระบวนการถ่ายโอนพลังงาน	ช่วงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	เทคนิคการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปี
Absorption	γ -ray	Mossbauer spectroscopy
	X-ray	X-ray absorption spectroscopy
	UV/Vis	UV/Vis spectroscopy
		Atomic absorption spectroscopy
	Infrared	Infrared spectroscopy
		Raman spectroscopy
Absorption	Microwave	Microwave spectroscopy

ตารางที่ 2.4 เทคนิคการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปีที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงาน
(นิพนธ์ และ คณิตา ตังคณานุรักษ์, 2547) (ต่อ)

กระบวนการถ่ายโอนพลังงาน	ช่วงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	เทคนิคการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปี
		Electron spin resonance spectroscopy
Emission	Radio wave	Nuclear magnetic resonance spectroscopy
	UV/Vis	Atomic emission spectroscopy
Photoluminescence	X-ray	X-ray fluorescence
	UV/Vis	Fluorescence spectroscopy
		Phosphorescence spectroscopy
		Atomic fluorescence spectroscopy

ตารางที่ 2.5 เทคนิคการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปีที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงาน
(นิพนธ์ และ คณิตา ตังคณานุรักษ์, 2547)

ช่วงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	ประเภทของการเกิดอันตรกิริยา	เทคนิคการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปี
X-ray	Diffraction	X-ray diffraction
UV/Vis	Refraction	Refractometry
	Scattering	Nephelometry
		Turbidimetry
	Dispersion	Optical rotary dispersion

เมื่อโมเลกุลดูดกลืนคลื่นแสงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะ (Transition) พื้นฐาน 3 แบบ โดยทั้ง 3 แบบจะทำให้โมเลกุลมีพลังงานภายในสูงขึ้น ทำให้โมเลกุลขึ้นไปอยู่ในสถานะเร้า ซึ่งพลังงานแต่ละการเปลี่ยนสถานะจะมีค่าพลังงานที่แน่นอน

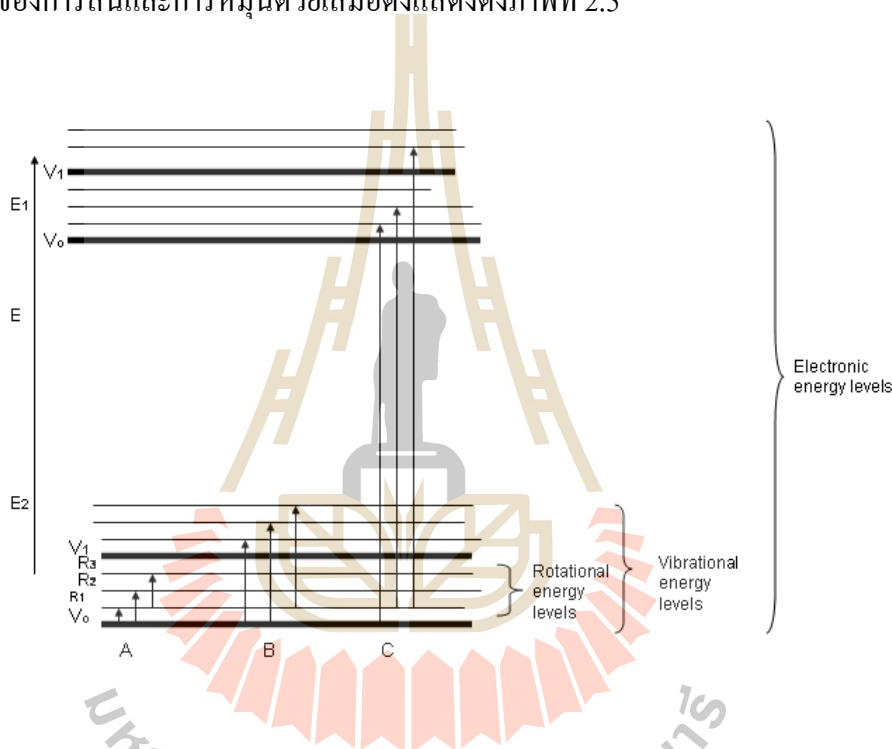
2.2.3.1 การเปลี่ยนสถานะที่เกิดจากการหมุนของโมเลกุล (Rotational transition) เนื่องจากโมเลกุลหมุนรอบแกนต่าง ๆ ด้วยพลังงานของการหมุนที่ระดับพลังงานแน่นอนหลายระดับ พลังงาน ดังนั้นเมื่อโมเลกุลดูดกลืนแสงในช่วงไมโครเวฟและอินฟราเรดย่านไกล จะทำให้โมเลกุลนั้นมีระดับพลังงานของการหมุนสูงขึ้น

2.2.3.2 การเปลี่ยนสถานะที่เกิดจากการสั่นของโมเลกุล (Vibrational transition) เนื่องจากโมเลกุลไม่อยู่นิ่ง ซึ่งแต่ละอะตอมที่ประกอบเป็นโมเลกุลจะสั่นอยู่ตลอดเวลาและเกิดขึ้นที่ระดับ

พลังงานแน่นอน ดังนั้นเมื่อโมเลกุลดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด จะถูกเปลี่ยนระดับพลังงานเป็นระดับพลังงานของการสั่นที่สูงขึ้น

2.2.3.3 การเปลี่ยนสถานะอิเล็กทรอนิกส์ใน โมเลกุล (Electronic transition) เนื่องจากอิเล็กตรอนภายในโมเลกุล เมื่อโมเลกุลดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในโมเลกุลนั้น ๆ เกิดการรื้อหรือการกระตุ้นอิเล็กตรอน (Electronic excitation) ทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าเดิม

การเปลี่ยนสถานะอิเล็กทรอนิกส์ใน โมเลกุลทุกครั้งจะต้องทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของการสั่นและการหมุนด้วยเสมอ ดังแสดงดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การเปลี่ยนสถานะของระดับพลังงานของการหมุน (R), ระดับพลังงานของการสั่น (V) และระดับพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ (E) ของโมเลกุลจากการดูดกลืนคลื่นแสง (Osibanjo, Curtis, and Lai 2015)

2.2.4 สเปกโทรสโกปีที่อาศัยหลักการกระเจิงแสง

เมื่อผ่านคลื่นแสงความยาวคลื่นเดียวที่มีความยาวคลื่น λ ผ่านไปยังตัวกลางที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า $\frac{3}{4}\lambda$ จะทำให้อนุภาคเกิดการกระเจิงแสงออกมาทุกทิศทาง อนุภาคขนาดใหญ่ นอกจากจะกระเจิงแสงแล้ว ยังเกิดการสะท้อนหรือการหักเหแสงได้ การกระเจิงแสงที่เกิดจากการที่อนุภาคดูดกลืนคลื่นแสง แล้วปล่อยคลื่นแสงออกมาโดยที่พลังงานของคลื่นแสงไม่เปลี่ยนแปลง เรียกว่า การกระเจิงแสงแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) แต่ถ้าคลื่นแสงที่

ถูกปล่อยออกมา มีพลังงานของคลื่นแสงเปลี่ยนแปลง เรียกว่า การกระเจิงแสงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering)

2.2.5 สเปกโทรสโกปีที่อาศัยหลักการคายคลื่นแสง

สารที่อยู่ในสถานะเร้าสามารถคายโฟตอนที่มีค่าพลังงานเฉพาะออกมาได้ โดยการกลับสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า การกระตุ้นเพื่อให้เกิดเป็นอะตอมในสถานะแก๊สของโมเลกุลนั้น อาจทำได้โดยการใช้แหล่งพลังงานหลายรูปแบบ เช่น การสปาร์กด้วยไฟฟ้ากระแสสลับหรือกระแสตรงที่มีความต่างศักย์สูง การให้ความร้อนด้วยเปลวไฟ (Flame excitation) การยิงด้วยอิเล็กตรอน หรือนิวตรอนและรังสีเอกซ์ พลังงานดังกล่าวมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดการสลายพันธะเคมีได้ อะตอมต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบแยกออกมา อะตอมเหล่านี้จะอยู่ในสถานะแก๊สที่เป็นอิสระอยู่ในสถานะพื้น และสถานะเร้า สำหรับอะตอมอิสระในสถานะเร้าจะปล่อยหรือคายคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นจำเพาะได้เป็นสเปกตรัมที่ประกอบด้วยเส้นต่าง ๆ (Line spectrum) ที่แคบและชัดเจนที่มีความถี่ต่าง ๆ ที่เป็นคุณลักษณะประจำของธาตุ สำหรับสเปกตรัมที่เปล่งออกจากสารที่เป็นของแข็งหรือของเหลวที่อะตอมจัดตัวใกล้กันและเป็นอิสระจะให้สเปกตรัมแบบต่อเนื่อง (Continuous spectrum) เพราะความยาวคลื่นแต่ละความยาวคลื่นมีจำนวนมากและอยู่ใกล้กันมากจนซ้อนทับกัน และไม่สามารถแยกออกจากกันได้ด้วยเครื่องมือธรรมดา

เทคนิคด้านสเปกโทรสโกปีที่ใช้ในการระบุลักษณะของอนุภาคทั้งเชิงกายภาพและเชิงเคมี อาทิเช่น อะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโทรสโกปี, ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี, อินฟราเรด/รามาน สเปกโทรสโกปี และเอ็กซ์เรย์แอบซอร์บชันสเปกโทรสโกปี เป็นต้น โดยเป็นการศึกษาอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอนุภาคของฝุ่นละอองซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพในการดูดกลืนหรือสะท้อนคลื่นแสง ส่วนใหญ่จะใช้ในการศึกษาขนาด (Size) รูปร่าง (Shape) การกระจายขนาดของอนุภาค (Size distribution) รวมไปถึงองค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition)

2.3 การจำแนกลักษณะทางเคมีของฝุ่นละอองโดยเทคนิคสเปกโทรสโกปีแบบสั่น

เทคนิคสเปกโทรสโกปีแบบสั่นเป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการสั่นของโมเลกุล ซึ่งพลังงานการสั่นของโมเลกุลเป็นพลังงานที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของการสั่นของโมเลกุลที่เรียกว่า แทรนซิชันของการสั่น (Vibrational transition) และมีระดับพลังงานที่แน่นอน ดังแสดงในภาพที่ 2.4 โดยระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับโมเลกุลได้แก่ ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนิก (Electronic energy levels) ซึ่งเป็นพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน, ระดับพลังงานของการสั่น (Vibrational energy levels) และระดับพลังงานของการหมุน (Rotational energy levels) เมื่อโมเลกุลดูดกลืนคลื่นแสงอินฟราเรดจะเกิดการรับพลังงานและเปลี่ยนระดับพลังงานการสั่นสูงขึ้นเท่ากับระดับพลังงานของการสั่นทำให้เกิดแทรนซิชันของการสั่น และเนื่องจากการเกิดแทรนซิชันของการ

สั้นใช้พลังงานมากกว่าแทรนซิชั่นของการหมุน ดังนั้นเมื่อโมเลกุลรับพลังงานจากคลื่นอินฟราเรดก็จะทำให้แทรนซิชั่นของการหมุนเกิดขึ้นด้วยจึงทำให้อินฟราเรดสเปกตรัมมีแถบดูดกลืนกว้างขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อเกิดการแทรนซิชั่นระหว่างระดับพลังงานของการสั่นคู่ใด ๆ จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของการหมุนด้วย ซึ่งพลังงานของการสั่นจะเกิดขึ้นใน โมเลกุลที่ประกอบด้วย 2 อะตอม โดยเกิดจากการสั่นของพันธะระหว่าง 2 อะตอม

2.3.1 รูปแบบการสั่นแบบพื้นฐาน

การสั่นแบบพื้นฐานของพันธะระหว่าง 2 อะตอมจำแนกได้เป็น 2 ลักษณะคือ

2.3.1.1 การสั่นแบบยืดหรือหด (Stretching vibration, ν) เป็นการสั่นที่เกิดจากความยาวของพันธะระหว่างอะตอมเปลี่ยนแปลงอาจยืดยาวขึ้นหรือหดสั้นลง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวของพันธะใน โมเลกุลระหว่างอะตอม มี 2 รูปแบบคือ

1) การสั่นแบบยืดสมมาตร (Symmetric vibration, ν_s) คือพันธะระหว่างอะตอมทั้ง 2 ยืดออก หรือยืดเข้าเป็นระยะเท่าๆ กัน

2) การสั่นแบบยืดไม่มีสมมาตร (Asymmetric vibration, ν_{as}) คือพันธะระหว่างอะตอมทั้ง 2 ยืดออก หรือยืดเข้าเป็นระยะไม่เท่ากัน

2.3.1.2 การสั่นแบบงอ (Bending vibration, δ) หรือการสั่นแบบผิดรูป (Deformations) เป็นการสั่นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมของพันธะระหว่างอะตอม ทำให้มุมมีลักษณะกว้างออกหรือแคบลง ซึ่งอาจเกิดการเคลื่อนที่อยู่ในระนาบเดียวกัน (In-plane) หรือต่างระนาบก็ได้ (Out-of-plane) มี 4 รูปแบบคือ

1) การงอแบบกรรไกรในระนาบ (In-plan scissoring deformation) โดยสองอะตอมที่ต่อกับอะตอมกลางแกว่งไปด้านข้างในระนาบของโมเลกุล

2) การงอแบบโคลงในระนาบ (In-plan rocking deformation) โดยสองอะตอมที่ต่อกับอะตอมกลางเคลื่อนที่เข้าหากัน หรือเคลื่อนที่ออกจากกัน ในระนาบของโมเลกุล

3) การงอแบบกระดิกออกนอกระนาบ (Out-of-plan wagging -deformation) สองอะตอมที่ต่อกับอะตอมกลางแกว่งไปข้างหน้าและข้างหลังนอกระนาบของโมเลกุล

4) การงอแบบบิด (Out-of-plan twisting deformation) สองอะตอมที่ต่อกับอะตอมกลางหมุนรอบพันธะนอกระนาบของโมเลกุล

การสั่นแบบยืดและแบบงอของแต่ละพันธะจะมีค่าความถี่เฉพาะ เมื่อ โมเลกุลได้รับคลื่นแสงอินฟราเรดที่มีความถี่พอดีกับการสั่นของพันธะใน โมเลกุลทำให้เกิดการแทรนซิชั่นที่เรียกว่า Vibrational transition และให้แถบการดูดกลืนแสงเป็นพิคแคบๆ พลังงานจากคลื่นแสงอินฟราเรดที่ถ่ายเทให้กับพันธะของ โมเลกุลจะไปเพิ่มแอมพลิจูดของการสั่นใน โมเลกุลนั้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าเกิดการเรโซแนนซ์ นั่นคือโมเลกุลจะมีพลังงานมากกว่าปกติ (โมเลกุลอยู่ในสภาวะเร้า) และ

โมเลกุลจะกลับสู่สภาวะพื้นโดยการปล่อยพลังงานในรูปความร้อนออกมา

2.3.2 เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

2.3.2.1 หลักการของเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์เพื่อตรวจสอบและศึกษาโครงสร้างของโมเลกุลของสารได้ทั้งสถานะของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยศึกษาแทรนซิชันของการสั่นหรือการหมุนของหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลของสารนั้นๆ เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเกิดจากกระบวนการดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรดของโมเลกุล จึงเป็นการวัดการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดที่ทำให้เกิดการแทรนซิชันของการสั่นของโมเลกุล และมีผลต่อการสั่นของพันธะโมเลกุล

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงอินฟราเรดเป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.78-1000 ไมโครเมตร อยู่ระหว่างช่วงคลื่นวิสิเบิลและช่วงคลื่นไมโครเวฟ แบ่งเป็น 3 ช่วงประกอบด้วยอินฟราเรดย่านใกล้ (Near-IR, NIR) อินฟราเรดย่านกลาง (Mid-IR) และอินฟราเรดย่านไกล (Far-IR) ซึ่งอินฟราเรดย่านกลางเป็นช่วงที่ใช้มากในการวิเคราะห์สารอินทรีย์ ให้แถบการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดช่วงเลขคลื่นระหว่าง $400-4000\text{ cm}^{-1}$ และให้แถบการดูดกลืน (Absorption bands) ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของหมู่ฟังก์ชัน และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของโมเลกุล

อินฟราเรดย่านไกลเป็นช่วงคลื่นระหว่าง $667-10\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นย่านที่เกี่ยวข้องกับการสั่นแบบงอ เกิดในโมเลกุลที่อะตอมของคาร์บอน, ไนโตรเจน, ออกซิเจน และฟลูออรีน ที่เกิดพันธะกับอะตอมที่น้ำหนักมวลหนักมากกว่า 19 ขึ้นไป เกิดจากสารประกอบที่เป็นวงหรือไม่อิ่มตัว สามารถวิเคราะห์ตรวจสอบสารประกอบ Organometallic และศึกษา Coordination bonds ในสารประกอบอินทรีย์ และพบว่าการดูดกลืนช่วงอินฟราเรดของโมเลกุลนั้นมีข้อกำหนดที่สำคัญ 2 ประการดังนี้

1) โมเลกุลที่กำลังสั่นนั้นต้องเกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ภายในโมเลกุล ดังนั้น โมเลกุลที่ประกอบด้วย 2 อะตอมที่เหมือนกัน เช่น N_2 , O_2 และ Cl_2 จะไม่ให้อินฟราเรดสเปกตรัม ซึ่งโมเลกุลใดๆ จะดูดกลืนช่วงคลื่นแสงอินฟราเรดได้นั้นต้องมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ในระหว่างที่โมเลกุลนั้นเกิดการสั่น ดังนั้น โมเลกุลของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่มีความหนาแน่นของประจุ (Charge density) แตกต่างกันระหว่างอะตอมทั้ง 2 จะให้แถบการดูดกลืนคลื่นแสงอินฟราเรดได้ เรียกโมเลกุลเหล่านี้ว่า IR active สำหรับโมเลกุลที่ประกอบด้วย 2 อะตอมที่เหมือนกันจึงไม่มีความแตกต่างของความหนาแน่นประจุ การสั่นของโมเลกุลดังกล่าวจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ จะไม่ให้แถบการดูดกลืนคลื่นแสงอินฟราเรด

เรียก โมเลกุลเหล่านี้ว่า IR inactive

2) พลังงานของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ให้กับ โมเลกุลจะต้องมีค่าพอดีกับผลต่างของระดับพลังงานของการสั่นที่เกี่ยวข้องกับการทรานซิชัน

2.3.2.2 กฎการเลือกของอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เมื่อ โมเลกุลของสารประกอบดูดกลืนคลื่นรังสีอินฟราเรดแล้วทำให้เกิดแถบการสั่นแบบพื้นฐานปรากฏในอินฟราเรดสเปกตรัม เรียกว่า Infrared active จะเกิดขึ้นได้เมื่อ

1) โมเลกุลดูดกลืนรังสีอินฟราเรดแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ของโมเลกุล

2) คลื่นรังสีอินฟราเรดที่ความถี่นั้นๆ จะต้องมีพลังงานเท่ากับระดับพลังงานที่ทำให้เกิดทรานซิชันของการสั่น

2.3.3 เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี

Schweiger (1999) พบว่าเทคนิครามานสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคหนึ่งที่มีความสามารถในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองได้ โดยใช้หลักการกระเจิงแสงของอนุภาค (Optical elastic scattering) ที่กำลังสั่นและหมุนอยู่ และวัดสเปกตรัมที่เกิดขึ้นจากการกระเจิงแสงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Fung and Tang (1999) ซึ่งใช้เทคนิครามานในการจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละออง และพบว่าสามารถใช้วิเคราะห์ตัวอย่างที่อยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ทั้งประเภทของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้และเนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่มีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างก่อนวิเคราะห์และไม่ทำลายตัวอย่าง ทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์และให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว

2.3.3.1 หลักการของเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี

รามานสเปกโทรสโกปีเป็นการวัดการกระเจิงของคลื่นแสงช่วงเลขคลื่นระหว่าง $50\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$ เกิดจากแสงเลเซอร์ที่มีความถี่เดียว (Monochromatic radiation) และมีความเข้มสูงอาจเกิดขึ้นในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ หรือยูวี-วิสิเบิล ซึ่งจะวัดการกระเจิงของคลื่นแสงหลังจากได้ชนกับโมเลกุลที่กำลังสั่นและหมุนอยู่ เนื่องจากโมเลกุลที่มีการสั่นแบบสมมาตรจะไม่สามารถถูกกระตุ้นด้วยคลื่นอินฟราเรด เพราะว่าโมเลกุลไม่มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ภายในโมเลกุล อย่างไรก็ตามพันธะของโมเลกุลดังกล่าวยังคงมีการสั่น และพบว่าเทคนิครามานจะให้สเปกตรัมของโมเลกุลดังกล่าวได้ โดยการผ่านคลื่นแสงความถี่เดียวไปยังโมเลกุลที่มีการสั่นแบบสมมาตรเมื่อคลื่นแสงชนกับโมเลกุลถ้าการชนกับโมเลกุลเป็นการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) คือเป็นการชนแบบไม่มีการสูญเสียพลังงาน จะได้คลื่นแสงที่กระเจิงหลังจากการชนแล้วมีพลังงานเท่ากับพลังงานของคลื่นแสงที่ตกกระทบโมเลกุล การกระเจิงในลักษณะนี้เรียกว่า การกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh scattering) แต่ถ้าการชนกับโมเลกุลเป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) เป็น

การชนแบบมีการสูญเสียพลังงาน เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ทำให้โมเลกุลรับพลังงานเพิ่มขึ้นหรือลดลงเท่ากับระดับพลังงานของการสั่นหรือการหมุน และเกิดการกระเจิงแสงโดยการคายพลังงานที่มีความถี่ต่างกัน ซึ่งเรียกว่าการกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering)

รามานสเปกตรัมจะเป็นการพล็อตระหว่างความเข้มของการกระเจิงแบบรามาน (Intensity) กับความถี่ที่เลื่อนไปจากความถี่ของแสงเลเซอร์ที่ใช้ในการกระตุ้น (Frequency shift หรือ Raman shift, Δcm^{-1})

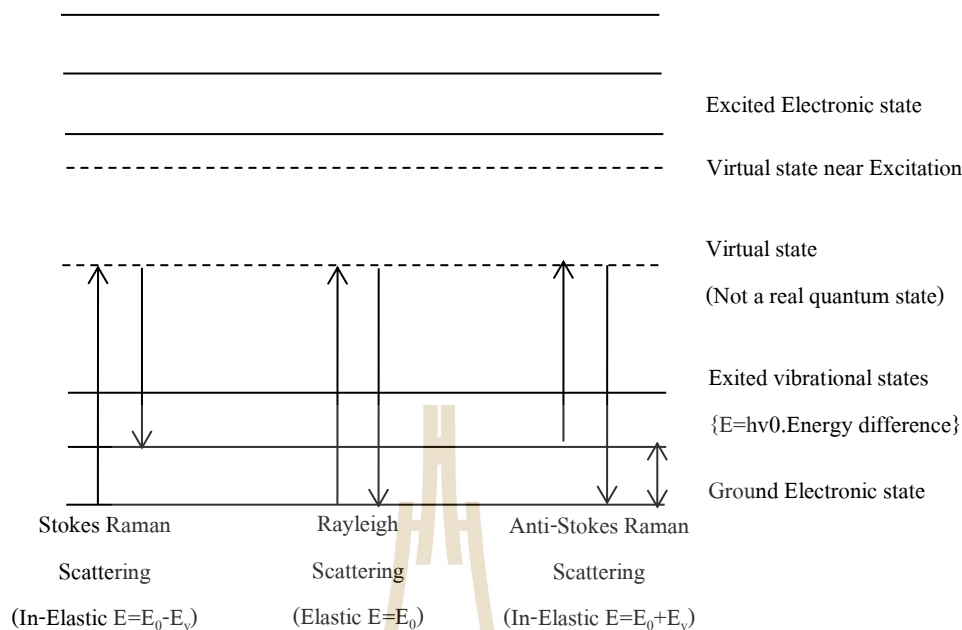
2.3.3.2 การกระเจิงแสงแบบรามาน

การกระเจิงแสงแบบรามานเป็นการกระเจิงแสงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) จะได้คลื่นแสงที่กระเจิงหลังจากการชนแล้วอาจมีพลังงานสูงกว่าหรือต่ำกว่าพลังงานของคลื่นแสงที่ตกกระทบโมเลกุล โดยเกิดจากคลื่นแสงเลเซอร์ที่มีความถี่เดียว (ν_0) ไปชนโมเลกุล และเกิดการกระเจิงจนทำให้โมเลกุลมีพลังงานสูงขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานกึ่งสถานะเร้า (Virtual state หรือ Quasi-excited state, E_v) ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่อยู่ระหว่างสถานะพื้นของระดับพลังงานชั้นอิเล็กตรอนิกและสถานะเร้าของระดับพลังงานชั้นอิเล็กตรอนิก แล้วกลับสู่ระดับพลังงานสถานะพื้น E_0 และเกิดการกระเจิงแบบรามานขึ้นมา 2 แบบได้เส้นสเปกตรัมที่มีความถี่ต่ำกว่าและสูงกว่าความถี่ของคลื่นแสงเลเซอร์ดังภาพที่ 2.6

1) การกระเจิงแบบสโตกส์รามาน (Stokes raman scattering) เป็นเส้นสเปกตรัมที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ของคลื่นแสงเลเซอร์ เกิดจากการชนกันระหว่างโฟตอนของคลื่นแสงเลเซอร์กับโมเลกุลที่อยู่ในสถานะพื้นของระดับพลังงานการสั่น ($V=0$) เป็นผลทำให้โฟตอนมีพลังงานลดลง ส่วนโมเลกุลที่ได้รับพลังงานจากโฟตอนจะอยู่ในสถานะเร้าและกลับลงสู่ระดับพลังงาน E_0 ($E=E_0-E_v$)

2) การกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh scattering) เป็นเส้นสเปกตรัมที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของคลื่นแสงเลเซอร์ ($E=E_0$)

3) การกระเจิงแบบแอนติสโตกส์รามาน (Anti-stoke raman scattering) เป็นเส้นสเปกตรัมที่มีความถี่มากกว่าความถี่ของคลื่นแสงเลเซอร์ เกิดจากการชนกันระหว่างโฟตอนของคลื่นแสงเลเซอร์กับโมเลกุลที่มีอยู่ในสถานะเร้าของระดับพลังงานของการสั่น ($V=0$) ทำให้โฟตอนได้รับพลังงานจากโมเลกุล ผลคือโมเลกุลกลับลงสู่สถานะพื้น E_0 และโฟตอนมีพลังงานเพิ่มขึ้น ($E=E_0+E_v$)



ภาพที่ 2.6 เส้นสเปกตรัมที่เกิดจากการกระเจิงแบบสโตกส์รามาน, แบบเรย์ลี, และแบบแอนติสโตกส์รามาน (Dasand and Agrawal, 2011)

2.3.3.3 กฎการเลือก

การสั่นของโมเลกุลในรูปแบบบางชนิดไม่สามารถดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้ ซึ่งกฎของการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของโมเลกุลคือ โมเลกุลจะสามารถดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้ (IR active) ก็ต่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) เกิดขึ้นในขณะที่มีการสั่น เพราะฉะนั้นการสั่นบางชนิดที่ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ จะไม่สามารถดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้

สารบางชนิดเมื่อนำไปวัดอินฟราเรดหรือรามานสเปกตรัมพบว่าบางโหมดของการสั่น (Mode of vibration) สามารถจะให้ทั้งอินฟราเรดและรามานสเปกตรัม บางโหมดของการสั่นสามารถจะให้สเปกตรัมดังกล่าวอย่างใดอย่างหนึ่ง จึงมีกฎของการเลือกสำหรับการเกิดอินฟราเรดและรามานสเปกตรัม ที่รู้จักกันดีคือ Rule of Mutual Exclusion มี 3 ข้อคือ

1) โมเลกุลที่มี Center of symmetry ถ้าบางโหมดของการสั่นให้ IR active การสั่นของโหมดนั้นจะเป็น Raman inactive หรือกล่าวว่าถ้าการสั่นของโมเลกุลมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่จะให้ IR active แต่ถ้าการสั่นของโมเลกุลมีการเปลี่ยนแปลง Polarizability ของพันธะเคมีจะให้ Raman active เช่นเมื่อพิจารณาโมเลกุลของ O_2 , N_2 , H_2 และ Cl_2 ซึ่งประกอบด้วย 2 อะตอมที่เหมือนกัน (Homonuclear diatomic molecules) โมเลกุลดังกล่าวมี Center of symmetry พบว่าไม่มี

การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ แต่มีการเปลี่ยนแปลง Polarizability ของพันธะเคมี โมเลกุลดังกล่าว จะให้ Raman active และเป็น IR inactive

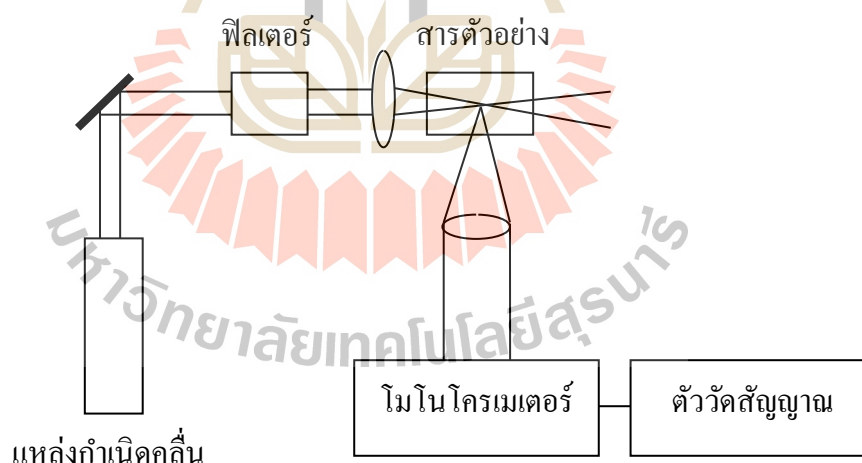
2) โมเลกุลที่ไม่มี Center of symmetry จะให้ทั้ง IR และ Raman active

3) โมเลกุลของสารบางชนิดไม่ให้ทั้งอินฟราเรดและรามานสเปกตรัมซึ่งจะพบใน โมเลกุลที่มีการสั่นแบบงอประเภทงอแบบบิด (Twisting) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงทั้งโมเมนต์ขั้วคู่ กับ Polarizability ของพันธะเคมีเกิดขึ้นและหักล้างกันเอง จึงไม่ให้ทั้งอินฟราเรดและรามาน สเปกตรัม

โมเลกุลใดๆ ที่ทำให้คลื่นแสงที่ไปกระตุ้นเกิดการกระเจิงแล้วให้ Raman shift โมเลกุลนั้นจะต้องมีการสั่นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง Polarizability ของพันธะเคมีนั้น พบว่า โมเลกุลที่มีการสั่นแบบสมมาตรจะเห็นการเปลี่ยนแปลง Polarizability ของพันธะเคมี แต่ใน โมเลกุลที่มีการสั่นแบบไม่สมมาตรจะมีการเปลี่ยนแปลง Polarizability ของพันธะเคมีน้อยมาก หรือไม่เปลี่ยนแปลงเลย

2.3.4 เครื่องมือทางสเปกโทรสโกปี

ส่วนประกอบโดยทั่วไปของเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์และเครื่องรามานสเปกโตร มิเตอร์จะประกอบด้วยอุปกรณ์หลักดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ส่วนประกอบของเครื่องอินฟราเรดและรามานสเปกโตรมิเตอร์

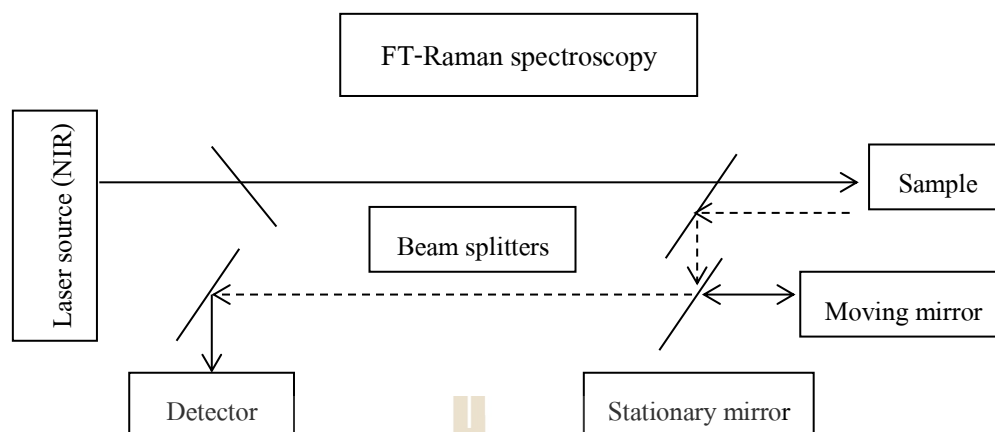
(คัดแปลงจาก นิพนธ์ และคณิตา, 2547)

2.3.4.1 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์

1) สเปกโตรมิเตอร์ระบบกระจายแสง (Dispersive spectrometer) มีทั้งลำแสงคู่ และเดี่ยว ซึ่งเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ชนิดลำแสงเดี่ยวจะให้สเปกตรัมที่มี Background ที่เกิดจากการ

ดูดกลืนของ CO_2 (gas) และความชื้นในอากาศจึงต้องมีการบันทึกสเปกตรัม 2 ครั้ง ครั้งแรกไม่มีสารตัวอย่าง (ได้สเปกตรัมของ Background) แล้วจึงวัดสารตัวอย่างจึงจะได้อินฟราเรดสเปกตรัมของสารตัวอย่างที่ได้หัก Background ออกไป ส่วนเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ชนิดลำแสงคู่จัดเป็นระบบสแกนความยาวคลื่น เมื่อคลื่นแสงอินฟราเรดออกจากแหล่งกำเนิดคลื่นแสงอินฟราเรดจะถูกแยกออกเป็น 2 ลำแสงโดยลำแสงหนึ่งผ่านไปยังเซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่าง (Sample beam) และมีอีกลำแสงหนึ่งไปยังเซลล์อ้างอิง (Reference beam) ด้วยกระจกราบ ลำแสงทั้ง 2 จะถูกส่งผ่านอุปกรณ์ตัดลำแสง (Chopper) หรือ Sector mirror อุปกรณ์ตัดลำแสงจะยอมให้ลำแสงที่มาจาก Sample beam ผ่านไปแต่จะสะท้อนลำแสงที่มาจาก Reference beam ทำให้ลำแสงทั้งสองถูกแยกออกจากกันในระยะเวลาต่างกัน หลังจากนั้นลำแสงแต่ละลำแสงจะไปตกที่โมโนโครเมเตอร์ทำเช่นนี้สลับกัน โมโนโครเมเตอร์ที่ทำด้วยเกรตติงจะทำหน้าที่สแกนความยาวคลื่นแต่ละความยาวคลื่นผ่านช่องทางออก (Exit slit) ไปตกกระทบที่ตัววัดสัญญาณที่ต่อเข้ากับอุปกรณ์ขยายสัญญาณ เมื่อต่อเครื่องบันทึกสเปกตรัมกับอุปกรณ์ขยายสัญญาณจะสามารถบันทึก %T (transmittance) ของสารตัวอย่างเทียบกับสารอ้างอิงเป็นฟังก์ชันกับเลขคลื่นจะได้อินฟราเรดสเปกตรัม

2) ฟูเรียทรานสฟอร์มสเปกโทรมิเตอร์ หรือสเปกโทรมิเตอร์ระบบไม่กระจายแสง (Fourier transform spectrometer, FT) มีอุปกรณ์ที่ใช้รวมแสงคืออินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ซึ่งจะอาศัยการสอดแทรก (Interference) ของคลื่นแสงอินฟราเรดซึ่งอาจเป็นแบบคลื่นเสริมกันหรือหักล้างกัน โดยอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ประกอบด้วยกระจกแบนราบสองอันวางตั้งฉากกัน กระจกแบนราบอันนี้จะตั้งอยู่กับที่ (Fixed mirror) ส่วนกระจกแบนราบอีกอันหนึ่งจะเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วที่ถูกควบคุมด้วยกลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่มีตัวแยกแสง (Beam splitter) ซึ่งเป็นแผ่นโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) เคลือบด้วยชั้นเจอร์เมเนียม (Ge) ทำมุม 45 องศากับกระจกแบนราบทั้งสอง เมื่อผ่านคลื่นแสงอินฟราเรดไปตกที่ตัวแยกแสง ตัวแยกแสงจะแยกคลื่นแสงออกเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งจะถูกสะท้อนไปที่กระจกแบนราบที่ตั้งอยู่กับที่ ลำแสงอีกส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนไปที่กระจกที่เคลื่อนที่ได้ จากนั้นลำแสงทั้งสองจะสะท้อนกลับมารวมกันอีกที่ตัวแยกแสงแล้วถูกส่งผ่านไปยังสารตัวอย่าง และถูกส่งผ่านต่อไปยังตัววัดสัญญาณ สัญญาณที่ได้จากตัววัดสัญญาณจะถูกอ่านออกมาในรูปอินเตอร์เฟอโรแกรม และถูกคำนวณโดยใช้ฟังก์ชันฟูเรียทรานสฟอร์มไปเป็นอินฟราเรดสเปกตรัม ส่วนประกอบของสเปกโทรมิเตอร์ระบบไม่กระจายแสงแสดงดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ส่วนประกอบของสเปกโทรมิเตอร์ระบบไม่กระจายแสง (ฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม)
(Dasand and Agrawal, 2011)

2.3.4.2 แหล่งผลิตคลื่นแสงความเข้มสูง

แหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรด เป็นวัสดุทึบไฟเช่นแท่งเซรามิกที่ทำด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์เรียกว่า โกลบาร์ เมื่อเผาด้วยไฟฟ้าให้ร้อนประมาณ $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะคายคลื่นแสงอินฟราเรดในช่วงอินฟราเรดย่านกลางและให้ความเข้มแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ $2\text{ }\mu\text{m}$ (5000 cm^{-1}) ส่วนในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้จะใช้หลอดทั้งสแตนเลสและอินฟราเรดย่านไกลใช้อาร์กปรอทความดันสูง แต่จะมีแสงรบกวนจากรังสีในช่วงยูวี-วิสิเบิล นอกจากนี้ยังมีอินฟราเรดเลเซอร์ที่สามารถจุดหลอดได้ที่อุณหภูมิปกติ เรียกว่า Quantum cascade lasers (QCLs) ให้รังสีอินฟราเรดครอบคลุมทั้งช่วงอินฟราเรดย่านไกล และอินฟราเรดย่านกลาง

แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ ให้รังสีที่มีความยาวคลื่นเดี่ยวเพื่อใช้เป็นคลื่นแสงกระตุ้นในระบบรามาน ซึ่งจัดเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแสงที่มีความเข้มแสงสูง มีความกว้างของช่วงแสงที่ใช้แคบมาก (Highly monochromatic) ให้คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นเดี่ยวเพื่อใช้เป็นคลื่นแสงกระตุ้น อาจเป็นรังสีที่อยู่ในช่วงยูวี-วิสิเบิล หรืออินฟราเรดย่านไกล

เลเซอร์ชนิด Nd/YAG ซึ่งคายแสงในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ พบว่ามีข้อดีเหนือกว่าเลเซอร์ชนิดอื่นคือ สามารถใช้งานได้ดีและให้กำลังไฟสูงถึง 50 วัตต์ โดยไม่ทำให้ตัวอย่างสลาย (Photodecomposition) นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนจากฟลูออเรสเซนส์ (Fluorescence background) ได้อีกด้วย

2.3.4.3 ระบบใส่สารตัวอย่าง

ภาชนะบรรจุสารตัวอย่างที่เป็นของเหลวนั้นจะใช้ Cuvette cell ขนาด 1 เซนติเมตร หรือ Capillary cell และมักจะพบว่าสารตัวอย่างอาจถูกทำลายเมื่อฉายลำแสงเลเซอร์

ให้กับสารตัวอย่างจึงอาจบรรจุสารตัวอย่างที่เป็นของเหลวด้วย Rotating cell หรือ Stirred เมื่อบรรจุเซลล์ในช่องใส่สารตัวอย่างแล้ว แสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะไปกระทบกระจกเบนราบ และผ่านไปยังฟิลเตอร์แทรกสอด (Interference filter) เพื่อกรองแสงที่ไม่ต้องการออก แสงที่ผ่านการกรองแล้วจะถูกเลนส์วัตถุปรับไปกระทบตัวอย่าง แสงที่กระเจิงออกมาจะรวมกันที่เลนส์นูนและผ่านออกไปยัง Slits ที่ทำมุม 90 องศาในแนว 180 องศา เพื่อตรวจวัดต่อไป

2.3.4.4 เลนส์และตัวกรองแสง (Lenses and filters)

เมื่อลำแสงเลเซอร์ผ่านออกจากแหล่งผลิตคลื่นแสงเลเซอร์ไปกระทบกระจกเบนราบได้ลำแสงคู่ขนานผ่านไปยังตัว Laser line filter (อาจเป็น Interference หรือ filter) ที่มีประสิทธิภาพสูงในการกรองแสงช่วงคลื่นที่ไม่ต้องการออกไปได้ถึงร้อยละ 99.9 ลำแสงที่ผ่านการกรองแล้วจะถูกเลนส์นูนปรับให้เป็นจุดเล็กๆ ไปกระทบที่สารตัวอย่าง Raman scattering ผ่านออกจากสารตัวอย่างแล้วถูกรวบรวมเข้าสู่เลนส์นูนให้มาอยู่ที่ช่องส่งผ่านออกของ โมโนโครเมเตอร์ซึ่งอาจจะเป็นมุม 90 องศาหรือมุม 180 องศา

2.3.4.5 โมโนโครเมเตอร์

โมโนโครเมเตอร์ทำหน้าที่รวบรวม Raman scattering มาที่ช่องแสงผ่านออก แล้วกระจายออกเป็นแต่ละความถี่ของคลื่น จากนั้นค่อยๆ ผ่านออกที่ช่องแสงเข้าสู่ตัววัดสัญญาณ โมโนโครเมเตอร์ประกอบด้วย 1) เลนส์หรือกระจกคอลลิเมตติ้ง (Collimating) ทำหน้าที่ให้แสงที่ผ่านเข้ามาเป็นลำแสงขนาน ส่วนเลนส์หรือกระจกแบบ โฟกัสจะทำให้แสงนั้นเปลี่ยนไปในทิศทางที่ออกจากช่องแสงผ่านออกในแนวระนาบ 2) ช่องแสงผ่านเข้า-ออก (Entrance-exit slit) ทำหน้าที่กรองแสงที่ไม่ต้องการออก และช่วยควบคุมความบริสุทธิ์ของแสงที่จะออกจาก โมโนโครเมเตอร์ และ 3) หน่วยกระจายแสง (Dispersive device) ซึ่งหน่วยที่นิยมใช้มี 2 ชนิดคือปริซึม (Prisms) และเกรตติง (Gratings)

2.3.4.6 ตัววัดสัญญาณ

เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์จะใช้ Pyroelectric Deuterated Triglycine Sulfate (DTGS) และ Mercury Cadmium Telluride (MCT) โดยที่ DTGS จะเป็นตัววัดสัญญาณในย่านอินฟราเรดย่านกลาง สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิปกติ ส่วน MCT จะมีความไวกว่าแต่ต้องหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลว และใช้ได้เฉพาะอินฟราเรดย่านกลางเท่านั้น สำหรับเครื่องอินฟราเรดย่านไกลมักจะใช้ Germanium bolometer เป็นตัววัดสัญญาณ เนื่องจากมีความไวต่อเลขคลื่นในช่วงกว้างระหว่าง $5-400\text{ cm}^{-1}$ แต่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีผลต่อสัญญาณรบกวน ดังนั้นจึงต้องใช้ไนโตรเจนเหลวหล่อเย็นขณะใช้งาน

เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ จะใช้ตัววัดสัญญาณที่มีความไวต่อพลังงานอินฟรา

เรขาคณิตกลางโดยใช้ Photodiode เช่น Diode array หรือ Charge coupled detector (CCD) ซึ่งใช้ใน ระบบที่ใช้คลื่นกระตุ้นเป็นช่วงยูวี-วิสิเบิลในระบบสเปกโตรมิเตอร์ระบบกระจายแสง ส่วน FT-spectrometer จะใช้ Germanium (Ge) หรือ Indium Gallium Arsenide (InGaAs) ถ้าใช้อุณหภูมิปกติ จะมีความไวถึงเลขคลื่น 3600 cm^{-1} แต่ถ้าหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ 77 K จะมีความไว สูงสุดเพียง 3000 cm^{-1} เท่านั้น

2.3.5 การวิเคราะห์โดยเทคนิคสเปกโทรสโกปีแบบสั้น

2.3.5.1 การวิเคราะห์โดยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี

1) การเตรียมตัวอย่าง

เทคนิครามานสเปกโทรสโกปีใช้วิเคราะห์สารตัวอย่างที่เป็นสารประกอบ อินทรีย์และอนินทรีย์ได้ทุกสถานะ ทั้งที่เป็นของแข็งที่มีลักษณะเป็นผง เป็นเม็ด หรือแผ่นฟิล์ม ของเหลวหรือสารละลาย หรือตัวอย่างที่มีสถานะเป็นแก๊ส สามารถวัดรามานสเปกตรัมได้โดยตรง ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างไม่ซับซ้อน อาจวัดสเปกตรัมได้โดยตรงจากภาชนะที่บรรจุสาร ตัวอย่างเช่น ขวดแก้ว ถุงพลาสติก หรือซองบรรจุเม็ดยา จะเห็นว่าอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ในเทคนิค รามานจึงเป็น Solid sample cell, Cuvette holder และ Gas cell holder

สารตัวอย่างที่เป็นของเหลวจะสามารถวัดรามานสเปกตรัมได้โดยตรงโดยไม่ต้องเตรียมสารตัวอย่างหรือเจือจางตัวอย่าง และใช้ปริมาณตัวอย่างเพียงเล็กน้อยประมาณ 5-10 ไมโครลิตร โดยการบรรจุสารตัวอย่างลงในหลอดแก้วคาพิลลารีหรือหลอดแก้วที่มีฝาปิด วัด สเปกตรัมโดยให้แสงเลเซอร์ผ่านหลอดที่ใช้บรรจุสารตัวอย่างตามขวางหรือตามความยาวของ ภาชนะที่ใช้บรรจุ สามารถปรับจุดโฟกัสของลำแสงเลเซอร์โดยการปรับตำแหน่งของหลอดบรรจุ สารตัวอย่างได้ตามแกน x y และ z เพื่อให้ได้ค่าสัญญาณสูงสุด และสามารถใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ได้ เนื่องจากน้ำให้สัญญาณรามานต่ำจึงนิยมใช้เป็นตัวทำละลาย นอกจากนี้ยังมีตัวทำละลายอื่น ๆ ที่ ใช้ได้ในเทคนิครามาน ได้แก่ คาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2) คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4) และ คลอโรฟอร์ม (CHCl_3) เป็นต้น และถึงแม้ว่าตัวทำละลายจะให้รามานสเปกตรัมแต่เนื่องจากมีเส้นรา มานแคบ และมีความเข้มของรามานที่เกิดจากแถบ Overtone จึงมีผลต่อการวัดรามานสเปกตรัมไม่ มาก

สารตัวอย่างที่เป็นผงจะใช้วิธีการอัดตัวอย่างให้แน่นในเซลล์บรรจุตัวอย่าง ส่วนสารตัวอย่างบางชนิดที่มีสีเข้มมากอาจเกิดการสลายตัวหรือไหม้ได้เมื่อถูกคลื่นแสงเลเซอร์ สามารถแก้ไขและลดปัญหาที่เกิดขึ้นได้หลายวิธี เช่น การใช้ Spinning cell บรรจุตัวอย่างเพื่อลด เวลาในการปรับแสงเลเซอร์ (Exposure time) ให้สั้นลง การลดกำลังของแสงเลเซอร์ให้น้อยลงโดย การปรับลดกระแสไฟฟ้าที่ใช้จุดหลอดเลเซอร์หรือปรับระยะ โฟกัสของลำแสงเลเซอร์ ในกรณีของ สารตัวอย่างบางชนิดที่ค่อนข้างไวต่อแสงเลเซอร์หรือสามารถดูดกลืนแสงเลเซอร์ได้ดีมากอาจถูก

เผาไหม้หรือสลายตัวได้ง่ายแม้ว่าจะถูกคลื่นแสงที่มีพลังงานต่ำก็ตาม ควรใช้วิธีผสมสารตัวอย่างกับเกลือแฮไลด์ เช่น โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) หรือโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) บดให้เข้ากันแล้วอัดเป็นเม็ด ข้อควรระวังคือการอัดตัวอย่างต้องใช้แรงอัดสูง อาจมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอัญรูป (Polymorphism) ของสารตัวอย่าง

นอกจากนี้แล้วยังมีปัญหาที่อาจเกิดจากสัญญาณรบกวนของฟลูออเรสเซนซ์ที่เกิดจากสารตัวอย่างเองหรือสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง สามารถแก้ไขได้โดยวิธีการ Drench quenching จะเป็นการฉายแสงเลเซอร์อาบสารตัวอย่างนาน ๆ จนกว่าสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์จะลดลงหรือหมดไป แต่จะใช้เวลาานานมาก โดยทั่วไปจะใช้วิธีเจือจางด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์ หรือผงเงิน

2) การวิเคราะห์รามานสเปกตรัม

แถบการสั่นที่ปรากฏในรามานสเปกตรัมเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า Polarizability ที่เกี่ยวข้องกับความเป็นสมมาตรของการสั่น จะให้ความเข้มแสงของการกระเจิงแบบรามานสูง เช่น โครงสร้าง $-C=C-$, $-C\equiv C-$, $-C\equiv N-$, $-C=S-$, $-S-S-$, $-N=N-$ และ $-S-H-$ ดังนั้นแถบของการสั่นของรามานที่ปรากฏในย่านบริเวณลายนิ้วมือที่เกิดจากโครงสร้างหลักของโมเลกุล เช่น ลักษณะของโครงสร้างสายโซ่ และวงแหวนไฮโดรคาร์บอนแบบอิมตัวหรือไม่อิมตัว จะแสดงข้อมูลของโครงสร้างการสั่นในช่วงนี้มากกว่าข้อมูลจากอินฟราเรด ทำให้สามารถบอกชนิดและขนาดของวงแหวนไฮโดรคาร์บอนได้จากตำแหน่งเลขคลื่นของการสั่นแบบยืดและมีสมมาตรของวงแหวนที่ปรากฏในรามานสเปกตรัม ส่วนข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสารประกอบอะโรมาติกจะมีความเข้มของรามานสูง

การวิเคราะห์รามานสเปกตรัมของสารอนินทรีย์ โดยเทคนิครามานสามารถใช้ตรวจสอบสารอนินทรีย์ได้ เนื่องจากสามารถเตรียมเป็นสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย นอกจากนี้พลังงานของการสั่นของพันธะระหว่างโลหะกับลิแกนด์อยู่ในช่วงเลขคลื่น $100-700\text{ cm}^{-1}$ ในช่วงเลขคลื่นนี้จะศึกษาทางเทคนิคอินฟราเรดได้ยาก จัดเป็นช่วงเลขคลื่นที่เป็น Raman active จึงใช้เป็นข้อมูลสำหรับหาองค์ประกอบ สำหรับพันธะระหว่างโลหะกับออกซิเจน เช่น อนุมูลของ VO_4^{3-} , $Al(OH)_4^-$, $Si(OH)_6^{2-}$ และ $Sn(OH)_6^{2-}$ จะให้รามานสเปกตรัม และรามานสเปกตรัมสามารถใช้บอกถึงโครงสร้างของอนุมูลในสารละลายที่ต้องการศึกษาได้ ซึ่งการวิเคราะห์รามานสเปกตรัมนั้นควรทราบถึงโหมดการสั่นที่ให้ Intense Raman band คือ

ก) การสั่นของโมเลกุลที่มีพันธะเคมีที่เกี่ยวข้องกับกำมะถันและแฮโลเจนจะให้ Strong Raman band เนื่องจากการสั่นแบบยืดของพันธะ $S-S$, $C-X$ ($X = Cl, Br$ หรือ I) เช่น หมู่ฟังก์ชันของ $C-Cl$, $C-CH_2-CH_2-Cl$, CH_2-Cl , $C-Br$ และ $C-CH_2-CH_2-Br$

ข) การสั่นแบบยืดของพันธะคู่และพันธะสามจะให้ Strong Raman band เนื่อง-

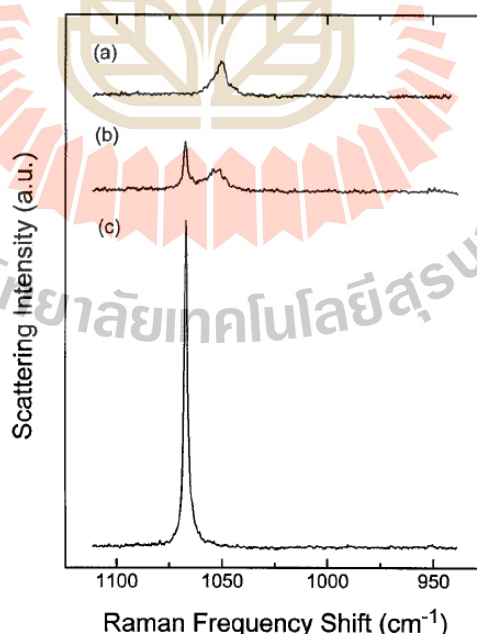
จากการสั่นแบบยืดของพันธะ $C=C$, $C=S$, $C\equiv N$ และ $C=N$ เป็นต้น ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของ $C-C\equiv C-H$, $C-C\equiv C-C$, $CH_2-C\equiv N$, $S-C\equiv N$

ค) โดยทั่วไปการสั่นของโมเลกุลแบบยืดที่มีสมมาตรจะให้ความเข้มมากกว่าการสั่นของโมเลกุลแบบยืดไม่มีสมมาตร

ง) สารประกอบที่เป็นอะโรมาติก (Ring compounds) เช่น มีวงแหวนเบนซีนและฟี-นิลอะลานินจะให้รามานแบรินด์ที่ประมาณ 1000 cm^{-1}

จ) โมเลกุลที่มีโหมมของการสั่นของหมู่แอลคิล (Alkyl chains) เรียกโหมมของการสั่นว่า Accordion mode จะให้รามานแบรินด์ที่ประมาณ $2800-3300\text{ cm}^{-1}$

อนุภาคฝุ่นประเภทเกลืออนินทรีย์ (Inorganic salt) ที่อยู่ในรูปของผลึก (Crystalline) ส่วนใหญ่จะนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโกปี เนื่องจากแถบสเปกตรัม (Bandwidth) ที่ได้จะมีลักษณะแคบ แต่หากตัวอย่างอยู่ในรูปสารละลาย (Solution) พบว่าสเปกตรัมที่ได้จะมีลักษณะกว้างออก (Broad) อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุล (Fung, and Tang, 1999) ดังตัวอย่างในภาพที่ 2.9 ซึ่งแสดงรามานสเปกตรัมของอนุภาคโซเดียมไนเตรด ($NaNO_3$) สำหรับอนุภาคชนิดเดียวกันแต่มีสถานะทางกายภาพที่แตกต่างกัน พบว่าสเปกตรัมที่เกิดขึ้นมีลักษณะแตกต่างกัน อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงการสั่นของโมเลกุล



ภาพที่ 2.9 แสดงรามานสเปกตรัมของอนุภาคโซเดียมไนเตรดในสถานะที่แตกต่างกันคือ (a) หยดของสารละลาย (b) ระหว่างการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวของแข็งและ (c) อนุภาคผลึก (Fung and Tang, 1999)

อนุภาคฝุ่นละอองโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (Hydrate) และในรูปที่ปราศจากน้ำ (Anhydrous) ขึ้นอยู่กับธรรมชาติทางเคมีของสารที่เป็นองค์ประกอบ แอมโมเนียมซัลเฟต $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$ จัดเป็นอนุภาคที่พบทั่วไปในฝุ่นละออง ซึ่งส่วนใหญ่จะพบในรูปที่ปราศจากน้ำ แต่ก็พบว่ามีการเกิดอนินทรีย์หลายชนิดที่อยู่ในรูปของผลึกมากกว่า 2 รูปแบบ เช่น แมกนีเซียมไนเตรด $((\text{Mg}(\text{NO}_3)_2)$ จะอยู่ในสถานะที่เสถียรในบรรยากาศ โดยมีน้ำเป็นองค์ประกอบที่อุณหภูมิต่ำกว่า $-20\text{ }^\circ\text{C}$ พบว่าอยู่ในรูป $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า $-8\text{ }^\circ\text{C}$ พบว่าอยู่ในรูป $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ โดยทั่วไปฝุ่นละอองในบรรยากาศจะพบสารประกอบประเภทไนเตรดและซัลเฟต ซึ่งเลขคลื่นที่เป็นค่าจำเพาะของสารประกอบเกลืออนินทรีย์ที่พบในฝุ่นละออง ทั้งที่อยู่ในรูปที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบและในรูปที่ปราศจากน้ำแสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 เลขคลื่นที่เป็นค่าจำเพาะของสารประกอบเกลืออนินทรีย์ (Fung and Tang, 1999)

สารประกอบ	Frequency (cm^{-1})	สารประกอบ	Frequency (cm^{-1})
LiNO_3	1070	$\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1008
$\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	1056	Na_2SO_4	996
NaNO_3	1067	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	992
KNO_3	1053	K_2SO_4	983
NH_4NO_3	1050	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	983
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1059	Na_2HPO_4	935
$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$	1056	Na_2CrO_4	851
$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	1047	K_2CrO_4	852

การวิเคราะห์รามานสเปกตรัมของสารอินทรีย์ พบว่าการสะสมข้อมูลของสารอินทรีย์มาตรฐานในเทคนิคอินฟราเรด (Standard IR spectrum) นั้นมีมากกว่าเทคนิครามาน (Standard Raman spectrum) มาก จึงทำให้เทคนิคอินฟราเรดยังคงเป็นที่นิยมใช้กันมากในการตรวจสอบหาโครงสร้างของสารอินทรีย์ต่างๆ ที่รามานสเปกตรัมให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของสารอินทรีย์ที่มีกลุ่ม ไม่มีขั้ว (Non-polar groups) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งข้อมูลนี้ไม่มีในอินฟราเรดสเปกตรัม อย่างไรก็ตามสามารถเลือกเทคนิค NMR หรือ Mass spectroscopy มาใช้หา Non-polar groups ได้ จึงพอจะกล่าวได้ว่าการนำรามานสเปกตรัมมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบหาโครงสร้างของสารอินทรีย์มีอยู่น้อย แต่ใช้รามานสเปกตรัมเพื่อช่วยเสริมข้อมูลที่ได้จากอินฟราเรดสเปกตรัม

Non-polar groups จะให้ Strong Raman scattering จึงใช้ศึกษาสารพอลิเมอร์

และสารประกอบอะโรมาติกได้ดีทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ เช่น อนุภาคที่ประกอบด้วยอะตอมชนิดเดียวกัน (Homoatomic species) C–C, C=C, C≡C, O–O, O=O, N–N, N≡N และ S–S จะให้ Raman scattering ที่สูง

การที่พันธะ C=C มี Stretching vibration จะให้ Strong Raman scattering จึงใช้ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งให้รามานสเปกตรัมที่เลขคลื่น 1,620-1,680 cm^{-1}

การเก็บข้อมูล Standard raman spectrum ครอบคลุมได้ในช่วงความถี่ต่างๆ (น้อยกว่า 200 cm^{-1}) ได้เนื่องจากโมโนโครเมเตอร์ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดแสงที่หลงมาจากที่อื่น จึงทำให้สามารถศึกษาสารตัวอย่างที่เป็นของแข็งหรือของเหลวได้และให้พีคที่ 5-6 cm^{-1} และสำหรับสารตัวอย่างที่เป็นแก๊สจะให้พีคความถี่ต่ำกว่า 2 cm^{-1} ได้ ซึ่งการวิเคราะห์โครงสร้างของโมเลกุลจากเลขคลื่นรามานสเปกตรัมสรุปได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันที่พบในรามานสเปกตรัม (แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ, 2552)

Wavenumber (cm^{-1})	Group	Possible compound
3050-3100	=CH ₂	Alkenes
3050-3000	=CH or –CH=CH–	Aromatic compounds, alkenes
2900-3000	–CH, –CH ₂ , –CH ₃	Aliphatic groups
2500-2600	–SH	Thiols, mercaptans
2100-2300	–C≡C–	Alkynes
2200-2260	–C≡N–	Nitriles
1650	C=C	Alkenes
1600-1650	C=N	Heterocyclic compounds
1600	C=C	Aromatic compounds
1280-1420	C–N	Amides, aromatic amines
1330-1390	NO ₂	Nitro compounds
1000	Benzene ring	Aromatic compounds
650-850	C–Cl	Chloro compounds
	Benzene ring	Mono-, m-di-, and 1, 3, t-trisubst benzenes
570-700	C–S	Sulfide, mercaptans
490-650	C–Br	Bromo compounds

ตารางที่ 2.7 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันที่พบในรามานสเปกตรัม (แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ, 2552)
(ต่อ)

Wavenumber (cm ⁻¹)	Group	Possible compound
430-550	S-S	Disulfides

จากการศึกษาของ Harpale et al. (2006) ได้ศึกษาทดลองเพื่อจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองโดยใช้เทคนิครามานสเปกโตรสโกปี โดยจากการศึกษาเมื่อนำสเปกตรัมที่ได้จากการทดลองเทียบกับสเปกตรัมอ้างอิงจากการศึกษาของ Degen and Newman, 1993; Degen, 1997 พบว่าฝุ่นละอองประกอบด้วยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์หลายชนิดซึ่งแสดงเลขคลื่น (Wavenumber, cm⁻¹) ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 เลขคลื่นของสารประกอบในฝุ่นละออง (Harpale et al., 2006)

สารประกอบ	Wavenumber (cm ⁻¹)	สารประกอบ	Wavenumber (cm ⁻¹)
(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈	1229	CH ₃ in alkanes	2952-2964
K ₂ S ₂ O ₈	1287	CH ₃ =C- in alkanes	2984
KNO ₃	1345	(NH ₄) ₂ S ₂ O ₆	3081
Sr(NO ₃) ₂	1403	NH ₄ HB ₄ O ₇ ·3H ₂ O	3103
Li ₂ CO ₃	1460	NH ₄ HSO ₄	3152
Cycloalkanes	1514	-NH-stretch	3180
C=C=C in alkaenes	1988	NH ₄ NO ₃	3221
Benzene ring	2002	H ₃ BO ₃	3238
KSCN	2052	Fe(NH ₄) ₂ (SO ₄) ₂ ·6H ₂ O	3279-3281
C≡C in thiocynate	2180	NaBO ₂ ·4H ₂ O	3293
CH ₃ in alkanes	2876-2884	-NH- valence	3331
CH ₃ in alkanes	2876-2884	CH ₂ -methylene, or CH-stretch vibration in alkanes	2904-2929

จากตารางที่ 2.8 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโกปีจะให้ข้อมูลเชิงคุณภาพที่แสดงถึงองค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคฝุ่นละออง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ

Escribano et al. (2001) ที่ระบุว่าเทคนิครามานสเปกโทรสโกปีเป็นเครื่องมือหนึ่งที่สามารถใช้ในการจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคฝุ่นละอองได้

2.3.5.2 การวิเคราะห์โดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

1) การเตรียมตัวอย่าง

เทคนิคอินฟราเรดเป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างได้ทั้งในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส และสารทุกชนิดคลุกคลื่นอินฟราเรดได้ ดังนั้นวิธีการเตรียมสารตัวอย่างที่เหมาะสมจึงเป็นขั้นตอนเบื้องต้นที่สำคัญมาก การเลือกใช้สารที่เป็นตัวผสม เจือจาง หรือตัวละลายควรให้สเปกตรัมที่มีแถบการสั่นไม่ทับซ้อนกับแถบการสั่นที่สำคัญของสารตัวอย่าง

สารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ใช้วิธีการอัดเป็นเม็ด (Disc หรือ pellet) เตรียมได้ โดยการบดสารตัวอย่างที่ไม่มีความชื้นกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ที่อบแห้งในอัตราส่วนประมาณ 1-5 มิลลิกรัมต่อ 200 มิลลิกรัม และอัดเป็นแผ่นบางด้วยเครื่องอัดเม็ดอินฟราเรดที่ความดัน 10 ตัน ประมาณ 2-3 นาที การใช้เครื่องดูดสุญญากาศขณะอัดสารตัวอย่างจะช่วยลดความชื้นจากสารตัวอย่าง ทำให้ได้เม็ดตัวอย่างที่ใส ข้อดีของการใช้ KBr คือเป็นสารที่ไม่คลุกคลื่นอินฟราเรด แต่จะลดความชื้นได้ง่าย

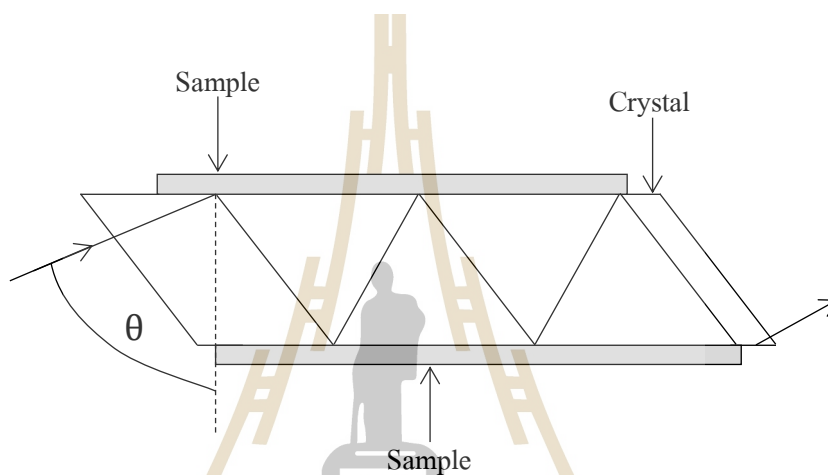
สารตัวอย่างที่เป็นของเหลวหรือเป็นสารละลาย จะวัดอินฟราเรดโดยตรงโดยใส่สารตัวอย่างในเซลล์ใส่ของเหลว สารตัวอย่างบางชนิดที่มีความเข้มข้นมากอาจคลุกคลื่นแสงอินฟราเรดได้มากจึงใช้วิธีเจือจางด้วยตัวทำละลาย ส่วนกรณีที่สารตัวอย่างเป็นของเหลวข้นและมีความหนืดสูง อาจเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีการง่ายๆ โดยการหยดตัวอย่างบนแผ่นเซลล์ NaCl และประกบปิดด้วยแผ่น NaCl อีกแผ่นหนึ่ง และนำไปวัดอินฟราเรดสเปกตรัม

สารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ของเหลว แผ่นฟิล์ม เช่น พอลิเมอร์ หรือวัสดุที่ทึบแสงอาจวัดการส่องผ่านของแสงได้ยาก จึงใช้เทคนิคการวัดค่าการสะท้อน (Reflectance techniques) ซึ่งแบ่งตามลักษณะการสะท้อนออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่เกิดจากการสะท้อนภายนอก (External reflectance) เกิดจากการสะท้อนลำแสงอินฟราเรดไปยังสารตัวอย่างแล้วเกิดการสะท้อนของลำแสงโดยตรงจากผิวหน้าของสารตัวอย่าง เช่น Specular Reflectance และ Diffuse Reflectance ในขณะที่อีกกลุ่มหนึ่งเกิดจากการสะท้อนจากภายในตัวกลาง (Internal reflectance) ได้แก่ Attenuated Total Reflectance (ATR) และ Multiple Internal Reflectance (MIR) ซึ่งแต่ละวิธีทำให้ความเข้มข้นของการสะท้อนแสงขึ้นกับมุมตกกระทบ มุมสะท้อนของคลื่นแสงอินฟราเรด และลักษณะของสารตัวอย่าง

2) เทคนิค Attenuated Total Reflectance (ATR)

ATR เป็นวิธีการที่ใช้วัดอินฟราเรดสเปกตรัมของสารตัวอย่างที่ไม่สามารถเตรียมตัวอย่างได้โดยวิธีการง่ายๆ เช่น ของแข็งที่ละลายในตัวทำละลายต่าง ๆ ใต้น้อยหรือไม่ละลาย

