

การกระจายตัวของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน  
ในฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาชีวมวลในป่าโล่ง

DISTRIBUTION OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS ON  
DIFFERENT SIZES OF PARTICULATE MATTERS EMITTED FROM  
BIOMASS OPEN BURNING

ศวรรค์ สุทธิวุฒิ

SAVAN PEOTEHWUT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMHL-2009-SC-M 016-050

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การกระจายตัวของสารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน  
ในฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาชีวมวลในที่โล่ง

DISTRIBUTION OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS ON  
DIFFERENT SIZES OF PARTICULATE MATTERS EMITTED FROM  
BIOMASS OPEN BURNING



T107448

สวรรณค์ ภูธวิวุฒิ

SAWAN PHOOTHIWUT

เลขหมู่.....107448  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี. 29 ส.ค. 2553



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-SC-M-016-050

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การกระจายตัวของสารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในฝุ่นละออง  
ขนาดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาชีวมวลในที่โล่ง  
Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on Different Sizes of Particulate  
Matters Emitted from Biomass Open Burning

นักศึกษา นายสุวรรณต์ ภูริวุฒิ  
รหัสประจำตัว 49068103  
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุวรรณณี จรรยาพูน

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชมพูนุท	ไชยรักษ์	
ผศ.ดร.สุวรรณณี	จรรยาพูน	
ดร.ณัฐวุฒิ	เชิงชั้น	
ดร.วนิสตา	สุรพิพิช	

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 20 พฤศจิกายน 2552 เวลา 13.00 – 16.00 น.  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
สถานที่สอบ ณ อาคารปฏิบัติการ คณะวิทยาศาสตร์ ห้อง 316  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว  
  
(รองศาสตราจารย์ ดร.คุณฉวี ชนงษ์พัฒน์)  
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 24 เดือน ๕๙ พ.ศ. 52

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจส.  
วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์  
วันที่ ๒๕ เดือน ๕๙ พ.ศ. ๕๒  
ลงชื่อ.....

<b>หัวข้อวิทยานิพนธ์</b>	การกระจายตัวของสารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ในฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาชีวมวลในที่โล่ง
<b>นักศึกษา</b>	นายสวรรค์ ภูริวุฒิ
<b>รหัสประจำตัว</b>	49068103
<b>ปริญญา</b>	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
<b>สาขาวิชา</b>	เคมีสิ่งแวดล้อม
<b>พ.ศ.</b>	2552
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการกระจายตัวของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่  
ดูดซับอยู่บนอนุภาคฝุ่นขนาดต่างๆ (p-PAHs) ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ  
พื้นที่การเกษตร และช่วงการเกิดปัญหาหมอกควัน บริเวณจังหวัดลำปาง เก็บตัวอย่างฝุ่น  
ด้วยกระดาดกรองควอตซ์ โดยเครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นแบบ 8 ชั้น ที่มีขนาดแตกต่างกัน คือ 9.0-  
5.8, 5.8-4.7, 4.7-3.3, 3.3-2.1, 2.1-1.1, 1.1-0.7, 0.7-0.4 และ < 0.4  $\mu\text{m}$  ที่อัตราการไหลประมาณ 28.3  
ลิตรต่อนาที สกัดตัวอย่างฝุ่นละอองด้วยตัวทำละลาย วิเคราะห์ PAHs 16 ชนิด ด้วยเครื่อง GC-MS/SIM  
จากผลการวิเคราะห์พบว่า การเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ และพื้นที่การเกษตร มีการกระจายตัว  
ฝุ่นขนาดเล็ก 0.4-0.7  $\mu\text{m}$  มากที่สุด เท่ากับ 28.7 % และ 30.2 % โดยมี p-PAHs เท่ากับ 33.5 % และ  
37.4 % ตามลำดับ ในช่วงระหว่างการเกิดปัญหาหมอกควันพบว่าการกระจายตัวฝุ่นขนาดเล็กกว่า 0.4  $\mu\text{m}$   
มากที่สุด เท่ากับ 37.9 % โดยมี p-PAHs เท่ากับ 50.5 % นอกจากนี้ยังพบว่า การกระจายตัวของสาร  
PAHs 3-4 วงอะโรมาติก มีปริมาณมากกว่า สาร PAHs 5-6 วงอะโรมาติกในการเผาไหม้ฟางข้าวใน  
ถังทดสอบและพื้นที่การเกษตร ในขณะที่การเกิดปัญหาหมอกควัน พบว่าสาร PAHs 3-4 วงอะโรมาติก  
ปริมาณน้อยกว่า สาร PAHs 5-6 วงอะโรมาติก จากผลการวิเคราะห์พบว่าอัตราส่วนเฉพาะของ  
InP/BgP+InP ในฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ พื้นที่การเกษตร และปัญหา  
หมอกควัน เท่ากับ 0.56, 0.51 และ 0.45 ตามลำดับ

**คำสำคัญ:** สารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกที่จับอยู่บนอนุภาคฝุ่น, การเผาฟางข้าวในที่โล่ง  
อัตราส่วนเฉพาะของ InP/BgP+InP

<b>Thesis Title</b>	Distributions of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on Different Sizes of Particulate Matters Emitted from Biomass Open Burning
<b>Student</b>	Sawan Phoothiwut
<b>Student ID.</b>	49068103
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Environmental Chemistry
<b>Year</b>	2009
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Suwannee Junyapoon

### Abstract

This study examines the size distributions of particulate bound polycyclic aromatic hydrocarbons (p-PAHs) emitted from rice straw open burning in combustion chamber, agricultural region and released during smoke crisis in Lampang province. The particle-PAHs samples were collected on quartz fiber filters by an Eight-stage Cascade Impactor having difference particle size fractions between 9.0-5.8, 5.8-4.7, 4.7-3.3, 3.3-2.1, 2.1-1.1, 1.1-0.7, 0.7-0.4 and < 0.4  $\mu\text{m}$  particle diameter at a flow rate of 28.3 l/min. PAHs samples were analyzed using solvent-extraction followed by GC-MS/SIM for 16 PAHs. The results showed that size distributions of particulate matter and p-PAHs were highest in fine particle size range of 0.4-0.7  $\mu\text{m}$  from the rice straw burning in combustion chamber (28.7 % and 30.2 %) and agricultural region after harvesting (33.5 % and 37.4 %). During smoke crisis periods, the size distribution of particulate matter was highest in fine particle size range of less than 0.4  $\mu\text{m}$  (37.9 %) containing p-PAHs 50.5 %. The size distribution of 3-4 ring PAHs were higher than 5-6 ring PAHs in the rice straw burning in chamber and agricultural region. However, size distribution of 3-4 ring PAHs were lower than 5-6 ring PAHs during smoke crisis period. The characteristic ratios of InP/BgP+InP on particulate matters emitted from chamber test, agricultural region and during smoke crisis period were 0.56, 0.51 and 0.45, respectively.

**Keywords:** p-PAHs, rice straw open burning, characteristic ratio of InP/BgP+InP

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. สุวรรณิ จรรยาพูน อาจารย์ประจำสาขาวิชาเคมีและสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้หลายรอบมาก ให้มีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาเคมีและสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำให้คำปรึกษา และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา และช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ดร. วนิสา สุรพิพิธ อาจารย์จากศูนย์ข้อมูลระบบเครือข่ายคุณภาพอากาศ และเสียง กรมควบคุมมลพิษ ที่ให้คำแนะนำให้คำปรึกษา และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา

ขอขอบพระคุณ ดร. ณัฐวุฒิ เชิงชั้น อาจารย์ประจำสาขาวิชาเคมีและสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำให้คำปรึกษา และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาเคมีและสิ่งแวดล้อม รวมทั้งเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือบริการวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความร่วมมือ และอำนวยความสะดวก ในการทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทุกๆด้าน รวมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ ที่ให้กำลังใจตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์

นายสวรรค ภูริวุฒิ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	XI
สารบัญคำย่อ.....	XII
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 สารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน.....	4
2.1.1 การเกิดสาร PAHs.....	5
2.1.2 แหล่งกำเนิดสาร PAHs.....	6
2.1.3 การจำแนกแหล่งที่มาของสาร PAHs โดยใช้อัตราส่วนเฉพาะ.....	8
2.1.4 ความเป็นพิษของสาร PAHs.....	9
2.1.5 การสลายตัวของสาร PAHs ในบรรยากาศ.....	17
2.1.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของสาร PAHs.....	24
2.2 ฝุ่นละออง.....	28
2.2.1 กลไกการเกิดฝุ่นละออง.....	28
2.2.2 แหล่งกำเนิดของฝุ่นละอองในบรรยากาศ.....	28
2.2.3 ขนาดของฝุ่นละออง.....	29
2.2.4 การแพร่กระจายของฝุ่นละอองในบรรยากาศ.....	30
2.2.5 ผลกระทบของฝุ่นละอองในบรรยากาศ.....	31

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.6 มาตรฐานฝุ่นละออง.....	32
2.2.7 สถานการณ์มลพิษทางอากาศที่เกิดจากการเผาในที่โล่ง ในพื้นที่เกษตรของ ประเทศไทย.....	33
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	38
<b>บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>39</b>
3.1 สารเคมี.....	39
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	40
3.3 วัสดุชีวมวลที่ใช้ในการศึกษา.....	40
3.4 สภาพพื้นที่เก็บตัวอย่างจังหวัดลำปาง.....	40
3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	41
3.5.1 การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองคัดแยกขนาด.....	42
3.5.2 การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ.....	44
3.5.2.1 การเก็บตัวอย่างฝุ่นที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวลในถังทดสอบ.....	44
3.5.2.2 การเก็บตัวอย่างฝุ่นที่มีการเผาไหม้ฟางข้าว.....	45
3.5.2.3 การเก็บตัวอย่างฝุ่นระหว่างการเกิดปัญหาหมอกควัน.....	46
3.5.3 การวิเคราะห์สาร PAHs .....	48
3.5.3.1 การวิเคราะห์สาร PAHs ที่ดูดซับบนอนุภาคฝุ่นขนาดต่าง ๆ.....	48
3.5.3.2 การวิเคราะห์หาร้อยละการกลับคืนของสารตัวอย่าง.....	50
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....</b>	<b>51</b>
4.1 ผลการศึกษาการกระจายตัวของฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวล.....	51
4.1.1 การกระจายตัวของขนาดและความเข้มข้นของฝุ่นละออง ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ.....	53
4.1.2 การกระจายตัวของขนาดและความเข้มข้นของฝุ่นละออง ที่เกิดจากการเผา ไหม้ฟางข้าวในพื้นที่ทำการเกษตร.....	54
4.1.3 การกระจายตัวของขนาดและความเข้มข้นของฝุ่นละอองในบรรยากาศ ระหว่างเกิดปัญหาหมอกควัน.....	55

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสาร PAHs.....	59
4.2.1 ชนิดและปริมาณของสาร PAHs ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าว ในถังทดสอบ.....	60
4.2.2 ชนิดและปริมาณของสาร PAHs ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าว ในพื้นที่ทางการเกษตร.....	63
4.2.3 ชนิดและปริมาณของสาร PAHs ที่เกิดจากปัญหาหมอกควัน.....	65
4.2.4 ชนิดและปริมาณของสาร PAHs ที่เป็นสารร่วมก่อมะเร็ง และสารก่อมะเร็ง.....	68
4.3 การจำแนกแหล่งที่มาของสาร PAHs ใช้อัตราส่วนเฉพาะ.....	70
4.4 การวิเคราะห์ทางสถิติของวิธีการทดลอง.....	71
4.4.1 ผลการทดสอบความเที่ยงและค่าการวิเคราะห์ที่คืนกลับของวิธีวิเคราะห์.....	71
4.4.2 ผลการทดสอบค่าขีดต่ำสุดของของการตรวจวัดสารมาตรฐาน PAHs.....	73
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>74</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	74
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	75
<b>บรรณานุกรม.....</b>	<b>76</b>
ภาคผนวก ก การเตรียมกระดาษกรอง การคำนวณความเข้มข้นของสาร PAHs.....	83
ภาคผนวก ข ตารางแสดงอัตราการไหลของบีมเก็บอากาศและน้ำหนักฝุ่นละออง.....	98
ภาคผนวก ค กราฟมาตรฐานสาร PAHs 16 ชนิด.....	113
ภาคผนวก ง ตารางแสดงผลความเข้มข้นของสาร PAHs ในฝุ่นละออง.....	118
ประวัติผู้เขียน.....	131

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สาร PAHs ที่มีจำนวนวงเบนซีน n วง..... 6
2.2	แหล่งที่มาของสาร PAHs ที่สำคัญ..... 7
2.3	การเปรียบเทียบอัตราส่วนเฉพาะของสาร PAHs ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ..... 8
2.4	การเปรียบเทียบ Carcinogenic activity ของ chrysene และ methyl derivatives..... 10
2.5	สมบัติและความเป็นสารก่อมะเร็งของสาร PAHs..... 11
2.6	LD <sub>50</sub> ของสาร PAHs ในสัตว์ทดลอง..... 16
2.7	ค่าครึ่งชีวิตของสาร PAHs จากการเกิดปฏิกิริยาโดยแสงในถ้ำลอยสีต่าง ๆ..... 18
2.8	ค่ามาตรฐานฝุ่นละอองในบรรยากาศ..... 33
2.9	พื้นที่ศึกษาโครงการติดตามและประเมินสถานการณ์การเผาในพื้นที่เกษตร..... 34
2.10	พื้นที่การเกิดไฟไหม้ป่าระหว่าง ปี พ.ศ. 2548 - 11 พฤษภาคม พ.ศ. 2552..... 35
2.11	การตรวจวัดฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2547-2552..... 36
3.1	สถานะของการวิเคราะห์ชนิด และปริมาณสาร PAHs ด้วย GC-MS..... 49
4.1	ความเข้มข้นของฝุ่น ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ..... 52
4.2	ความเข้มข้นของฝุ่น ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในพื้นที่การเกษตรจังหวัดลำปาง..... 54
4.3	ความเข้มข้นของฝุ่น ในระหว่างที่เกิดปัญหาหมอกควัน..... 56
4.4	ความเข้มข้นของฝุ่น ในช่วงสภาพอากาศปกติ..... 57
4.5	ความเข้มข้นของสาร PAHs ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ..... 61
4.6	ความเข้มข้นของสาร PAHs ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าว ในพื้นที่การเกษตร..... 63
4.7	ความเข้มข้นของสาร PAHs ในระหว่างที่เกิดปัญหาหมอกควัน..... 65
4.8	สาร PAHs 7 ชนิด ในฝุ่นละออง ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งในปอด..... 69
4.9	อัตราส่วนเฉพาะของสาร PAHs..... 70
4.10	การทดสอบความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์..... 72
4.11	การวิเคราะห์กลับคืนของวิธีวิเคราะห์..... 73
4.12	ค่าขีดต่ำสุดของการตรวจวัดสารมาตรฐาน PAHs..... 74

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-1 ร้อยละความชื้นของฟางข้าวในถังทดสอบ.....	100
ข-2 อัตราการไหลของบีมก่อนและหลังการเก็บตัวอย่างอากาศ จากการเผาฟางข้าว ในถังทดสอบ.....	100
ข-3 ข้อมูลค่าเฉลี่ยอนุกรมวิธาน ในระหว่างจากการเผาฟางข้าวในถังทดสอบ.....	101
ข-4 น้ำหนักฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาฟางข้าวในถังทดสอบ .....	102
ข-5 ร้อยละความชื้นของฟางข้าวในพื้นที่การเกษตร.....	103
ข-6 อัตราการไหลของบีมก่อนและหลังการเก็บตัวอย่างอากาศ จากการเผาฟางข้าวในพื้นที่การเกษตร.....	104
ข-7 ข้อมูลอนุกรมวิธานจากการเผาฟางข้าวในพื้นที่ทำการเกษตร.....	105
ข-8 น้ำหนักฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาฟางข้าวในพื้นที่ทำการเกษตร.....	106
ข-9 อัตราการไหลของบีมก่อนและหลังการเก็บตัวอย่างอากาศ จังหวัดลำปาง ช่วงที่เกิดปัญหาหมอกควัน.....	106
ข-10 ข้อมูลอนุกรมวิธานในระหว่างการเกิดปัญหาหมอกควัน.....	107
ข-11 น้ำหนักฝุ่นละอองในระหว่างการเกิดปัญหาหมอกควัน.....	108
ข-12 อัตราการไหลของบีมก่อนและหลังการเก็บตัวอย่างอากาศ จังหวัดลำปาง ในช่วงสภาพอากาศปกติ.....	109
ข-13 ข้อมูลอนุกรมวิธานในช่วงสภาพอากาศปกติ.....	110
ข-14 น้ำหนักฝุ่นละอองในช่วงสภาพอากาศปกติ.....	111
ง-1 พื้นที่ได้กราฟของสาร PAHs ในอนุภาคฝุ่น จากการเผาไหม้ฟางข้าว ในถังทดสอบ.....	119
ง-2 ความเข้มข้นของสาร PAHs ในอนุภาคฝุ่น ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าว ในถังทดสอบ.....	120
ง-3 พื้นที่ได้กราฟของสาร PAHs ในอนุภาคฝุ่น จากการเผาไหม้ฟางข้าว ในพื้นที่ทางการเกษตร.....	121
ง-4 ความเข้มข้นของสาร PAHs ในอนุภาคฝุ่น ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าว ในพื้นที่การเกษตร.....	122
ง-5 พื้นที่ได้กราฟของสาร PAHs ระหว่างการเกิดปัญหาหมอกควัน.....	123

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง-6 ความเข้มข้นของสาร PAHs ในอนุภาคฝุ่น ระหว่างการเกิดปัญหาหมอกควัน.....	124
ง-7 พื้นที่ได้กราฟของสารละลายมาตรฐานผสม 16 PAHs.....	125
ง-8 พื้นที่ได้กราฟการทดสอบความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์สาร PAHs.....	126
ง-9 ความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์สาร PAHs.....	127
ง-10 พื้นที่ได้กราฟของสารมาตรฐาน PAHs.....	128
ง-11 ค่าการคืนกลับของสารมาตรฐาน PAHs.....	129
ง-12 การคำนวณขีดต่ำสุดของการตรวจวัด PAHs.....	130

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การจัดเรียงตัวของ PAHs..... 6
2.2	ไอโซเมอร์ทั้ง 5 ของ PAHs ที่มีวงเบนซีน 4 วง และมีน้ำหนักโมเลกุล 228..... 9
2.3	โครงสร้างของสาร PAHs จำนวน 16 ชนิด..... 12
2.4	การเกิดปฏิกิริยาของ Naphthalene กับ Hydroxyl radical..... 19
2.5	การเกิดปฏิกิริยาของ Naphthalene กับ Hydroxyl radical product..... 20
2.6	การเกิดปฏิกิริยาของ Naphthalene กับ NO <sub>3</sub> product..... 20
2.7	ลักษณะของอนุภาคและการดูดซับของ PAHs บนอนุภาค..... 22
2.8	ปฏิกิริยาการย่อยสลาย PAHs โดยแบคทีเรีย..... 23
2.9	ปฏิกิริยาการย่อยสลาย PAHs โดยเชื้อรา..... 23
2.10	รูปร่างของอนุภาคฝุ่นต่างๆ..... 29
2.11	ผลกระทบของฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ ต่อระบบทางเดินหายใจ..... 32
3.1	สภาพภูมิประเทศจังหวัดลำปาง..... 40
3.2	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... 41
3.3	เครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นแบบ 8 ชั้น..... 43
3.4	การสอบเทียบอัตราการไหลของปั๊ม..... 43
3.5	การติดตั้งอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นจากการเผาฟางข้าวในถังทดสอบ..... 45
3.6	สภาพแวดล้อมบริเวณที่เก็บตัวอย่างฝุ่นในบรรยากาศระหว่างเกิดปัญหาหมอกควัน..... 47
3.7	สภาพแวดล้อมบริเวณที่เก็บตัวอย่างฝุ่นในบรรยากาศช่วงสภาพอากาศปกติ..... 47
4.1	รูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคของฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาไหม้ ฟางข้าวในถังทดสอบ..... 52
4.2	รูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคของฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาฟางข้าวเพื่อเตรียม พื้นที่การเกษตร ..... 54
4.3	รูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคของฝุ่นละออง ที่เกิดจากปัญหาหมอกควัน..... 55
4.4	รูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคของฝุ่นละออง ในช่วงสภาพอากาศปกติ..... 57
4.5	สภาพบรรยากาศบริเวณจังหวัดลำปาง..... 58
4.6	รูปแบบการกระจายตัวของ Total-PAHs ในอนุภาคฝุ่น ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าว ในถังทดสอบ ..... 59

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7	รูปแบบการกระจายตัวของสารประกอบ PAHs ในอนุภาคฝุ่น ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ..... 60
4.8	รูปแบบการกระจายตัวของ Total-PAHs ในอนุภาคฝุ่น ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในพื้นที่ทำการเกษตร ..... 62
4.9	รูปแบบการกระจายตัวของสารประกอบ PAHs ในอนุภาคฝุ่น ที่เกิดจากการเผาฟางข้าวในพื้นที่สำหรับทำการเกษตร ..... 63
4.10	รูปแบบการกระจายตัวของ Total-PAHs ในอนุภาคฝุ่น ระหว่างการเกิดปัญหาหมอกควัน..... 64
4.11	โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐานผสม 16 PAHs และ PAHs ในฝุ่นขนาด 0.4-0.7 ไมโครเมตร ระหว่างการเกิดปัญหาหมอกควัน..... 65
4.12	รูปแบบการกระจายตัวของสาร PAHs ในอนุภาคฝุ่น ระหว่างการเกิดปัญหาหมอกควัน. 66
4.13	รูปแบบการกระจายตัวของสาร PAHs จำนวน 3-6 วงอะโรมาติก..... 67
4.14	รูปแบบการกระจายตัวของสาร PAHs ที่เป็นสารก่อมะเร็ง และไม่ใช่อะโรมาติก..... 68

## คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
PAHs	สารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน
NAP	Naphthalene
ACY	Acenaphthylene
ACE	Acenaphthene
FLU	Fluorene
PHE	Phenanthrene
ANT	Anthracene
FLA	Fluoranthene
PYR	Pyrene
BaA	Benz(a)anthrazene
CHR	Chrysene
BbF	Benzo(b)fluoranthene
BkF	Benzo(k)fluoranthene
BaP	Benzo(a)pyrene
BeP	Benzo(e)pyrene
InP	Indeno(1,2,3-cd)pyrene
DbA	Dibenzo(a,h)anthracen
BgP	Benzo(g,h,i)perylene
$\mu\text{g}/\text{m}^3$	ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
$\text{ng}/\text{m}^3$	นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
$\mu\text{m}$	ไมโครเมตร

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มลพิษทางอากาศ (Air pollution) ส่วนใหญ่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลในกระบวนการผลิตทางด้านอุตสาหกรรม และการคมนาคมขนส่ง ในเขตชุมชนเมืองขนาดใหญ่ สำหรับในเขตชนบท ปัญหามลพิษทางอากาศที่สำคัญคือ ปัญหาฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาชีวมวลในที่โล่ง ได้แก่ การเผาวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตรกรรม การเผาขยะชุมชน และไฟฟ้า โดยปัญหาจะมากน้อยต่างกันขึ้นอยู่กับขนาดและปริมาณฝุ่นละออง รวมถึงสารที่ยึดเกาะกับฝุ่นละออง สภาพภูมิประเทศและสภาพภูมิอากาศ โดยทั่วไป ปัญหามลพิษทางอากาศจะมีความรุนแรงในช่วงฤดูหนาว เนื่องจากสภาพอากาศนิ่ง รวมทั้งมีความกดอากาศสูงหรือมีค่า Mixing height ต่ำ ก่อให้เกิดการสะสมของมลสารที่ไม่สามารถแพร่กระจายในบรรยากาศได้ จึงทำให้ความเข้มข้นของมลสารต่าง ๆ มีค่าสูง สำหรับในช่วงฤดูร้อน จะมีการกระจายตัวของมลพิษได้ดี เนื่องจากอากาศมีความหนาแน่นน้อย ทำให้สามารถลอยตัวขึ้นสูง หรือมีค่า Mixing height สูง ทำให้เกิดการกระจายในแนวดิ่ง ส่วนในช่วงฤดูฝนมลพิษจะถูกชะโดยน้ำฝน (กิติโรจน์, 2546) กรมควบคุมมลพิษ ได้กำหนดสารมลพิษอากาศหลักของประเทศไทย 7 ชนิด ได้แก่ ฝุ่นละอองรวม (TSP), ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน ( $PM_{10}$ ), ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ), ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $NO_2$ ), ก๊าซโอโซน ( $O_3$ ) และตะกั่ว (Pb) (กรมควบคุมมลพิษ, 2550) อย่างไรก็ตาม ยังขาดแคลนข้อมูลองค์ประกอบของฝุ่นที่มีสารประกอบพอลิไซคลิกคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ การยึดเกาะของ PAHs กับฝุ่นละอองขนาดเล็ก ทำให้ PAHs สามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนล่าง ส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ นอกจากนี้ PAHs ที่อยู่ในรูปฝุ่นยังมีค่าครึ่งชีวิตที่ยาวนานกว่าในรูปก๊าซ เนื่องจากฝุ่นละอองจะช่วยลดอัตราการสลายตัวของ PAHs โดยแสงอาทิตย์ จากงานวิจัยของ Dockery และคณะ (1993) พบว่า  $PM_{2.5}$  มีความสัมพันธ์กับอัตราการตายจากโรคมะเร็งปอดและโรคหัวใจ ทำให้มีอาการรุนแรงมากขึ้น และยังมีรายงานว่ามีความสัมพันธ์กับอัตราการตายก่อนวัยอันควร

พื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยประสบกับปัญหาหมอกควันในช่วงฤดูแล้ง ทำให้ปริมาณฝุ่นละอองมีค่าเกินมาตรฐาน มาเป็นเวลานานนับสิบปี ส่งผลให้ประชาชนมีอัตราการป่วยด้วยโรคระบบทางเดินหายใจมากขึ้น จังหวัดลำปางเป็นหนึ่งในจังหวัดทางภาคเหนือที่ได้รับผลกระทบจากปัญหาดังกล่าว เนื่องจากมีสภาพพื้นที่เป็นแอ่งกระทะ ในช่วงฤดูแล้งเมื่อมีการเผาวัสดุทางการเกษตรในที่โล่งหรือเกิดปัญหาไฟฟ้า ซึ่งในช่วงดังกล่าวมวลอากาศเย็นที่ปกคลุมพื้นที่ในภาคเหนือ ส่งผลให้มี

ความกดอากาศสูง สภาพอากาศนิ่ง ทำให้ฝุ่นละอองขนาดเล็กสะสมอยู่ในบรรยากาศไม่สามารถแพร่กระจายออกไป (กรมควบคุมมลพิษ, 2552)

งานวิจัยนี้ศึกษารูปแบบการกระจายตัวของฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ ชนิดและปริมาณสารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ดูดซับบนอนุภาคแขวนลอย (p-PAHs) ที่เกิดจากการเผาไหม้ของฟางข้าว ในถังทดสอบ พื้นที่เตรียมการเกษตร และในช่วงระหว่างที่เกิดปัญหาหมอกควัน บริเวณพื้นที่จังหวัดลำปาง โดยเก็บตัวอย่างฝุ่นด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นแบบ 8 ชั้น (Eight-Stage Cascade Impactor) และวิเคราะห์ปริมาณของฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ รวมทั้งวิเคราะห์ชนิดและปริมาณ 16 PAHs ที่ดูดซับบนอนุภาคฝุ่นขนาดต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสัดส่วนแหล่งกำเนิด (Source apportionment) ของสารประกอบ PAHs ในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเผาวัสดุชีวมวลในที่โล่ง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษารูปแบบการกระจายขนาดและความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่น ที่เกิดจากการเผาไหม้วัสดุชีวมวลในที่โล่ง

1.2.2 ศึกษาชนิดและปริมาณของสารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ที่ดูดซับบนอนุภาคฝุ่น (p-PAHs) ขนาดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้วัสดุชีวมวลในที่โล่ง

1.2.3 ศึกษาสัดส่วนแหล่งกำเนิดของสารประกอบ PAHs ที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวล

## 1.3 ขอบเขตงานของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษารูปแบบการกระจายขนาดและความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นขนาดต่าง ๆ และ PAHs ที่ดูดซับบนอนุภาคฝุ่นขนาดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้วัสดุชีวมวล ในถังทดสอบ (ทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ) โดยเก็บตัวอย่างอากาศด้วย 8-Stages Cascade Impactor ที่มีขนาดแตกต่างกัน 8 ขนาด คือ > 9.0, 9.0-5.8, 5.8-4.7, 4.7- 3.3, 3.3-2.1, 2.1-1.1, 1.1-0.7, 0.7-0.4 และ < 0.4 ไมครอน ชีวมวลที่ใช้การศึกษา คือ ฟางข้าว โดยสกัด PAHs ด้วย Acetonitrile โดยใช้ Ultrasonicator และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS-SIM

1.3.2 ศึกษารูปแบบการกระจายของขนาดและความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นขนาดต่าง ๆ และ PAHs ที่ดูดซับบนอนุภาคฝุ่นขนาดต่าง ๆ ในบรรยากาศของจังหวัดลำปางบริเวณที่มีการเผาไหม้ฟางข้าว เพื่อเตรียมพื้นที่สำหรับทางการเกษตร

1.3.3 ศึกษารูปแบบการกระจายของขนาดและความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นขนาดต่าง ๆ และ PAHs ที่ดูดซับบนอนุภาคฝุ่นขนาดต่าง ๆ ในบรรยากาศของจังหวัดลำปางระหว่างที่เกิดปัญหาหมอกควัน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบรูปแบบการกระจายตัวของฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ กัน 8 ขนาด คือ >9.0, 9.0-5.8, 5.8-4.7, 4.7-3.3, 3.3-2.1, 2.1-1.1, 1.1-0.7, 0.7-0.4 และ < 0.4  $\mu\text{m}$  ที่เกิดจากการเผาไหม้วัสดุชีวมวลในที่โล่ง

1.4.2 ทราบชนิด ปริมาณ และรูปแบบการกระจายตัวของสาร PAHs ที่ดูดซับบนอนุภาคฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้วัสดุชีวมวลในที่โล่ง

1.4.3 ได้ข้อมูลสัดส่วนแหล่งกำเนิดสาร PAHs ที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวลในที่โล่ง สามารถนำข้อมูลสารมลพิษที่เกิดจากการเผาวัสดุชีวมวลในที่โล่ง ไปใช้ในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และวางแผนป้องกันปัญหามลพิษทางอากาศในอนาคต

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 สารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

สารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) ประกอบด้วยกลุ่มของสารประกอบที่มีวงเบนซินตั้งแต่สองวงเชื่อมต่อกัน โดยวงอะโรมาติกสองวงที่อยู่ติดกันใช้คาร์บอน 2 อะตอมร่วมกัน วงอะโรมาติกอาจมีคาร์บอน 5 หรือ 6 อะตอมก็ได้ สาร PAHs ที่ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ 1) PAHs อยู่ในรูปก๊าซ (gas phase) และ 2) PAHs ที่เกาะอยู่กับฝุ่นละออง (particulate phase) สาร PAHs ส่วนใหญ่มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง จึงถูกปลดปล่อยออกมาสู่บรรยากาศในสถานะก๊าซในสภาวะที่มีความดันไอต่ำ จากนั้นสาร PAHs มักจะรวมตัวกับอนุภาคในบรรยากาศ กลายเป็น particulate PAHs (p-PAHs) ซึ่ง PAHs ที่อยู่ในรูปอนุภาคของฝุ่นที่มีค่าครึ่งชีวิตที่นานกว่า PAHs ที่อยู่ในรูปของก๊าซ เนื่องจาก PAHs ที่ยึดเกาะอยู่ในรูปอนุภาคของฝุ่น สามารถคงตัวอยู่ในบรรยากาศได้นาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ รวมถึงอัตราการตกสะสมแบบเปียกและแบบแห้ง เมื่อเทียบกับ PAHs ที่อยู่ในรูปของก๊าซที่สามารถสลายตัวโดยปฏิกิริยาของแสงกับไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ), ไคโนโตรเจนเพนตะออกไซด์ ( $\text{N}_2\text{O}_5$ ), ไฮดรอกซิลเรดิคอล ( $\bullet\text{OH}$ ), ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) และเพอรอกซีเอซีทิลไนเตรต (peroxyacetyl nitrate, PAN) (ATSDR, 1995)

การแพร่กระจายของ PAHs ในบรรยากาศ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ ได้แก่ ค่าการละลายน้ำ (Water solubility), ค่าความดันไอ (Vapor pressure), ค่าคงที่ของเฮนรี (Henry's law constant), สัมประสิทธิ์การพาร์ทิชันของออกทานอลกับน้ำ (Octanal-water partition coefficient,  $K_{ow}$ ) และสัมประสิทธิ์การพาร์ทิชันของสารอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon partition coefficient,  $K_{oc}$ ) จากคุณสมบัติดังกล่าว สามารถแบ่งกลุ่มของ PAHs โดยพิจารณาจากน้ำหนักโมเลกุลออกเป็น 3 กลุ่มคือ 1) PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Low molecular weight) 152 - 178 กรัมต่อโมล พบอยู่ในรูปของก๊าซ, 2) PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลปานกลาง (Medium molecular weight) 202 กรัมต่อโมล พบอยู่ในรูปของก๊าซและอนุภาคฝุ่น และ 3) PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (High molecular weight) 228-278 กรัมต่อโมล พบอยู่ในรูปอนุภาคฝุ่น (Baek และคณะ, 1991 ; ATSDR, 1995)

### 2.1.1 การเกิดสาร PAHs

สาร PAHs เกิดจาก 2 กระบวนการ (Bjørseth และ Ramdahl, 1985) คือ

1) กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) เป็นกระบวนการย่อยสลายชีวมวลด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีที่ผันกลับไม่ได้ (irreversible reaction) ทำให้เกิดการสลายตัวขององค์ประกอบย่อยชนิดต่าง ๆ เริ่มต้นจากชีวมวลได้รับความร้อน ช่วงแรกเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) จะเกิดการสลายตัว ตามด้วยเซลลูโลส (cellulose) และลิกนิน (lignin) กระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลโดยทั่วไปเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic reaction) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิระหว่าง 200 – 600 องศาเซลเซียส โดยจะปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) กรดน้ำส้ม (acetic acid) เมทานอล (methanol) และน้ำมันดินเบา (light tar) นอกจากนี้ การเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง ๆ ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน และน้ำมันดินหนัก รวมถึงสาร PAHs ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของสาร PAHs ที่เกิดจากการเผาไหม้ ได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน อัตราการเผาไหม้ ชนิดและคุณลักษณะของชีวมวล เป็นต้น

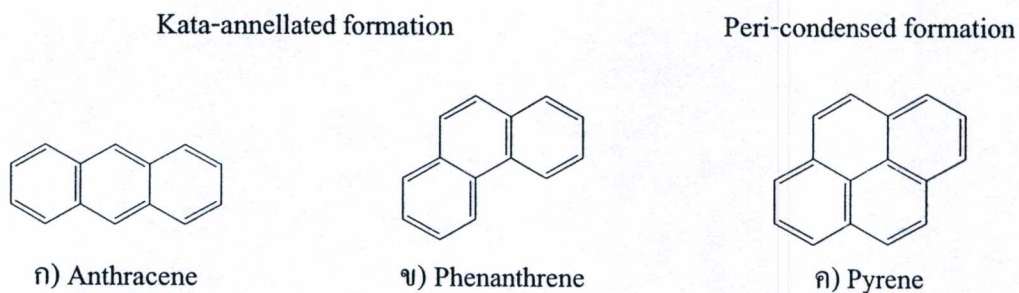
2) การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (incomplete combustion) เป็นการสลายตัวของชีวมวลด้วยความร้อน ในสภาวะที่เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์โดยมีออกซิเจนไม่เพียงพอ ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่าย จากผิวหน้าของวัสดุชีวมวล ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า เกิดปฏิกิริยา dehydration ได้ผลิตภัณฑ์ของถ่านคาร์บอน (char) และไอน้ำ ส่วนที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสหรือสูงกว่า จะเกิดปฏิกิริยา depolymerization ได้ผลิตภัณฑ์ คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ )

การเกิดสาร PAHs ขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์และอุณหภูมิ พบว่าที่อุณหภูมิสูง สารประกอบ PAHs จะประกอบด้วย unsubstituted parent PAHs เป็นส่วนใหญ่ เช่น กระบวนการเผาไหม้ของสารประกอบอินทรีย์ที่อุณหภูมิสูงที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่ การเผาไหม้จากโรงงานอุตสาหกรรม การเผาไหม้จากเตาเผาขยะ เป็นต้น ในขณะที่อุณหภูมิต่ำ (< 700 °C) จะประกอบด้วย parent PAHs และ alkyl-substituted PAHs ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป methyl derivatives ในเชื้อเพลิงฟอสซิลเกิดจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน เป็นระยะเวลาอันยาวนานที่อุณหภูมิต่ำและความดันสูง ซึ่ง PAH profile หรือ relative distribution ของสารประกอบ PAHs แต่ละชนิดอาจใช้บอกแหล่งกำเนิดของ PAHs ได้

PAH อาจมีหลายไอโซเมอร์ เนื่องจากวงเบนซีนสามารถจัดเรียงตัวในรูปแบบ kata-annellated formation หรือ peri-condensed formation โดย kata-annellated formation จะมี tertiary carbon atom อยู่ตรงกลางของ interlinked rings 2 วงที่สามารถจัดเรียงในรูปแบบทั้ง linearly annellated ได้แก่ Anthracene หรือ angularly annellated formation ได้แก่ Phenanthrene ส่วน peri-condensed

formation จะมี tertiary carbon atom บางส่วนอยู่ตรงกลางของ interlinked rings 3 วงได้แก่ Pyrene ดังแสดงในรูปที่ 2.1

จากการที่สาร PAHs มีวงเบนซีนหลายวงเป็นองค์ประกอบ ทำให้จำนวนไอโซเมอร์เพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โปเนนเชียล (ตารางที่ 2.1) นอกจากนี้ แต่ละ parent PAHs อาจมี oxygenate, nitrated และ sulphonated analogues มาสร้างพันธะทำให้เกิดเป็น PAHs ต่าง ๆ มากมาย



รูปที่ 2.1 การจัดเรียงตัวของสาร PAHs (Adapted from Zander, 1983)

ตารางที่ 2.1 สาร PAHs ที่มีจำนวนวงเบนซีน n วง (Zander, 1983)

N	Kata-annellated	Peri-condensed	Total
1	1	0	1
2	1	0	1
3	2	1	3
4	5	2	7
5	12	10	22
6	37	45	82
7	123	210	333
8	446	1002	1448

### 2.1.2 แหล่งกำเนิดสาร PAHs

แหล่งกำเนิดสาร PAHs แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

#### 1) แหล่งกำเนิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ (Natural sources)

เป็นแหล่งกำเนิดที่ก่อให้เกิดสาร PAHs ตามกระบวนการตามธรรมชาติ โดยไม่มีกิจกรรมของมนุษย์เข้าไปเกี่ยวข้อง เช่น การเกิดไฟฟ้า และภูเขาไฟระเบิด เป็นต้น

#### 2) แหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Anthropogenic sources)

เป็นแหล่งกำเนิดที่ก่อให้เกิดสาร PAHs ที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น แหล่งกำเนิดจากอาคารบ้านเรือนและที่อยู่อาศัย เกิดจากการประกอบอาหาร รวมทั้งการสูบบุหรี่, แหล่งกำเนิดจากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของสารอินทรีย์ การเผาถ่านหิน หรือโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงชีวมวล การเผาขยะ, แหล่งกำเนิดจากการคมนาคม เกิดจากการเผาไหม้จากรถยนต์ แหล่งกำเนิดจากเกษตรกรรม เกิดจากการเผาไหม้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เพื่อเตรียมพื้นที่การเพาะปลูก ได้แก่ การเผาฟางข้าว ชานอ้อย เป็นต้น ตัวอย่าง PAHs ที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แหล่งที่มาของสาร PAHs ที่สำคัญ (ATSDR, 1995 และ Keshtkar and Ashbaugh, 2007)

แหล่งที่มา (Source)	PAHs predominant
การเผาไหม้จากยานที่พังกาอาศัย	Acenaphthylene
ไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล ในรูปฝุ่น	Fluoranthene, Phenanthrene, Pyrene
ไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล ในรูปก๊าซ	Phenanthrene, Anthracene
ไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล ในรูปฝุ่น และก๊าซ	Acenaphthene, Fluorene, Phenanthrene
ถ่านลอย และถ่านหนัก	Phenanthrene
เตาเผาขยะเทศบาล	Benzo(g,h,i)perylene
เตาเผาขยะชุมชน	Fluoranthene, Benzo(a)fluoranthene, Benzo(g,h,i)perylene Indeno(1,2,3-c,d)pyrene, Phenanthrene, Chrysene
เตาเผาขยะทางการแพทย์	Benz(a)anthracene, Benzo(g,h,i)perylene
เตาเผาขยะแบบหมุน	Benz(a)anthracene, Phenanthrene
การใช้แก๊สจากบ้านเรือน	Chrysene, Pyrene, Fluoranthene
ควันบุหรี่	Benzo(a)pyrene
น้ำมันดิน (coal tar pitch)	Phenanthrene, Pyrene
การเผาไหม้ฟางข้าว	Indeno(1,2,3-cd)pyrene, Benzo(a)pyrene, Dibenzo(a,h)anthracene

### 2.1.3 การจำแนกแหล่งที่มาของสาร PAHs โดยใช้อัตราส่วนเฉพาะ

การบ่งชี้แหล่งที่มาของสาร PAHs สามารถจำแนกได้ โดยใช้อัตราส่วนเฉพาะของ PAHs จากงานวิจัยของ Li และ Kamens (1993), Guo และคณะ (2003), Daisey และคณะ (1986), Masclet และคณะ (1987), Rogge และคณะ (1993) และ Menichini และคณะ (1999) ได้ศึกษาอัตราส่วนเฉพาะของสารประกอบ PAHs ที่จับกับอนุภาคฝุ่น ซึ่งมาจากไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล และก๊าซโซลีน Jenkins และคณะ, (1996a, b) ได้ศึกษาอัตราส่วนเฉพาะของสารประกอบ PAHs ที่จับกับอนุภาคฝุ่น ซึ่งมาจากการเผาไหม้ของฟางข้าว ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบอัตราส่วนเฉพาะของสาร PAHs ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ (Yang และคณะ, 2006)

อัตราส่วนเฉพาะ	BaA/Chr	Flu/ (Flu+Pyr)	BgP/InP	BaP/BgP	BaP/BeP	BbF/BkF	InP/(BgP + InP)
1) ไอเสียเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน	-	-	3.5 <sup>a</sup>	1.25 <sup>b</sup>	0.31 <sup>c</sup>	-	0.17 <sup>d</sup>
2) ไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล	-	-	1.1 <sup>a</sup>	0.46- 0.81 <sup>c</sup>	0.45 <sup>c</sup>	-	0.3-0.7 <sup>c</sup>
3) การเผาไม้	0.62 <sup>e</sup> , 0.66-0.93 <sup>h</sup>	0.74 <sup>i</sup>	-	-	-	0.76-1.08 <sup>h</sup>	-
4) การเผาฟางข้าว	-	-	0.67 <sup>f</sup>	2.0 <sup>f</sup>	0.73 <sup>f</sup>	-	0.64 <sup>f</sup>
4.1) ช่วงที่มีการเผาฟางข้าว	-	-	-	-	-	-	-
-ฝุ่นขนาด < 0.1 µm	-	-	0.52	1.89	0.84	-	0.66
-ฝุ่นขนาด 0.1-3.2 µm	-	-	0.48	1.91	0.51	-	0.68
-ฝุ่นขนาด > 3.2 µm	-	-	0.44	1.08	0.37	-	0.69
-ในรูปก๊าซ	-	-	0.16	1.02	2.92	-	0.86
4.2) ช่วงที่ไม่มีการเผาฟางข้าว	-	-	-	-	-	-	-
-ฝุ่นขนาด < 0.1 µm	-	-	0.83	1.03	0.31	-	0.60
-ฝุ่นขนาด 0.1-3.2 µm	-	-	0.76	0.93	0.35	-	0.63
-ฝุ่นขนาด > 3.2 µm	-	-	0.69	0.64	0.49	-	0.62
-ในรูปก๊าซ	-	-	0.40	1.83	0.94	-	0.72

<sup>a</sup> Li และ Kamens (1993), <sup>b</sup> Masclet และคณะ (1987), <sup>c</sup> Menichini และคณะ (1999), <sup>d</sup> Daisey และคณะ (1986),

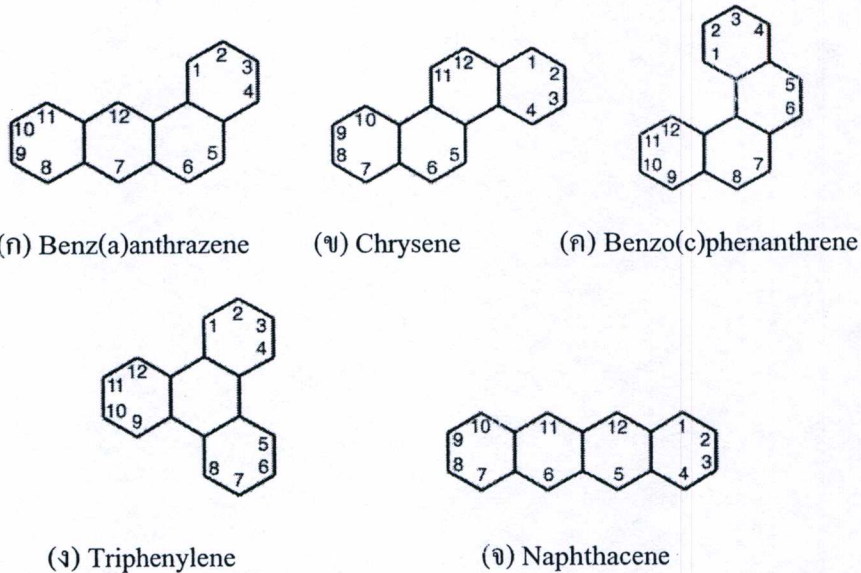
<sup>e</sup> Rogge และคณะ (1993), <sup>f</sup> Jenkins และคณะ (1996 a, b), <sup>i</sup> Grimmer และคณะ, (1983), <sup>h</sup> Dickhut และคณะ, (2000), <sup>g</sup> Kavouras และคณะ, (2001)

## 2.1.4 ความเป็นพิษของ PAHs

### 1) สารก่อเกิดมะเร็ง (Carcinogenicity)

สารประกอบ PAHs จัดเป็นสารมลพิษทางอากาศที่สำคัญกำหนดใน Clean Air Act ปี ค.ศ. 1990 ของประเทศสหรัฐอเมริกา และ International Agency for Research on Cancer (IARC) เนื่องจากสมบัติความเป็นสารที่อาจจะก่อหรือร่วมก่อให้เกิดมะเร็งได้ (IARC, 1984) อย่างไรก็ตาม สารประกอบ PAHs จะเป็นสารก่อมะเร็งหรือไม่ขึ้น ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของสาร PAHs ตัวอย่างเช่น สาร PAHs ที่มีวงอะโรมาติก 4 วง และมีมวลโมเลกุล 228 กรัมต่อโมล พบว่า Benzo(a)anthracene, Chrysene และ Benzo(c)phenanthrene เป็นสารก่อมะเร็ง ในขณะที่ Triphenylene และ Naphthacene ไม่เป็นสารก่อมะเร็ง (รูปที่ 2.2) นอกจากนี้ alkyl group ของวงอะโรมาติก จะมีผลต่อความสามารถในการก่อมะเร็ง ตัวอย่างเช่น Chrysene และ Methyl derivatives ของ Chrysene ดังแสดงในตารางที่ 2.4