แผ่นฟิล์ม เส้นด้ายหรือเส้นใย ของแข็งกึ่งเหลว และตัวอย่างที่มีสภาพเป็นผง เมื่อผ่านลำแสงฟลักต์ตัวกลางแล้วทำให้เกิดการสะท้อนแสงภายในตัวกลางทั้งหมด จะเกิดขึ้นได้เมื่อมุมตกกระทบของลำแสงที่รอยต่อระหว่างผลึกตัวกลางกับสารตัวอย่างมีขนาดใหญ่กว่ามุมวิกฤติ ซึ่งมีขนาดของมุมขึ้นกับดัชนีหักเหของผลึกและสารตัวอย่าง ดังภาพที่ 2.10 แสดงการสะท้อนของแสงระหว่างสารตัวอย่างและผลึก ATR ขณะที่ลำแสงทะลุผ่านสารตัวอย่างแม้จะเป็นเพียงไม่กี่ไมครอนก็ตาม ลำแสงอินฟราเรดจะสูญเสียพลังงานที่ความยาวคลื่นที่ถูกสารตัวอย่างดูดกลืน แต่เทคนิค ATR เป็นการสะท้อนภายในที่ทำให้เกิดการสะท้อนหลายครั้ง จะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงเพิ่มมากขึ้นด้วย



ภาพที่ 2.10 การสะท้อนในผลึก ATR (แมน อมรสิทธิ์ และคณะ, 2552)

3) การวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัม

ในการวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารตัวอย่าง การตรวจหาแถบการสั่นหรือพีคของหมู่ฟังก์ชันหลักใน โครงสร้างของสารประกอบที่อาจปรากฏในสเปกตรัมจะทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้าง ซึ่งการวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัมมีวิธีการดังนี้

ก) การตรวจหาหมู่คาร์บอนิล (C=O) โดยแถบสเปกตรัมจะปรากฏในช่วง $1660-1820\text{ cm}^{-1}$ และมีการดูดกลืนแสงมากที่สุด ซึ่งถ้ามีหมู่ C=O ให้ตรวจหาหมู่ฟังก์ชันต่อไปนี้

- ถ้าเป็นกรด ให้ตรวจหาหมู่ -OH จะปรากฏแถบสเปกตรัมกว้างในช่วง $2400-3400\text{ cm}^{-1}$ จะซ้อนทับกับแถบสเปกตรัมของ -CH

- ถ้าเป็นเอไมด์ ให้ตรวจหาหมู่ -NH จะปรากฏแถบสเปกตรัมที่มีความสูงขนาดกลางใกล้ 3400 cm^{-1}

- ถ้าเป็นเอสเทอร์ ให้ตรวจหาหมู่ C-O จะปรากฏแถบสเปกตรัมที่มีการดูดกลืนแสงได้มากใกล้ $1000-1300\text{ cm}^{-1}$

- ถ้าเป็นแอนไฮไดรด์ จะปรากฏแถบสเปกตรัม (C=O) 2 แถบที่ 1760 cm^{-1} และ 1810 cm^{-1}

- ถ้าเป็นแอลดีไฮด์ ให้ตรวจหาหมู่ -CH จะปรากฏแถบสเปกตรัม 2 แถบที่มีการดูดกลืนแสงน้อยมากใกล้ 2750 cm^{-1} และ 2850 cm^{-1} ทางด้านขวาของแถบสเปกตรัม Aliphatic C-H

- ถ้าเป็นคีโตนจะไม่พบแถบสเปกตรัมที่แสดงการสั่นของหมู่ฟังก์ชันที่แสดงว่าเป็นกรด เอไมด์ เอสเทอร์ แอนไฮไดรด์ หรือแอลดีไฮด์

ข) ถ้าเป็นแอลกอฮอล์ให้ตรวจหา -OH แถบสเปกตรัมจะกว้างมากใกล้ $3300-3400\text{ cm}^{-1}$ สามารถยืนยันได้ถ้าปรากฏแถบสเปกตรัมของ C-O ใกล้ $1000-1300\text{ cm}^{-1}$

- ถ้าเป็นเอมีน ให้ตรวจหาหมู่ -NH จะปรากฏแถบสเปกตรัมความสูงปานกลางใกล้ 3400 cm^{-1}

- ถ้าเป็นอีเทอร์ ให้ตรวจหาหมู่ C-O ใกล้ $1000-1300\text{ cm}^{-1}$ แต่จะไม่พบแถบสเปกตรัมของ -OH ใกล้ 3400 cm^{-1}

ค) พันคู่ และ/หรือ วงแหวนอะโรมาติก ถ้ามี C=C จะพบแถบสเปกตรัมที่มีการดูดกลืนแสงน้อยใกล้ 1650 cm^{-1} , ถ้าพบแถบสเปกตรัมสูงปานกลางถึงสูงในช่วง $1450-1600\text{ cm}^{-1}$ จะเป็นแถบสเปกตรัมที่เกิดจากวงแหวนอะโรมาติก

- ยืนยันว่าเป็นพันธะคู่หรืออะโรมาติก โดยตรวจหาหมู่ -CH ในช่วง 3000 cm^{-1}

- ถ้าพบที่เลขคลื่นยาวกว่า 3000 cm^{-1} จะเป็นอะโรมาติกและไวนิล C-H

- ถ้าพบที่เลขคลื่นสั้นกว่า 3000 cm^{-1} จะเป็นอะลิฟาติก C-H

ง) พันธะสามจะพบแถบสเปกตรัมบาง ชัด สูงปานกลางใกล้ 2250 cm^{-1} ถ้ามีพันธะสาม จะพบแถบสเปกตรัมที่มีขนาดเล็กแต่ชัดใกล้ 2150 cm^{-1}

จ) หมู่ไนโตรพบ 2 แถบสเปกตรัมใกล้ $1530-1600\text{ cm}^{-1}$ และ $1300-1390\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งการวิเคราะห์โครงสร้างของโมเลกุลจากเลขคลื่นอินฟราเรดสเปกตรัมสรุปได้ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัม (แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ, 2552)

Wavenumber (cm ⁻¹)	Group	Possible compound
3100-3700	-OH	Alcohols, Aldehydes, Carboxylic acid
	-NH	Amides, Amines
	≡C-H	Alkynes
3000-3100	=CH	Aromatic compounds
	-CH ₂ or -CH=CH-	Alkenes or unsaturated rings
2800-3000	-CH, -CH ₂ , -CH ₃	Aliphatic groups
2600-2800	-CHO	Aldehydes (Fermi doublet)
2400-2700	-POH	Phosphorus compounds
	-SH	Mercaptans and Thiols
	-PH	Phosphines
2000-2400	-C≡N	Nitriles
	-N=N ⁺ =N ⁻	Azides
	-C≡C-	Alkynes
1650-1870	C=O	Acid halides, Aldehydes, Amides, Amino acid, Aldehydes, Carboxylic acid, Lactams Esters ketones, Lactones, Quinones
	C=C, C=N, NH	Unsaturated aliphatic, Aliphatic, Unsaturated heterocycles, Amides, Amines, Amino acid
1300-1550	NO ₂	Nitro compounds
	CH ₃ and CH ₂	Alkanes, Alkenes
1000-1300	C-O-C and C-OH	Ethers, Alcohols, Sugars
	S=O, P=O, C-F	Sulfur, Phosphorus, and Fluorine compounds
800-1100	Si-O and P-O	Oganosilicon and Phosphorus compounds
650-1000	=C-H	Alkenes and Aromatic compounds
	-NH	Aliphatic, Amines
400-800	C-halogen	Halogen compounds

Coury and Dillner (2009). ได้นำเทคนิค ATR-FTIR มาประยุกต์ใช้ในการจำแนก หมู่ฟังก์ชันสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของฝุ่นละออง ซึ่งในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ ใช้จำนวนตัวอย่างเพียงเล็กน้อย และไม่มีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง จากการศึกษาและทดลองพบว่า เทคนิคนี้สามารถนำมาใช้จำแนกองค์ประกอบของฝุ่นละอองที่เป็นสารอินทรีย์ได้ สอดคล้องกับการศึกษาวิจัยของ Brown, Dangler, Burke, Hering, and Allen. (1990) ซึ่งใช้เทคนิค FTIR ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของฝุ่นละออง โดยการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองด้วยเครื่องมือเก็บตัวอย่าง Impactor ชนิด Low pressure แบบแยกขนาด จากการศึกษาทดลองชี้ให้เห็นว่า องค์ประกอบของฝุ่นละอองประกอบด้วยสารในกลุ่ม แอมโมเนียม, ซัลเฟต, ไนเตรต, อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน, อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน และคาร์บอนิล ซึ่งช่วงของการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดแสดงดังตาราง 2.10

ตาราง 2.10 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองด้วย FTIR (Brown and et al., 1990)

Functionality	Infrared absorption range (cm ⁻¹)
C-H (Aromatic)	3000-3120
C-H (Aliphatic)	2800-3000
C=O (Carbonyl)	1640-1850
NH ₄ ⁺ (Ammonium)	1390-1500
NO ₃ ⁻ (Nitrate)	1200-1390
SO ₄ ²⁻ (Sulfate)	1000-1200

2.4 อินฟราเรดและรามานไมโครสโกปี

เป็นเทคนิคที่นำเครื่องอินฟราเรดและรามานสเปกโตรมิเตอร์มาใช้งานร่วมกันกับกล้องจุลทรรศน์ที่ทำหน้าที่เป็น Sampling probe โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ประสิทธิภาพสูงที่มีกำลังขยายสูง ให้ความแตกต่างที่คมชัด และมี High resolution สามารถบันทึกเป็นรูปภาพ โดยแสดงความแตกต่างของข้อมูลระหว่างจุดตัวอย่างที่อยู่ใกล้กันมากขนาดไมครอนได้อย่างชัดเจน (Spatial information) ในขณะที่เครื่องอินฟราเรดและรามานให้ข้อมูลเป็นสเปกตรัมแสดงโครงสร้างการสั่นของโมเลกุล (Chemical information) เรียกเทคนิคนี้ว่า Chemical Imaging เป็นเทคนิคที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ทางเคมี ชีววิทยาและด้านการแพทย์ เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถใช้ได้กับตัวอย่างที่มีสภาพเป็นของแข็ง ใช้ได้แม้กับตัวอย่างที่มีขนาดเล็กถึง 10 ไมโครเมตร (Infrared) หรือ 1 ไมโครเมตร (Raman) นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสิ่งเจือปนในสารตัวอย่างถึงแม้ว่าจะมีปริมาณน้อยมากได้ด้วย โดยเปรียบเทียบสเปกตรัมที่ได้จากจุดต่าง ๆ ของสารตัวอย่าง

2.4.1 หลักการของ Chemical Imaging

เครื่องมือโดยทั่วไปมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนดังนี้ คือ แหล่งกำเนิดแสง ระบบคัดแยกแสง (อาจเป็นระบบ Interferometer หรือ Filters) และเครื่องบันทึกภาพ (Detector array camera) โดยเมื่อบันทึกข้อมูลเป็นสเปกตรัมกับความยาวคลื่นแสงที่จุด Mapping point ต่างๆ จะได้สเปกตรัมจำนวนมากตามจำนวนของ Mapping point เรียกข้อมูลกลุ่มนี้ว่า Hyperspectral (มีระบบคัดแยกแสงเป็น Interferometer หรือ Tunable filters) ส่วนข้อมูลที่แสดงค่าของพลังงานแสงเฉพาะความยาวคลื่นแสงช่วงหนึ่งๆ ที่จุด Mapping point ต่าง ๆ เรียกว่า Multispectral (มีระบบคัดแยกแสงเป็น Fixed filters) และเรียกข้อมูลแต่ละชุดว่า Hypercube ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นในลักษณะของภาพสามมิติ โดยที่แกน x และ y จะแสดงข้อมูลของสเปกตรัมที่จุด Mapping point ต่าง ๆ ในขณะที่แกน z แสดงข้อมูลของความยาวคลื่นแสงต่าง ๆ โดยสามารถเลือกดูข้อมูลภาพที่ความยาวคลื่นหนึ่ง ๆ ได้ ทำให้ผู้วิเคราะห์เลือกดูสเปกตรัมได้จาก Mapping point ตำแหน่งที่สนใจเป็นพิเศษได้ เช่น ตรวจสอบจุดที่มีสเปกตรัมที่แตกต่างจากสเปกตรัมอื่น ๆ หรือตรวจสอบปนเปื้อนปลอมปน เป็นต้น

ในการวัดสเปกตรัมอาจจะวัดทีละจุดต่อ 1 ตำแหน่ง (Single-point mapping) โดยจุดวัดตัวอย่างจะเลื่อนไปที่ละจุดตามแกน x และ y จนจบแถวตามระยะที่กำหนดโดยใช้โปรแกรมที่ควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ หรือวัดแต่ละแถวจะได้ภาพเชิงเส้น (Line-image) โดยใช้ Linear array detector ประมาณ 16-28 pixels (Liner array mapping) โดยการวัดสเปกตรัมจะเลื่อนไปที่ละแถว หรือวัดสเปกตรัมเป็นภาพสองมิติ โดยใช้ Focal Plane Array Detector (FPA) ประมาณ 256-16,384 pixels จะบันทึกข้อมูลของตัวอย่างบนพื้นที่กำหนดเลือกทีละความยาวคลื่นในเวลาเดียวกันได้โดยไม่ต้องเลื่อนสารตัวอย่าง จึงวัดสเปกตรัมได้จำนวนหลายหมื่นสเปกตรัมในขณะที่ Single-point mapping วัดข้อมูลได้เพียง 16-28 สเปกตรัมเท่านั้น ดังนั้นจึงมีการนำเทคนิค Chemical imaging ไปประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิคทางอินฟราเรดย่านกลาง อินฟราเรดย่านใกล้ และรามานสเปกโทรสโกปี

2.4.2 อินฟราเรดไมโครสโกปี

เป็นเครื่องมือที่ประกอบด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ และกล้องไมโครสโคป วัดภาพอินฟราเรดไมโครสโคปโดยใช้ N_2 -liquid MCT detector วัดเป็นค่าการส่องผ่าน (Transmission) ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) หรือค่าการสะท้อน (Reflection) และสามารถดูสารตัวอย่างโดยใช้แสงอินฟราเรดหรือแสงวิสิเบิลได้ทางกล้องวิดีโอหรือจอภาพ หรืออาจแยกวัดอินฟราเรดสเปกตรัมสารตัว -

เพียงอย่างเดียวได้โดยใช้ DTGS detector ที่อุณหภูมิห้องปกติ

ทางเดินของแสงที่ส่องผ่านสารตัวอย่างเมื่อเป็นการวัดการส่องผ่าน แสงจากแหล่งกำเนิดแสงหรือจาก Interferometer ถูกโฟกัสไปยังตำแหน่งของสารตัวอย่าง และแสงที่ไม่ถูกดูดกลืนจะ

ผ่านตัวอย่างไปยังตัววัดสัญญาณ โดยทั่วไปจะใช้แผ่นเซลล์ที่ใส แสงส่องผ่านได้สองแผ่นวางประกบตัวอย่างอยู่ตรงกลาง นิยมใช้กับสารตัวอย่างที่หน้าเรียบหรือสามารถตัดเป็นแผ่นบางได้

2.4.3 รามานไมโครสโกปี

รามานสเปกตรัมเป็นการวัดความเข้มแสงของการกระเจิงแสงที่เลื่อนไปจากแสงเลเซอร์ที่ใช้กระตุ้นตัวอย่าง ดังนั้นเทคนิครามานจึงมีข้อได้เปรียบกว่าเทคนิคอินฟราเรดที่สามารถทะลุผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างได้โดยวิธีการที่เรียกว่า Confocal imaging ใช้ได้กับสารตัวอย่างที่มีปริมาณเพียงเล็กน้อยและไม่เป็นการทำลายสารตัวอย่าง แต่ต้องพึงระวังไม่ให้แสงเลเซอร์มีพลังงานสูงเกินไป เพราะอาจทำให้สารตัวอย่างไหม้และถูกทำลายได้

การใช้เครื่องฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ และเครื่องฟูเรียทรานส์ฟอร์มรามานสเปกโตรมิเตอร์มีข้อแตกต่างแสดงดังตาราง 2.11

ตาราง 2.11 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเครื่องฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ และเครื่องฟูเรียทรานส์ฟอร์มรามานสเปกโตรมิเตอร์ (แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ, 2552)

	Infrared	Raman
Physical effects	Absorption Changing of the dipole moment	Scattering Changing of polarizability
Sample preparation	Optimal thickness (transmission mode) or sample contact (ATR) mode necessary	No contact, no destruction, simple preparation, water as solvent or glass container do not disturb the measurement
Problems	Strong absorption of glass, water, CO ₂	Fluorescence
Material	Mainly organic compounds	Nearly unlimited
Resolution		
- lateral	10-20 μm	1-2 μm
- confocal	Not possible	Ca 2.5 μm
Chemical imaging	Mapping	Mapping and global imaging
Frequency range	700-4000 cm^{-1}	50-4000 cm^{-1}

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Anil et al. (2014) ได้ศึกษาองค์ประกอบของฝุ่นละออง โดยการเก็บฝุ่นละอองแยกเป็น 2 ขนาด คือ ฝุ่นหยาบ (Coarse) และฝุ่นละเอียด (Fine) เก็บตัวอย่างในช่วงวันที่ 27 กุมภาพันธ์-8 มีนาคม 2009 ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการพัดพาของฝุ่นจากทะเลทราย (Saharan dust) นำมาวิเคราะห์ทางเคมีโดยใช้เทคนิคฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีร่วมกับ Attenuated total reflectance (ATR-FTIR) ซึ่งใช้ในการจำแนกหมู่ฟังก์ชันที่พบในฝุ่นละออง ผลการทดลองพบหมู่ฟังก์ชันคือ แอลกอฮอล์, แอมโมเนียม, อะลิฟาติกคาร์บอน, คาร์บอนิล, ออร์กาโนไนเตรท, ไนเตรท, ซิลิเกต, ซิลิกา, คาร์โบลีน และ แคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้พบว่ากลุ่มของหมู่ฟังก์ชันที่เห็นได้ชัด คือ ซิลิเกต, ซิลิกา, คาร์โบลีน และ แคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของปริมาณฝุ่นละอองที่เก็บในช่วงที่เกิดการพัดพาของฝุ่นจากทะเลทราย ช่วงเลขคลื่นที่ตรวจพบที่ $800-1030\text{ cm}^{-1}$ คือ ไอออนของซิลิเกตจากฝุ่นละออง ถูกนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงฝุ่นหยาบที่ถูกพัดพาอยู่ในบรรยากาศ จากการทดลองในครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าเทคนิค ATR-FTIR เป็นเทคนิคที่รวดเร็วและสะดวกในการนำมาใช้เพื่อจำแนกองค์ประกอบของฝุ่นละออง และสามารถนำมาใช้จำแนกฝุ่นหยาบที่ถูกพัดพาอยู่ในบรรยากาศ

Ayora, Ballesteros, Pérez, Rupérez, and Laserna. (1997) ได้ศึกษาทดลองเพื่อหาธาตุปริมาณน้อยในฝุ่นละออง โดยใช้เทคนิค Surface-Enhanced Raman Spectroscopy เก็บตัวอย่างบนกระดาษกรองที่เคลือบด้วยโลหะเงิน และใช้เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ในการหาองค์ประกอบของธาตุในฝุ่นละออง การวิเคราะห์ตัวอย่างฝุ่นละอองบนกระดาษกรองจะวิเคราะห์ทั้ง SER สเปกตรัมและรามานสเปกตรัม โดยใช้อาร์กอนไอออนเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแสงพลังงานสูงที่มีความยาวคลื่น 488 นาโนเมตร วิเคราะห์ SER สเปกตรัมโดยการสแกนครั้งเดียว โดยใช้ความเร็วในการสแกน 6 nm/min และใช้ Resolution เท่ากับ 2 cm^{-1} ส่วนการวิเคราะห์รามานสเปกตรัมจะใช้ Nd:YAG laser เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1064 นาโนเมตร สแกน 100 ครั้งและใช้ Resolution เท่ากับ 4 cm^{-1} โดยใช้สารเคมี 4 ชนิดคือ Acridine (A), Quinacrine (Q), 4-Nitrophenol (PNP), และ 2,4-Dinitrophenol (DNP) สำหรับใช้เป็นตัวแทนของฝุ่นละอองสังเคราะห์ (Synthetic aerosol) การใช้เทคนิค SERS สามารถแสดงลักษณะสเปกตรัม (Fingerprinting) ของสารตัวอย่างที่มีปริมาณน้อยในระดับนาโนกรัมได้

Coury and Dillner (2008) ได้นำเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีร่วมกับ Attenuated total reflectance (ATR-FTIR) มาประยุกต์ใช้สำหรับวิเคราะห์ฝุ่นละอองในบรรยากาศในรูปของหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ ซึ่งเทคนิคนี้ได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์ฝุ่นละอองที่ถูกเก็บแบบแยกขนาด โดยเป็นการเก็บตัวอย่างในช่วงฤดูหนาวและฤดูร้อนในปี ค.ศ. 2004 แบ่งจุดเก็บตัวอย่างออกเป็น 3 จุด คือ A downtown Phoenix, A rural site near Phoenix และ An urban

fringe site จากผลการทดลองได้แบ่งกลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ซึ่งถูกจำแนกมาจากตัวอย่างฝุ่นละอองออกเป็น อะลิฟาติก และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน, เมทิลีน, เมทิล, แอลคีน, แอลดีไฮด์/คีโตน, กรดคาร์บอกซิลิก, เอสเทอร์/แลค โตน, กรดแอนไฮดรายด์, คาร์โบไฮเดรตไฮดรอกซิล และอีเทอร์, กรดอะมิโน และเอมีน นอกจากนี้ยังพบสารประกอบในกลุ่มอนินทรีย์คือ แอมโมเนียมซัลเฟต และแอมโมเนียมไนเตรท และผลการทดลองจากการเปรียบเทียบมวลรวมที่วัดโดยเทคนิค ATR-FTIR และเทคนิคการชั่งน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าเทคนิคนี้สามารถนำมาใช้หาปริมาณฝุ่นละอองในตัวอย่างแบบแยกขนาดได้และผลการวิเคราะห์ตัวอย่างฝุ่นละอองโดยเทคนิคนี้ชี้ให้เห็นว่าตัวอย่างที่เก็บจากแหล่งกำเนิดที่ต่างกัน 3 จุด มีความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ต่างกัน

Escribano et al. (2001) ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบของอนุภาคที่ประกอบด้วยคาร์บอน โดยใช้เทคนิครามานสเปกโทรสโกปีและศึกษาลักษณะโครงสร้างของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ซึ่งใช้วัสดุอ้างอิง (Reference materials) เป็นตัวแทนของตัวอย่าง ได้แก่ กราไฟต์อัดก้อน กราไฟต์สังเคราะห์ ผลึกขนาดเล็กของกราไฟต์ ผงกราไฟต์ แก้ว (Glassy carbon) ถ่าน หมึกพิมพ์ และเขม่าจากเครื่องยนต์นำตัวอย่างวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งใช้ อาร์กอนไอออนเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 514.5 นาโนเมตร ผลการทดลองพบว่าตัวอย่างที่มีองค์ประกอบของกราไฟต์สามารถตรวจวัดได้โดยเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ และสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ยังทำให้ทราบถึงลักษณะความสมบูรณ์ของ โครงสร้างผลึกคาร์บอนซึ่งแสดงออกมาในรูปความถี่ของรามาน (cm^{-1}) โดยพบว่าความถี่ของรามานในช่วง 1340 cm^{-1} นั้นพันธะของกราไฟต์จะมีลักษณะไม่เป็นระเบียบ (D-band) และความถี่ของรามานในช่วง $1500\text{-}1600 \text{ cm}^{-1}$ พันธะของกราไฟต์จะมีลักษณะเป็นระเบียบ (G-band)

Fung and Tang (1999) ได้ศึกษาการนำเทคนิค Laser raman spectroscopy มาใช้ในการระบุองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละออง ออกแบบการทดลองโดยใช้แหล่งกำเนิดคลื่นแสงที่แตกต่างกันคือ Argon ion laser และ Krypton ion laser และวัดการกระเจิงแสงแบบรามาน (Raman scattering) ของอนุภาคฝุ่นละออง ผลการศึกษาพบว่าแหล่งกำเนิดคลื่นแสงที่เหมาะสมคือ Argon ion laser เนื่องจากให้เส้นพลังงานสูงในช่วงวิสิเบิลสเปกตรัมซึ่งเหมาะสมกับการกระตุ้นแบบรามาน (Raman excitation) มากกว่า และพบว่าเทคนิคนี้สามารถนำมาใช้จำแนกองค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคฝุ่นละอองที่ประกอบด้วยอนุภาคอินทรีย์และอนินทรีย์ได้ สามารถระบุความถี่ที่เลื่อนไปจากความถี่ของแสงเลเซอร์ที่ใช้ในการกระตุ้น (Raman frequency) ที่เกิดจากการกระเจิงแบบรามานของสารประกอบประเภทไน-เทรต ซัลเฟต ฟอสเฟต และโครเมตได้ และจากการศึกษารามานสเปกตรัมที่เกิดจากอนุภาคชนิดเดียวกันแต่มีสถานะต่างกัน คือ หยดสารละลายและอนุภาคที่อยู่ในรูปผลึก

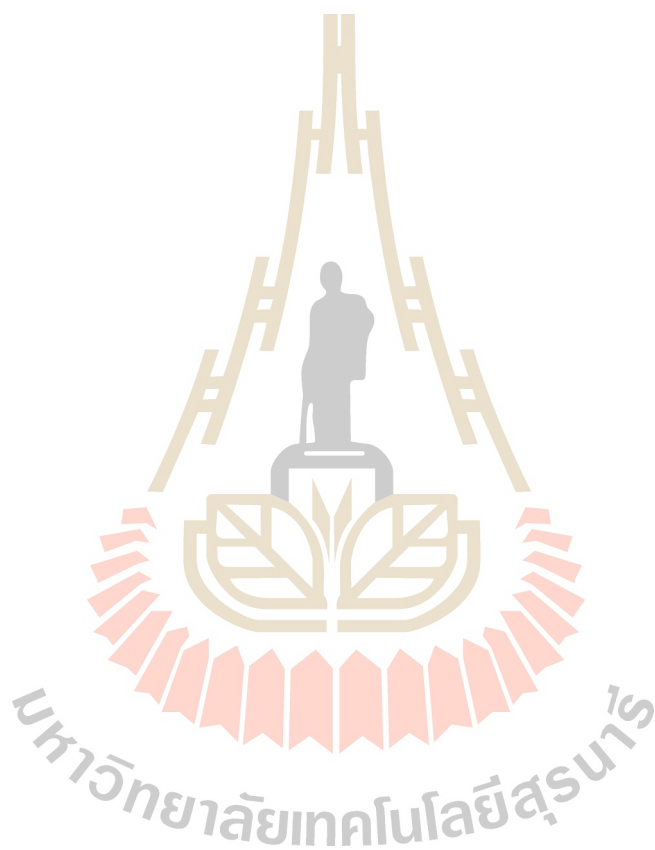
พบว่า อนุภาคในรูปผลึกจะให้รามานสเปกตรัมที่แคบและชัดเจนกว่าหยดสารละลาย ซึ่งรามานสเปกตรัมจะมีลักษณะกว้าง และไม่ชัดเจน (Broad)

Harpale et al. (2006) ได้ทำการทดลองเพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองโดยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี ทำการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองบนกระดาษกรองควอตซ์ด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างอากาศปริมาตรสูง (High volume aerosol sampler) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องรามานสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งใช้ Diode laser เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร เทียบสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์กับสเปกตรัมอ้างอิง (Degem and Newman, 1993; Degen, 1997) เพื่อระบุองค์ประกอบทางเคมี ผลการทดลองพบว่าสเปกตรัมที่ได้จากการเทียบกับสเปกตรัมอ้างอิงคือ สารประกอบในกลุ่ม คาร์บอนเนต ซัลเฟต เพอร์ซัลเฟตของแอมโมเนียมและโพแทสเซียม ไนเตรตของแอมโมเนียม โพแทสเซียม และสตรอนเชียม และสารประกอบกลุ่มคาร์บอน

Ivleva, McKeon, Niessner, and Pöschl. (2007) ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองในพื้นที่เขตชนบทของเทือกเขาแอลป์ในประเทศเยอรมนี โดยใช้เทคนิค Raman Microspectroscopic ร่วมกับเทคนิค Raman Mapping ทำการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองแบบแยกขนาดโดยใช้เครื่อง Electrical low pressure impactor ซึ่งมีจำนวน 11 ชั้น (stages) ที่อัตราการไหล 30 ลิตรต่อนาที เก็บตัวอย่างฝุ่นละอองในช่วงขนาด 28 นาโนเมตร- 4 ไมโครเมตรและใช้อะลูมิเนียมฟอยล์สำหรับดักจับฝุ่นละออง ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของฝุ่นละอองเฉพาะชั้นที่ 6-10 ผลการศึกษาพบว่าองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองที่ได้จากการวิเคราะห์สเปกตรัมเทียบกับสเปกตรัมอ้างอิง (Degem and Newman, 1993; Nyquist et al., 1997) คือ โซเดียมไนเตรต แคลเซียมไนเตรต แอมโมเนียมไนเตรต แคลเซียมซัลเฟต โซเดียมซัลเฟต โพแทสเซียมซัลเฟต แคลเซียมคาร์บอนเนต และสารประกอบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ เหม่า และสารฮิวมิก (Humic-like substance) ซึ่งการแยกความแตกต่างของโครงสร้างของสารประเภทคาร์บอน โดยใช้เทคนิค Curve fitting แบบ 5 bands จากผลการศึกษาและทดลองพบว่าการประยุกต์ใช้เทคนิค Raman Microspectroscopic และเทคนิค Raman Mapping สามารถให้ข้อมูลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองได้

Nelson et al. (2001) ได้ทำการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับ ขนาด ลักษณะทางสัณฐานวิทยา โครงสร้างของโมเลกุล และองค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคฝุ่นขนาดเล็ก ($PM_{2.5}$) ที่เก็บตัวอย่างจากบรรยากาศทั่วไปและตัวอย่างอนุภาคอ้างอิง โดยใช้เทคนิครามานร่วมกับการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (SEM) ทดลองกับอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กที่ถูกดักจับบนตัวกรองชนิดโพลีคาร์บอนเนต ผลการทดลองพบว่าเมื่อนำรามานสเปกตรัมที่ได้จากการทดลอง เปรียบเทียบกับสเปกตรัมอ้างอิงจากฐานข้อมูล สามารถระบุสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบของฝุ่นละอองได้

ดังนั้นคือ สารประกอบเหล็กซัลเฟต เฟอร์สแอม โมเนียมซัลเฟต แอม โมเนียมคลอไรด์ แอม โมเนียมซัลไฟด์ แอม โมเนียมซัลเฟต แอม โมเนียมคาร์บอเนต และแอม โมเนียมไนเตรต ซึ่งจากผลการศึกษาทดลองโดยการใช้ทั้งสองเทคนิคยังพบว่ามีความสะดวกและรวดเร็วในการวิเคราะห์ เนื่องจากการเตรียมตัวอย่างไม่ซับซ้อน และไม่มีการทำลายตัวอย่างขณะวิเคราะห์ จึงสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างจากเครื่องมือทั้งสองประเภทได้โดยไม่ต้องเตรียมตัวอย่างใหม่



บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้ทำการศึกษาเพื่อจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองจากตัวอย่างที่เก็บจากแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกัน ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีแบบสั่น ผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงออกมาในรูปแบบสเปกตรัม และนำผลการวิเคราะห์ที่ได้มาจัดกลุ่มและเปรียบเทียบกับสเปกตรัมอ้างอิง (Larkin, 2011; Smith, 1999) เพื่อจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละออง โดยแสดงภาพรวมของงานวิจัยดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ได้แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 3 ตอนคือ 1) การเก็บตัวอย่างฝุ่นละออง โดยแบ่งออกเป็นการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองจากแหล่งกำเนิดโดยตรง (Sources) และการเก็บ

ตัวอย่างฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไป (Ambient) , 2) การวิเคราะห์เชิงปริมาณ โดยแบ่งเป็นการ
 คำนวณหาความเข้มข้นของฝุ่นละออง (Particle concentration) และการคำนวณหาการกระจาย
 ขนาดของฝุ่นละออง (Particle size distribution) และ 3) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่น
 ละอองด้วยเทคนิคสเปก - โทรสโคปีแบบสั่น (Vibrational spectroscopy)

3.1 การเก็บตัวอย่างฝุ่นละออง

งานวิจัยนี้ดำเนินการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองด้วยเครื่องมือเก็บตัวอย่างคือ Cascade Impactor ชนิด Non-viable sampler แบบ 8 ชั้น (stages) ยี่ห้อ Thermo Andersen 20810 แสดงดังภาพที่ 3.2 สำหรับเก็บอนุภาคฝุ่นละอองแบบแยกขนาดในช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aerodynamic diameter) 0.43-10.00 ไมโครเมตร



ภาพที่ 3.2 เครื่องมือเก็บตัวอย่างฝุ่นละออง Cascade impactor ที่ใช้ในการศึกษา

วิธีการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองขนาดเล็กแบบแยกขนาดด้วยเครื่อง Cascade Impactor อาศัยแรง
 ฉีกของอนุภาค คือ เมื่ออากาศพร้อมกับฝุ่นละอองถูกดูดเข้าเครื่อง อากาศและอนุภาคฝุ่นจะพุ่งเข้า
 ปะทะกับแผ่นรองรับที่เรียกว่า Impaction plate ซึ่งในการทดลองนี้ใช้อะลูมิเนียมฟอยด์ขนาด
 เส้นผ่าศูนย์กลาง 81 มิลลิเมตรเป็นตัวกลางเก็บรวบรวมฝุ่นละออง และอากาศที่ถูกดูดเข้ามาจะไหล
 หักเหในทิศทางโค้งรอบ Impaction plate ออกไป ส่วนฝุ่นละอองที่มีน้ำหนักมากกว่าจะมีแรงเฉื่อย
 ของการเคลื่อนที่และเข้าปะทะกับแผ่นรองรับโดยตรง โดยไม่สามารถเคลื่อนที่ตามกระแสอากาศ

ออกไปได้ และติดอยู่บนแผ่นรองรับนั้น ทำให้สามารถแยกอนุภาคฝุ่นละอองออกจากอากาศที่ไหลเข้ามาได้ ฝุ่นละอองจะถูกแยกตามขนาดดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ขนาดของอนุภาคที่ถูกแยกบนแผ่นรองรับแยกตามชั้น

(Thermo Fisher Scientific, 2010)

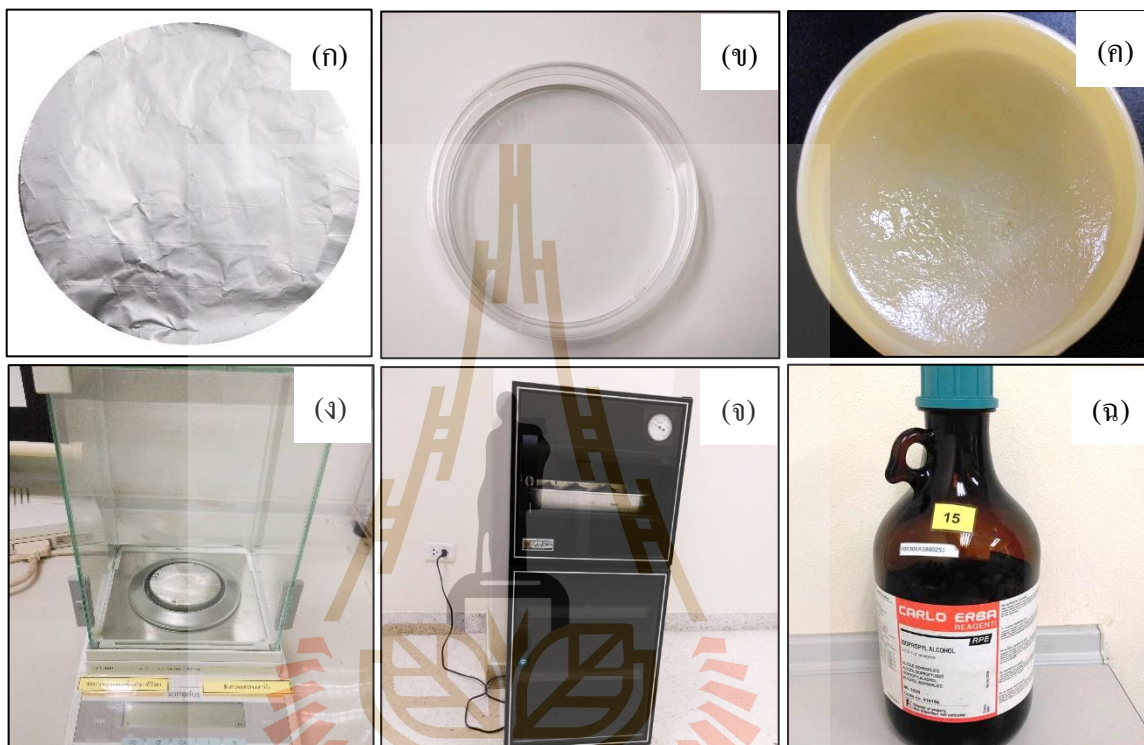
impactor stage no	size range (μm)
Preseparator	> 10.00 microns
stage 0	9.00 - 10.00 microns
stage 1	5.80 - 9.00 microns
stage 2	4.70 - 5.80 microns
stage 3	3.30 - 4.70 microns
stage 4	2.10 - 3.30 microns
stage 5	1.10 - 2.10 microns
stage 6	0.65 - 1.10 microns
stage 7	0.43 - 0.64 microns
Final filter	< 0.43 microns

เครื่อง Impactor ที่ใช้มีจำนวน 8 ชั้น (stages) สามารถแยกอนุภาคฝุ่นละอองได้ตามขนาดลดหลั่นกันไป (Cascade impactor) ที่ชั้นบนสุดของแผ่นรองรับจะแยกฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่ที่สุดที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปพร้อมกับกระแสอากาศ ส่วนฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่าที่สามารถไหลไปกับกระแสอากาศได้ จะเคลื่อนที่ไปยังชั้นถัดไป ซึ่งช่องทางไหลเข้า (Inlet หรือ nozzle) ของกระแสอากาศในชั้นถัดไปจะเล็กลงเรื่อยๆ และขนาดของฝุ่นที่ถูกแยกจะเล็กลงตามไปด้วย ทำให้ความเร็วของการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น อนุภาคของฝุ่นละอองที่ไม่สามารถติดตามกระแสอากาศได้จะตกกระทบบนแผ่นรองรับและถูกกักเก็บในชั้นต่าง ๆ การทำงานของ Cascade impactor ที่มีจำนวนชั้น (Impactor stage) หลายชั้นจะสามารถแยกขนาดของอนุภาคได้หลายช่วง

3.1.1 การเตรียมอะลูมิเนียมฟอยล์

ก่อนการชั่งน้ำหนักอะลูมิเนียมฟอยล์ที่จะนำไปเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองทุกครั้ง ผ่านการทำ ความสะอาดโดยเช็ดด้วย Isopropanol และตากให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ทำการปรับสภาพโดยนำ อะลูมิเนียมฟอยล์ที่สะอาดและไม่ชำรุดที่เคลือบด้วย Grease oil ใต้อุณหภูมิความชื้น เพื่อลดความชื้น อย่างน้อย 24 ชั่วโมง และนำมาชั่งน้ำหนักที่แน่นอนด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดทศนิยม 5 ตำแหน่ง (Sartorius รุ่น BP211D) และนำอะลูมิเนียมฟอยล์เก็บรักษาไว้ในตลับพลาสติก โดยเก็บ

อะลูมิเนียมฟอยด์ 1 แผ่นต่อ 1 ตลับ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนก่อนนำไปเก็บตัวอย่างฝุ่นละออง และทำการกำหนดรหัสของอะลูมิเนียมฟอยด์แต่ละแผ่น โดยการบันทึกรหัสลงบนตลับพลาสติกที่ใช้เก็บอะลูมิเนียมฟอยด์ พร้อมกับบันทึกวันที่ของการปรับสภาพ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้สำหรับการเตรียมอะลูมิเนียมฟอยด์แสดงดังภาพที่ 3.3

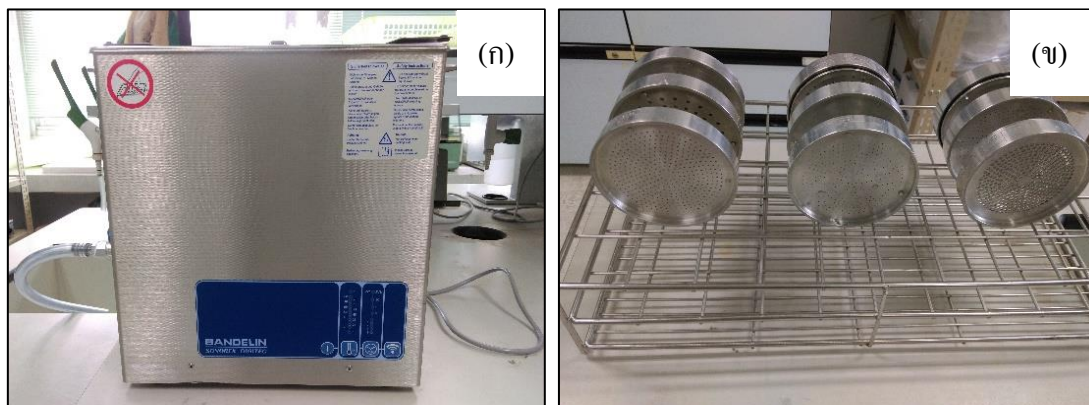


ภาพที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตรียมอะลูมิเนียมฟอยด์ (ก) อะลูมิเนียมฟอยด์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 81 มม. (ข) ตลับพลาสติก (ค) grease oil (ง) เครื่องชั่งทศนิยม 5 ตำแหน่ง (จ) ตู้ดูดความชื้น (ฉ) isopropanol

3.1.2 การเตรียมอุปกรณ์เก็บตัวอย่าง

3.1.2.1 การทำความสะอาดเครื่องมือเก็บตัวอย่าง

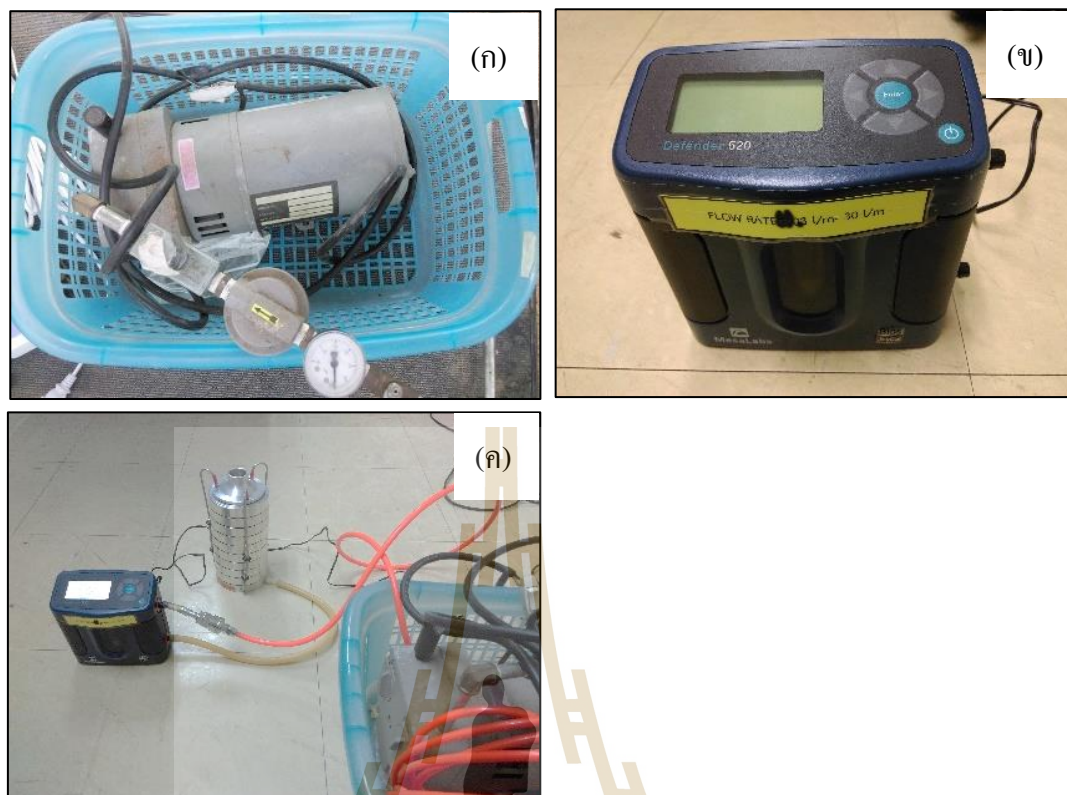
ก่อนทำการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองด้วยเครื่อง Cascade Impactor ผ่านการทำ ความสะอาด Impaction plate ด้วยการล้างในเครื่องล้างด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Bandelin Electronic รุ่น DT 514BH) ประมาณ 15 นาที และตากให้แห้งด้วยลมบนชั้นในห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทำความสะอาดเครื่องมือเก็บตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 (ก) เครื่องอัดตัว โชนิก (ข) Impaction plate

3.1.2.2 การปรับเทียบอุปกรณ์เก็บตัวอย่างและปั๊ม

การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองด้วยเครื่องมือเก็บตัวอย่าง Cascade impactor ร่วมกับปั๊มดูดอากาศ (Thomas รุ่น QR-0050) โดยปั๊มดูดอากาศที่ใช้มีการปรับเทียบให้อัตราการไหลของอากาศมีค่า 28.3 ลิตรต่อนาที ด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาตรฐานปฐมภูมิ (Primary standard) (Bios Drycal รุ่น Defender 520) สำหรับการต่ออุปกรณ์สำหรับปรับเทียบอัตราการไหลคือปั๊มเข้ากับช่องบน (Suction) ของเครื่องปรับเทียบอัตราการไหล ส่วนช่องล่าง (Pressure) ต่อเข้ากับอุปกรณ์เก็บตัวอย่าง Cascade impactor ปรับอัตราการไหลที่ปั๊มและอ่านค่าอัตราการดูดอากาศที่เครื่องปรับเทียบอัตราการไหลให้ได้ค่า 28.3 ลิตรต่อนาที (ภาพที่ 3.5)



ภาพที่ 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการปรับเทียบอัตราการไหลของเครื่อง Cascade impactor
 (ก) บีมคูดอากาศ (ข) เครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาตรฐานปฐมภูมิ
 (ค) แผนภาพการต่ออุปกรณ์สำหรับปรับเทียบอัตราการไหล

3.1.3 การเตรียม Chamber สำหรับเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเครื่องยนต์

การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเครื่องยนต์จะเก็บตัวอย่างโดยการต่อ Chamber สำหรับเก็บตัวอย่างด้วยท่ออะลูมิเนียมพอยด์ชนิดอ่อนเข้ากับท่อไอเสียโดยตรง ซึ่ง Chamber สำหรับเก็บตัวอย่างมีปริมาตรมากเพียงพอสำหรับไอเสียที่ถูกปล่อยออกจากท่อไอเสียก่อนการทำ Chamber สำหรับเก็บตัวอย่าง มีการทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของไอเสียจากปลายท่อ เพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณของ Chamber การทดลองมีขั้นตอนดังนี้

3.1.3.1 การวัดความเร็วลมของไอเสียที่ถูกปล่อยออกจากปลายท่อ

การวัดความเร็วลมของไอเสียที่ถูกปล่อยออกจากปลายท่อ ใช้อุปกรณ์สำหรับวัดความเร็วลมคือ Air velocity meter รุ่น 9555 (ภาพที่ 3.6) โดยทำการวัดความเร็วไอเสียจากรถยนต์ 2 ประเภทคือ 1) รถยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงประเภทแก๊สโซลีนและ 2) รถยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมัน

ดีเซล ทำการวัดความเร็วไอเสียตัวอย่างละ 5 นาที



ภาพที่ 3.6 อุปกรณ์สำหรับวัดความเร็วลมปลายท่อ (Air velocity meter)

3.1.3.2 การคำนวณหาอัตราการไหลของไอเสีย

นำค่าเฉลี่ยความเร็วไอเสียที่ถูกปล่อยออกจากปลายท่อ (m/s) จากข้อ 3.1.3.1 มาคำนวณหาอัตราการไหลของไอเสียด้วยสมการ 3.1

$$\text{จากสมการ} \quad Q = AV \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

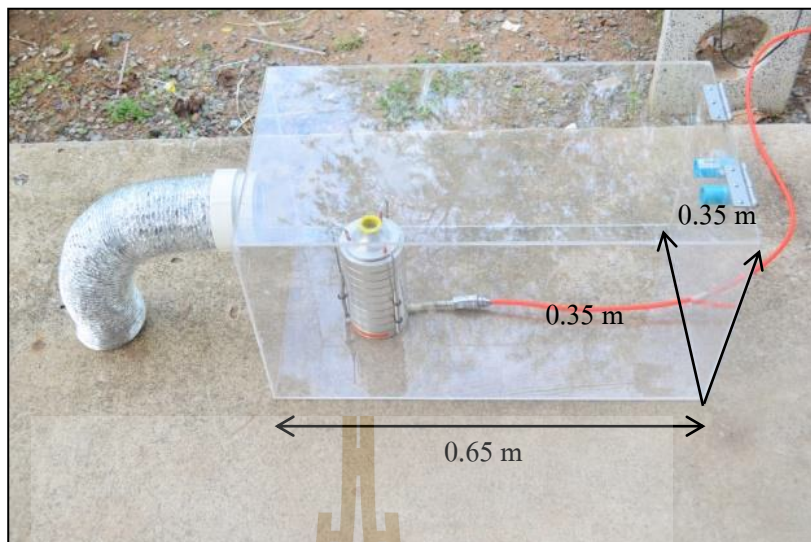
กำหนดให้ $Q =$ อัตราการไหลของอากาศ (m^3/s)

$A =$ พื้นที่หน้าตัดท่อไอเสีย (m^2)

$V =$ ความเร็วเฉลี่ย (m/s)

3.1.3.3 การทำ Chamber สำหรับเก็บตัวอย่างฝุ่นละออง

นำค่าอัตราการไหลของอากาศที่ได้จากการคำนวณในข้อ 3.1.3.2 มาใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณหาปริมาตร Chamber สำหรับเก็บตัวอย่าง โดยเทียบกับปริมาตรอากาศที่จะถูกดูดออกโดยปั๊มซึ่งมีค่าเท่ากับ 28.3 L/min ซึ่งปริมาตรของ Chamber ต้องมากพอสำหรับเก็บอากาศเป็นปริมาตร 28.3 L ในเวลา 1 นาที ขนาดของ Chamber สำหรับเก็บตัวอย่างจึงใช้ขนาดเท่ากับ 0.35 m x 0.35 m x 0.65 m ซึ่งมีปริมาตรเท่ากับ 0.08 m^3 (80 L) เพียงพอต่อปริมาตรอากาศที่ไหลเข้า และมีช่องสำหรับระบายอากาศส่วนเกินออก (ภาพที่ 3.7)



ภาพที่ 3.7 Chamber สำหรับเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองจากท่อไอเสีย

3.1.4 การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองจากแหล่งกำเนิด

การเก็บตัวอย่างจากแหล่งกำเนิดโดยตรง เลือกแหล่งกำเนิดแบบทั่วไป 4 ประเภทคือ 1) การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะ 2) การเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (เศษหญ้า/ฟาง) 3) การเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง (เนื้อไก่) และ 4) อนุภาคฝุ่นดิน ซึ่งแหล่งกำเนิดเหล่านี้มีการปล่อยฝุ่นละอองออกสู่บรรยากาศโดยทั่วไป

3.1.4.1 การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะ แบ่งการเก็บตัวอย่างออกเป็น 2 ตอน คือการเก็บตัวอย่างจากรถยนต์ที่มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทแก๊สโซลีนและน้ำมันดีเซล ยานพาหนะที่ใช้เชื้อเพลิงแก๊สโซลีนเก็บตัวอย่างจากรถยนต์นั่งส่วนบุคคลขนาดเล็ก (City car) และยานพาหนะที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลเก็บตัวอย่างจากรถกระบะ 4 ล้อ (ปิคอัพ) การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองเป็นการเก็บโดยตรงจากท่อไอเสียแบบไม่มีการเจือจางกับอากาศภายนอก ต่อชุดอุปกรณ์การเก็บตัวอย่าง (รายละเอียดหัวข้อ 3.1.3) กับท่อไอเสียรถยนต์ ซึ่งชุดอุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างประกอบด้วยท่ออะลูมิเนียมฟอยด์ชนิดอ่อนสำหรับต่อกับท่อไอเสียรถยนต์ ซึ่งเชื่อมต่อเข้ามาภายใน Chamber ที่มี Cascade Impactor อยู่ภายในและต่อเข้ากับปั๊มดูดอากาศซึ่งอยู่ภายนอก Chamber สตาร์ทเครื่องยนต์และทำการเก็บตัวอย่างเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ขณะเก็บตัวอย่างใช้เครื่องวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้ Testo 327 สำหรับวัดอุณหภูมิ เก็บตัวอย่างฝุ่นละอองจากไอเสียรถยนต์ประเภทละ 3 ชั่วโมง โดยเก็บตัวอย่างจากรถยนต์แต่ละประเภทดังนี้

1) รถยนต์นั่งส่วนบุคคลไม่เกิน 7 คนเก็บตัวอย่างจากรถที่มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทแก๊สโซลีน (เบนซินแก๊สโซฮอล์ 91)

2) รดกะบะ 4 ล้อ (ปีคอป) เก็บตัวอย่างจากรถที่มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทดีเซล

3.1.4.2 การเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

การเก็บตัวอย่างจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรใช้วิธีการจำลองการเผาวัสดุที่ต้องการ โดยชุดทดสอบการเผา (ภาพที่ 3.8) โดยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ใช้ในการเผา คือ เศษหญ้า ทำการเผาโดยวางวัสดุตัวอย่างบนถาดสเตนเลสที่รองด้วยอะลูมิเนียมฟอยด์ ขณะเผาใช้เครื่องวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้ Testo 327 สำหรับวัดอุณหภูมิขณะเผาไหม้ เก็บตัวอย่างฝุ่นละอองจากการเผาไหม้โดยใช้ท่อทองแดงต่อจากปลายปล่องเข้าสู่อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง Cascade impactor ก่อนเผาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ตัวอย่างมีการแยกไปวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นของตัวอย่างด้วยวิธีอบแห้ง (Drying method) โดยการชั่งน้ำหนักตัวอย่างในถ้วยกระเบื้องก่อนอบและหลังอบด้วยอุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และคำนวณหาน้ำหนักแห้งและร้อยละของความชื้นตัวอย่างจากสมการ 3.2 และ 3.3

$$\text{ร้อยละของน้ำหนักแห้ง (DM)} = \left(\frac{W_3 - W_1}{W_2 - W_1} \right) \times 100 \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

กำหนดให้

W_1 = น้ำหนักถ้วยเปล่าพร้อมฝา (g)

W_2 = น้ำหนักถ้วยพร้อมตัวอย่างก่อนอบ (g)

W_3 = น้ำหนักถ้วยพร้อมตัวอย่างหลังอบ (g)

$$\text{ร้อยละของความชื้น} = 100 - \text{ร้อยละของน้ำหนักแห้ง} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$



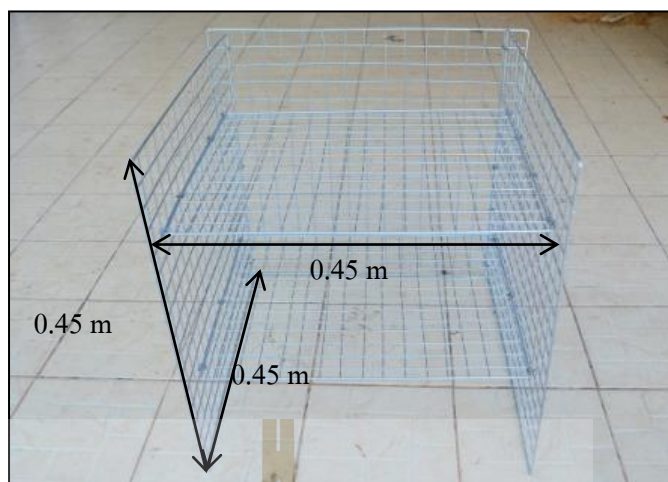
ภาพที่ 3.8 ชุดทดสอบการเผา

3.1.4.3 การเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง

การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่างจะใช้การปิ้งย่างโดยใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิง ใช้วัตถุดิบในการปิ้งย่างคือ เนื้อไก่ ในการปิ้งย่างใช้ตะแกรงอะลูมิเนียมขนาด 0.45 m x 0.45 m x 0.45 m ซึ่งแบ่งเป็น 2 ชั้น สำหรับปิ้งย่าง (ชั้นบน) และใส่ถ่าน (ชั้นล่าง) (ภาพที่ 3.9) โดยปิ้งผ่านเตาจำลองการเผาและเก็บฝุ่นละอองด้วย Cascade impactor โดยใช้ท่อทองแดงต่อจากปลายปล่องเข้าสู่อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง ขณะเก็บตัวอย่างใช้เครื่อง Testo 327 ในการวัดอุณหภูมิขณะปิ้งย่างใช้เวลาในการปิ้งย่างตัวอย่างละไม่น้อยกว่า 30 นาที

3.1.4.4 อนุภาคฝุ่นดิน

การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองจากอนุภาคฝุ่นดิน ใช้วิธีการทำให้ฝุ่นดินฟุ้งกระจายใน Chamber (รายละเอียดหัวข้อ 3.1.3) ซึ่งวางอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นละออง Cascade impactor ที่ต่อกับปั๊มดูดอากาศไว้ภายใน Chamber ทำการเก็บตัวอย่าง ในการเก็บตัวอย่างแต่ละครั้งใช้เวลา 50 นาที



ภาพที่ 3.9 ตะแกรงที่ใช้สำหรับการบ่งย่าง

3.1.4.5 การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองจากบรรยากาศ

การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองจากบรรยากาศจะแบ่งการเก็บตัวอย่างออกเป็น 2 ตอน ในลักษณะของตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของพื้นที่คือ 1) การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไป โดยใช้เวลาในการเก็บตัวอย่างอย่างน้อย 24 ชั่วโมง และ 2) การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองบริเวณริมถนนที่มีการจราจร โดยใช้เวลาในการเก็บตัวอย่างอย่างน้อย 12 ชั่วโมง โดยตั้งเครื่องมือเก็บตัวอย่าง Cascade Impactor สูงจากพื้น 30 เซนติเมตร และห่างจากถนน 1 เมตร

การเก็บตัวอย่างทุกครั้งมีการบันทึกค่าอุณหภูมิและความดันขณะเก็บตัวอย่าง เพื่อนำไปใช้ในการปรับการคำนวณค่าปริมาตรอากาศให้อยู่ในสภาวะมาตรฐาน

3.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ

3.2.1 การคำนวณหาความเข้มข้นของฝุ่นละออง (Particle concentration)

จากการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองด้วยเครื่องมือเก็บตัวอย่าง Anderson Cascade Impactor ชนิด 8 stages ซึ่งใช้อะลูมิเนียมฟอยด์เป็นวัสดุในการดักจับฝุ่นละออง โดยการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองในแต่ละแห่งกำหนดจะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง หลังเก็บตัวอย่างนำอะลูมิเนียมฟอยด์จากการเก็บตัวอย่างใน 1 ครั้งมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยวิธีชั่งน้ำหนัก (Gravimetric method) โดยการคำนวณหาผลสุทธิน้ำหนักของอะลูมิเนียมฟอยด์ก่อนเก็บตัวอย่างและหลังเก็บตัวอย่าง ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียดทศนิยม 5 ตำแหน่ง (Sartorius รุ่น BP211D) และนำข้อมูลที่ได้จากการชั่งน้ำหนักมาคำนวณหาความเข้มข้นของฝุ่นละอองดังนี้

3.2.1.1 การคำนวณหาปริมาตรอากาศ

$$\text{จากสมการ } V_{\text{sampled}} = Q \times t \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

กำหนดให้ V_{sampled} = ปริมาตรตัวอย่างอากาศทั้งหมดในหน่วยลูกบาศก์เมตร

Q = อัตราการไหลเฉลี่ยตลอดช่วงเวลาที่เก็บตัวอย่าง ในหน่วย
ลูกบาศก์ต่อนาที (m^3/min)

t = ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง ในหน่วยนาที

ปรับปริมาตรอากาศที่คำนวณได้ให้อยู่ในสภาวะมาตรฐาน 25 องศาเซลเซียสและ 760 มิลลิเมตรปรอทดังสมการ 3.5

$$V_{\text{std}} = V_{\text{sampled}} \left(\frac{P_{\text{sampled}}}{P_{\text{std}}} \right) \left(\frac{T_{\text{std}}}{T_{\text{sampled}}} \right) \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

กำหนดให้ V_{std} = ปริมาตรอากาศที่สภาวะมาตรฐาน

V_{sampled} = ปริมาตรอากาศขณะทำการเก็บตัวอย่าง

T_{std} = อุณหภูมิที่สภาวะมาตรฐาน

T_{sampled} = อุณหภูมิที่ทำการเก็บตัวอย่าง

P_{std} = ความดันที่สภาวะมาตรฐาน (1 บรรยากาศ)

P_{sampled} = ความดันขณะทำการเก็บตัวอย่าง

3.2.1.2 การคำนวณความเข้มข้นฝุ่นละออง

$$PM = \frac{(W_f - W_i) \times 10^6}{V_{\text{std}}} \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

กำหนดให้ PM = ความเข้มข้นของฝุ่นละอองหน่วยเป็นไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

W_f = น้ำหนักกระดาษกรองหลังเก็บตัวอย่าง หน่วยเป็นกรัม (g)

W_i = น้ำหนักกระดาษกรองก่อนเก็บตัวอย่าง หน่วยเป็นกรัม (g)

3.2.2 การคำนวณหาการกระจายขนาดของฝุ่นละออง (Particle size distribution)

การคำนวณหาการกระจายขนาดของฝุ่นละอองเป็นการศึกษาการกระจายของฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ โดยเครื่องเก็บตัวอย่าง Anderson Cascade Impactor ที่ใช้ในการศึกษาทดลองในครั้งนี้สามารถแยกขนาดของฝุ่นได้ในช่วง 0.43-0.65, 0.65-1.10, 1.10-2.10, 2.10-3.30, 3.30-4.70, 4.70-5.80, 5.80-9.00, และ 9.00-10.00 ไมโครเมตร น้ำหนักของฝุ่นที่ชั่งได้ในแต่ละช่วงขนาด นำมาใช้แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของฝุ่นแต่ละชนิดของแต่ละแหล่งกำเนิด โดยการแสดงผลการ

กระจายขนาดของอนุภาคจะแสดงออกมาในรูปของฮิสโทแกรม ดังแสดงในภาพที่ 3.10 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคในแต่ละช่วงขนาด (Particle diameter, D_p) และอัตราส่วนของความเข้มข้นฝุ่นละออง (Particle concentration, dN) กับความแตกต่างของขนาดฝุ่นละอองในแต่ละช่วงขนาดในเทอมของล็อกการิทึม ($d\log D_p$) ดังสมการที่ 3.7

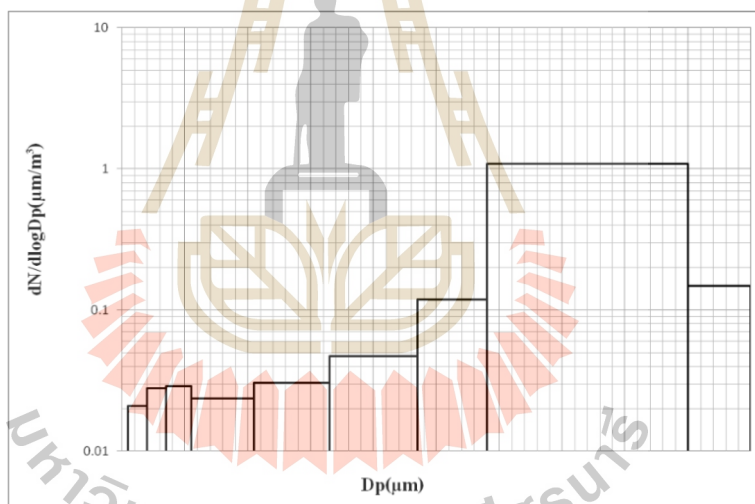
$$\frac{dN}{d\log D_p} = \frac{dN}{\log D_{p,u} - \log D_{p,l}} \dots\dots\dots (3.7)$$

กำหนดให้ dN = ความเข้มข้นของฝุ่นละออง ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

D_p = ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคในแต่ละช่วงขนาด (μm)

$D_{p,u}$ = ขนาดของอนุภาคที่มีค่ามากที่สุดในแต่ละช่วงขนาด (μm)

$D_{p,l}$ = ขนาดของอนุภาคที่มีค่าน้อยที่สุดในแต่ละช่วงขนาด (μm)



ภาพที่ 3.10 ฮิสโทแกรมแสดงการกระจายขนาดของฝุ่นละออง

3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองโดยเทคนิคสเปกโทรสโกปีแบบสั่น

3.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองโดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

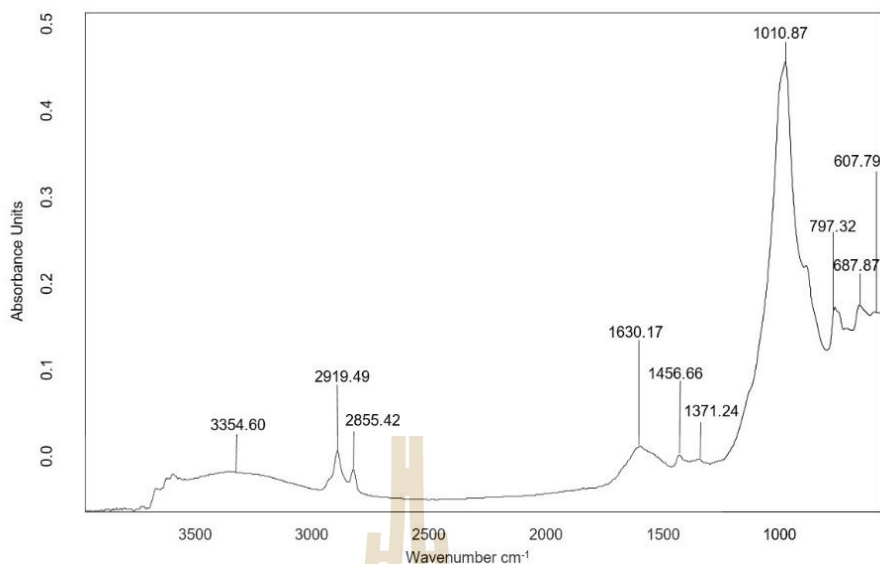
การศึกษานี้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคฝุ่นละอองโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker Vertex 70v ร่วมกับกล้องไมโครสโคป รุ่น Hyperion 2000 (FTIR microscope) ดังแสดงในภาพที่ 3.11 ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาพที่ 3.11 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ตัวอย่างฝุ่นละอองที่ถูกดักจับบนอะลูมิเนียมฟอยล์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ร่วมกับกล้อง Microscope สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้โดยตรง ด้วยการวางตัวอย่างบน Sample stage ก่อนการวิเคราะห์มีการเลือกจุด/บริเวณที่ต้องการวิเคราะห์ตัวอย่าง โดยเป็นภาพ CCD image ของตัวอย่าง ซึ่งแสดงผลในเครื่องคอมพิวเตอร์ ผ่าน โปรแกรม OPUS หรือดูผ่านจอ LCD ของกล้อง Microscope การกำหนดจุดที่วิเคราะห์มีการกำหนดในลักษณะกริด (9 grids) เมื่อกำหนดจุด/บริเวณที่วิเคราะห์ได้แล้ว ใช้คำสั่งวิเคราะห์ด้วย Reflectance mode (เนื่องจากตัวอย่างเป็นอนุภาคทึบแสง จึงใช้โหมดการวิเคราะห์แบบการสะท้อน) เมื่อสั่งวิเคราะห์ ATR crystal เคลื่อนที่อัตโนมัติด้วยกลไกภายในเครื่อง โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างทีละจุดเลื่อนไปจนครบทั้ง 9 จุด