U.S. EPA ได้กำหนดสาร PAHs ที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ 16 ชนิด (รูปที่ 2.3) โดยแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ตามความสามารถในการก่อมะเร็ง คือ สารที่น่าจะก่อมะเร็งในคน สารที่ก่อมะเร็งในคน และ สารที่ไม่ก่อมะเร็งในคน ดังแสดงในตารางที่ 2.5 และรูปที่ 2.3 (IARC, 1984, US.EPA, 1986)



รูปที่ 2.2 ไอโซเมอร์ทั้ง 5 ของ PAHs ที่มีวงเบนซีน 4 วง และมีน้ำหนักโมเลกุล 228

(Lee and Wright, 1980)

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบ Carcinogenic activity ของ chrysene และ methyl derivatives (Lee และคณะ, 1981)

Compound	Relative carcinogenicity
Chrysene	+
1-Methyl chrysene	0/+
2-Methyl chrysene	+
3-Methyl chrysene	+
4-Methyl chrysene	+
5-Methyl chrysene	++
6-Methyl chrysene	+

หมายเหตุ : 0 = non-carcinogenic, + = weekly carcinogenic, ++ = strongly carcinogenic

## 2) การออกฤทธิ์ยับยั้งหรือกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์

PAHs ออกฤทธิ์ยับยั้งหรือกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์หลายชนิด ที่สำคัญได้แก่

2.1) **Carboxylesterase** เป็นเอนไซม์ใน microsome พบได้ในเซลล์ของตับ ไต และเยื่อลำไส้ Anthracene, Phenanthrene, Benz(a)anthracene และ Benzo(a)pyrene มีฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของ Carboxylesterase ในเยื่อลำไส้ของหนูทดลอง

2.2) **Aldehyde dehydrogenase (ADH)** เป็นเอนไซม์ในไซโตพลาสซึมพบได้มากในเซลล์ตับ จากการศึกษาในหนู rat พบว่าความรุนแรงของการกระตุ้นการทำงานของ ADH มีความสอดคล้องกับฤทธิ์การก่อมะเร็งของ PAHs นั้น ๆ เช่น Benz(a)anthracene และ Benzo(a)pyrene สามารถกระตุ้นการทำงานของ ADH ได้มากกว่าและมีฤทธิ์ก่อมะเร็งที่แรงกว่า Anthracene, Chrysene และ Phenanthrene

2.3) **Aromatic hydrocarbon hydroxylases (AHH)** เป็นเอนไซม์ในกลุ่ม Microsomal mixed function oxidases และเป็น Cytochrome P-450 AHH มีหน้าที่เมตาบอไลซ์ของ PAHs ทุกชนิด PAHs ส่วนมากมีฤทธิ์กระตุ้นการทำงานของ AHH โดยผ่าน Ah receptor ซึ่งความสามารถในการกระตุ้นได้มากน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของ PAHs สปีชีส์และสายพันธุ์ของสัตว์

ตารางที่ 2.5 สมบัติและความเป็นสารก่อมะเร็งของสาร PAHs (IARC, 1984 และ U.S. EPA, 1986)

Compound	Molecular formula	Vapour pressure (mm Hg) <sup>a</sup>	K <sub>ow</sub>	Henry's law constant (atm-m <sup>3</sup> /mol)	Boiling point (°C)	Carcinogenic potency classification	
						U.S.EPA <sup>b</sup>	IARC <sup>c</sup>
Naphthalene	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	4.9 x 10 <sup>-2</sup>	3.50	4.83 x 10 <sup>-4</sup>	218	D	2B
Acenaphthylene	C <sub>12</sub> H <sub>8</sub>	2.9 x 10 <sup>-2</sup>	4.07	1.45 x 10 <sup>-2</sup>	265-280	D	3
Acenaphthene	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub>	4.47 x 10 <sup>-3</sup>	3.98	7.91 x 10 <sup>-2</sup>	278-279	N/A	3
Fluorene	C <sub>13</sub> H <sub>10</sub>	3.2 x 10 <sup>-3</sup>	4.18	1.0 x 10 <sup>-4</sup>	293-295	N/A	3
Phenanthrene	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	6.8 x 10 <sup>-4</sup>	4.45	2.56 x 10 <sup>-5</sup>	339-340	D	3
Anthracene	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	1.7 x 10 <sup>-5</sup>	4.45	1.77 x 10 <sup>-5</sup>	340	D	3
Fluoranthene	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	5.0 x 10 <sup>-6</sup>	4.90	6.5 x 10 <sup>-6</sup>	339-340	D	3
Pyrene	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	2.5 x 10 <sup>-6</sup>	4.88	1.14 x 10 <sup>-5</sup>	360-404	D	3
Benz(a)anthracene	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	2.2 x 10 <sup>-9</sup>	5.61	1.0 x 10 <sup>-6</sup>	435	B2	2B
Chrysene	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	6.3 x 10 <sup>-7</sup>	5.16	1.05 x 10 <sup>-6</sup>	442-448	B2	2B
Benzo(b)fluoranthene	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	5.0 x 10 <sup>-7</sup>	6.04	1.22 x 10 <sup>-5</sup>	482	B2	2B
Benzo(k)fluoranthene	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	9.56x10 <sup>-11</sup>	6.06	3.87 x 10 <sup>-5</sup>	472-480	B2	2B
Benzo(a)pyrene	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	5.0 x 10 <sup>-9</sup>	6.06	4.9 x 10 <sup>-7</sup>	493-496	B2	1
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	~10 <sup>-11</sup> -10 <sup>-6</sup>	6.58	6.95 x 10 <sup>-8</sup>	536	B2	2B
Dibenzo(a,h)anthracene	C <sub>22</sub> H <sub>14</sub>	~1.0 x 10 <sup>-10</sup>	6.84	7.3 x 10 <sup>-8</sup>	524	B2	2A
Benzo(g,h,i)perylene	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	~10 <sup>-11</sup> -10 <sup>-6</sup>	7.64	1.44 x 10 <sup>-7</sup>	525	N/A	3

หมายเหตุ : <sup>a</sup>ATSDR, 1995.

<sup>b</sup>U.S. Environmental Protection Agency

B2 : สารที่น่าจะก่อมะเร็งในคน (Probable human carcinogen)

D : ไม่สามารถจำแนกได้ (Not classifiable)

N/A : ไม่สามารถหาได้ (Not available)

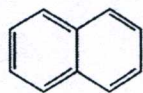
<sup>c</sup>International Agency for Research on Cancer

1 : สารที่น่าก่อมะเร็งในคน (Carcinogen to humans)

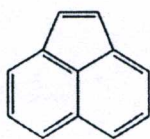
2A : สารที่น่าจะก่อมะเร็งในคน (Probably carcinogen to humans)

2B : สารที่อาจก่อมะเร็งในคน (Possibly carcinogen to humans)

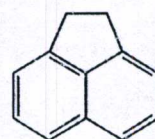
3 : ไม่สามารถจำแนกได้ (Not classifiable carcinogen to humans)



Naphthalene (128)



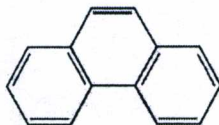
Acenaphthylene (152)



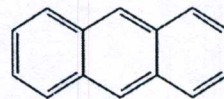
Acenaphthene (154)



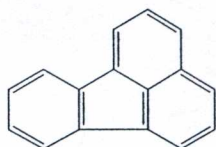
Fluorene (166)



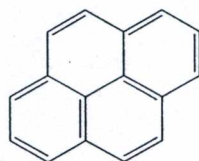
Phenanthrene (178)



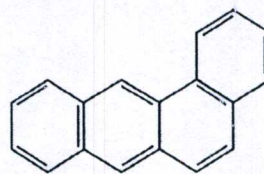
Anthracene (178)



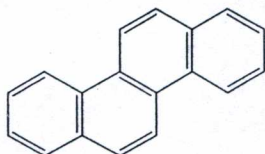
Fluoranthene (202)



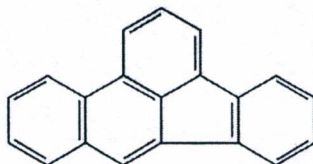
Pyrene (202)



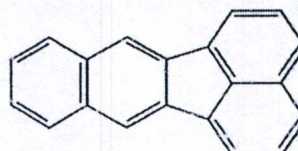
Benz(a)anthracene (228)



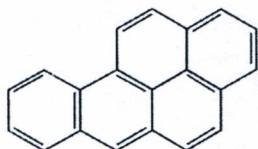
Chrysene (228)



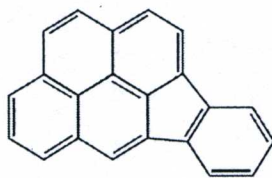
Benzo(b)fluoranthene (252)



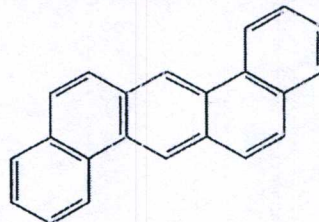
Benzo(k)fluoranthene (252)



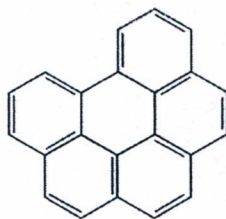
Benzo(a)pyrene (252)



Indeno(1,2,3-cd)pyrene (276)



Dibenzo(a,h)anthracene (278)



Benzo(g,h,i)perylene (276)

รูปที่ 2.3 โครงสร้างของสาร PAHs 16 ชนิด (U.S. EPA, 1986)

### 3) การเป็นสารก่อเกิดกลายพันธุ์ (Mutagenicity)

PAHs ที่เป็นสารก่อมะเร็งจะมีฤทธิ์เป็นสารก่อเกิดการกลายพันธุ์ด้วย และ PAHs ต้องถูกเมทาโบไลซ์โดย cytochrome P-450 เป็น epoxide ก่อนจึงสามารถรวมตัวกับ DNA ได้ผลของปฏิกิริยาที่มีความคงตัวสูง สามารถแยกได้จากสัตว์ทดลอง

### 4) การเสริมพิษ/การต่อต้านพิษ (Synergism/Antagonism)

โดยทั่วไป PAHs ที่เกิดจากแหล่งต่างๆ อยู่ในรูปของสารผสมมากกว่าในรูปของสารเดี่ยว และอาจมีสารชนิดอื่นที่ไม่ใช่ PAHs ปะปนอยู่ด้วยเช่น สาร nicotine ที่ปะปนกับ PAHs ในควันบุหรี่ เส้นใยแอสเบสตอสที่ปะปนกับ PAHs ในผงเขม่าจากโรงงาน เป็นต้น การเกิดปฏิกิริยาร่วมระหว่าง PAHs ด้วยกันเอง และระหว่าง PAHs กับสารอื่นๆ จึงอาจเกิดขึ้นได้ทั้งก่อนและภายหลังการได้รับเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์และสัตว์ เนื่องจาก PAHs ที่เป็นสารก่อมะเร็งและก่อกลายพันธุ์จะต้องถูกเมทาโบไลซ์เพื่อเปลี่ยนเป็นเมทาโบไลต์ที่มีความเป็นพิษและสามารถรวมตัวกับสารชีวโมเลกุลขนาดใหญ่ที่สำคัญของเซลล์ เช่น DNA, RNA และโปรตีนได้ ดังนั้นการยับยั้งหรือกระตุ้นเอนไซม์ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับเมทาบอลิซึมของ PAHs ไม่ว่าจะเนื่องจาก PAHs ด้วยกันเองหรือจากสารชนิดอื่นย่อมมีผลในการเสริมหรือต่อต้านความเป็นพิษของ PAHs ได้

Benzo(a)pyrene เป็นสารก่อมะเร็งที่มีฤทธิ์แรง จากการศึกษาในหนูที่ได้รับ Benzo(a)pyrene ร่วมกับ PAHs ชนิดอื่นที่มีฤทธิ์ก่อมะเร็งอย่างอ่อนหรือไม่มีฤทธิ์ก่อมะเร็ง ได้แก่ Benzo(e)pyrene, Benzo(ghi)pyrene, Fluoranthene และ Pyrene พบว่าสารเหล่านี้ทำให้ฤทธิ์ก่อมะเร็งของ Benzo(a)pyrene เพิ่มมากขึ้น โดย Benzo(e)pyrene, Fluoranthene และ Pyrene สามารถเสริมฤทธิ์ของ Benzo(a)pyrene ได้มากกว่า Benzo(g,h,i)perylene และพบว่าสารเหล่านี้ทำให้ปริมาณของสารประกอบระหว่าง Benzo(a)pyrene และ DNA เพิ่มมากขึ้นด้วย

### 5) ความเป็นพิษต่อระบบประสาท (Neurotoxicity)

ไม่มีรายงานความเป็นพิษต่อระบบประสาทจากการได้รับ PAHs ยกเว้น Naphthalene ที่มีรายงานว่าทำให้เกิดอาการทางประสาทในเด็กทารกได้ เช่น มีอาการเซื่องซึม การร้องไห้ลดลง มีดีซ่านในสมอง (kernicterus) อาการเหล่านี้เข้าใจว่าเกิดจากการขาดออกซิเจนในสมอง ซึ่งเป็นผลของภาวะโลหิตจางที่เกิดจากเม็ดเลือดแดงแตก (hemolytic anemia)

### 6) การระคายเคืองเบื้องต้น (Primary irritation)

PAHs บางชนิดสามารถก่ออาการระคายเคืองของผิวหนังและเยื่อเมือกต่างๆ ได้

Anthracene ทำให้เกิดอาการแพ้แสง (photosensitivity) ได้ทั้งในคนและในสัตว์ทดลอง มีรายงานว่าคนที่ได้สัมผัสกับ Anthracene เกิดการอักเสบอย่างเฉียบพลันของผิวหนัง คือ มีอาการบวมแดง แสบร้อน และคันในบริเวณที่ได้สัมผัส นอกจากนี้ Anthracene ยังทำให้เกิดการระคายเคืองของดวงตา เยื่อเมือกอักเสบ ตาแดง หนังตาบวม น้ำตาไหล แพ้แสง และมีการระคายเคืองของเยื่อทางเดินหายใจส่วนบนร่วมด้วย อาการเฉียบพลันเหล่านี้กลับหายเป็นปกติได้ในเวลาหลายวัน

หลังจากการได้รับ Anthracene หากได้รับเป็นระยะเวลาอันยาวนานผิวหนังส่วนที่ได้รับสัมผัสมีสีเข้มขึ้น ส่วนบนของผิวหนังหนาและดำ และมีการพองตัวของเส้นโลหิตฝอยของผิวหนังในบริเวณนั้น ในบางกรณีอาจมีการอักเสบของเยื่อทางเดินอาหารเกิดขึ้น แสงอัลตราไวโอเล็ตมีส่วนร่วมในการก่อความระคายเคืองของ Anthracene โดยแสงอัลตราไวโอเล็ตความยาวคลื่น 295 นาโนเมตร สามารถกระตุ้นให้เกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่าง DNA และ Anthracene เพิ่มขึ้น การทดสอบในหนู mouse สายพันธุ์ที่ไม่มีขน โดยการป้ายสารละลาย Anthracene บนผิวหนังส่วนหลังแล้วส่องด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลานาน 40 นาที พบว่ามีการอักเสบของผิวหนังอย่างรุนแรง และมากกว่าในหนูชนิดเดียวกันที่ได้รับแต่ Anthracene หรือแสงอัลตราไวโอเล็ตเพียงอย่างเดียว Pyrene ทำให้เกิดอาการแพ้แสงของผิวหนังได้อย่างรุนแรงในหนูตะเภา

Benzo(a)pyrene ทำให้เกิดการระคายเคืองของผิวหนังและเยื่อทางเดินหายใจ มีรายงานว่าคนที่ได้รับ Benzo(a)pyrene โดยการหายใจ มีอาการไอ หอบหืดอักเสบ การได้รับ Benzo(a)pyrene หรือน้ำมันดิบซึ่งมี PAHs หลายชนิดเป็นส่วนประกอบ โดยการสัมผัสทางผิวหนัง ทำให้เกิดอาการผื่นของผิวหนังคือ เป็นตุ่ม นอกจากนี้ ยังมีอาการแสบร้อน ไวต่อแสง และมีตุ่มหนองเกิดขึ้น อาการเหล่านี้รุนแรงมากขึ้นเมื่อได้รับแสงอัลตราไวโอเล็ต Benz(a)anthracene ทำให้เกิดอาการระคายเคืองของเยื่อทางเดินหายใจในมนุษย์ สำหรับในสัตว์ทดลองพบว่า Benz(a)anthracene ทำให้เกิดอาการระคายเคืองของเยื่อทางเดินหายใจ และการตรวจทางพยาธิของเยื่อทางเดินหายใจ พบว่ามีการบวม น้ำ มีการแทรกตัว (infiltration) ของเม็ดเลือดขาวชนิด granulocyte และ mononuclear cells เข้าไปในเยื่อทางเดินหายใจ และมีจำนวนเซลล์สร้างเส้นใย (fibroblast) เพิ่มขึ้น ในระยะท้ายของการทดลองพบว่ามีภาวะการเกิดพังผืด (fibrosis) ของเยื่อทางเดินหายใจด้วย

#### 7) ผลต่อการพัฒนาของตัวอ่อน (Embryotropic action)

ไม่พบรายงานผลของ PAHs ต่อการพัฒนาของตัวอ่อนในมนุษย์ มีเพียงรายงานผลของ Benzo(a)pyrene ในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมเท่านั้น หนูที่ได้รับ Benzo(a)pyrene ระหว่างการตั้งท้องทำให้การพัฒนาของตัวอ่อนผิดปกติไปคือ อัตราการรอดชีวิตของลูกหนูเมื่อคลอดลดลง การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักของลูกหนูที่มีชีวิตลดลง ตัวอ่อนมีการพัฒนาของระบบสืบพันธุ์อย่างผิดปกติ คือ เซลล์สืบพันธุ์มีรูปร่างผิดปกติ โดยการพัฒนาของเซลล์สืบพันธุ์ที่ผิดปกติของลูกหนูเหล่านี้ เมื่อโตเต็มที่ จะมีความสมบูรณ์ทางเพศลดลง และบางตัวเป็นหมัน

#### 8) ความเป็นพิษต่อภูมิคุ้มกัน (Immunotoxicity)

ข้อมูลความเป็นพิษต่อภูมิคุ้มกันของ PAHs ส่วนใหญ่เป็นข้อมูลของ Benzo(a)pyrene การศึกษาในสัตว์ทดลองพบว่าการได้รับ Benzo(a)pyrene ทางผิวหนัง สามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาของระบบภูมิคุ้มกันแบบ allergic contact hypersensitivity ทำให้การตอบสนองของ

ภูมิคุ้มกันที่มีต่อสารชนิดอื่นลดลง ชะลอการสร้างแอนติบอดี และสามารถเปลี่ยนแปลงการทำงานของ macrophages, T-cells

### 9) ความผิดปกติต่อการสืบพันธุ์ (Reproductive toxicology)

ไม่พบรายงานความเป็นพิษของ PAHs ที่มีต่อระบบสืบพันธุ์ในมนุษย์ และมี PAHs เพียง 2 ชนิด เท่านั้นที่มีรายงานว่าทำให้เกิดความผิดปกติของระบบสืบพันธุ์ คือ Acenaphthene และ Benzo(a)pyrene

Acenaphthene จากการทดสอบความเป็นพิษของ Acenaphthene ในหนู mouse ทั้งสองเพศ โดยการให้ Acenaphthene เข้ากระเพาะอาหารในขนาดตั้งแต่ 0-700 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว/วัน ติดต่อกันนาน 13 สัปดาห์ พบว่าหนูทดลองเพศผู้ไม่มีความผิดปกติใด ๆ ของระบบสืบพันธุ์ ในขณะที่หนูทดลองเพศเมียที่ได้รับ Acenaphthene ในขนาด 700 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว/วัน มีน้ำหนักของรังไข่ลดลงอย่างสอดคล้องกับการลดลงของการทำงานของรังไข่และมดลูก

Benzo(a)pyrene จากการทดลองในหนู mouse สายพันธุ์ CD-1 ที่ได้รับ Benzo(a)pyrene โดยการกรอกเข้ากระเพาะอาหารปริมาณ 160 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว/วัน ติดต่อกันนาน 10 วัน ทำให้อัตราการตั้งท้องจนครบกำหนดคลอดของแม่หนูลดลง และทำให้ลูกหนูที่รอดชีวิตทั้งหมดกลายเป็นหมันเมื่อเติบโตเต็มที่แล้ว นอกจากนี้ หนูที่ได้รับ Benzo(a)pyrene ปริมาณ 10 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว/วัน ขณะตั้งท้องมีผลทำให้รูปร่างของอวัยวะสืบพันธุ์ และการพัฒนาของเซลล์สืบพันธุ์ของลูกหนูผิดปกติไป แต่การทดสอบในแม่หนู mouse สายพันธุ์ Swiss ที่ได้รับ Benzo(a)pyrene ผสมในอาหารปริมาณ 133 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว/วัน ไม่พบว่าทำให้เกิดอาการผิดปกติใด ๆ ของระบบสืบพันธุ์

### 10) ความผิดปกติที่เกิดในทารก (Teratogenicity)

ไม่มีรายงานความผิดปกติที่เกิดในทารกของ PAHs ในมนุษย์ มีรายงานแต่เพียงของ Benzo(a)pyrene ในสัตว์ทดลอง

### 11) ความเป็นพิษต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (Mammalian toxicity)

PAHs มีความเป็นพิษเฉียบพลันต่ำในสัตว์ทดลอง การได้รับ PAHs ในระยะเวลาสั้นมักไม่ทำให้เกิดความผิดปกติของร่างกายอย่างเด่นชัดหรือรุนแรง  $LD_{50}$  ในการให้ PAHs ทางปากในหนู mouse และหนู rat มีค่ามากกว่า 1,000 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว ยกเว้น naphthalene ในหนู mouse มีค่า  $LD_{50}$  354-710 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว  $LD_{50}$  ของ PAHs ในสัตว์ทดลองดังแสดงในตารางที่ 2.6 รายงานความเป็นพิษเฉียบพลันของ PAHs ในมนุษย์และสัตว์ทดลองมีดังนี้

Anthracene มีฤทธิ์ในการกระตุ้นร่างกายให้มีความไวต่อแสงมากขึ้น (photosensitivity) ในมนุษย์ มีรายงานว่า Anthracene ทำให้เกิดอาการผิดปกติของผิวหนังคือ แสบร้อน คัน และมีอาการระคายเคืองของเยื่อปอดและหลอดลม

Chrysene การป้าย Chrysene บนผิวหนังของหนู mouse ปริมาณ 0.0125 มิลลิกรัม/ตารางเซนติเมตร 2 ครั้ง/วัน เป็นเวลา 2 วัน ทำให้ผิวหนังมีจำนวนสีผิว (melanocyte) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

Naphthalene ทำให้เกิดภาวะโลหิตจาง เนื่องจากเม็ดเลือดแดงแตก (hemolytic anemia) และต้อกระจก (cataract) ความผิดปกติทั้ง 2 อย่างนี้เกิดได้ทั้งเฉียบพลันและเรื้อรัง มีรายงานการตายของคนที่ยืนถูกเหม็นในขนาด 5 กรัม ผลการชันสูตรร่างผู้ตายพบว่าที่ปอดมีการคั่งของโลหิตและบวมน้ำที่ตับ มีการแทรกตัวของเม็ดเลือดขาวชนิด polymorphonuclear leucocytes และ lymphocytes พร้อมทั้งมีการเปลี่ยนแปลงของไขมันในเซลล์ตับ นอกจากนี้ยังมีรายงานการตายของเด็กอายุ 6 ปีที่ยืน Naphthalene ในขนาด 2.0 กรัม โดยการคำนวณพบว่า ปริมาณของ Naphthalene ค่าเท่ากับ 71.4-214.2 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว โดยคิดจากคนที่มีน้ำหนักตัวโดยเฉลี่ย 70 กิโลกรัม

ตารางที่ 2.6 LD<sub>50</sub> ของสาร PAHs ในสัตว์ทดลอง (กรมควบคุมมลพิษ, 2543)