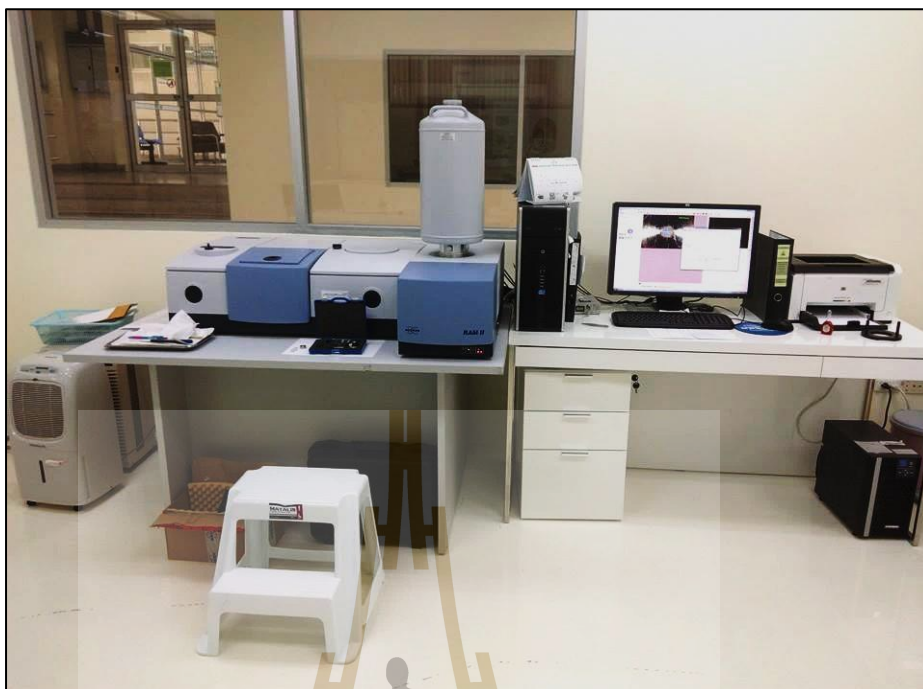
ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างฝุ่นละอองบนอะลูมิเนียมฟอยล์แสดงในรูปแบบของสเปกตรัม ดังภาพที่ 3.12 ซึ่งเป็นสเปกตรัมที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืน (Absorbance unit) กับเลขคลื่น (Wavenumber, cm^{-1}) เรียกว่า Infrared spectrum



ภาพที่ 3.12 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

3.3.2 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองโดยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี

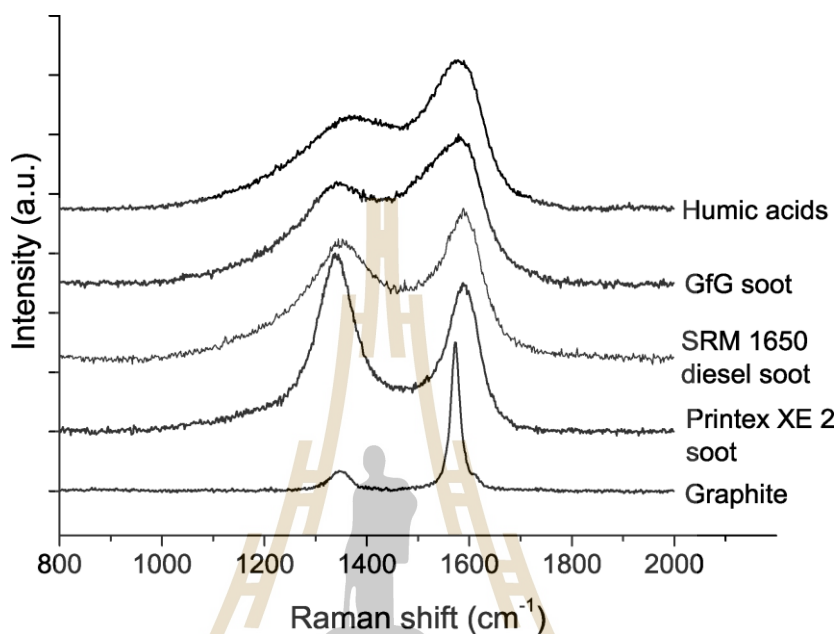
การศึกษาในครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคฝุ่นละอองโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มรามานสเปกโตรมิเตอร์ (FT-Raman) (ภาพที่ 3.13) ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ยี่ห้อ BRUKER รุ่น Vertex 70 + RamII ซึ่งสเปกโตรมิเตอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงชนิด Nd: YAG laser ที่ให้ความยาวคลื่นที่ 1064 nm



ภาพที่ 3.13 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มรามาานสเปกโทรมิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

เครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์เป็นเครื่องมือหนึ่งทางสเปกโตรสโกปีที่ใช้สำหรับวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างทางเคมีของอนุภาคสาร โดยอาศัยหลักการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) ระหว่างโฟตอนกับโมเลกุลของสาร จากนั้นพลังงานบางส่วนจะถูกถ่ายเทไปยังโมเลกุลทำให้เกิดการสั่นของโมเลกุลแล้วเกิดการกระเจิงแสงโดยการคายพลังงานที่มีความถี่ต่างๆ กันซึ่งเรียกว่าการกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering) การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในรูปของสเปกตรัมที่พล็อตระหว่างความเข้มของการกระเจิงแบบรามานกับความถี่ที่เลื่อนไปจากความถี่ของคลื่นแสงที่ใช้กระตุ้น เรียกว่า Raman shift หรือ Frequency shift ซึ่งตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์อยู่ในรูปของฝุ่นละอองขนาดเล็กที่ถูกดักจับบนอะลูมิเนียมฟอยล์ โดยวางตัวอย่างในช่องใส่ตัวอย่างสำหรับตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ซึ่งการวิเคราะห์สามารถวัดสเปกตรัมได้โดยตรงจากตัวอย่าง โดยการวิเคราะห์ทำการวางตัวอย่างบน Sample stage ซึ่งภายในมีกล้องวิดีโอสำหรับบันทึกภาพตัวอย่างขณะวิเคราะห์ (Video measurement) โดยแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม OPUS ก่อนการวิเคราะห์ทำการเลือกจุดที่ต้องการวิเคราะห์โดยการเลื่อน Stage x, y และ z เมื่อได้จุดที่ต้องการวิเคราะห์แล้ว เลือกสภาวะที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ โดยกำหนดสภาวะคือ Raman laser power = 100 mW, Resolution = 4 cm^{-1} , Scan time = 200 scans และใช้คำสั่ง Video measurement ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างฝุ่นละอองบนอะลูมิเนียมฟอยล์จะแสดงออกมาในรูปของสเปกตรัม ดังแสดงดังภาพที่ 3.14 ซึ่งเป็นสเปกตรัมที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของพลังงาน (Intensity) และ Raman shift (cm^{-1}) เรียกว่า Raman spectrum



ภาพที่ 3.14 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ ของสารประกอบคาร์บอนที่ต่างชนิดกัน (Ivleva et al., 2015)

3.3.3 การระบุองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองด้วยการเทียบกับสเปกตรัมอ้างอิง

การระบุองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองในการทดลองใช้วิธีเปรียบเทียบสเปกตรัมของตัวอย่างที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มรามานและอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์กับสเปกตรัมอ้างอิง (Larkin, 2011; Smith, 1999) ซึ่งแสดงเลขคลื่น (Wavenumber) ที่เป็นค่าจำเพาะของหมู่ฟังก์ชันดังตาราง 3.2

ตารางที่ 3.2 เลขคลื่น (Wavenumber, cm^{-1}) ที่เป็นค่าจำเพาะของหมู่ฟังก์ชันที่ใช้เป็นสเปกตรัมอ้างอิง (Larkin, 2011; Smith, 1999)

Functionality	Group	Assignment	Wavenumber (cm^{-1})	Intensity
Alkanes	R-CH ₃	Asymmetric. str.	2950-2975	vs
		Symmetric. str.	2860-2885	vs

ตารางที่ 3.2 เลขคลื่น (Wavenumber, cm^{-1}) ที่ เป็นค่าจำเพาะของหมู่ฟังก์ชันที่ใช้เป็นสเปกตรัมอ้างอิง (Larkin, 2011; Smith, 1999) (ต่อ)

Functionality	Group	Assignment	Wavenumber (cm^{-1})	Intensity
		Asymmetric. bend	1440-1470	ms
		Symmetric. bend	1370-1380	vw
	R-CH ₂ -R	Asymmetric. str.	2915-2936	vs
		Symmetric. str.	2833-2865	vs
		Scissors	1445-1465	m
		Rock	710-730	w
Alkenes	=C-H	CH str.	3075-3090	m
		CH bend.	905-915, 985-995	m
	C=C	C=C str.	1630-1660	m
Alkynes	C-C≡C-H	CH str.	3267-3340	w
		CH Wag	578-710	w
		C≡C str.	2100-2140	vs
	C-C≡C-C	C≡C str.	2100-2245	s
Alcohols	C-O	C-O str. (1° alcohol)	1000-1075	m
		C-O str. (2° alcohol)	1075-1150	m
		C-O str. (3° alcohol)	1100-1210	m
		O-H bend.	1300-1400, 600-700	m
Alcohols or water	O-H	O-H str.	3300-3400	br
Ether	C-O,	Asymmetric. C-O-	1070-1140	m
	Unbranched	C		
		Symmetric. C-O-C	820-890	w
	C-O, Branched	Asymmetric. C-O-	1070-1210	m
		C		
Ketone	C=O, Saturated	C=O str.	1705-1725	m
	C=O, Aromatic	C=O str.	1640-1700	m
	C-C-C,	C-C-C str.	1100-1230	w
	Saturated			
Aldehyde	C=O, Saturated	C=O str.	1720-1740	m

ตารางที่ 3.2 เลขคลื่น (Wavenumber, cm^{-1}) ที่เป็นค่าจำเพาะของหมู่ฟังก์ชันที่ใช้เป็นสเปกตรัมอ้างอิง (Larkin, 2011; Smith, 1999) (ต่อ)

Functionality	Group	Assignment	Wavenumber (cm^{-1})	Intensity
Aldehyde	C=O, Aromatic	C=O str.	1685-1710	m
	C-H	C-H bend.	1380-1400	w
Carboxylic acid	C=O, Saturated	C=O str.	1700-1730	m
Carboxylic acid	C=O, Aromatic	C=O str.	1680-1710	m
	C-O	C-O str.	1210-1320	w
	O-H	O-H str.	2500-3500	br
		O-H In-plane bend	1395-1440	m
		O-H Out-plane bend	900-960	m
Ester	C=O	C=O str.	1735-1750	s
	C-C-O	C-C-O str.	1160-1210	m
	O-C-C	O-C-C str.	1030-1100	m
Amides (1°)	NH ₂	NH ₂ str.	3170-3370 (2 bands)	s
		NH ₂ Scissors	1620-1650	m
		NH ₂ Wag	600-750	br
	C=O	C=O str.	1630-1680	m
	C-N	C-N str.	1390-1430	br
Amides (2°)	N-H	N-H str	3170-3370	s
		N-H In-plane bend.	1515-1570	s
		N-H Out-plane bend.	680-750	br
	C=O	C=O str	1630-1680	m
	C-N	C-N str	1230-1310	mw
Amines (1°)	NH ₂	NH ₂ Asymmetric str.	3350-3380	s
		NH ₂ Symmetric str.	3310-3280	s
		NH ₂ Scissors	1580-1650	m
		NH ₂ Out-plane bend.	750-850	m
	C-N	C-N str.	1020-1250	m
Amines (2°)	N-H	N-H str.	3280-3320	s
		N-H wag	750-700	m

ตารางที่ 3.2 เลขคลื่น (Wavenumber, cm^{-1}) ที่เป็นค่าจำเพาะของหมู่ฟังก์ชันที่ใช้เป็นสเปกตรัมอ้างอิง (Larkin, 2011; Smith, 1999) (ต่อ)

Functionality	Group	Assignment	Wavenumber (cm^{-1})	Intensity
Nitriles	$\text{C}\equiv\text{N}$	$\text{C}\equiv\text{N}$ str.	2240-2260	mw
Nitriles	C-N	C-N str.	1180-1130	m
Nitro	NO_2	NO_2 Asymmetric str.	1500-1550	s
		NO_2 Symmetric str.	1330-1390	s
		NO_2 Scissors	835-890	s
Thiols	S-H	S-H str	2560-2590	w
Halogenated	C-F	C-F	1000-1300	s
Organic molecule	C-Cl	C-Cl	600-800	s
	C-Br	C-Br	550-650	s
Inorganic sulfate	S-O	S-O str.	1080-1140	m
		S-O bend	610-680	m
Silica	Si-O-Si	Si-O-Si Asymmetric str.	1000-1200	s
		Si-O-Si Symmetric str.	805	w
Nitrates	N-O	N-O str.	1340-1400	m
		N-O Out-plane bend.	810-840	w
Phosphates	PO_4^{-3}	PO_4^{-3} str.	1000-1100	br and s

หมายเหตุ br = broad, vs = very strong, s = strong, ms = medium strong, m = medium, mw = medium weak, w = weak, stretching = การยืด, bending = การงอ, asymmetric = ไม่สมมาตร, symmetric = สมมาตร, wagging = การงอแบบกระดิก, scissoring = การงอแบบกรรไกร

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองแบบแยก 8 ขนาดในช่วงเส้นผ่าศูนย์กลาง (Aerodynamic diameter) 0.43-10.00 ไมโครเมตร เป็นตัวอย่างจากแหล่งกำเนิดและในบรรยากาศ สำหรับนำไปใช้วิเคราะห์เชิงปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีแบบต้น รายละเอียดมีดังนี้

4.1 ปริมาณฝุ่นละอองและการกระจายตัวของขนาด

ความเข้มข้นและการกระจายขนาดของฝุ่นละอองที่เก็บตัวอย่างจากแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกัน เป็นการคำนวณโดยใช้ข้อมูลจากน้ำหนักอะลูมิเนียมฟอยล์ที่ชั่งได้ก่อนและหลังการเก็บตัวอย่าง (รายละเอียดดังภาคผนวก ก)

4.1.1 ระดับความเข้มข้นฝุ่นละอองจากแหล่งกำเนิดและบรรยากาศ

4.1.1.1 การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะ

ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะที่ใช้ น้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซล เป็นการเก็บตัวอย่างโดยตรงจากไอเสียที่อยู่ในกล่องขนาดกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 65 cm x 35 cm x 35 cm (ปริมาตร 80 ลิตร) ใช้ระยะเวลาเก็บตัวอย่างครั้งละ 3 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างชนิดละ 3 ครั้ง มีจำนวนตัวอย่างฝุ่นละอองทั้ง 8 ขนาดรวม 48 ตัวอย่าง พบว่าเครื่องยนต์ที่เผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงดีเซลมีอุณหภูมิเฉลี่ยในกล่องขณะเก็บตัวอย่าง 61.6 ± 2.29 องศาเซลเซียส เป็นระดับอุณหภูมิสูงกว่าเครื่องยนต์เบนซิน ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ย 49.85 ± 0.46 องศาเซลเซียส

ความเข้มข้นของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์เบนซินมีค่าเฉลี่ยสูงสุด 22.34 ± 16.07 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรในฝุ่นละอองในช่วงขนาด 1.10-2.10 ไมโครเมตร ส่วนค่าเฉลี่ยต่ำสุดของความเข้มข้นฝุ่นละอองมีค่า 7.82 ± 6.67 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เกิดขึ้นในช่วงขนาดของฝุ่นละออง 5.80-9.00 ไมโครเมตร (ตารางที่ 4.1) ในขณะที่ความเข้มข้นของฝุ่นละอองจากเครื่องยนต์ดีเซลพบว่ามีค่าเฉลี่ยสูงสุด 138.92 ± 9.37 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เกิดขึ้นในช่วงขนาดของฝุ่นละออง 0.43-0.65 ไมโครเมตร ส่วนค่าเฉลี่ยต่ำสุดของความเข้มข้นฝุ่นละอองมีค่า 29.31 ± 13.68 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เกิดขึ้นในช่วงขนาดของฝุ่นละออง 1.10-2.10 ไมโครเมตร (ตารางที่ 4.2) เครื่องยนต์ดีเซลมีความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นละอองสูงกว่าเครื่องยนต์เบนซินในสภาวะมาตรฐานที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและความดันบรรยากาศ 760 มิลลิเมตร

ปรอท โดยค่าความเข้มข้นฝุ่นละอองรวมของเครื่องยนต์ดีเซลมีค่าเฉลี่ย 459.74 ± 90.47 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนความเข้มข้นฝุ่นละอองรวมของเครื่องยนต์เบนซินมีค่าเฉลี่ย 98.48 ± 27.76 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งความเข้มข้นฝุ่นละอองจากเครื่องยนต์ดีเซลมีค่าสูงกว่าเครื่องยนต์แก๊สโซลีนในทุกช่วงขนาดของฝุ่นละออง ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Kittelson (1998) ซึ่งพบว่าฝุ่นละอองที่ถูกปล่อยจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลมีระดับสูงกว่าการเผาไหม้ในเครื่องยนต์เบนซิน และยังพบว่าความเข้มข้นฝุ่นละอองเฉลี่ยจากการเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดมีปริมาณฝุ่นละอองสูงสุดอยู่ในขนาดฝุ่นใกล้เคียงกันที่ช่วงขนาดฝุ่นละออง 0.43-2.10 ไมโครเมตร มีค่าประมาณ 40.03 % และ 48.91 % ของปริมาณฝุ่นทั้งหมดที่เก็บในช่วง 0.43-10.00 ไมโครเมตร ในฝุ่นละอองจากเครื่องยนต์เบนซินและดีเซลตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่าทางสถิติของความเข้มข้นฝุ่นละออง ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซินแยกตามขนาดฝุ่นละออง (0.43-10.00 ไมโครเมตร)

Stage	Cut-point (μm)	ความเข้มข้นฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซิน ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
		ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	9.00-10.00	11.64	3.97	7.85	3.84
2	5.80-9.00	15.52	3.97	7.82	6.67
3	4.70-5.80	15.89	11.64	14.47	2.45
4	3.30-4.70	27.77	11.92	19.70	7.93
5	2.10-3.30	19.84	3.88	9.23	9.19
6	1.10-2.10	39.67	7.94	22.34	16.07
7	0.65-1.10	15.89	3.97	9.21	6.09
8	0.43-0.65	11.90	3.97	7.88	3.97

ตารางที่ 4.2 ค่าทางสถิติของความเข้มข้นฝุ่นละออง ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซล แยกตามขนาดฝุ่นละออง (0.43-10.00 ไมโครเมตร)

Stage	Cut-point (μm)	ความเข้มข้นฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซล ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
		ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	9.00-10.00	99.89	18.70	72.19	46.33
2	5.80-9.00	39.20	28.06	34.07	5.62
3	4.70-5.80	59.93	18.70	39.28	20.61
4	3.30-4.70	54.94	37.41	45.48	8.85
5	2.10-3.30	59.93	34.30	43.88	13.99
6	1.10-2.10	44.95	19.60	29.31	13.68
7	0.65-1.10	60.79	44.10	56.60	11.03
8	0.43-0.65	149.64	132.29	138.92	9.37

4.1.1.2 การเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

การเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่เป็นเศษหญ้า 3 ครั้ง มีจำนวนตัวอย่างฝุ่นละอองทั้ง 8 ขนาด รวม 24 ตัวอย่าง ก่อนการทดลองนำตัวอย่างเศษหญ้าแยกไปวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นของตัวอย่างด้วยวิธีอบแห้ง (Drying method) พบว่า ร้อยละของความชื้นของเศษหญ้าในแต่ละครั้ง คือ 7.62, 8.17 และ 10.53 ตามลำดับ ความเข้มข้นของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เศษหญ้ามียค่าเฉลี่ยสูงสุด $1.16 \times 10^5 \pm 7.06 \times 10^3$ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เกิดขึ้นในช่วงขนาดของฝุ่นละออง 0.43-0.65 ไมโครเมตร ส่วนค่าเฉลี่ยต่ำสุดของความเข้มข้นฝุ่นมีค่า $6.86 \times 10^2 \pm 4.34 \times 10^2$ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เกิดขึ้นในช่วงขนาดของฝุ่นละออง 4.70-5.80 ไมโครเมตร (ตารางที่ 4.3) โดยค่าความเข้มข้นฝุ่นละอองรวมมีค่าเฉลี่ยสูงถึง $1.44 \times 10^5 \pm 1.04 \times 10^4$ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดอื่น ๆ ที่มีการเก็บตัวอย่าง และจากข้อมูลความเข้มข้นฝุ่นละอองเฉลี่ย ปริมาณสูงสุดพบในฝุ่นละอองขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ ในช่วงขนาดฝุ่นละออง 0.43-1.10 ไมโครเมตร มีค่าประมาณ 88.96 % ของปริมาณฝุ่นทั้งหมดที่เก็บในช่วง 0.43-10.00 ไมโครเมตร ผลการศึกษามีค่าสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Reid, Koppman, Eck, and Eleuterio. (2005) ที่พบว่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีค่าสูงในช่วงฝุ่นขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลาง < 1 ไมโครเมตร) การทดลองนี้พบว่ามีสัดส่วนประมาณ 80-90% ของปริมาณฝุ่นละอองทั้งหมด

ตารางที่ 4.3 ค่าทางสถิติของความเข้มข้นฝุ่นละออง ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) จากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรแยกตามขนาดฝุ่นละออง (0.43-10.00 ไมโครเมตร)

Stage	Cut-point (μm)	ความเข้มข้นฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
		ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	9.00- 10.00	4.62×10^3	2.25×10^3	3.35×10^3	1.19×10^3
2	5.80-9.00	1.89×10^3	1.47×10^3	1.70×10^3	2.15×10^2
3	4.70-5.80	1.18×10^3	3.85×10^2	6.86×10^2	4.34×10^2
4	3.30-4.70	1.25×10^3	1.07×10^3	1.13×10^3	1.05×10^2
5	2.10-3.30	2.01×10^3	9.63×10^2	1.42×10^3	5.39×10^2
6	1.10-2.10	4.38×10^3	2.54×10^3	3.30×10^3	9.57×10^2
7	0.65-1.10	18.21×10^4	15.07×10^4	1.66×10^4	1.57×10^3
8	0.43-0.65	124.38×10^5	111.74×10^5	1.16×10^5	7.06×10^3

4.1.1.3 การเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง

การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่างเนื้อไก่ โดยใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิง ใช้ระยะเวลาในการปิ้งย่างตัวอย่างละ 35 นาที เก็บตัวอย่างขณะปิ้งย่างทั้งหมด 3 ครั้ง มีจำนวนตัวอย่างฝุ่นทั้ง 8 ขนาด รวม 24 ตัวอย่าง ความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นละอองจากกิจกรรมการปิ้งย่างเนื้อไก่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 2825.77 ± 145.05 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เกิดขึ้นในช่วงขนาดของฝุ่นละออง 0.43-0.65 ไมโครเมตร ส่วนค่าเฉลี่ยต่ำสุดของความเข้มข้นฝุ่นละอองมีค่า 71.54 ± 29.77 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เกิดขึ้นช่วงขนาดของฝุ่นละออง 4.70-5.80 ไมโครเมตร (ตารางที่ 4.4) โดยค่าความเข้มข้นฝุ่นละอองรวมมีค่าเฉลี่ย $3.85 \times 10^3 \pm 1.90 \times 10^2$ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และจากข้อมูลความเข้มข้นฝุ่นละอองเฉลี่ย ปริมาณฝุ่นสูงสุดพบในฝุ่นละอองขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ ในช่วงขนาดฝุ่นละออง 0.43-2.10 ไมโครเมตรเช่นเดียวกับการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยมีค่าประมาณ 85.66 % ของปริมาณฝุ่นละอองทั้งหมดที่อยู่ในช่วง 0.43-10.00 ไมโครเมตร

ตารางที่ 4.4 ค่าทางสถิติของความเข้มข้นฝุ่นละออง ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) จากกิจกรรมการปิ้งย่างแยกตามขนาดฝุ่นละออง (0.43-10.00 ไมโครเมตร)

Stage	Cut-point (μm)	ความเข้มข้นฝุ่นละอองจากกิจกรรมการปิ้งย่าง ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
		ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	9.00- 10.00	126.88	93.08	108.02	17.24
2	5.80-9.00	186.15	126.88	150.61	31.35
3	4.70-5.80	90.63	37.23	71.54	29.77
4	3.30-4.70	138.79	108.75	125.95	15.49
5	2.10-3.30	126.88	69.40	96.45	28.89
6	1.10-2.10	204.77	126.88	162.60	39.34
7	0.65-1.10	335.07	294.93	312.71	20.46
8	0.43-0.65	2959.79	2671.76	2825.77	145.05

4.1.1.4 อนุภาคฝุ่นดิน

ตัวอย่างจากฝุ่นดินจากการฟุ้งกระจายใน Chamber ดำเนินการ 3 ครั้ง มีจำนวนตัวอย่างฝุ่นละอองทั้ง 8 ขนาด รวม 24 ตัวอย่าง ความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นละอองจากฝุ่นดินมีค่าเฉลี่ยสูงสุด 2003.94 ± 366.36 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เกิดขึ้นในช่วงขนาดของฝุ่นละออง 9.00-10.00 ไมโครเมตร ส่วนค่าเฉลี่ยต่ำสุดของความเข้มข้นฝุ่นละอองมีค่า 17.39 ± 8.39 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เกิดขึ้นในช่วงขนาดของฝุ่นละออง 2.10-3.30 ไมโครเมตร (ตารางที่ 4.5) โดยค่าความเข้มข้นฝุ่นละอองรวมมีค่าเฉลี่ย $2.62 \times 10^3 \pm 5.86 \times 10^2$ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และจากข้อมูลความเข้มข้นฝุ่นละอองเฉลี่ย ปริมาณฝุ่นละอองสูงสุดพบในช่วงขนาดฝุ่นละออง 9.00-10.00 ไมโครเมตร มีค่าประมาณ 76.34 % ของปริมาณฝุ่นทั้งหมดที่เก็บในช่วง 0.43-10.00 ไมโครเมตร ต่างจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะ, การเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และการเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง ซึ่งพบปริมาณฝุ่นละอองสูงสุดในขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่

ตารางที่ 4.5 ค่าทางสถิติของความเข้มข้นฝุ่นละออง ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) จากอนุภาคฝุ่นดินแยกตามขนาดฝุ่น-
ละออง (0.43-10.00 ไมโครเมตร)

Stage	Cut-point (μm)	ความเข้มข้นฝุ่นละอองจากอนุภาคฝุ่นดิน ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
		ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	9.00-10.00	2398.65	1674.78	2003.94	366.36
2	5.80-9.00	274.38	34.18	135.31	124.51
3	4.70-5.80	61.96	8.54	35.30	26.71
4	3.30-4.70	17.70	17.09	17.50	0.35
5	2.10-3.30	25.63	8.85	17.39	8.39
6	1.10-2.10	194.72	76.90	143.65	60.45
7	0.65-1.10	53.11	8.54	26.45	23.54
8	0.43-0.65	274.38	205.08	245.38	36.01

4.1.1.5 บรรยากาศทั่วไป

ตัวอย่างฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไปเป็นพื้นที่ทั่วไปที่มีผลกระทบน้อย ทำการเก็บตัวอย่าง 24 ชั่วโมง 3 ครั้ง มีตัวอย่างฝุ่นละอองทั้ง 8 ขนาด รวม 24 ตัวอย่าง ความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นละอองในบรรยากาศทั่วไปมีค่าเฉลี่ยสูงสุด 5.96 ± 0.74 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เกิดขึ้นในช่วงขนาดของฝุ่นละออง 9.00-10.00 ไมโครเมตร ส่วนค่าเฉลี่ยต่ำสุดของความเข้มข้นฝุ่นละอองมีค่า 0.88 ± 0.50 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เกิดขึ้นในช่วงขนาดของฝุ่นละออง 2.10-3.30 ไมโครเมตร (ตารางที่ 4.6) โดยค่าความเข้มข้นฝุ่นรวมมีค่าเฉลี่ย 18.87 ± 1.81 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรซึ่งอยู่ในระดับต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นฝุ่นละอองจากพื้นที่บริเวณริมถนน และจากข้อมูลความเข้มข้นฝุ่นละอองเฉลี่ย ปริมาณฝุ่นสูงสุดพบในช่วงขนาดฝุ่นละออง 9.00-10.00 ไมโครเมตรมีค่าประมาณ 31.61 % ของปริมาณฝุ่นทั้งหมดที่เก็บในช่วง 0.43-10.00 ไมโครเมตร เช่นเดียวกับอนุภาคฝุ่นดิน ผลการทดลองมีค่าสอดคล้องกับการทดลองของ Obaidullah, Dyakov, Peeters, Bram, and De Ruyck. (2012) ซึ่งศึกษาความเข้มข้นของฝุ่นละอองในบรรยากาศในช่วงขนาดฝุ่นตั้งแต่ 1-10 ไมโครเมตร (PM_1 , $\text{PM}_{2.5}$, และ PM_{10}) และพบว่าฝุ่นละอองจากบรรยากาศมีความเข้มข้นสูงที่สุดในช่วงขนาด PM_{10}

ตารางที่ 4.6 ค่าทางสถิติของความเข้มข้นฝุ่นละออง ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) จากบรรยากาศทั่วไปแยกตามขนาดฝุ่นละออง (0.43-10.00 ไมโครเมตร)

Stage	Cut-point (μm)	ความเข้มข้นฝุ่นละอองจากจากบรรยากาศทั่วไป ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
		ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	9.00-10.00	6.78	5.34	5.96	0.74
2	5.80-9.00	2.91	1.70	2.26	0.62
3	4.70-5.80	1.92	0.24	1.13	0.84
4	3.30-4.70	1.70	1.45	1.61	0.14
5	2.10-3.30	1.44	0.49	0.88	0.50
6	1.10-2.10	3.36	1.45	2.50	0.97
7	0.65-1.10	2.19	1.20	1.61	0.51
Final	0.43-0.65	3.36	2.67	2.91	0.39

4.1.1.6 บริเวณริมถนนที่มีการจราจร

ตัวอย่างฝุ่นละอองบริเวณริมถนนที่มีการจราจร มีจำนวนตัวอย่างฝุ่นละอองทั้ง 8 ขนาด รวม 24 ตัวอย่าง ความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นละอองจากพื้นที่บริเวณริมถนนมีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด 32.51 ± 3.39 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เกิดขึ้นในช่วงขนาดของฝุ่นละออง 9.00-10.00 ไมโครเมตร ส่วนค่าเฉลี่ยต่ำสุดของความเข้มข้นฝุ่นละอองมีค่า 0.88 ± 0.31 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เกิดขึ้นในช่วงขนาดของฝุ่นละออง 2.10-3.30 ไมโครเมตร (ตารางที่ 4.7) โดยค่าความเข้มข้นฝุ่นละอองรวมมีค่าเฉลี่ย 53.68 ± 3.51 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และจากข้อมูลความเข้มข้นฝุ่นละอองเฉลี่ย ปริมาณฝุ่นละอองสูงสุดพบในช่วงขนาดฝุ่นละออง 9.00-10.00 ไมโครเมตรมีค่าประมาณ 60.57 % ของปริมาณฝุ่นละอองทั้งหมดที่เก็บในช่วง 0.43-10.00 ไมโครเมตร เช่นเดียวกับอนุภาคฝุ่นดิน และบรรยากาศทั่วไป เมื่อเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละอองรวมบริเวณริมถนนกับบรรยากาศทั่วไปพบว่าระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองบริเวณริมถนนมีค่าสูงกว่าในบรรยากาศทั่วไป เนื่องจากการปล่อยไอเสียจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากการคมนาคม รวมถึงฝุ่นดิน/ทรายที่ฟุ้งกระจายขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ จากการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Jinsart et al. (2011) ศึกษาปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละอองบริเวณริมถนน พบว่าพื้นที่บริเวณริมถนนเป็นแหล่งกำเนิดที่มีการปลดปล่อยฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เครื่องยนต์ในระดัสูง โดยพบระดับความเข้มข้นของ PM_{10} สูงกว่า $\text{PM}_{2.5}$ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Fischer et al. (2000) ในต่างประเทศซึ่งพบปริมาณฝุ่น PM_{10} สูงกว่าฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ ในพื้นที่บริเวณริมถนน

ตารางที่ 4.7 ค่าทางสถิติของความเข้มข้นฝุ่นละออง ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) จากบริเวณริมถนนที่มีการจราจรแยกตามขนาดฝุ่นละออง (0.43-10.00 ไมโครเมตร)

Stage	Cut-point (μm)	ความเข้มข้นฝุ่นละอองจากบริเวณริมถนนที่มีการจราจร ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
		ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	9.00-10.00	35.95	29.18	32.51	3.39
2	5.80-9.00	7.16	3.59	5.52	1.80
3	4.70-5.80	2.75	1.03	1.78	0.88
4	3.30-4.70	2.20	1.03	1.61	0.59
5	2.10-3.30	1.10	0.52	0.88	0.31
6	1.10-2.10	6.16	2.75	4.19	1.77
7	0.65-1.10	2.57	1.10	1.75	0.75
Final	0.43-0.65	6.16	4.40	5.44	0.92

จากข้อมูลความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นละอองจากการบรรยากาศทั่วไป พื้นที่บริเวณริมถนนและอนุภาคฝุ่นดิน ปริมาณฝุ่นละอองสูงสุดพบในฝุ่นละอองขนาดใหญ่ช่วงขนาดฝุ่นละออง 9.00-10.00 ไมโครเมตร ซึ่งต่างจากความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นละอองจากแหล่งกำเนิด (การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะ การเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และการเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง) ซึ่งพบปริมาณฝุ่นสูงสุด ในฝุ่นละอองขนาดเล็กช่วงขนาดฝุ่นละออง 0.43-2.10 ไมโครเมตร โดยค่าเฉลี่ยผลรวมของฝุ่นละอองแสดงดังตาราง 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยผลรวมของฝุ่นละอองขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตรแยกตามแหล่งกำเนิด

แหล่งกำเนิด	ฝุ่นละอองรวม ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SD
การเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซิน	98.48	27.76
การเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซล	459.74	90.47
การเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร	1.44×10^5	0.10×10^5
การเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง	3.85×10^3	0.20×10^3
อนุภาคฝุ่นดิน	2.62×10^3	0.59×10^3
บรรยากาศทั่วไป	18.87	1.81
บริเวณริมถนนที่มีการจราจร	53.68	3.51

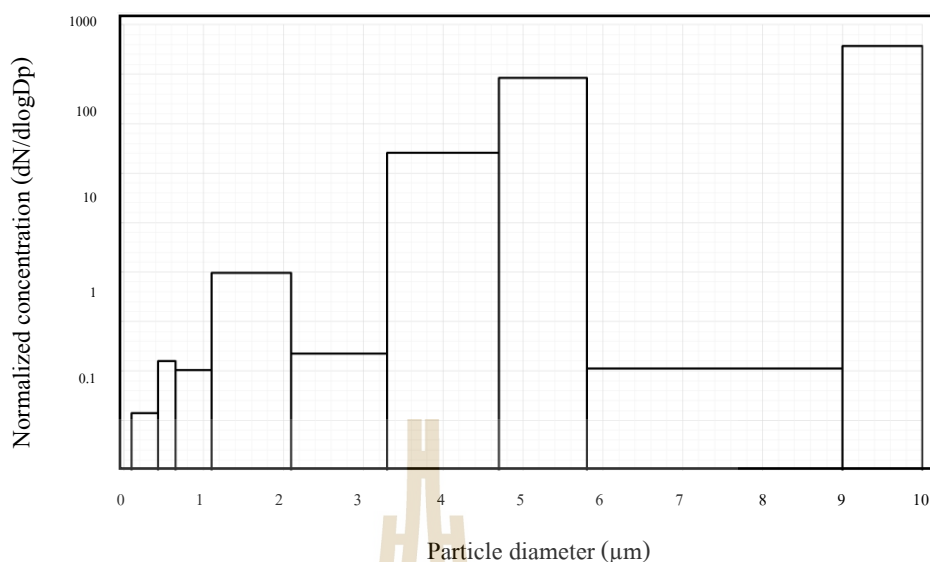
4.1.2 การกระจายขนาดของฝุ่นละออง

การคำนวณการกระจายตัวของฝุ่นละออง 8 ช่วงขนาด คือ 0.43-0.65, 0.65-1.10, 1.10-2.10, 2.10-3.30, 3.30-4.70, 4.70-5.80, 5.80-9.00, และ 9.00-10.0 ไมโครเมตร แสดงผลในรูปฮิสโทแกรมที่อธิบายลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างช่วงขนาดของฝุ่นละออง (Particle diameter, Dp) และอัตราส่วนของความเข้มข้นฝุ่นละออง (Particle concentration, dN) กับความแตกต่างของขนาดฝุ่นละอองในแต่ละช่วงขนาดในเทอมของล็อกการิทึม ($d\log D_p$) (รายละเอียดดังภาคผนวก ข) พบว่าการกระจายขนาดของฝุ่นละอองแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ 1) การกระจายขนาดแบบ 3 กลุ่ม (modes) พบเฉพาะในฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซินและดีเซล คือขนาดฝุ่นในช่วง 0.43-0.65 (หรือ 1.10-2.10 ในฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซิน), 4.70-5.80 และ 9.00-10.00 ไมโครเมตร และ 2) การกระจายขนาดแบบ 2 กลุ่ม (modes) พบในการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร, การเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง, อนุภาคฝุ่นดิน, บรรยากาศทั่วไป และพื้นที่บริเวณริมถนน พบขนาดฝุ่นละอองในช่วง 0.43-0.65 และ 9.00-10.00 ไมโครเมตร ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของฝุ่นละอองแบ่งตามชนิดของแหล่งกำเนิดมีดังนี้

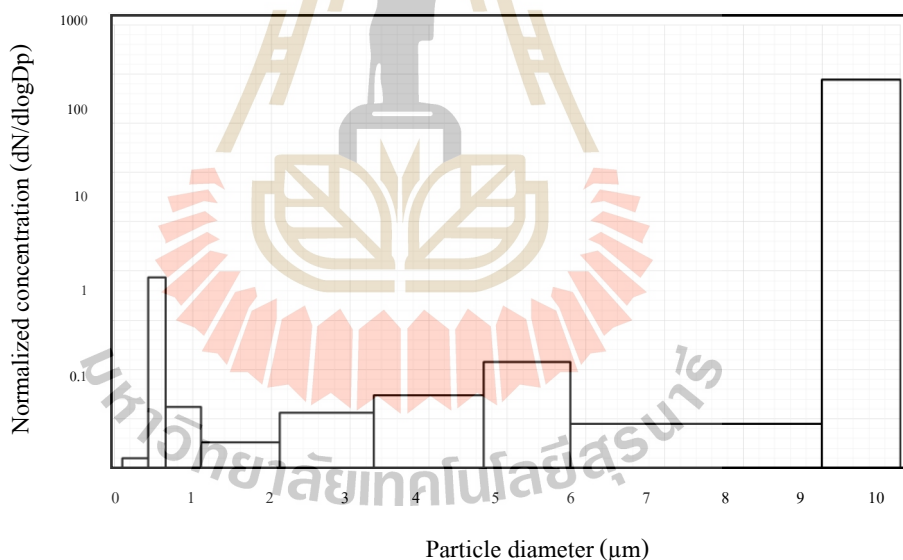
4.1.2.1 การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะ

ขนาดฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะที่ใช้เชื้อเพลิงเบนซินแยกได้ 3 กลุ่ม คือ ฝุ่นละอองในช่วงขนาด 1.10-2.10, 4.70-5.80 และ 9.00-10.00 ไมโครเมตร (ภาพที่ 4.1) ส่วนขนาดฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะที่ใช้ น้ำมันดีเซลแยกได้ 3 กลุ่ม คือ ฝุ่นละอองในช่วงขนาด 0.43-0.65, 4.70-5.80 และ 9.00-10.00 ไมโครเมตร (ภาพที่ 4.2) จากข้อมูลปริมาณฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ทั้งสองชนิด แสดงให้เห็นว่าปริมาณฝุ่นละอองที่สูงกว่าในแต่ละชั้น (stage) จากการเก็บตัวอย่างการเผาไหม้เครื่องยนต์ดีเซลมีการกระจายตัวแตกต่างจากการเผาไหม้เครื่องยนต์เบนซิน ถึงแม้ว่ามีลักษณะการกระจายขนาดของฝุ่นละอองแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม (modes) คล้ายกัน แต่การกระจายขนาดของฝุ่นละอองในช่วงแรกของการเผาไหม้เครื่องยนต์เบนซิน อยู่ในช่วง 1.10-2.10 ไมโครเมตร ในขณะที่การเผาไหม้เครื่องยนต์ดีเซลอยู่ในช่วง 0.43-0.65 ไมโครเมตร และยังพบการกระจายขนาดของฝุ่นละอองในช่วง 4.70-5.80 ไมโครเมตรจากการเผาไหม้เครื่องยนต์เบนซินมีค่าสูงกว่าการเผาไหม้เครื่องยนต์ดีเซล ส่วนในช่วงขนาดฝุ่นละออง 9.00-10.00 ไมโครเมตรพบฝุ่นละอองมีการกระจายตัวสูงคล้ายกันในการเผาไหม้จากเครื่องยนต์ทั้งสองชนิด

จากผลการศึกษาระยะการกระจายตัวของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ในเทอมของล็อกการิทึม (Lognormal) พบว่ามีลักษณะการกระจายตัวใกล้เคียงกับการศึกษาของ Kittelson (1998) ซึ่งระบุว่า การกระจายตัวของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม (modes) เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 4.1 การกระจายขนาดของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซิน

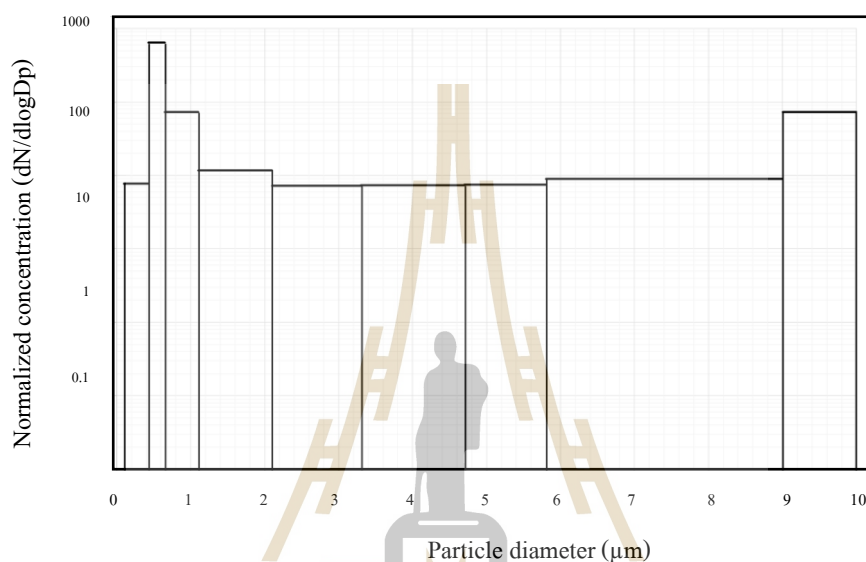


ภาพที่ 4.2 การกระจายขนาดของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซล

4.1.2.2 การเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

ขนาดฝุ่นละอองของการเผาไหม้เศษหญ้าแยกเป็น 2 กลุ่ม คือ ขนาดฝุ่นละอองในช่วง 0.43-0.65 และ 9.00-10.00 ไมโครเมตร (ภาพที่ 4.3) ปริมาณความเข้มข้นฝุ่นละอองที่พบจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดอื่น (การเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง, อนุภาคฝุ่นดิน, บรรยากาศทั่วไป และพื้นที่บริเวณริมถนน) แต่

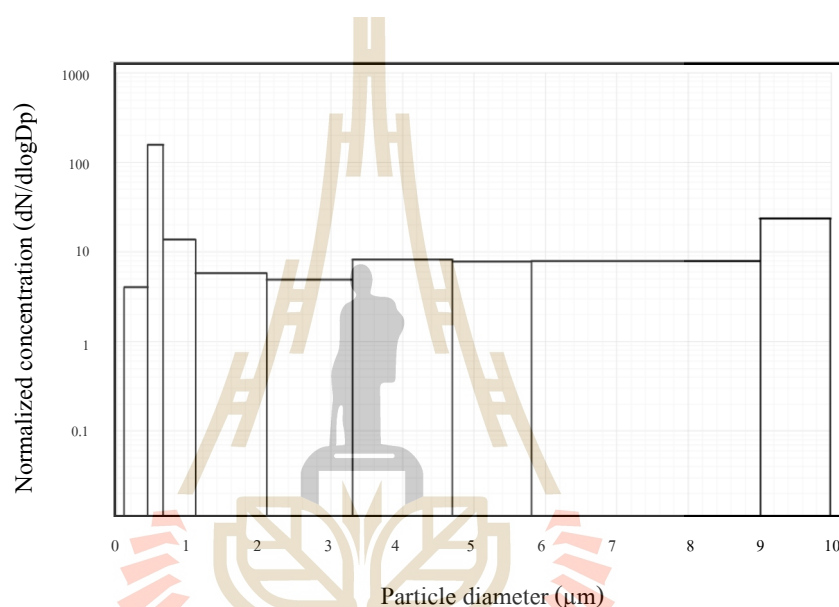
ลักษณะการกระจายตัวของฝุ่นละอองไม่แตกต่างจากแหล่งกำเนิดที่มีปริมาณความเข้มข้นฝุ่นละอองต่ำ คือมีการกระจายตัวแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคล้ายกัน แต่ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีการกระจายตัวสูงในช่วงขนาด 0.43-0.65 ไมโครเมตร (คล้ายกับฝุ่นละอองจากกิจกรรมการปิ้งย่าง) ในขณะที่แหล่งกำเนิดอื่นมีการกระจายตัวของฝุ่นละอองสูงในช่วงขนาด 9.00-10.00 ไมโครเมตร ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณความเข้มข้นฝุ่นละอองที่พบ (หัวข้อ 4.1.1)



ภาพที่ 4.3 การกระจายขนาดของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

4.1.2.3 การเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง

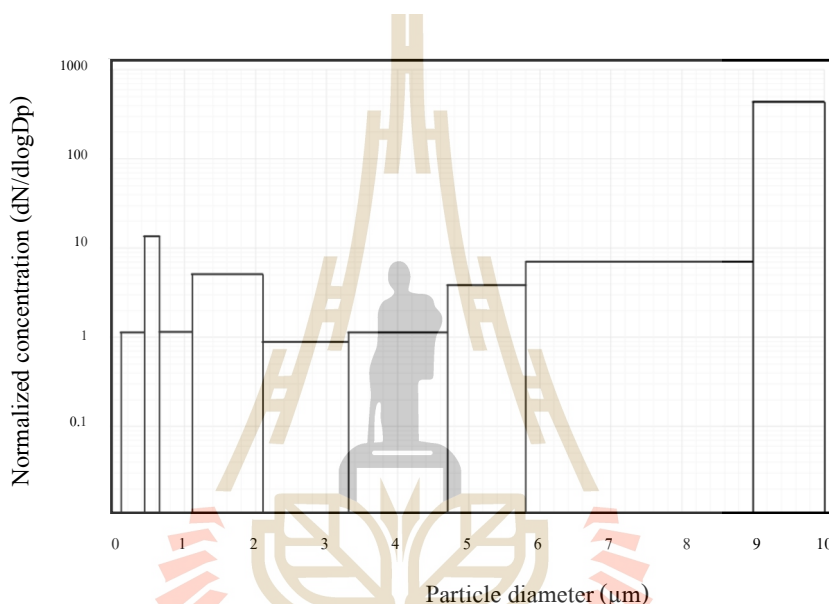
การปิ้งย่างเนื้อไก่มีลักษณะการกระจายตัวของฝุ่นละอองแยกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ฝุ่นละอองในช่วง 0.43-0.65 และ 9.00-10.00 ไมโครเมตร (ภาพที่ 4.4) ฝุ่นละอองมีการกระจายตัวสูงในช่วง 0.43-0.65 ไมโครเมตร สอดคล้องกับปริมาณความเข้มข้นฝุ่นละอองที่พบ (หัวข้อ 4.1.1) จากการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Manatsakarn, 2016 พบว่าการกระจายตัวของฝุ่นละอองจากการปิ้งย่างมีลักษณะการกระจายตัว 3 modes อยู่ในช่วง 0.43-0.65, 4.70-5.80 และ 9.00-10.00 ไมโครเมตรซึ่งอยู่ในช่วงขนาดเดียวกัน



ภาพที่ 4.4 การกระจายขนาดของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง

4.1.2.4 อนุภาคฝุ่นดิน

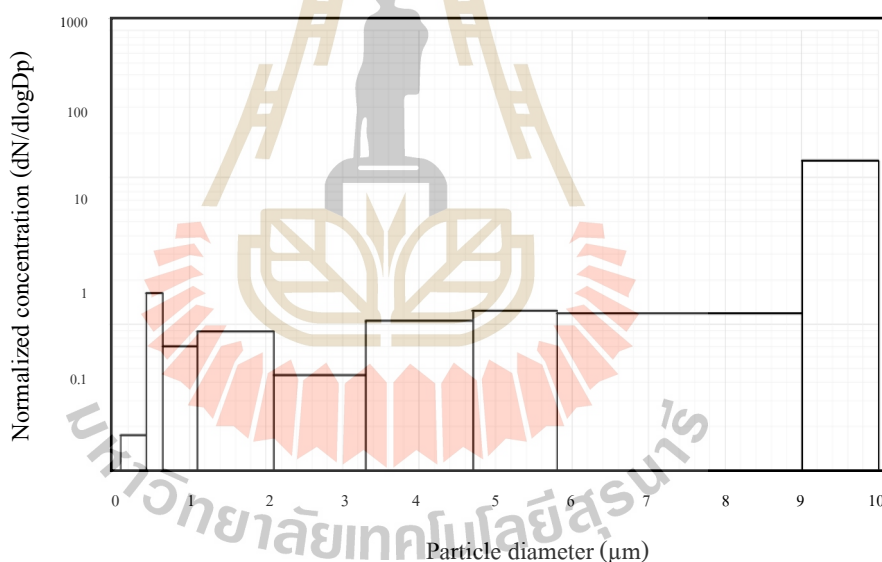
ขนาดฝุ่นละอองของอนุภาคฝุ่นดินแยกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ขนาดฝุ่นละอองในช่วง 0.43-0.65 และ 9.00-10.00 ไมโครเมตร (ภาพที่ 4.5) ซึ่งลักษณะการกระจายตัวของฝุ่นละอองแบ่งเป็น 2 กลุ่มคล้ายฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไป และพื้นที่บริเวณริมถนน ซึ่งพบการกระจายตัวสูงในช่วง 9.00-10.00 ไมโครเมตร (สอดคล้องกับปริมาณความเข้มข้นฝุ่นละอองที่พบ (หัวข้อ 4.1.1)) ต่างจากฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและกิจกรรมการปิ้งย่างที่พบการกระจายตัวสูงในช่วง 0.43-0.65 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.5 การกระจายขนาดของฝุ่นละอองจากอนุภาคฝุ่นดิน

4.1.2.5 บรรยากาศทั่วไป

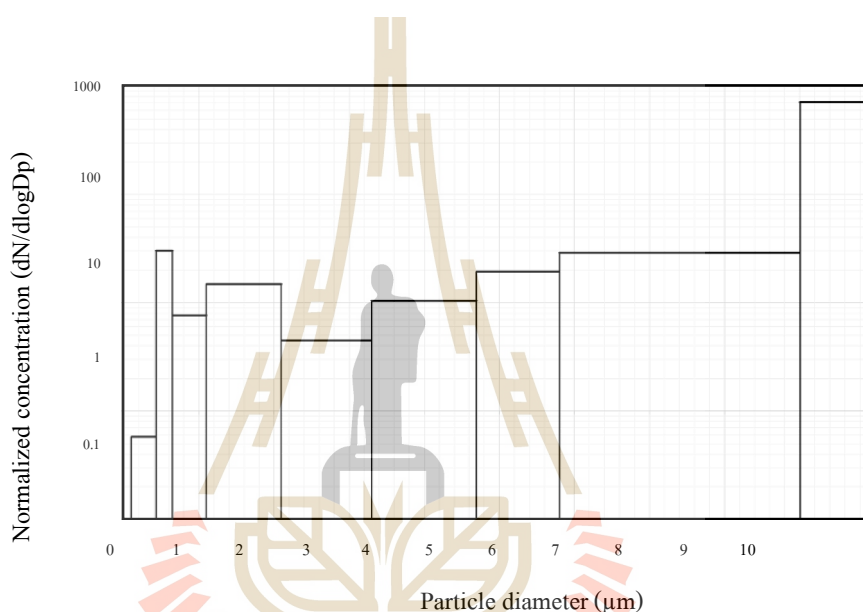
ขนาดฝุ่นละอองในบรรยากาศทั่วไปแยกได้เป็น 2 กลุ่ม คือขนาดฝุ่นละอองในช่วง 0.43-0.65 ไมโครเมตร และ 9.00-10.00 ไมโครเมตร (ภาพที่ 4.6) ฝุ่นละอองมีการกระจายตัวสูงในช่วง 9.00-10.00 ไมโครเมตร สอดคล้องกับปริมาณความเข้มข้นฝุ่นละอองที่พบ (หัวข้อ 4.1.1) ปริมาณความเข้มข้นฝุ่นละอองที่พบในบรรยากาศทั่วไปมีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดอื่น (การเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร, การเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง, อนุภาคฝุ่นดิน และพื้นที่บริเวณริมถนน) แต่ลักษณะการกระจายตัวของฝุ่นไม่แตกต่างจากแหล่งกำเนิดที่มีปริมาณความเข้มข้นฝุ่นละอองสูง ผลการศึกษาการกระจายตัวของฝุ่นละอองในบรรยากาศทั่วไปมีความคล้ายคลึงกับตัวอย่างฝุ่นละอองที่พบในบรรยากาศทั่วไป (Obaidullah et al., 2012) กล่าวคือพบการกระจายตัวของฝุ่นละอองมีลักษณะเป็น Bimodal distributions ซึ่งมีการกระจายตัวของฝุ่นละอองแยกเป็น 2 ช่วงขนาด (modes)



ภาพที่ 4.6 การกระจายขนาดของฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไป

4.1.2.6 บริเวณริมถนนที่มีการจราจร

ขนาดฝุ่นละอองจากพื้นที่บริเวณริมถนนที่มีการจราจรแยกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ขนาดฝุ่นละอองในช่วง 0.43-0.65 และ 9.00-10.00 ไมโครเมตร (ภาพที่ 4.7) เมื่อพิจารณาการกระจายขนาดของฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไปและพื้นที่บริเวณริมถนนพบว่า มีลักษณะคล้ายกัน ซึ่งการกระจายตัวของฝุ่นละอองมีปริมาณสูงในฝุ่นละอองขนาดใหญ่ในช่วง 9.00-10.00 ไมโครเมตร ในขณะที่การกระจายขนาดของฝุ่นละอองจากแหล่งกำเนิดพบการกระจายตัวสูงในฝุ่นละอองขนาดเล็กในช่วง 0.43-0.65 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.7 การกระจายขนาดของฝุ่นละอองจากพื้นที่บริเวณริมถนนที่มีการจราจร

4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละออง

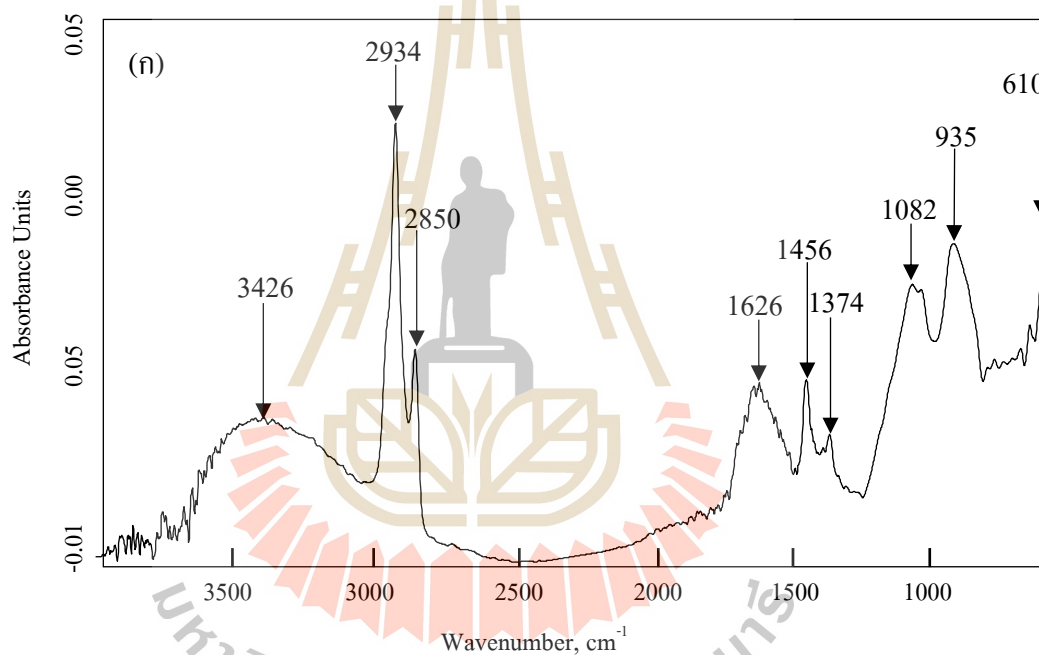
4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

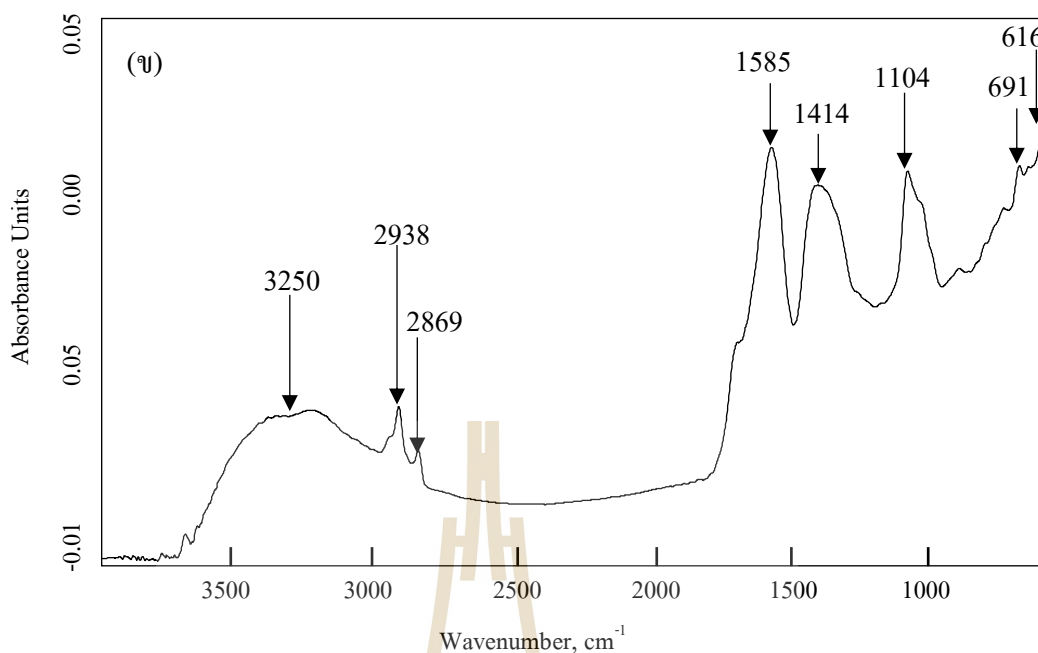
การวิเคราะห์ตัวอย่างฝุ่นละอองด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FTIR) ร่วมกับกล้องไมโครสโคป (Hyperion microscope) เป็นการวิเคราะห์ตัวอย่างในลักษณะ 3x3 กริด ผลการวิเคราะห์แสดงเป็นสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ของตัวอย่างแต่ละจุดทั้งหมด 9 สเปกตรัม (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ค) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างแยกตามช่วงขนาดของฝุ่นละออง 8 ช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร) ให้สเปกตรัมที่ดูคลื่นรังสีอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่น $600-4000 \text{ cm}^{-1}$ เมื่อนำข้อมูลของเลขคลื่น (Wavenumber) ที่ได้จากเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์มาจัดกลุ่มในแต่ละช่วงขนาดและเทียบกับสเปกตรัมอ้างอิง (Larkin, 2011; Smith, 1999) สามารถแบ่งสเปกตรัมตามช่วง

ของเลขคลื่นที่พบเป็น 2 กลุ่ม คือ สารอินทรีย์ (อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน, อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน, แอลกอฮอล์, คาร์บอนิล และสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจน) และไอออนของสารอนินทรีย์ (แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+), ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) และซิลิเกตไอออน (SiO_4^{4-})) จากผลการทดลองเมื่อนำมาจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองแยกตามแหล่งกำเนิดพบว่า ได้ผลการทดลองดังนี้

4.2.1.1 การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะที่มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมันเบนซิน

การจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมันเบนซินพบแถบสเปกตรัมที่แตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 4.8





ภาพที่ 4.8 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซิน
(ก) ช่วงขนาดของฟู่นละอง 2.10-3.30 ไมโครเมตร และ (ข) ช่วงขนาดของฟู่น
ละอง 0.43-0.65 ไมโครเมตร

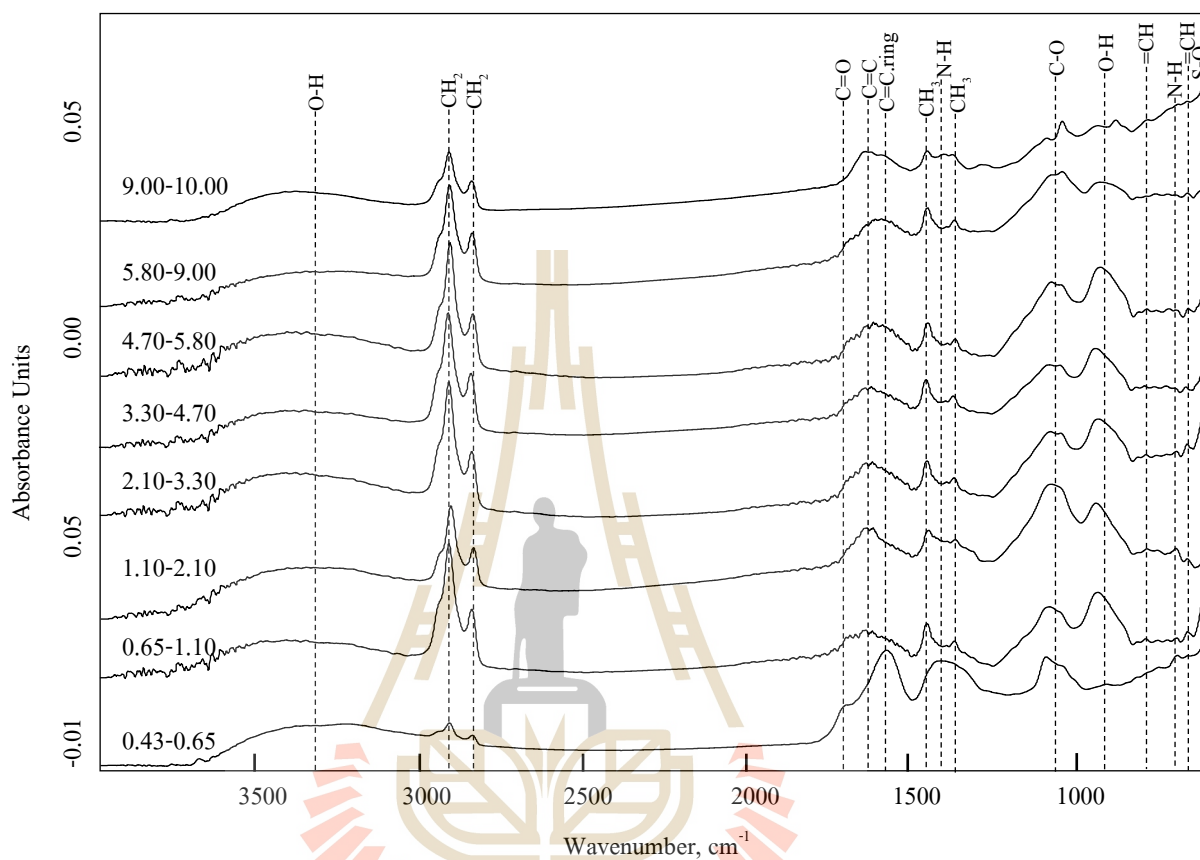
จากภาพที่ 4.8 (ก) พบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ กลุ่มแอลเคน (ช่วงเลขคลื่น 1358-1468 และ 2845-2942 cm^{-1}), แอลดีน (ช่วงเลขคลื่น 1606-1659 cm^{-1}), แอลกอฮอล์ (ช่วงเลขคลื่น 1037-1105 และ 3203-3570 cm^{-1}), กรดคาร์บอกซิลิก (ช่วงเลขคลื่น 901-948 cm^{-1}), ซัลเฟตไอออน (ช่วงเลขคลื่น 602-623 cm^{-1}), และไอน้ำ (ช่วงเลขคลื่น 3203-3570 cm^{-1}) ซึ่งเป็นแถบสเปกตรัมที่พบในช่วงขนาดฟู่นละอง 2.10-3.30 ไมโครเมตร นอกจากนี้ยังพบแถบสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันอื่นในช่วงขนาดฟู่นละอง 0.43-0.65 ไมโครเมตร (ภาพที่ 4.8 (ข)) คือ อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (ช่วงเลขคลื่น 1565-1587 cm^{-1}), และแอมโมเนียมไอออน (ช่วงเลขคลื่น 1392-1440 cm^{-1}) รายละเอียดแถบสเปกตรัมและช่วงเลขคลื่นของฟู่นละองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซินในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตรแสดงดังตาราง 4.9

ตารางที่ 4.9 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซินที่เกิดขึ้นในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตร

Functionality	Group	Assignment	Wavenumber range (cm ⁻¹)	Intensity
Alkanes	CH ₃ -(CH ₂) _n -CH ₃	CH ₃ .symmetric.bending	1358-1387	m
		CH ₃ .asymmetric.bending	1443-1468	m
		CH ₂ .symmetric.stretching	2845-2869	vs
		CH ₂ .asymmetric.stretching	2913-2942	vs
Alkenes	CH ₂ =CH ₂	=CH.wagging.bending	685-704	w
Alkenes	CH ₂ =CH ₂	=CH.wagging.bending	877-899	w
		C=C.stretching	1606-1659	m
Aromatic	C ₆ H ₆	C=C.ring.stretching	1565-1587	m
Alcohols	CH ₃ -OH	C-O.asymmetric.stretching	1037-1105	m
Alcohols/water	-OH-	O-H.stretching	3203-3570	br
Carboxylic acid	CH ₃ -COOH	O-H.wagging.bending	901-948	ms
Aldehyde	CH ₃ -C(=O)H	C=O.asymmetric.stretching	1705-1750	s
		(saturated)		
Amine	CH ₃ -NH ₂	N-H.wagging.bending	745-765	w
Ammonium ions	NH ₄ ⁺	N-H. stretching	1392-1440	m
Sulfate ions	SO ₄ ²⁻	S-O.bending	602-623	m

หมายเหตุ br = broad, vs= very strong, s = strong, ms= medium strong, m = medium, w= weak, stretching = การยืด, bending = การงอ, asymmetric = ไม่สมมาตร, symmetric = สมมาตร, wagging = การงอแบบกระดิก

แถบสเปกตรัมที่พบแยกตามขนาดฝุ่นละอองออกเป็น 8 ช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร) แสดงดังภาพที่ 4.9