PAHs	สปีชีส์	วิธีการได้รับสาร	LD <sub>50</sub> (มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว)
Naphthalene	หนู mouse	ทางปาก	354 - 710
		ฉีดเข้าท้อง	150 - 400
	หนู rat	ทางปาก	490 - 9,430
		ฉีดเข้าท้อง	1,000 - 1,600
Phenanthrene	หนู mouse	ทางปาก	700 - 1,000
		ฉีดเข้าท้อง	700
		ฉีดเข้าเส้นเลือด	56
Pyrene	หนู mouse	ฉีดเข้าท้อง	514 - 678
Fluoranthene	หนู mouse	ฉีดเข้าเส้นเลือด	100
	หนู rat	ทางปาก	2,000
	กระต่าย	ป้ายบนผิวหนัง	3,180
Chrysene	หนู mouse	ฉีดเข้าท้อง	> 320
Anthracene	หนู mouse	ทางปาก	18,000
		ฉีดเข้าท้อง	> 43
Benzo(a)pyrene	หนู mouse	ทางปาก	> 1,600
		ฉีดเข้าท้อง	250
		ฉีดเข้าใต้ผิวหนัง	50

### 2.1.5 การสลายตัวของ PAHs ในบรรยากาศ

ปริมาณและการกระจายตัวของสารประกอบ PAHs ขึ้นกับความคงตัวของสารประกอบ PAHs โดยทั่วไปสาร PAHs ในบรรยากาศมี 2 ลักษณะ คือ ก๊าซและอนุภาครวมตัวกับฝุ่น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าความดันไอของ PAHs เมื่อสารประกอบ PAHs ถูกปล่อยสู่บรรยากาศ อนุภาคเหล่านี้จะเข้าสู่กระบวนการหลายกระบวนการ ความเข้มข้นของ PAHs จะขึ้นอยู่กับชนิดของ PAHs แต่ละตัว ในการจับกับอนุภาคสารอินทรีย์ และปฏิกิริยาเคมี รวมถึงความคงตัวของสารนั้น (Pankow, 1991; Yamasaki และคณะ, 1982) การเปลี่ยนแปลงระหว่างก๊าซและอนุภาคของ PAHs จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการพาร์ทิชัน (partitioning ratio) ซึ่งสามารถแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้น PAHs ในรูปอนุภาคกับความเข้มข้น PAHs ในรูปก๊าซ โดยทั่วไปแล้ว PAHs ที่อุณหภูมิปกติทั่วไป มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง ค่าความดันไอลำต่ำ ค่าละลายน้ำได้น้อยมากและการสลายตัวในสิ่งแวดล้อมได้ต่างกัน

PAHs สามารถสลายตัวในบรรยากาศได้หลายวิธี ได้แก่

#### 1) การสลายตัวโดยแสง (Photodegradation)

กระบวนการสลายตัวเนื่องมาจากแสง (Photodegradation) เป็นกระบวนการสำคัญของการสลายตัวของ PAHs ในบรรยากาศ เป็นผลมาจากการกระตุ้นของแสง จากงานวิจัยของ Kamens และคณะ (1988, 1989) สารประกอบ PAHs สามารถดูดกลืนแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 300 – 420 nm ซึ่งเป็นการเกิด photo-oxidized ที่รวดเร็ว การสลายตัวของ PAHs จะขึ้นอยู่กับความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิ ในช่วงเวลาของวัน การสลายตัวในบรรยากาศของ PAHs ในอนุภาคของเขม่า (soot particles) แสดงถึง ค่าครึ่งชีวิตของ BaA, BeP, BgP, Ind และ BbF จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิในบรรยากาศมีค่าต่ำ ปริมาณแสงต่ำและปริมาณความชื้นต่ำ จากการศึกษาของ Panther และ คณะ (1999) พบว่า PAHs จะสลายตัวได้ดีในเดือนที่มีสภาพอากาศร้อน เนื่องจากมีชั่วโมงที่มีแสงสว่างมากกว่าและมีความเข้มข้นของแสงมากในบรรยากาศ โดยทั่วไป PAHs ในอากาศ ซึ่งส่วนใหญ่ถูกดูดซับอยู่บนเถ้าลอย (fly ash) เขม่า (soot) และผงถ่าน (carbon black) มีความแตกต่างกันอย่างมาก ถึงแม้ว่าเป็น PAHs สารกลุ่มเดียวกันก็ตาม คือมีค่าครึ่งชีวิตน้อยกว่า 1 ชั่วโมง ถึง 1,000 ชั่วโมง Behymer และ Hites (1988) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวโดยแสงของ PAHs ในเถ้าลอยในฤดูร้อนและหนาว จากการศึกษาพบว่าค่าครึ่งชีวิตของการสลายตัวของ PAHs จากปฏิกิริยาของแสง ไม่ว่าโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยวงอะโรมาติกกี่วงก็ตาม ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเถ้าลอย เช่น องค์ประกอบที่เป็นคาร์บอน พื้นที่ผิว และสี ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ค่าครึ่งชีวิตของ PAHs จากการเกิดปฏิกิริยาโดยแสงในเถ้าลอยสีต่าง ๆ (Behymer และ Hites, 1988)

สารประกอบ	White fly ash		Grey fly ash		Black fly ash	
	ฤดูร้อน	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	ฤดูหนาว
Fluoranthene	7.7 ชม.	23.0 ชม.	1.9 วัน	5.7 วัน	1.2 วัน	3.6 วัน
Pyrene	3.7 ชม.	11.0 ชม.	1.6 วัน	4.8 วัน	1.1 วัน	3.3 วัน
Benz(a)anthracene	15.0 นาที	45.0 นาที	17.0 ชม.	2.1 วัน	1.1 วัน	3.3 วัน
Chrysene	10.0 ชม.	1.30 วัน	2.3 วัน	6.9 วัน	1.0 วัน	3.0 วัน
Benzo(a)pyrene	15.0 ชม.	45.0 นาที	18.0 ชม.	2.3 วัน	20.0 ชม.	2.5 วัน
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	6.5 ชม.	20.0 ชม.	1.1 วัน	3.3 วัน	1.0 วัน	3.0 วัน
Benzo(g,h,i)perylene	1.9 ชม.	5.7 ชม.	2.5 วัน	7.5 วัน	23.0 hr	2.9 วัน

Butler และ Crossly (1981) ศึกษาค่าครึ่งชีวิตของ PAHs ในอนุภาคของเขม่า ภายใต้สภาวะที่มีแสง และมีความเข้มข้นของก๊าซ  $\text{NO}_2$  10 ppm พบว่า Benzo(a)pyrene มีค่าครึ่งชีวิต 168 ชั่วโมง, Benzo(g,h,i)perylene 195 ชั่วโมง, Benz(a)anthracene 264 ชั่วโมง, Pyrene 336 ชั่วโมง, Chrysene 624 ชั่วโมง, Fluoranthene 648 ชั่วโมง และ Phenanthrene 720 ชั่วโมง

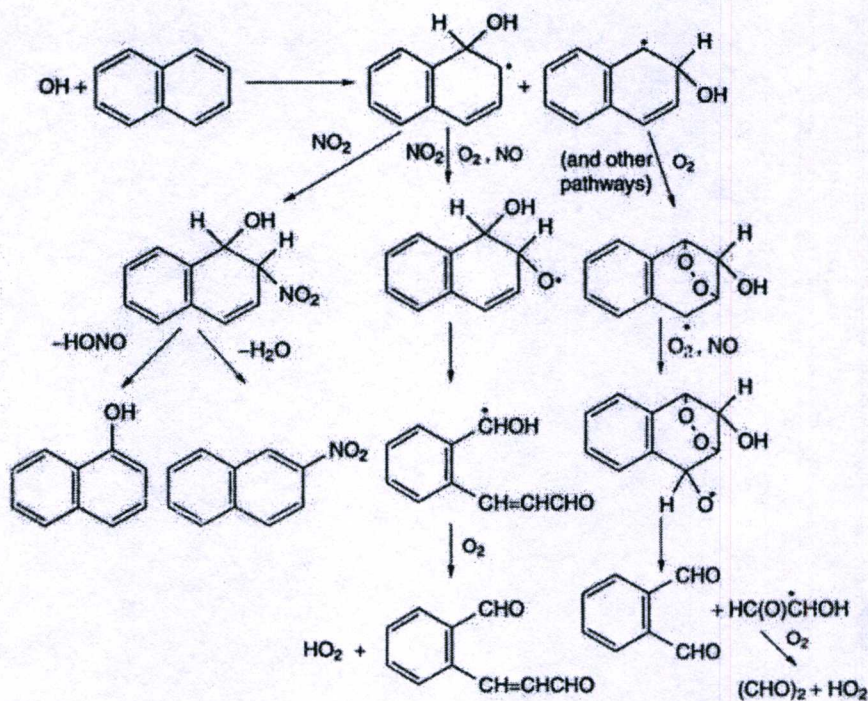
## 2) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยเคมีแสง (Photochemical oxidation)

การเปลี่ยนรูปจากปฏิกิริยา Photochemical oxidation มีความสำคัญต่อการสลายตัวของ PAHs ทั้งในรูปของก๊าซและในรูปของอนุภาค จากงานวิจัยของ Baek และคณะ (1991) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบ PAHs กับ  $\text{NO}_x$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$ , OH,  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$  และ peroxyacetyl nitrate ในบรรยากาศ ได้สารประกอบ oxy-, hydroxyl-, nitro- และ hydroxynitro-PAHs derivative จากงานวิจัยของ Holloway และคณะ (1987) และ Kamens และคณะ (1986) พบว่าสาร PAHs เกิดปฏิกิริยา Photochemical oxidation เกิดเป็นสารประกอบ nitrated PAHs, quinones, phenols และ dihydrodiols

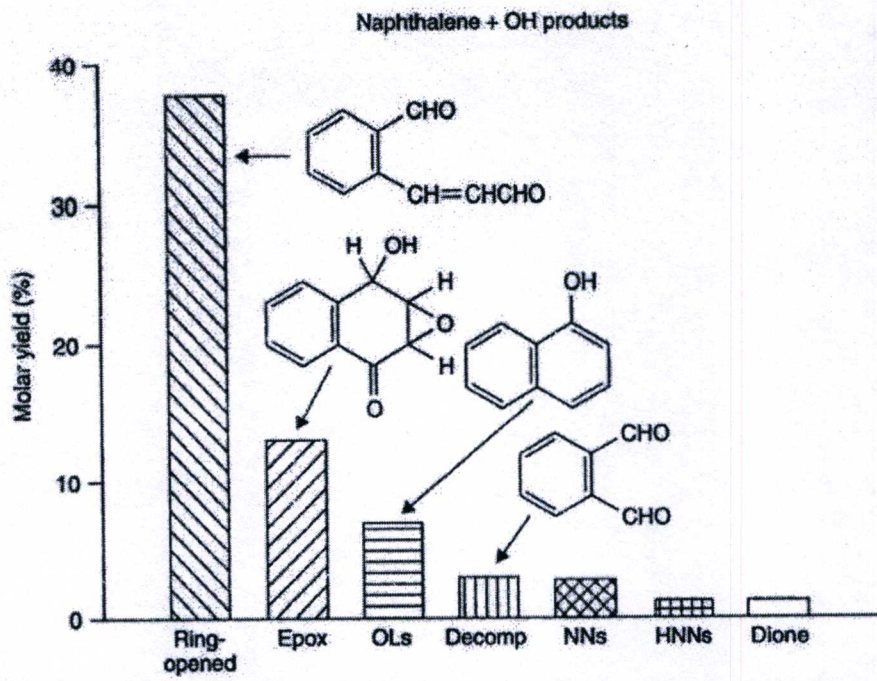
การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Hydroxyl radical (OH) และ Naphthalene สามารถแบ่งปฏิกิริยาได้เป็น 2 วิธี คือ 1) Hydroxyl radical (OH) เข้าทำปฏิกิริยากับ Naphthalene บริเวณตำแหน่งที่ 1 จากนั้นเกิดปฏิกิริยากับ  $\text{NO}_2$  บริเวณตำแหน่ง ortho กรณีการเกิด Dehydration ดึงเอา  $\text{H}_2\text{O}$  ออกจากปฏิกิริยา เกิดเป็น 2-Nitronaphthalene และกรณีเกิดการสูญเสีย Nitrous acid เกิดเป็น 1-naphthol นอกจากนี้ การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Hydroxyl radical (OH) และ Naphthalene บริเวณตำแหน่งที่ 2 สามารถเกิดได้เช่นเดียวกัน เกิดเป็น 2-Naphthol, 1-Nitronaphthalene, 2-Formylcinnamaldehyde

และ 2) Hydroxyl radical (OH) เข้าทำปฏิกิริยากับ Naphthalene บริเวณตำแหน่ง C-H หรือ C=C (ดังแสดงในรูปที่ 2.4)

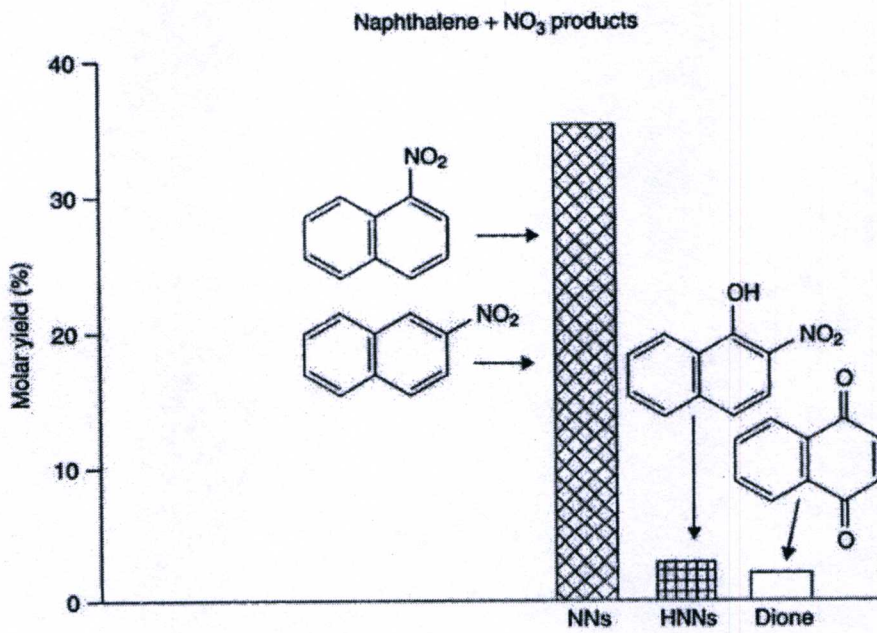
การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Hydroxyl radical และ Naphthalene ได้สารประกอบอะโรมาติกที่มีโครงสร้างแบบวงเปิด คือ 2-Formylcinnamaldehyde เกิด Molar yield ประมาณ 38 % และ Epox เกิด Molar yield ประมาณ 12 % ดังแสดงในรูปที่ 2.5 การเกิดปฏิกิริยาของ Naphthalene กับ NO<sub>3</sub> radical เกิดเป็น Nitrooxycyclohexadienyl-type radical ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับ NO<sub>2</sub> ถ้าเกิดปฏิกิริยาตรงตำแหน่งที่ 1 จะเกิดเป็น 1-Nitronaphthalene และ NO<sub>3</sub> radical เข้าทำปฏิกิริยากับ Naphthalene ตรงตำแหน่งที่ 2 จะเกิดเป็น 2-Nitronaphthalene ซึ่ง 1-Nitronaphthalene และ 2-Nitronaphthalene เกิด Molar yield เท่ากับ 35 % นอกจากนี้ NO<sub>3</sub> radical สามารถเกิดปฏิกิริยากับ OH radical-Naphthalene เกิดเป็น Hydroxynitronaphthalene ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.4 การเกิดปฏิกิริยาของ Naphthalene กับ Hydroxyl radical (Douben, 2003)



รูปที่ 2.5 การเกิดปฏิกิริยาของ Naphthalene กับ Hydroxyl radical product (Douben, 2003)



รูปที่ 2.6 การเกิดปฏิกิริยาของ Naphthalene กับ NO<sub>3</sub> product (Douben, 2003)

### 3) การทำปฏิกิริยาของสาร PAHs กับ Reactive gases

นอกจากปฏิกิริยา Photochemical oxidation สาร PAHs สามารถลดลงได้จากการ evaporative หรือ oxidative reactions กับ reactive gases ซึ่งก๊าซเหล่านี้อาจจะถูกปล่อยมาจากแหล่งเดียวกัน ตัวอย่างก๊าซเหล่านี้ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) ซัลเฟอร์ออกไซด์ ( $\text{SO}_x$ ) โอโซน ( $\text{O}_3$ ) และสารประกอบอื่น ๆ ของ Photochemical smog และได้มีงานวิจัยของ Lindskog (1983) ศึกษาปฏิกิริยาของสารประกอบ PAHs ที่เกิดจากการเผาไหม้ในอนุภาคเขม่า โดยให้สารประกอบ PAHs ทำปฏิกิริยากับ  $\text{NO}_2$  และ  $\text{O}_3$  ในสถานะที่ไม่มีแสง จากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของ PAHs ลดลง ซึ่งมีปัจจัยจากความเข้มข้นของก๊าซ เวลาในการทำปฏิกิริยา และความชื้นในบรรยากาศ เมื่อมีการเพิ่มกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ในอนุภาคเขม่าพบว่าปฏิกิริยาของ PAHs เพิ่มขึ้นมากกว่ามีแต่ก๊าซ  $\text{NO}_2$  และ  $\text{O}_3$  เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ Baek และคณะ (1991) ศึกษาปฏิกิริยาระหว่าง PAHs กับ  $\text{O}_3$  หรือ Peroxyacetyl nitrate เกิดเป็นสารประกอบ Diones สาร PAHs ทำปฏิกิริยากับก๊าซ  $\text{NO}_2$  เกิดเป็นสารประกอบ Nitro และ Dinitro-PAHs และสาร PAHs ทำปฏิกิริยากับ  $\text{SO}_2$  เกิดเป็นสารประกอบ Sulfonic acid

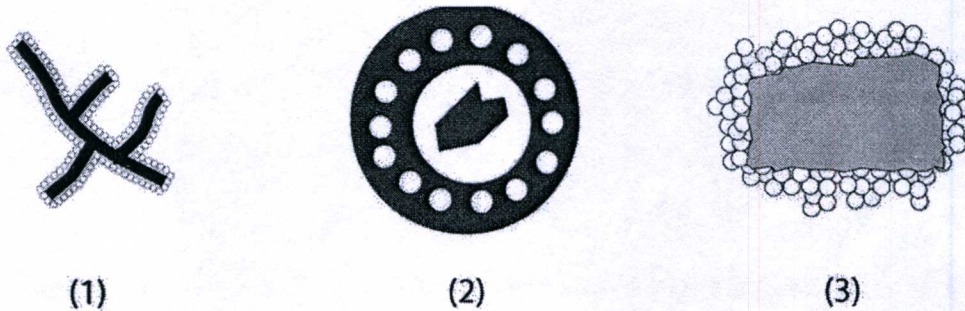
### 4) การระเหยกลายเป็นไอ

สารประกอบ PAHs มีแนวโน้มในการระเหยกลายเป็นไอเข้าสู่บรรยากาศได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความดันไอ (Vapor pressure) และอุณหภูมิในบรรยากาศ ซึ่งสาร PAHs ทุกชนิด ระเหยกลายเป็นไอได้น้อยมากที่อุณหภูมิห้อง เช่น Benzo(g,h,i)perylene มีค่าความดันไอ  $1.0 \times 10^{-10}$  มิลลิเมตรปรอท ที่ 20 องศาเซลเซียส Naphthalene มีค่าความดันไอที่ 1 มิลลิเมตรปรอท ที่ 53 องศาเซลเซียส และระเหิดได้ที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้น การกลายเป็นไอของ PAHs ที่อุณหภูมิห้องเกิดได้น้อยมากหรือไม่เกิดเลย

### 5) การรวมตัวของอนุภาคในบรรยากาศ

การกระจายตัวของ PAHs ในบรรยากาศโดยทั่วไปจะแตกต่างกันตามกระบวนการที่เกิดขึ้น ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการควบแน่นหรือการดูดซับ ทำให้พบ PAHs ใน 2 สถานะคือ สถานะก๊าซ และสถานะที่จับกับอนุภาคแขวนลอย (particle-bound PAHs, pPAHs) จากการศึกษาของ Chetwittayachan (2002) พบว่าสาร PAHs จะอยู่ในสถานะก๊าซที่อุณหภูมิสูงกว่า 150 องศาเซลเซียส และอยู่ในรูปที่ยึดเกาะกับอนุภาคของแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า จากการศึกษาโครงสร้างแบบชั้น (shell structure) สาร PAHs จะเกาะอยู่บนอนุภาคที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก จากนั้นสาร PAHs จะถูกปกคลุมด้วยสารกลุ่มระเหยง่ายชนิดอื่นอีกชั้นหนึ่ง นอกจากนี้ Venkataraman และคณะ (1999) ศึกษาความสัมพันธ์ของสาร PAHs ที่พบในเขตเมือง โดยได้จำแนกลักษณะของอนุภาคเป็น 3 ลักษณะ (ในรูปที่ 2.7) คือ

- 1) สาร PAHs ที่เกาะอยู่บนอนุภาคที่มีแกนเป็นธาตุคาร์บอน ซึ่งมีขนาดเล็กมาก คือ เล็กกว่า 0.1 ไมครอน
- 2) สาร PAHs ที่เกาะอยู่บนอนุภาคขนาดเล็กหรืออาจดูดซับบนอนุภาคที่มีขนาดระหว่าง 0.1-2.0 ไมครอน ที่ถูกห่อหุ้มด้วยสารประกอบในกลุ่มระเหยได้ง่าย
- 3) สาร PAHs ที่เข้าไปเกาะติดกับที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ขนาดระหว่าง 2-10 ไมครอน

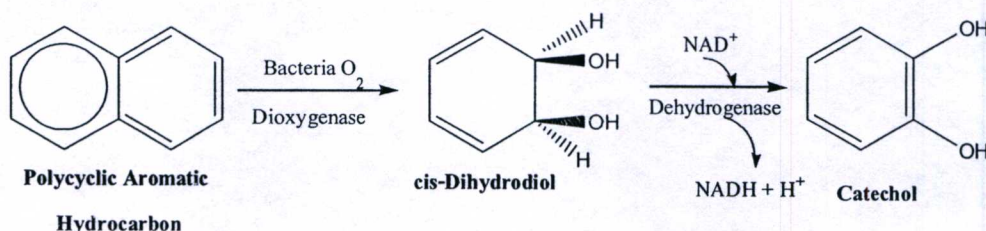


รูปที่ 2.7 ลักษณะของอนุภาคและการดูดซับของ PAHs บนอนุภาค (Chetwittayachan และคณะ, 2002)

การเปลี่ยนแปลงของสาร PAHs ในบรรยากาศระหว่างรูปแบบของการถูกกำจัดออกทางกายภาพ เช่น การตกสะสมแบบเปียกและแบบ จากงานวิจัยของ Baek และคณะ (1991) พบว่าการกระจายตัวของ PAHs มากที่สุดในอนุภาคฝุ่นขนาดที่มี 0.4 และ 1.1 ไมครอน นอกจากนี้ พบว่าอนุภาคฝุ่นที่มีขนาด 3.0-5.0 ไมครอน สามารถถูกกำจัดจากบรรยากาศ ด้วยการตกสะสมแบบเปียกและแบบแห้ง โดยส่วนใหญ่อนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอน มักเกาะกลุ่มกับอนุภาคขนาดเล็กหรืออนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งทำให้อนุภาคฝุ่นมีขนาดใหญ่ขึ้น การเพิ่มขนาดของอนุภาคฝุ่นปกติใช้เวลาเป็นวันถึงสัปดาห์ หลังจากนั้นจะเกิดการตกสะสมแบบเปียกและแบบแห้งในบรรยากาศ ส่วนอนุภาคฝุ่นที่มีขนาด 0.1-0.3 ไมครอน มีระยะเวลาคงตัวในบรรยากาศได้หลายวันหรือนานกว่านั้น ทำให้สามารถแพร่กระจายตัวได้ในระยะทางไกล ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ โดยทั่วไปการตกสะสมแบบแห้งจะคงตัวในบรรยากาศได้นานกว่าการตกสะสมแบบเปียก จากการศึกษาของ Bjørseth และ Olufsen (1983) พบว่า PAHs ในรูปของอนุภาคฝุ่นเกิดการกระจายตัวจากประเทศอังกฤษไปยังประเทศนอร์เวย์ และประเทศสวีเดน