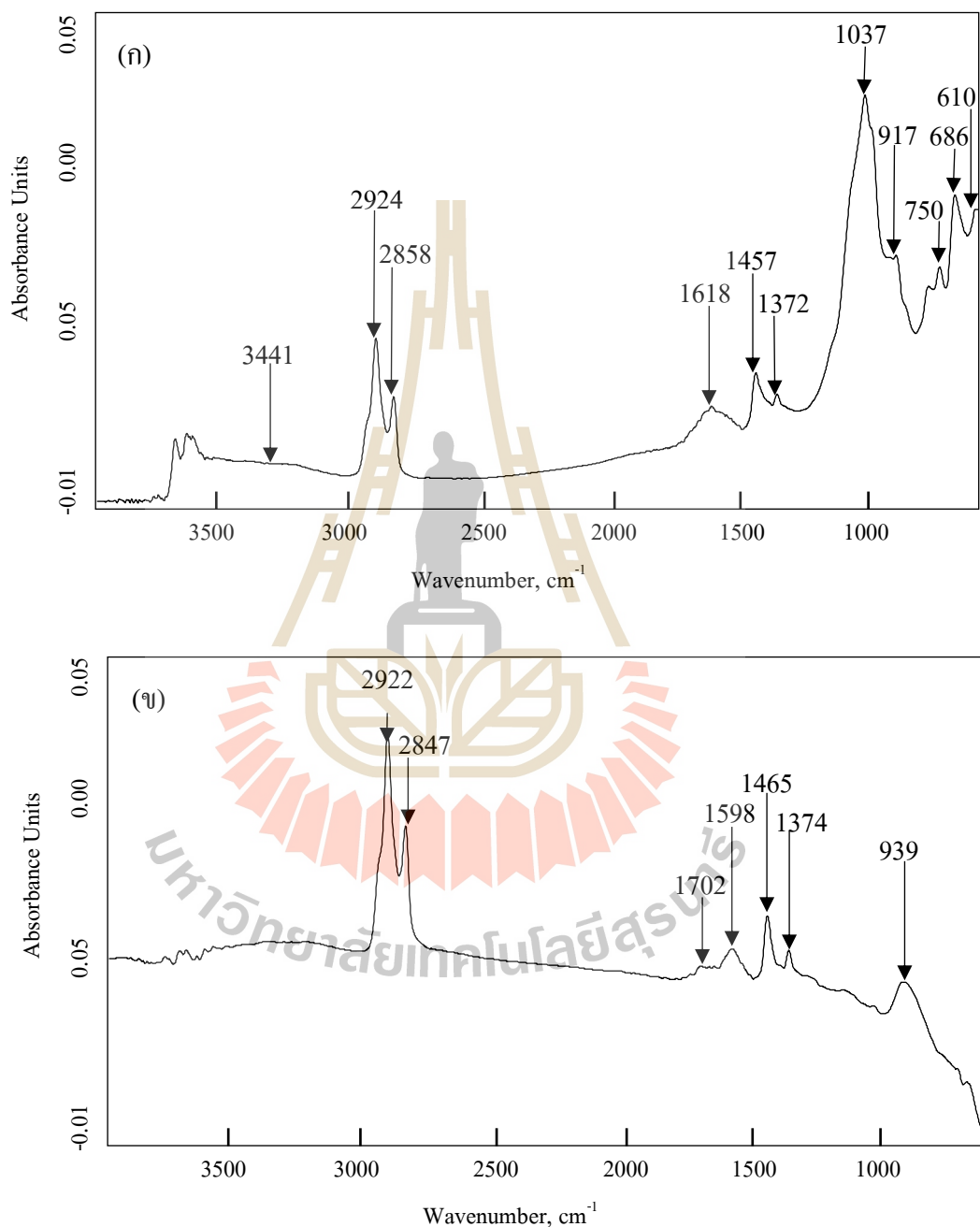
ภาพที่ 4.9 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซินแยกตามขนาดฝุ่นละอองเป็น 8 ช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร)

จากภาพที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมพบว่าสเปกตรัมที่พบทุกช่วงขนาดคือ 1) สเปกตรัมของไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) ในกลุ่มเมทิลีน (CH_2) ของหมู่แอลเคนในสองช่วงเลขคลื่นคือ 2845-2869 และ 2913-2942 cm^{-1} , 2) สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับออกซิเจน (C-O) ของหมู่แอลกอฮอล์ในช่วงเลขคลื่น 1037-1105 cm^{-1} และยังพบการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของออกซิเจนกับไฮโดรเจน (O-H) ในช่วงเลขคลื่น 3203-3570 cm^{-1} ของหมู่แอลกอฮอล์หรือน้ำ และ 3) สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของซัลเฟอร์กับออกซิเจน (S-O) ของซัลเฟตไอออนในช่วงเลขคลื่น 600-623 cm^{-1} ส่วนสเปกตรัมที่พบบางช่วงขนาดมีดังนี้

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) ในกลุ่มเมทิล (CH_3) ของหมู่แอลเคนในสองช่วงเลขคลื่นคือ $1358\text{-}1387$ และ $1443\text{-}1468\text{ cm}^{-1}$
- สเปกตรัมของหมู่แอลคีนพบการสั่นสองพันธะคือ การสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) ในสองช่วงเลขคลื่นคือ $685\text{-}704$ และ $877\text{-}899\text{ cm}^{-1}$ และการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับคาร์บอน (C=C) ในช่วงเลขคลื่น $1606\text{-}1659\text{ cm}^{-1}$
- สเปกตรัมเกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับคาร์บอนที่ต่อกันเป็นวงอะโรมาติก (-C=C-) ของหมู่อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในช่วงเลขคลื่น $1565\text{-}1587\text{ cm}^{-1}$
- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของออกซิเจนกับไฮโดรเจน (O-H) ของหมู่กรดคาร์บอกซิลิกในช่วงเลขคลื่น $901\text{-}948\text{ cm}^{-1}$
- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับออกซิเจน (C=O) ของหมู่แอลดีไฮด์ในช่วงเลขคลื่น $1705\text{-}1720\text{ cm}^{-1}$
- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของไนโตรเจนกับไฮโดรเจน (N-H) ของหมู่เอมีนในช่วงเลขคลื่น $745\text{-}765\text{ cm}^{-1}$
- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของไนโตรเจนกับไฮโดรเจน (N-H) ของแอมโมเนียมไอออนในช่วงเลขคลื่น $1392\text{-}1440\text{ cm}^{-1}$
- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของซัลเฟอร์กับออกซิเจน (S-O) ของซัลเฟตไอออนในช่วงเลขคลื่น $600\text{-}623\text{ cm}^{-1}$ (รายละเอียดช่วงเลขคลื่นแสดงดังตาราง 4.9)

4.2.1.2 การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะที่มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมันดีเซล

การจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมันดีเซลพบแถบสเปกตรัมที่แตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซล

(ก) ช่วงขนาดของฝุ่นละออง 9.00-10.00 ไมโครเมตร และ

(ข) ช่วงขนาดของฝุ่นละออง 0.65-1.10 ไมโครเมตร

จากภาพที่ 4.10 (ก) พบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ กลุ่มแอลเคน (ช่วงเลขคลื่น 1360-1473 และ 2837-2939 cm^{-1}), แอลคีน (ช่วงเลขคลื่น 679-699 และ 1609-1646 cm^{-1}), แอลกอฮอล์ (ช่วงเลขคลื่น 1039-1100 และ 3240-3547 cm^{-1}), กรดคาร์บอกซิลิก (ช่วงเลขคลื่น 912-960 cm^{-1}), เอมีน (ช่วงเลขคลื่น 745-765 cm^{-1}), ซัลเฟตไอออน (ช่วงเลขคลื่น 605-648 cm^{-1}), และไอน้ำ (ช่วงเลขคลื่น 3240-3547 cm^{-1}) ซึ่งเป็นแถบสเปกตรัมที่พบในช่วงขนาดฝุ่นละออง 9.00-10.00 ไมโครเมตร นอกจากนี้ยังพบแถบสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันอื่นในช่วงขนาดฝุ่นละออง 0.65-1.10 ไมโครเมตร (ภาพที่ 4.10 (ข)) คือ อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (ช่วงเลขคลื่น 1572-1601 cm^{-1}), และแอลดีไฮด์ (ช่วงเลขคลื่น 1674-1721 cm^{-1}) รายละเอียดแถบสเปกตรัมและช่วงเลขคลื่นของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซลในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตรแสดงดังตาราง 4.10

ตารางที่ 4.10 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซลที่เกิดขึ้นในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตร

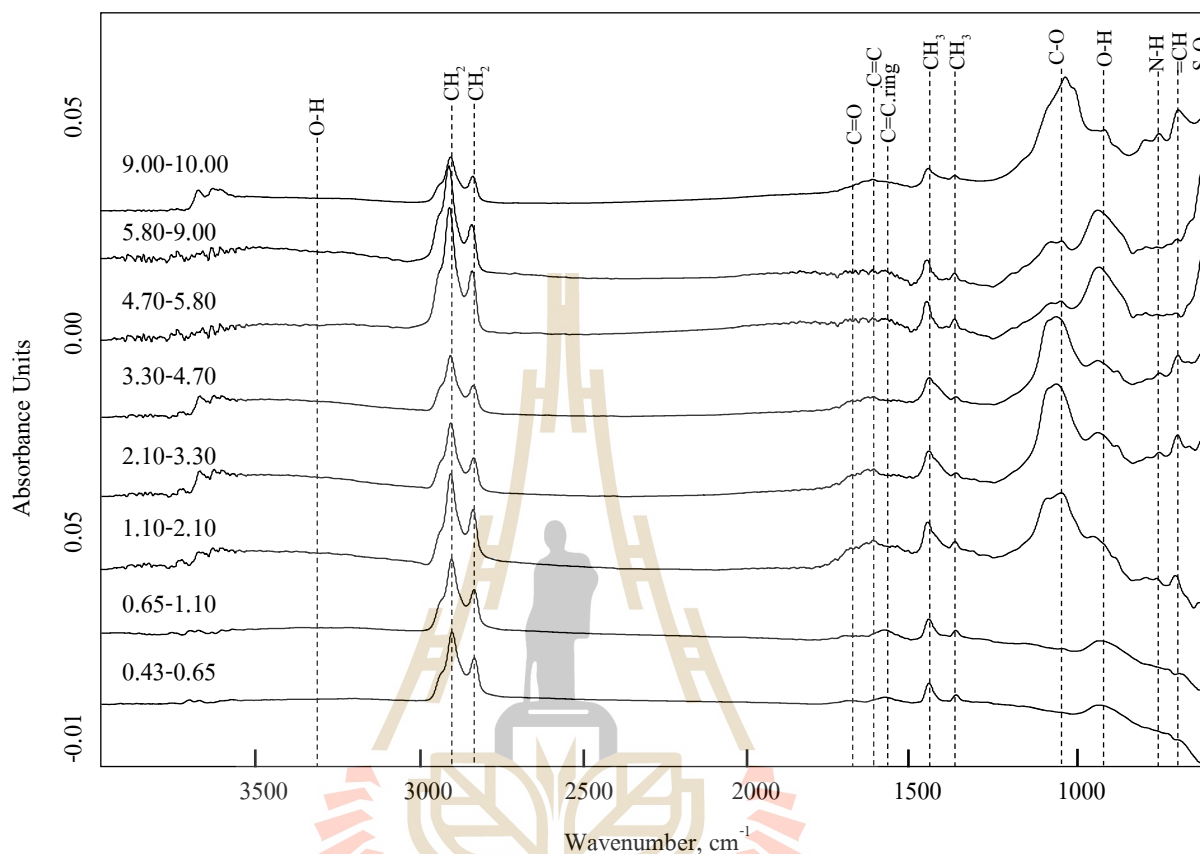
Functionality	Group	Assignment	Wavenumber range (cm^{-1})	Intensity
Alkanes	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	CH_3 .symmetric.bending	1360-1385	m
		CH_3 .asymmetric.bending	1451-1473	m
		CH_2 .symmetric.stretching	2837-2866	vs
		CH_2 .asymmetric.stretching	2911-2939	vs
Alkenes	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$	=CH.wagging.bending	679-699	w
		C=C.stretching	1609-1646	m
Aromatic	C_6H_6	C=C.ring.stretching	1572-1601	m
Alcohols	CH_3-OH	C-O.asymmetric.stretching	1039-1100	m
Alcohols/water	-OH-	O-H.stretching	3240-3547	br
Carboxylic acid	CH_3-COOH	O-H.wagging.bending	912-960	ms
Aldehyde	$\text{CH}_3-\text{C}(=\text{O})\text{H}$	C=O.asymmetric.stretching (aromatic)	1674-1721	m
Amine	CH_3-NH_2	N-H.wagging.bending	745-765	w
Sulfate ions	SO_4^{2-}	S-O.bending	605-648	m

หมายเหตุ br = broad, vs= very strong, s = strong, ms= medium strong, m = medium, w= weak,

stretching = การยืด, bending = การงอ, asymmetric = ไม่สมมาตร, symmetric =

สมมาตร, wagging = การงอแบบกระดิก

แถบสเปกตรัมที่พบแยกตามขนาดฝุ่นละอองออกเป็น 8 ช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร) แสดงดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซลแยกตามขนาดฝุ่นละอองเป็น 8 ช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร)

จากภาพที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมพบว่าสเปกตรัมที่พบทุกช่วงขนาดคือ 1) สเปกตรัมของไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) ในกลุ่มเมทิล (CH_3) และเมทิลีน (CH_2) ของหมู่แอลเคนในสี่ช่วงเลขคลื่นคือ $1360\text{-}1385$, $1451\text{-}1473$, $2837\text{-}2866$ และ $2911\text{-}2939\text{ cm}^{-1}$ และ 2) สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของออกซิเจนกับไฮโดรเจน (O-H) ของหมู่กรดคาร์บอกซิลิกเกิดขึ้นในช่วงเลขคลื่น $912\text{-}960\text{ cm}^{-1}$ ส่วนสเปกตรัมที่พบบางช่วงขนาดมีดังนี้

- สเปกตรัมของหมู่แอลคีนพบการสั่นสองพันธะคือ การสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) และการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับคาร์บอน ($\text{C}=\text{C}$) ในช่วงเลขคลื่น $679\text{-}699$ และ $1606\text{-}1646\text{ cm}^{-1}$ ตามลำดับ

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับคาร์บอนที่ต่อกันเป็นวงอะโรมาติก ($-C=C-$) ของหมู่อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในช่วงเลขคลื่น $1572-1601\text{ cm}^{-1}$

- สเปกตรัมของหมู่แอลกอฮอล์พบการสั่นสองพันธะคือ การสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับออกซิเจน ($C-O$) ในวงเลขคลื่น $1039-1100\text{ cm}^{-1}$ และการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของออกซิเจนกับไฮโดรเจน ($O-H$) ในวงเลขคลื่น $3240-3547\text{ cm}^{-1}$ ของหมู่แอลกอฮอล์หรือไอน้ำ

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับออกซิเจน ($C=O$) ของหมู่แอลดีไฮด์ในช่วงเลขคลื่น $1674-1721\text{ cm}^{-1}$

- สเปกตรัมเกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของไนโตรเจนกับไฮโดรเจน ($N-H$) ของหมู่อะมีนในช่วงเลขคลื่น $745-765\text{ cm}^{-1}$

- สเปกตรัมเกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของซัลเฟอร์กับออกซิเจน ($S-O$) ของซัลเฟตไอออนในช่วงเลขคลื่น $605-648\text{ cm}^{-1}$

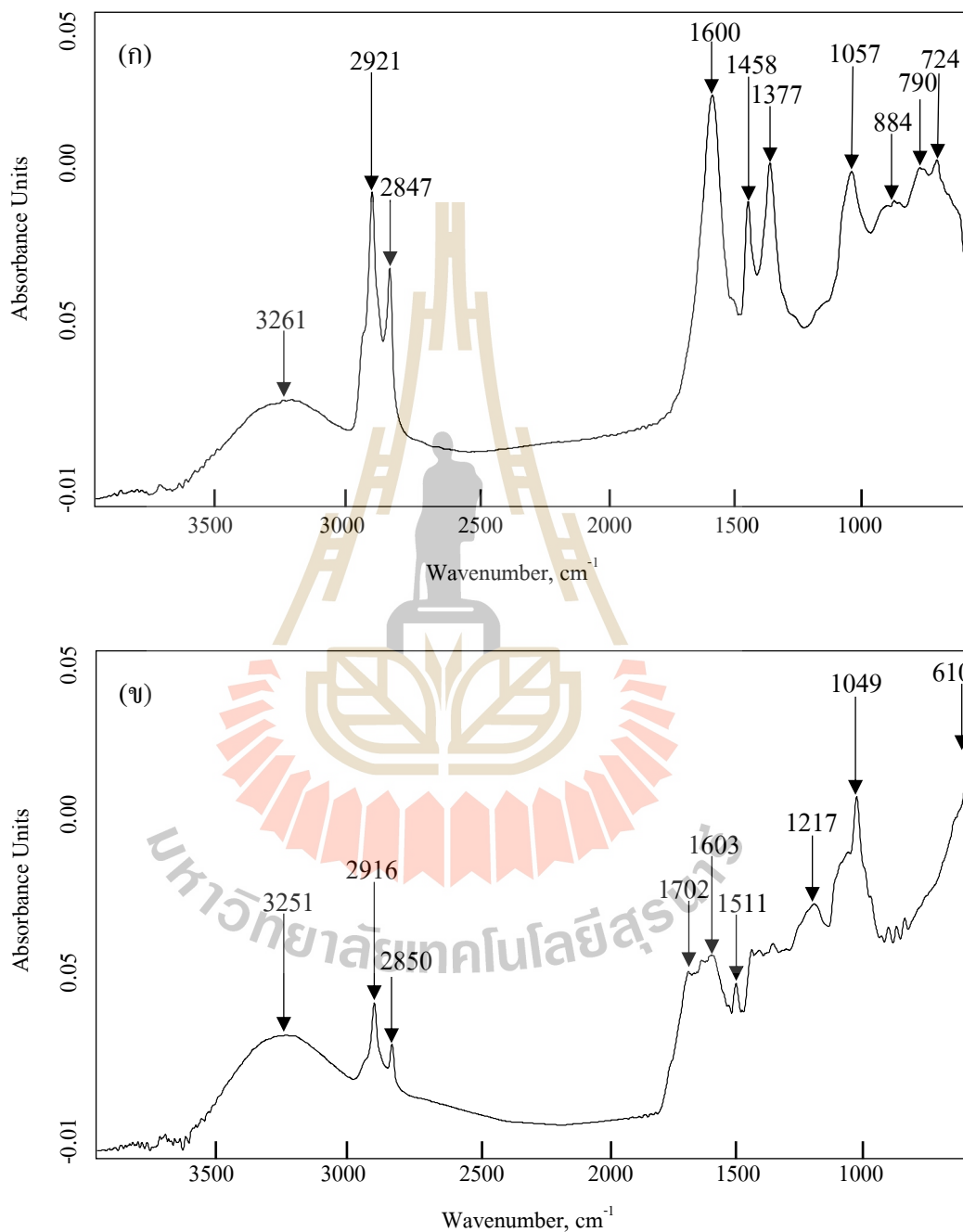
องค์ประกอบของฝุ่นละอองที่พบในเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดมีหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน, ไฮโดรเจน, ออกซิเจน, ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Popovicheva, Kireeva, Shonija, Vojtisek-Lom, and Schwarz. (2015) จากตารางที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าองค์ประกอบหลักของเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนในกลุ่ม CH_3 (เมทิล), CH_2 (เมทิลีน) และ $C=C-H$ เป็นไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในกลุ่มของแอลเคน, แอลคีน และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน โดยกลุ่มที่พบเป็นส่วนใหญ่คือ CH_2 , อะตอมของออกซิเจนพบอยู่ในพันธะ $C-O$ ของกลุ่มแอลกอฮอล์และอยู่ในพันธะ $O-H$ ของกลุ่มแอลกอฮอล์หรือไอน้ำซึ่งพบในเชื้อเพลิงเบนซินทุกช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร) แต่ในเชื้อเพลิงดีเซลไม่พบในช่วงขนาดฝุ่นละออง 0.43-1.10 ไมโครเมตร และยังไม่พบอะตอมของออกซิเจนอยู่ในพันธะ $O-H$ ของกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกในเชื้อเพลิงทั้งสองชนิด ส่วนอะตอมของออกซิเจนที่พบอยู่ในพันธะ $C=O$ (คาร์บอนิล) ในกลุ่มแอลดีไฮด์ พบว่าในเชื้อเพลิงเบนซินเป็นพันธะ $C=O$ ชนิดอะโรมาติก ซึ่งเกิดที่เลขคลื่นสูงกว่าในเชื้อเพลิงดีเซลซึ่งพบ $C=O$ ชนิดอิ่มตัว โดยในเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดพบเฉพาะในช่วงขนาดฝุ่นละออง 0.43-2.10 ไมโครเมตร เช่นเดียวกัน อะตอมของไนโตรเจนพบอยู่ในพันธะ $N-H$ ของกลุ่มเอมีนและแอมโมเนียมไอออน โดยในกลุ่มเอมีนพบในการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งสองชนิด ส่วนในแอมโมเนียมไอออนพบเฉพาะในเชื้อเพลิงเบนซิน และอะตอมของซัลเฟอร์พบอยู่ในพันธะ $S-O$ ของกลุ่มซัลเฟตไอออน ซึ่งพบในทุกช่วงขนาดฝุ่นละอองของการเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซิน แต่ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซลพบเฉพาะในช่วงขนาดฝุ่นละออง 3.30-10.00 ไมโครเมตร องค์ประกอบที่พบในฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดแสดงดังตาราง 4.11

ตารางที่ 4.11 หมู่ฟังก์ชันที่พบในฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซินและดีเซล

Functionality	Vibrational mode	เชื้อเพลิงเบนซิน	เชื้อเพลิงดีเซล
Alkanes	CH ₃ .symmetric.bending	✓	✓
	CH ₃ .asymmetric.bending	✓	✓
	CH ₂ .symmetric.stretching	✓	✓
	CH ₂ .asymmetric.stretching	✓	✓
Alkenes	=CH.wagging.bending	✓	✓
	C=C.stretching	✓	✓
Aromatic	C=C.ring.stretching	✓	✓
Alcohols	C-O.asymmetric.stretching	✓	✓
Alcohols/water	O-H.stretching	✓	✓
Carboxylic acid	O-H.wagging.bending	✓	✓
Aldehyde	C=O.asymmetric.stretching		✓
	(aromatic)		
	C=O.asymmetric.stretching (saturated)	✓	
Amine	N-H.wagging.bending	✓	✓
Ammonium ions	N-H.stretching	✓	
Sulfate ions	S-O.bending	✓	✓

4.2.1.3 การเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

การจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรพบแถบสเปกตรัมที่ต่างกันแสดงดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (ก) ช่วงขนาดของฝุ่นละออง 3.30-4.70 ไมโครเมตร และ (ข) ช่วงขนาดของฝุ่นละออง 0.65-1.10 ไมโครเมตร

จากภาพที่ 4.12 (ก) พบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ กลุ่มแอลเคน (ช่วงเลขคลื่น 710-735, 1359-1473 และ 2840-2944 cm^{-1}), แอลคีน (ช่วงเลขคลื่น 780-800 และ 865-890 cm^{-1}), แอลกอฮอล์ (ช่วงเลขคลื่น 1039-1108 และ 3225-3498 cm^{-1}), อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (ช่วงเลขคลื่น 1578-1603 cm^{-1}), และไอน้ำ (ช่วงเลขคลื่น 3225-3498 cm^{-1}) ซึ่งเป็นแถบสเปกตรัมที่พบในช่วงขนาดฝุ่นละออง 3.30-4.70 ไมโครเมตร นอกจากนี้ยังพบแถบสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันอื่นในช่วงขนาดฝุ่นละออง 0.65-1.10 ไมโครเมตร (ภาพที่ 4.12 (ข)) คือ แอลกอฮอล์ (ช่วงเลขคลื่น 1197-1219 cm^{-1}), แอลดีไฮด์ (ช่วงเลขคลื่น 1695-1715 cm^{-1}), ไนโตร (ช่วงเลขคลื่น 1506-1522 cm^{-1}), และซัลเฟตไอออน (ช่วงเลขคลื่น 600-645 cm^{-1}) รายละเอียดแถบสเปกตรัมและช่วงเลขคลื่นของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตรแสดงดังตาราง 4.12

ตารางที่ 4.12 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่เกิดขึ้นในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตร

Functionality	Group	Assignment	Wavenumber range (cm^{-1})	Intensity
Alkanes	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	CH_2 .rocking.bending	710-735	w
		CH_3 .symmetric.bending	1359-1387	m
		CH_3 .asymmetric.bending	1450-1473	m
Alkanes	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	CH_2 .symmetric.stretching	2840-2873	vs
		CH_2 .asymmetric.stretching	2908-2944	vs
Alkenes	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$	$=\text{CH}$.wagging.bending	660-670	w
			780-800	w
			865-890	w
		$\text{C}=\text{C}$.stretching	1606-1613	m
Aromatic	C_6H_6	$\text{C}=\text{C}$.ring.stretching	1578-1603	m
Alcohols	CH_3-OH	$\text{C}-\text{O}$.asymmetric.stretching	1039-1108	m
			1197-1219	w
Alcohols/water	$-\text{OH}-$	$\text{O}-\text{H}$.stretching	3225-3498	br
Carboxylic acid	CH_3-COOH	$\text{O}-\text{H}$.wagging.bending	912-948	ms
Aldehyde	$\text{CH}_3-\text{C}(=\text{O})\text{H}$	$\text{C}=\text{O}$.asymmetric.stretching	1695-1715	m

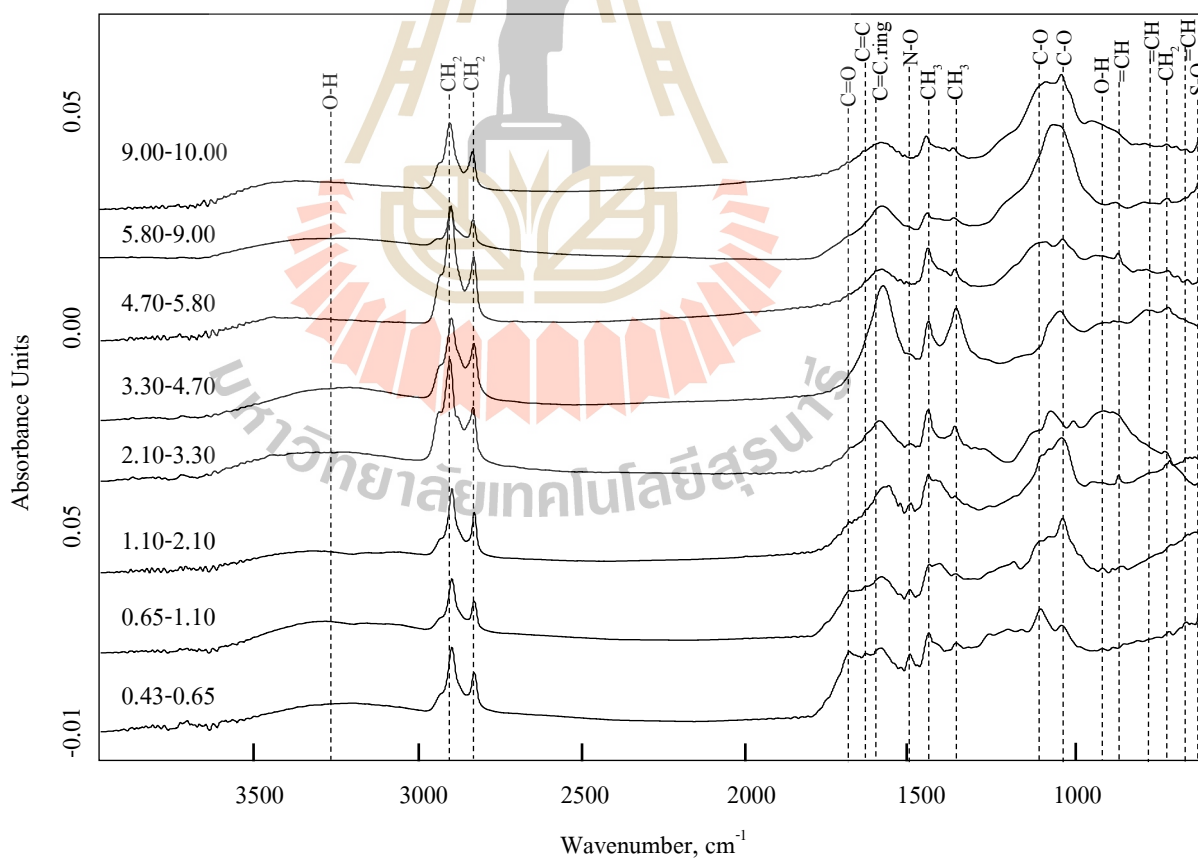
(aromatic)

ตารางที่ 4.12 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้
ทางการเกษตรที่เกิดขึ้นในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตร

Functionality	Group	Assignment	Wavenumber range (cm ⁻¹)	Intensity
Nitro	CH ₃ -NO ₂	NO ₂ .asymmetric.stretching	1506-1522	m
Sulfate ions	SO ₄ ²⁻	S-O.bending	600-645	m

หมายเหตุ br = broad, vs= very strong, s = strong, ms= medium strong, m = medium, w= weak,
stretching = การยืด, bending = การงอ, asymmetric = ไม่สมมาตร, symmetric =
สมมาตร, wagging = การงอแบบกระดิก, rocking = การงอแบบโคลงในระนาบ

แถบสเปกตรัมที่พบแยกตามขนาดฝุ่นละอองออกเป็น 8 ช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร) แสดงดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร
แยกตามขนาดฝุ่นละอองเป็น 8 ช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร)

จากภาพที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมพบว่าสเปกตรัมที่พบทุกช่วงขนาดคือ 1) สเปกตรัมของไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) ในกลุ่มเมทิล (CH_3) และเมทิลีน (CH_2) ของหมู่แอลเคนในสามช่วงเลขคลื่นคือ $1450\text{-}1473$, $2840\text{-}2873$ และ $2908\text{-}2944\text{ cm}^{-1}$, 2) สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับออกซิเจน (C-O) ของหมู่แอลกอฮอล์ในช่วงเลขคลื่น $1039\text{-}1108\text{ cm}^{-1}$ และยังพบการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของออกซิเจนกับไฮโดรเจน (O-H) ในช่วงเลขคลื่น $3225\text{-}3498\text{ cm}^{-1}$ ของหมู่แอลกอฮอล์หรือไอน้ำ และ 3) สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของซัลเฟอร์กับออกซิเจน (S-O) ของซัลเฟตไอออนในช่วงเลขคลื่น $600\text{-}645\text{ cm}^{-1}$ ส่วนสเปกตรัมที่พบบางช่วงขนาดมีดังนี้

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) ในกลุ่มเมทิลีน (CH_2) และเมทิล (CH_3) ของหมู่แอลเคนในช่วงเลขคลื่น $710\text{-}735$ และ $1359\text{-}1387\text{ cm}^{-1}$ ตามลำดับ

- สเปกตรัมของหมู่แอลคีนพบการสั่นสองพันธะคือ การสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) ในสามช่วงเลขคลื่นคือ $660\text{-}676$, $780\text{-}800$ และ $865\text{-}890\text{ cm}^{-1}$ และการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับคาร์บอน (C=C) ในช่วงเลขคลื่น $1606\text{-}1613\text{ cm}^{-1}$

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับคาร์บอนที่ต่อกันเป็นวงอะโรมาติก (-C=C-) ของหมู่อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในช่วงเลขคลื่น $1578\text{-}1603\text{ cm}^{-1}$

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับออกซิเจน (C-O) ของหมู่แอลกอฮอล์ในช่วงเลขคลื่น $1197\text{-}1219\text{ cm}^{-1}$

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของออกซิเจนกับไฮโดรเจน (O-H) ของหมู่กรดคาร์บอกซิลิกในช่วงเลขคลื่น $912\text{-}948\text{ cm}^{-1}$

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับออกซิเจน (C=O) ของหมู่แอลดีไฮด์ (aromatic) ในช่วงเลขคลื่น $1695\text{-}1715\text{ cm}^{-1}$

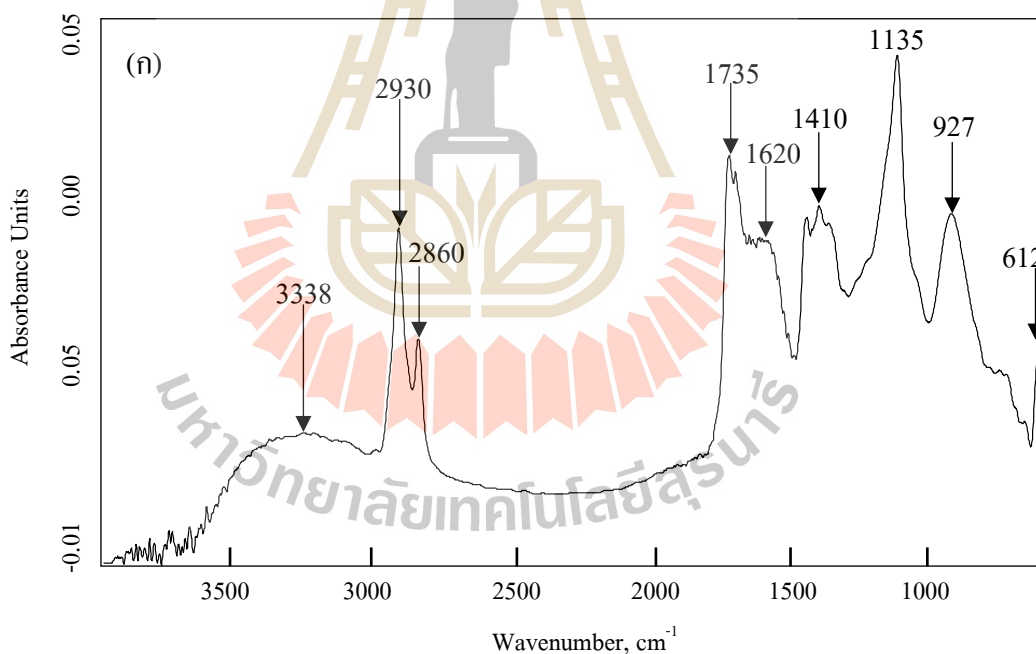
- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของไนโตรเจนกับออกซิเจน (N-O) ของหมู่ไนโตรพในในช่วงเลขคลื่น $1506\text{-}1522\text{ cm}^{-1}$

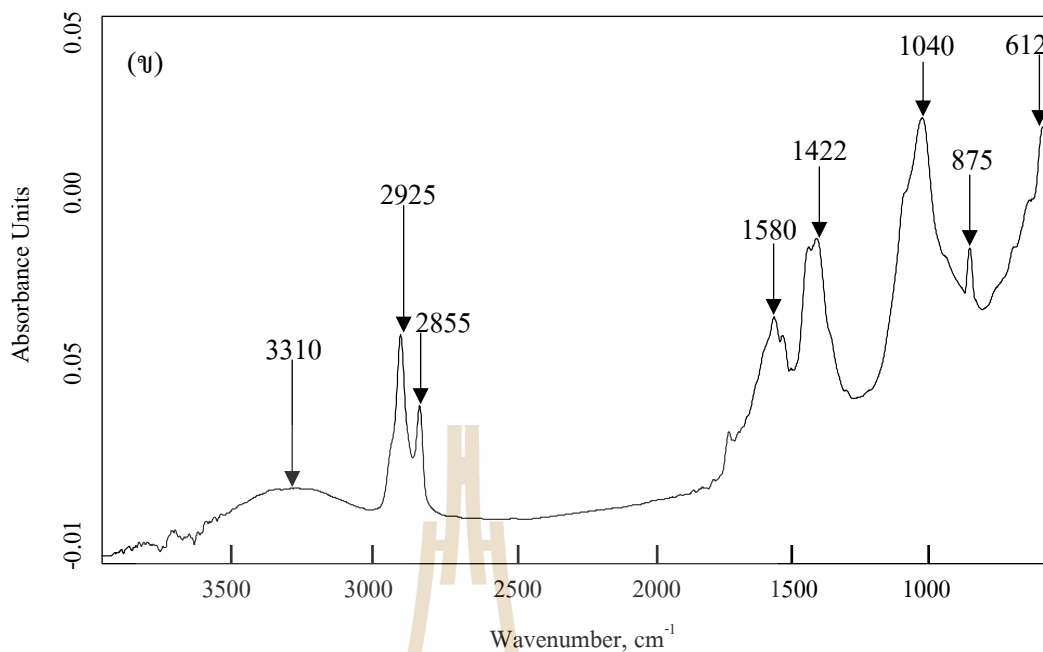
องค์ประกอบของฟingerprint ที่พบจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน, ไฮโดรเจน, ออกซิเจน, ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ จากตารางที่ 4.12 พบว่าองค์ประกอบหลักของการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนในกลุ่ม CH_3 (เมทิล), CH_2 (เมทิลีน) และ C=C-H เป็นไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในกลุ่ม

ของแอลเคน, แอลคีน และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน โดยกลุ่มที่พบเป็นส่วนใหญ่คือ CH_2 , อะตอมของออกซิเจนพบอยู่ในพันธะ C-O ของกลุ่มแอลกอฮอล์และ O-H ของกลุ่มแอลกอฮอล์หรือไอน้ำ โดยพบทุกช่วงขนาดฟูลละออง และยังพบอยู่ในพันธะ O-H ของกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกในบางช่วงขนาด ส่วนอะตอมของออกซิเจนที่พบอยู่ในพันธะ C=O (คาร์บอนิล) ในกลุ่มแอลดีไฮด์พบว่า เป็นพันธะ C=O ชนิดอะโรมาติก พบเฉพาะในช่วงขนาดฟูลละออง 0.43-1.10 ไมโครเมตร, อะตอมของไนโตรเจนพบในอยู่พันธะ N-O ของกลุ่มไนโตร ซึ่งพบเฉพาะช่วงขนาดฟูลละออง 0.43-2.10 ไมโครเมตร และอะตอมของซัลเฟอร์พบอยู่ในพันธะ S-O ของกลุ่มซัลเฟตไอออนซึ่งพบทุกช่วงขนาดฟูลละออง

4.2.1.4 การเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง

การจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฟูลละอองจากการเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่างพบแถบสเปกตรัมที่แตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 4.14





ภาพที่ 4.14 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละองจากการเผาไหม้ที่เกิดจาก
กิจกรรมการปิ้งย่าง (ก) ช่วงขนาดของฟู่นละอง 0.43-0.65 ไมโครเมตร และ
(ข) ช่วงขนาดของฟู่นละอง 1.10-2.10 ไมโครเมตร

จากภาพที่ 4.14 (ก) พบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ กลุ่มแอลเคน (ช่วงเลขคลื่น 2848-2938 cm^{-1}), แอลคีน (ช่วงเลขคลื่น 1617-1658 cm^{-1}), แอลกอฮอล์หรือไอน้ำ (ช่วงเลขคลื่น 3233-3488 cm^{-1}), กรดคาร์บอกซิลิก (ช่วงเลขคลื่น 915-957 cm^{-1}), แอลดีไฮด์ (ช่วงเลขคลื่น 1712-1745 cm^{-1}), เอมีน (ช่วงเลขคลื่น 1135-1175 cm^{-1}), แอมโมเนียมไอออน (ช่วงเลขคลื่น 1400-1432 cm^{-1}), และซัลเฟตไอออน (ช่วงเลขคลื่น 602-625 cm^{-1}) ซึ่งเป็นแถบสเปกตรัมที่พบในช่วงขนาดฟู่นละอง 0.43-0.65 ไมโครเมตร นอกจากนี้ยังพบแถบสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันอื่นในช่วงขนาดฟู่นละอง 1.10-2.10 ไมโครเมตร (ภาพที่ 4.14 (ข)) คือ แอลกอฮอล์ (ช่วงเลขคลื่น 1040-1099 cm^{-1}) และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (ช่วงเลขคลื่น 1570-1605 cm^{-1}) รายละเอียดแถบสเปกตรัมและช่วงเลขคลื่นของฟู่นละองจากการเผาไหม้จากกิจกรรมการปิ้งย่างในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตรแสดงดังตาราง 4.13

ตารางที่ 4.13 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของฝุ่นละอองจากกิจกรรมการปิ้งย่างที่
เกิดขึ้นในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตร

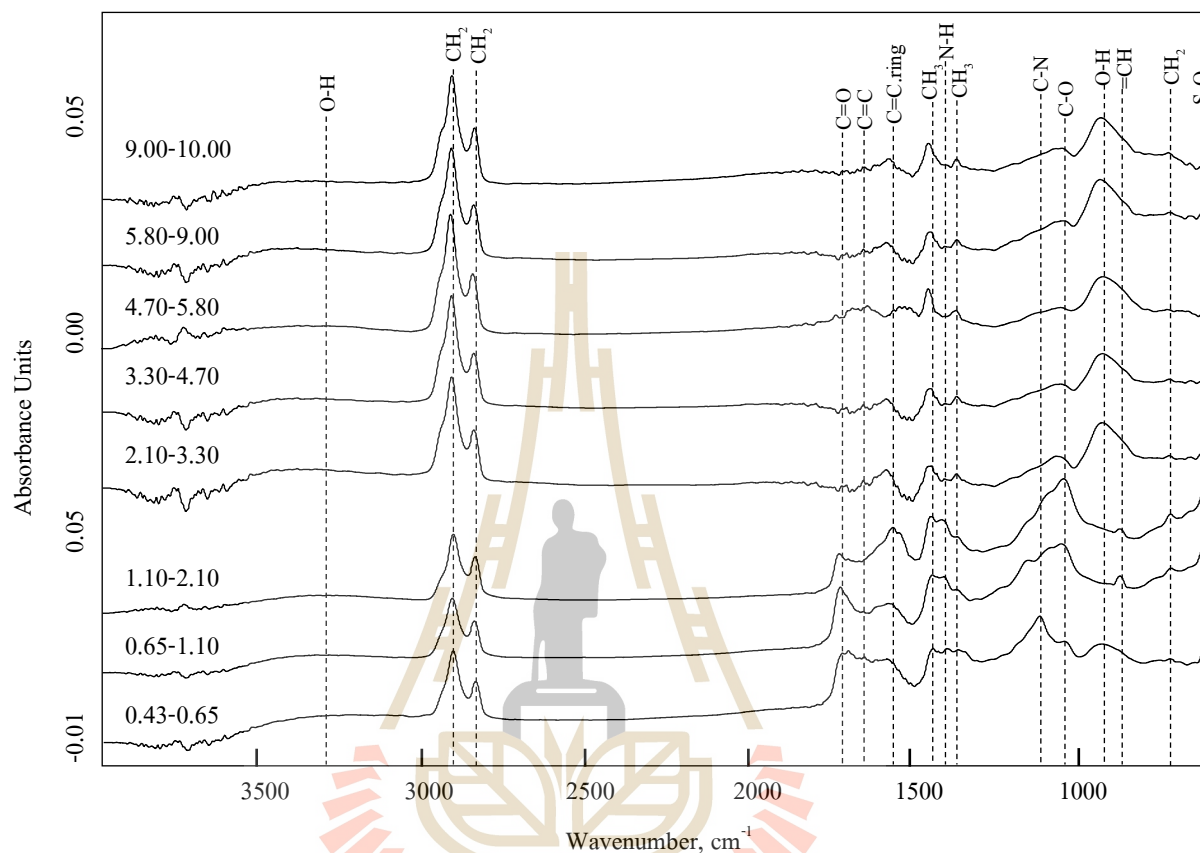
Functionality	Group	Assignment	Wavenumber range (cm ⁻¹)	Intensity
Alkanes	CH ₃ -(CH ₂) _n -CH ₃	CH ₂ .rocking.bending	710-737	w
		CH ₃ .symmetric.bending	1367-1388	m
		CH ₃ .asymmetric.bending	1442-1475	m
		CH ₂ .symmetric.stretching	2848-2868	vs
		CH ₂ .asymmetric.stretching	2920-2938	vs
Alkenes	CH ₂ =CH ₂	=CH.wagging.bending	865-882	w
		C=C.stretching	1617-1658	m
Aromatic	C ₆ H ₆	C=C.ring.stretching	1570-1605	m
Alcohols	CH ₃ -OH	C-O.asymmetric.stretching	1040-1099	m
Alcohols/water	-OH-	O-H.stretching	3233-3488	br
Carboxylic acid	CH ₃ -COOH	O-H.wagging.bend	915-957	ms
Aldehyde	CH ₃ -C(=O)H	C=O.asymmetric.stretching	1712-1745	m
		(saturated)		
Amine	CH ₃ -NH ₂	C-N.asymmetric.stretching	1135-1175	w
Ammonium ions	NH ₄ ⁺	N-H. stretching	1400-1432	m
Sulfate ions	SO ₄ ²⁻	S-O.bending	602-625	m

หมายเหตุ br = broad, vs = very strong, s = strong, ms = medium strong, m = medium, w = weak,

stretching = การยืด, bending = การงอ, asymmetric = ไม่สมมาตร, symmetric =

สมมาตร, wagging = การงอแบบกระดิก, rocking = การงอแบบโคลง

แถบสเปกตรัมที่พบแยกตามขนาดฝุ่นละอองออกเป็น 8 ช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร) แสดงดังภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง แยกตามขนาดฝุ่นละอองเป็น 8 ช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร)

จากภาพที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมพบว่าสเปกตรัมที่พบทุกช่วงขนาดคือ 1) สเปกตรัมของไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) ในกลุ่มเมทิล (CH_3) และเมทิลีน (CH_2) ของหมู่แอลเคนในสามช่วงเลขคลื่นคือ $1442-1475$, $2848-2868$ และ $2920-2938 \text{ cm}^{-1}$ และ 2) สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของออกซิเจนกับไฮโดรเจน (O-H) ของหมู่แอลกอฮอล์หรือน้ำในช่วงเลขคลื่น $3233-3488 \text{ cm}^{-1}$ ส่วนสเปกตรัมที่พบบางช่วงขนาดมีดังนี้

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) ในกลุ่มเมทิลีน (CH_2) และเมทิล (CH_3) ของหมู่แอลเคนในช่วงเลขคลื่น $710-737$ และ $1367-1388 \text{ cm}^{-1}$ ตามลำดับ

- สเปกตรัมของหมู่แอลคีนพบการสั่นสองพันธะคือ การสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) และการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับคาร์บอน (C=C) ในช่วงเลขคลื่น 865-882 และ 1617-1658 cm^{-1} ตามลำดับ

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับคาร์บอนที่ต่อกันเป็นวงอะโรมาติก (-C=C-) ของหมู่อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในช่วงเลขคลื่น 1570-1605 cm^{-1}

- สเปกตรัมเกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับออกซิเจน (C-O) ของหมู่แอลกอฮอล์ในช่วงเลขคลื่น 1040-1099 cm^{-1}

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของออกซิเจนกับไฮโดรเจน (O-H) ของหมู่กรดคาร์บอกซิลิกในช่วงเลขคลื่น 915-957 cm^{-1}

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับออกซิเจน (C=O) ของหมู่แอลดีไฮด์ (saturated) ในช่วงเลขคลื่น 1712-1745 cm^{-1}

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไนโตรเจน (C-N) ของหมู่เอมีนในช่วงเลขคลื่น 1135-1175 cm^{-1}

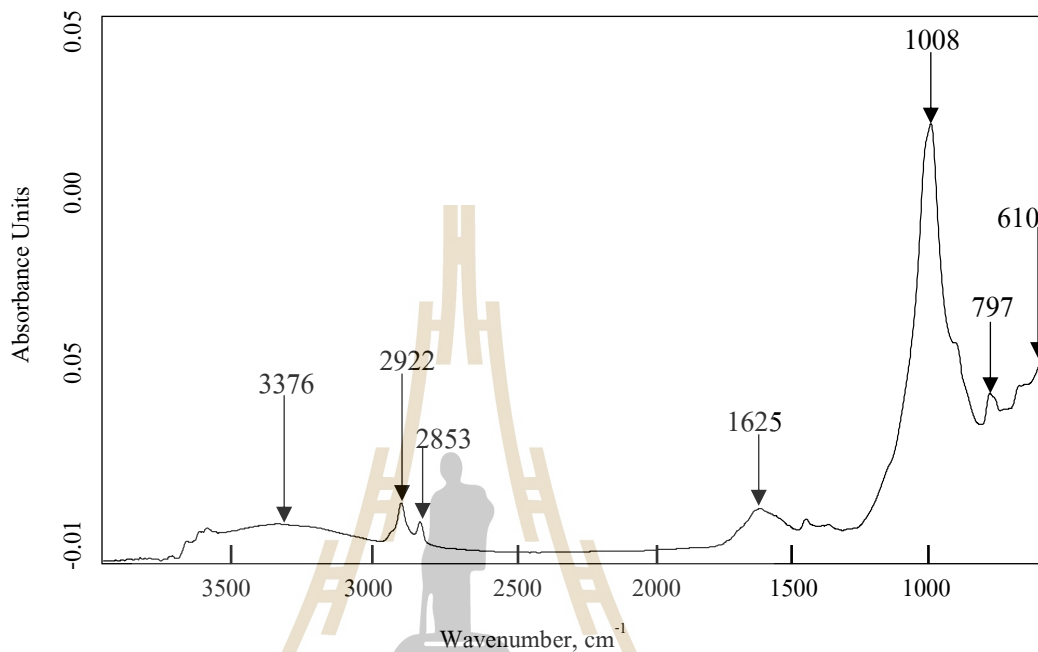
- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของไนโตรเจนกับไฮโดรเจน (N-H) ของแอมโมเนียมไอออนในช่วงเลขคลื่น 1400-1432 cm^{-1}

- สเปกตรัมเกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของซัลเฟอร์กับออกซิเจน (S-O) ของซัลเฟตไอออนในช่วงเลขคลื่น 602-625 cm^{-1}

องค์ประกอบของฝุ่นละอองที่พบจากกิจกรรมการปิ้งย่างมีหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน, ไฮโดรเจน, ออกซิเจน, ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ จากตารางที่ 4.13 พบว่าองค์ประกอบหลักของฝุ่นละอองจากกิจกรรมการปิ้งย่าง ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนในกลุ่ม CH_3 (เมทิล), CH_2 (เมทิลีน) และ C=C-H เป็นไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในกลุ่มของแอลเคน, แอลคีน และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน โดยกลุ่มที่พบเป็นส่วนใหญ่คือ CH_2 , อะตอมของออกซิเจนพบอยู่ในพันธะ C-O ของกลุ่มแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยังพบอยู่ในพันธะ O-H ของกลุ่มแอลกอฮอล์หรือน้ำ และยังพบอยู่ในพันธะ O-H ของกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกในบางช่วงขนาด ส่วนอะตอมของออกซิเจนที่พบอยู่ในพันธะ C=O (คาร์บอนิล) ในกลุ่มแอลดีไฮด์พบว่าเป็นพันธะ C=O ชนิดอิมตัว พบเฉพาะในช่วงขนาดฝุ่นละออง 0.43-2.10 ไมโครเมตร, อะตอมของไนโตรเจนพบอยู่ในพันธะ N-H ของกลุ่มเอมีนและแอมโมเนียมไอออน โดยในกลุ่มเอมีนพบเฉพาะในช่วงขนาดฝุ่นละออง 0.43-1.10 ไมโครเมตร ส่วนไนโตรเจนพบเฉพาะในช่วงขนาดฝุ่นละออง 0.43-2.10 ไมโครเมตร และอะตอมของซัลเฟอร์พบอยู่ในพันธะ S-O ของกลุ่มซัลเฟตไอออนในบางช่วงขนาดฝุ่นละออง

4.2.1.5 อนุภาคฝุ่นดิน

การจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองจากอนุภาคฝุ่นดินพบแถบสเปกตรัมที่แตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.16 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ที่เกิดจากอนุภาคฝุ่นดิน ช่วงขนาดของฝุ่นละออง 9.00-10.00 ไมโครเมตร

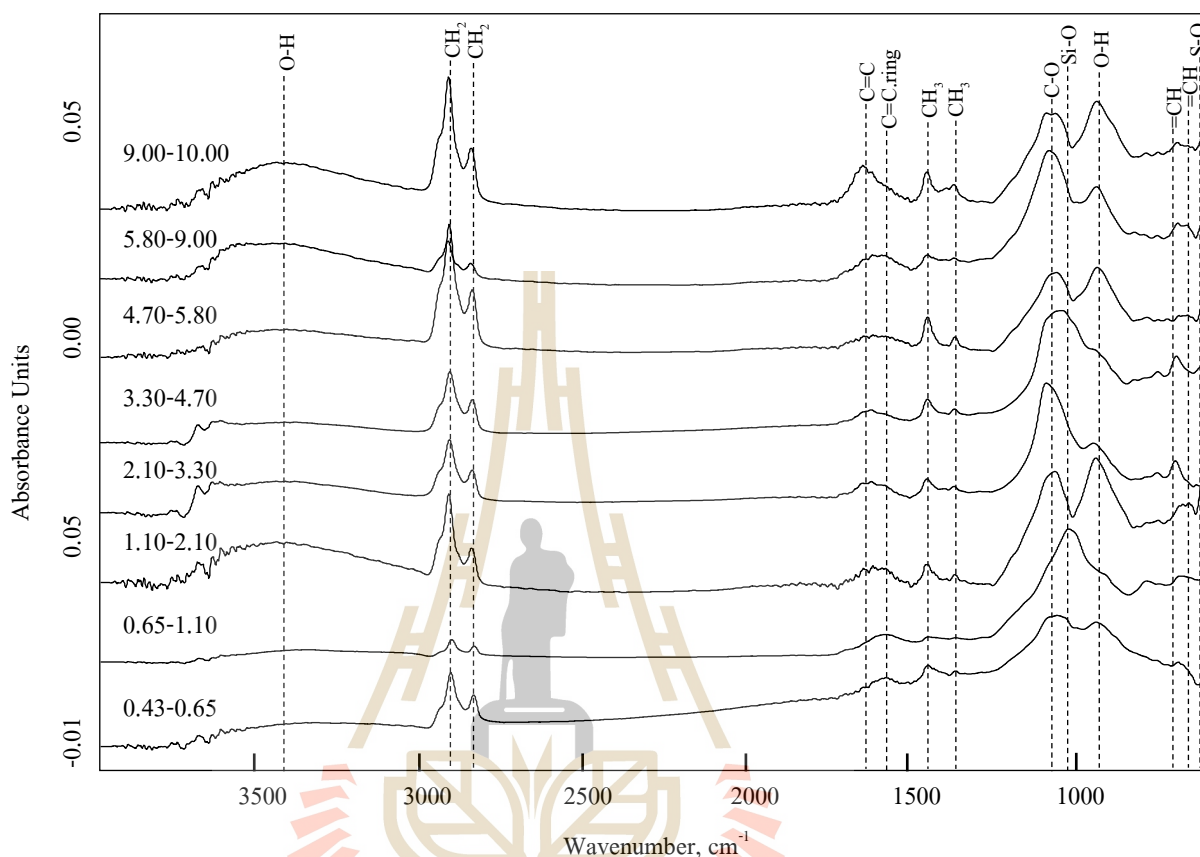
จากภาพที่ 4.16 พบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ กลุ่มแอลเคน (ช่วงเลขคลื่น 2845-2938 cm^{-1}), แอลคีน (ช่วงเลขคลื่น 773-800 และ 1617-1658 cm^{-1}), แอลกอฮอล์หรือไอน้ำ (ช่วงเลขคลื่น 3203-3517 cm^{-1}), และซัลเฟตไอออน (ช่วงเลขคลื่น 602-621 cm^{-1}), และซิลิเกตไอออน (ช่วงเลขคลื่น 995-1040 cm^{-1}) ซึ่งเป็นแถบสเปกตรัมที่พบในช่วงขนาดฝุ่นละออง 9.00-10.00 ไมโครเมตร รายละเอียดแถบสเปกตรัมและช่วงเลขคลื่นของฝุ่นละอองจากอนุภาคฝุ่นดินในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตรแสดงดังตาราง 4.14

ตารางที่ 4.14 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของอนุภาคฝุ่นดินที่เกิดขึ้นในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตร

Functionality	Group	Assignment	Wavenumber range (cm ⁻¹)	Intensity
Alkanes	CH ₃ -(CH ₂) _n -CH ₃	CH ₃ .symmetric.bending	1363-1385	m
		CH ₃ .asymmetric.bending	1441-1473	m
		CH ₂ .symmetric.stretching	2845-2866	vs
		CH ₂ .asymmetric.stretching	2917-2938	vs
Alkenes	CH ₂ =CH ₂	=CH.wagging.bending	661-704	w
			773-800	w
		C=C.stretching	1609-1665	m
Aromatic	C ₆ H ₆	C=C.ring.stretching	1582-1603	m
Alcohols	CH ₃ -OH	C-O.asymmetric.stretching	1040-1104	m
Alcohols/water	-OH-	O-H.stretching	3203-3517	br
Carboxylic acid	CH ₃ -COOH	O-H.wagging.bending	909-955	ms
Sulfate ions	SO ₄ ²⁻	S-O.bending	602-621	m
Silicate	SiO ₄ ⁴⁻	Si-O-Si.stretching	995-1040	s

หมายเหตุ br = broad, vs= very strong, s = strong, ms= medium strong, m = medium, w= weak, stretching = การยืด, bending = การงอ, asymmetric = ไม่สมมาตร, symmetric = สมมาตร, wagging = การงอแบบกระดิก

แถบสเปกตรัมที่พบแยกตามขนาดฝุ่นละอองออกเป็น 8 ช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร) แสดงดังภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.17 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ที่ฝุ่นละอองจากการอนุภาคฝุ่นดินแยกตามขนาดฝุ่นละอองเป็น 8 ช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร)

จากภาพที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมพบว่าสเปกตรัมที่พบทุกช่วงขนาดคือ 1) สเปกตรัมของไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) ในกลุ่มเมทิล (CH_3) และเมทิลีน (CH_2) ของหมู่แอลเคนในสามช่วงเลขคลื่นคือ $1441-1473$, $2845-2866$ และ $2917-2938 \text{ cm}^{-1}$, 2) สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) ของหมู่แอลคีนในช่วงเลขคลื่น $661-704 \text{ cm}^{-1}$ และ 3) สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของออกซิเจนกับไฮโดรเจน (O-H) ของหมู่แอลกอฮอล์หรือน้ำในช่วงเลขคลื่น $3203-3517 \text{ cm}^{-1}$ ส่วนสเปกตรัมที่พบบางช่วงขนาดมีดังนี้

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) ในกลุ่มเมทิล (CH_3) ของหมู่แอลเคนในช่วงเลขคลื่น $1363-1385 \text{ cm}^{-1}$

- สเปกตรัมของหมู่แอลคีนพบการสั่นสองพันธะคือ การสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) และการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับคาร์บอน (C=C) ในช่วงเลขคลื่น 773-800 และ 1609-1665 cm^{-1} ตามลำดับ

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับคาร์บอนที่ต่อกันเป็นวงอะโรมาติก (-C=C-) ของหมู่อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในช่วงเลขคลื่น 1582-1603 cm^{-1}

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับออกซิเจน (C-O) ของหมู่แอลกอฮอล์ในช่วงเลขคลื่น 1040-1104 cm^{-1}

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของออกซิเจนกับไฮโดรเจน (O-H) ของหมู่กรดคาร์บอกซิลิกในช่วงเลขคลื่น 909-955 cm^{-1}

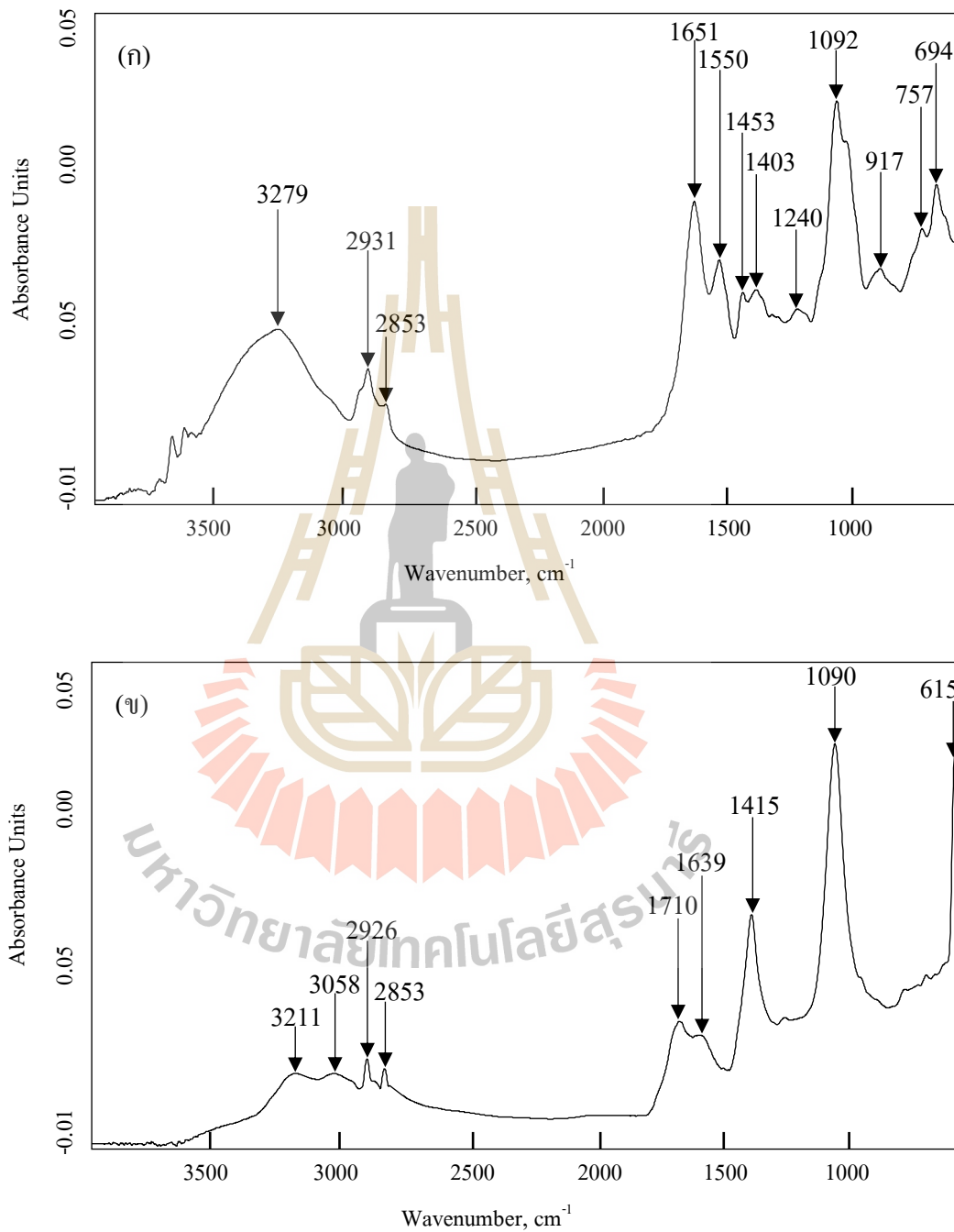
- สเปกตรัมเกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของซัลเฟอร์กับออกซิเจน (S-O) ของซัลเฟตไอออนในช่วงเลขคลื่น 602-621 cm^{-1}

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของซิลิกอนกับออกซิเจน (Si-O) ของซิลิเกตไอออนในช่วงเลขคลื่น 995-1040 cm^{-1}

องค์ประกอบของฝุ่นละอองที่พบในอนุภาคฝุ่นดินมีหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน, ไฮโดรเจน, ออกซิเจน, ซัลเฟอร์ และซิลิกอน จากตารางที่ 4.14 พบว่าองค์ประกอบหลักของอนุภาคฝุ่นดิน ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนในกลุ่ม CH_3 (เมทิล), CH_2 (เมทิลีน) และ C=C-H เป็นไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในกลุ่มของแอลเคน, แอลคีน และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน โดยกลุ่มที่พบเป็นส่วนใหญ่คือ CH_2 , อะตอมของออกซิเจนพบอยู่ในพันธะ C-O ของกลุ่มแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยังพบอยู่ในพันธะ O-H ของกลุ่มแอลกอฮอล์หรือไอน้ำ และยังพบอยู่ในพันธะ O-H ของกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกในบางช่วงขนาด, อะตอมของซัลเฟอร์พบอยู่ในพันธะ S-O ของกลุ่มซัลเฟตไอออนในบางช่วงขนาด และอะตอมของซิลิกอนพบอยู่ในพันธะ Si-O ของกลุ่มซิลิเกตไอออนในบางช่วงขนาดฝุ่นละออง

4.2.1.6 บรรยากาศทั่วไป

การจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไปพบแถบสเปกตรัมที่แตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 4.18



ภาพที่ 4.18 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไป

(ก) ช่วงขนาดของฝุ่นละออง 5.80-9.00 ไมโครเมตร และ

(ข) ช่วงขนาดของฝุ่นละออง 0.43-0.65 ไมโครเมตร

จากภาพที่ 4.18 (ก) พบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ กลุ่มแอลเคน (ช่วงเลขคลื่น 1443-1446 และ 2853-2931 cm^{-1}), แอลคีน (ช่วงเลขคลื่น 666-704 และ 1618-1664 cm^{-1}), แอลกอฮอล์ (ช่วงเลขคลื่น 1039-1105, 1230-1245 และ 3206-3411 cm^{-1}), กรดคาร์บอกซิลิก (ช่วงเลขคลื่น 910-948 cm^{-1}), เอมีน (ช่วงเลขคลื่น 745-760 cm^{-1}), เอไมด์ (ช่วงเลขคลื่น 1522-1560 cm^{-1}), แอมโมเนียมไอออน (ช่วงเลขคลื่น 1392-1440 cm^{-1}), และไอน้ำ (ช่วงเลขคลื่น 3206-3411 cm^{-1}) ซึ่งเป็นแถบสเปกตรัมที่พบในช่วงขนาดฝุ่นละออง 5.80-9.00 ไมโครเมตร นอกจากนี้ยังพบแถบสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันอื่นในช่วงขนาดฝุ่นละออง 0.43-0.65 ไมโครเมตร (ภาพที่ 4.18 (ข)) คือ แอลคีน (ช่วงเลขคลื่น 3043-3058 cm^{-1}), แอลดีไฮด์ (ช่วงเลขคลื่น 1687-1710 cm^{-1}) และซัลเฟตไอออน (ช่วงเลขคลื่น 602-620 cm^{-1}) รายละเอียดแถบสเปกตรัมและช่วงเลขคลื่นของฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไปในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตรแสดงดังตาราง 4.15

ตารางที่ 4.15 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของฝุ่นละอองในบรรยากาศทั่วไปที่เกิดขึ้นในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตร

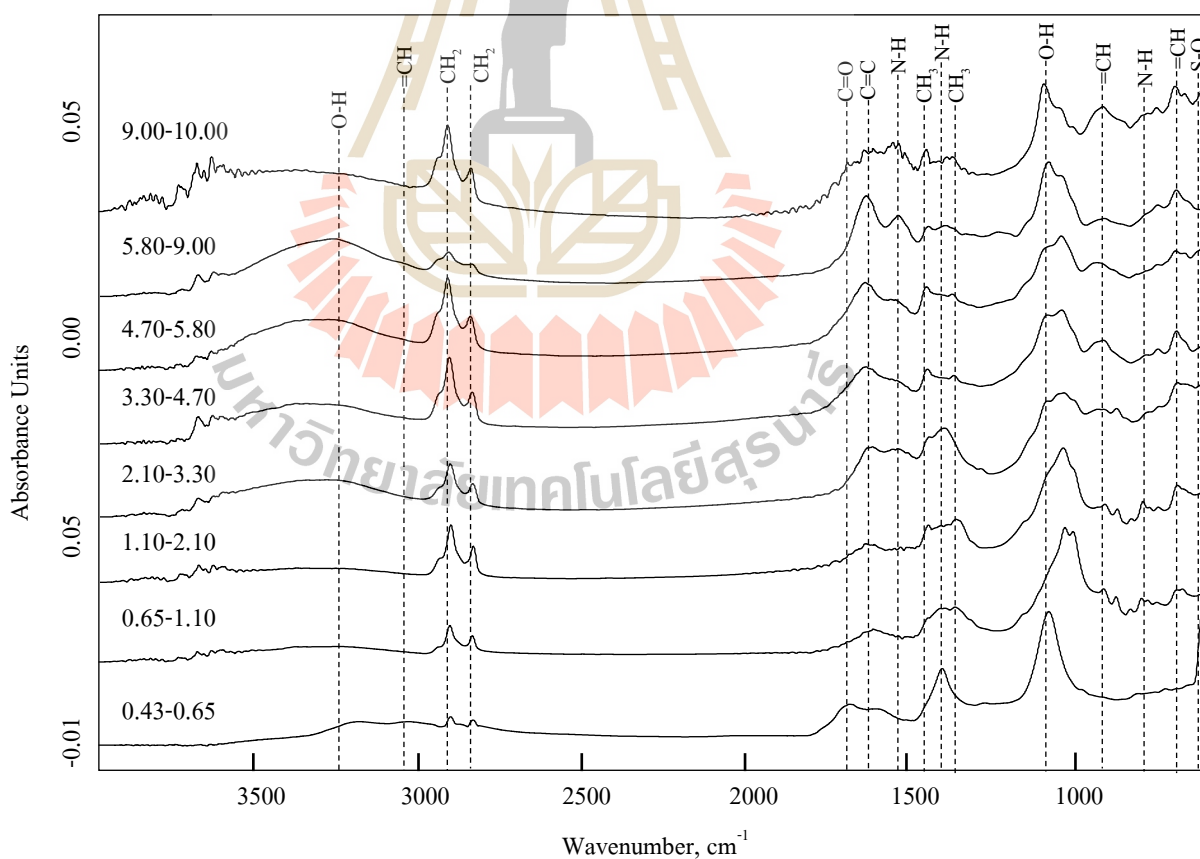
Functionality	Group	Assignment	Wavenumber range (cm^{-1})	Intensity
Alkanes	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	CH_3 .symmetric.bending	1352-1387	m
		CH_3 .asymmetric.bending	1443-1466	m
Alkanes	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	CH_2 .symmetric.stretching	2845-2875	vs
		CH_2 .asymmetric.stretching	2916-2939	vs
Alkenes	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$	=CH.wagging.bending	666-704	w
			775-803	w
		CH. symmetric.stretching	3043-3058	m
		C=C.stretching	1618-1664	m
Alcohols	CH_3-OH	C-O.asymmetric.stretching	1039-1105	m
			1240-1245	w
Alcohols/water	-OH-	O-H.stretching	3206-3411	br
Carboxylic acid	CH_3-COOH	O-H.wagging.bending	910-948	ms
Aldehyde	$\text{CH}_3-\text{C}(=\text{O})\text{H}$	C=O.asymmetric.stretching (aromatic)	1687-1710	m
Amine	CH_3-NH_2	N-H.wagging.bending	745-760	w
Amide	$\text{CH}_3-\text{C}=\text{O}-\text{NH}_2$	N-H.scissoring.bending	1522-1560	ms