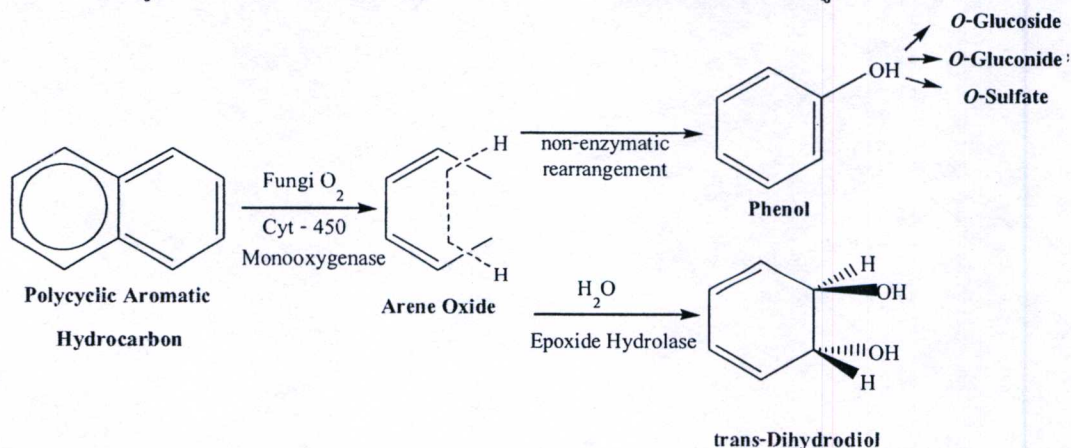
หลังจากที่ PAHs เกิดการตกตัวจากบรรยากาศลงสู่ผิวดินและแหล่งน้ำ สามารถถูกย่อยสลายหรือเปลี่ยนรูปโดยชีวภาพ (Biodegradation and biotransformation) ดังนี้

1) การย่อยสลาย PAHs โดยแบคทีเรีย เกิดเป็น cis-dihydrodiol โดยเอนไซม์ dioxygenase แล้ว cis-dihydrodiol จึงถูกย่อยสลายต่อไปได้เป็น catechol โดยเอนไซม์ dehydrogenase ปฏิกริยาการเติมหมู่ไฮดรอกซิลทั้งสองให้กับ PAHs ถือเป็นปฏิกริยาขั้นต้นของการเปิดวงอะโรมาติก ปฏิกริยานี้ยังถูกคะตะไลซ์โดยเอนไซม์ การเปิดวงอะโรมาติกออก เกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ 1) วิธี meta (meta pathway) และ 2) วิธี ortho (ortho pathway) ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ปฏิกริยาการย่อยสลาย PAHs โดยแบคทีเรีย

2) การย่อยสลาย PAHs โดยเชื้อรา PAHs ถูกคะตะไลซ์ด้วยเอนไซม์ไซโตโครม พี-450 (cytochrome P-450) เปลี่ยนเป็นอีพ็อกไซด์ (epoxide) หรือ แอรินออกไซด์ (arene oxide) แล้วจึงถูกคะตะไลซ์ด้วยเอนไซม์ epoxide hydrolase ได้ trans-dihydrodiol ผลของปฏิกริยาที่ได้นี้ตรงข้ามกับที่ได้จากการย่อยสลายโดยแบคทีเรียซึ่งได้ cis-dihydrodiol อีพ็อกไซด์ที่เกิดอาจจัดเรียงตัวภายในโมเลกุลโดยไม่ต้องอาศัยเอนไซม์ ได้เป็นสารประกอบฟีนอลแล้วจึงกำจัดออกจากเซลล์ของเชื้อราในรูปของ O-glucoside, O-gluconide หรือ O-sulfate ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ปฏิกริยาการย่อยสลาย PAHs โดยเชื้อรา

## 2.1.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของ PAHs

### 1) อุณหภูมิและฤดูกาล

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการกระจายตัวของ PAHs คือ อุณหภูมิ พบว่า PAHs มีปริมาณสูงเมื่ออุณหภูมิต่ำ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงจะทำให้ PAHs เปลี่ยนสถานะกลายเป็นก๊าซได้ดี

Smith และ Harrison (1996) ศึกษา PAHs ในบรรยากาศ 18 ชนิด โดยเก็บฝุ่น TSP และตัวอย่างก๊าซ ใน Birmingham ประเทศอังกฤษ โดยเก็บใน Birmingham University ซึ่งเป็นเขตเมือง และ Wasthills House ซึ่งเป็นเขตชนบท โดยเก็บในฤดูหนาวและร้อน พบว่า pPAHs ในเขตเมืองมีความเข้มข้นมากกว่าในชนบทประมาณ 3.8 เท่า และ Total PAHs (PAHs ที่ปรากฏอยู่ในรูปฝุ่นและในรูปของก๊าซ) มีค่ามากกว่า 4.3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาในฤดูร้อนและฤดูหนาวพบว่า pPAHs ในเขตเมืองในฤดูหนาวมีค่าความเข้มข้นสูงกว่าฤดูร้อน 4.9 เท่า และ PAHs ที่อยู่ในรูปของก๊าซมีค่าสูงกว่า PAHs ในรูปของฝุ่น 5.5 เท่า

Kiss และคณะ (1998) ศึกษาการกระจายของสารประกอบ PAHs ในอนุภาคแอโรซอลขนาดต่าง ๆ ในบรรยากาศ เก็บตัวอย่างฝุ่นละอองด้วย 9 stage cascade impactor พบว่าสารประกอบ PAHs มีการกระจายตัวแปรผันตามขนาดของน้ำหนักรวมโมเลกุล จำนวนวงอะโรมาติก และอุณหภูมิ เช่น ในช่วงฤดูหนาว เดือนมกราคม ค.ศ. 1996 ที่อุณหภูมิ -3 ถึง -5 องศาเซลเซียส มีการกระจายของสารประกอบ PAHs พบ Naphthalene, Fluorene, Phenanthrene, Anthracene, Fluoranthene ประมาณ 50% และ Pyrene พบ Benzo(a)anthracene, Chrysene, Benzo(b)fluoranthene และ Benzo(k)fluoranthene ประมาณ 60% พบ Benzo(a)pyrene, Indeno(1,2,3-cd)pyrene, Dibenz(a,h)anthracene และ Benzo(g,h,i)perylene ประมาณ 70% ในช่วงฤดูฝนเดือนตุลาคม ค.ศ. 1995 อุณหภูมิ 20 ถึง 25 องศาเซลเซียส มีการกระจายของสารประกอบ PAHs แบบ unimodal distribution พบว่า Benzo(a)anthracene ที่มีวงเบนซิน 4 วง ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักรวมโมเลกุลสูงกว่า Naphthalene ที่มีวงเบนซิน 2 วง และ Phenanthrene ที่มีวงเบนซิน 3 วง อย่างไรก็ตาม สารประกอบ PAHs ที่มีโครงสร้างเบนซิน 2-3 วง พบในฝุ่นละอองทุกขนาดคัดแยก ในฤดูหนาว PAHs ที่มีโครงสร้างวงเบนซิน 3-6 วง พบในอนุภาคแอโรซอล ขนาด 0.25 - 2.0 ไมครอน และในช่วงฤดูใบไม้ผลิ PAHs ที่มีโครงสร้างวงเบนซิน 4-6 วง พบในฝุ่นละอองขนาด 0.125 - 2.0 ไมครอน นอกจากนี้ ในช่วงฤดูใบไม้ผลิ และฤดูหนาวมีความเข้มข้นของสารประกอบ PAHs 3.1 และ 133.0 ng/m<sup>3</sup> ตามลำดับ

Fang และคณะ (2004) ศึกษา pPAHs และ gPAHs ในได้หวัน 2 แห่ง คือ บริเวณ Taichung Industrial Park (TIP) ซึ่งเป็นเขตอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ และบริเวณ Tunghai University Campus (THU) เป็น suburban โดยเก็บตัวอย่างฝุ่น TSP เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ในเดือนสิงหาคม ค.ศ. 2002 และเดือนมีนาคม ค.ศ. 2003 วิเคราะห์หา PAHs ในอนุภาคฝุ่น นอกจากนี้ ยังวิเคราะห์หาปัจจัยทางอุณหภูมิตามการใช้ Pearson correlation matrix ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของ PAHs มีความสัมพันธ์

กับอนุภาคนิวคลีโอล โดยพบความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ PAHs ทั้ง 2 แห่ง กับอนุภาคนิวคลีโอลแปรผกผันกัน พบว่า g-PAHs มีความสัมพันธ์กับอนุภาคนิวคลีโอล (correlation coefficients)  $R_{THU} = -0.459$  และ  $R_{TTP} = -0.604$  ส่วน Total-PAHs มีความสัมพันธ์กับอนุภาคนิวคลีโอล  $R_{THU} = -0.481$  และ  $R_{TTP} = -0.607$  และพบมีความสัมพันธ์กับ g-PAHs ต่ำกว่าคือ  $R_{THU} = -0.022$  และ  $R_{TTP} = -0.216$

Guo และคณะ (2003) ทำการศึกษาความเข้มข้น pPAHs 16 ชนิดในฝุ่น  $PM_{2.5}$  และ  $PM_{10}$  ในฮ่องกงในช่วงฤดูหนาว (พฤศจิกายน - มีนาคม) และฤดูร้อน (มิถุนายน - สิงหาคม) โดยเก็บตัวอย่างที่เป็นตัวแทนพื้นที่ที่มีการจราจรหนาแน่น และพื้นที่รวม คือมีทั้งย่านธุรกิจการค้า ที่อยู่อาศัย และเขตอุตสาหกรรม พบว่าทั้งพื้นที่ที่มีการจราจรหนาแน่น และพื้นที่รวม pPAHs ในช่วงฤดูหนาว มีค่าสูงกว่าในฤดูร้อนทั้งในฝุ่น  $PM_{2.5}$  และ  $PM_{10}$  ฤดูหนาวพื้นที่ที่มีการจราจรหนาแน่นมีค่า pPAHs ใน  $PM_{2.5}$  และ  $PM_{10}$  เท่ากับ 41.75 และ 54.72  $ng/m^3$  ตามลำดับ ฤดูร้อนมีค่าเท่ากับ 4.87 และ 5.82  $ng/m^3$  ตามลำดับ ส่วนพื้นที่รวมในฤดูหนาวมีค่า pPAHs ใน  $PM_{2.5}$  และ  $PM_{10}$  เท่ากับ 27.93 และ 38.63  $ng/m^3$  ตามลำดับ ฤดูร้อนมีค่าเท่ากับ 3.71 และ 4.67  $ng/m^3$  ตามลำดับ

Park และคณะ (2002) พบว่า PAHs มีปริมาณสูงในฤดูหนาว เนื่องจากมีการใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้เพื่อให้ความร้อนภายในที่อยู่อาศัย และประกอบกับปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ mixing layer height ต่ำ และ อนุภาคนิวคลีโอลต่ำ เป็นต้น

Bae และคณะ (2002) ศึกษาการกระจายตัวของสารประกอบ PAHs ในฝุ่นขนาด 0.1 ถึง 100 ไมครอน เมื่อมีการตกสะสมแบบแห้ง ในเกาหลีใต้ ในฤดูฤดูหนาว เดือนกุมภาพันธ์ และใบไม้ผลิ เดือนพฤษภาคม ค.ศ. 2000 ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของ Total pPAHs อยู่ในช่วงระหว่าง 22.9 และ 410  $ng/m^3$  ส่วนในฤดูหนาวมี Total pPAHs ที่มีการตกสะสมแบบแห้ง อยู่ในช่วงระหว่าง 10 และ 24  $\mu g m^{-2} day^{-1}$  และในฤดูใบไม้ผลิมี Total pPAHs ที่มีการตกสะสมแบบแห้ง อยู่ในช่วงระหว่าง 4.1 และ 8.2  $\mu g m^{-2} day^{-1}$

Possazini และคณะ (2004) ตรวจวัด PAHs 20 ชนิดในบรรยากาศเมืองโรม ประเทศอิตาลี ที่อยู่ในรูปของ PAHs ที่มีเบนซินมากกว่า 4 วง จะอยู่ในรูปฝุ่น ส่วน PAHs ที่มีวงแหวน 2-3 วง มากกว่าร้อยละ 90 อยู่ในรูปก๊าซ และเมื่อนำร้อยละของ PAHs ที่อยู่ในรูปก๊าซแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบกัน 3 ฤดู (ฤดูใบไม้ร่วง ฤดูหนาว และฤดูใบไม้ผลิ) พบว่า โดยส่วนใหญ่ Volatile-PAHs จะมีการกระจายตัวที่ไม่คงที่ใน ฤดูใบไม้ร่วง และฤดูใบไม้ผลิ พบว่า Pyrene อยู่ในรูปก๊าซร้อยละ 50 ในฤดูหนาว และปรากฏในรูปก๊าซร้อยละ 80 ในฤดูใบไม้ผลิ แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของ PAHs ในบรรยากาศขึ้นอยู่กับอนุภาคนิวคลีโอล ถ้าอนุภาคนิวคลีโอลสูง PAHs จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปก๊าซได้มากขึ้น

## 2) ความชื้นสัมพัทธ์

ความชื้นสัมพัทธ์ คืออัตราส่วนระหว่างมวลของไอน้ำที่มีอยู่จริงกับมวลของไอน้ำอิ่มตัว ณ อุณหภูมิและปริมาตรเดียวกัน คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์จะไม่ทำให้ ปริมาตรไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศเปลี่ยนแปลง แต่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ความชื้นสัมพัทธ์จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ในบรรยากาศเมื่อแสงมากขึ้น จะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้ความชื้นใน บรรยากาศหรือความชื้นสัมพัทธ์มากขึ้น เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงทำให้น้ำที่อนุภาค PAHs เกาะอยู่ มากขึ้นเพราะมีปริมาณน้ำในบรรยากาศมาก ความชื้นสัมพัทธ์จึงเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา photodegradation คือ เมื่อแสงมีความเข้มมากทำให้ความชื้นสัมพัทธ์สูง อัตราการสลายตัวของ PAHs ขึ้นกับน้ำในฝุ่นละออง

Kamens และคณะ (1998) ศึกษาผลกระทบจากค่าความชื้นในอากาศมีผลต่อ gas/particle partitioning ของสาร Semi-volatile organic compounds (SOCs) ที่แตกต่างกันของผิวสารอินทรีย์ (organic layer) ของ wood soot, diesel soot และ secondary aerosols ทำการศึกษาใน Outdoor environment chamber โดยศึกษาหาค่า partitioning coefficient (Kp) ของสาร SOCs ที่แตกต่างกัน โดยการวัดใน Outdoor teflon film chamber และนำค่ามาเปรียบเทียบกับค่า Kp ที่คำนวณได้จาก ทฤษฎีกับค่า activity coefficient และ ความดันไอ โดยใช้การประเมินค่า SOC activity coefficient จากปริมาณของน้ำในชั้นของสารอินทรีย์ที่รวมตัวกับอนุภาคของฝุ่นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ สมดุลในชั้นของสารอินทรีย์ที่แตกต่างกันในอนุภาคฝุ่นที่อยู่ในบรรยากาศ ได้จากคำนวณค่า activity coefficient ของน้ำในสารอินทรีย์ที่เกาะอยู่กับอนุภาคฝุ่น และค่าความชื้นสัมพัทธ์ใน บรรยากาศ พบว่าค่า SOC activity coefficient ของอนุภาคฝุ่นในเขม่าไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล ไม่ ขึ้นอยู่กับค่า relative humidity (RH) แต่สำหรับอนุภาคเขม่าที่เกิดจากการเผาไม้ (wood soot particle) ในส่วนของสารประกอบที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic compounds) หรือไม่ละลายน้ำมี แนวโน้มในการดูดซับกับสารอินทรีย์ใน wood soot particles ได้ดี เช่น alkanes และ polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) พบว่าค่า SOC activity coefficient จะเพิ่มขึ้น เมื่อ relative humidity (RH) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่สำหรับพวก wood soot particles SOCs ที่มีความเป็นขี้ เช่น n-alkanoic acids และหมู่แทนที่ของ phenol ใน wood soot particles พบว่า SOC activity coefficient มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อค่า RH เพิ่มขึ้น ยกเว้นพวก wood smoke particle เป็นสารประกอบที่มีขี้ พบว่าค่า SOC activity coefficient มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบกับ SOCs ที่ไม่มีขี้ สรุปได้ ว่า ความชื้นในอากาศมีผลต่อการแบ่งแยกชั้นระหว่าง PAHs ในรูปของก๊าซและในรูปของฝุ่น ใน ส่วนสารประกอบที่ไม่ชอบน้ำของแอโรซอลที่มีขี้

### 3) ความเร็วและทิศทางลม

ความเร็วของลมมีผลต่อความเข้มข้นของ PAHs โดยเมื่อความเร็วลมสูง จะทำให้ PAHs เกิดการกระจายตัวได้ดี ความเข้มข้นจะลดต่ำลง แต่ถ้าความเร็วลมต่ำ จะทำให้ความเข้มข้นมลพิษสูง Chaloulakou และคณะ (2003) ตรวจสอบความเข้มข้นของ  $PM_{10}$  และ  $PM_{2.5}$  และปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา ในเมือง Athens ประเทศกรีซ พบว่าฝุ่น  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  และ  $PM_{10-2.5}$  มีความสัมพันธ์กับความเร็วลมและอุณหภูมิ โดย  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  และ  $PM_{10-2.5}$  มีความสัมพันธ์แบบผกผันกับความเร็วลม มีค่า R (correlation coefficient) เท่ากับ -0.43, -0.54 และ -0.19 ตามลำดับ และจากการศึกษาพบว่าฝุ่น  $PM_{10}$  และ  $PM_{2.5}$  มีค่าสูงกว่า  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  และ  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ที่ความเร็วลมมีค่าต่ำกว่า  $2.0 \text{ m/s}$

### 4) แสง

PAHs สามารถเกิดปฏิกิริยา photodegradation ด้วยแสง ซึ่งเกิดจาก 2 กระบวนการคือ กระบวนการ photolysis โดยตรง จากแสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า  $290 \text{ nm}$  และกระบวนการ photolysis ทางอ้อมโดย oxidizing agent เช่น  $\bullet\text{OH}$ ,  $\text{O}_3$  และ  $\text{NO}_3$  ในอากาศ โดยทั่วไปแล้ว photolysis ทางอ้อม หรือ photooxidation เป็นกระบวนการที่สำคัญกว่ากระบวนการ photolysis โดยตรง และ PAHs แต่ละชนิดที่ดูดซับบนเขม่าที่เกิดปฏิกิริยากับ  $\text{NO}_x$  พบว่ามีค่าครึ่งชีวิตของการสลายตัวตั้งแต่ 3.7-30 วัน และพบว่าการสลายตัวของ PAHs จะช้าเมื่อความเข้มของแสงน้อย (IPCS, 1998) จากงานวิจัยของ Kamens และคณะ (1985) ทำการศึกษาหาค่าอัตราการสลายตัวของ PAHs ที่มีมวลโมเลกุลมากกว่า 228 กรัมต่อโมล ของอนุภาคควันจากการเผาไหม้ของไม้กับก๊าซโอโซน ( $\text{O}_3$ ) หรือกับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $\text{NO}_2$ ) ในสถานะที่มีแสงแดดและในสถานะที่ไม่มีแสงแดด ผลการวิจัยแสดงถึงความเข้มข้นของ PAHs ในบรรยากาศในอนุภาคควันที่เกิดจากการเผาไหม้ของไม้ในสถานะที่ไม่มีแสงแดด จะมีค่าคงที่ แต่จะสลายตัวได้อย่างรวดเร็วในสถานะที่มีแสงแดด

### 5) ความกดอากาศ

เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมายังไม่พบความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างความกดอากาศและสาร PAHs การศึกษาของ Fang และคณะ (2004) ศึกษา p-PAHs ในไต้หวัน โดยเก็บตัวอย่างฝุ่น TSP เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และวิเคราะห์หาสาร PAHs ในฝุ่นพร้อมวิเคราะห์ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา โดย Pearson correlation matrix พบว่าไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างสาร PAHs และความกดอากาศ

## 2.2 ฝุ่นละออง (Particulate matter)

ฝุ่นละอองในบรรยากาศ เป็นอนุภาคที่มีทั้งเป็นของแข็งและของเหลว ซึ่งแพร่กระจายอยู่ในอากาศ โดยทั่วไปมีขนาดตั้งแต่ 0.0002 ไมครอน (ขนาดใกล้เคียงกับโมเลกุลของสสาร) จนถึงขนาดใหญ่กว่า 500 ไมครอน ฝุ่นละอองขนาดใหญ่สามารถแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศ 2-3 นาที จะตกลงสู่พื้นด้วยแรงดึงดูดของโลก และแรงลม ฝุ่นละอองที่แขวนลอยอยู่ในอากาศได้นานมักเป็น ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน เนื่องจากมีความเร็วในการตกสู่พื้นต่ำ หากมีแรงกระทำจากภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น การไหลเวียนของอากาศ และกระแสลม จะทำให้สามารถแขวนลอยอยู่ในอากาศได้นานขึ้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

### 2.2.1 กลไกการเกิดฝุ่นละออง

กระบวนการเกิดฝุ่นละออง มี 2 ชนิด คือ 1) ละอองไอปฐมภูมิในบรรยากาศ (Primary aerosol) เป็นอนุภาคของแข็งหรือของเหลวในบรรยากาศ เช่น ฝุ่นละอองจากทะเลทราย หรือผิวดิน ที่แห้ง คาร์บอนไฟ และเขม่าดำ 2) ละอองไอทุติยภูมิในบรรยากาศ (Secondary aerosol) ขณะที่ถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศในรูปก๊าซ และไอของสารระเหย จากนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นอนุภาคของแข็ง หรือของเหลว เมื่อมีความเข้มข้นเกินค่าสมดุลของความดันไอระเหย (equilibrium vapor pressure)

### 2.2.2 แหล่งกำเนิดของฝุ่นละอองในบรรยากาศ

ฝุ่นละออง สามารถแบ่งแหล่งกำเนิดเป็น 2 ประเภท คือ

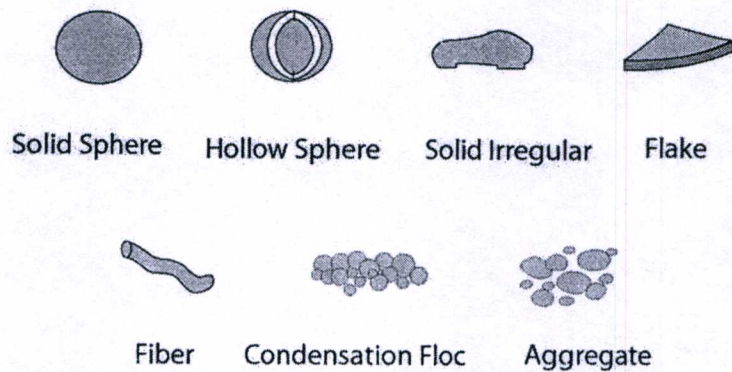
1) ฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (Natural sources) ได้แก่ ดิน ทราย หิน ละอองไอน้ำ เขม่าควันจากไฟป่า และละอองเกลือจากน้ำทะเล ซึ่งมีกลไกในการเกิดแตกต่างกัน ส่งผลทำให้เกิดอนุภาคที่มีขนาด และองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน ฝุ่นหยาบเป็นอนุภาคที่มีองค์ประกอบของเปลือกโลก ประกอบด้วยออกไซด์ของเหล็ก แคลเซียม ซิลิกอน แคลเซียม และอลูมิเนียม และธาตุอื่นๆ อนุภาคที่พบบริเวณชายฝั่งทะเล ประกอบด้วย โซเดียมคลอไรด์จากละอองเกลือ ฝุ่นละอองประกอบด้วย ซัลเฟต ไนเตรต แอมโมเนีย สารประกอบอินทรีย์คาร์บอน และอินทรีย์คาร์บอน และโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ โดยทั่วไปฝุ่นละอองมีแนวโน้มว่ามีสภาพเป็นกรด เนื่องจากมีซัลเฟตเป็นองค์ประกอบ