ตารางที่ 4.15 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของฝุ่นละอองในบรรยากาศทั่วไปที่เกิดขึ้นในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตร (ต่อ)

Functionality	Group	Assignment	Wavenumber range (cm ⁻¹)	Intensity
Ammonium ions	NH ₄ ⁺	N-H.stretching	1392-1440	m
Sulfate ions	SO ₄ ²⁻	S-O.bending	602-620	m

หมายเหตุ br = broad, vs= very strong, s = strong, ms= medium strong, m = medium, w= weak, stretching = การยืด, bending = การงอ, asymmetric = ไม่สมมาตร, symmetric = สมมาตร, wagging = การงอแบบกระดิก, scissoring = การงอแบบกรรไกร

แถบสเปกตรัมที่พบแยกตามขนาดฝุ่นละอองออกเป็น 8 ช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร) แสดงดังภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไปแยกตามขนาดฝุ่นละอองเป็น 8 ช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร)

จากภาพที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมพบว่าสเปกตรัมที่พบทุกช่วงขนาดคือ 1) สเปกตรัมของไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) ในกลุ่มเมทิลีน (CH_2) ของหมู่แอลเคนในสองช่วงเลขคลื่นคือ 2845-2875 และ 2916-2939 cm^{-1} , 2) สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับออกซิเจน (C-O) ของหมู่แอลกอฮอล์ในช่วงเลขคลื่น 1039-1105 cm^{-1} และยังพบการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของออกซิเจนกับไฮโดรเจน (O-H) ในช่วงเลขคลื่น 3206-3411 cm^{-1} ของหมู่แอลกอฮอล์หรือไอน้ำ และ 3) สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของซัลเฟอร์กับออกซิเจน (S-O) ของซัลเฟตไอออนในช่วงเลขคลื่น 602-620 cm^{-1} ส่วนสเปกตรัมที่พบบางช่วงขนาดมีดังนี้

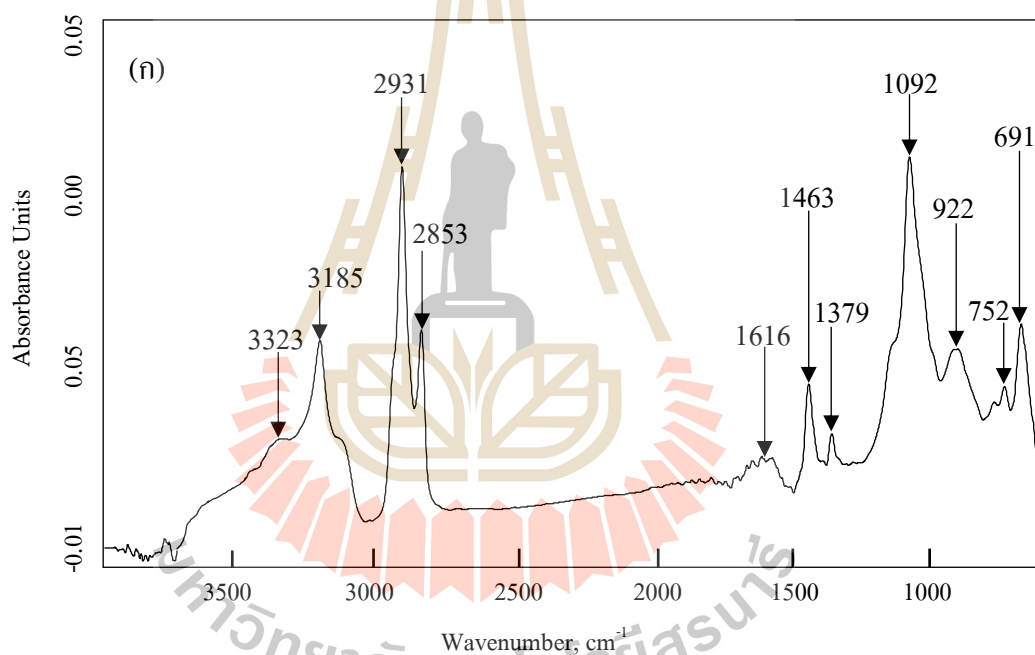
- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) ในกลุ่มเมทิล (CH_3) ของหมู่แอลเคนในช่วงเลขคลื่น 1352-1387 และ 1443-1466 cm^{-1}
- สเปกตรัมของหมู่แอลคีนพบการสั่นสองพันธะคือ การสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) ในสามช่วงเลขคลื่นคือ 666-704, 775-803 และ 3043-3058 cm^{-1} และการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับคาร์บอน (C=C) ในช่วงเลขคลื่น 1618-1664 cm^{-1}
- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับออกซิเจน (C-O) ของหมู่แอลกอฮอล์ในช่วงเลขคลื่น 1230-1245 cm^{-1}
- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของออกซิเจนกับไฮโดรเจน (O-H) ของหมู่กรดคาร์บอกซิลิกในช่วงเลขคลื่น 910-948 cm^{-1}
- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับออกซิเจน (C=O) ของหมู่แอลดีไฮด์ในช่วงเลขคลื่น 1687-1710 cm^{-1}
- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของไนโตรเจนกับไฮโดรเจน (N-H) ของหมู่เอมีนในช่วงเลขคลื่น 745-760 cm^{-1}
- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของไนโตรเจนกับไฮโดรเจน (N-H) ของหมู่เอไมด์ในช่วงเลขคลื่น 1522-1560 cm^{-1}
- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของไนโตรเจนกับไฮโดรเจน (N-H) ของแอมโมเนียมไอออนในช่วงเลขคลื่น 1392-1440 cm^{-1}

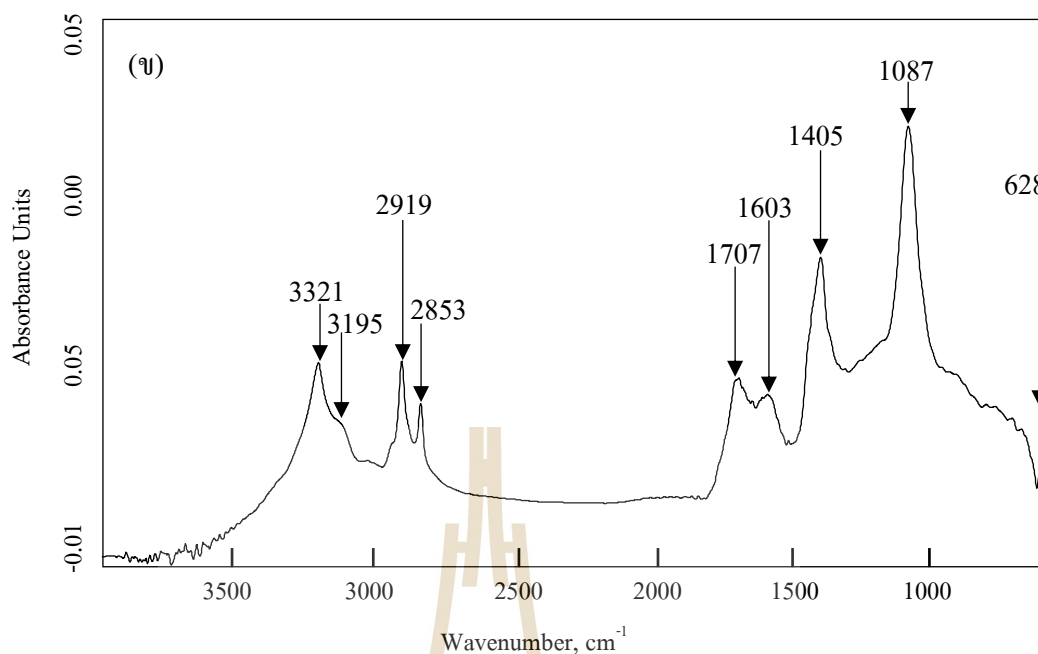
องค์ประกอบของฝุ่นละอองที่พบในบรรยากาศทั่วไปมีหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน, ไฮโดรเจน, ออกซิเจน, ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ จากตารางที่ 4.15 พบว่าองค์ประกอบหลักของฝุ่นละอองในบรรยากาศทั่วไป ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนในกลุ่ม CH_3 (เมทิล), CH_2 (เมทิลีน) และ C=C-H เป็นอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในกลุ่มของแอลเคน และแอลคีน โดยกลุ่มที่พบเป็นส่วนใหญ่คือ CH_2 , อะตอมของออกซิเจนพบอยู่ในพันธะ C-O ของกลุ่มแอล

กอสอลล์ นอกจากนี้ยังพบอยู่ในพันธะ O-H ของกลุ่มแอลกอฮอล์หรือไอน้ำ และยังพบอยู่ในพันธะ O-H ของกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกในบางช่วงขนาด ส่วนอะตอมของออกซิเจนที่พบอยู่ในพันธะ C=O (คาร์บอนิล) ในกลุ่มแอลดีไฮด์พบว่าเป็นพันธะ C=O ชนิดอะโรมาติก พบเฉพาะในช่วงขนาดฝุ่นละออง 0.43-0.65 ไมโครเมตร, อะตอมของไนโตรเจนพบอยู่ในพันธะ N-H ของกลุ่มเอมีน, เอไมด์ และแอมโมเนียมไอออน พบในบางช่วงขนาดฝุ่นละออง และอะตอมของซัลเฟอร์พบอยู่ในพันธะ S-O ของกลุ่มซัลเฟตไอออนซึ่งพบทุกช่วงขนาดฝุ่นละออง

4.2.1.7 บริเวณริมถนนที่มีการจราจร

การจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองจากบริเวณริมถนนที่มีการจราจร พบแถบสเปกตรัมที่แตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 4.20





ภาพที่ 4.20 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟูรีเยอร์ของจากบริเวณริมถนนที่มีการจราจร

(ก) ช่วงขนาดของฝุ่นละออง 5.80-9.00 ไมโครเมตร และ

(ข) ช่วงขนาดของฝุ่นละออง 0.43-0.65 ไมโครเมตร

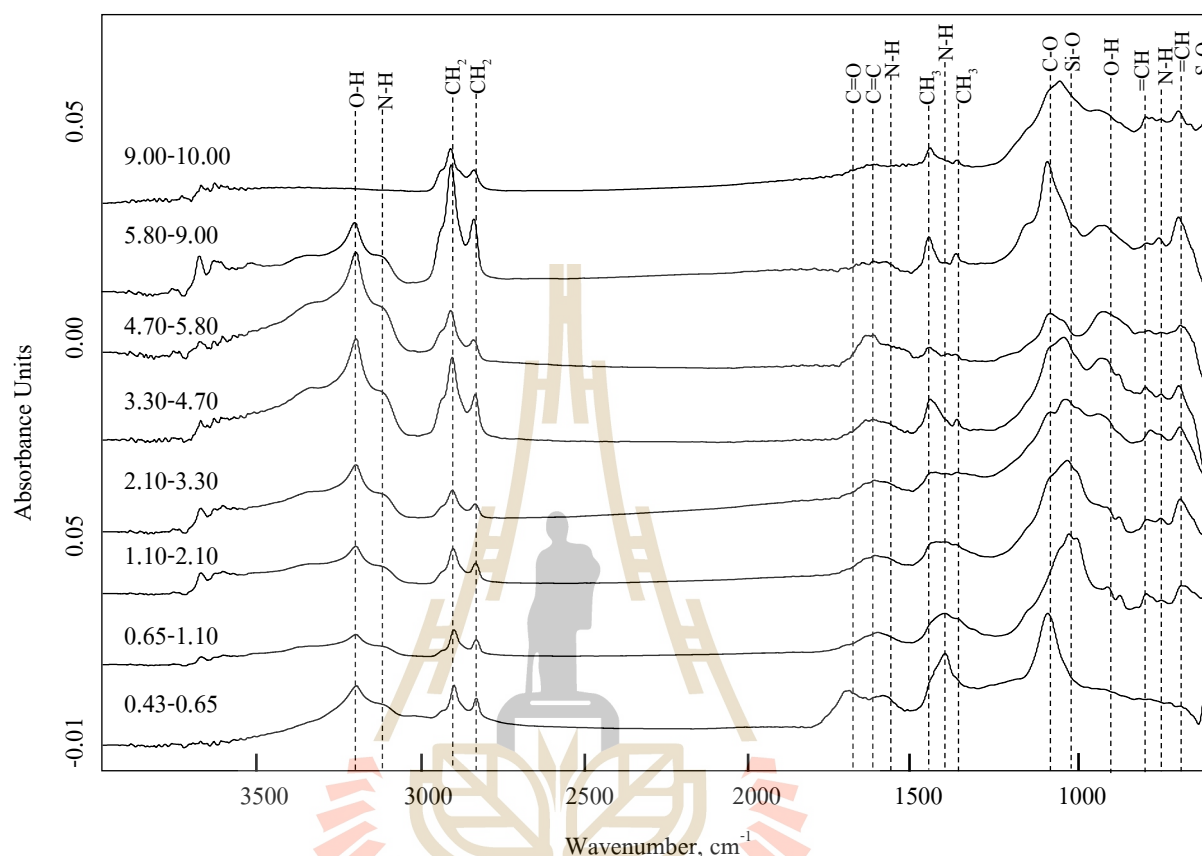
จากภาพที่ 4.20 (ก) พบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ กลุ่มแอลเคน (ช่วงเลขคลื่น 1374-1471 และ 2853-2919 cm^{-1}), แอลคีน (ช่วงเลขคลื่น 676-701 และ 1606-1659 cm^{-1}), แอลกอฮอล์ (ช่วงเลขคลื่น 1037-1105, และ 3310-3450 cm^{-1}), กรดคาร์บอกซิลิก (ช่วงเลขคลื่น 902-948 cm^{-1}), เอไมด์ (ช่วงเลขคลื่น 3185-5503 cm^{-1}), และไอน้ำ (ช่วงเลขคลื่น 3310-3450 cm^{-1}) ซึ่งเป็นแถบสเปกตรัมที่พบในช่วงขนาดฝุ่นละออง 5.80-9.00 ไมโครเมตร นอกจากนี้ยังพบแถบสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันอื่นในช่วงขนาดฝุ่นละออง 0.43-0.65 ไมโครเมตร (ภาพที่ 4.20 (ข)) คือ อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (ช่วงเลขคลื่น 1606-1659 cm^{-1}), แอลดีไฮด์ (ช่วงเลขคลื่น 1699-1717 cm^{-1}), แอมโมเนียมไอออน (ช่วงเลขคลื่น 1397-1440 cm^{-1}), และซัลเฟตไอออน (ช่วงเลขคลื่น 600-640 cm^{-1}) ซึ่งเป็นแถบสเปกตรัมที่พบในช่วงขนาดฝุ่นละออง 0.43-0.65 ไมโครเมตรรายละเอียดแถบสเปกตรัมและช่วงเลขคลื่นของฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไปในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตรแสดงดังตาราง

ตารางที่ 4.16 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของฝุ่นละอองจากบริเวณริมถนนที่มีการจราจรที่เกิดขึ้นในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตร

Functionality	Group	Assignment	Wavenumber range (cm ⁻¹)	Intensity
Alkanes	CH ₃ -(CH ₂) _n -CH ₃	CH ₃ .symmetric.bending	1374-1382	m
		CH ₃ .asymmetric.bending	1443-1471	m
		CH ₂ .symmetric.stretching	2844-2873	vs
		CH ₂ .asymmetric.stretching	2913-2941	vs
Alkenes	CH ₂ =CH ₂	=CH.wagging.bending	676-701	w
			765-803	w
		C=C.stretching	1606-1659	m
Alcohols	CH ₃ -OH	C-O.asymmetric.stretching	1037-1105	m
Alcohols/water	-OH-	O-H.stretching	3310-3450	br
Carboxylic acid	CH ₃ -COOH	O-H.wagging.bending	902-948	ms
Aldehyde	CH ₃ -C(=O)H	C=O.asymmetric.stretching	1699-1717	m
		(aromatic)		
Amine	CH ₃ -NH ₂	N-H.wagging.bending	745-755	w
Amide	CH ₃ -C(=O)-NH ₂	N-H.scissoring.bending	1517-1545	ms
		N-H.stretching	3185-3305	m
Ammonium ions	NH ₄ ⁺	N-H.stretching	1397-1440	m
Sulfate ions	SO ₄ ²⁻	S-O.bending	600-640	m
Silicate	SiO ₄ ⁴⁻	Si-O-Si.stretching	999-1034	s

หมายเหตุ br = broad, vs= very strong, s = strong, ms= medium strong, m = medium, w= weak, stretching = การยืด, bending = การงอ, asymmetric = ไม่สมมาตร, symmetric = สมมาตร, wagging = การงอแบบกระดิก, scissoring = การงอแบบกรรไกร

แถบสเปกตรัมที่พบแยกตามขนาดฝุ่นละอองออกเป็น 8 ช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร) แสดงดังภาพที่ 4.21



ภาพที่ 4.21 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากบริเวณริมถนนที่มีการจราจรแยกตามขนาดฝุ่นละอองเป็น 8 ช่วงขนาด (0.43-10.00 ไมโครเมตร)

จากภาพที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมพบว่าสเปกตรัมที่พบทุกช่วงขนาดคือ 1) สเปกตรัมของไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) ในกลุ่มเมทิลีน (CH₂) ของหมู่แอลเคนในสองช่วงเลขคลื่นคือ 2844-2873 และ 2913-2941 cm⁻¹ ส่วนสเปกตรัมที่พบบางช่วงขนาดมีดังนี้

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) ในกลุ่มเมทิล (CH₃) ของหมู่แอลเคนในช่วงเลขคลื่น 1374-1382 และ 1443-1471 cm⁻¹
- สเปกตรัมของหมู่แอลคีนพบการสั่นสองพันธะคือ การสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) ในสองช่วงเลขคลื่นคือ 676-701 และ 765-803 cm⁻¹ และการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับคาร์บอน (C=C) ในช่วงเลขคลื่น 1606-1659 cm⁻¹

- สเปกตรัมของหมู่แอลกอฮอล์พบการสั่นสองพันธะคือ การสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับออกซิเจน (C-O) และการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของออกซิเจนกับไฮโดรเจน (O-H) เกิดขึ้นในช่วงเลขคลื่น 1037-1105 และ 3310-3450 cm^{-1} ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า การสั่นในช่วง 3310-3450 cm^{-1} ยังเป็นบริเวณเดียวกับการสั่นของพันธะ O-H ในกลุ่มไอน้ำด้วย

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของออกซิเจนกับไฮโดรเจน (O-H) ของหมู่กรดคาร์บอกซิลิกในช่วงเลขคลื่น 902-948 cm^{-1}

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับออกซิเจน (C=O) ของหมู่แอลดีไฮด์ในช่วงเลขคลื่น 1699-1717 cm^{-1}

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของไนโตรเจนกับไฮโดรเจน (N-H) ของหมู่เอมีนในช่วงเลขคลื่น 745-755 cm^{-1}

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของไนโตรเจนกับไฮโดรเจน (N-H) ของหมู่เอไมด์ในสองช่วงเลขคลื่นคือ 1517-1545 และ 3185-3305 cm^{-1}

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของไนโตรเจนกับไฮโดรเจน (N-H) ของแอมโมเนียมไอออนในช่วงเลขคลื่น 1397-1440 cm^{-1}

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของซัลเฟอร์กับออกซิเจน (S-O) ของซัลเฟตไอออนในช่วงเลขคลื่น 600-640 cm^{-1}

- สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของซิลิกอนกับออกซิเจน (Si-O) ของซิลิเกตไอออนในช่วงเลขคลื่น 999-1034 cm^{-1}

องค์ประกอบของฝุ่นละอองที่พบบริเวณริมถนนที่มีการจราจรมีหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน, ไฮโดรเจน, ออกซิเจน, ไนโตรเจน, ซัลเฟอร์ และซิลิกอน จากตารางที่ 4.16 พบว่าองค์ประกอบหลักของฝุ่นละอองบริเวณริมถนน ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนในกลุ่ม CH_3 (เมทิล), CH_2 (เมทิลีน) และ $\text{C}=\text{C}-\text{H}$ เป็นอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในกลุ่มของแอลเคน และแอลคีน โดยกลุ่มที่พบเป็นส่วนใหญ่คือ CH_2 , อะตอมของออกซิเจนพบอยู่ในพันธะ C-O ของกลุ่มแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยังพบอยู่ในพันธะ O-H ของกลุ่มแอลกอฮอล์หรือไอน้ำ และยังพบอยู่ในพันธะ O-H ของกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกในบางช่วงขนาด ส่วนอะตอมของออกซิเจนที่พบอยู่ในพันธะ C=O (คาร์บอนิล) ในกลุ่มแอลดีไฮด์พบว่าเป็นพันธะ C=O ชนิดอะโรมาติก พบเฉพาะในช่วงขนาดฝุ่นละออง 0.43-0.65 ไมโครเมตร, อะตอมของไนโตรเจนพบอยู่ในพันธะ N-H ของกลุ่มเอมีน, เอไมด์ และแอมโมเนียมไอออน พบในบางช่วงขนาดฝุ่นละออง, อะตอมของซัลเฟอร์พบอยู่ในพันธะ S-O ของกลุ่มซัลเฟตไอออน และอะตอมของซิลิกอนพบอยู่ในพันธะ Si-O ของกลุ่มซิลิเกตไอออนเฉพาะช่วงขนาดฝุ่น 5.80-10.00 ไมโครเมตร

จากผลการทดลองเพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองในรูปหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FTIR) ร่วมกับกล้องไมโครสโคป (Hyperion microscope) พบว่าองค์ประกอบของฝุ่นละอองช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตรประกอบด้วยพันธะที่อยู่ในหมู่ฟังก์ชัน อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน, อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน, แอลกอฮอล์หรือไอน้ำ, กรดคาร์บอกซิลิก, แอลดีไฮด์, เอมีน, เอไมด์, ไนโตร, แอมโมเนียมไอออน, ซัลเฟตไอออน และซิลิเกตไอออน สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Allen et al.1994; Ghauch, Deveau, Jacob, and Baussand. 2006; Coury and Dillner, 2009 โดยองค์ประกอบที่พบในฝุ่นละอองแต่ละแหล่งกำเนิดสรุปดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของฝุ่นละอองที่พบในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตร แบ่งตามแหล่งกำเนิด

Functionality	Vibrational mode	1	2	3	4	5	6	7
Alkanes	CH ₃ ,symmetric.bending	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	CH ₃ ,asymmetric.bending	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	CH ₂ ,bend.rock			✓	✓			
	CH ₂ ,symmetric.stretching	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	CH ₂ ,asymmetric.stretching	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Alkenes	=CH.wagging.bending	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	=CH,symmetric.stretching					✓	✓	
Alkenes	C=C.stretching	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Aromatic	C=C.ring.stretching	✓	✓	✓	✓	✓		
Alcohols	C-O.asymmetric.stretching	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Alcohols/water	O-H.stretching	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Carboxylic acid	O-H.wagging.bending	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Aldehyde	C=O.asymmetric.stretching		✓	✓			✓	✓
	(aromatic)							
	C=O.asymmetric.stretching	✓			✓			
	(saturated)							
Amine	N-H.wagging.bending	✓	✓				✓	✓
	C-N.asymmetric.stretching				✓			
Amide	N-H.stretching							✓

ตารางที่ 4.17 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบของฝุ่นละอองที่พบในช่วงขนาด 0.43-10.00 ไมโครเมตร แบ่งตามแหล่งกำเนิด (ต่อ)

Functionality	Vibrational mode	1	2	3	4	5	6	7
	N-H.scissoring.bending						✓	✓
Nitro	NO ₂ .asymmetric.stretching			✓				
Ammonium ions	N-H.stretching	✓			✓		✓	✓
Sulfate ions	S-O.bending	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Silicate	Si-O-Si.stretching					✓		✓

หมายเหตุ 1= ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซิน, 2= ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซล, 3= ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร, 4= ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง, 5= อนุภาคฝุ่นดิน, 6= ฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไป, 7= ฝุ่นละอองจากพื้นที่บริเวณริมถนน, br = broad, vs= very strong, s = strong, ms= medium strong, m = medium, w= weak, stretching = การยืด, bending = การงอ, asymmetric = ไม่สมมาตร, symmetric = สมมาตร, wagging = การงอแบบกระดิก, scissoring = การงอแบบกรรไกร

จากตารางที่ 4.17 สเปกตรัมที่พบในฝุ่นละอองทั้งจากแหล่งกำเนิดและในบรรยากาศทั่วไป พบองค์ประกอบที่เป็นสารอินทรีย์และไอออนของสารอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นในช่วงเลขคลื่นที่ต่างกันดังนี้

1) ไฮโดรคาร์บอนพบสเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะ C-H ในกลุ่มเมทิลีน (CH₂) และ เมทิล (CH₃) ของหมู่แอลเคน และการสั่นของพันธะ C=C-H ในหมู่แอลคีน โดยพบว่าการเกิดสเปกตรัมของพันธะ C-H พบทั้งการสั่นแบบยืดและการสั่นแบบงอ โดยสเปกตรัมที่พบในฝุ่นละอองทุกแหล่งกำเนิดคือ สเปกตรัมของพันธะ C-H ในกลุ่ม CH₂ (การสั่นแบบยืด) เกิดในช่วงเลขคลื่น 2837-2944 cm⁻¹ และกลุ่ม CH₃ (การสั่นแบบงอ) เกิดในช่วงเลขคลื่น 1352-1475 cm⁻¹ แต่ในกลุ่ม CH₃ พบเพียงบางช่วงขนาดฝุ่นละออง และยังพบสเปกตรัมของกลุ่ม CH₂ ที่เป็นการสั่นแบบงอในช่วงเลขคลื่น 710-737 cm⁻¹ ซึ่งพบเฉพาะในฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและการเผาไหม้จากกิจกรรมการปิ้งย่างเท่านั้น

การสั่นของพันธะ C=C-H ในหมู่แอลคีนพบการสั่นของพันธะ =C-H เกิดขึ้นในช่วงเลขคลื่นคือ 661-704, 765-803, 865-899 และ 3043-3058 cm⁻¹ เป็นสเปกตรัมที่มีความเข้มต่ำและพบบางช่วงเลขคลื่นเท่านั้น โดยพบในฝุ่นละอองทุกแหล่งกำเนิดแต่พบเพียงบางช่วงขนาดฝุ่นละออง ส่วนการสั่นของพันธะ C=C พบในฝุ่นละอองทุกแหล่งกำเนิดแต่พบเพียงบางช่วงขนาดฝุ่นละออง

เช่นกัน ซึ่งสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นองค์ประกอบหนึ่งของอนุภาคฝุ่นละออง (Seinfeld and Pandis, 1998) จึงพบกลุ่มไฮโดรคาร์บอนในฝุ่นละอองทุกแหล่งกำเนิดที่เก็บตัวอย่าง

อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนพบสเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะ $C=C$ ของวงอะโรมาติกเป็นการสั่นแบบยืดเกิดในช่วงเลขคลื่น $1565-1605\text{ cm}^{-1}$ พบในฝุ่นละอองที่เก็บตัวอย่างจากแหล่งกำเนิดโดยตรง แต่ไม่พบในฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไปและฝุ่นละอองบริเวณริมถนน

2) แอลกอฮอล์พบสเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะ $C-O$ และ $O-H$ โดยพบสเปกตรัมของพันธะ $C-O$ เป็นการสั่นแบบยืดเกิดในช่วงเลขคลื่นคือ $1037-1105\text{ cm}^{-1}$ ส่วนพันธะ $O-H$ เป็นการสั่นแบบยืดเกิดในช่วงเลขคลื่นคือ $3203-3570\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งพบสเปกตรัมของพันธะ $O-H$ ในฝุ่นละอองจากการเก็บตัวอย่างทุกแหล่งกำเนิด ส่วนพันธะ $C-O$ พบในทุกแหล่งกำเนิดเช่นกันแต่พบเพียงบางช่วงขนาดเท่านั้น จากการศึกษายังพบว่าช่วงการสั่นของพันธะ $O-H$ ที่พบในกลุ่มแอลกอฮอล์เป็นช่วงเดียวกับกับการสั่นของพันธะ $O-H$ ที่พบในไอน้ำเช่นกัน ในการจำแนกสเปกตรัมในช่วงเลขคลื่น $3203-3570\text{ cm}^{-1}$ จึงจำแนกว่าเป็นการสั่นของพันธะ $O-H$ ที่อยู่ในกลุ่มของแอลกอฮอล์หรือไอน้ำ

3) คาร์บอนิลพบสเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะ $C=O$ พบในหมู่กรดคาร์บอกซิลิกและหมู่แอลดีไฮด์ซึ่งเกิดในช่วงเลขคลื่นใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากในหมู่กรดคาร์บอกซิลิกยังพบการสั่นของพันธะ $O-H$ (การสั่นแบบงอ) ดังนั้นในการระบุองค์ประกอบของหมู่กรดคาร์บอกซิลิกจึงใช้การสั่นของพันธะ $O-H$ (การสั่นแบบงอ) ซึ่งเกิดในช่วงเลขคลื่นคือ $901-960\text{ cm}^{-1}$ ในการจำแนกส่วนหมู่แอลดีไฮด์ใช้การสั่นของพันธะ $C=O$ (การสั่นแบบยืด) ในการจำแนก โดยสเปกตรัมของพันธะ $C=O$ จะแบ่งออกเป็นสเปกตรัมของพันธะ $C=O$ ชนิดอะโรมาติก และพันธะ $C=O$ ชนิดอิ่มตัวเกิดในช่วงเลขคลื่นคือ $1674-1721$ และ $1705-1745\text{ cm}^{-1}$ ตามลำดับ โดยสเปกตรัมของพันธะ $O-H$ ในหมู่กรดคาร์บอกซิลิกพบในฝุ่นละอองทุกแหล่งกำเนิด แต่พบเพียงบางช่วงขนาด ส่วนสเปกตรัมของพันธะ $C=O$ ในหมู่แอลดีไฮด์ พบในฝุ่นละอองจากการเก็บตัวอย่างทุกแหล่งกำเนิด ยกเว้นอนุภาคฝุ่นดิน ซึ่งในแหล่งกำเนิดที่พบจะพบเฉพาะในช่วงขนาดฝุ่นละออง $0.43-2.10$ ไมโครเมตรเท่านั้น

4) สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนพบสเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะ $N-H$, $C-N$ และ $N-O$ ในหมู่เอมีน, เอไมด์ และไนโตร โดยพบว่าเกิดสเปกตรัมของพันธะ $N-H$ ในหมู่เอมีนเป็นการสั่นแบบงอเกิดในช่วงเลขคลื่น $745-765\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งพบเฉพาะในฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงทั้งสองชนิด, ฝุ่นละอองในบรรยากาศ และฝุ่นละอองบริเวณริมถนน โดยพบเฉพาะบางช่วงขนาดฝุ่นละอองเท่านั้น ส่วนพันธะ $N-H$ ในหมู่เอไมด์พบทั้งการสั่นแบบยืดและการสั่นแบบงอเกิดขึ้นสองช่วงเลขคลื่นคือ $3185-3305$ และ $1517-1560\text{ cm}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งพบเฉพาะในฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไปและบริเวณริมถนนเท่านั้น เมื่อพิจารณาจะพบว่าการเกิดสเปกตรัมของพันธะ

N-H เป็นการสั่นแบบยืดเกิดบริเวณเดียวกับสเปกตรัมของพันธะ O-H ในหมู่แอลกอฮอล์ จะใช้ลักษณะของสเปกตรัมในการจำแนก เนื่องจากสเปกตรัมของ พันธะ O-H มีลักษณะกว้าง (Broad) กว่าสเปกตรัมของพันธะ N-H ซึ่งมีลักษณะแคบและมีความเข้มสูงกว่า

สเปกตรัมของพันธะ C-N ในหมู่เอมีนพบว่าเป็นการสั่นแบบยืดเกิดในช่วงเลขคลื่น 1145-1175 cm^{-1} ซึ่งพบเฉพาะในฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ที่มาจากกิจกรรมการปิ้งย่างเท่านั้น และสเปกตรัมของพันธะ N-O ในหมู่ไนโตรพบว่าเป็นการสั่นแบบยืดเกิดในช่วงเลขคลื่น 1506-1522 cm^{-1} ซึ่งพบเฉพาะในฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเท่านั้น เนื่องจากการเผาไหม้วัสดุทางการเกษตรมีการปลดปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) (Ortiz de Zárate et al, 2000) ซึ่งจะเปลี่ยนรูปไปเป็นอนุภาคในกลุ่มไนโตรเจน

5) แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) พบสเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะ N-H เป็นการสั่นแบบยืดเกิดในช่วงเลขคลื่น 1392-1440 cm^{-1} พบในฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงเบนซิน, การเผาไหม้จากกิจกรรมการปิ้งย่าง, ฝุ่นละอองในบรรยากาศทั่วไป และฝุ่นละอองบริเวณริมถนน พบว่ามีความเข้มสูงในช่วงฝุ่นละอองขนาดเล็ก (0.43-2.10 ไมโครเมตร) สอดคล้องกับการศึกษาของ Allenn et al. (1994); Bardouki et al. (2003) และ Maria, Russel, Turpin, and Porcja. (2002) ซึ่งพบว่าแอมโมเนียมไอออนเป็นองค์ประกอบหลักที่พบทั่วไปในฝุ่นละออง และมีความเข้มข้นสูงในช่วงฝุ่นขนาดเล็ก (fine fraction) (Sharka' and Saliba, 2004) จากการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Bertoa and Astorga (2016) พบว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซินมีการปลดปล่อยแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) ซึ่งเป็นสารตั้งต้น (precursor) ที่ถูกเปลี่ยนรูปในบรรยากาศไปเป็นอนุภาคของแอมโมเนียมซัลเฟต และแอมโมเนียมไนเตรต (Behera and Sharma, 2010) จึงพบแอมโมเนียมไอออนในฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซินแต่ไม่พบในฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซล

6) ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) พบสเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะ S-O เป็นการสั่นแบบงอเกิดในช่วงเลขคลื่น 600-648 cm^{-1} พบในฝุ่นละอองทุกแหล่งกำเนิด ซึ่งพบความเข้มของสเปกตรัมสูงในฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงทั้งสองชนิด, การเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และฝุ่นละอองในบรรยากาศทั่วไป สอดคล้องกับการศึกษาของ Bardouki et al. (2003) และ Maria et al. (2002) ซึ่งพบว่าซัลเฟตไอออนเป็นองค์ประกอบหลักที่พบทั่วไปในฝุ่นละออง และจากการศึกษาของ Allen et al. 1994 ระบุว่าช่วงเลขคลื่นดังกล่าวเป็นสเปกตรัมของซัลเฟตไอออน ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) และไบซัลเฟตไอออน (NH_4HSO_4) ซึ่งเป็นกลุ่มที่อยู่ในช่วงเลขคลื่นเดียวกัน

7) ซิลิเกตไอออน (SiO_4^{4-}) พบสเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะ Si-O เป็นการสั่นแบบยืดเกิดในช่วงเลขคลื่น 995-1040 cm^{-1} พบเฉพาะในอนุภาคฝุ่นดิน และฝุ่นละอองบริเวณริมถนนเท่านั้น โดยอนุภาคฝุ่นดินพบซิลิเกตไอออนกระจายอยู่ในหลายช่วงขนาด แต่ฝุ่นละอองบริเวณริมถนนพบซิลิเกตไอออนเฉพาะช่วงขนาดฝุ่นละออง 5.80-10.00 ไมโครเมตรเท่านั้น จากการศึกษา

ของ Allen et al. (1994); Anil et al. (2014); Maria et al. (2002) ระบุว่าสเปกตรัมของซิลิเกตไอออนที่เกิดขึ้นในช่วงเลขคลื่นใกล้เคียงกันนี้ (1010-1035 cm^{-1}) คือ Kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) เป็นอนุภาคที่เกิดจากการผุกร่อนของดิน/หิน/แร่ ซึ่งพบความเข้มข้นของสเปกตรัมสูงในช่วงฝุ่นขนาดใหญ่ (Coarse fraction)

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองจากแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกันด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีแบบสั่นสามารถระบุองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองในรูปแบบหมู่ฟังก์ชันได้ รายละเอียดสรุปดังตาราง 4.8

ตารางที่ 4.18 เลขคลื่น (Wavenumber, cm^{-1}) ที่เป็นค่าจำเพาะของหมู่ฟังก์ชันจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของฝุ่นละอองที่ได้จากการศึกษา

Functionality	Group	Assignment	Wavenumber range (cm^{-1})	Intensity
Alkanes	$\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_n\text{-CH}_3$	CH_3 ,symmetric.bending	1352-1388	m
		CH_3 ,asymmetric.bending	1441-1475	m
		CH_2 ,symmetric.stretching	2837-2875	vs
		CH_2 ,asymmetric.stretching	2908-2944	vs
		CH_2 ,rocking.bending	710-737	w
Alkenes	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$	$=\text{CH}$.wagging.bending	660-704	w
			765-803	w
			865-899	w
		CH . symmetric.stretching	3043-3058	m
		$\text{C}=\text{C}$.stretching.	1606-1665	m
Aromatic	C_6H_6	$\text{C}=\text{C}$.ring. stretching	1565-1605	m
Alcohols	$\text{CH}_3\text{-OH}$	C-O .asymmetric.stretching	1037-1108	m
			1197-1219	w
Alcohols/water	-OH-	O-H .stretching	3203-3570	br
Carboxylic acid	$\text{CH}_3\text{-COOH}$	O-H .wagging.bending	901-960	ms
Aldehyde	$\text{CH}_3\text{-C(=O)H}$	C=O .asymmetric.stretching	1674-1721	m
		(aromatic)	C=O .asymmetric.stretching	1705-1750

ตารางที่ 4.18 เลขคลื่น (Wavenumber, cm^{-1}) ที่เป็นค่าจำเพาะของหมู่ฟังก์ชันจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของฝุ่นละอองที่ได้จากการศึกษา (ต่อ)

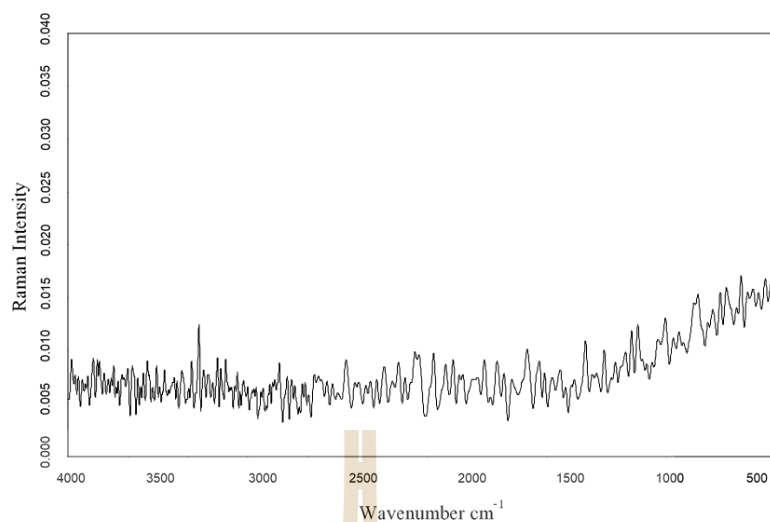
Functionality	Group	Assignment	Wavenumber range (cm^{-1})	Intensity
		(saturated)		
Amine	$\text{CH}_3\text{-NH}_2$	N-H.wagging.bending	745-765	w
		C-N.asymmetric.stretching	1135-1175	w
Amide	$\text{CH}_3\text{-C=O-NH}_2$	N-H.scissoring.bending	1517-1560	ms
		N-H.stretching	3185-3305	m
Nitro	$\text{CH}_3\text{-NO}_2$	NO_2 . asymmetric.stretching	1506-1522	m
Ammonium ions	NH_4^+	N-H.stretching	1392-1440	m
Sulfate ions	SO_4^{2-}	S-O.bending	600-648	m
Silicate ions	SiO_4^{4-}	Si-O-Si. stretching	995-1040	s

หมายเหตุ br= broad, vs= very strong, s= strong, ms= medium strong, m= medium, w= weak, stretching= การยืด, bending= การงอ, asymmetric= ไม่สมมาตร, symmetric= สมมาตร, wagging= การงอแบบกระดิก, scissoring= การงอแบบกรรไกร

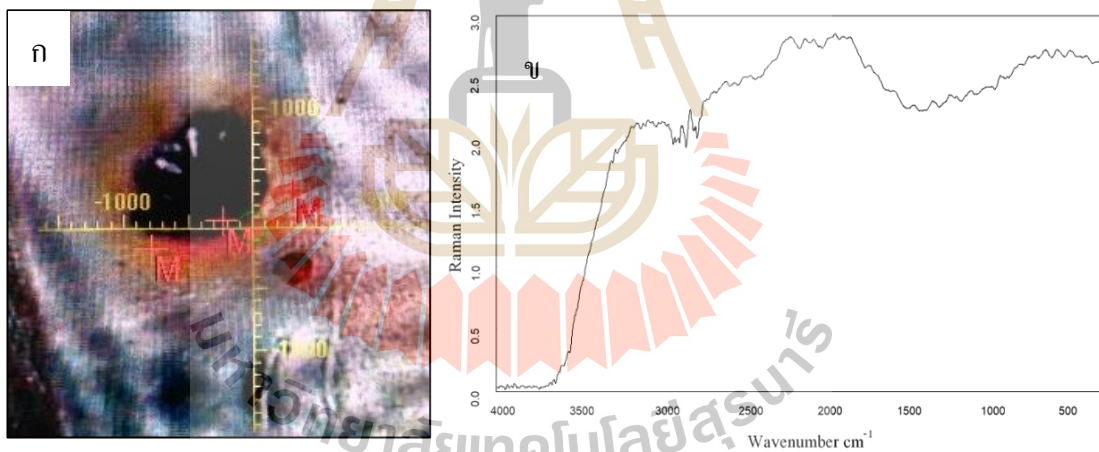
4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี โดยใช้เครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มรามานสเปกโทรมิเตอร์ ซึ่งมีแหล่งกำเนิดแสงชนิด Nd: YAG laser ที่ให้ความยาวคลื่นในช่วง 1064 นาโนเมตร ในการวิเคราะห์ตัวอย่างฝุ่นละอองจะวิเคราะห์โดยตรงด้วยโหมด Video measurement โดยใช้พลังงานในการวิเคราะห์ (Raman laser power) = 100 mW ใช้ Resolution = 4 cm^{-1} และจำนวนครั้งการสแกนเท่ากับ 200 ครั้ง

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฝุ่นละออง จากตัวอย่างฝุ่นละอองที่มาจากกรมฯ ใหม่วัดสุเหลื่อใช้ทางการเกษตร เมื่อใช้พลังงาน (Raman laser power) ในการวิเคราะห์ในช่วงต่ำกว่า 100 มิลลิวัตต์ (20-100 มิลลิวัตต์) พบว่าสเปกตรัมที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์มีสัญญาณรบกวนสูง (noise) และไม่สามารถแยกความแตกต่างของแถบสเปกตรัมได้ (ภาพที่ 4.22) และเมื่อใช้พลังงานสูงกว่า 100 มิลลิวัตต์ วิเคราะห์ตัวอย่าง พบว่าเกิด Thermal effect อันเนื่องมาจากลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างที่มีสีดำ (ภาพที่ 4.23) ส่งผลให้แถบสเปกตรัมบางช่วงมีลักษณะกว้าง (Broad) (Bruker optic GmbH, 2014)



ภาพที่ 4.22 แถบรามานสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร



ภาพที่ 4.23 (ก) ลักษณะของตัวอย่างที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-Raman
(ข) แถบรามานสเปกตรัมที่เกิด Thermal effect

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีแบบสั่น แบ่งเป็นการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี และรามานสเปกโทรสโกปี ผลจากการวิเคราะห์แสดงในรูปของหมู่ฟังก์ชัน การศึกษานี้เก็บตัวอย่างฝุ่นละอองจากแหล่งกำเนิดที่ต่างกันคือ การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะที่ใช้เครื่องยนต์แก๊สเบนซินและเครื่องยนต์ดีเซล, การเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร, การเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง, อนุภาคฝุ่นดิน, บรรยากาศทั่วไป และพื้นที่บริเวณริมถนน โดยใช้อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง Cascade impactor ชนิด 8 ชั้น (stage) ร่วมกับปั๊มดูดอากาศที่ควบคุมอัตราการไหล 28.3 ลิตรต่อนาที เก็บฝุ่นละอองในช่วงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.43-10.00 ไมโครเมตร และใช้อะลูมิเนียมฟอยด์เป็นตัวกลางในการเก็บรวบรวมฝุ่นละออง ความเข้มข้นของฝุ่นละอองหาโดยวิธีชั่งน้ำหนัก (Gravimetric method) ผลการศึกษารูปได้ดังนี้

ความเข้มข้นของฝุ่นละอองที่เก็บจากแหล่งกำเนิด คือ การเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซิน, การเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซล, การเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร, การเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง และอนุภาคฝุ่นดิน มีค่าเฉลี่ยผลรวมของฝุ่นละออง 98.48 ± 27.76 , 459.74 ± 90.47 , $1.44 \times 10^5 \pm 1.04 \times 10^4$, $3.85 \times 10^3 \pm 1.90 \times 10^2$ และ $2.63 \times 10^3 \pm 5.86 \times 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ ส่วนฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไปและพื้นที่บริเวณริมถนนมีค่าเฉลี่ยผลรวมของฝุ่นละออง 18.87 ± 1.81 และ $53.86 \pm 3.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ

ความเข้มข้นฝุ่นละอองที่คำนวณได้ในแต่ละช่วงขนาด นำมาใช้แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของฝุ่นละอองแต่ละแหล่งกำเนิดในเทอมของลอคกาลีทิม พบว่าฝุ่นละอองมีการกระจายตัวแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ 1) การกระจายตัวแบบ 3 กลุ่ม (modes) พบเฉพาะในฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซินและดีเซลจากยานพาหนะ โดยพบการกระจายตัวของฝุ่นละอองสูงในช่วงขนาด 9.00-10.00 ไมโครเมตร และ 2) การกระจายตัวแบบ 2 กลุ่ม (modes) โดยฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และการเผาไหม้จากกิจกรรมการปิ้งย่างพบการกระจายตัวของฝุ่นละอองสูงในช่วงขนาดเล็กที่ต่ำกว่า 1 ไมโครเมตร คือ 0.43-0.65 ไมโครเมตร ในขณะที่อนุภาคฝุ่นดิน, บรรยากาศทั่วไป และพื้นที่บริเวณริมถนนพบการกระจายตัวของฝุ่นละอองสูงในช่วงขนาดใหญ่ คือ 9.00-10.00 ไมโครเมตร

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ใช้เครื่องฟูเรีย -

ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FTIR) ร่วมกับกล้องไมโครสโคป (Hyperion microscope) ด้วยโหมดการวิเคราะห์ ATR-FTIR ที่ Resolution = 4 cm^{-1} ในช่วงเลขคลื่น (Wavenumber) $600\text{-}4000 \text{ cm}^{-1}$ ข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์นำไปเทียบกับสเปกตรัมอ้างอิง (Larkin, 2011; Smith, 1999) พบว่า องค์ประกอบที่พบในฝุ่นละอองแบ่งเป็นกลุ่มของสารอินทรีย์ (อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน, อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน, แอลกอฮอล์หรือไอน้ำ, คาร์บอนิล และสารอินทรีย์ไนโตรเจน) และไอออนของสารอินทรีย์ (แอมโมเนียมไอออน, ซัลเฟตไอออน และซิลิเกตไอออน) โดยพบว่าองค์ประกอบที่พบในฝุ่นละอองทุกแหล่งกำเนิดคือ พันธะ C-H ในกลุ่มเมทิล (CH_3) และเมทิลีน (CH_2) ของกลุ่มแอลเคน, พันธะ =C-H และ C=C ของกลุ่มแอลคีน, พันธะ C-O ของกลุ่มแอลกอฮอล์ และ O-H ของกลุ่มแอลกอฮอล์หรือไอน้ำ, พันธะ O-H ของกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก และพันธะ S-O ของกลุ่มซัลเฟตไอออน ส่วนองค์ประกอบที่พบในฝุ่นละอองบางแหล่งกำเนิดมีดังนี้

- อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนพบในฝุ่นละอองทุกแหล่งกำเนิดยกเว้นในบรรยากาศทั่วไปและพื้นที่บริเวณริมถนน
- แอลดีไฮด์พบในฝุ่นละอองทุกแหล่งกำเนิดยกเว้นอนุภาคฝุ่นดิน ซึ่งพบเฉพาะในช่วงขนาดฝุ่น $0.43\text{-}2.10 \text{ ไมโครเมตร}$
- เอมีนพบในฝุ่นละอองทุกแหล่งกำเนิดยกเว้นการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอนุภาคฝุ่นดิน
- เอไมด์พบเฉพาะฝุ่นละอองในบรรยากาศทั่วไปและพื้นที่บริเวณริมถนน
- ไนโตรพบเฉพาะการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร
- แอมโมเนียมไอออนพบในฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเบนซินของยานพาหนะ, การเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง, บรรยากาศทั่วไปและพื้นที่บริเวณริมถนน
- ซิลิเกตไอออนพบเฉพาะในอนุภาคฝุ่นดินและพื้นที่บริเวณริมถนน

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี ใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มรามานสเปกโทรมิเตอร์ ด้วยโหมดการวิเคราะห์ Reflectance ร่วมกับ Video measurement ที่ Resolution = 4 cm^{-1} ในช่วงเลขคลื่น (Wavenumber) $400\text{-}4000 \text{ cm}^{-1}$ จากการวิเคราะห์ตัวอย่างฝุ่นละอองพบว่าสเปกตรัมมีลักษณะกว้าง (Broad) ตั้งแต่ช่วงเลขคลื่น $500\text{-}3500 \text{ cm}^{-1}$ อันเนื่องมาจากการเกิด Thermal effect ซึ่งเกิดขึ้นกับตัวอย่างที่มีลักษณะทางกายภาพเป็นสีดำ (Bruker optic GmbH, 2014) ทำให้ไม่สามารถแยกความแตกต่างของแต่ละสเปกตรัมที่เกิดขึ้นได้ จึงไม่สามารถจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปีได้

การใช้เทคนิค ATR-FTIR ร่วมกับกล้องไมโครสโคป สามารถจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองได้ ซึ่งจัดเป็นวิธีวิเคราะห์ที่สะดวก, รวดเร็ว ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างไม่ยุ่งยาก และสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างฝุ่นละอองในปริมาณน้อยได้ โดยข้อมูลการวิเคราะห์เป็นสเปกตรัมที่มีลักษณะจำเพาะและแตกต่างกันในแต่ละแหล่งกำเนิด โดยข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมทำให้ทราบหมู่ฟังก์ชันและพันธะที่เป็นองค์ประกอบของฝุ่นละออง นอกจากนี้รูปแบบของสเปกตรัมที่ต่างกันยังสามารถใช้ในการระบุแหล่งกำเนิดของฝุ่นละอองที่ต่างกันได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการใช้ผลงานวิจัย

ข้อมูลเลขคลื่น (wavenumber) สำหรับใช้ในการระบุพันธะของหมู่ฟังก์ชันที่ได้จากการศึกษาทดลองครั้งนี้เหมาะสำหรับนำไปใช้อ้างอิงในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ด้วยการวิเคราะห์ Reflectance mode ที่ Resolution = 4 cm^{-1} ในช่วงเลขคลื่น $600\text{-}4000 \text{ cm}^{-1}$ โดยข้อมูลเลขคลื่นจะแสดงผลในรูปแบบของช่วงเลขคลื่นเพื่อให้อ่านครอบคลุมช่วงการเกิดของเลขคลื่น

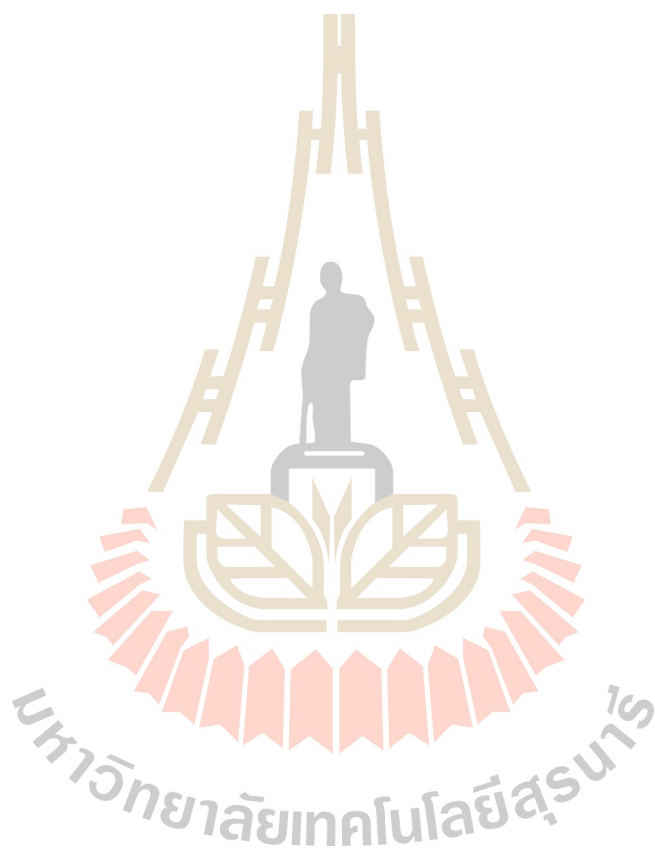
เนื่องจากฝุ่นละอองเป็นอนุภาคที่แสงไม่สามารถส่องผ่านได้ จึงเหมาะกับการวิเคราะห์ด้วย Reflectance mode และยังเป็นตัวอย่างที่มีขนาดเล็กยกต่อการวิเคราะห์ การใช้อุปกรณ์ ATR (Attenuate Total Reflection) ร่วมกับกล้องไมโครสโคปเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์จะทำให้การวิเคราะห์ตัวอย่างมีความแม่นยำและรวดเร็วขึ้น การใช้เทคนิค ATR-FTIR จึงมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ตัวอย่างฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กและมีปริมาณน้อย

5.2.2 ข้อเสนอในการวิจัยต่อไป

การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองแบบแยกขนาดด้วยเครื่องมือเก็บตัวอย่าง Cascade Impactor (Thermo Andersen 20810) ร่วมกับปั๊มดูดอากาศที่อัตราการไหล 28.3 ลิตรต่อนาที จำเป็นต้องมีการควบคุมอัตราการดูดอากาศให้ได้ตามที่อุปกรณ์ออกแบบไว้ โดยการปรับเทียบอัตราการไหลด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาตรฐานปฐมภูมิ (Primary standard) (Bios Drycal รุ่น Defender 520)

การศึกษารุ่นนี้ใช้เทคนิครามานสเปกโทรสโกปีในการวิเคราะห์องค์ประกอบของฝุ่นละอองเป็นการวิเคราะห์ฝุ่นละอองบนอะลูมิเนียมฟอยล์โดยตรง ซึ่งใช้หลักการสะท้อนของแสง (Reflectance mode) ในการวิเคราะห์ แต่เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของฝุ่นละอองมีสีดำ การวิเคราะห์ด้วยโหมดนี้จะทำให้เกิด Thermal effect เกิดสเปกตรัมที่มีลักษณะกว้าง (Broad) จึงต้องใช้โหมดการวิเคราะห์ที่อาศัยการส่องผ่านของแสง (Transmittance mode) โดยการบดตัวอย่างฝุ่นละอองกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) และอัดด้วยแรงดันสูง จะได้ตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นแผ่น

กลมและโปร่งใสสำหรับใช้วิเคราะห์ด้วย Transmittance mode แต่เนื่องจากการศึกษาทดลองครั้งนี้เป็นการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองบนอะลูมิเนียมฟอยล์ซึ่งมีปริมาณตัวอย่างน้อยและไม่เพียงพอในการบดกับ KBr จึงไม่สามารถใช้การวิเคราะห์ด้วย Transmittance mode ได้



รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรมควบคุมมลพิษ. (2556). (ร่าง) รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี 2556. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- ธิดารัตน์ ผลพิบูลย์, อีสริย์ฐิกา ชัยสวัสดิ์ และอนุวัตร รุ่งพิสุทธิพงษ์. (2557). ภัยหน้าหนาวจากฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM_{2.5}). วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 8 (1): 40-46.
- นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิตา ตั้งคณานุรักษ์. (2547). สเปกโทรสโกปีด้านการวิเคราะห์ (Analytical Spectroscopy). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- แม่น อมรสิทธิ์และคณะ. (2552). หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: บริษัทชวนพิมพ์ 50 จำกัด.
- วนิดา จีนศาสตร์. (2551). มลพิษอากาศและการจัดการคุณภาพอากาศ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาต่างประเทศ

- Allen, D. T., Palen, E., Haimov, J., Mitchell, I. H., Hering, S. V., and Young, J. R. (1994). Fourier Transform Infrared Spectroscopy of aerosol collected in a low pressure impactor (LPI/FTIR): Method development and field calibration. **Aerosol Sci. Techno** (21): 325-342.
- Anil, I., Golcuk, K., and Karaca, F. (2014). ATR-FTIR Spectroscopic study of function groups in aerosols: The contribution of a Saharan dust transport to urban atmosphere in Istanbul, Turkey. **Water Air Soil Pollut** (225): 1-14
- Arnott, W. P., Moosmuller, H., Rogers, C. F., Jin, T., and Bruch, R. (1999). Photoacoustic spectrometer for measuring light absorption by aerosol: Instrument description. **Atmos. Environ** (33): 2845-2852.
- Arnott, W. P., Moosmuller, H., and Walker, J. W. (2000). Nitrogen dioxide and kerosene-flame soot calibration of photoacoustic spectrometer for measuring light absorption by aerosol. **Rev. Sci. Instrum** (71): 4545-4552.
- Ayora, M. J., Ballesteros, L., Pérez, R., Rupérez, A., and Laserna, J. J. (1997). Detection of atmospheric contaminants in aerosols by surface-enhanced Raman spectrometry. **Analytica**

Chimica Acta (355): 15-21.

Bardouki, H., Liakakou, H., Economou, C., Sciare, J., Smolik, J., Ždimal, V., Eleftheriadis, K., Lazaridis, M., Dye, C., Mihalopoulos, N. (2003). Chemical composition of size-resolved atmospheric aerosols in the eastern Mediterranean during summer and winter. **Atmos. Environ** (37): 195-208

Behera, S. N., and Sharma, M. (2010). Investigating the potential role of ammonia in ion chemistry of fine particulate matter formation for an urban environment. **Science Total Environ** (408): 3569-3575.

Bertoa, R. S., and Astorga, C. (2016). Isocyanic acid and ammonia in vehicle emissions. **Transportation Research part D** (49): 259-270.

Brown, S., Dangler, M. C., Burke, S. R., Hering, S. V., and Allen, D. T. (1990). Direct fourier transform infrared analysis of size-segregated aerosols: result from the carbonaceous species methods intercomparison study. **Aerosol Sci. Techno** (12: 1): 172-181.

Bruker optic GmbH. (2014). **RAM II user manual**. Ettingen. Germany.

Calvo, A. I., Alves, C., Castro, A., Pont, V., Vicente, A. M., and Fraile, R. (2013). Research on aerosol sources and chemical composition: Past, current and emerging issues. **Atmos. Research** (120): 1-28.

Chow, J.C. (1995). Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles. **J. Air Waste Manage. Assoc** (45): 320-382.

Chow, J. C., Watson, J. G., Crow, D., Lowenthal, D. H., and Merrifield, T. M. (2001). Comparison of IMPROVE and NIOSH carbon measurements. **Aerosol Sci. Technol** (34): 23-34.

Chow, J. R., Doraiswamy, P., Watson, J. G., Chen, L. W., Ho, S. S. H., and Sodeman, D. A. (2008). Advances in integrated and continuous measurements for particle mass and chemical composition. **J. Air Waste Manage. Assos** (58): 141-163.

Colthup, N. B., Daly, L. H., Wiberley, S. E. (1975). Introduction to infrared and raman spectroscopy. 2nd. New York: Academic Press.

Committee on medical effects of air pollution (COMEAP). (1998). Quantification of the effects of air pollution on health in the United Kingdom. London: Department of Health.

Coury, C., and Dillner, A. M. (2008). A method to quantify organic functional groups and inorganic compounds in ambient aerosols using attenuated total reflectance FTIR spectroscopy and multivariate chemometric techniques. **Atmos. Environ** (42): 5923-5932.

- Coury, C., and Dillner, A. M. (2009). ATR-FTIR characterization of organic functional groups and inorganic ions in ambient aerosols at a rural site. **Atmos. Environ** (43): 940-948.
- Dasand, R. S., and Agrawal, Y.K., (2011). Raman spectroscopy: Recent advancements, techniques and applications. **Vibra. Spectro** (57): 163– 176.
- Degen, I.A. (1997). **Table of Characteristics Group Frequencies for the Interpretation of Infrared and Raman Spectra**. U.K. Acolyte Publications.
- Degen, I.A., and Newman, G.A. (1993). Raman Spectra of Inorganic Ions. **Spectro chimica Acta** (49): 859-887.
- Escribano, R., Sloan, J. J., Siddique, N., Sze, N., and Dudev, T. (2001). Raman spectroscopy of carbon containing particle. **Vibra. Spectro** (26): 179-186.
- Fisher, P. H., Hoek, G., van Reeuwijk, H., Briggs, D. J., Lebret, E., van Wijnen, J. H., Kingham, S., and Elliott, P. E. (2000). Traffic-related differences in outdoor and indoor concentrations of particles and volatile organic compounds in Amsterdam. **Atmos. Environ** (34) : 3713-3722.
- Fraser, M. P., and Lakshmanan. (2000). Using levoglucosaa as a molecular marker for the long-range transtort of biomass combustion aerosol. **Eviron. Sci. Techno** (34): 4560-4564.
- Fruin, S. A., Winer, A. M., Rodes, C.E. (2004). Black carbon concentrations in California vehicles and estimation of in-vehicle diesel exhaust particulate matter exposure. **Atoms. Environ** (38): 4123-4133.
- Fung, K. H., and Tang, I. N. (1999). **Aerosol Chemical Processes in the Environment**. Boca Raton: CRC Press LLC.
- Geagea, M. L., Stille, P., Gauthier-Lafaye, F., and Millet, M. (2008). Tracing of industrial aerosol sources in an urban environment using Pb, Sr, and Nd isotopes. **Eviron. Sci. Technol** (42): 692-698.
- Ghauch, A., Deveau, P. A., Jacob, V., and Baussand, P. (2006). Use of FTIR spectroscopy coupled with ATR for the determination of atmospheric compounds. **Talanta** (68): 1294-1302.
- Hansen, A. D. A., Rosen, H., and Novakov, T. (1984). The Aethalometer-An Instrument for the real-time measurement of optical-absorption by aerosol-particles. **Sci. Total Environ** (36): 191-196.
- Hansen, J., Sato, M., and Ruedy, R. (1997). Radiative forcing and climate response. **J. Geophys. Res** (102): 6831-6864.

- Harpale, V. M., Ralegankar, S. D., Jadhav, D. B., and Dhole, S. D. (2006). Chemical identification of urban air particulates in the environment of Pune City (India) by raman spectroscopy. **Aerosol and Air Quality Research** (6): 295-304.
- Ivleva, N. P., McKeon, U., Niessner, R., and Pöschl, U. (2007). Raman microspectroscopic analysis of size-resolved atmospheric aerosol particle samples collected with an ELPI: soot, humic-like substances, and inorganic compounds. **Aerosol Sci. Technol** (41): 655-671.
- Jang, M., and Kamens, R. M. (1999). Newly characterized products and composition of secondary aerosols from the reaction of alpha-pinene with ozone. **Atmos. Environ** (33): 459-474.
- Jinsart, W., Tamura, K., Loetkamonwit, S., Thepanondh, S., Karita, K., and Yano, E. (2011). Roadside Particulate Air Pollution in Bangkok. **Air & Waste Management Association** (52): 1102-1110.
- Karar, K., Gupta, A. K., Kumar, A., and Biswas, A. K. (2006). Characterization and identification of the sources of chromium, zinc, lead, cadmium, nickel, manganese and iron in PM₁₀ particulates at the two sites of Kolkata, India. **Environ. Monit. Assess** (120): 347-360.
- Kittelson, D. B. (1998). Engines and nanoparticles: a review. **Aerosol Sci** (29): 575-588.
- Klaver, A., Formenti, P., Caquineau, S., Chevaillier, S., Ausset, P., Calzolia, G., Osborne, S., Johnson, B., Harrison, M., and Dubovik, O. (2011). Physico-chemical and optical properties of Sahelian and Saharan mineral dust: in situ measurements during the GERBILS campaign. **Q. J. R. Meteorol. Soc** (137): 1193-1210.
- Kock, D., Bond, T. C., Streets, D., Unger, N., and Van Der Werf, G. R. (2007). Global impacts of aerosols from particular source regions and sectors. **J. Geophys. Res** (112). D02205.
- Kulkarni, P., Baron, P. A., and Willeke, K. (2011). **Aerosol measurement: principles, techniques, and application** (3rd ed.). New Jersey: Wiley.
- Larkin, J. P. (2011). **Infrared and raman spectroscopy: principles and spectral interpretation**. Amsterdam; Boston. Elsevier.
- Langkulsen, U., Jinsart, W., Karita, K., and Yano, E. (2006). Health effect of respirable particulate matter in Bangkok schoolchildren. International Congress Series 1294 Evidence-based occupational health. **Elsevier B.V** 2006 (a): 197-200.
- Langkulsen, U., Jinsart, W., Karita, K., and Yano, E. (2006). Respiratory Symptoms and Lung Function in Bangkok schoolchildren. **The European Journal of Public Health** 2006 (b) 16(6): 676-681.