2) ฝุ่นละอองที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์สร้างขึ้น (Anthropogenic sources) โดยทั่วไปเป็นฝุ่นขนาดเล็ก ได้แก่ ฝุ่นจากการคมนาคม เช่น รถบรรทุกหิน ดิน ทราย ซีเมนต์ และเขม่าจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล เป็นต้น การก่อสร้าง เช่น อาคาร สิ่งก่อสร้าง การปรับปรุงสาธารณูปโภค การก่อสร้างอาคารสูง การรื้อถอน ทำลายอาคารหรือสิ่งก่อสร้าง เป็นต้น และอุตสาหกรรม เช่น การทำปูนซีเมนต์ การโม่บดหรือย่อยหิน และอื่น ๆ ฝุ่นที่เกิดจากโรงงาน

อุตสาหกรรม กระบวนการเผาไหม้ และกระบวนการผลิต มีลักษณะแตกต่างกัน ได้แก่ ขนาดของฝุ่น ปริมาณหรือความเข้มข้น รูปร่าง ความหนาแน่น และคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น การนำไฟฟ้า (conductivity) การกัดกร่อน (corrosive) การดูดความชื้น (hygroscopic) ความไวต่อปฏิกิริยา (reactivity) และความเป็นพิษ (toxicity) เช่น แอสเบสตอส ตะกั่ว ไฮโดรคาร์บอน กัมมันตรังสี รวมทั้ง ฟุ้ง (fume) หมอกน้ำค้าง (mist) และควัน (smoke) ที่เกิดพร้อมกับกระบวนการสันดาปหรือให้ความร้อน

### 2.2.3 ขนาดของฝุ่นละออง (Particle size)

ขนาดของอนุภาค หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคฝุ่น กรณีที่เป็นอนุภาคทรงกลม แต่โดยทั่วไปอนุภาคฝุ่นมีรูปร่างหลายอย่าง นอกจากทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ดังนั้น อนุภาคที่ไม่ใช่ทรงกลมมักบอกขนาดที่เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (Equivalent diameter) โดยเทียบกับ Project area พื้นที่ผิว ปริมาตร และมวล



รูปที่ 2.10 รูปร่างของอนุภาคฝุ่นต่างๆ

(<http://www.epa.gov/air/oaqps/eog/bces/module3/diameter/diameter.htm>)

ฝุ่นละอองสามารถแบ่งตามขนาดออกเป็น 4 ประเภท (US EPA, 1996b) คือ

- 1) **ฝุ่นละอองรวม (Supercoarse particles)** เป็นอนุภาคฝุ่นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 100 ไมครอน
- 2) **ฝุ่นหยาบ (Coarse particles)** เป็นอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2.5-10 ไมครอน มีแหล่งกำเนิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ การจราจร การขนส่งวัสดุฝุ่นจากกิจกรรมการบด ข่อยหิน การทำเหมืองแร่ เป็นต้น
- 3) **ฝุ่นละเอียด (Fine particles)** เป็นอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.1-2.5 ไมครอน มีแหล่งกำเนิดจากควันเสียของรถยนต์ โรงไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม การเผาชีวมวลใน

ที่โล่ง การเกิดไฟฟ้า การหุงต้มอาหาร โดยใช้ฟืน นอกจากนี้ยังเกิดจากจากก๊าซ  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  และ VOCs จะทำปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่นในอากาศเกิดการรวมตัวกับก๊าซ ในสภาวะที่มีความดันไอดำ

4) **ฝุ่นละเอียดมาก (Ultrafine Particles)** เป็นอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.1 ไมครอน มีแหล่งกำเนิดจากการรวมตัวของไอน้ำในช่วงระหว่างที่เกิดการเผาไหม้ในช่วงที่มีอุณหภูมิสูง ๆ

#### 2.2.4 การแพร่กระจายของฝุ่นละอองในบรรยากาศ

การกระจายตัว (Size distribution) ของอนุภาคฝุ่นละออง จะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และความหนาแน่นของฝุ่น โดยทั่วไปนิยมแสดงค่าในรูปแอโรไดนามิกไดเอมิเตอร์ (Aerodynamic diameter,  $D_p$ ) ซึ่งเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่มีความหนาแน่นในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีความเร็วตกกลับในบรรยากาศเท่ากับของอนุภาค ซึ่งการกระจายของอนุภาคฝุ่นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$SD = n_N = \frac{dN}{dD_p} = \frac{dC_i}{d \log D_p} \quad (2.1)$$

เมื่อ

SD	=	การกระจายตัวของฝุ่นละออง ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
$n_N$	=	ปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละออง ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
$D_p$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่นละออง ( $\mu\text{m}$ )
$dD_p$	=	ส่วนต่างของขนาดในแต่ละชั้น
$d \log D_p$	=	$\log$ ขนาดชั้นบน - $\log$ ขนาดชั้นล่าง
$dC_i$	=	ความเข้มข้นของ PAHs ในแต่ละชั้น ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

การกระจายตัวของฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ ในบรรยากาศในบริเวณพื้นที่ต่าง ๆ เช่น เขตเมือง หรือพื้นที่ใกล้เคียง ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ระดับนาโนเมตรจนถึงระดับ 100 ไมโครเมตร โดยส่วนใหญ่มีแหล่งกำเนิดจากการเผาไหม้ เช่น รถยนต์ โรงไฟฟ้าถ่านหิน การเผาวัสดุจำพวกไม้ เป็นต้น ขนาดที่แตกต่างของฝุ่นละออง สามารถบอกถึงแหล่งที่มา หรือพฤติกรรมต่าง ๆ เช่น การแขวนลอยในอากาศ การเกิดปฏิกิริยาโดยแสง เคมี และสภาพแวดล้อม เป็นต้น ซึ่งสามารถคำนวณการแพร่กระจายโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ และแสดงผลในรูปแบบของลักษณะการกระจายตัวของฝุ่นละอองเพื่ออธิบายพฤติกรรมของฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ

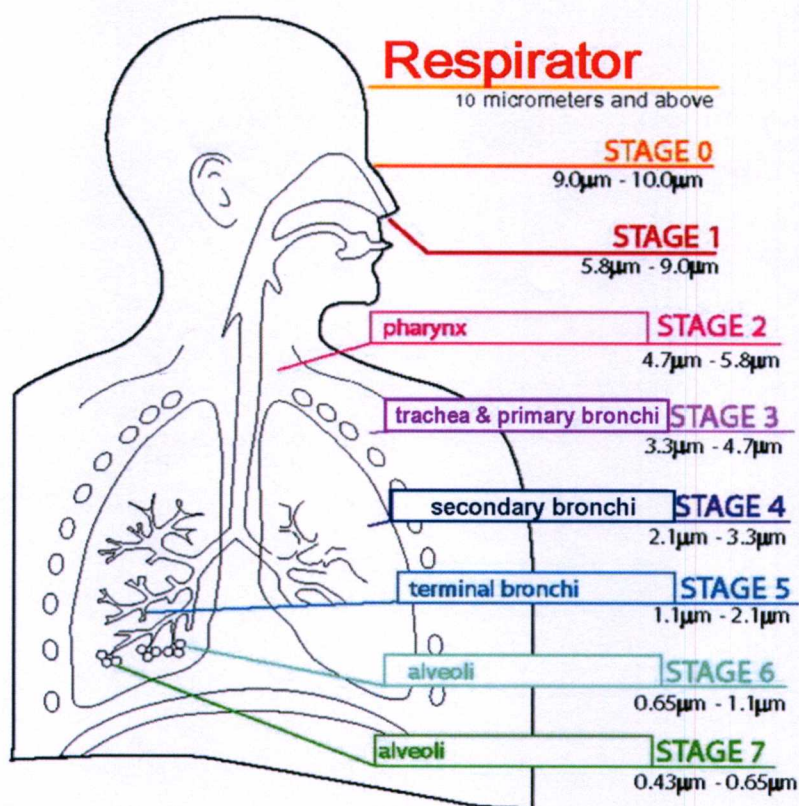
### 2.2.5 ผลกระทบของฝุ่นละอองในบรรยากาศ

1) **ผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย** ฝุ่นละอองจะทำให้เกิดอาการระคายเคืองตา การหายใจเอา ฝุ่นละอองเข้าไปในระบบทางเดินหายใจ โดยฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่กว่า 15 ไมครอน จะถูกจับที่ ระบบทางเดินหายใจส่วนบน ในส่วนของจมูกและลำคอ ทำให้ระคายเคือง แสบจมูก ไอจาม มี เสมหะ ซึ่งจะถูกขับออกมาพร้อมกับเสมหะ ส่วนฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน จะเป็น อันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ เพราะสามารถแทรกตัวลึกเข้าไปถึงระบบทางเดินหายใจ ส่วนล่างเข้าไปในเนื้อเยื่อปอด หรือมีการสะสมของฝุ่นในถุงลมปอด ทำให้การทำงานของปอด เสื่อมลง ทำให้หลอดลมอักเสบ (bronchitis) เกิดหอบหืด (asthma) ถุงลมโป่งพอง (emphysema) และปอดบวม (pneumonia) โดยแบ่งขนาดของฝุ่นละอองที่มีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ ออกเป็น 8 ระดับ คือ ฝุ่นละอองที่มีขนาด 10.0-9.0 ไมครอน (stage 0) ฝุ่นละอองขนาด 9.0-5.8 ไมครอน (stage 1) เข้าสู่ทางจมูก และตกสะสมบริเวณ โพรงจมูก จากนั้นฝุ่นละอองขนาด 5.8-4.7 ไมครอน (stage 2) เข้าสู่บริเวณคอหอย (pharynx) ซึ่งเป็นทางเชื่อมระหว่างปาก โพรงจมูกและหลอด อาหาร ฝุ่นละอองขนาดระหว่าง 4.7-3.3 ไมครอน (stage 3) เข้าสู่บริเวณหลอดลม (trachea) และ ท่อหลอดลมคอระดับที่หนึ่ง (primary bronchi) ฝุ่นละอองขนาดระหว่าง 3.3-2.1 ไมครอน (stage 4) เข้าสู่บริเวณท่อหลอดลมระดับสอง (secondary bronchi) ฝุ่นละอองขนาดระหว่าง 2.1-1.1 ไมครอน (stage 5) เข้าสู่บริเวณระดับปลายแขนงของหลอดลม (terminal bronchi) ฝุ่นละออง ขนาดระหว่าง 1.1-0.65 ไมครอน (stage 6) และ 0.65-0.43 ไมครอน (stage 7) เข้าสู่บริเวณถุงลม ปอด (alveoli) ดังแสดงในรูปที่ 2.11

2) **ผลกระทบต่อทัศนวิสัย** ฝุ่นละอองลดความสามารถในการมองเห็น ทำให้ทัศนวิสัยไม่ดี เนื่องจากฝุ่นละอองในบรรยากาศเป็นอนุภาคของแข็งที่ดูดซับและหักเหแสงได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ขนาด ความหนาแน่น และองค์ประกอบของฝุ่นละอองนั้น ๆ

3) **ผลกระทบต่อวัตถุและสิ่งก่อสร้าง** ฝุ่นละอองในบรรยากาศ มีคุณสมบัติทางกายภาพและ ทางเคมีที่ต่างกัน สามารถส่งผลกระทบต่อวัตถุและสิ่งก่อสร้างได้ เช่น การกัดกร่อนผิวหน้าของ โลหะ การทำลายผิวหน้าของสิ่งก่อสร้าง การเสื่อมคุณภาพของผลงานทางศิลปะ เป็นต้น

4) **ผลกระทบต่อพืช** ฝุ่นละอองลดความเข้มของแสง ทำให้ลดการสังเคราะห์แสงของพืช (photosynthesis)



รูปที่ 2.11 ผลกระทบของฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ ต่อระบบทางเดินหายใจ

### 2.2.6 มาตรฐานฝุ่นละออง

ประเทศสหรัฐอเมริกา U.S. EPA (United State Environmental Protection Agency) ได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานของฝุ่นรวม (Total suspended particulate) และฝุ่น  $PM_{10}$  แต่เนื่องจากการศึกษาวิจัยฝุ่นขนาดเล็กนั้นเป็นอันตรายต่อสุขภาพมากกว่าฝุ่นรวม เนื่องจากสามารถผ่านเข้าไประบบทางเดินหายใจส่วนล่าง และมีผลต่อสุขภาพมากกว่าฝุ่นรวม ดังนั้น U.S. EPA จึงได้มีการยกเลิกค่ามาตรฐานฝุ่นรวม และกำหนดค่ามาตรฐานฝุ่นขนาดเล็ก 2 ชนิด คือ  $PM_{10}$  และ  $PM_{2.5}$  ในปี ค.ศ. 2006 WHO ได้จัดทำ Air Quality Guidelines (AQGs) โดยเก็บข้อมูลมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1987 และทำการทบทวนในปี ค.ศ. 1997 และล่าสุดได้จัดประชุมผู้เชี่ยวชาญ เมื่อวันที่ 18 - 20 ตุลาคม ค.ศ. 2005 ที่เมืองบอนน์ (Bonn) ประเทศเยอรมนี เพื่อทำการทบทวน WHO AQGs โดยใช้หลักฐานทางวิชาการล่าสุด และได้ทำการเผยแพร่ WHO Air Quality Guideline ค.ศ. 2006 สำหรับประเทศไทย กรมควบคุมมลพิษได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานฝุ่นรวม (TSP) และฝุ่นขนาดเล็ก ( $PM_{10}$ ) ส่วนค่ามาตรฐานฝุ่นขนาดเล็ก  $PM_{2.5}$  ยังอยู่ในระหว่างรอประกาศจากคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ซึ่งกรมควบคุมมลพิษได้กำหนดมาตรฐานค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ( $PM_{2.5}$ ) ในบรรยากาศโดยทั่วไป เท่ากับ 60 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ค่ามาตรฐานฝุ่นละอองในบรรยากาศ

ฝุ่นละออง	ประเทศไทย		WHO	
	ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	ค่าเฉลี่ย 1 ปี ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	ค่าเฉลี่ย 1 ปี ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
TSP	330 <sup>a</sup>	100 <sup>a</sup>	-	-
PM <sub>10</sub>	120 <sup>a</sup>	50 <sup>a</sup>	50 <sup>b</sup>	20 <sup>b</sup>
PM <sub>2.5</sub>	60 <sup>c</sup>	25 <sup>c</sup>	25 <sup>b</sup>	10 <sup>b</sup>

หมายเหตุ : <sup>a</sup> ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 24 (พ.ศ. 2547)

<sup>b</sup> WHO Air Quality Guideline Global Update 2005 (2006)

<sup>c</sup> (ร่าง) ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (พ.ศ. 2552)

### 2.2.7 สถานการณ์มลพิษทางอากาศที่เกิดจากการเผาในที่โล่งในพื้นที่เกษตรของประเทศไทย

ในปี พ.ศ. 2549 กรมควบคุมมลพิษ โดยสำนักจัดการคุณภาพอากาศและเสียง ได้ดำเนินโครงการติดตามและประเมินสถานการณ์การเผาในที่โล่งในพื้นที่เกษตร เป็นแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศเชิงพื้นที่ที่สำคัญแหล่งหนึ่งที่เกิดฝุ่นละออง เขม่าควัน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) และสารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) นอกจากนี้ ยังมีผลกระทบต่อทัศนวิสัย ก่อให้เกิดอุบัติเหตุบนท้องถนน เกิดการเปลี่ยนแปลงการก่อตัวของเมฆทำให้ฝนไม่ตกตามฤดูกาล การเผาในที่โล่งในบริเวณกว้าง อาจนำไปสู่การเกิดหมอกควันในปริมาณสูง สามารถกระจายตัวส่งผลกระทบต่อประเทศข้างเคียง ทำให้เกิดปัญหาหมอกควันข้ามแดน เช่น เหตุการณ์ไฟป่าบริเวณเกาะสุมาตราและบอร์เนียว ประเทศอินโดนีเซีย การเผาในที่โล่ง มีกิจกรรมหลักจากการเผาเศษวัสดุเหลือใช้ในพื้นที่เกษตรกรรม โดยเฉพาะพืชเศรษฐกิจ ได้แก่ ข้าว ข้าวโพด และอ้อย จากข้อมูลพื้นที่เพาะปลูกทั่วประเทศของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ประเมินไว้ว่าประเทศมีพื้นที่นาข้าวประมาณ 66 ล้านไร่ ไร่ข้าวโพดประมาณ 7 ล้านไร่ (กรมควบคุมมลพิษ, 2550) การติดตามและประเมินสถานการณ์การเผาในพื้นที่เกษตรของประเทศไทย จึงมีความสำคัญในการคาดการณ์ระดับความรุนแรงของปัญหามลพิษจากการเผาในที่โล่ง และสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการติดตามประเมินผลสำเร็จของการดำเนินมาตรการควบคุมการเผาในที่โล่งในภาคการเกษตร จากการสำรวจข้อมูลพื้นฐานด้านการเผาเศษวัสดุเหลือใช้ภาคการเกษตรในพื้นที่เพาะปลูกข้าว ข้าวโพด และอ้อย เพื่อให้ทราบสถานการณ์การเผาในที่โล่งในพื้นที่เกษตรกรรมที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง สามารถนำไปใช้ประกอบการจัดลำดับความรุนแรงของปัญหาการเผาไหม้ในที่โล่งในแต่ละพื้นที่ และใช้เป็นฐานในการประเมินผลสำเร็จของการดำเนินงานในการลดและควบคุมการเผาในที่โล่งในพื้นที่เกษตร เพื่อ

นำไปใช้ในการปรับปรุงมาตรการให้เหมาะสมกับสภาพความรุนแรงของปัญหา รวมถึงวางแผนส่งเสริมการเกษตรเชิงอนุรักษ์และการจัดการใช้ประโยชน์เศษวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรอย่างยั่งยืนในพื้นที่ศึกษา 55 จังหวัด ดังแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 พื้นที่ศึกษาโครงการติดตามและประเมินสถานการณ์การเผาในพื้นที่เกษตรของประเทศไทย (กรมควบคุมมลพิษ, 2550)

พื้นที่	จังหวัด
ภาคเหนือ	กำแพงเพชร พิจิตร พิษณุโลก สุโขทัย เพชรบูรณ์ เชียงใหม่ เชียงราย ลำพูน ลำปาง อุตรดิตถ์ พะเยา อุทัยธานี
ภาคกลาง	กรุงเทพมหานคร สมุทรปราการ สมุทรสาคร นครปฐม ปทุมธานี อ่างทอง สุพรรณบุรี พระนครศรีอยุธยา สิงห์บุรี นครสวรรค์ ชัยนาท ลพบุรี สระบุรี
ภาคตะวันตก	เพชรบุรี ราชบุรี กาญจนบุรี
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	เลย หนองบัวลำภู สระแก้ว หนองคาย ชัยภูมิ ขอนแก่น บุรีรัมย์ สุรินทร์ ร้อยเอ็ด ศรีสะเกษ อุบลราชธานี อำนาจเจริญ ยโสธร สกลนคร มหาสารคาม มุกดาหาร กาฬสินธุ์ นครพนม อุรธานี นครราชสีมา
ภาคตะวันออก	ปราจีนบุรี นครนายก ชลบุรี ฉะเชิงเทรา
ภาคใต้	นครศรีธรรมราช พัทลุง สงขลา

จากผลวิเคราะห์เปรียบเทียบ และบูรณาการข้อมูลจากเอกสารปริทัศน์ ข้อมูลภาพถ่ายทางดาวเทียม ข้อมูลแบบสอบถาม และข้อมูลจากการสำรวจภาคสนาม สรุปผลได้ดังนี้

- พบการเผาในที่โล่งในพื้นที่นาในเขตชลประทานตลอดทั้งปี โดยจังหวัดที่มีการเผามากที่สุด ได้แก่ ปทุมธานี พระนครศรีอยุธยา นครปฐม ชัยนาท อ่างทอง สุพรรณบุรี นครสวรรค์ ในขณะที่พื้นที่ปลูกอ้อย จะพบจุด Hotspot จำนวนมากในช่วงเวลาจำกัดระหว่างเดือนมกราคม – มีนาคม สำหรับพื้นที่ปลูกข้าวโพด พบว่าบางจังหวัด ได้แก่ กาญจนบุรี เชียงราย ลพบุรี เลย และสระบุรี จะพบจุด Hotspot จำนวนน้อยประปรายตลอดปี และจะพบจุด Hotspot จำนวนมากในช่วงเดือนมกราคม โดยเดือนที่มีการเผาสูงสุด ได้แก่ เดือนกุมภาพันธ์และ มีนาคม

- จากการคำนวณปริมาณพื้นที่เสี่ยงต่อการเผาในที่โล่งในแต่ละจังหวัด พบว่ามีจังหวัดที่มีพื้นที่เสี่ยงมากกว่า 1 ล้านไร่ จำนวน 14 จังหวัด โดยจังหวัดที่มีพื้นที่เสี่ยงมากที่สุด ได้แก่ จังหวัด นครสวรรค์ พื้นที่เสี่ยงถึง 1,962,313 ไร่ หรือคิดเป็นร้อยละ 4.92 รองลงมาคือ นครราชสีมา และ สุพรรณบุรี พื้นที่เสี่ยงคิดเป็นร้อยละ 4.83 และ 4.19 ตามลำดับ

- จากการคำนวณปริมาณการปล่อยฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM<sub>10</sub>) จากการเผาในที่โล่งในพื้นที่เพาะปลูก ข้าวนาปรัง ข้าวนาปี อ้อย และข้าวโพด พบว่า ปี พ.ศ. 2548 มีการปล่อย PM<sub>10</sub> รวม 253,854 ตัน โดยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีปริมาณการปล่อย PM<sub>10</sub> สูงสุดจำนวน 113,687 ตัน คิดเป็นร้อยละ 45 ของปริมาณรวมทั้งหมด ตามด้วยภาคกลาง จำนวน 69,708 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 28 ภาคเหนือ จำนวน 64,254 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 25 และภาคใต้ จำนวน 6,206 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 2 หากจำแนกการปล่อย PM<sub>10</sub> ตามพื้นที่เพาะปลูกจะพบว่า การเผาพื้นที่ปลูกข้าวนาปีปล่อยฝุ่นละอองขนาดเล็กสูงสุดจำนวน 150,026 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 59 ตามด้วยการเผาพื้นที่ไร่อ้อย จำนวน 66,800 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 26 การเผาพื้นที่ปลูกข้าวนาปรังจำนวน 34,720 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 14 และการเผาพื้นที่ไร่ข้าวโพด จำนวน 2,309 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 1

- พบพื้นที่การเกิดไฟไหม้ป่าในจังหวัดภาคเหนือ ดังแสดงในตารางที่ 2.10 การจัดทำนโยบายการควบคุมการเผาในที่โล่งในพื้นที่เกษตร ควรมุ่งเน้นไปที่การควบคุมการเผาในพื้นที่ปลูกข้าวนาปีซึ่งมีฤดูกาลเผาอยู่ในช่วงเดือนมกราคม-มีนาคม เป็นพื้นที่แรก ตามด้วยการเผาไร่อ้อยซึ่งมีฤดูกาลเผาอยู่ในช่วงเดือนธันวาคม-เมษายน และการเผาพื้นที่ปลูกข้าวนาปรัง ซึ่งมีฤดูกาลเผาอยู่ในช่วงเดือนมกราคม-มีนาคม ตามลำดับ ฤดูกาลที่ควรควบคุมการปล่อยฝุ่นขนาดเล็กจากการเผาในที่โล่งในพื้นที่เกษตร คือช่วงเดือนมกราคม-มีนาคม เนื่องจากเป็นช่วงเดือนที่มีการเผาพื้นที่ปลูกข้าวนาปีและไร่อ้อย ประกอบกับช่วงเวลาดังกล่าว เป็นช่วงที่มีความกดอากาศสูงและมวลอากาศเย็นจากประเทศจีนปกคลุมภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ทำให้เกิดสภาวะบรรยากาศที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการกระจายตัวของฝุ่นละอองและสารมลพิษ ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารมลพิษในบรรยากาศเพิ่มสูงขึ้น จนอาจเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพอากาศ และเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน

ตารางที่ 2.10 พื้นที่การเกิดไฟไหม้ป่าระหว่าง ปี พ.ศ. 2548 - 11 พฤษภาคม พ.ศ. 2552 (Forest Fire Control Division National Park, 2552)

จังหวัด	พื้นที่ไฟไหม้ป่า (ไร่)				
	พ.ศ. 2548	พ.ศ. 2549	พ.ศ. 2550	พ.ศ. 2551	พ.ศ. 2552
1) เชียงใหม่	9,453.0	5,184.0	12,062.8	9,491.4	8,347.8
2) แม่ฮ่องสอน	7,754.3	3,719.0	8,750.0	2,402.0	2,476.0
3) ลำปาง	1,174.0	987.0	1,390.0	1,312.0	1,830.0
4) เชียงราย	1,634.0	1,264.3	4,151.3	934.0	766.8
รวม	20,015.3	11,154.3	26,354.0	14,139.4	13,420.5

ในช่วงต้นปี พ.ศ. 2550 บริเวณพื้นที่ทางภาคเหนือตอนบน ประสบปัญหาหมอกพิษหมอกควันค่อนข้างรุนแรง โดยพบแนวโน้มการเพิ่มสูงขึ้นของปริมาณฝุ่น  $PM_{10}$  ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมพบจุดความร้อน (Hotspot) จำนวนมากในประเทศไทย พม่า ลาว เวียดนาม และกัมพูชาประกอบกับในช่วงเวลาดังกล่าวมวลอากาศเย็นเริ่มปกคลุมพื้นที่ภาคเหนือตอนบน สภาพอากาศแห้งและนิ่ง ฝุ่นละอองจึงแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศได้นาน ไม่สามารถแพร่กระจายออกไปได้และไม่ตกลงสู่พื้น ก่อให้เกิดสภาพฟ้าหาลัว มีหมอกควันปกคลุมทัศนวิสัยต่ำกว่า 1 กิโลเมตร ประชาชนได้รับผลกระทบในหลายจังหวัด เช่น เชียงใหม่ ลำพูน ลำปาง แม่ฮ่องสอน เชียงราย พะเยา แพร่ และน่าน เป็นต้น จากผลการติดตามตรวจสอบคุณภาพอากาศในพื้นที่ 4 จังหวัดภาคเหนือตอนบน แสดงดังตารางที่ 2.11

จากรายงานการตรวจวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน ของกรมควบคุมมลพิษ ตั้งแต่วันที่ 13 กุมภาพันธ์ - 18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2552 ที่ผ่านมา พบว่า จ.ลำปาง ลำพูน และ แพร่ มีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน สูงกว่าค่ามาตรฐานคือ เกิน 300 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ติดต่อกันเป็นเวลาหลายวัน ผลกระทบของฝุ่นควันที่เกิดจากการเผาไหม้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและการเกิดไฟป่าจะส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ โดยฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน ทำให้เกิดโรคหัวใจ และหลอดเลือดหัวใจอักเสบ ซึ่งฝุ่นควันที่เกิดจากการเผาไหม้ในบริเวณภาคเหนือ ก็ทำให้เกิดอาการได้เช่นเดียวกันกับฝุ่นควันจากท่อไอเสียรถยนต์ จากข้อมูลพบว่า หากเพิ่มปริมาณฝุ่นทุก ๆ 10 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะทำให้เพิ่มอัตราการตายทุกสาเหตุ ร้อยละ 4.5 เพิ่มอัตราการตายจากโรกระบบทางเดินหายใจ ร้อยละ 9.8 เพิ่มอัตราการตายจากโรคหัวใจ และหลอดเลือด ร้อยละ 3.9 เพิ่มอัตราการตายในผู้สูงอายุที่มากกว่า 65 ปี ถึงร้อยละ 5.4

ตารางที่ 2.11 การตรวจวัดฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงสูงสุด ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2547 – 2552 (กรมควบคุมมลพิษ, 2552)

จังหวัด	สถานี	พ.ศ.					
		2547	2548	2549	2550	2551	2552
		$PM_{10}$ (ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)					
1) เชียงใหม่	สถานีศาลากลาง	205	157	249	304	-	116
	โรงเรียนยุพราชวิทยาลัย	275	149	237	383	206	149
2) ลำปาง	ม.ธรรมศาสตร์ศูนย์ลำปาง	176	345	247	259	197	268
	การประปา อ.แม่เมาะ	-	-	-	219	-	234
3) เชียงราย	โรงเรียนสามัคคีวิทยาคม	-	-	-	213	174	288
4) แม่ฮ่องสอน	อ.เมือง	-	-	-	353	134	-

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**Park และคณะ (2002)** ศึกษาความเข้มข้นของสารประกอบ PAHs 16 ชนิด ในรูปของ pPAHs และ gPAHs พบว่าสารประกอบ PAHs โดยส่วนใหญ่ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ พบในรูปของ gPAHs และ PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง คือ Benzo(a)anthracene, Chrysene, Benzo(b+k)fluoranthene, Benzo(a)pyrene, Indeno(1,2,3-cd)pyrene, Dibenzo(a,h)anthracene, Benzo(g,h,i)pyrene และ พบในรูปของ pPAHs และปริมาณ Total pPAHs และ Total gPAHs มีค่าเท่ากับ  $26.25 \pm 29.40$  และ  $63.03 \pm 74.26$  ng/m<sup>3</sup> ตามลำดับ

**Tsai และคณะ (2002)** ศึกษาสารประกอบ PAHs 21 ชนิด ในรูปของ pPAHs และ gPAHs พบว่าสารประกอบ PAHs ที่มี 2-3 วงเบนซิน พบในรูปของ gPAHs ส่วนสารประกอบ PAHs ที่มี 5-7 วงเบนซิน พบในรูปของ pPAHs โดยส่วนใหญ่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง นอกจากนี้ ยังพบว่าสาร PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ เป็นสารก่อมะเร็งมากกว่า PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ๆ

**Saez และคณะ (2003)** ศึกษาสารประกอบ PAHs 16 ชนิด ในฝุ่นคัดแยกขนาดต่าง ๆ ที่มาจากการเผาไหม้ชีวมวลของไม้ Poplar wood chip ในห้องทดสอบ เก็บตัวอย่างโดยใช้ multistage cascade ผลการศึกษาพบว่า เมื่อให้ excess air ที่ 20 %, 50 %, 60 % และ 70% มีปริมาณฝุ่นรวมเท่ากับ 0.35, 0.33, 0.12 และ 0.23 g/m<sup>3</sup> ตามลำดับ ความเข้มข้นของ PAHs เท่ากับ 49.0, 6.0, 1.8 และ 4.4 µg/(std) m<sup>3</sup> พบว่าที่ 60 % ของ excess air เป็นสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการเผาไหม้ชีวมวล เนื่องจากเกิดปริมาณฝุ่น สารประกอบ PAHs และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุด พิจารณาที่ excess air 60 % ในฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กกว่า 0.65 ไมครอน พบสาร PAHs ที่มีวงเบนซิน 3 > 5 > 4 > 6 วง, ที่ excess air 70 % ในฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กกว่า 4.0 ไมครอน พบสาร PAHs ที่มีวงเบนซิน 3 > 5 > 4 > 6 วง, ที่ excess air 50 % ในฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 1.65 ไมครอน พบสาร PAHs ที่มีวงเบนซิน 3 > 4 > 5 > 6 วง และ ที่ excess air 20 % ในฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 3.9 ไมครอน พบสาร PAHs ที่มีวงเบนซิน 5 > 6 > 4 > 3 วง

**Zou และคณะ (2003)** ศึกษาสารประกอบ PAHs 16 ชนิด ที่เกิดจากการเผาไหม้ในห้องทดสอบโดยการเผาไหม้ไม้ทั้ง 4 ชนิด คือ Pine, Red gum, Sugar gum และ Yellow box แบ่งสถานะการเผาไหม้เป็น 2 แบบ คือ สถานะการเผาไหม้แบบช้า และสถานะการเผาไหม้แบบเร็ว จากการศึกษาพบว่า สาร PAHs ที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่า 202 กรัมต่อโมล ในรูปของ gPAHs และสาร PAHs ที่มีมวลโมเลกุลสูงกว่านี้ พบในรูปของ pPAH ที่สถานะการเผาไหม้แบบช้าของไม้ทั้ง 4 ชนิด พบว่าไม้ Pine, Yellow box, Red gum และ Sugar gum มีปริมาณ Total PAHs เท่ากับ 15,398, 10,880, 10,740 และ 7,780 µg/kg ตามลำดับ ที่สถานะการเผาไหม้แบบเร็วของไม้ทั้ง 4 ชนิด พบว่าไม้ Pine, Yellow box, Sugar gum และ Red gum มีปริมาณ Total PAHs เท่ากับ 11,508, 8,111, 7,857 และ 5,965 µg/kg ตามลำดับ

**Kameda และคณะ (2005)** ศึกษาการกระจายตัวของสารประกอบ PAHs 21 ชนิด ในฝุ่นที่มีขนาดแตกต่างกัน 6 ขนาด คือ  $> 7.0$ ,  $7.0 - 3.3$ ,  $3.3 - 2.0$ ,  $2.0 - 1.1$ ,  $1.1 - 0.43$  และ  $< 0.43$  ไมครอน ในเมือง Yokohama เพื่อประเมินความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็งในปอด พบว่า สาร PAHs 6 ชนิด คือ Dibenzo(a,h)anthracene, Benzo(b)fluoranthene, Indeno(1,2,3-cd)pyrene, Dibenzo(a,h)pyrene, Dibenzo(a,e)pyrene และ Benzo(a)pyrene มีความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็งในปอด 93 % รวมถึงสาร PAHs ที่มีมวลโมเลกุลสูง ๆ น่าจะเป็นตัวบ่งชี้ความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็งในปอดมากกว่า Benzo(a)pyrene เพียงชนิดเดียว นอกจากนี้ ยังพบว่า การกระจายตัวของสาร PAHs ทั้ง 6 ชนิด ในฝุ่นละอองที่มีขนาด  $1.1 - 0.43$  ไมครอน ซึ่งเกิดการตกสะสมในระบบทางเดินหายใจมากที่สุด ประมาณ 57 – 70 % จากความเข้มข้นของ PAHs ทั้งหมด

**Yang และคณะ (2006)** ศึกษาขนาดและการกระจายตัวของสารประกอบ PAHs 21 ชนิด ในช่วงระหว่างที่มีการเผาไหม้ฟางข้าว พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของสารประกอบ PAHs ในรูปของอนุภาคฝุ่น และในรูปของก๊าซ คือ  $33.0$  และ  $1,160.0 \text{ ng m}^{-3}$  และช่วงที่ไม่มีการเผาไหม้ฟางข้าว พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของสารประกอบ PAHs ในรูปของอนุภาคฝุ่น และในรูปของก๊าซ คือ  $13.5$  และ  $479.0 \text{ ng m}^{-3}$  นอกจากนี้ ในช่วงระหว่างที่มีการเผาไหม้ฟางข้าว ค่าอัตราส่วนเฉพาะของ BaP/BgP เท่ากับ  $2.0$  และ ค่าอัตราส่วนเฉพาะของ InP/ InP +BgP เท่ากับ  $0.64$  แสดงให้เห็นได้ว่า ค่าอัตราส่วนเฉพาะ BaP/BgP สามารถบ่งชี้แหล่งที่มาของสารประกอบ PAHs ที่มาจากการเผาไหม้ฟางข้าวได้ ยกเว้น ค่าอัตราส่วนเฉพาะของ InP/ InP +BgP ซึ่งอัตราส่วนเฉพาะของ InP/ InP +BgP ที่มาจากเครื่องยนต์ดีเซล อยู่ในช่วง  $0.3-0.7$  ซึ่งอยู่ในช่วงเดียวกันกับค่าอัตราส่วนเฉพาะของ InP/ InP +BgP ที่มาจากการเผาไหม้ฟางข้าว

**Lai และคณะ (2009)** ศึกษาการกระจายตัวของระดับความเข้มข้นของสาร PAHs 21 ชนิด ในเขตเมือง Jhu-Shan (พื้นที่ชนบท) และ Sin-Gang (พื้นที่ในเมือง) ในช่วงระหว่างที่มีการเผาไหม้ฟางข้าว และไม่มีการเผาไหม้ฟางข้าว พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของ Total-PAHs เพิ่มขึ้นเป็น 58 % ในระหว่างที่มีการเผาไหม้ของฟางข้าว ซึ่งมีค่ามากกว่าช่วงที่ไม่มีการเผาไหม้ฟางข้าว  $1.54-2.57$  เท่า มีการกระจายตัวของอนุภาคฝุ่นขนาด  $0.88-1.21$  ไมโครเมตร มากที่สุด นอกจากนี้ยังพบการกระจายตัวของสาร PAHs ในบรรยากาศ ประมาณ  $6.3-24.6$  % ในช่วงที่มีการเผาไหม้ฟางข้าวทั้งสองพื้นที่ศึกษา

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

1. Acetonitrile (HPLC grade) 99.5 %, บริษัท Fisher Scientific, ประเทศเยอรมนี
2. Dichloromethane (HPLC grade) 99.5 %, บริษัท Fisher Scientific, ประเทศเยอรมนี
3. Hexane (HPLC grade) 99.5 %, บริษัท Lab Scan, ประเทศไทย
4. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons 16 Mix Calibration Standard in  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ , บริษัท Restex, ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. Helium gas 99.999 %, บริษัท Praxair, ประเทศไทย
6. Nitrogen 99.999 %, บริษัท Praxair, ประเทศไทย

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นแบบ 8 ชั้น (8 stage non-viable cascade impactor), บริษัท TISCH Environmental, ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. เครื่อง Calibrator, Defender™ 500 Series, บริษัท TISCH Environmental, ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. ชุดเครื่องวัดอุณหภูมิอากาศ Weather link vantage pro 2
4. เครื่อง Gas chromatograph รุ่น 6830 N และ Mass spectrophotometer รุ่น 5973N, บริษัท Agilent Technologies, ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น TC - 254, บริษัท Denver Instrument Company, ประเทศเยอรมนี
6. เครื่องชั่งละเอียด 5 ตำแหน่งรุ่น Sartorius BA 210 บริษัท Scientific Promotion, ประเทศฝรั่งเศส
7. เครื่องระเหยสุญญากาศ (Rotary Vacuum Evaporatory) รุ่น N-N series บริษัท Tokyo Rikakikai, ประเทศญี่ปุ่น
8. ตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ (Desiccator auto dry box) รุ่น CM-3 บริษัท Samplatec Corp, ประเทศเยอรมนี
9. HP 5 ขนาด 30 m x 0.25 mm I.D. x 0.25  $\mu\text{m}$  (film thickness) capillary column , บริษัท J&W Scientific, ประเทศสหรัฐอเมริกา
10. Bond Elute C-18 , 500 mg 3 ml, บริษัท Varian, ประเทศสหรัฐอเมริกา
11. กระจกทรายใยหิน (Quartz fiber filter) ขนาด 0.81 มิลลิเมตร บริษัท Toyo Roshi Kaisha, ประเทศญี่ปุ่น

12. คีมคีบปากแบน (Forcep) เคลือบด้วย Teflon
13. ถุงมือไวนิล ไม่มีแป้ง (Vinyl non powdered gloves)
14. ชามระเหย
15. เครื่องแก้วต่าง ๆ

### 3.3 วัสดุชีวมวลที่ใช้ในการศึกษา

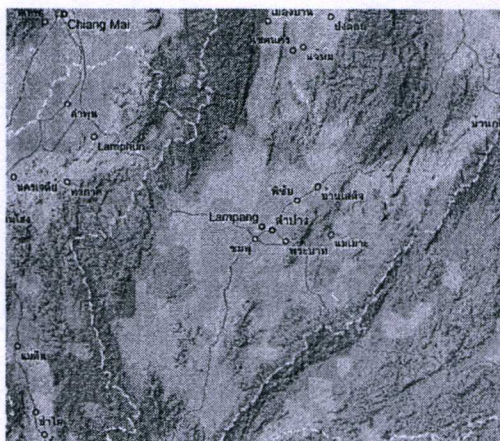
1. ฟางข้าว

### 3.4 สภาพพื้นที่ที่เก็บตัวอย่าง บริเวณจังหวัดลำปาง

จังหวัดลำปางมีระยะทางห่างจากกรุงเทพฯ 599 กิโลเมตร มีเนื้อที่ทั้งหมด 12,534 ตารางกิโลเมตร ภูมิประเทศเป็นที่ดอนและป่าเขา ดอนเหนือเป็นที่ราบแล้วค่อย ๆ ลาดต่ำลงมาทางใต้เป็นที่ราบลุ่มแม่น้ำวัง เทือกเขาที่สำคัญคือเทือกเขาผีปันน้ำ เป็นต้นกำเนิดของแม่น้ำวัง และเทือกเขาขุนตาล ซึ่งกั้นเขตแดนระหว่างลำปาง-ลำพูน มีอุโมงค์ให้รถไฟลอดผ่านเป็นระยะทาง 1 กิโลเมตร จังหวัดลำปางมีพื้นที่ติดต่อกับจังหวัดอื่นๆ ดังนี้

- ทิศเหนือ ติดต่อกับ จังหวัดเชียงใหม่ พะเยา และเชียงราย
- ทิศใต้ ติดต่อกับ จังหวัดตาก และสุโขทัย
- ทิศตะวันตก ติดต่อกับ จังหวัดลำพูน และเชียงใหม่
- ทิศตะวันออก ติดต่อกับ จังหวัดแพร่ และสุโขทัย

สภาพภูมิประเทศจังหวัดลำปางเป็นที่ราบสูงอยู่สูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 268.60 เมตร มีภูเขาทอดตัวตามความยาว และมีที่ราบลุ่มแม่น้ำเป็นบางส่วน พื้นที่ราบล้อมรอบด้วยภูเขา เป็นแอ่งแผ่นดิน เรียกว่า อ่างลำปาง ซึ่งยาวและกว้างที่สุดในภาคเหนือซึ่งมีทิวเขาผีปันน้ำล้อมรอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.1

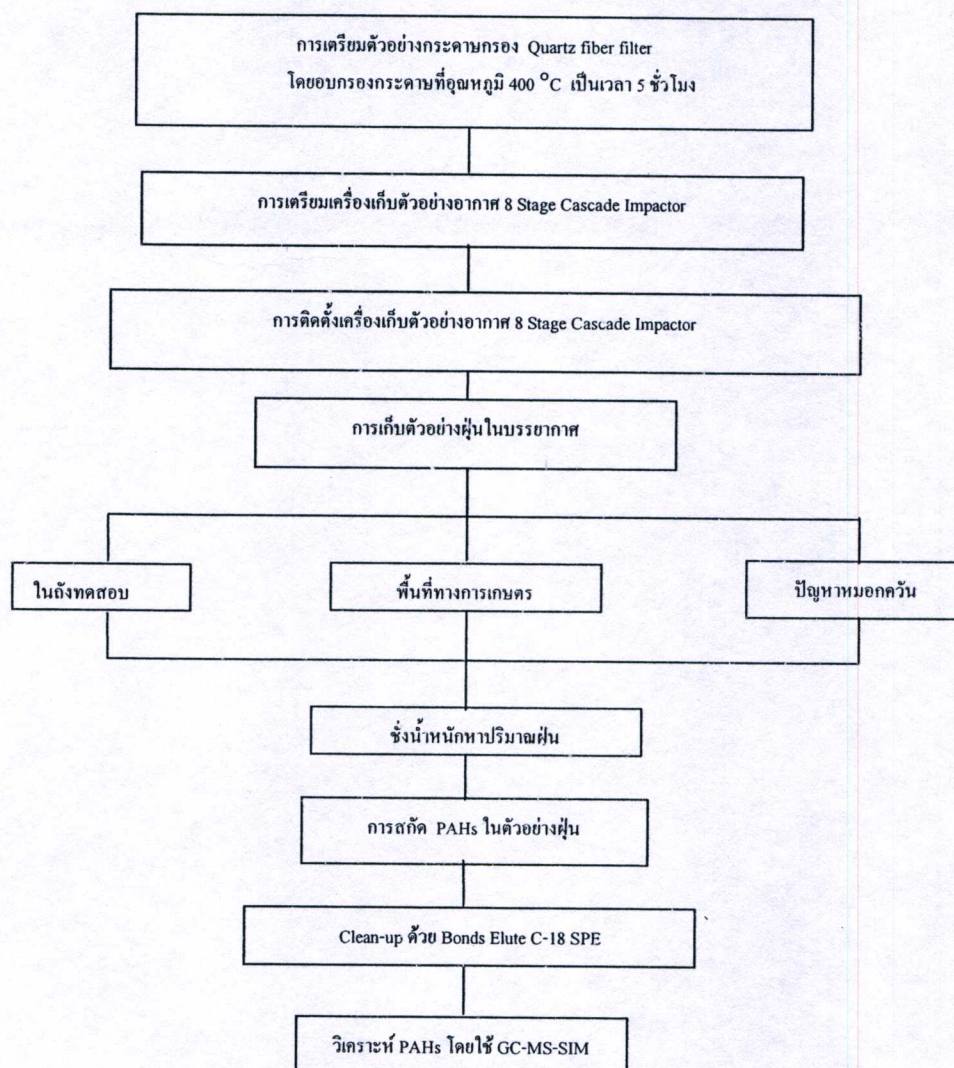


รูปที่ 3.1 สภาพภูมิประเทศจังหวัดลำปาง

สภาพภูมิอากาศจังหวัดลำปาง ลักษณะอากาศและอุณหภูมิของจังหวัดลำปางไม่มีความเปลี่ยนแปลง ความแตกต่างที่รุนแรงมากมัก กล่าวคือ ในฤดูร้อนไม่ร้อนจัดและฤดูหนาวไม่หนาวจัด ฤดูร้อนนั้นจะอยู่ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ ถึงกลางเดือนพฤษภาคม ส่วนฤดูหนาวอยู่ระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์ และช่วงฤดูฝน เริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม

### 3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

สรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.5.1 การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองคัดแยกขนาด

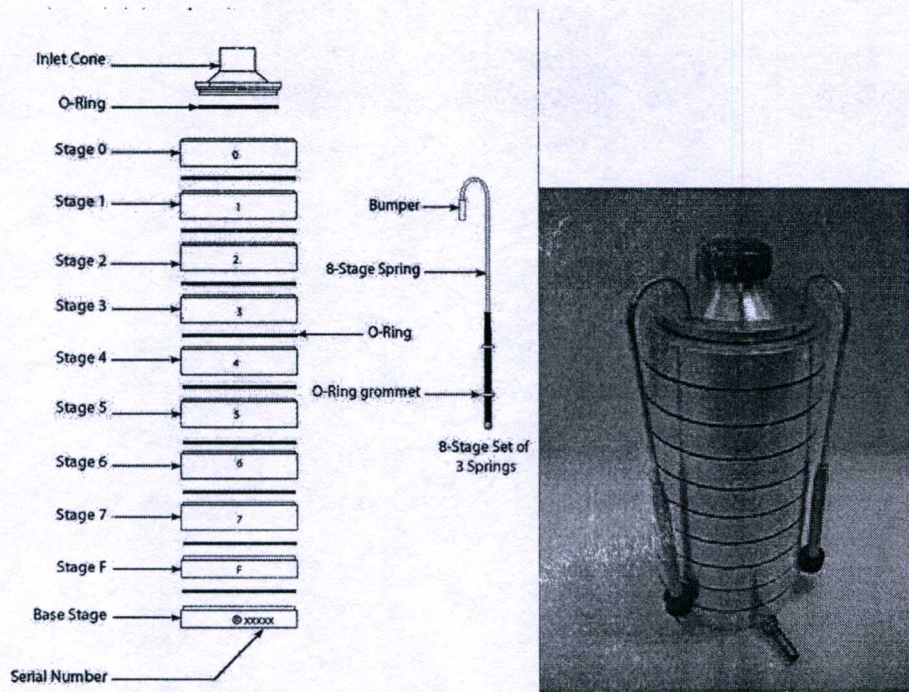
อุปกรณ์ 8 Stage Cascade Impactor ประกอบด้วยชั้นอนุภาคนิยม 8 ชั้น ได้แก่ stage 0, stage 1, stage 2, stage 3, stage 4, stage 5, stage 6, stage 7 และชั้นล่างสุด stage F ซึ่งเป็น Back up filter โดยในแต่ละชั้นจะมีขนาดในการคัดแยกฝุ่นละออง ดังนี้ คือ > 9.0, 9.0 - 5.8, 5.8 - 4.7, 4.7 - 3.3, 3.3 - 2.1, 2.1 - 1.1, 1.1 - 0.7, 0.7 - 0.4 และ < 0.4 ไมครอน ตามลำดับ (ก่อนใช้งานทำความสะอาด ดังรายละเอียดในภาคผนวก ก-1) มีขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์ที่จุดเก็บตัวอย่าง ดังนี้