- Lavrach, R. J., and Hays, M. D. (2007). Developments in direct thermal extraction gas chromatography-mass spectrometry of fine aerosols. **Trends Anal. Chem** (26): 88-102.
- Liacos, W. J., Kam, W., Delfino, J. R., Schauer, J. J., and Sioutas, C. (2012). Characterization of organic, metal and trace element PM_{2.5} species and derivation of freeway-based emission rates in Los Angeles, CA. **Science of The Total Environment**: 159–166, 435–436.
- Lodge, Jr., J.P. 1989. **Methods of air sampling and analysis** (3rd ed.). Chelsea, MI: Lewis.
- Manatsakarn, S. (2016). **Developing local air emission factors for grilling activities of street food stalls**. Degree of Master of Science. Suranaree University of Technology, Thailand.
- Maria, S. F., Russel, L. M., Turpin, B. J., and Porcja, R. J. (2002). FTIR measurement of functional groups and organic mass in aerosol samples over the Caribbean. **Atmos. Environ** (36): 5185-5196
- McCubbin, D. R., Apelberg, B. J., Roe, S., and Divita, F. (2002). Livestock ammonia management and particulate related health benefits. **Environ. Sci. Technol** (36): 1141–1146.
- Mészáros, E. (1999). **Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry**. Budapest: Akadémiai Kiado. Mulik, J. and E. Sawicki. (1979). **Ion Chromatographic Analysis of Environmental Pollutants**. Dionex Corp. Ann Arbor, MI: Ann Arbor Science Publishers.
- Nelms, S. (2005). **Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Handbook**. Oxford, UK: Blackwell.
- Nelson, M. P., Zugates, C. T., Treado, P. J., Casuccio, G. S., Exline, D. L., and Schlaegle, S. F. (2001). Combining raman chemical imaging and scanning electron microscopy to characterize ambient fine particulate matter. **Aerosol Sci. Technol** (34): 108-117.
- Nyquist, R. A., Putzing, C. L., and Leungers, M. A. (1997). **The hand book of infrared and raman spectra of inorganic compounds and organic salts, Four volume set**. San Diego. Academic Press. Vol 1. 77-224.
- Obaidullah, M., Dyakov, I. V., Peeters, L., Bram, S., and De Ruyck, J. (2012). Measurements of particle concentrations and size distributions in three parking garages. **International Journal of Energy and Environment** (6): 508-515.
- Ortiz De Zárate, I., Ezcurra, A., Lacaux, J. P., Van Dinh, P. (2000). Emission factor estimates of cereal waste burning in Spain. **Atmos. Environ** (34): 3183–3193.
- Osibanjo, R., Curtis, R., and Lai, Z. (2015). Infrared: Theory [On-line]. Available: http://chem.libretexts.org/Core/Physical_and_Theoretical_Chemistry.

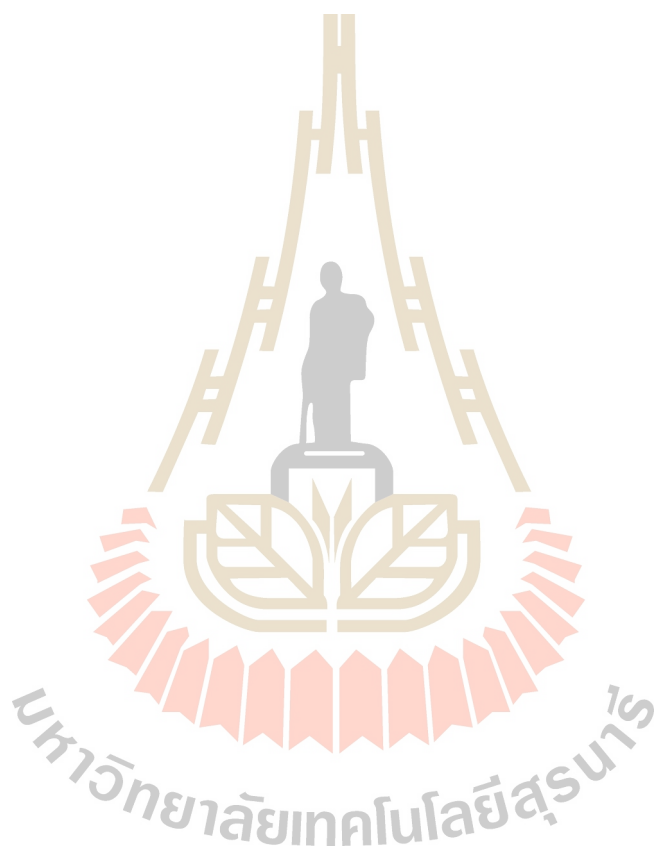
- Pancras, J. P., Ondov, J. M., and Zeisler, R. (2005). Multi-element electrothermal AAS determination of 11 marker elements in fine ambient aerosol slurry samples collected with SEAS-2. **Anal.Chim. Acta** (538): 303-312.
- Park, S. S., and Kim, Y. J. (2005). Source contributions to fine particulate matter in an urban atmosphere. **Chemosphere** (59): 217-226.
- Popovicheva, O. B., Kireeva, E. D., Shonija, N. K., Vojtisek-Lom, M., and Schwarz, J. (2015). FTIR analysis of surface functionalities on particulate matter produced by off-road diesel engines operating on diesel and biofuel. **Environ Sci Pollut Res** (22): 4534-4544.
- Pöschl, U. (2005). Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects. **Angew. Chem. Int. Ed** 2005 (44): 7520 – 7540.
- Quinn, P. K., et al. (2008). Short-lived pollutants in the Arctic: their climate impact and possible mitigation strategies. **Atmos. Chem. Phys** (8): 1723-1735.
- Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Keihl, J. T., and Rosenfeld, D. (2001). Aerosols, climate, and the hydrological cycle. **Science** (294): 2119-2124.
- Ramanathan, V., and Ramana, M. V. (2005). Persistent, widespread, and strongly absorbing haze over the Himalayan foothills and the Indo-Ganges plain. **Pure and Applied Geophysics** (162): 1609-1626.
- Reid, J. S., Koppman, R., Eck, T. F., and Eleuterio, D. P. (2005). A review of biomass burning emissions part II: intensive physical properties of biomass burning particles. **Atmos. Chemis. Phy** (5): 799-825.
- Salma, I., Maenhaut, W., Annegran, H. J., Andreae, M. O., Meixner, F. X., and Garstang, M. (1997). Combined application of INAA and PIXE for studying the regional aerosol composition in Southern Africa. **J. Radioanal. Nucl. Chem** (216): 143-148.
- Schauer, J. J., Rogge, W. F., Hildemann, L. M., Mazurek, M. A., Cass, G. R., and Simoneit, B. R. T. (1996). Source apportionment of airborne particulate matter using organic compounds as tracers. **Atmos. Environ** (30). 3837-3855.
- Schumann, U. and Huntrieser, H., (2007). The global lightning-induced nitrogen oxides source. **Atmos. Chem. Phys** (7): 3823–3907.
- Schweiger, G. T. (1999). In situ chemical analysis of aerosol particles by raman spectroscopy. **In Analytical Chemistry of Aerosols**: 319-352.

- Seinfeld, J. H., and Pandis, S. N. (1998). **Atmos. chemis. Phys.** New York: John Wiley and Sons.
- Shaka, H., Saliba, N. A. (2004). Concentration measurements and chemical composition of PM10-2.5 and PM2.5 at coastal site in Beirut, Lebanon. **Atmos. Environ** (38): 523-531.
- Signorell R. and Reid, J. P. (2011). **Fundamentals and Applications in Aerosol Spectroscopy.** United State of America: CRC Press Taylor and Francis group.
- Simoneit, B. R. T. (1986). Characterization of organic constituents in aerosol in relation to their origin and transport-A review. **Intl. J. Environ. Anal. Chem** (23): 207-237.
- Smith, B. (1999). **Infrared spectral interpretation: a systematic approach.** United States of America: CRC press LLC.
- Solomon, P.A. and C. Sioutas. (2008). Continuous and semicontinuous monitoring techniques for particulate matter mass and chemical components: A synthesis of findings from EPA's Particulate Matter Supersites Program and related studies. **J. Air Waste Manage. Assoc** 58: 164-195.
- Solomon, P.A., Fraser, M.P., and Herckes, P. (2011). Method for chemical analysis of atmospheric aerosols. **Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications** (153-177). New Jersey: Wiley.
- Steven, H. K. (1985). Sampling and analysis methods for use in source apportionment studies to determine impact of wood burning of fine particle mass. **Environ. Inter** (11): 271-283.
- Steven, J. D., James, J. S., Sverre, V. and Michael, P. H. (2009). PM2.5 characterization for time series studies: Pointwise uncertainty estimation and bulk speciation methods applied in Denver. **Atmos. Environ** 43 (5): 1136-1146.
- Tai, A. P. K., Mickley, L. J., and Jacob, D. J. (2010). Correlations between fine particulate matter (PM_{2.5}) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of PM_{2.5} to climate change. **Atmos. Environ** 44 (32): 3976-3984.
- Thermo Fisher Scientific. (2010). **Operating manual for Andersen 1 ACFM non-viable ambient particle sizing samplers.** Franklin, MA. United States of America.
- Thomas, H.E., Watson, I.M., Kearney, C., Carn, S.A., and Murray, S.J. (2009). A multisensory comparison of sulphur dioxide emissions from the 2005 eruption of Sierra Negra volcano, Galápagos Islands. **Remote. Sens. Environ** (113): 1331-1342.

- U.S. Environmental Protection Agency. (1982). Air quality criteria for particulate matter and sulfur. **EPA - 600/882-029b.**
- USEPA. 1999b. **Particulate Matter (PM_{2.5}) Speciation Guidance.** Research Triangle Park, NC: Office of Air Quality Planning and Standards, USEPA.
- Van, M. K., Worobiec, A., Stranger, M., and Grieken, R. V. (2008). Sample damage during X-ray fluorescence analysis-case study on ammonium-salts in atmospheric aerosols. **J. Environ. Monitoring** (10): 989-992.
- Watson, J. G., Chen, L. W. A., Chow, J. C., Doraiswamy, P., and Lowenthal, D. H. (2008). Source apportionment: Findings from the U.S. Supersites program. **J. Air Waste Manage. Assoc** (58): 265-288.
- Watson, J. G., Chow, J. C., and Frazier, C. A. (1999). **X-ray fluorescence analysis of ambient air sampler. In Elemental Analysis of Airborne Particles.** Amsterdam: Gordon and Breach.
- Whelpdale, D.M., Dorling, S.R., Hicks, B. B., and Summers, P. W. (1996). Atmospheric process. In: Global acid deposition assessment. Report Number 106. **World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch:** 7–32.
- Williams, J., Reus, M. D., Krejci, R., Fischer, H., and Ström, J. (2002). Application of the variability-size relationship to atmospheric aerosol studies: estimating aerosol lifetimes and ages. **Atmos. Chem. Phys.** (2): 133-145.
- World Health Organization. (2013). Health effects of particulate matter. **Policy implications for countries in Eastern Europe, Caucasus and central Asia.** WHO regional office for Europe UN city, Marmorvej 51
- Yanca, C. A., Barth, D. C., Petterson, K. A., Nakanishi, M. P., Cooper, J. A., Johnsen, B. E., Lambert, R. H., and Bivins, D. G. (2006). Validation of three new methods for determination of metal emissions using a modified Environmental Protection Agency Method 301. **J. Air Waste Manage. Assoc** (56): 1733-1742.
- Yang, G.P., Zhang, H. H., Zhou, L. M., and Yang, J. (2011). Temporal and spatial variations of dimethylsulfide (DMS) and dimethylsulfoniopropionate (DMSP) in the East China Sea and the Yellow Sea. **Cont. Shelf Res** (31): 1325–1335.
- Yu, J. Z., Cocker, D. R., Griffin, R. J., Flagan, R. C., and Seinfeld, L. H. (1999). Gas-phase ozone oxidation of monoterpenes: Gaseous and particulate products. **J. Atmos. Chem** (34): 207-258.

Zeng, X., Wu, X., Yao, H., Yang, F., and Cahill, T. A. (1993). PIXE-induced XRF with transmission geometry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. Beam Interactions with Materials and Atoms* (75): 99-104.

Zielinska, B., and Samy, S. (2006). Analysis of nitrated polycyclic aromatic hydrocarbons. *Anal. Bioanal. Chem* (386): 883-890.





ภาคผนวก ก

นำหนักฝุ่นละอองจากการเก็บตัวอย่าง

ก. 1 ข้อมูลน้ำหนักฝุ่นละออง

ตาราง ก-1 น้ำหนักฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะที่มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมันเบนซิน

ครั้งที่	ชั้น	น้ำหนักก่อน (มก.)				น้ำหนักหลัง (มก.)				น้ำหนักฝุ่น (มก.)
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	
1	1	0.26938	0.26936	0.26939	0.26938	0.26941	0.26943	0.26940	0.26941	0.00003
	2	0.26583	0.26586	0.26583	0.26584	0.26588	0.26589	0.26587	0.26588	0.00004
	3	0.26203	0.26208	0.26206	0.26206	0.26207	0.26212	0.26207	0.26209	0.00003
	4	0.26985	0.26981	0.26984	0.26983	0.26986	0.26991	0.26986	0.26988	0.00005
	5	0.26895	0.26891	0.26894	0.26893	0.26894	0.26894	0.26893	0.26894	0.00001
	6	0.26696	0.26691	0.26696	0.26694	0.26698	0.26701	0.26698	0.26699	0.00005
	7	0.26009	0.26012	0.26008	0.26010	0.27010	0.27014	0.27011	0.27012	0.00002
	Final	0.26317	0.26312	0.26316	0.26315	0.26317	0.26318	0.26317	0.26317	0.00002
	2	1	0.26483	0.26478	0.26481	0.26481	0.26482	0.26484	0.26482	0.26483
	2	0.26468	0.26463	0.26466	0.26466	0.26466	0.26467	0.26467	0.26467	0.00001
	3	0.26744	0.26739	0.26743	0.26742	0.26749	0.26744	0.26744	0.26746	0.00004
	4	0.26354	0.26352	0.26353	0.26353	0.26355	0.26356	0.26356	0.26356	0.00003
	5	0.26554	0.26553	0.26553	0.26553	0.26556	0.26554	0.26553	0.26554	0.00001
	6	0.26407	0.26404	0.26409	0.26407	0.26410	0.26411	0.26406	0.26409	0.00002
	7	0.26723	0.26719	0.26722	0.26721	0.26726	0.26724	0.26725	0.26725	0.00004

ตาราง ก-1 น้ำหนักฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะที่มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมันเบนซิน (ต่อ)

ครั้งที่	ชั้น	น้ำหนักก่อน (มก.)				น้ำหนักหลัง (มก.)				น้ำหนักฝุ่น (มก.)
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	
2	Final	0.26715	0.26716	0.26713	0.26715	0.26716	0.26716	0.26716	0.26716	0.00001
3	1	0.26292	0.26288	0.26292	0.26291	0.26292	0.26294	0.26291	0.26292	0.00001
	2	0.26553	0.26553	0.26549	0.26552	0.26553	0.26552	0.26553	0.26553	0.00001
	3	0.26516	0.26514	0.26516	0.26515	0.26518	0.26520	0.26520	0.26519	0.00004
	4	0.26614	0.26616	0.26615	0.26615	0.26624	0.26622	0.26621	0.26622	0.00007
	5	0.26725	0.26722	0.26720	0.26722	0.26727	0.26727	0.26727	0.26727	0.00005
	6	0.26725	0.26722	0.26726	0.26724	0.26732	0.26733	0.26737	0.26734	0.00010
	7	0.26823	0.26822	0.26822	0.26822	0.26822	0.26824	0.26823	0.26823	0.00001
	Final	0.26514	0.26517	0.26516	0.26516	0.26520	0.26520	0.26518	0.26519	0.00003

ตาราง ก-2 น้ำหนักฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะที่มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมันดีเซล

ครั้งที่	ชั้น	น้ำหนักก่อน (มก.)				น้ำหนักหลัง (มก.)				น้ำหนักฝุ่น (มก.)
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	
1	1	0.26757	0.26755	0.26754	0.26755	0.26774	0.26773	0.26777	0.26775	0.00020
	2	0.26644	0.26641	0.26642	0.26642	0.26650	0.26651	0.26648	0.26650	0.00008
	3	0.26796	0.26794	0.26798	0.26796	0.26804	0.26806	0.26803	0.26804	0.00008

ตาราง ก-2 น้ำหนักฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะที่มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมันดีเซล (ต่อ)

ครั้งที่	ชั้น	น้ำหนักก่อน (มก.)				น้ำหนักหลัง (มก.)				น้ำหนักฝุ่น (มก.)
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	
1	4	0.26440	0.26443	0.26438	0.26440	0.26450	0.26450	0.26447	0.26449	0.00009
	5	0.26786	0.26783	0.26786	0.26785	0.26793	0.26792	0.26790	0.26792	0.00007
	6	0.26448	0.26446	0.26449	0.26448	0.26454	0.26453	0.26450	0.26452	0.00004
	7	0.26840	0.26835	0.26835	0.26837	0.26845	0.26848	0.26844	0.26846	0.00009
	Final	0.26752	0.26752	0.26753	0.26752	0.26779	0.26781	0.26778	0.26779	0.00027
2	1	0.26341	0.26344	0.26345	0.26343	0.26361	0.26365	0.26362	0.26363	0.00020
	2	0.26365	0.26365	0.26365	0.26365	0.26374	0.26371	0.26370	0.26372	0.00007
	3	0.26482	0.26482	0.26486	0.26483	0.26494	0.26497	0.26494	0.26495	0.00012
	4	0.26580	0.26581	0.26582	0.26581	0.26592	0.26595	0.26590	0.26592	0.00011
	5	0.26270	0.26680	0.26265	0.26268	0.26281	0.26280	0.26280	0.26280	0.00012
	6	0.26269	0.26270	0.26266	0.26268	0.26278	0.26276	0.26278	0.26277	0.00009
	7	0.26508	0.26507	0.26509	0.26508	0.26520	0.26524	0.26519	0.26521	0.00013
	Final	0.26472	0.26474	0.26472	0.26473	0.26500	0.26501	0.26500	0.26500	0.00027
3	1	0.26564	0.26567	0.26565	0.26565	0.26568	0.26570	0.26568	0.26569	0.00004
	2	0.26439	0.26441	0.26441	0.26441	0.26448	0.26445	0.26448	0.26447	0.00006
	3	0.26427	0.26428	0.26429	0.26428	0.26431	0.26433	0.26432	0.26432	0.00004

ตาราง ก-2 น้ำหนักฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะที่มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมันดีเซล (ต่อ)

ครั้งที่	ชั้น	น้ำหนักก่อน (มก.)				น้ำหนักหลัง (มก.)				น้ำหนักฝุ่น (มก.)
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	
3	4	0.26434	0.26436	0.26435	0.26435	0.26443	0.26443	0.26442	0.26443	0.00008
	5	0.26616	0.26616	0.26620	0.26617	0.26622	0.26627	0.26626	0.26625	0.00008
	6	0.26436	0.26432	0.26435	0.26434	0.26439	0.26437	0.26441	0.26439	0.00005
	7	0.26527	0.26528	0.26527	0.26527	0.26543	0.26538	0.26540	0.26540	0.00013
	Final	0.26643	0.26642	0.26642	0.26642	0.26674	0.26674	0.26675	0.26674	0.00032

ตาราง ก-3 น้ำหนักฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

ครั้งที่	ชั้น	น้ำหนักก่อน (มก.)				น้ำหนักหลัง (มก.)				น้ำหนักฝุ่น (มก.)
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	
1	1	0.26838	0.26835	0.26838	0.26837	0.26860	0.26858	0.26863	0.26860	0.00023
	2	0.27578	0.27574	0.27578	0.27577	0.27592	0.27591	0.27593	0.27592	0.00015
	3	0.27015	0.27014	0.27013	0.27014	0.27019	0.27017	0.27022	0.27019	0.00005
	4	0.26796	0.26796	0.26797	0.26796	0.26807	0.26808	0.26807	0.26807	0.00011
	5	0.27105	0.27104	0.27106	0.27105	0.27118	0.27118	0.27118	0.27118	0.00013
	6	0.27158	0.27158	0.27157	0.27158	0.27184	0.27184	0.27184	0.27184	0.00026
	7	0.27203	0.27203	0.27203	0.27203	0.27357	0.27358	0.27357	0.27357	0.00154

ตาราง ก-3 น้ำหนักฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (ต่อ)

ครั้งที่	ชั้น	น้ำหนักก่อน (มก.)				น้ำหนักหลัง (มก.)				น้ำหนักฝุ่น (มก.)
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	
1	Final	0.26578	0.26573	0.26575	0.26575	0.27720	0.27716	0.27715	0.27717	0.01142
2	1	0.26567	0.26567	0.26567	0.26567	0.26605	0.26605	0.26607	0.26606	0.00039
	2	0.27130	0.27129	0.27128	0.27129	0.27145	0.27145	0.27146	0.27145	0.00016
	3	0.20673	0.20671	0.20673	0.20672	0.20681	0.20683	0.20682	0.20682	0.00010
	4	0.27099	0.27100	0.27101	0.27100	0.27110	0.27108	0.27108	0.27109	0.00009
	5	0.26683	0.26684	0.26686	0.26684	0.26700	0.26701	0.26703	0.26701	0.00017
	6	0.26716	0.26719	0.26719	0.26718	0.26753	0.26756	0.26755	0.26755	0.00037
	7	0.27027	0.27026	0.27024	0.27026	0.27165	0.27165	0.27166	0.27165	0.00139
	Final	0.28235	0.28237	0.28237	0.28236	0.29287	0.29287	0.29288	0.29287	0.01051
3	1	0.28356	0.28357	0.28356	0.28356	0.28388	0.28387	0.28392	0.28389	0.00033
	2	0.28037	0.28037	0.28038	0.28037	0.28056	0.28053	0.28055	0.28055	0.00018
	3	0.20463	0.20463	0.20464	0.20463	0.20467	0.20467	0.20466	0.20467	0.00004
	4	0.26873	0.26874	0.26870	0.26872	0.26885	0.26885	0.26884	0.26885	0.00013
	5	0.28561	0.28562	0.28561	0.28561	0.28571	0.28570	0.28572	0.28571	0.00010
	6	0.28630	0.28633	0.28633	0.28632	0.28662	0.28664	0.28664	0.28663	0.00031
	7	0.28236	0.28238	0.28234	0.28236	0.28428	0.28425	0.28423	0.28425	0.00189

ตาราง ก-3 น้ำหนักฝุ่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (ต่อ)

ครั้งที่	ชั้น	น้ำหนักก่อน (มก.)				น้ำหนักหลัง (มก.)				น้ำหนักฝุ่น (มก.)
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	
3	Final	0.26585	0.26585	0.26585	0.26585	0.27754	0.27754	0.27754	0.27754	0.01169

ตาราง ก-4 น้ำหนักฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง

ครั้งที่	ชั้น	น้ำหนักก่อน (มก.)				น้ำหนักหลัง (มก.)				น้ำหนักฝุ่น (มก.)
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	
1	1	0.26915	0.26914	0.26911	0.26913	0.26919	0.26920	0.26917	0.26919	0.00006
	2	0.26610	0.26610	0.26610	0.26610	0.26617	0.26620	0.26617	0.26618	0.00008
	3	0.27125	0.27127	0.27127	0.27126	0.27132	0.27130	0.27132	0.27131	0.00005
	4	0.27156	0.27161	0.27159	0.27159	0.27167	0.27167	0.27168	0.27167	0.00008
	5	0.27249	0.27252	0.27249	0.27250	0.27253	0.27254	0.27255	0.27254	0.00004
	6	0.26683	0.26681	0.26683	0.26682	0.26689	0.26693	0.26690	0.26691	0.00009
	7	0.26641	0.26636	0.26639	0.26639	0.26655	0.26656	0.26658	0.26656	0.00017
	Final	0.26157	0.26155	0.26157	0.26156	0.26308	0.26312	0.26309	0.26310	0.00154
2	1	0.25940	0.25942	0.25941	0.25941	0.25946	0.25948	0.25951	0.25948	0.00007
	2	0.26386	0.26381	0.26384	0.26384	0.26390	0.26390	0.26394	0.26391	0.00007
	3	0.26258	0.26254	0.26257	0.26256	0.26261	0.26261	0.26262	0.26261	0.00005

ตาราง ก-4 น้ำหนักฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง (ต่อ)

ครั้งที่	ชั้น	น้ำหนักก่อน (มก.)				น้ำหนักหลัง (มก.)				น้ำหนักฝุ่น (มก.)
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	
2	4	0.26186	0.26183	0.26187	0.26185	0.26190	0.26191	0.26192	0.26191	0.00006
	5	0.26457	0.26458	0.26458	0.26458	0.26465	0.26465	0.26466	0.26465	0.00007
	6	0.26295	0.26295	0.26294	0.26295	0.26300	0.26305	0.26300	0.26302	0.00007
	7	0.26534	0.26532	0.26531	0.26532	0.26550	0.26547	0.26550	0.26549	0.00017
	Final	0.26334	0.26330	0.26333	0.26332	0.26487	0.26490	0.26491	0.26489	0.00157
3	1	0.26328	0.26328	0.26327	0.26328	0.26330	0.26332	0.26335	0.26233	0.00005
	2	0.26712	0.26711	0.26711	0.26711	0.26719	0.26721	0.26723	0.26721	0.00010
	3	0.26556	0.26561	0.26560	0.26559	0.26560	0.26559	0.26563	0.26561	0.00002
	4	0.26818	0.26818	0.26817	0.26818	0.26826	0.26826	0.26823	0.26825	0.00007
	5	0.26007	0.26012	0.26010	0.26010	0.26013	0.26014	0.26018	0.26015	0.00005
	6	0.26258	0.26256	0.26258	0.26257	0.26268	0.26269	0.26966	0.26268	0.00011
	7	0.26478	0.26475	0.26475	0.26476	0.26495	0.26493	0.26493	0.26494	0.00018
	Final	0.26625	0.26625	0.26622	0.26623	0.26783	0.26783	0.26779	0.26782	0.00159

ตาราง ก-5 น้ำหนักฝุ่นละอองจากอนุภาคฝุ่นดิน

ครั้งที่	ชั้น	น้ำหนักก่อน (มก.)				น้ำหนักหลัง (มก.)				น้ำหนักฝุ่น (มก.)
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	
1	1	0.26946	0.26947	0.26943	0.26945	0.27143	0.27142	0.27138	0.27141	0.00196
	2	0.26775	0.26775	0.26775	0.26775	0.26781	0.26776	0.26780	0.26779	0.00004
	3	0.26628	0.26626	0.26626	0.26627	0.26629	0.26628	0.26626	0.26628	0.00001
	4	0.26810	0.26812	0.26809	0.26810	0.26812	0.26814	0.26809	0.26812	0.00002
	5	0.26750	0.26748	0.26749	0.26749	0.26755	0.26750	0.26751	0.26752	0.00003
	6	0.26762	0.26758	0.26759	0.26760	0.26770	0.26769	0.26767	0.26769	0.00009
	7	0.26816	0.26818	0.26817	0.26817	0.26820	0.26816	0.26819	0.26818	0.00001
	Final	0.26968	0.26969	0.26968	0.26968	0.26992	0.26993	0.26992	0.26992	0.00024
2	1	0.27220	0.27219	0.27217	0.27219	0.27439	0.27439	0.27437	0.27438	0.00219
	2	0.26768	0.26767	0.26767	0.26767	0.26778	0.2678	0.26777	0.26778	0.00011
	3	0.27038	0.27033	0.27035	0.27035	0.27040	0.27045	0.2704	0.27042	0.00007
	4	0.27233	0.27230	0.27234	0.27232	0.27234	0.27233	0.27236	0.27234	0.00002
	5	0.27085	0.27084	0.27081	0.27083	0.27085	0.27085	0.27085	0.27085	0.00002
	6	0.27248	0.27249	0.27248	0.27248	0.27270	0.27268	0.27271	0.27270	0.00022
	7	0.26963	0.26963	0.26959	0.26962	0.26963	0.26965	0.26964	0.26964	0.00002
	Final	0.26961	0.26958	0.26959	0.26959	0.26987	0.26986	0.26990	0.26988	0.00029

ตาราง ก-5 น้ำหนักฝุ่นละอองจากอนุภาคฝุ่นดิน (ต่อ)

ครั้งที่	ชั้น	น้ำหนักก่อน (มก.)				น้ำหนักหลัง (มก.)				น้ำหนักฝุ่น (มก.)
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	
3	1	0.26842	0.26839	0.26844	0.26842	0.27111	0.27115	0.27112	0.27113	0.00271
	2	0.27128	0.27129	0.27125	0.27127	0.27157	0.27158	0.27159	0.27158	0.00031
	3	0.27046	0.27045	0.27041	0.27044	0.27048	0.27047	0.27049	0.27048	0.00004
	4	0.27405	0.27404	0.27405	0.27405	0.27408	0.27404	0.27405	0.27407	0.00002
	5	0.26734	0.26734	0.26729	0.26732	0.26735	0.26731	0.26734	0.26733	0.00001
	6	0.27118	0.27116	0.27116	0.27117	0.27135	0.27135	0.27136	0.27135	0.00018
	7	0.27013	0.27013	0.27011	0.27012	0.27018	0.27019	0.27016	0.27018	0.00006
	Final	0.26780	0.26781	0.26779	0.26780	0.26809	0.26811	0.26812	0.26811	0.00031

ตาราง ก-6 น้ำหนักฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไป

ครั้งที่	ชั้น	น้ำหนักก่อน (มก.)				น้ำหนักหลัง (มก.)				น้ำหนักฝุ่น (มก.)
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	
1	1	0.26706	0.26707	0.26709	0.26707	0.26736	0.26736	0.26733	0.26735	0.00028
	2	0.26902	0.26904	0.26900	0.26902	0.26910	0.26909	0.26908	0.26909	0.00007
	3	0.26672	0.26673	0.26674	0.26673	0.26678	0.26677	0.26678	0.26678	0.00005
	4	0.26754	0.26753	0.26754	0.26754	0.26760	0.26760	0.26760	0.26760	0.00006

ตาราง ก-6 น้ำหนักฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไป (ต่อ)

ครั้งที่	ชั้น	น้ำหนักก่อน (มก.)				น้ำหนักหลัง (มก.)				น้ำหนักฝุ่น (มก.)
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	
1	5	0.26961	0.26961	0.26957	0.26960	0.26963	0.26963	0.26963	0.26963	0.00003
	6	0.27023	0.27024	0.27023	0.27023	0.27028	0.27032	0.27028	0.27029	0.00006
	7	0.26653	0.26654	0.26650	0.26652	0.26659	0.26657	0.26658	0.26658	0.00006
	Final	0.20230	0.20232	0.20234	0.20232	0.20244	0.20243	0.20242	0.20243	0.00011
2	1	0.26808	0.26808	0.26808	0.26808	0.26830	0.26831	0.26830	0.26830	0.00022
	2	0.26774	0.26776	0.26778	0.26776	0.26788	0.26787	0.26788	0.26788	0.00012
	3	0.26866	0.26864	0.26864	0.26865	0.26866	0.26866	0.26865	0.26866	0.00001
	4	0.26806	0.26807	0.26805	0.26806	0.26812	0.26812	0.26814	0.26813	0.00007
	5	0.27124	0.27124	0.27125	0.27124	0.27125	0.27127	0.27125	0.27126	0.00002
	6	0.26717	0.26715	0.26712	0.26715	0.26725	0.26726	0.26727	0.26726	0.00011
	7	0.20100	0.20102	0.20097	0.20100	0.20109	0.20108	0.20109	0.20109	0.00009
	Final	0.26856	0.26859	0.26857	0.26857	0.26868	0.26867	0.26868	0.26868	0.00011
3	1	0.26748	0.26743	0.26745	0.26745	0.26770	0.26768	0.26768	0.26769	0.00024
	2	0.27052	0.27053	0.27053	0.27053	0.27061	0.27062	0.27062	0.27062	0.00009
	3	0.26702	0.26707	0.26704	0.26704	0.26712	0.26712	0.26711	0.26712	0.00008
	4	0.26871	0.26869	0.26868	0.26869	0.26876	0.26876	0.26876	0.26876	0.00007

ตาราง ก-6 น้ำหนักฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไป (ต่อ)

ครั้งที่	ชั้น	น้ำหนักก่อน (มก.)				น้ำหนักหลัง (มก.)				น้ำหนักฝุ่น (มก.)
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	
3	5	0.27010	0.27012	0.27008	0.27010	0.27017	0.27017	0.27015	0.27016	0.00006
	6	0.26644	0.26639	0.26641	0.26641	0.26656	0.26653	0.26655	0.26655	0.00014
	7	0.26670	0.26668	0.26668	0.26669	0.26675	0.26672	0.26675	0.26674	0.00005
	Final	0.26453	0.26454	0.26451	0.26453	0.26466	0.26468	0.26468	0.26467	0.00014

ตาราง ก-7 น้ำหนักฝุ่นละอองจากพื้นที่บริเวณริมถนน

ครั้งที่	ชั้น	น้ำหนักก่อน (มก.)				น้ำหนักหลัง (มก.)				น้ำหนักฝุ่น (มก.)
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	
1	1	0.26691	0.26693	0.26690	0.26691	0.26743	0.26746	0.26744	0.26744	0.00053
	2	0.26957	0.26957	0.26960	0.26958	0.26972	0.26970	0.26970	0.26971	0.00013
	3	0.26376	0.26375	0.26374	0.26375	0.26381	0.26379	0.26381	0.26380	0.00005
	4	0.26344	0.26348	0.26345	0.26346	0.26351	0.26350	0.26350	0.26350	0.00004
	5	0.26898	0.26901	0.26901	0.26900	0.26900	0.26902	0.26904	0.26902	0.00002
	6	0.26792	0.26797	0.26794	0.26794	0.26799	0.26798	0.26801	0.26799	0.00005
	7	0.27004	0.27005	0.27004	0.27004	0.27007	0.27006	0.27006	0.27006	0.00002
	Final	0.26674	0.26673	0.26671	0.26673	0.26681	0.26678	0.26683	0.26681	0.00008

ตาราง ก-7 น้ำหนักฝุ่นละอองจากพื้นที่บริเวณริมถนน (ต่อ)

ครั้งที่	ชั้น	น้ำหนักก่อน (มก.)				น้ำหนักหลัง (มก.)				น้ำหนักฝุ่น (มก.)
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	
2	1	0.26176	0.26171	0.26175	0.26174	0.26235	0.26236	0.26236	0.26236	0.00062
	2	0.26620	0.26620	0.26623	0.26621	0.26630	0.26634	0.26631	0.26632	0.00011
	3	0.26459	0.26461	0.26461	0.26460	0.26463	0.26464	0.26463	0.26463	0.00003
	4	0.26547	0.26547	0.26545	0.26546	0.26548	0.26550	0.26550	0.26549	0.00003
	5	0.26790	0.26787	0.26790	0.26789	0.26790	0.26790	0.26790	0.26790	0.00001
	6	0.26750	0.26748	0.26749	0.26749	0.26757	0.26757	0.26755	0.26756	0.00007
	7	0.26644	0.26641	0.26643	0.26643	0.26645	0.26646	0.26646	0.26646	0.00003
	Final	0.26614	0.26615	0.26614	0.26614	0.26627	0.26624	0.26624	0.26625	0.00011
3	1	0.26741	0.26742	0.26742	0.26742	0.26813	0.26813	0.26810	0.26812	0.00070
	2	0.26846	0.26844	0.26845	0.26845	0.26851	0.26851	0.26853	0.26852	0.00007
	3	0.26545	0.26548	0.26548	0.26547	0.26549	0.26550	0.26549	0.26549	0.00002
	4	0.26600	0.26600	0.26601	0.26600	0.26602	0.26601	0.26602	0.26602	0.00002
	5	0.26773	0.26772	0.26773	0.26773	0.26775	0.26776	0.26774	0.26775	0.00002
	6	0.26812	0.26813	0.26812	0.26812	0.26822	0.26825	0.26824	0.26824	0.00012
	7	0.26757	0.26756	0.26760	0.26758	0.26761	0.26764	0.26765	0.26763	0.00005
	Final	0.26940	0.26940	0.26943	0.26941	0.26953	0.26954	0.26952	0.26953	0.00012

ก.2 การคำนวณความเข้มข้นฝุ่นละออง

ตัวอย่าง: การคำนวณความเข้มข้นฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะที่มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมันเบนซิน (ตัวอย่างฝุ่นละอองจากชั้นที่ 1 Cut-point = 9.00-10.00 ไมโครเมตร)

จากการทดลอง อุณหภูมิที่บันทึกได้ขณะทดลอง = 49.34 °C

ความดันบรรยากาศ = 1011.6 hPa

อัตราการไหลของอากาศขณะเก็บตัวอย่าง = 28.3 L/min

ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง = 120 min

น้ำหนักกระดาศกรองหลังเก็บตัวอย่าง = 0.26941 g

น้ำหนักกระดาศกรองก่อนเก็บตัวอย่าง = 0.26938 g

1) คำนวณหาปริมาตรอากาศขณะเก็บตัวอย่าง

$$\text{จากสมการ } V_{\text{sample}} = Q \times t$$

กำหนดให้ V_{sample} = ปริมาตรตัวอย่างอากาศทั้งหมดในหน่วยลูกบาศก์เมตร

Q = อัตราการไหลเฉลี่ยตลอดช่วงเวลารับตัวอย่าง ในหน่วยลูกบาศก์ต่อนาที (m^3/min)

t = ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง ในหน่วยนาที

$$V_{\text{sample}} = \left(\frac{28.3 \text{ L}}{\text{min}} \right) \left(\frac{\text{m}^3}{1000 \text{ L}} \right) (180 \text{ min})$$

$$= 5.0940 \text{ m}^3$$

2) ปรับปริมาตรอากาศที่คำนวณได้ให้อยู่ในสภาวะมาตรฐาน 25 °C, 760 mmHg (1013.25 hPa)

$$\text{จากสมการ } V_{\text{std}} = V_{\text{sampled}} \left(\frac{P_{\text{sampled}}}{P_{\text{std}}} \right) \left(\frac{T_{\text{std}}}{T_{\text{sampled}}} \right)$$

กำหนดให้ V_{std} = ปริมาตรอากาศที่สภาวะมาตรฐาน

V_{sampled} = ปริมาตรอากาศที่ทำการเก็บตัวอย่าง

T_{std} = อุณหภูมิที่สภาวะมาตรฐาน

T_{sampled} = อุณหภูมิที่ทำการเก็บตัวอย่าง

P_{std} = ความดันที่สภาวะมาตรฐาน (1 บรรยากาศ)

P_{sampled} = ความดันขณะทำการเก็บตัวอย่าง

$$V_{\text{std}} = 5.0940 \text{ m}^3 \left(\frac{1011.6 \text{ hPa}}{1013.25 \text{ hPa}} \right) \left(\frac{25^\circ\text{C}}{49.34^\circ\text{C}} \right)$$

$$= 2.5770 \text{ m}^3$$

3) คำนวณความเข้มข้นฝุ่นละออง

$$\text{จากสมการ } PM = \frac{(W_f - W_i) \times 10^6}{V_{std}}$$

กำหนดให้ PM = ความเข้มข้นของฝุ่นละอองหน่วยเป็นไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

W_f = น้ำหนักกระดาษกรองหลังเก็บตัวอย่าง หน่วยเป็นกรัม (g)

W_i = น้ำหนักกระดาษกรองก่อนเก็บตัวอย่าง หน่วยเป็นกรัม (g)

$$\begin{aligned} &= \frac{(W_f - W_i)}{V_{std}} \\ &= \frac{(0.26941 - 0.26938) \text{g}}{2.5770 \text{ m}^3} \\ &= (1.1641 \times 10^{-5} \text{ g}/\text{m}^3) \times (10^6 \mu\text{g}/\text{g}) \\ &= 11.6414 \mu\text{g}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะที่มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมันเบนซินในชั้นที่ 1 (Cut-point = 9.00-10.00 ไมโครเมตร) มีความเข้มข้น = 11.64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

ก. 3 การคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นฝุ่นละออง

ตัวอย่าง: การคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะที่มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมันเบนซิน (ตัวอย่างฝุ่นละอองจากชั้นที่ 1 Cut-point = 9.00-10.00 ไมโครเมตร)

จากการคำนวณความเข้มข้นฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะที่มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมันเบนซินในชั้นที่ 1 (Cut-point = 9.0-10.0 ไมโครเมตร) การทดลองที่ 1, 2, และ 3 พบว่ามีค่าเท่ากับ 11.64, 7.94, และ 3.97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ จากการคำนวณค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นพบว่ามีค่าเท่ากับ 7.85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

$$\text{จากสมการ } S.D. = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n-1}}$$

กำหนดให้ S.D. = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

กำหนดให้ S.D. = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

X = ความเข้มข้นฝุ่นละอองแต่ละการทดลอง

\bar{X} = ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฝุ่นละออง ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

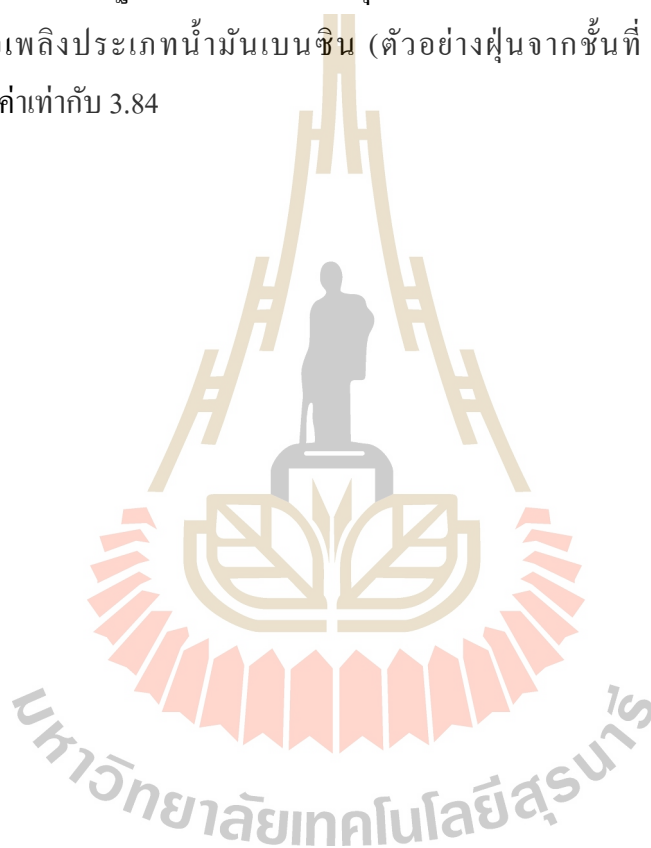
n = จำนวนครั้งของการทดลอง

$$\text{จากสมการ S.D.} = \sqrt{\frac{\sum (11.64-7.85)^2 + (7.94-7.85)^2 + (3.97-7.85)^2}{3-1}}$$

$$\text{S.D.} = \sqrt{\frac{29.4266}{2}}$$

$$\text{S.D.} = 3.84$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะที่มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมันเบนซิน (ตัวอย่างฝุ่นจากชั้นที่ 1 Cut-point = 9.00-10.00 ไมโครเมตร) มีค่าเท่ากับ 3.84





ภาคผนวก ข

ข้อมูลการกระจายขนาดของฝุ่นละออง

ข. ข้อมูลการกระจายขนาดของฝุ่นละออง

ตาราง ข-1 อัตราส่วนของความเข้มข้นฝุ่นละออง (dN) จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะที่มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมันเบนซินกับความแตกต่างของขนาดฝุ่นละอองในแต่ละช่วงขนาดในเทอมของล็อกการิทึม (dlogDp)

Stage	dlogDp	การทดลองที่ 1		การทดลองที่ 2		การทดลองที่ 3	
		dN($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	dN/dlogDp	dN($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	dN/dlogDp	dN($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	dN/dlogDp
1	0.0458	11.6414	254.1790	7.9444	173.4585	3.9670	86.6157
2	0.1908	15.5219	81.3517	3.9722	20.8187	3.9670	20.7914
3	0.0913	11.6414	127.5071	15.8888	174.0285	15.8680	173.8007
4	0.1536	19.4024	126.3177	11.9166	77.5820	27.7690	180.7878
5	0.1963	3.8805	19.7682	3.9722	20.2354	19.8350	101.0443
6	0.2808	19.4024	69.0969	7.9444	28.2920	39.6699	141.2746
7	0.2285	7.7610	33.9650	15.8888	69.5352	3.9670	17.3611
Final	0.1794	7.7610	43.2609	3.9722	22.1416	11.9010	66.3378

ตาราง ข-2 อัตราส่วนของความเข้มข้นฝุ่นละออง (dN) จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะที่มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมันดีเซลกับความแตกต่างของขนาดฝุ่นละอองในแต่ละช่วงขนาดในเทอมของ ล็อกการิทึม (dlogDp)

Stage	dlogDp	การทดลองที่ 1		การทดลองที่ 2		การทดลองที่ 3	
		dN($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	dN/dlogDp	dN($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	dN/dlogDp	dN($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	dN/dlogDp
1	0.0458	97.9912	2139.5459	99.8851	2180.8974	18.7047	408.3996
2	0.1908	39.1965	205.4324	34.9598	183.2275	28.0570	147.0493
3	0.0913	39.1965	429.3154	59.9311	656.4195	18.7047	204.8708
4	0.1536	44.0960	287.0833	54.9368	357.6615	37.4094	243.5508
5	0.1963	34.2969	174.7168	59.9311	305.3036	37.4094	190.5726
6	0.2808	19.5982	69.7942	44.9483	160.0723	23.3809	83.2653
7	0.2285	44.0960	192.9803	64.9253	284.1370	60.7903	266.0407
Final	0.1794	132.2881	737.3919	134.8449	751.6438	149.6376	834.1003

ตาราง ข-3 อัตราส่วนของความเข้มข้นฝุ่นละออง (dN) จากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร
กับความแตกต่างของขนาดฝุ่นละอองในแต่ละช่วงขนาดในเทอมของ ล็อกการิทึม
(dlogDp)

Stage	dlogD _p	การทดลองที่ 1		การทดลองที่ 2		การทดลองที่ 3	
		dN(μg/m ³)	dN/dlogDp	dN(μg/m ³)	dN/dlogDp	dN(μg/m ³)	dN/dlogDp
1	0.0458	2.25x10 ³	4.9127x10 ⁴	4.62 x10 ³	1.0087x10 ⁵	3.18 x10 ³	6.9432x10 ⁴
2	0.1908	1.47 x10 ³	7.7044x10 ³	1.89 x10 ³	9.9057x10 ³	1.73 x10 ³	9.0671x10 ³
3	0.0913	4.99 x10 ²	5.4655x10 ³	1.18 x10 ³	1.2924x10 ⁴	3.85 x10 ²	4.2169x10 ³
4	0.1536	1.08 x10 ³	7.0312x10 ³	1.07 x10 ³	6.9661x10 ³	1.25 x10 ³	8.1380x10 ³
5	0.1963	1.27 x10 ³	6.4697x10 ³	2.01 x10 ³	1.0239x10 ⁴	9.63 x10 ²	4.9058x10 ³
6	0.2808	2.54 x10 ³	9.0456x10 ³	4.38 x10 ³	1.5598x10 ⁴	2.99 x10 ³	1.0648x10 ⁴
7	0.2285	1.51 x10 ⁴	6.6083x10 ⁴	1.64 x10 ⁴	7.1772x10 ⁴	1.82 x10 ⁴	7.9650x10 ⁴
Final	0.1794	1.12 x10 ⁵	6.2430x10 ⁵	1.24 x10 ⁵	6.9119x10 ⁵	1.13 x10 ⁵	6.2988x10 ⁵

ตาราง ข-4 อัตราส่วนของความเข้มข้นฝุ่นละออง (dN) จากการเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง
กับความแตกต่างของขนาดฝุ่นละอองในแต่ละช่วงขนาดในเทอมของ ล็อกการิทึม
(dlogDp)

Stage	dlogD _p	การทดลองที่ 1		การทดลองที่ 2		การทดลองที่ 3	
		dN(μg/m ³)	dN/dlogDp	dN(μg/m ³)	dN/dlogDp	dN(μg/m ³)	dN/dlogDp
1	0.0458	104.0900	2.2727x10 ³	126.8800	2.7703x10 ³	93.0800	2.0323x10 ³
2	0.1908	138.7900	727.4109	126.8800	664.9895	186.1500	975.6289
3	0.0913	86.7500	950.1643	90.6300	992.6616	37.2300	407.7766
4	0.1536	138.7900	903.5807	108.7500	708.0078	130.3100	848.3724
5	0.1963	69.4000	353.5405	126.8800	646.3576	93.0800	474.1722
6	0.2808	156.1400	556.0541	126.8800	451.8519	204.7700	729.2379
7	0.2285	294.93	1.2907x10 ³	308.1400	1.3485x10 ³	335.0700	1.4664x10 ³
Final	0.1794	2671.7600	1.4893x10 ⁴	2845.7500	1.5863x10 ⁴	2959.7900	1.6498x10 ⁴

ตาราง ข-5 อัตราส่วนของความเข้มข้นฝุ่นละออง (dN) จากอนุภาคฝุ่นดินกับความแตกต่างของ
ขนาดฝุ่นละอองในแต่ละช่วงขนาดในเทอมของ ล็อกการิทึม (dlogDp)

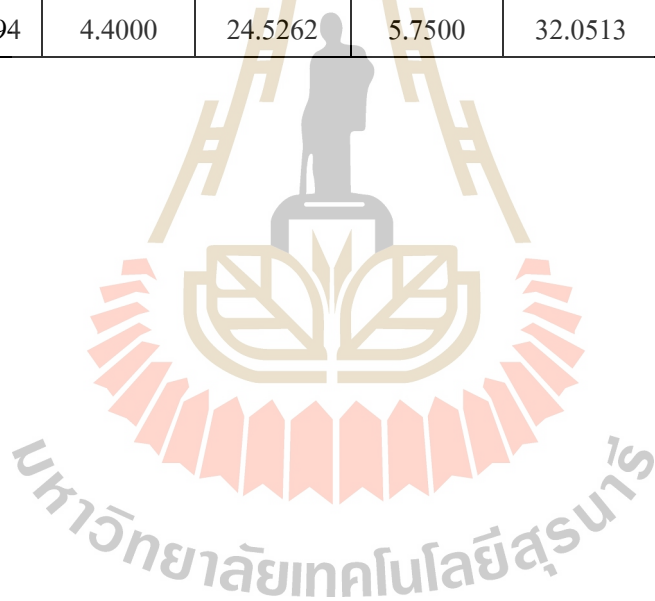
Stage	dlogD _p	การทดลองที่ 1		การทดลองที่ 2		การทดลองที่ 3	
		dN(μg/m ³)	dN/dlogDp	dN(μg/m ³)	dN/dlogDp	dN(μg/m ³)	dN/dlogDp
1	0.0458	1674.7800	3.6567x10 ⁴	1938.4000	4.2323x10 ⁴	2398.6500	5.2372x10 ⁴
2	0.1908	34.1800	179.1405	97.3600	510.2725	274.3800	1.438110 ³
3	0.0913	8.5400	93.5378	61.9600	678.6418	35.4000	387.7327
4	0.1536	17.0900	111.2630	17.7000	115.2344	17.7000	115.2344
5	0.1963	25.6300	130.5655	17.7000	90.1681	8.8500	45.0841
6	0.2808	76.9000	273.8604	194.7200	693.4473	159.3200	567.3789
7	0.2285	8.5400	37.3742	17.7000	77.4617	53.1100	232.4289
Final	0.1794	205.0800	1.1431x10 ³	256.6800	1.4308x10 ³	274.3800	1.5294x10 ³

ตาราง ข-6 อัตราส่วนของความเข้มข้นฝุ่นละออง (dN) จากบรรยากาศทั่วไปกับความแตกต่างของ
ขนาดฝุ่นละอองในแต่ละช่วงขนาดในเทอมของ ล็อกการิทึม (dlogDp)

Stage	dlogD _p	การทดลองที่ 1		การทดลองที่ 2		การทดลองที่ 3	
		dN(μg/m ³)	dN/dlogDp	dN(μg/m ³)	dN/dlogDp	dN(μg/m ³)	dN/dlogDp
1	0.0458	6.7825	148.0895	5.3435	116.6703	5.7681	125.9410
2	0.1908	1.6956	8.8868	2.9147	15.2762	2.1630	11.3365
3	0.0913	1.2112	13.2662	0.2429	2.6605	1.9227	21.0591
4	0.1536	1.4534	9.4622	1.7002	11.0690	1.6824	10.9531
5	0.1963	0.7267	3.7020	0.4858	2.4748	1.4420	7.3459
6	0.2808	1.4540	5.1781	2.6717	9.5146	3.3647	11.9826
7	0.2285	1.4534	6.3606	2.1860	9.5667	1.2017	5.2591
Final	0.1794	2.7000	15.0502	2.6717	14.8924	3.3646	18.7547

ตาราง ข-7 อัตราส่วนของความเข้มข้นฝุ่นละออง (dN) จากบริเวณริมถนนที่มีการจราจรกับความแตกต่างของขนาดฝุ่นละอองในแต่ละช่วงขนาดในเทอมของ ล็อกการิทึม (dlogDp)

Stage	dlogDp	การทดลองที่ 1		การทดลองที่ 2		การทดลองที่ 3	
		dN($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	dN/dlogDp	dN($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	dN/dlogDp	dN($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	dN/dlogDp
1	0.0458	29.1750	637.0087	32.4090	707.6201	35.9490	784.9127
2	0.1908	7.1561	37.5058	5.8000	30.3983	3.5949	18.8412
3	0.0913	2.7523	30.1457	1.5682	17.1763	1.0271	11.2497
4	0.1536	2.2019	14.3353	1.6000	10.4167	1.0271	6.6868
5	0.1963	1.1009	5.6083	0.5227	2.6628	1.0271	5.2323
6	0.2808	2.7523	9.8016	3.6591	13.0310	6.1627	21.9469
7	0.2285	1.1009	4.8179	1.5682	6.8630	2.5678	11.2376
Final	0.1794	4.4000	24.5262	5.7500	32.0513	6.1627	34.3517



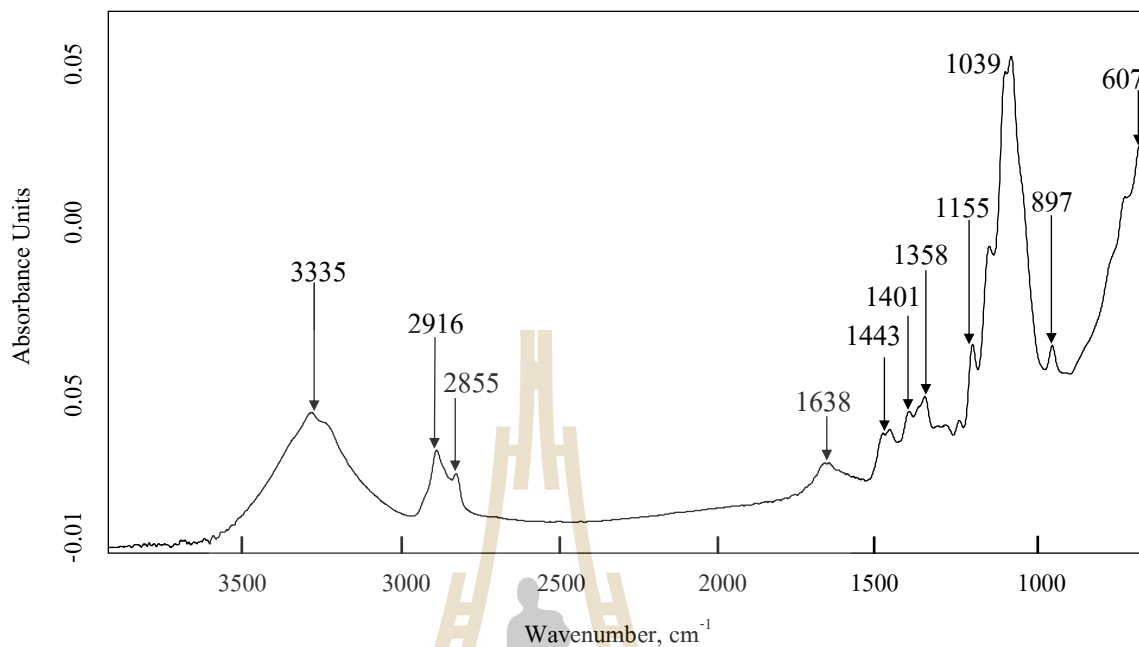


ภาคผนวก ค

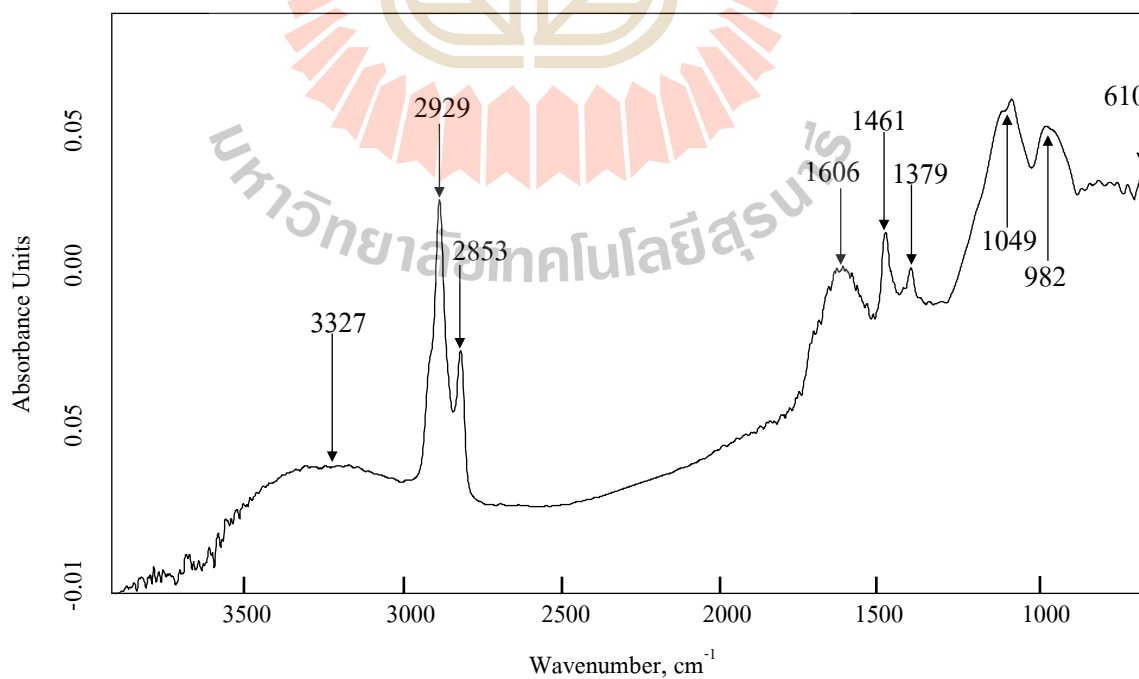
สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟูรีเยอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

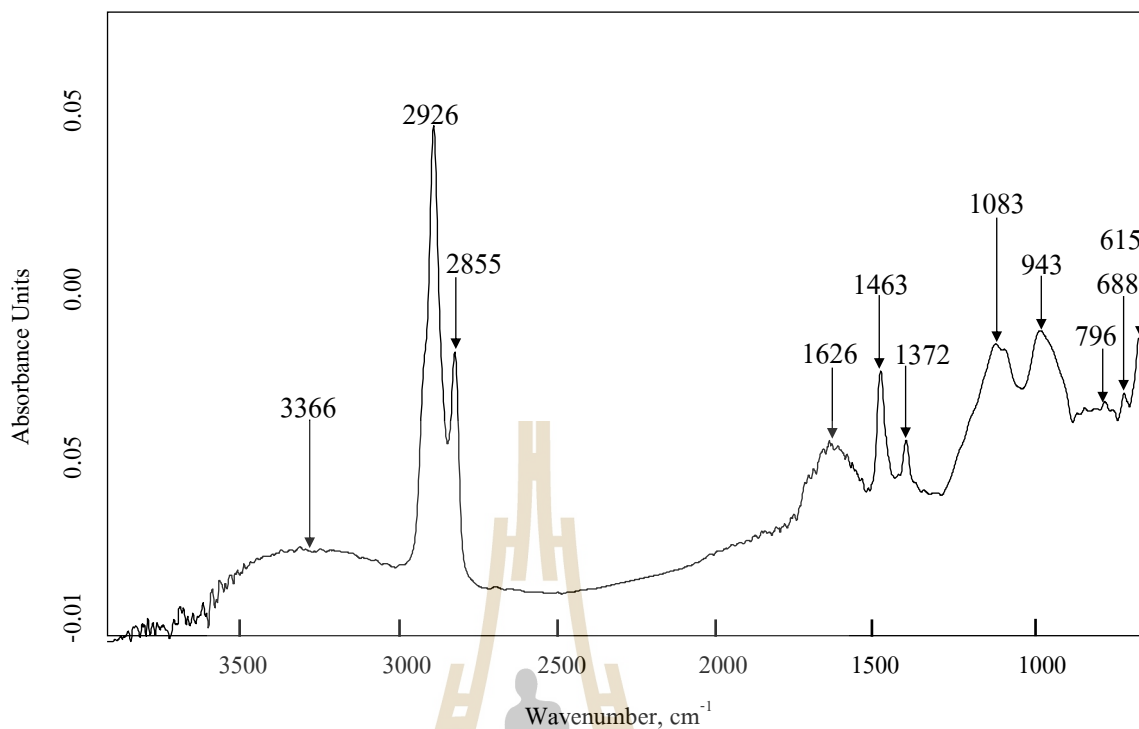
ค. สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละอง



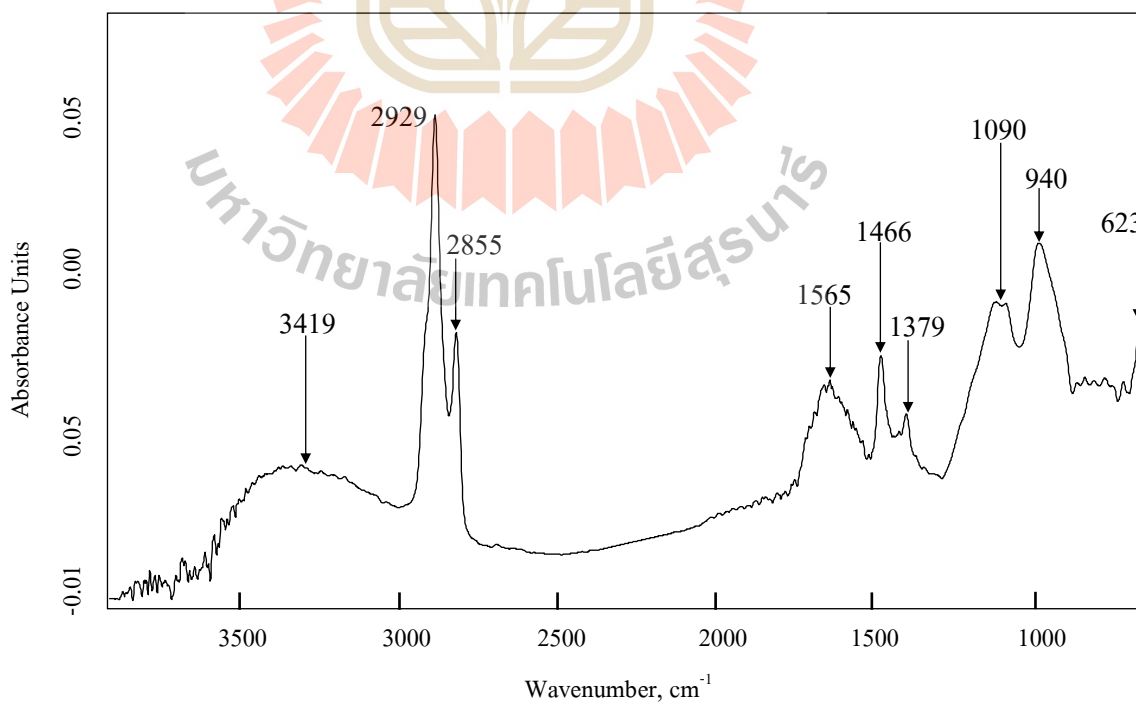
ภาพ ค-1 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันเบนซิน
ขนาดฟู่นละอง 9.00-10.00 ไมโครเมตร (stage 1)



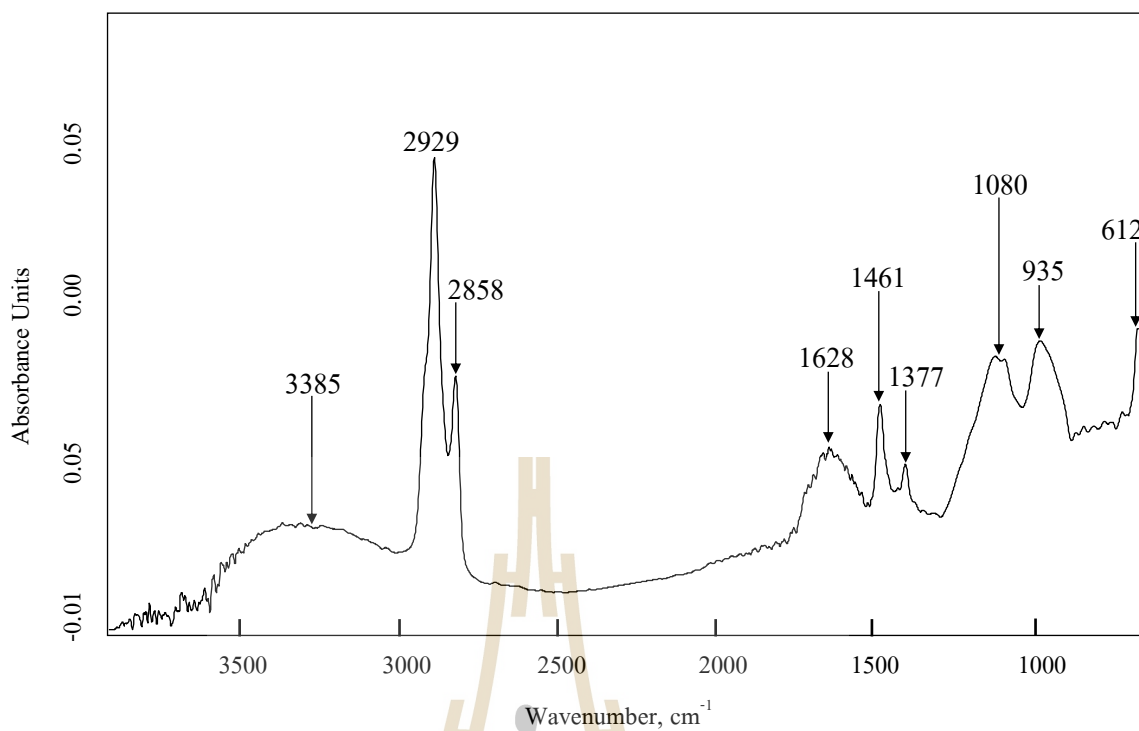
ภาพ ค-2 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันเบนซิน
ขนาดฟู่นละอง 5.80-9.00 ไมโครเมตร (stage 2)



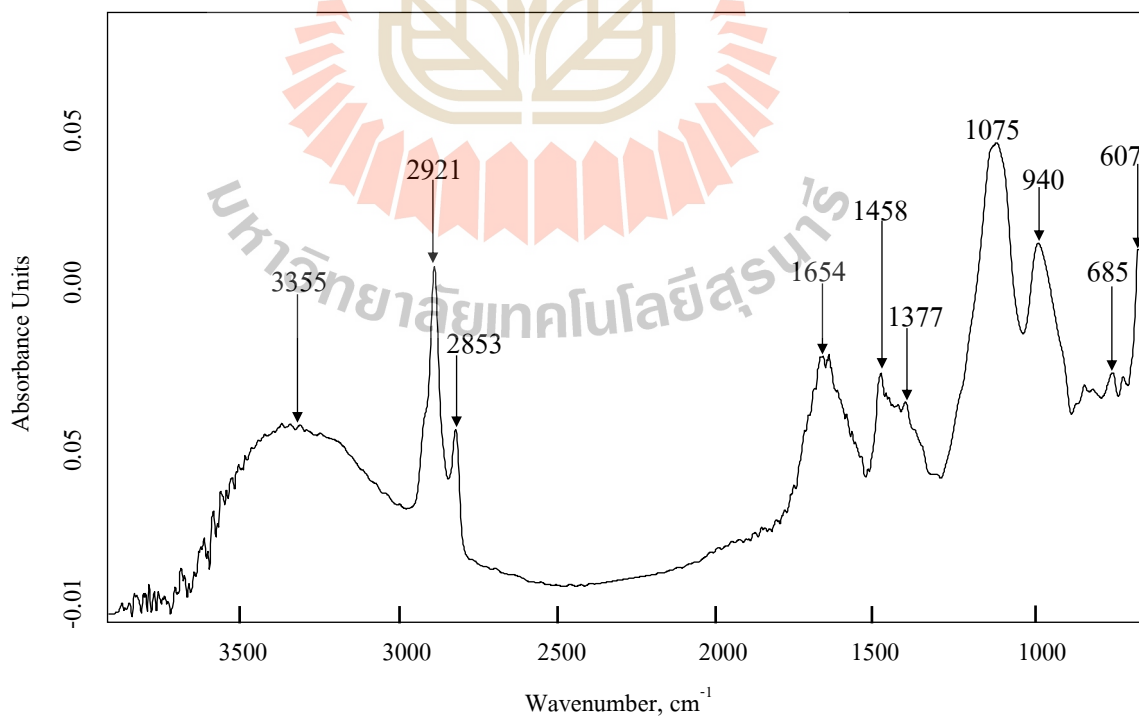
ภาพ ค-3 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันเบนซิน
ขนาดฝุ่นละออง 4.70-5.80 ไมโครเมตร (stage 3)



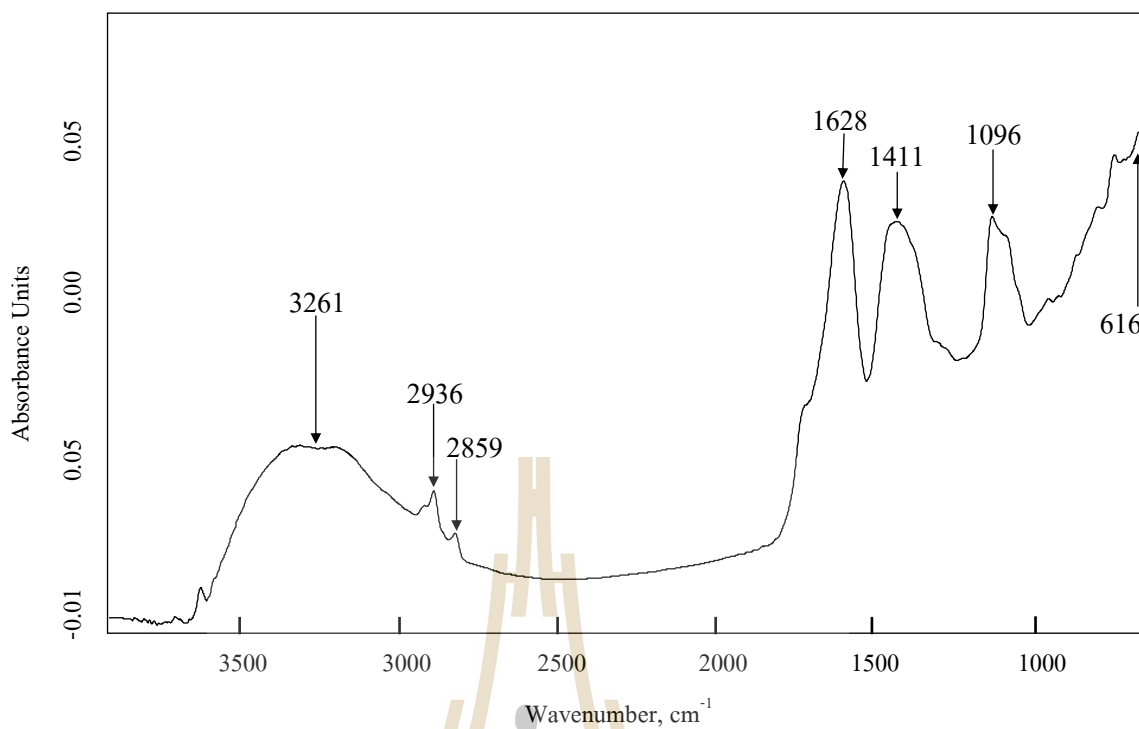
ภาพ ค-4 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันเบนซิน
ขนาดฝุ่นละออง 3.30-4.70 ไมโครเมตร (stage 4)



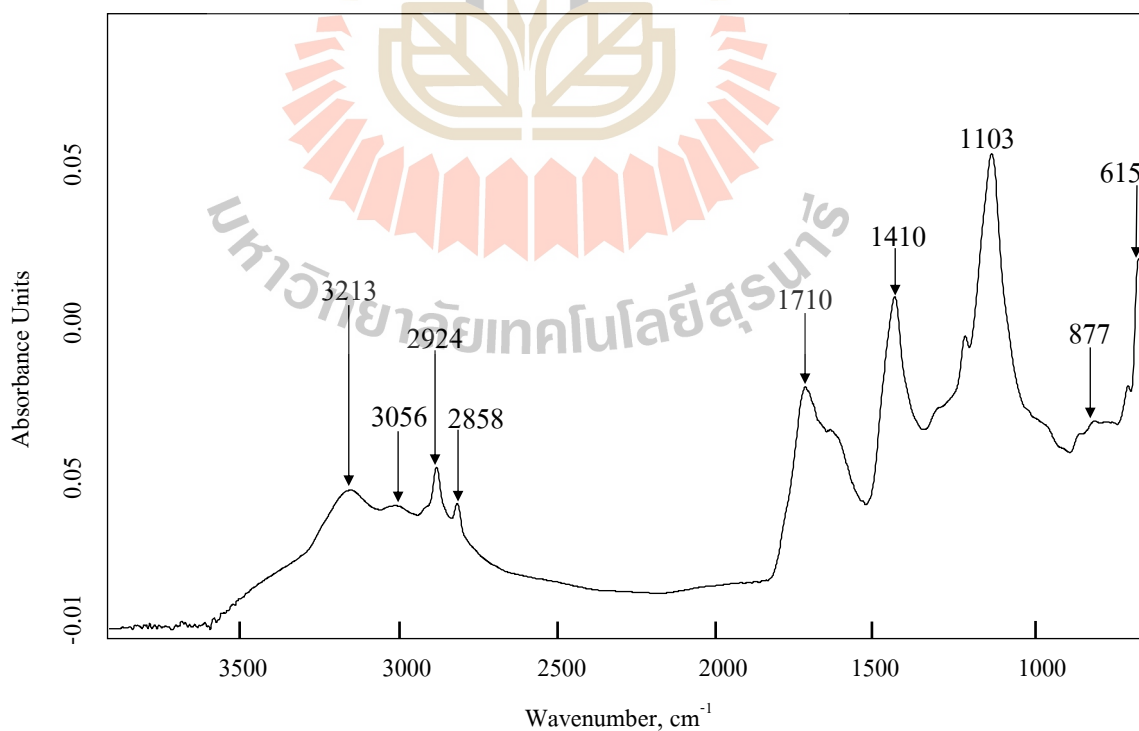
ภาพ ค-5 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันเบนซิน
ขนาดฟู่นละออง 2.10-3.30 ไมโครเมตร (stage 5)



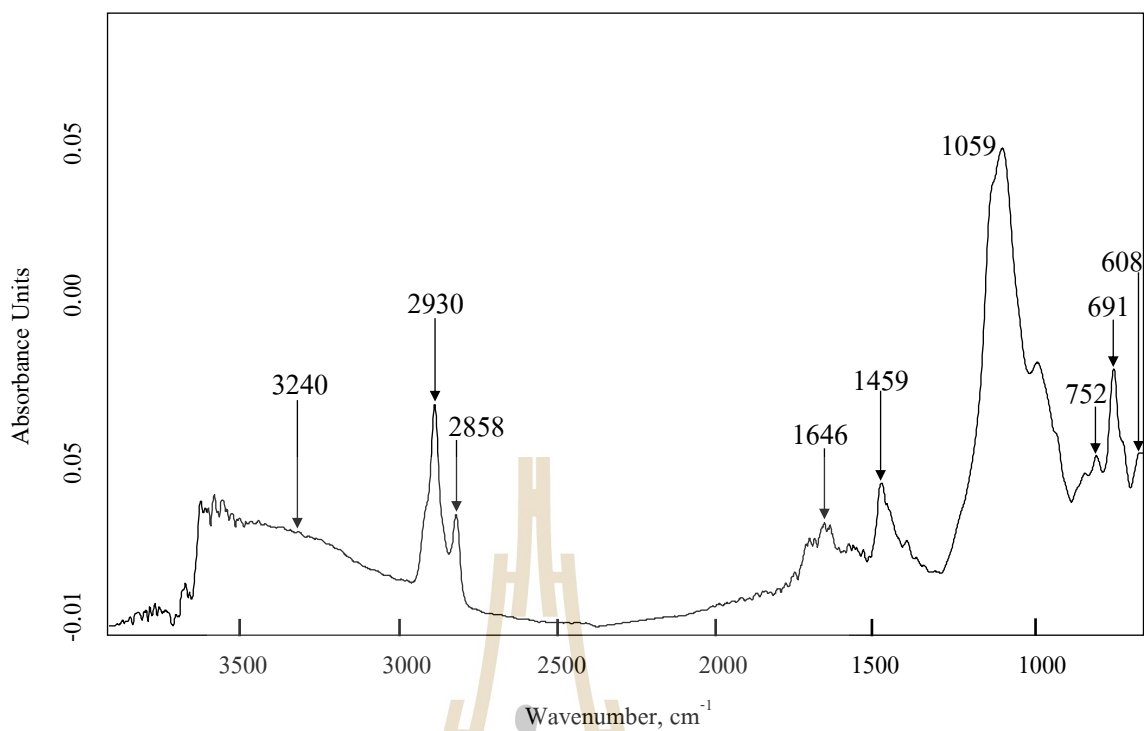
ภาพ ค-6 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันเบนซิน
ขนาดฟู่นละออง 1.10-2.10 ไมโครเมตร (stage 6)



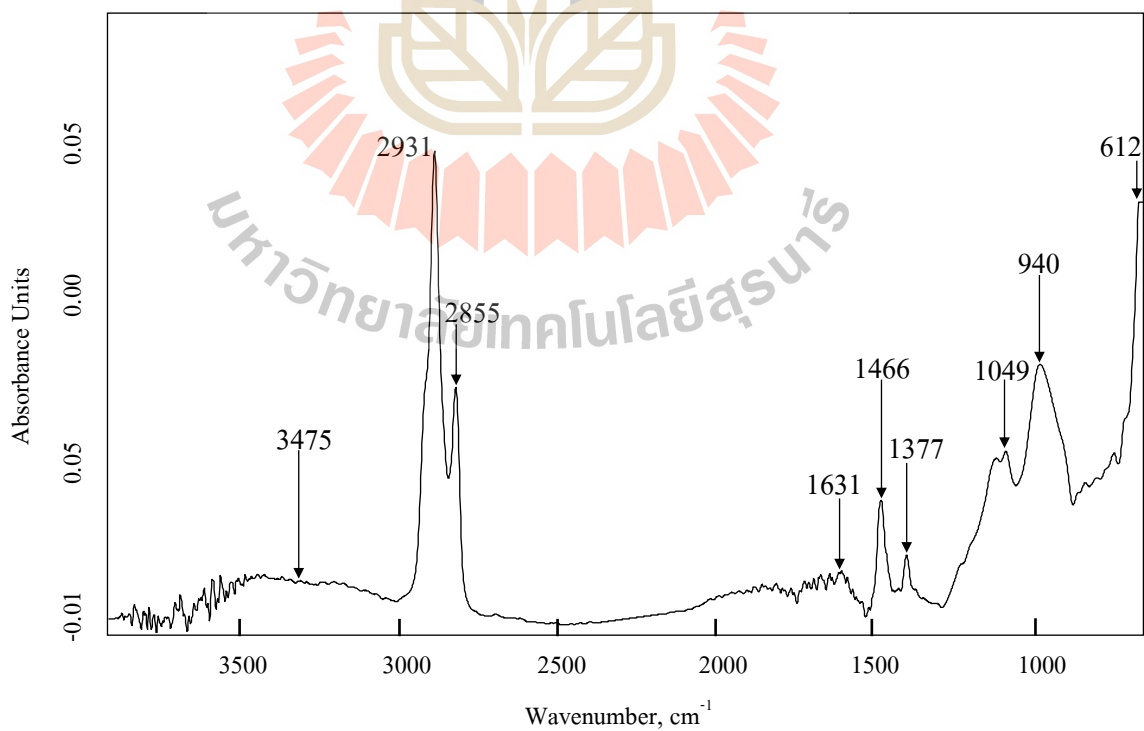
ภาพ ค-7 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันเบนซิน
ขนาดฝุ่นละออง 0.65-1.10 ไมโครเมตร (stage 7)



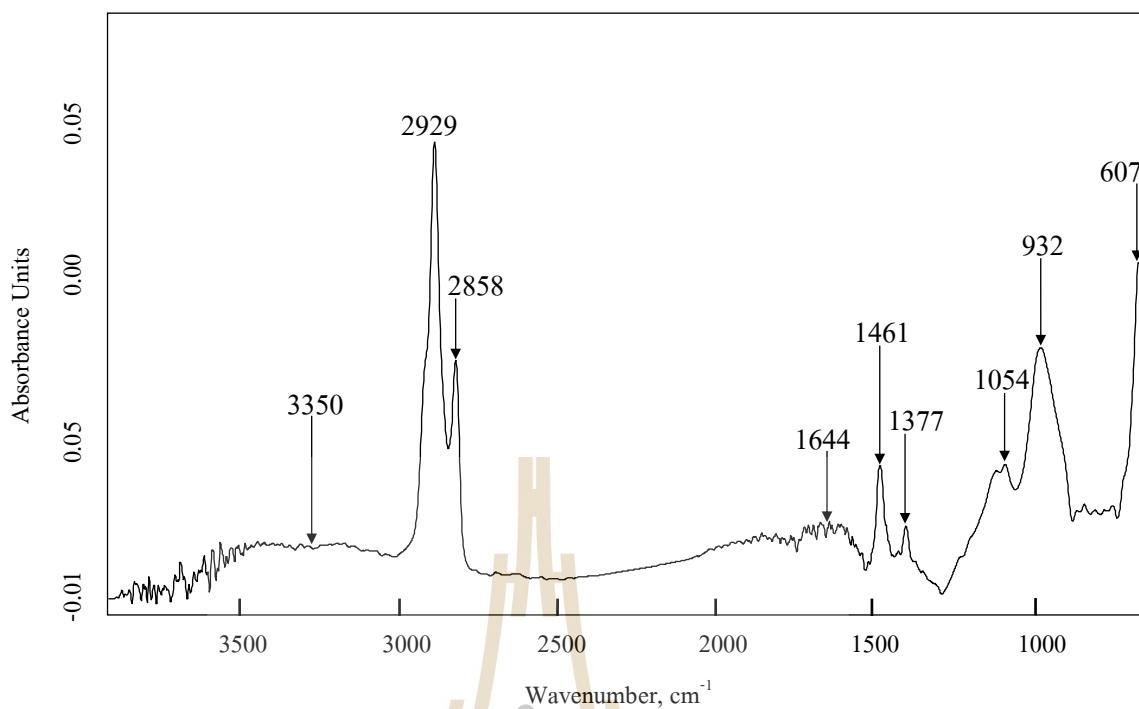
ภาพ ค-8 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันเบนซิน
ขนาดฝุ่นละออง 0.43-0.65 ไมโครเมตร (stage 8)



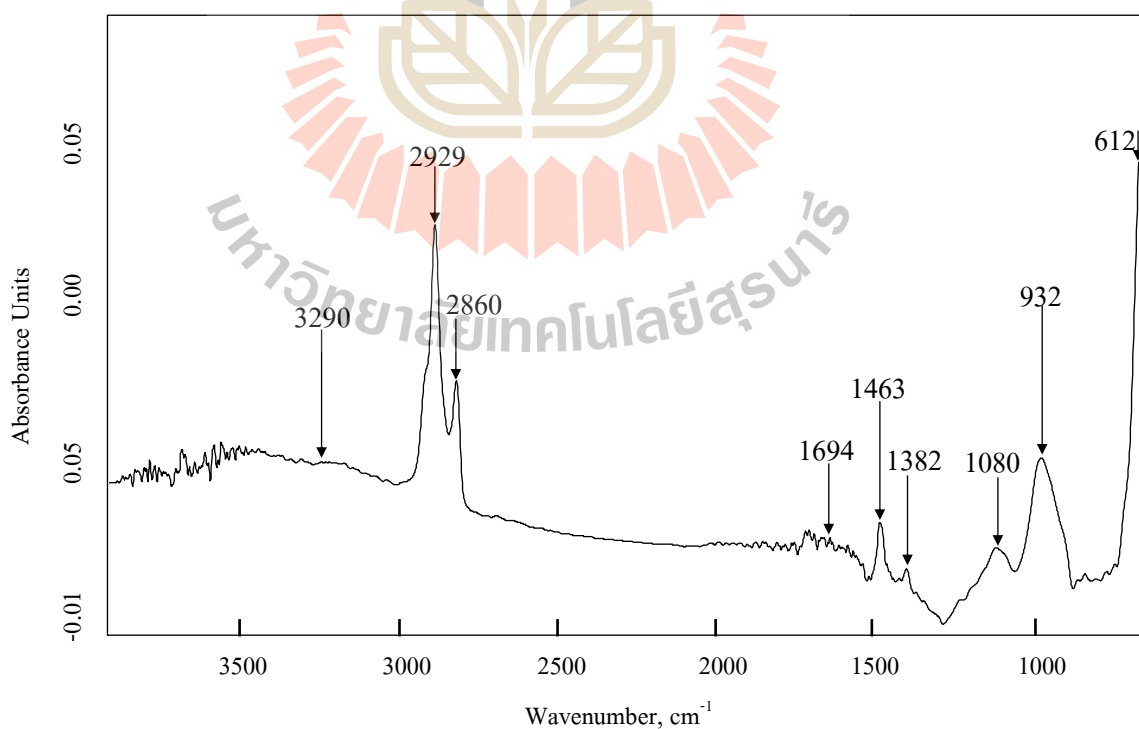
ภาพ ค-9 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซล
ขนาดฝุ่นละออง 9.00-10.00 ไมโครเมตร (stage 1)



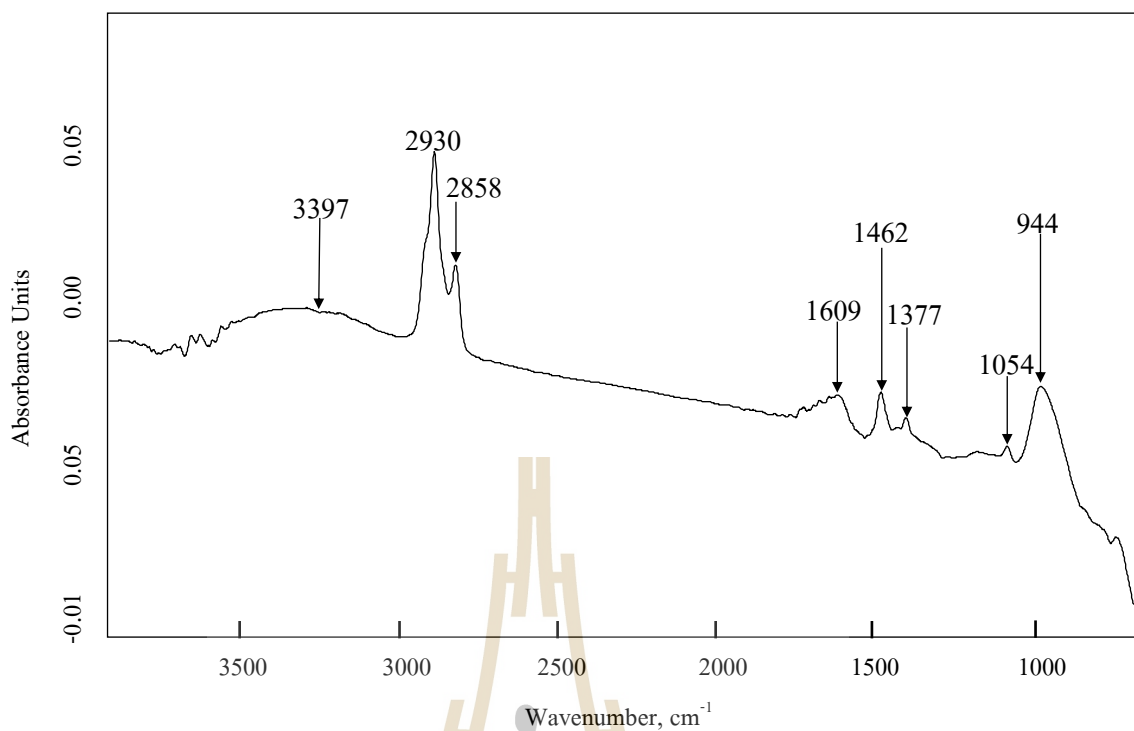
ภาพ ค-10 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซล
ขนาดฝุ่นละออง 5.80-9.00 ไมโครเมตร (stage 2)



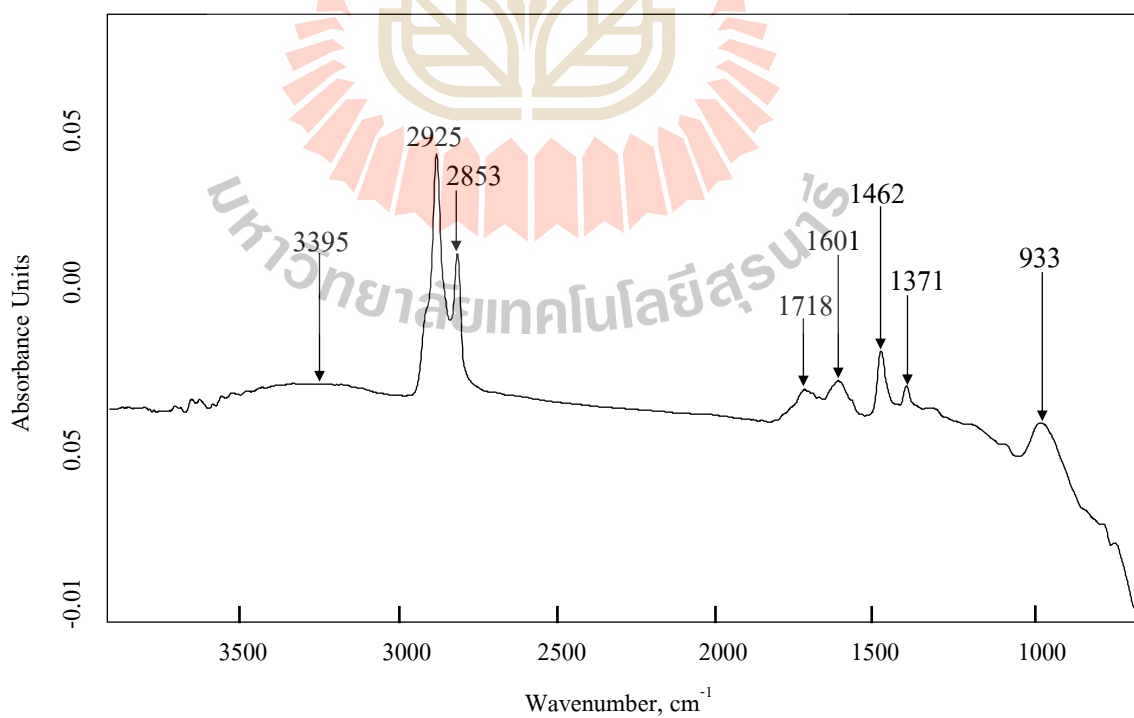
ภาพ ค-11 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซล
ขนาดฝุ่นละออง 4.70-5.80 ไมโครเมตร (stage 3)



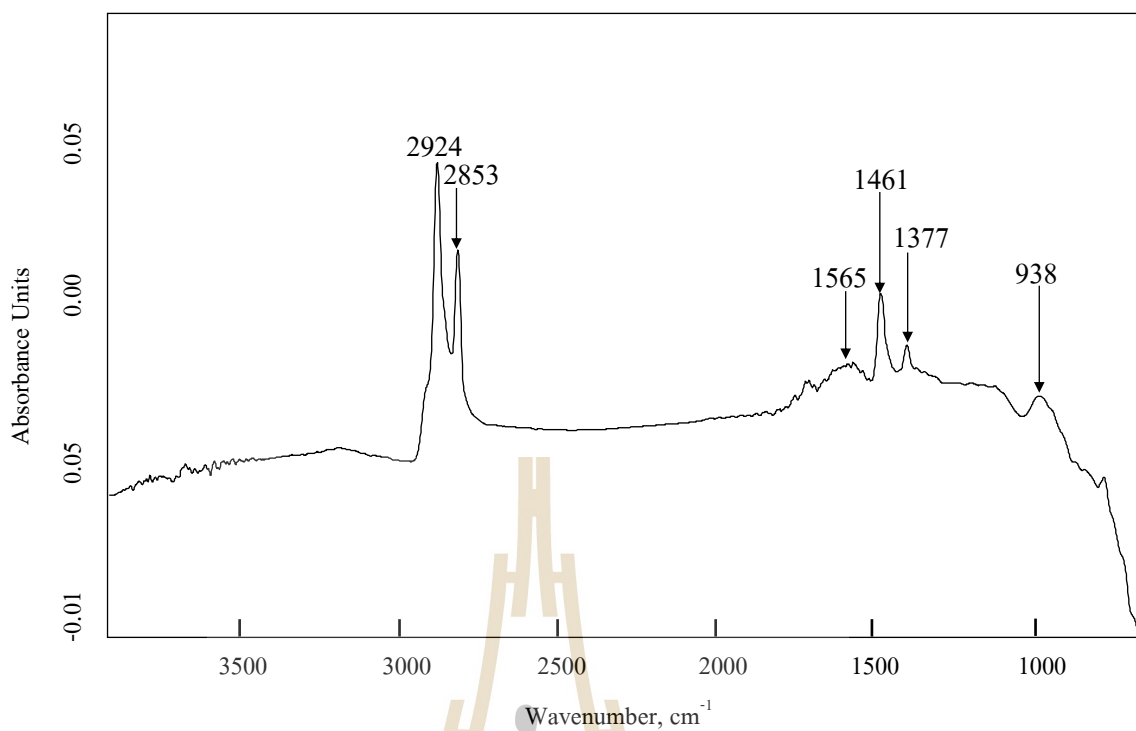
ภาพ ค-12 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซล
ขนาดฝุ่นละออง 3.30-4.70 ไมโครเมตร (stage 4)



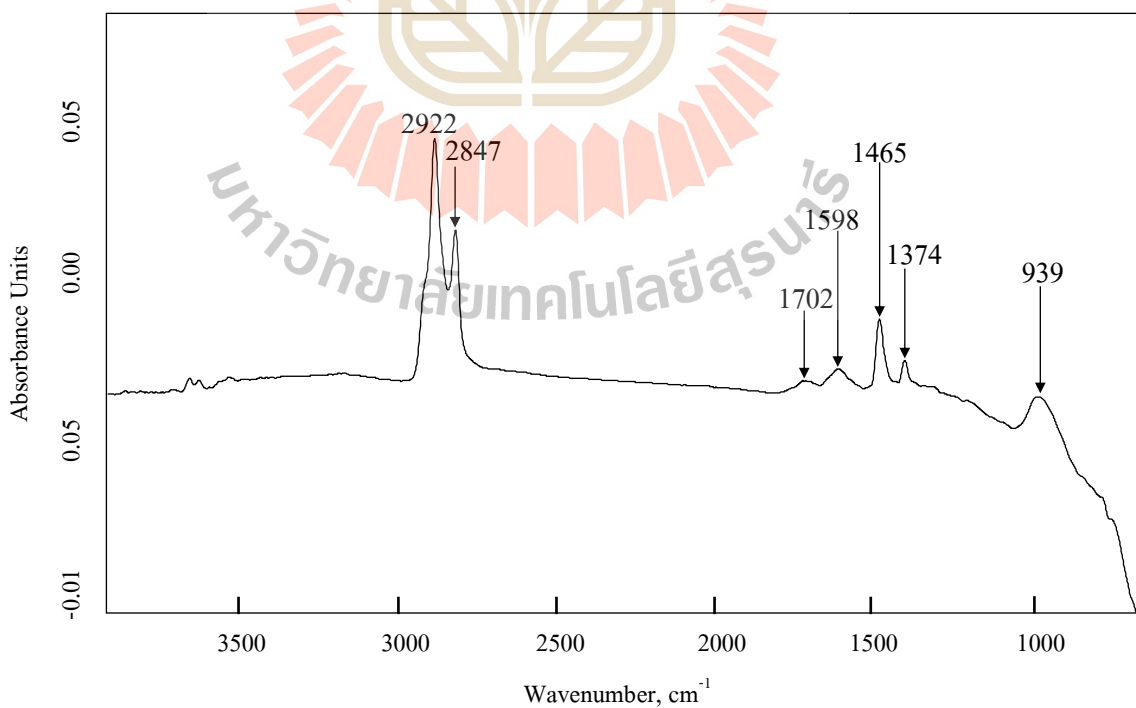
ภาพ ค-13 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟูรีเยอร์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซล
ขนาดฝุ่นละออง 2.10-3.30 ไมโครเมตร (stage 5)



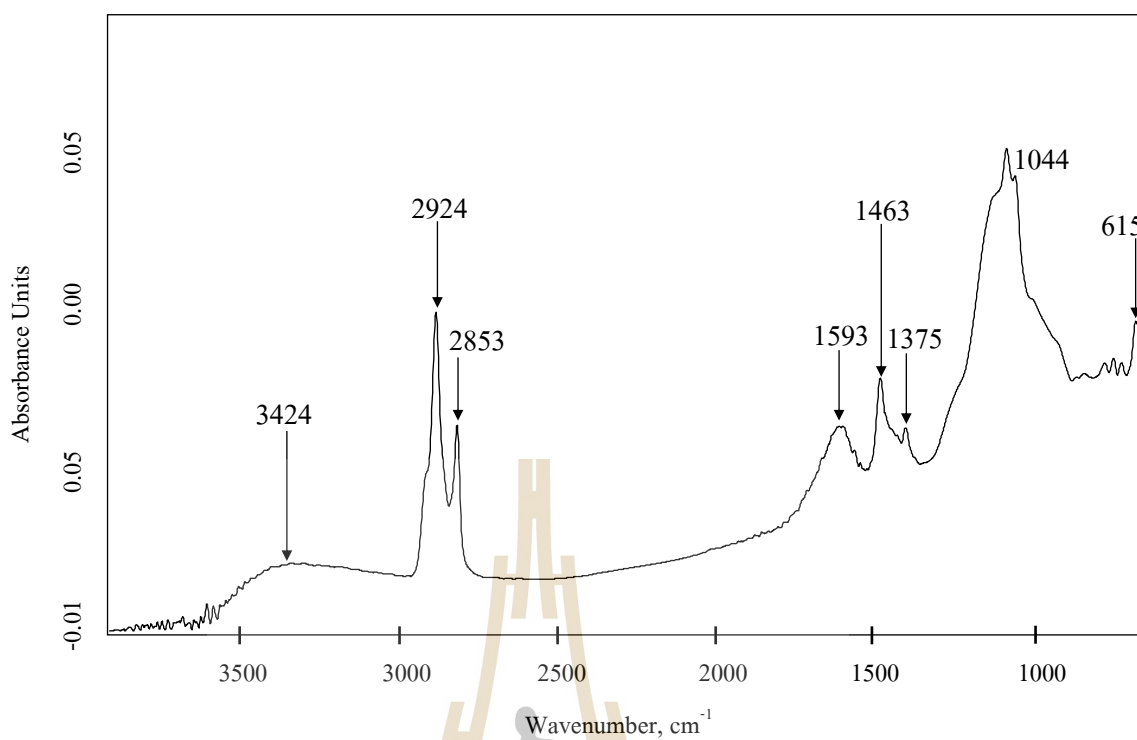
ภาพ ค-14 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟูรีเยอร์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซล
ขนาดฝุ่นละออง 1.10-2.10 ไมโครเมตร (stage 6)



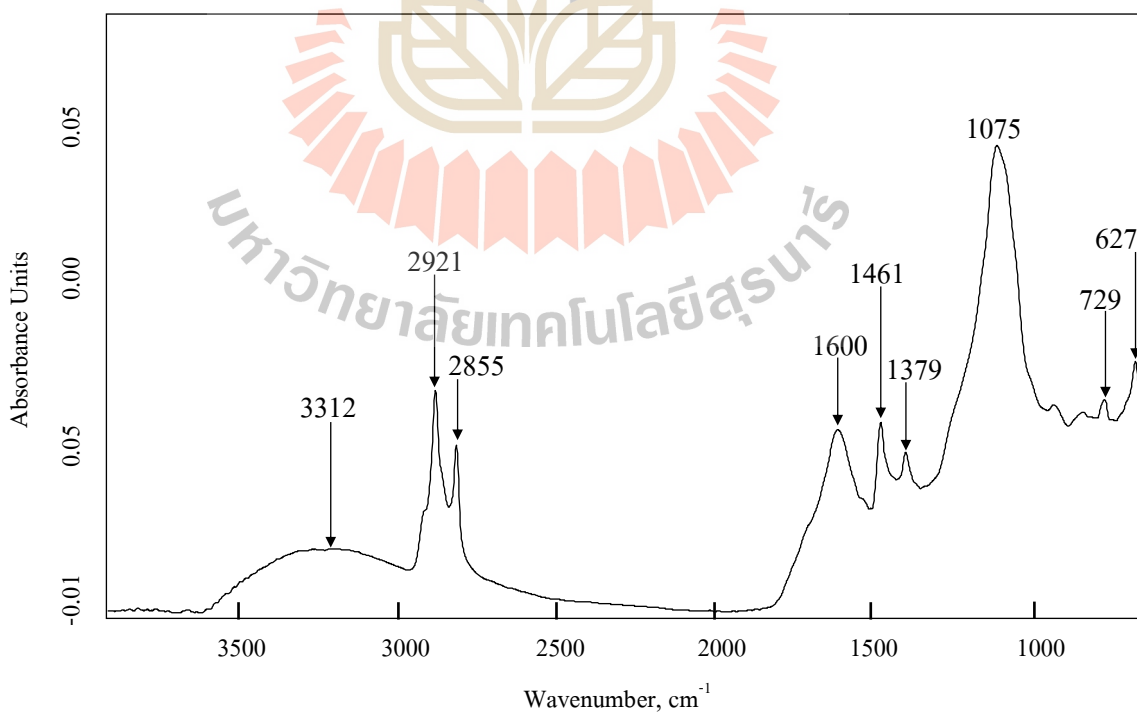
ภาพ ค-15 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซล
ขนาดฟู่นละออง 0.65-1.10 ไมโครเมตร (stage 7)



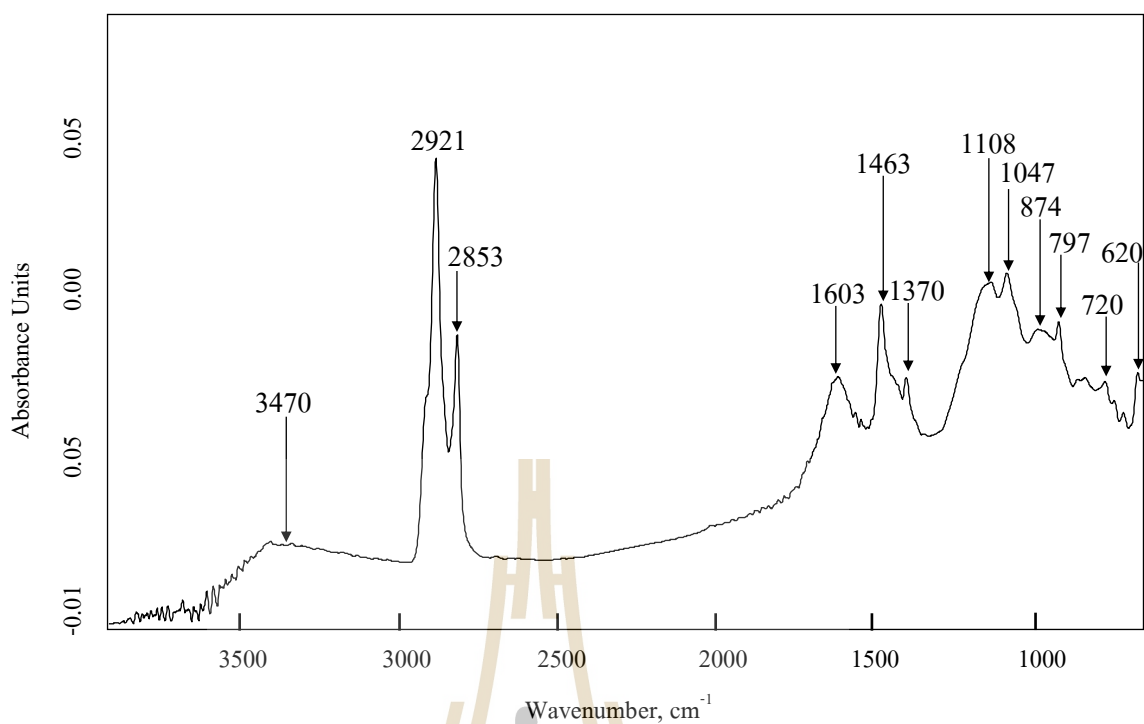
ภาพ ค-16 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซล
ขนาดฟู่นละออง 0.43-0.65 ไมโครเมตร (stage 8)



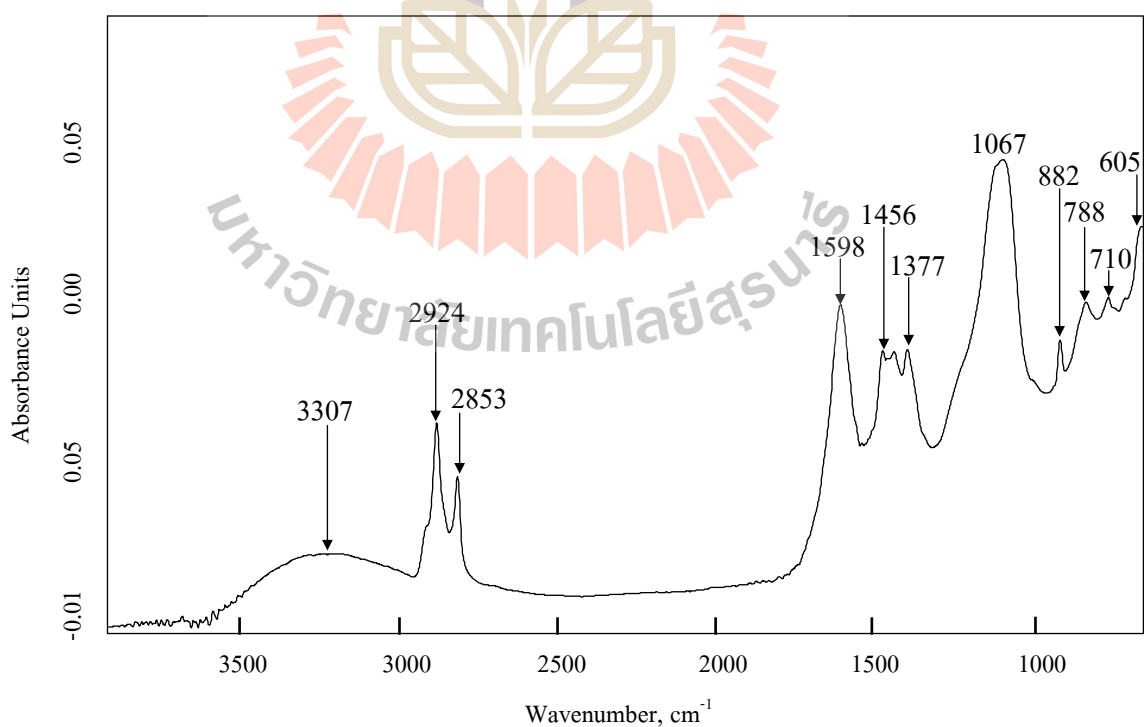
ภาพ ค-17 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร
ขนาดฟู่นละออง 9.00-10.00 ไมโครเมตร (stage 1)



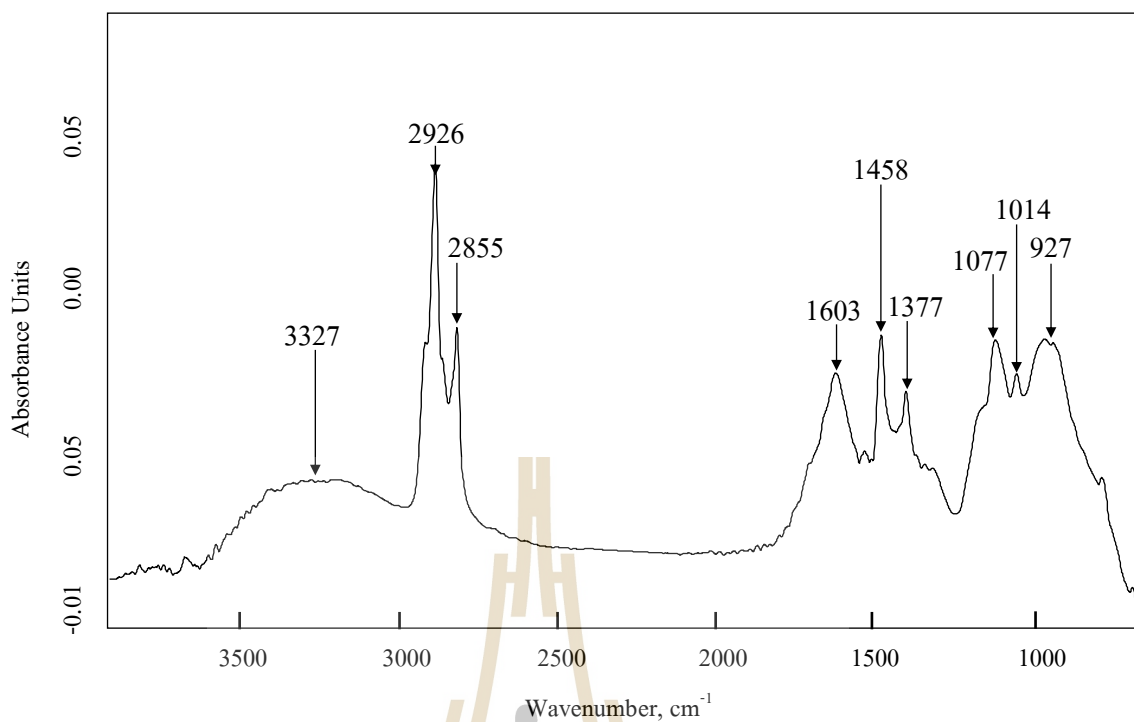
ภาพ ค-18 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร
ขนาดฟู่นละออง 5.80-9.00 ไมโครเมตร (stage 2)



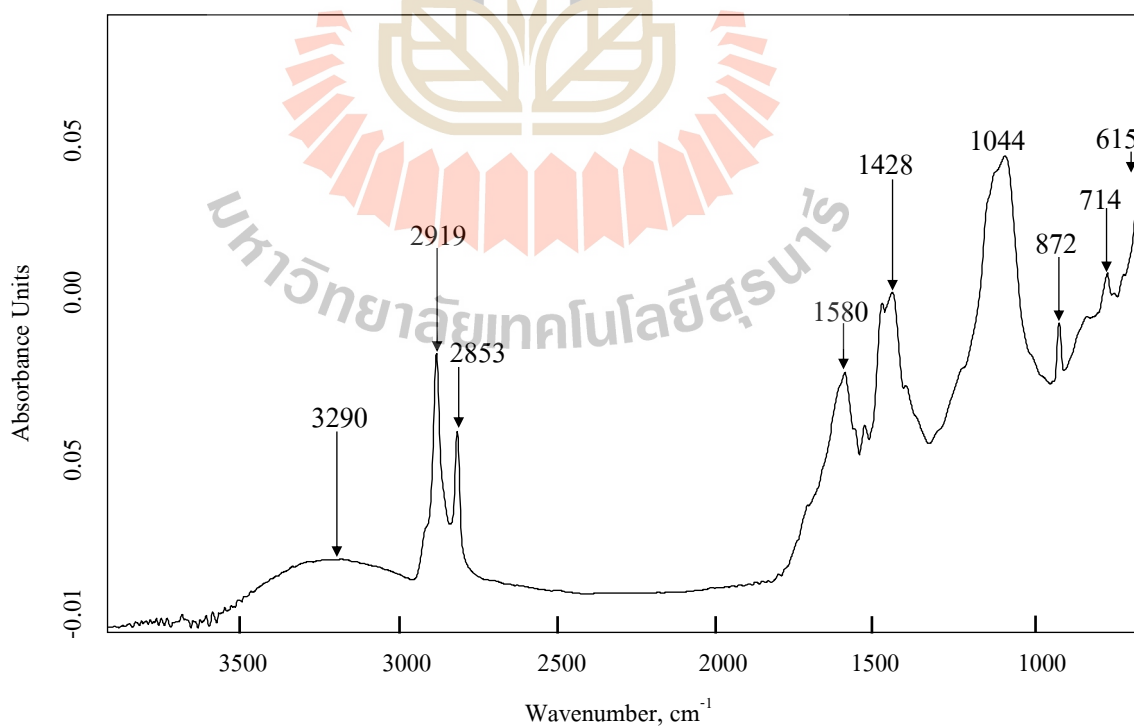
ภาพ ค-19 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟูรีเยอร์แปลงจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร
ขนาดฟูรีเยอร์แปลง 4.70-5.80 ไมโครเมตร (stage 3)



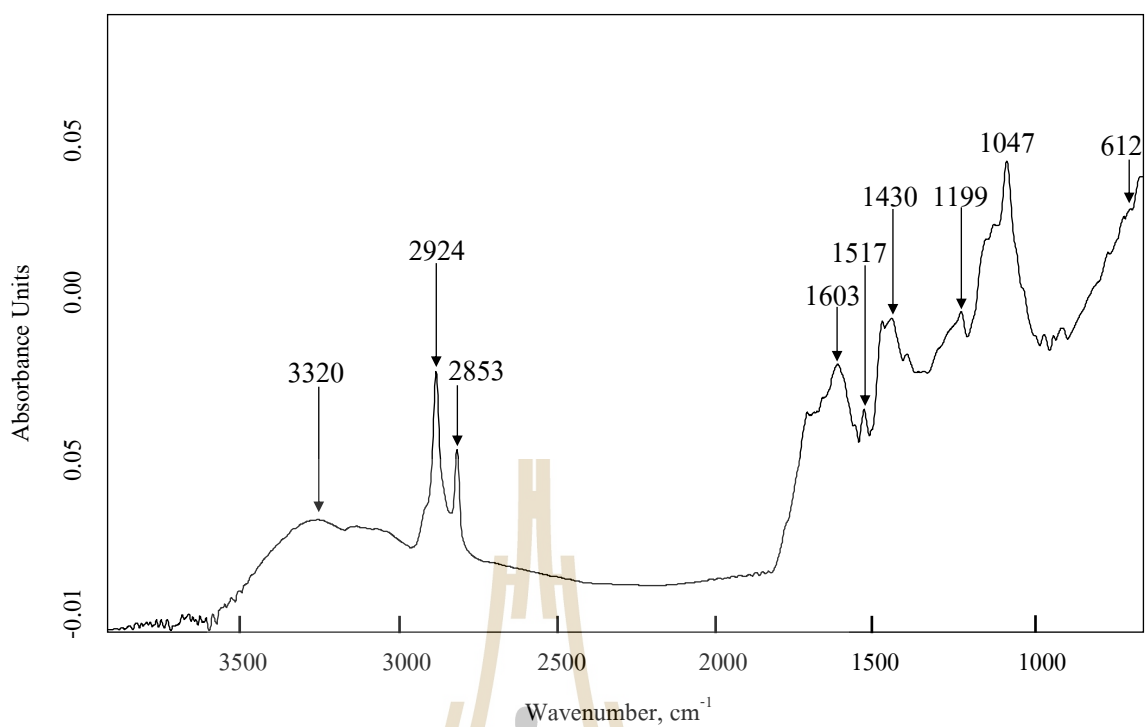
ภาพ ค-20 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟูรีเยอร์แปลงจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร
ขนาดฟูรีเยอร์แปลง 3.30-4.70 ไมโครเมตร (stage 4)



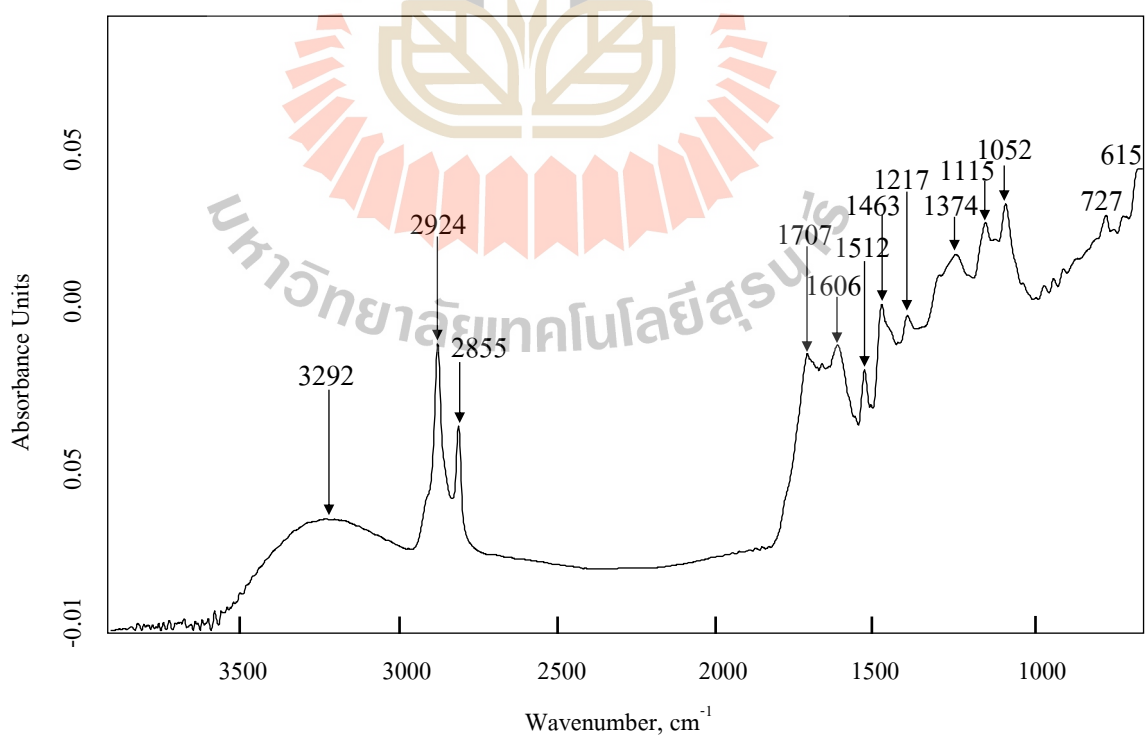
ภาพ ค-21 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร
ขนาดฟู่นละอง 2.10-3.30 ไมโครเมตร (stage 5)



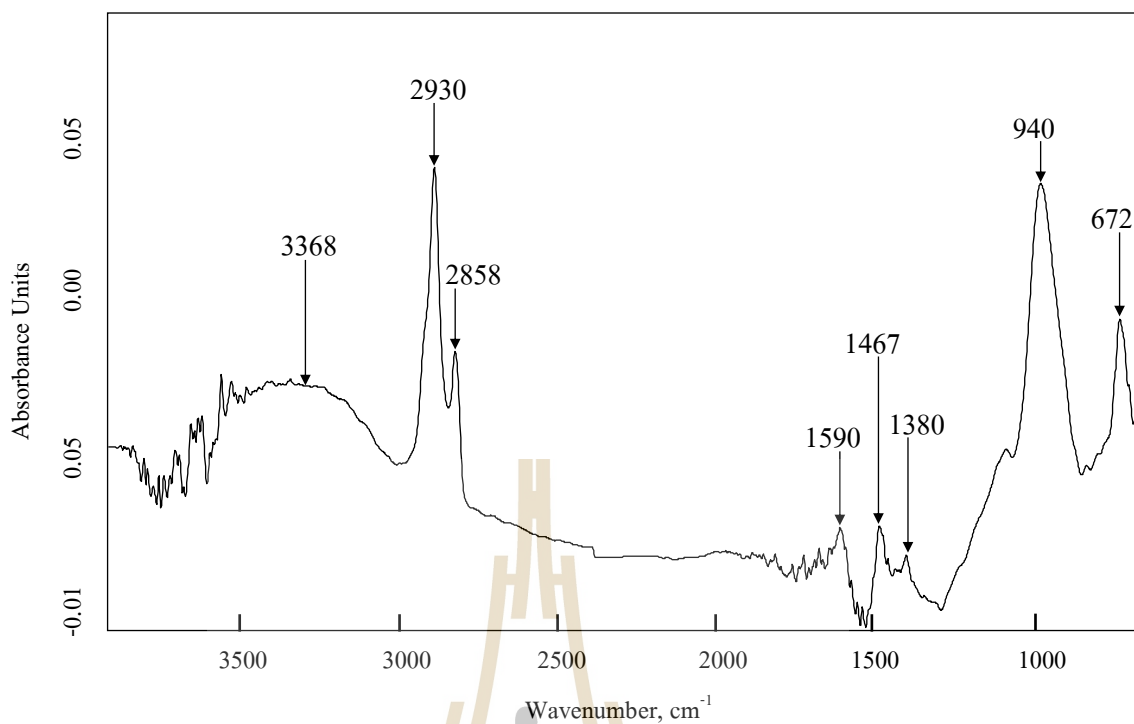
ภาพ ค-22 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร
ขนาดฟู่นละอง 1.10-2.10 ไมโครเมตร (stage 6)



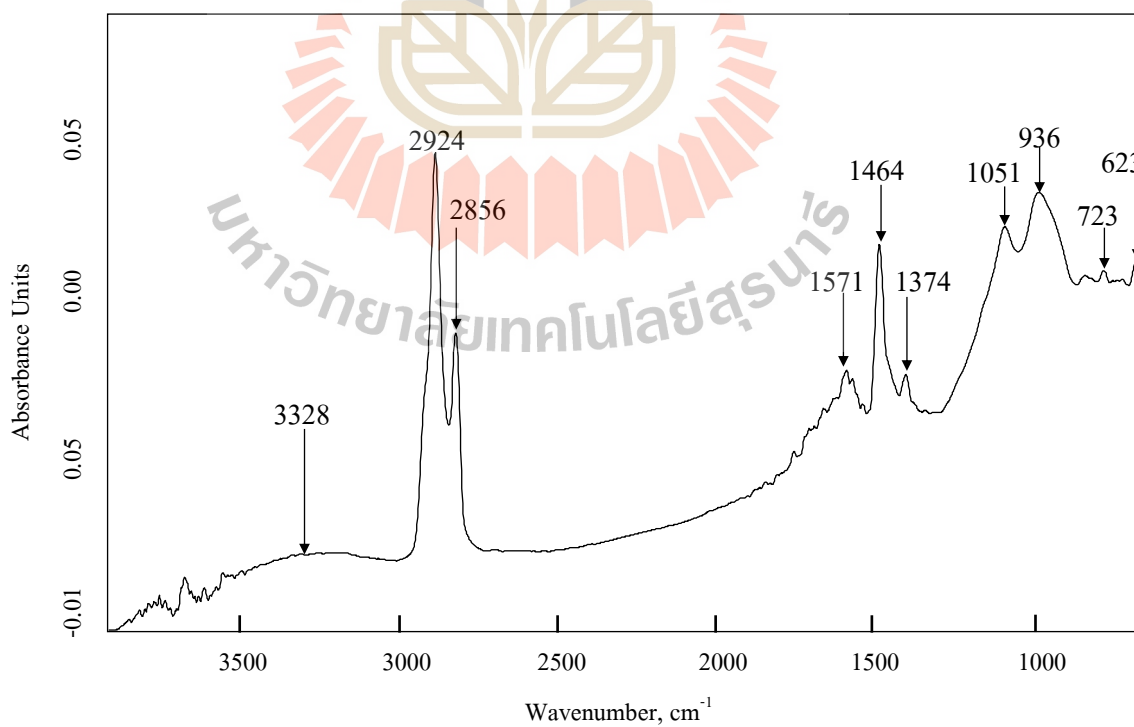
ภาพ ค-23 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร
ขนาดฟู่นละออง 0.65-1.10 ไมโครเมตร (stage 7)



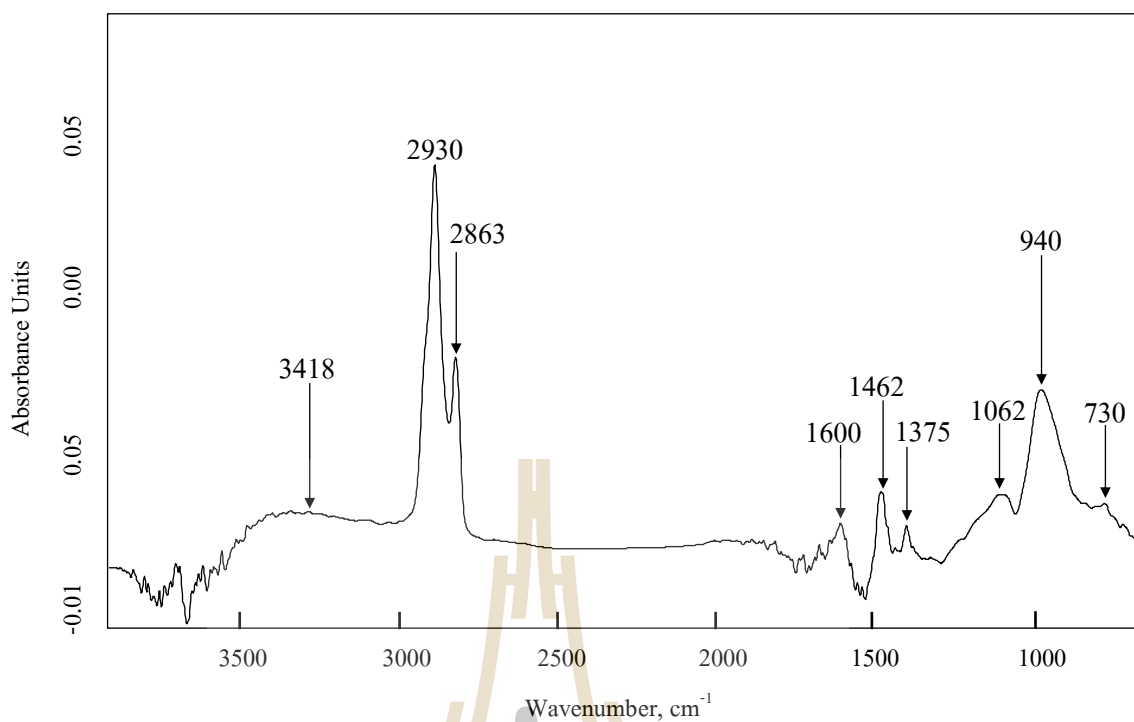
ภาพ ค-24 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละอองจากการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร
ขนาดฟู่นละออง 0.43-0.65 ไมโครเมตร (stage 8)



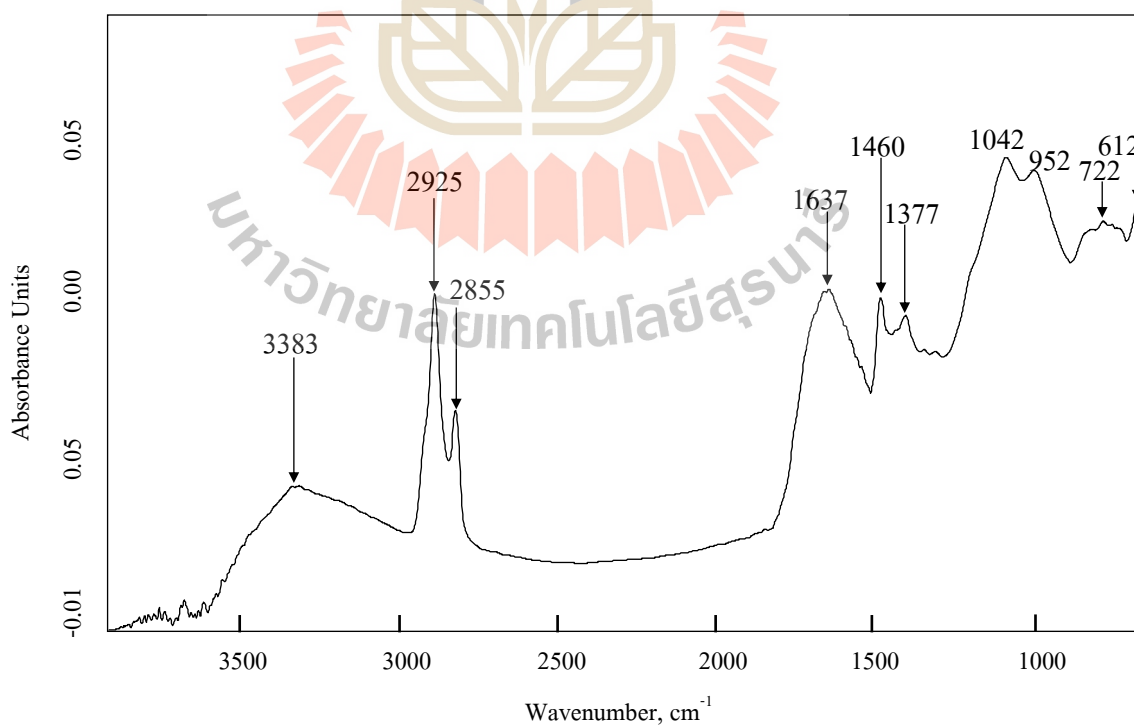
ภาพ ค-25 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง
ขนาดฝุ่นละออง 9.00-10.00 ไมโครเมตร (stage 1)



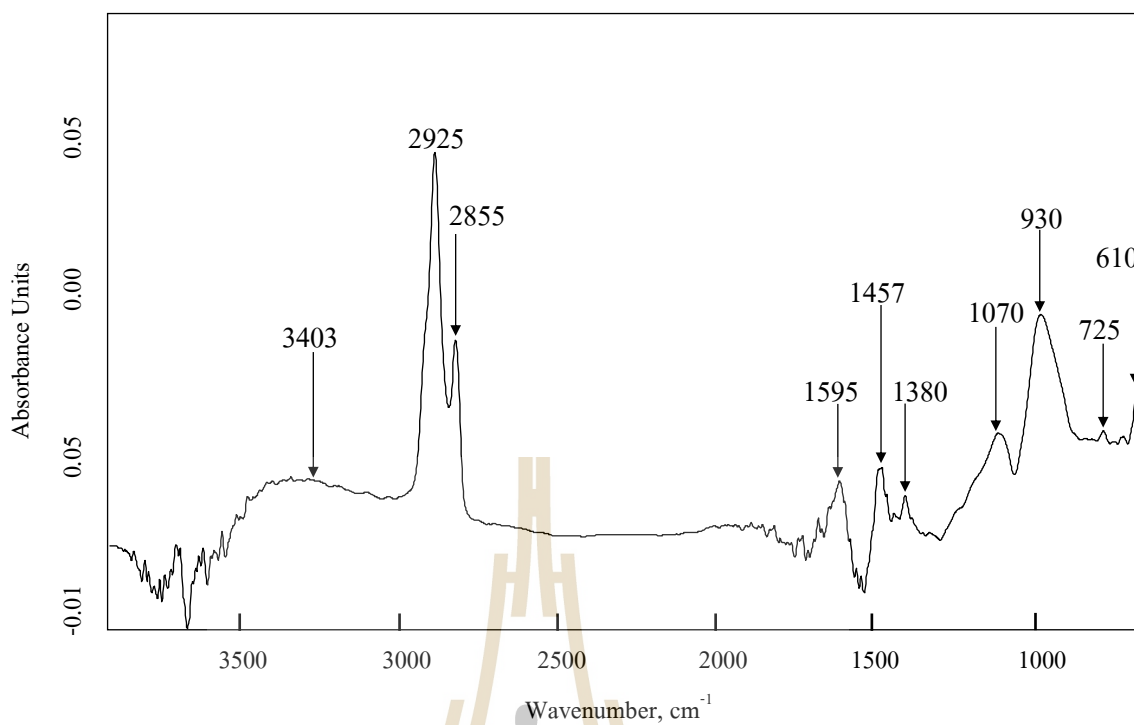
ภาพ ค-26 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง
ขนาดฝุ่นละออง 5.80-9.00 ไมโครเมตร (stage 2)



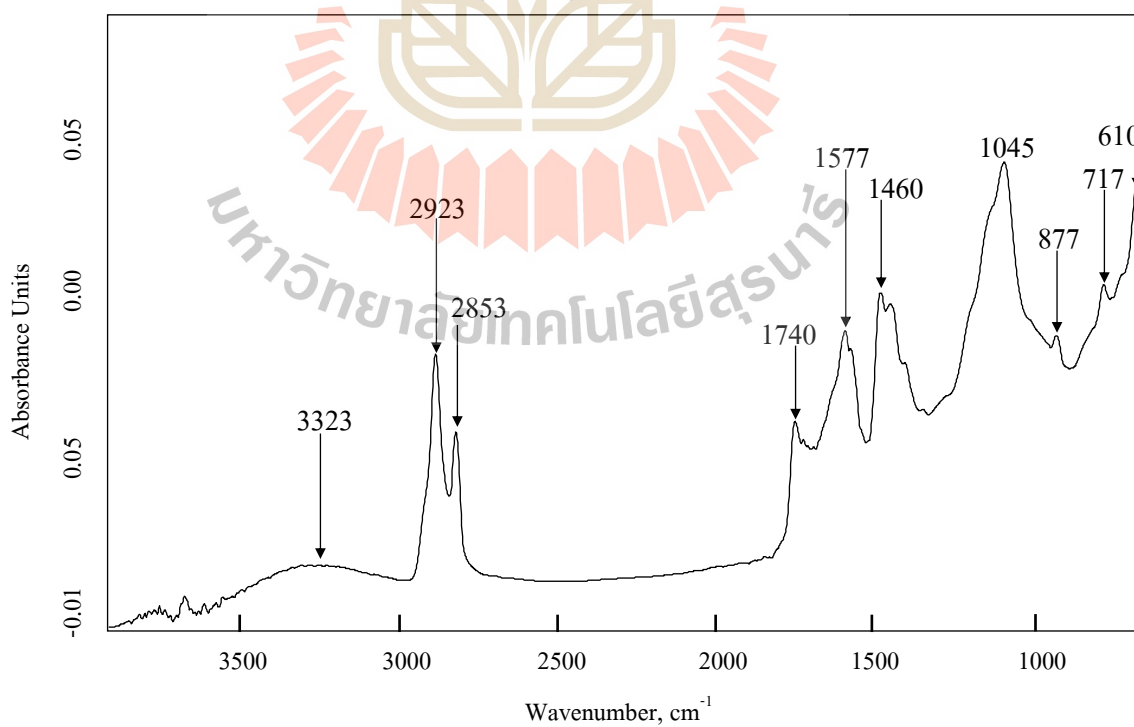
ภาพ ค-27 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละองจากการเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง
ขนาดฟู่นละอง 4.70-5.80 ไมโครเมตร (stage 3)



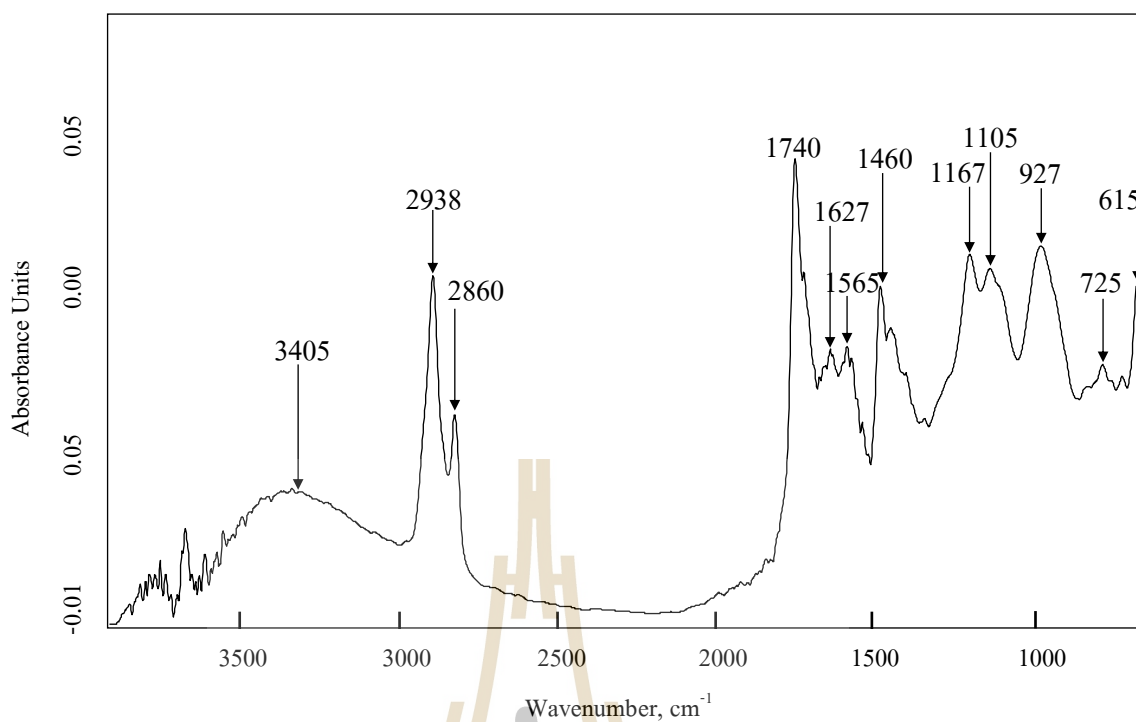
ภาพ ค-28 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละองจากการเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง
ขนาดฟู่นละอง 3.30-4.70 ไมโครเมตร (stage 4)



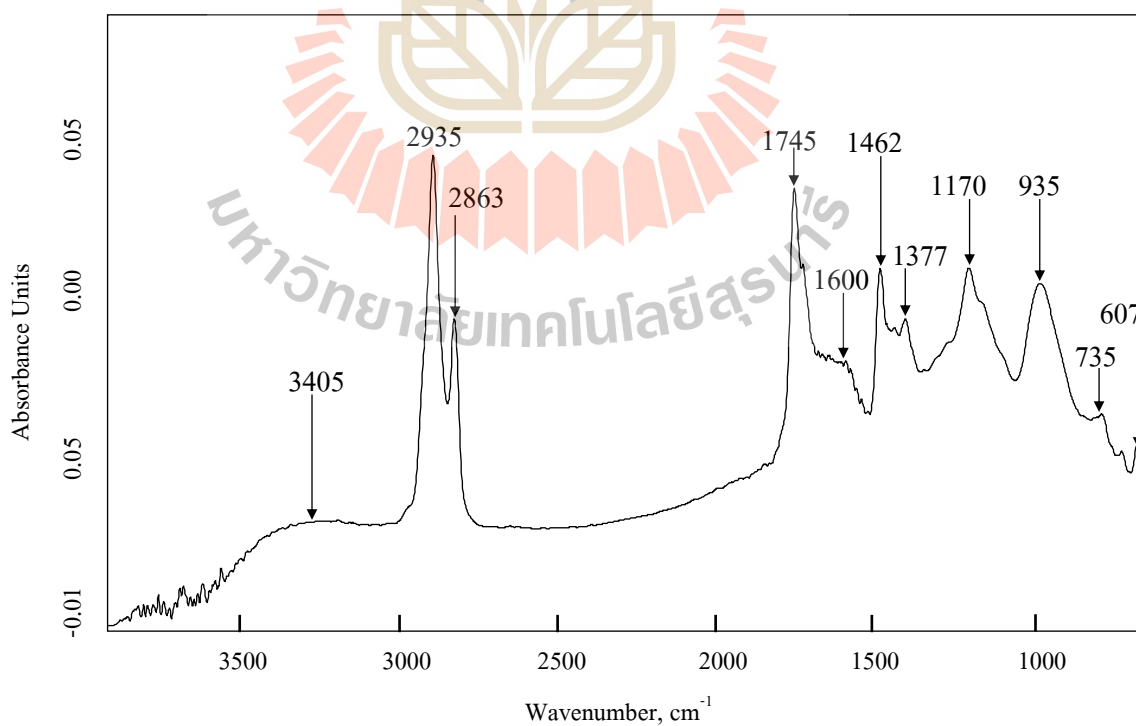
ภาพ ค-29 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละองจากการเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง
ขนาดฟู่นละอง 2.10-3.30 ไมโครเมตร (stage 5)



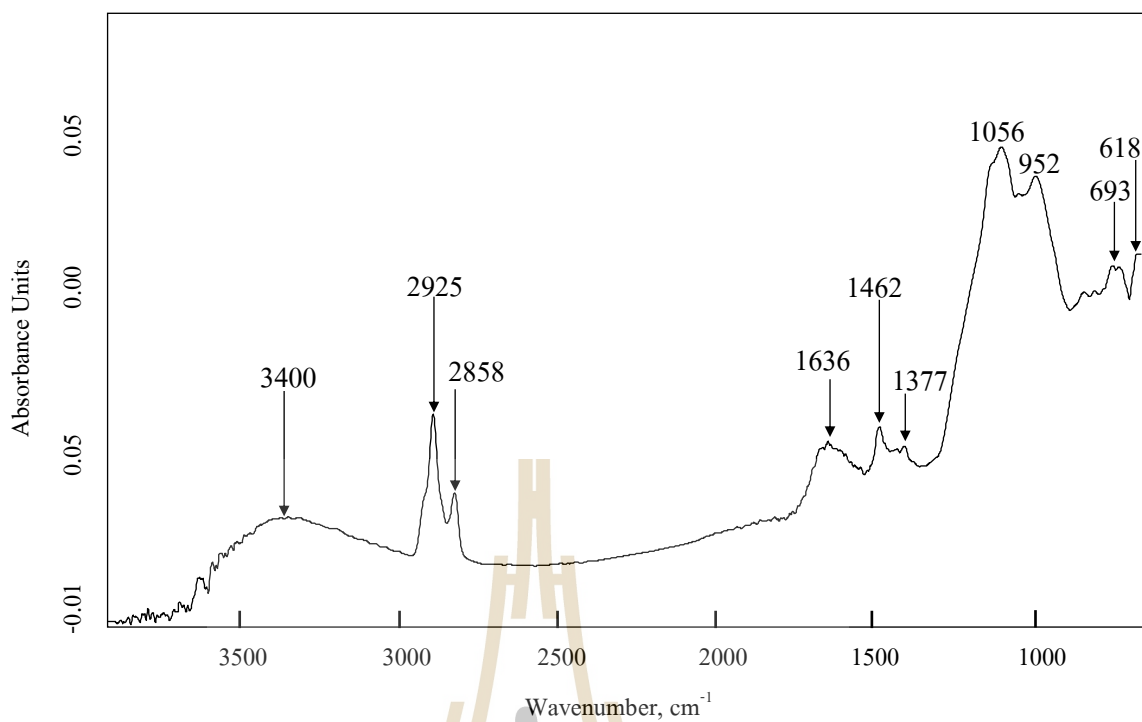
ภาพ ค-30 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละองจากการเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง
ขนาดฟู่นละอง 1.10-2.10 ไมโครเมตร (stage 6)



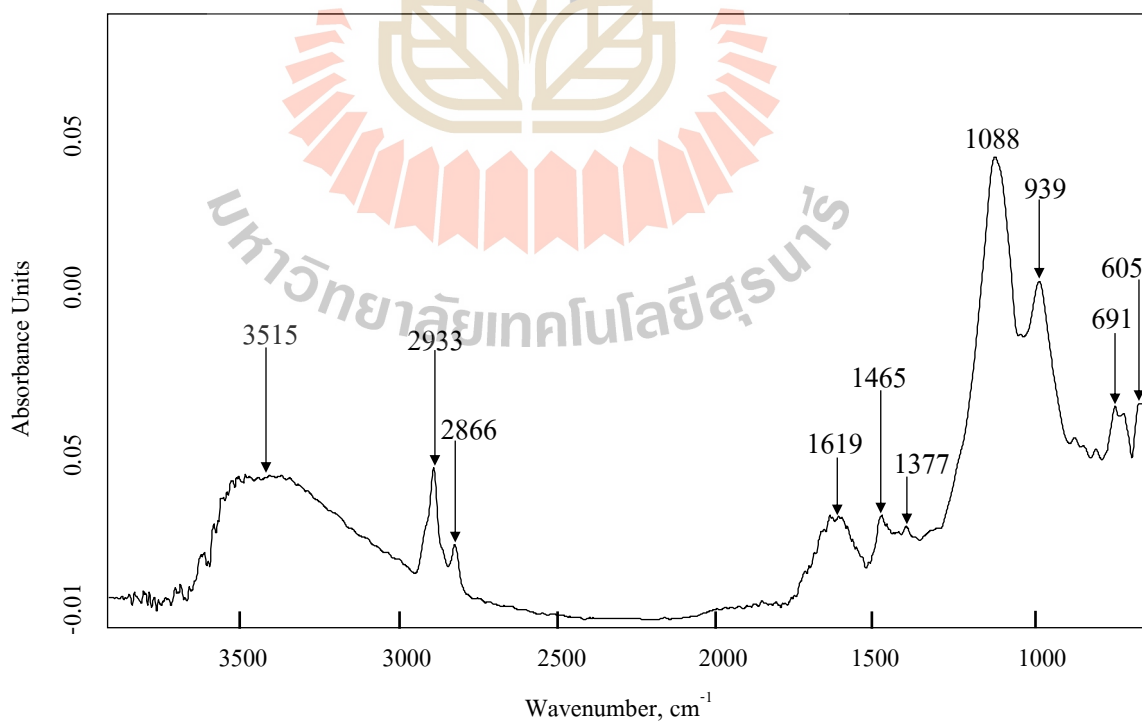
ภาพ ค-31 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละอองจากการเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง
ขนาดฟู่นละออง 0.65-1.10 ไมโครเมตร (stage 7)



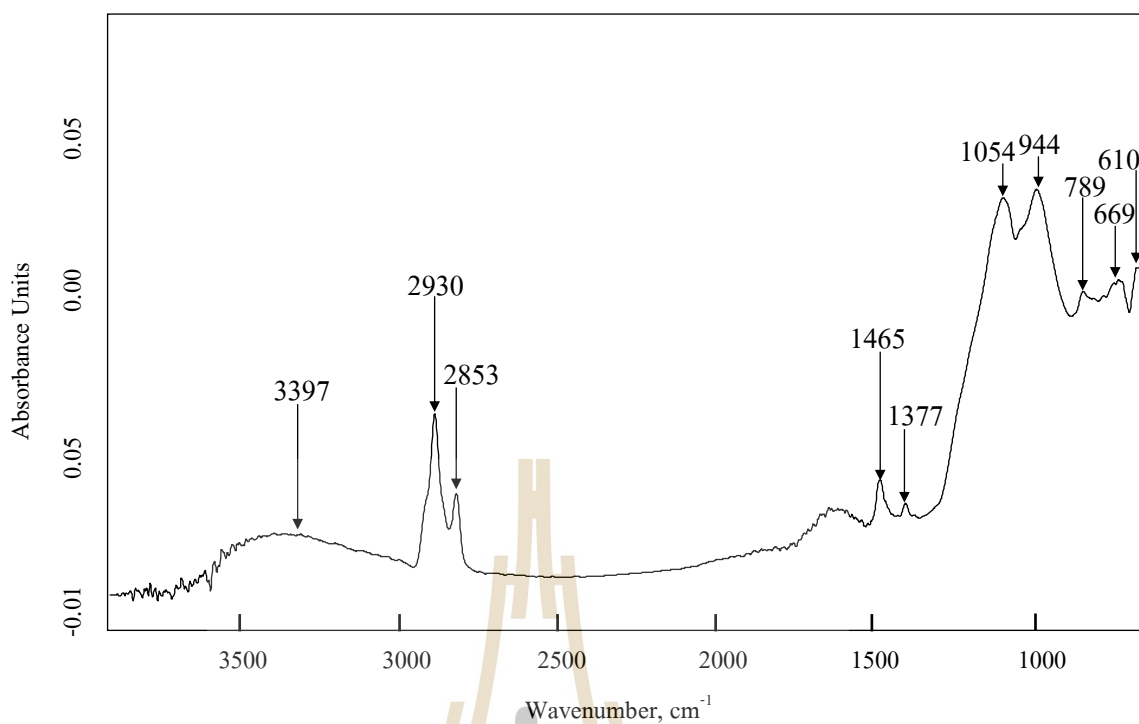
ภาพ ค-32 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละอองจากการเผาไหม้ที่เกิดจากกิจกรรมการปิ้งย่าง
ขนาดฟู่นละออง 0.43-0.65 ไมโครเมตร (stage 8)



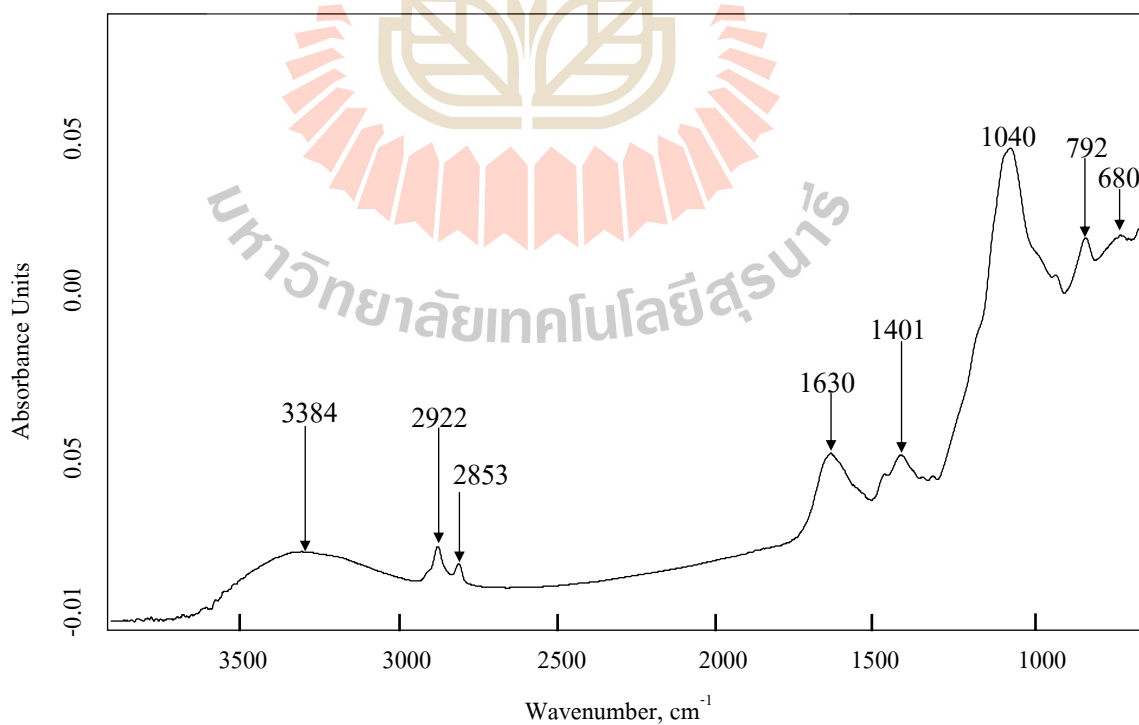
ภาพ ค-33 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟูรีเยอร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดของอนุภาคฝุ่นดิน
ขนาดฝุ่นละออง 9.00-10.00 ไมโครเมตร (stage 1)



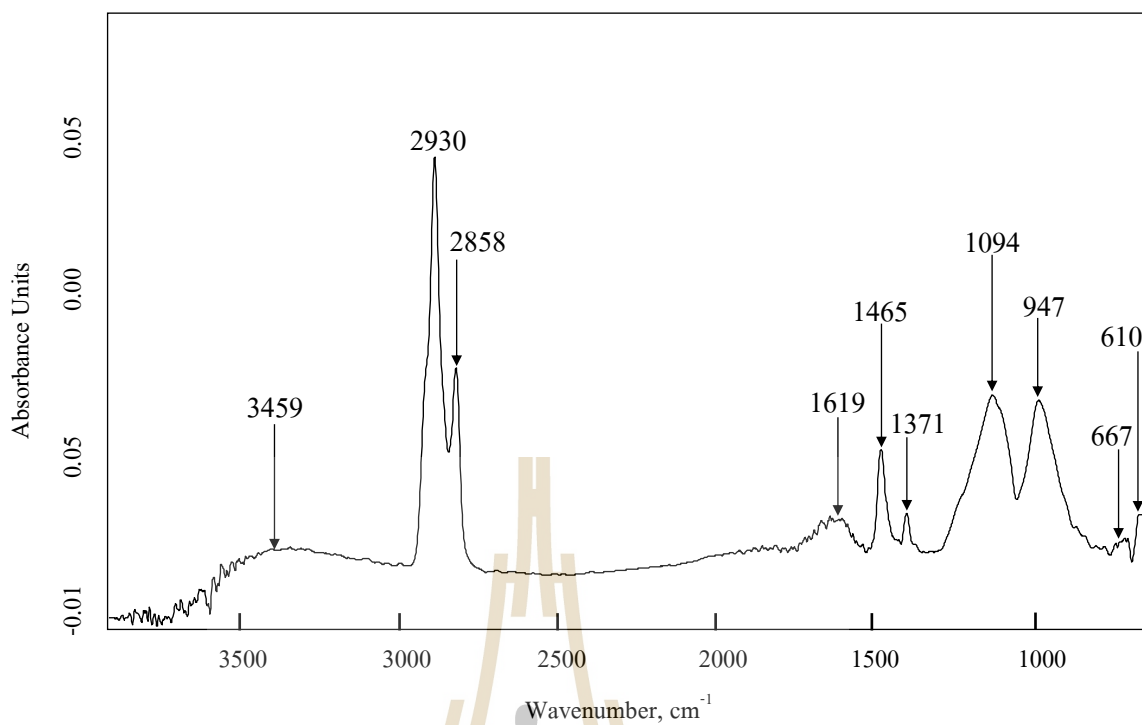
ภาพ ค-34 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟูรีเยอร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดของอนุภาคฝุ่นดิน
ขนาดฝุ่นละออง 5.80-9.00 ไมโครเมตร (stage 2)



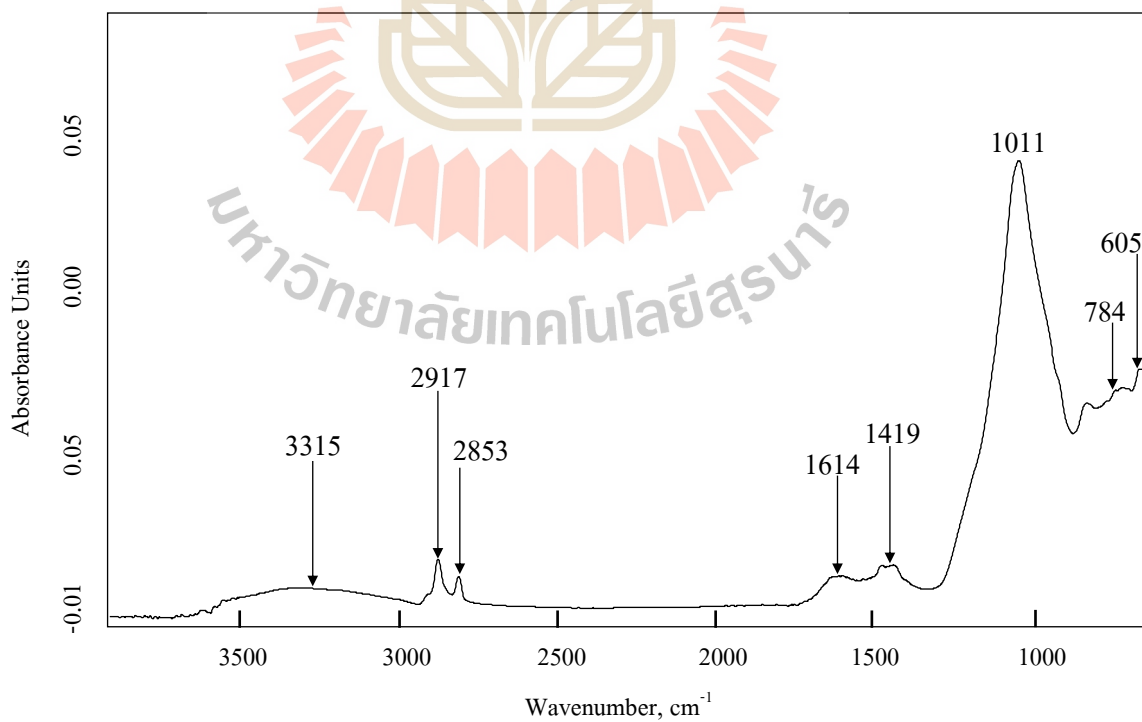
ภาพ ค-35 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟูรีเยอร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดของอนุภาคฝุ่นดิน
ขนาดฝุ่นละออง 4.70-5.80 ไมโครเมตร (stage 3)



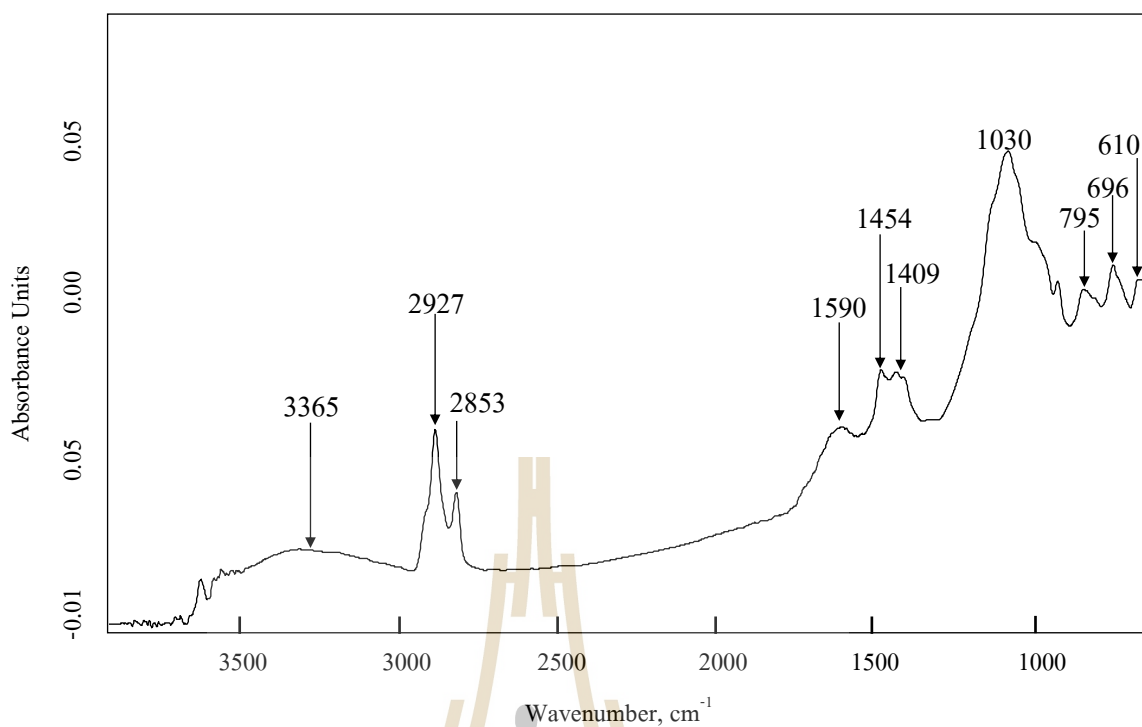
ภาพ ค-36 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟูรีเยอร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดของอนุภาคฝุ่นดิน
ขนาดฝุ่นละออง 3.30-4.70 ไมโครเมตร (stage 4)



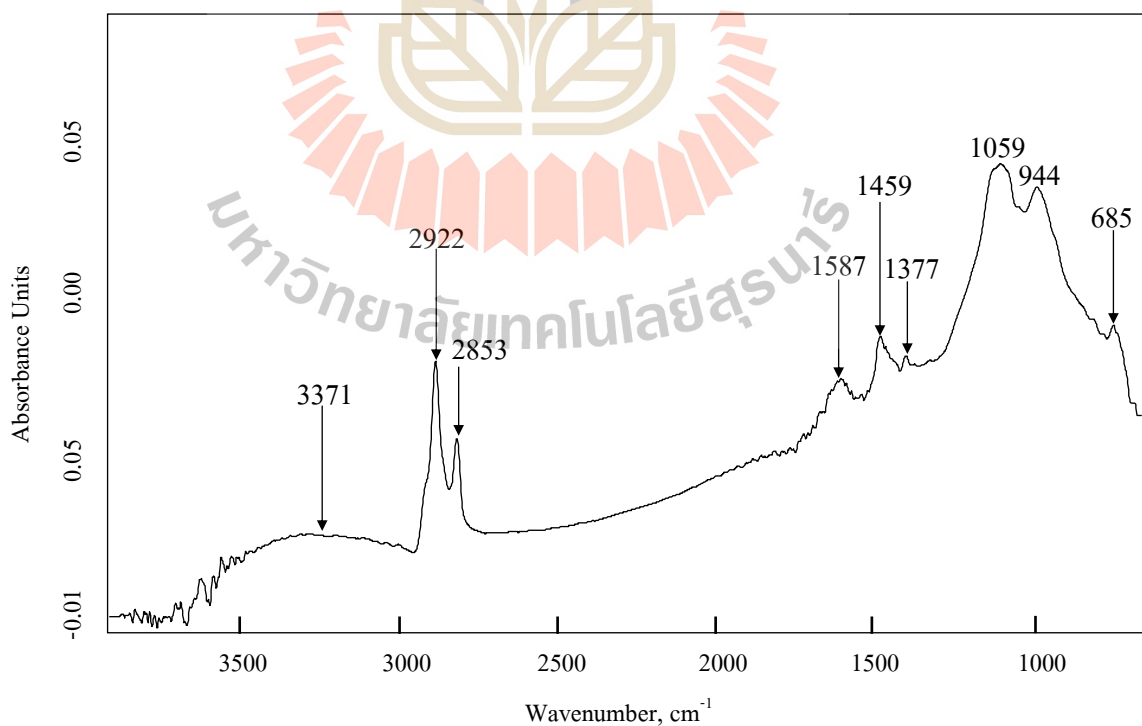
ภาพ ค-37 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟูรีเยอร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดของอนุภาคฝุ่นดิน
ขนาดฝุ่นละออง 2.10-3.30 ไมโครเมตร (stage 5)



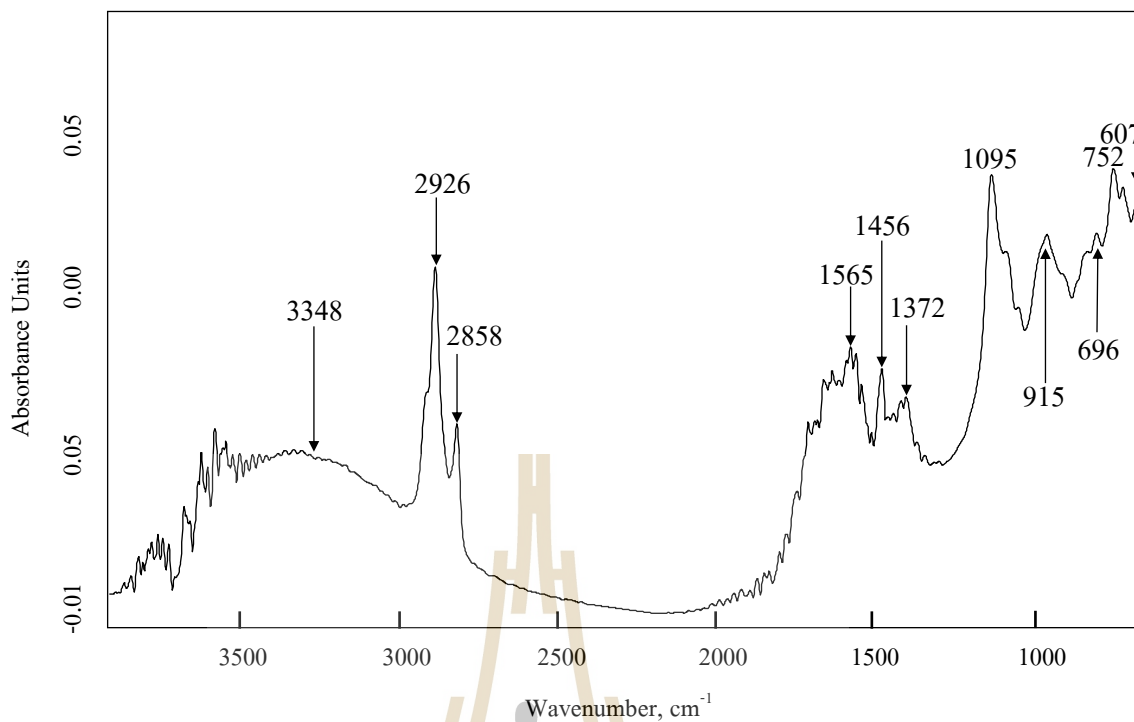
ภาพ ค-38 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟูรีเยอร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดของอนุภาคฝุ่นดิน
ขนาดฝุ่นละออง 1.10-2.10 ไมโครเมตร (stage 6)



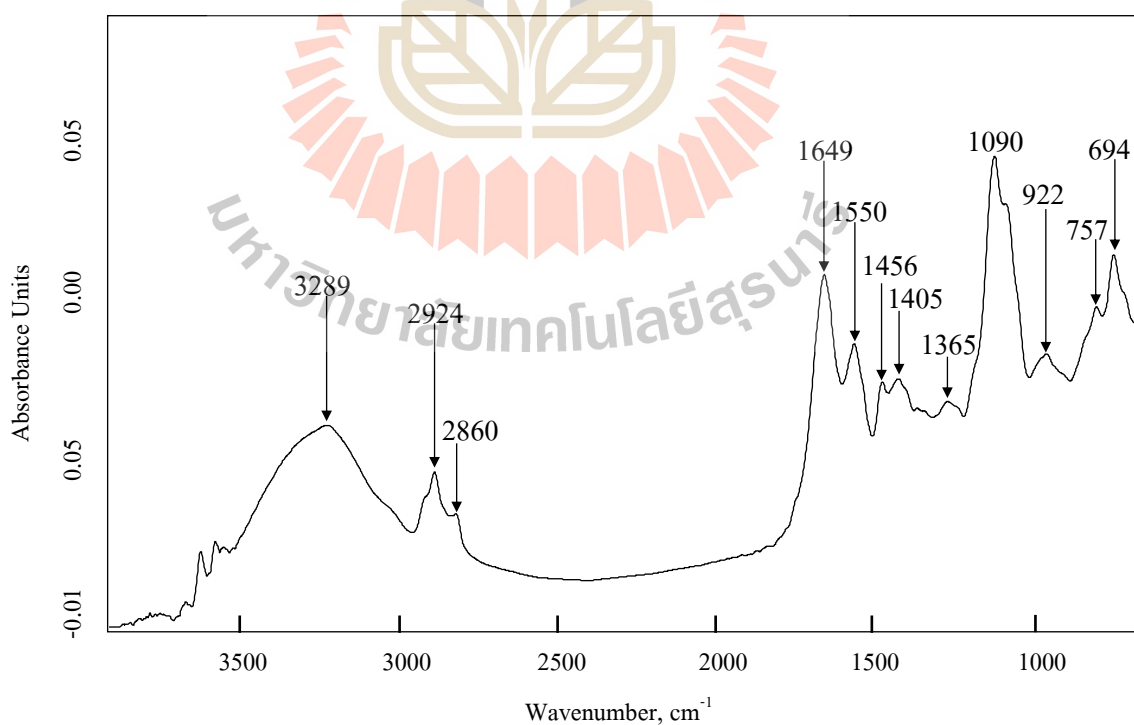
ภาพ ก-39 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละองจากอนุภาคฝุ่นดิน
ขนาดฟู่นละอง 0.65-1.10 ไมโครเมตร (stage 7)



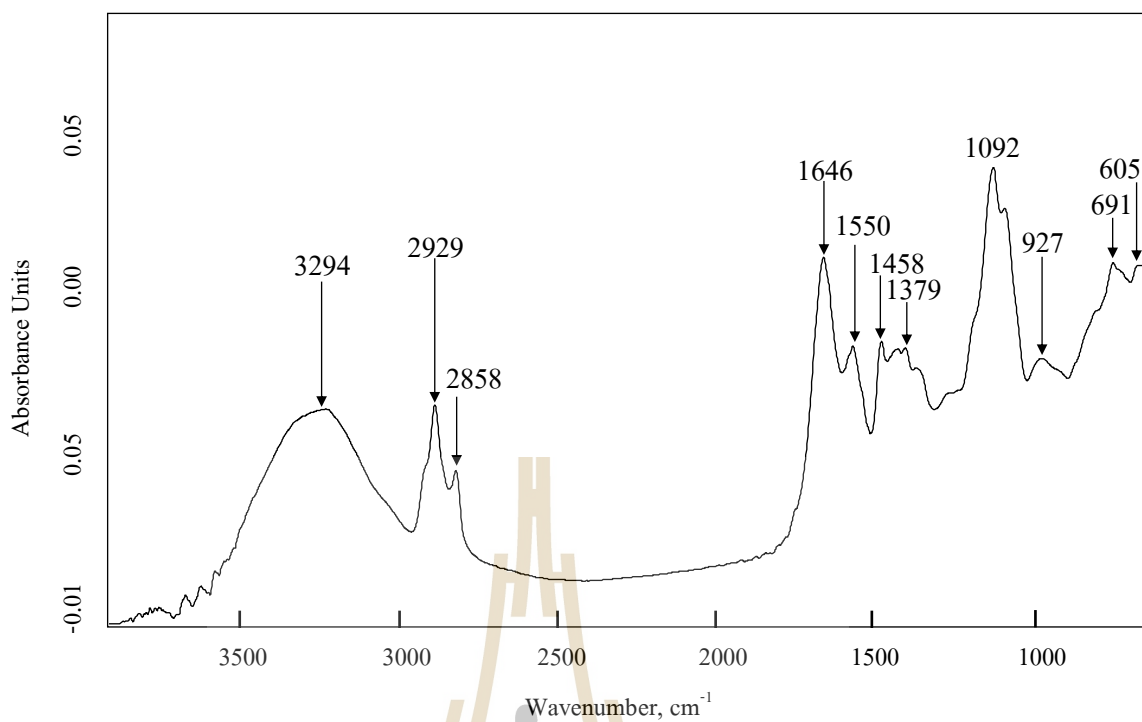
ภาพ ก-40 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละองจากอนุภาคฝุ่นดิน
ขนาดฟู่นละอง 0.43-0.65 ไมโครเมตร (stage 8)



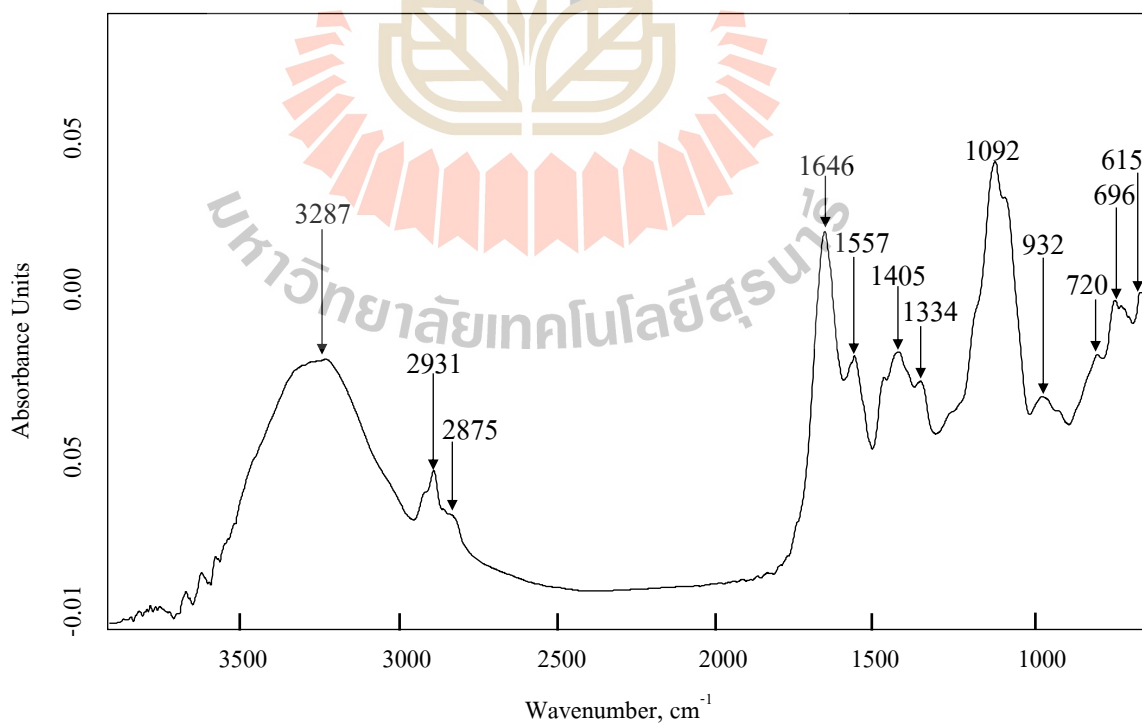
ภาพ ก-41 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไป
ขนาดฝุ่นละออง 9.00-10.00 ไมโครเมตร (stage 1)



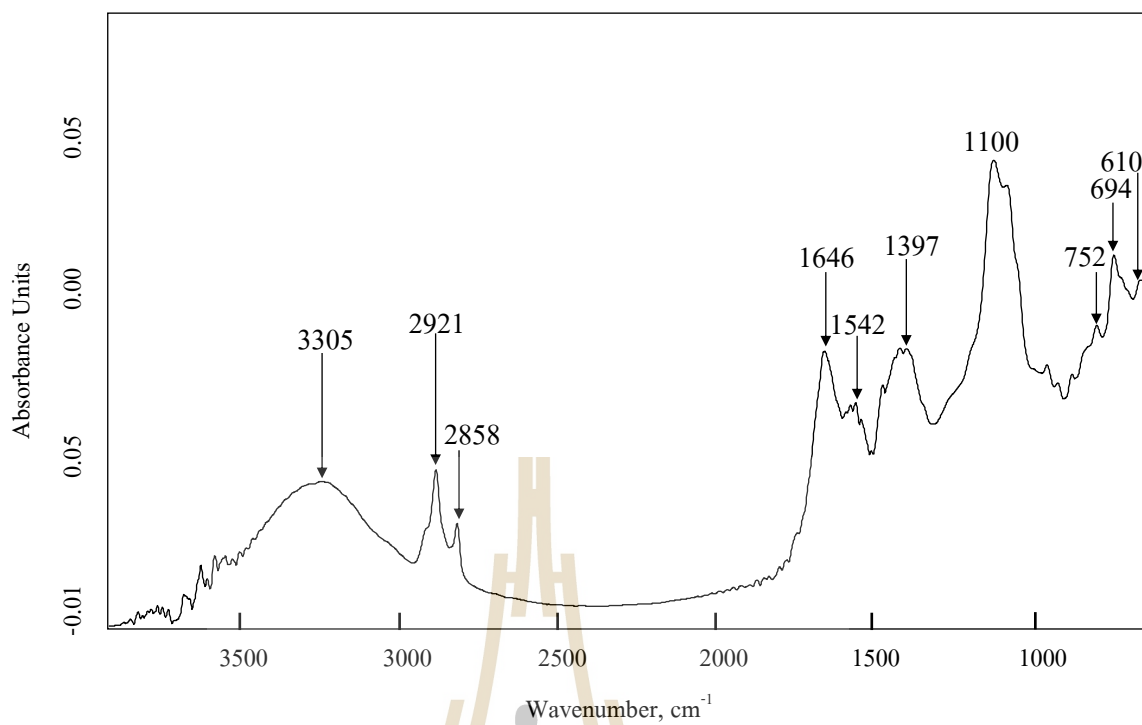
ภาพ ก-42 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไป
ขนาดฝุ่นละออง 5.80-9.00 ไมโครเมตร (stage 2)



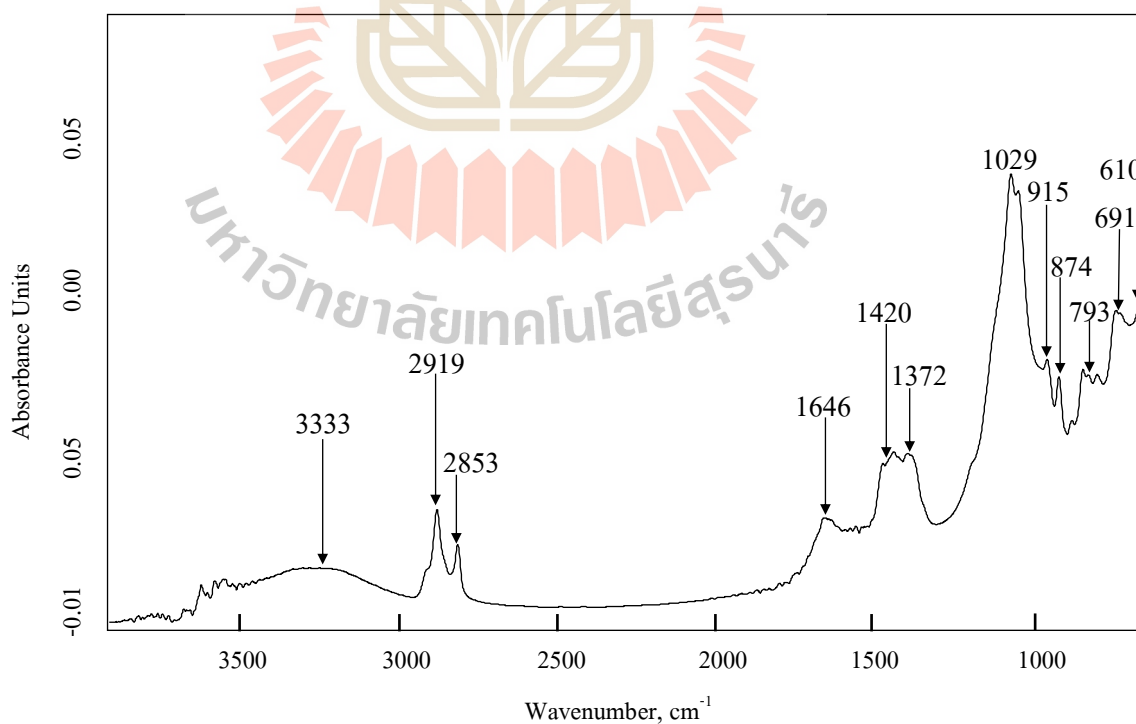
ภาพ ก-43 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไป
ขนาดฝุ่นละออง 4.70-5.80 ไมโครเมตร (stage 3)



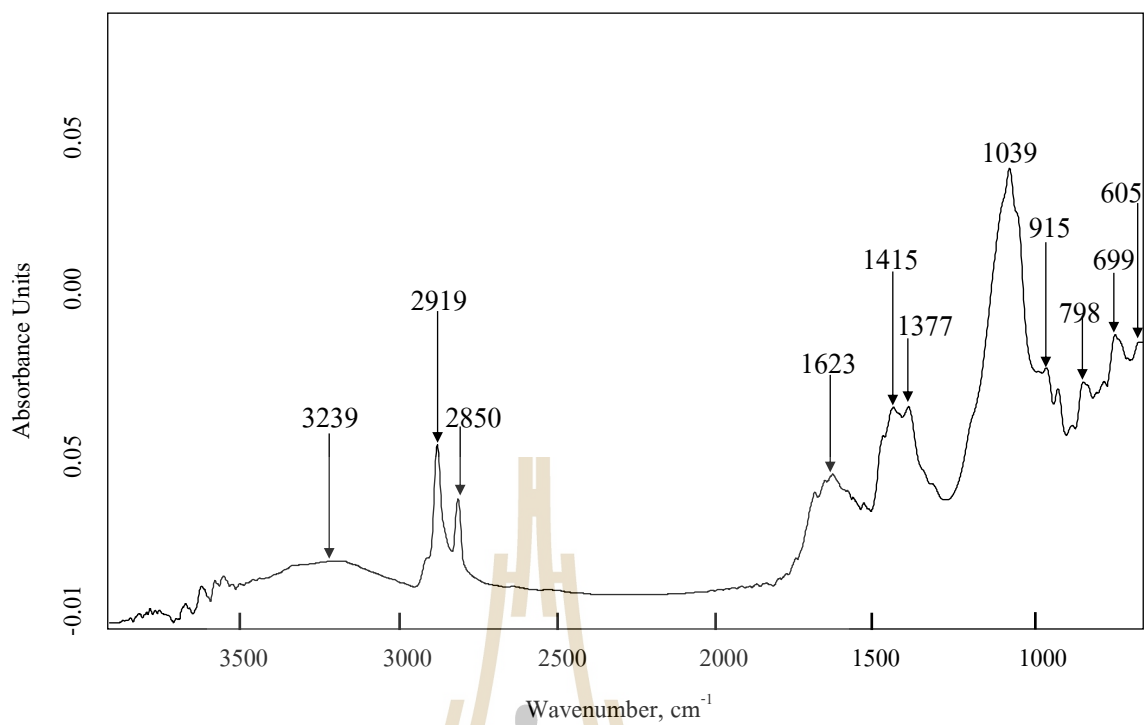
ภาพ ก-44 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไป
ขนาดฝุ่นละออง 3.30-4.70 ไมโครเมตร (stage 4)



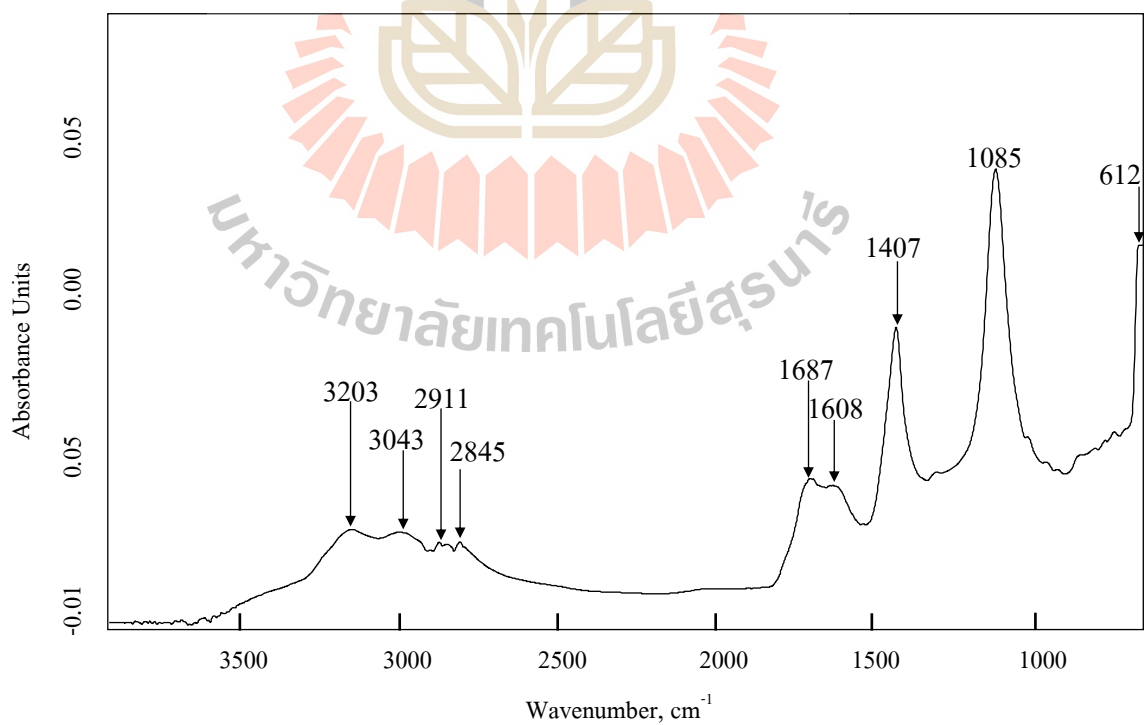
ภาพ ก-45 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไป
ขนาดฝุ่นละออง 2.10-3.30 ไมโครเมตร (stage 5)



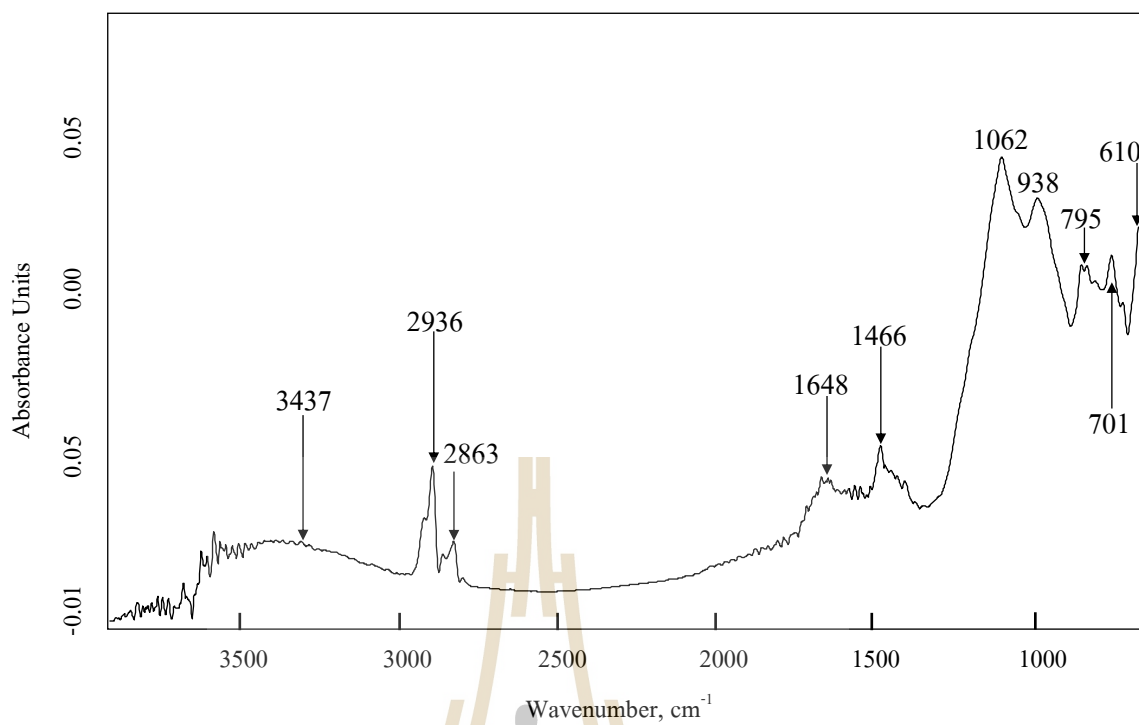
ภาพ ก-46 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไป
ขนาดฝุ่นละออง 1.10-2.10 ไมโครเมตร (stage 6)



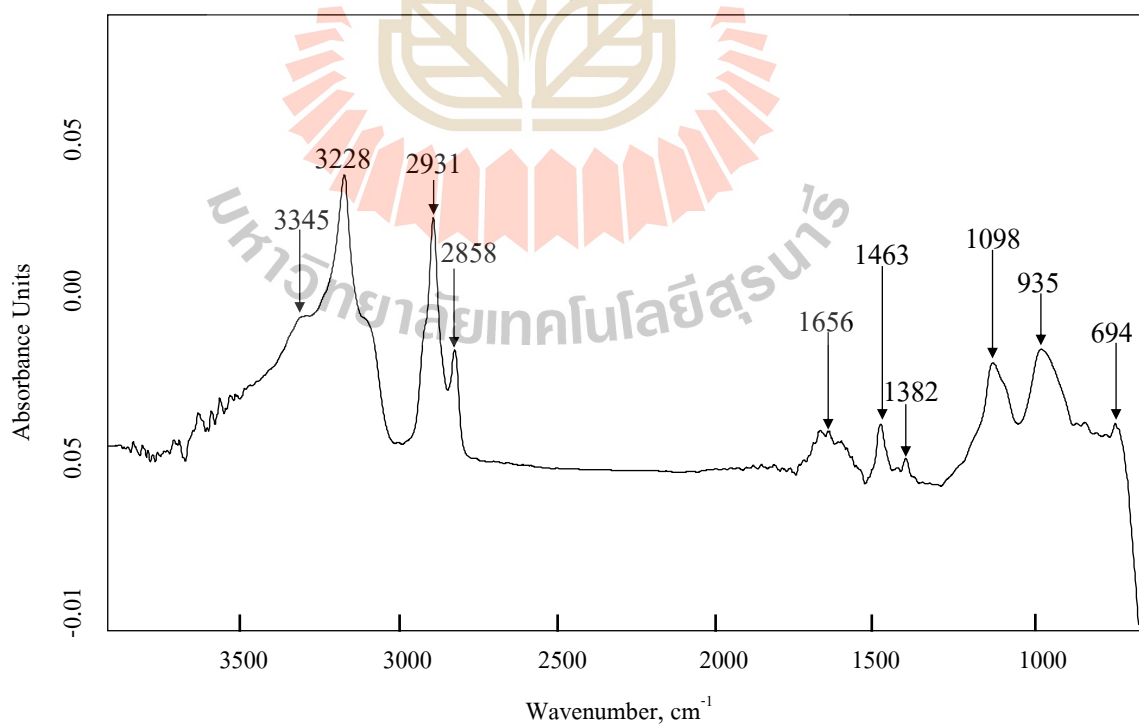
ภาพ ค-47 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไป
ขนาดฝุ่นละออง 0.65-1.10 ไมโครเมตร (stage 7)



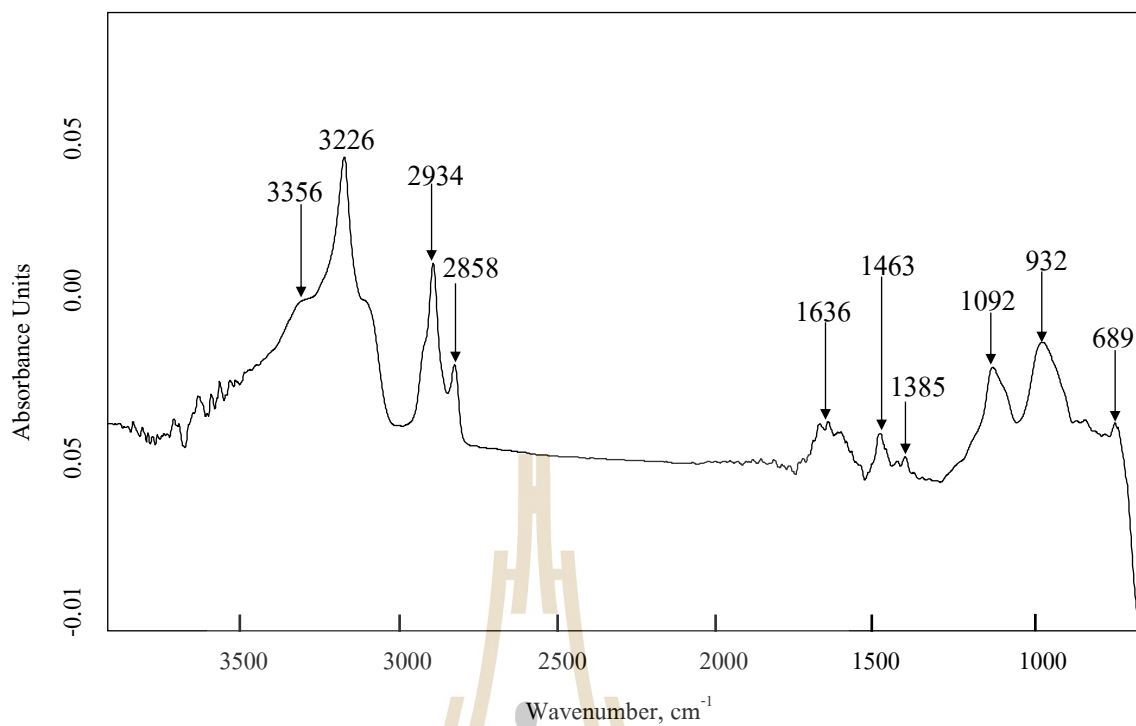
ภาพ ค-48 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากบรรยากาศทั่วไป
ขนาดฝุ่นละออง 0.43-0.65 ไมโครเมตร (stage 8)



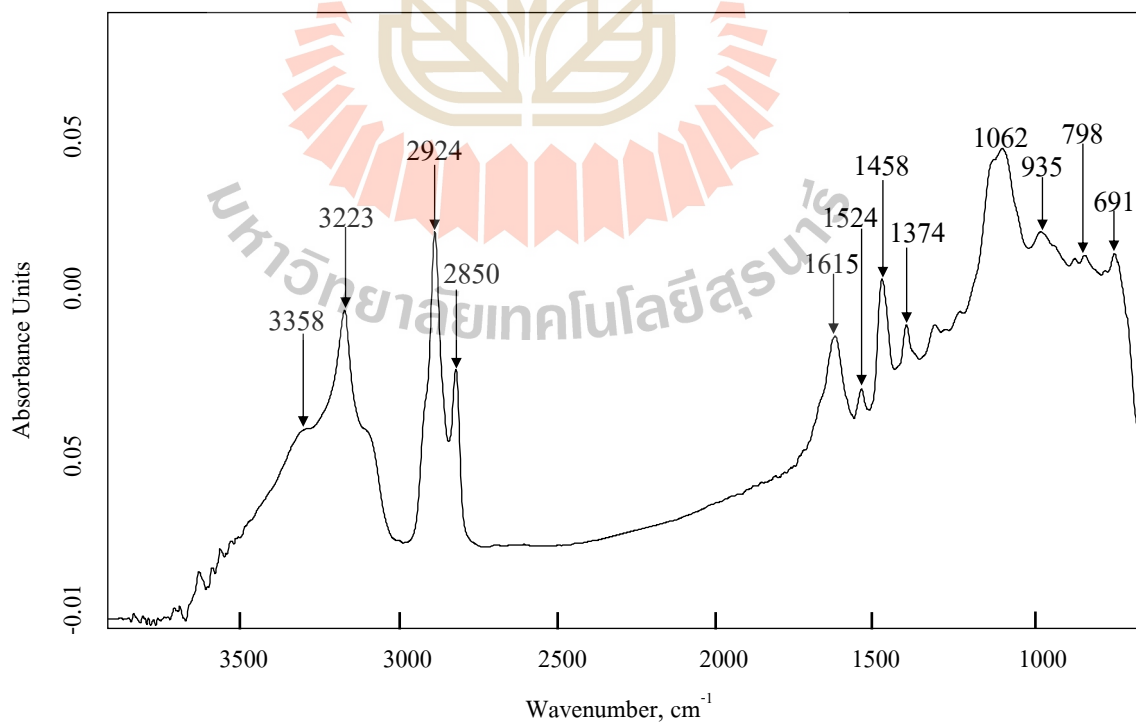
ภาพ ค-49 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากพื้นที่ริมถนนที่มีการจราจร
ขนาดฝุ่นละออง 9.00-10.00 ไมโครเมตร (stage 1)



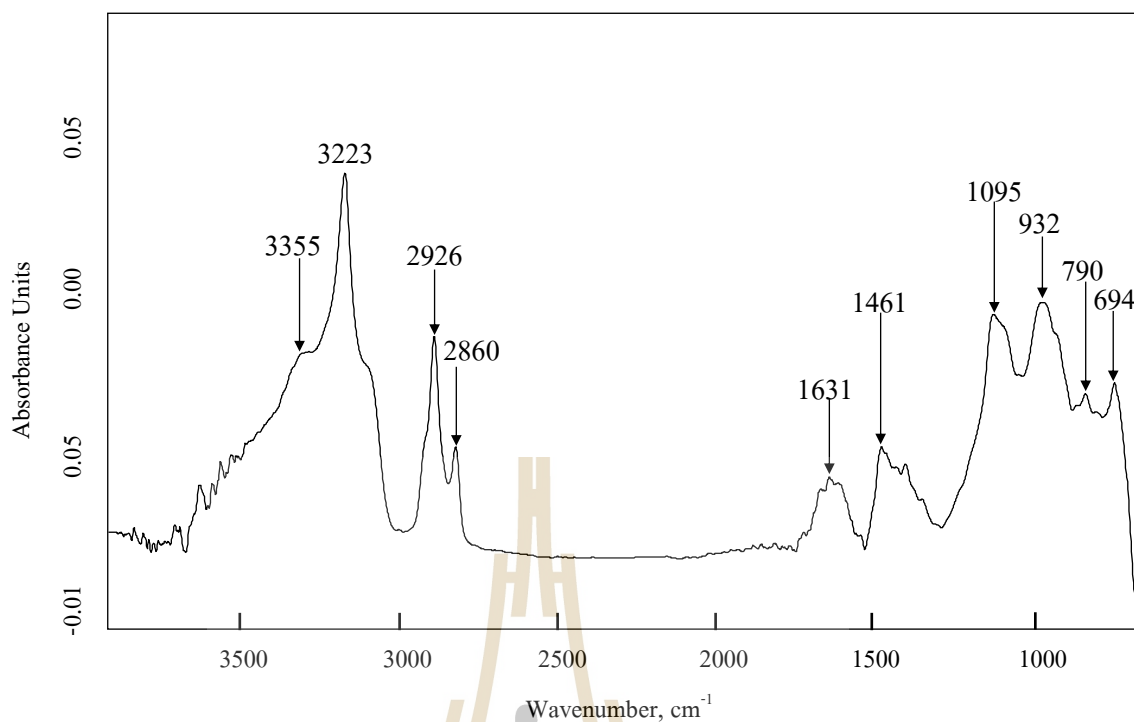
ภาพ ค-50 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฝุ่นละอองจากพื้นที่ริมถนนที่มีการจราจร
ขนาดฝุ่นละออง 5.80-9.00 ไมโครเมตร (stage 2)



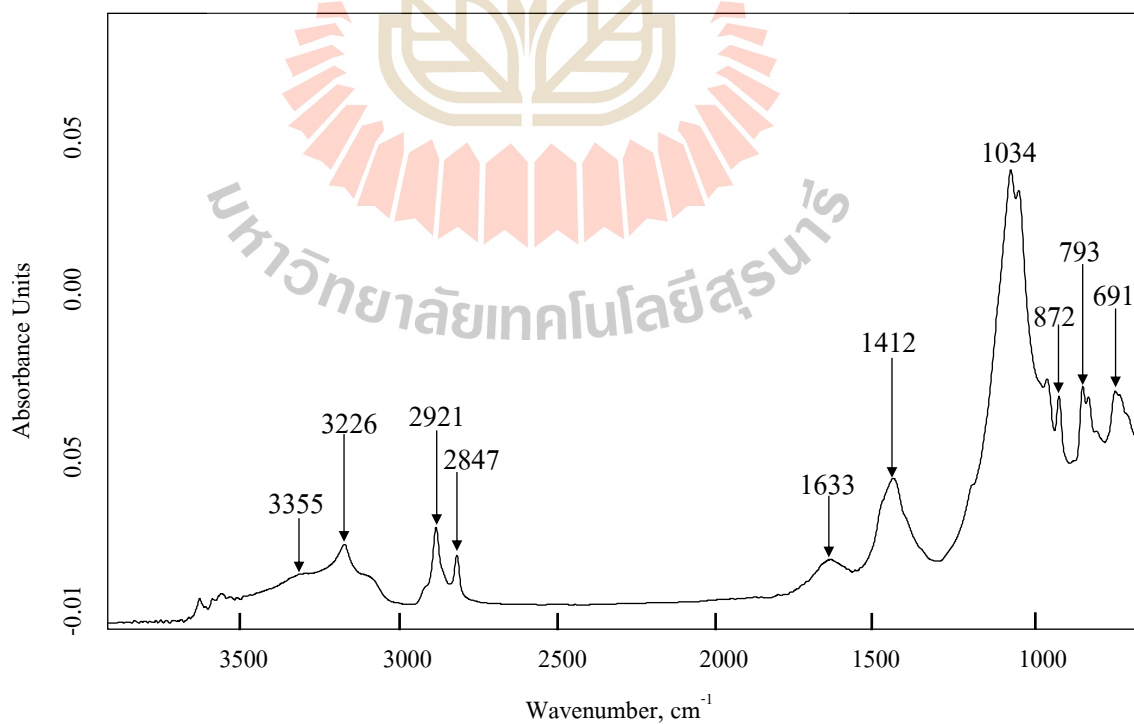
ภาพ ค-51 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละองจากพื้นที่ริมถนนที่มีการจราจร
ขนาดฟู่นละอง 4.70-5.80 ไมโครเมตร (stage 3)



ภาพ ค-52 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟู่นละองจากพื้นที่ริมถนนที่มีการจราจร
ขนาดฟู่นละอง 3.30-4.70 ไมโครเมตร (stage 4)



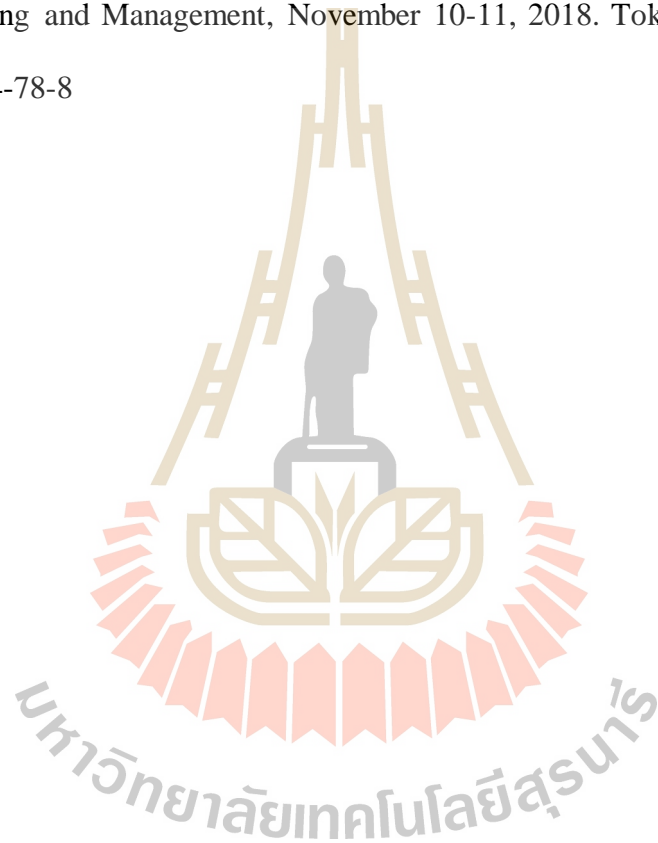
ภาพ ค-53 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟูรีเยอร์จากพื้นที่ที่ริมถนนที่มีการจราจร
ขนาดฝุ่นละออง 2.10-3.30 ไมโครเมตร (stage 5)



ภาพ ค-54 แถบสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ฟูรีเยอร์จากพื้นที่ที่ริมถนนที่มีการจราจร
ขนาดฝุ่นละออง 1.10-2.10 ไมโครเมตร (stage 6)

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Sakoolrat, S., and Chuersuwan, N., (2018). **Characterization of Surface Functional Group on Particulate Matter Using ATR-FTIR Spectroscopy Technique.** 8th ICCI-SEM 2018 International Conference on Contemporary issues in Science, Engineering and Management, November 10-11, 2018. Tokyo, Japan. ISBN: 978-93-86184-78-8



Characterization of Surface Functional Group on Particulate Matter Using ATR-FTIR Spectroscopy Technique

^[1] Somruadee Sakoolrat, ^[2] Nares Chuersuwan
^[1, 2] Institute of Public Health, Suranaree University of Technology,
Nakhon Ratchasima, Thailand

Abstract

Attenuated total reflectance Fourier transform infrared (ATR-FTIR) spectroscopy technique was applied to analyze the components of particulate matter (PM) collected from agricultural waste burning, airborne dust, and exhaust from diesel and gasoline engines. The PM samples were deposited on the aluminum foil in a cascade impactor, operated at 28.3 LPM. PM with cut-point diameter between 0.43 and 3.30 μm was analyzed by the FTIR coupled with a hyperion 2000 microscope (20x) in reflection mode with 4 cm^{-1} resolution and scanned at the wavenumbers from 600 to 4000 cm^{-1} . The results indicated that the spectrum wavenumbers of the samples were related to organic functional groups, i.e., aliphatic hydrocarbon, aromatic hydrocarbon, alcohol, aldehyde and carboxylic acid, and inorganic ions such as ammonium ions, sulfate ion and silicate ion. The vibrational bonds of aliphatic hydrocarbon (C-H), alcohol (C-O and O-H) and aldehyde (C=O) were identified as the main organic functional groups found on the PM samples. The ATR-FTIR with microscope was useful in identifying small PM samples and provided qualitative information about the components in terms of organic functional group and inorganic ions.

Keywords – Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared, PM composition, PM organic functional group, PM inorganic ions

ประวัติผู้เขียน

นางสาวสมฤดี สกฤรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 16 ธันวาคม พ.ศ. 2532 เริ่มเรียนชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนอนุบาลสุริยาอุทัยพิมาย ชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายที่โรงเรียนพิมายวิทยา อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในสาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี พ.ศ. 2554 และหลังจากสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี 2 ปี ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชามลพิษสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา โดยขณะศึกษาได้ทำวิทยานิพนธ์ในหัวข้อเรื่อง การจำแนกองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองด้วยสเปกโทรสโกปีแบบสั่น (Chemical characterization of particulate matter by vibrational spectroscopy)

ผลงานวิจัย: ได้นำเสนองานวิจัยในการประชุมวิชาการ 8th International Conference on Contemporary Issues in Science, Engineering and Management (ICCI-SEM) ระหว่างวันที่ 10-11 พฤศจิกายน พ.ศ. 2561, กรุงเทพมหานคร ประเทศญี่ปุ่น ในหัวข้อเรื่อง Characterization of surface functional groups on particulate matter using ATR-FTIR spectroscopy technique.