1. วางกระดาษกรอง Quartz fiber filter ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 81 มิลลิเมตร ที่ผ่านการอบไล่สารอินทรีย์ต่าง ๆ และซังน้ำหนักรีดเริ่มต้น (รายละเอียดการเตรียมกระดาษกรองด้วยวิธีมาตรฐานแสดงในภาคผนวก ก-2) บนแผ่นเพลตสวงกลม ในแต่ละชั้นจะมี O-ring เพื่อป้องกันการรั่วไหลของอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.3

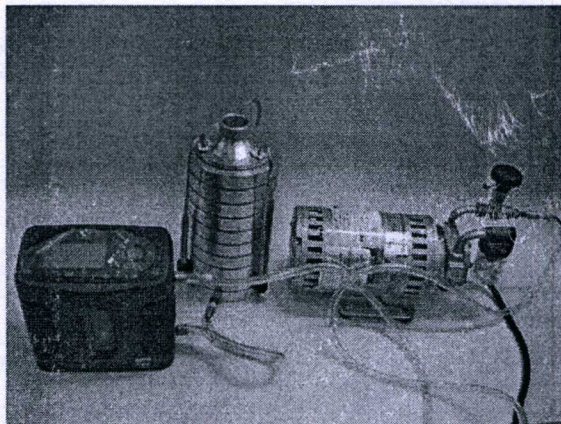
2. ต่อชุด Impactor ในแต่ละชั้น เริ่มตั้งแต่ Stage F ตามด้วย Stage 7 จนถึงหัวเก็บตัวอย่าง Inlet โดยแต่ละชั้นจะมี O-ring ป้องกันการรั่วไหลของอากาศ จากนั้นใช้สปริง ทั้ง 3 ยึดเครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นแบบ 8 ชั้นไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.3

3. ต่ออุปกรณ์ 8 Stage Cascade Impactor เข้ากับปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศ สอบเทียบอัตราการไหลของปั๊มที่ 28.3 ลิตรต่อนาที โดยต่อท่อ Tygon เข้ากับปั๊มและชุดเทียบอัตราการไหลและ Calibrator Defender 520 และ 8 Stage Cascade Impactor ดังแสดงในรูปที่ 3.4

4. บันทึกอัตราการไหลของปั๊ม 10 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.3 เครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นแบบ 8 ชั้น (8 Stage Cascade Impactor)



รูปที่ 3.4 การสอบเทียบอัตราการไหลของปั๊ม

### 3.5.2 การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ

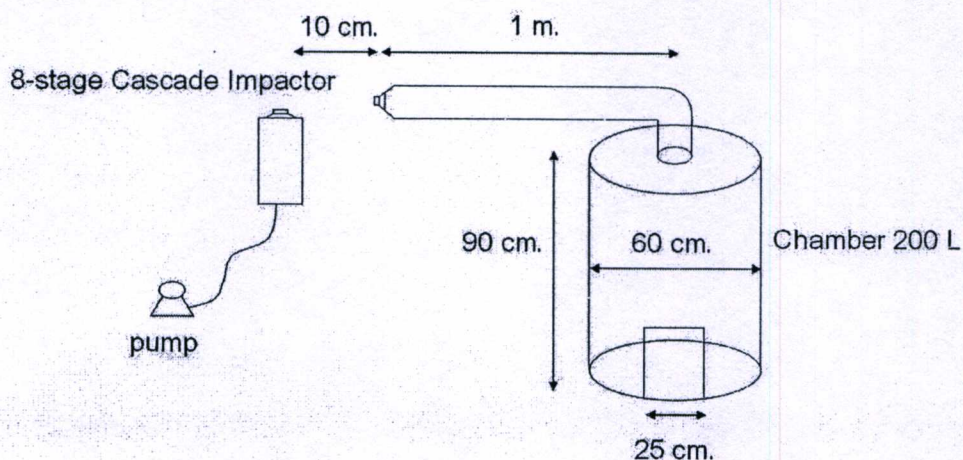
#### 3.5.2.1 การเก็บฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวลในถังทดสอบ

เก็บตัวอย่างกระดาศกรองโดยใช้ 8 Stage Cascade Impactor ช่วงเวลาที่ 1 วันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2552 เวลา 12:00 - 13:00 น. มีขั้นตอนดังนี้ (รูปที่ 3.5)

1. เตรียมตัวอย่างกระดาศกรอง Quartz fiber filter (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก-1)
2. เตรียมเครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นแบบ 8 Stage Cascade Impactor (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก-2)
3. ติดตั้งอุปกรณ์เครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นละออง 8 Stage Cascade Impactor รายละเอียดแสดงในหัวข้อ 3.5.1
4. สอบเทียบอัตราการไหลของปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศ ก่อนเก็บตัวอย่างอากาศ จำนวนจำนวน 10 ครั้ง หาค่าเฉลี่ย
5. หาปริมาณความชื้นของฟางข้าว ตามวิธีมาตรฐานของ ASTM D3173 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก-3)
6. ชั่งน้ำหนักฟางข้าว จำนวน 5.0 กิโลกรัม ใส่ในถังทดสอบที่ทำจากถังน้ำมัน ขนาด 20 ลิตร เจาะช่องให้อากาศเข้าทางด้านล่างขนาด 25 ซม. X 25 ซม. ฝาด้านบนมีปล่องขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร (รูปที่ 3.5) จากนั้น ให้เริ่มติดไฟฟางข้าวและสังเกตควันที่ปล่อยออกจากปล่องระบายอากาศเสีย
7. เก็บตัวอย่างฝุ่นด้วย 8 Stage Cascade Impactor ที่อัตราการไหล 28.3 ลิตรต่อนาที ที่ระยะห่างจากปล่อง 10 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยบันทึกเวลา (โดยสังเกตเวลาสิ้นสุดการเก็บตัวอย่างจากควันที่ปล่อย จากปากปล่องระบายอากาศเสีย) และข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา เช่น ความกดอากาศ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และทิศทางลม โดยใช้เครื่องวัดอุตุนิยมวิทยา Weather link vantage รวมถึงอุณหภูมิบริเวณปากปล่องระบายอากาศเสีย ในขณะที่เริ่มต้นและสิ้นสุด การเก็บตัวอย่างฝุ่น
8. สอบเทียบอัตราการไหลของปั๊ม หลังจากการเก็บตัวอย่างฝุ่น จำนวน 10 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย
9. สวมถุงมือไนลิลชนิดไม่มีแป้ง และใช้คีมคีบปากแบนคีบกระดาศกรองออกจากเครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่น ใส่ plate พลาสติก แล้วหุ้มด้วยแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ จากนั้นเก็บใส่ในถุงพลาสติกปิดถุงให้แน่นสนิทแล้ว เก็บใส่ในกล่องโฟมที่บรรจุน้ำแข็ง เพื่อควบคุมอุณหภูมิ ประมาณ 4 องศาเซลเซียส และนำกลับไปวิเคราะห์ตัวอย่างที่ห้องปฏิบัติการ
10. อบตัวอย่างกระดาศกรองในตู้ดูดความชื้น 2 - 3 ชั่วโมง (กรมควบคุมมลพิษ, 2546) จากนั้นชั่งน้ำหนักกระดาศกรองหลังเก็บตัวอย่าง คำนวณความเข้มข้นฝุ่นละอองแต่ละขนาด (รายละเอียดวิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก-4) และนำไปวิเคราะห์สารประกอบ PAHs ต่อไป

(ในกรณีที่ไม่ได้วิเคราะห์สารประกอบ PAHs ในทันที ให้เก็บตัวอย่างกระดาษกรองในตู้เย็นที่ควบคุมอุณหภูมิ - 20 องศาเซลเซียส)

11. ทำ Experimental blank โดยใช้กระดาษกรองเปล่า เพื่อตรวจสอบการปนเปื้อนบนกระดาษกรอง



รูปที่ 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นจากการเผาฟางข้าวในถังทดสอบ

### 3.5.2.2 การเก็บตัวอย่างฝุ่นละออง ในบรรยากาศที่มีการเผาไหม้ฟางข้าว เพื่อเตรียมพื้นที่ทาง การเกษตร

เก็บตัวอย่างฝุ่นละออง โดยใช้ 8 Stage Cascade Impactor ในบรรยากาศ บริเวณ อำเภอ  
ห้างฉัตร จังหวัดลำปาง วันที่ 20 มกราคม พ.ศ. 2552 เวลา 12:00 น. ถึง 21 มกราคม พ.ศ. 2552 เวลา  
22:00 น. มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมตัวอย่างกระดาษกรอง Quartz fiber filter (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก-1)
2. เตรียมเครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นแบบ 8 Stage Cascade Impactor (รายละเอียดแสดง  
ในหัวข้อ 3.5.1)
3. ติดตั้งอุปกรณ์เครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่น ที่ระดับความสูงจากพื้นดิน 1.50 เมตร บริเวณ  
ที่มีการเผาไหม้ฟางข้าว ในพื้นที่เกษตรกรรมหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต จำนวน 3 ไร่ โดยเก็บตัวอย่างฝุ่น  
ทางทิศทางใต้ลมห่างจากจุดที่มีการเผาไหม้ 15 เมตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. ทำการเก็บตัวอย่างฝุ่น เช่นเดียวกับข้อ 8-11 ในหัวข้อ 3.5.2.1
5. หาปริมาณความชื้นของฟางข้าวในภาคสนาม ตามวิธีมาตรฐานของ ASTM  
D3173 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก-3)

### 3.5.2.3 การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองในบรรยากาศ ระหว่างการเกิดปัญหาหมอกควัน

เก็บตัวอย่างฝุ่นละออง โดยใช้ 8 Stage Cascade Impactor ในบรรยากาศ บริเวณอำเภอเมือง จังหวัดลำปาง ระหว่างวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2552 เวลา 10:00 น. ถึง วันที่ 12 มีนาคม พ.ศ. 2552 เวลา 12:00 น. มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมตัวอย่างกระดาษกรอง Quartz fiber filter (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก-1)
2. เตรียมเครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นแบบ 8 Stage Cascade Impactor (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก-2)
3. ติดตั้งอุปกรณ์เครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นละออง 8 Stage Cascade Impactor ดังรายละเอียดในข้อ 3.5.1 ที่ระดับความสูงจากพื้นดิน 1.5 เมตร เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.6
4. ทำการเก็บตัวอย่างฝุ่นเช่นเดียวกับข้อ 8-11 ในหัวข้อ 3.5.2.1
5. ชุคควบคุมทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 แต่เก็บตัวอย่างอากาศในช่วงสภาพอากาศปกติ ไม่มีปัญหาหมอกควัน ระหว่างวันที่ 10-11 สิงหาคม พ.ศ. 2552 ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 สภาพแวดล้อมบริเวณที่เก็บตัวอย่างฝุ่นในบรรยากาศระหว่างเกิดปัญหาหมอกควัน



รูปที่ 3.7 สภาพแวดล้อมบริเวณที่เก็บตัวอย่างฝุ่น ในบรรยากาศช่วงสภาพอากาศปกติ

### 3.5.3 การวิเคราะห์สาร PAHs

#### 3.5.3.1 การวิเคราะห์สาร PAHs ที่ดูดซับบนอนุภาคฝุ่นขนาดต่าง ๆ

สกัดตัวอย่างฝุ่นบนกระดาษกรองโดยประยุกต์วิธีของ The Compendium Method TO-13A (U.S. EPA, 1999a ; มงคล และคณะ, 2550) มีขั้นตอนดังนี้

1. ตัดกระดาษกรองที่เก็บตัวอย่างฝุ่นแต่ละขนาดคัดแยก ให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ใส่ในขวดแก้วสีชา ขนาด 40 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลาย Acetonitrile ปริมาตร 15 มิลลิลิตร ในขวดแก้วสีชาปิดฝาให้สนิท แล้วพันฝาขวดด้วย paraffin film
3. สกัดโดยการเขย่าด้วยเครื่อง Ultrasonicator ที่มีกำลังเขย่า 154 Hz เป็นเวลา 30 นาที ควบคุมอุณหภูมิของเครื่อง Ultrasonicator โดยเติมน้ำแข็งเพื่อป้องกันการระเหยของสาร PAHs
4. กรองสารละลายที่ได้ด้วยกระดาษกรองชนิดไนลอน (nylon) ขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน ใส่ในขวดแก้วสีชาขนาด 40 มิลลิลิตร
5. สกัดกระดาษกรองในข้อ 3 ซ้ำโดยใช้สารละลาย Acetonitrile ปริมาตร 15 มิลลิลิตร โดยสกัดตามข้อ 3-4
6. นำสารละลายที่กรองได้จากข้อ 4 และ 5 มาใส่รวมกัน ในขวดก้นกลมนำไประเหยตัวทำละลายออกโดยใช้เครื่องหมุนระเหยความดันต่ำ 100 มิลลิบาร์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จนเหลือปริมาตรประมาณ 1 มิลลิลิตร
7. ใช้ dropper คูดสารละลายจากขวดก้นกลมที่ได้ลงในขวดวัดปริมาตรสีชาขนาด 1 มิลลิลิตร จากนั้นกลั้วสารละลายตัวอย่างที่ตกค้างในขวดก้นกลมด้วย Acetonitrile
8. ปรับปริมาตรสารละลายที่ได้ ให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 มิลลิลิตร โดยใช้ Acetonitrile (ในกรณีที่มีปริมาตรเกิน 1 มิลลิลิตร ให้พ่นด้วยก๊าซไนโตรเจน เพื่อลดปริมาตรสารละลาย)
9. Clean-up สารละลายที่สกัดได้ โดยใช้ C18 cartridge ขนาด 3 มิลลิลิตร และมีน้ำหนัก 500 มิลลิกรัม ก่อนการใช้ C18 cartridge ต้อง conditions ด้วยสารละลายผสม Hexane กับ dichloromethane อัตราส่วน 1:1 ปริมาตร 20 มิลลิลิตร
10. ใช้ dropper คูดสารละลายตัวอย่างในข้อ 8 ลงใน C18 cartridge กลั้วสารละลายตัวอย่างที่ตกค้างในขวดสีชาด้วย Acetonitrile
11. ชะสารละลายตัวอย่างโดยใช้ 20 % Dichloromethane ใน Hexane ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลดปริมาตรสารละลายตัวอย่างลงเหลือ 1 มิลลิลิตร ด้วยการพ่นก๊าซไนโตรเจน
12. วิเคราะห์หาชนิดและปริมาณ PAHs ด้วยเครื่อง GC-MS/SIM Mode โดยเทียบกับสารละลาย PAHs มาตรฐานผสม 16 ชนิด (รายละเอียดการเตรียมสารละลายมาตรฐานในภาคผนวก ก-5) โดยใช้สภาวะดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สภาวะของการวิเคราะห์ชนิด และปริมาณสารประกอบ PAHs ด้วยเครื่อง GC-MS

Parameters	Condition
Gas Chromatograph	6890 N (Agilent Technologies, USA)
Carrier gas	Helium, Flow rate 1 ml/min
Column	HP 5, 30 m x 0.25 mm I.D. x 0.25 $\mu$ m (film thickness) capillary column (J&W Scientific, USA)
Initial column temperature	80 °C
Temperature program ramp rate	Injector temperature : 290 °C Oven temperature 80 °C (initial temperature), holding at 80 °C for 2 mins, then increased from 80 °C to 150 °C at 20 °C /min, holding at 150 °C for 10 mins, next increased from 150 °C to 285 °C at 5 °C /min, then increased from 285 °C to 300 °C at 3 °C /min and hold at 300 °C for 7 mins.
Injector mode splitless	1 $\mu$ l
Purge flow split vent	60 ml/min @ 1 °C
Final temperature	300 °C
Final hold time	10 mins
Analytical time	50 mins
Detector	Mass Spectrometer 5973 N (Agilent Technologies, USA)
MS mode	EI mode (SIM mode)
MS detector temperature	300 °C
Mass range / scan speed	30-500 amu/sec.
Transfer line temperature	300 °C
Filament / multiplier delay	6 mins

### 3.5.3.2 การวิเคราะห์หาร้อยละการกักเก็บของสารตัวอย่าง PAHs

นำกระดาษกรองเปล่าที่ใช้เก็บตัวอย่างฝุ่น มาเติมสารละลายมาตรฐาน PAHs ที่ทราบความเข้มข้นเท่ากับ 0.20 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ไว้ใน plate ที่ปิดฝา แล้วหุ้มด้วยแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ ทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที

1. ตัดกระดาษกรองที่เก็บตัวอย่างฝุ่น ให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ใส่ในขวดแก้วสีชา ขนาด 40 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลาย Acetonitrile ปริมาตร 15 มิลลิลิตร ในขวดแก้วสีชาปิดฝาให้สนิท แล้วพันฝาขวดด้วย paraffin film
3. สกัดโดยการเขย่าด้วยเครื่อง Ultrasonicator ที่มีกำลังเขย่า 154 Hz เป็นเวลา 30 นาที ควบคุมอุณหภูมิของเครื่อง Ultrasonicator โดยการเติมน้ำแข็งเพื่อป้องกันการระเหยของสาร PAHs
4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4-12 ในหัวข้อ 3.5.3.1

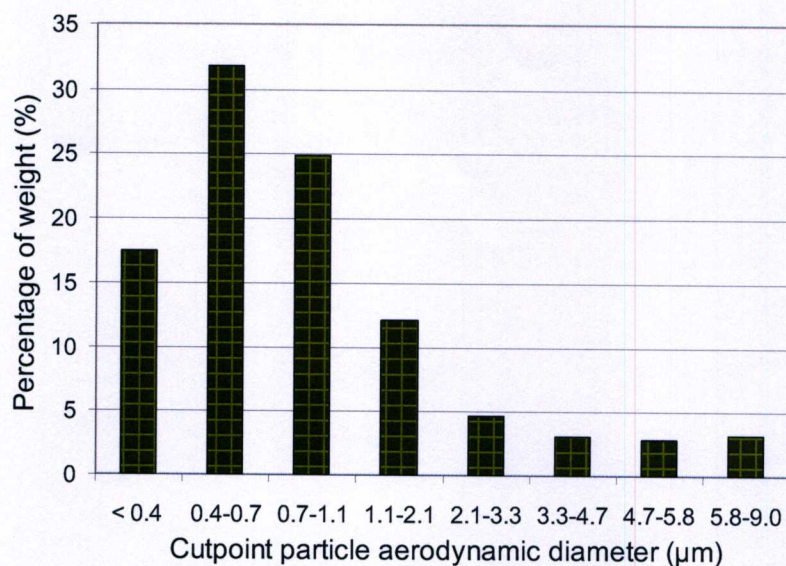
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการศึกษารูปแบบการกระจายตัวของฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวล

##### 4.1.1 รูปแบบการกระจายตัวของขนาดและความเข้มข้นของฝุ่นละออง ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ

การกระจายตัวของขนาดและความเข้มข้นของฝุ่นละออง ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าว ทำการศึกษาโดยเผาฟางข้าวที่มีค่าความชื้นเท่ากับ 4.34 % (รายละเอียดแสดงใน ตารางที่ ข-1 ภาคผนวก ข) ในถังทดสอบ บริเวณคณะวิทยาศาสตร์ ในวันที่ 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2552 เวลา 11:00 - 12:00 น. เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างอากาศด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นแบบ 8 ชั้น (8 Stage Cascade Impactor) ที่อัตราการไหลเฉลี่ย 28.354 ลิตรต่อนาที (รายละเอียดแสดงใน ตารางที่ ข-2 ภาคผนวก ข) อุณหภูมิเฉลี่ย 30.5 °C, ความชื้นสัมพัทธ์ 46 % และความดันบรรยากาศ 1,012.5 มิลลิบาร์ ไม่มีความเร็วและทิศทางลม เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวมีลมสงบ (รายละเอียดแสดงใน ตารางที่ ข-3 ภาคผนวก ข) จากผลการวิเคราะห์ พบฝุ่นละอองขนาดเล็กมากกว่าฝุ่นขนาดใหญ่ โดยพบฝุ่นขนาด 0.4-0.7 ไมโครเมตร (stage 6) มากที่สุดเท่ากับ 31.8 % โดยมีน้ำหนักฝุ่นเท่ากับ 0.0985 กรัม และความเข้มข้นเท่ากับ 2,396.65 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 บรรยากาศ ฝุ่นขนาด 4.7-5.8 ไมโครเมตร (stage 1) น้อยที่สุดเท่ากับ 2.8 % โดยมีน้ำหนักฝุ่นเท่ากับ 0.0087 กรัม และความเข้มข้นเท่ากับ 211.68 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 บรรยากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.1 (รายละเอียดแสดงในตารางที่ ข-4 ภาคผนวก ข) ซึ่งการกระจายตัวของอนุภาคฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบนี้ ไมโครเมตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Keshtkar และ Ashbaugh (2007) ซึ่งพบการกระจายตัวของอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กมากกว่าขนาดใหญ่



รูปที่ 4.1 รูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคของฝุ่นละออง ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ

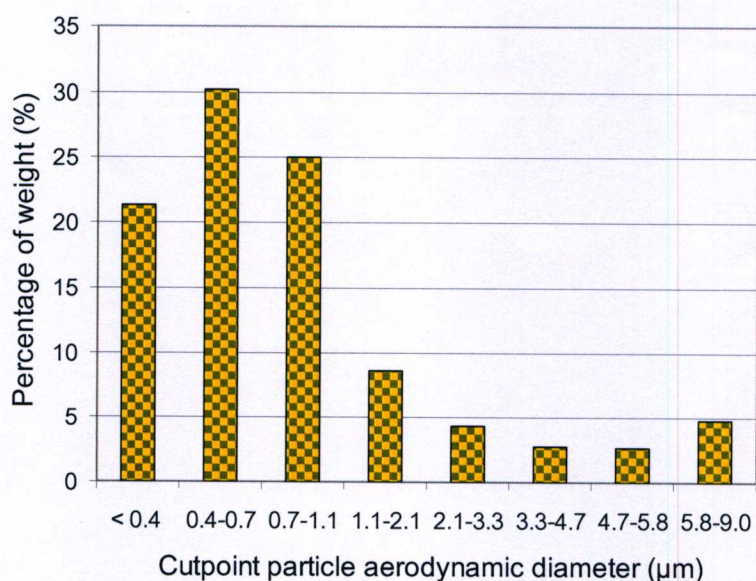
ตารางที่ 4.1 ความเข้มข้นของฝุ่น ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ

ชั้นที่	ช่วงขนาด (μm)	น้ำหนักฝุ่น (g)	เปอร์เซ็นต์ฝุ่น (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (μg/m <sup>3</sup> ) @ 25 °C 1 atm	ความเข้มข้นสะสมฝุ่น (μg/m <sup>3</sup> )
0	5.8 - 9.0	0.0098	3.2	238.45	7,540.33
1	4.7 - 5.8	0.0087	2.8	211.68	7,301.88
2	3.3 - 4.7	0.0095	3.1	231.15	7,090.20
3	2.1 - 3.3	0.0147	4.7	357.67	6,859.05
4	1.1 - 2.1	0.0374	12.1	910.00	6,501.37
5	0.7 - 1.1	0.0771	24.9	1,875.96	5,591.38
6	0.4 - 0.7	0.0985	31.8	2,396.65	3,715.42
7	< 0.4	0.0542	17.5	1,318.77	1,318.77
รวม		0.3099	100.00	7,540.33	

หมายเหตุ : เก็บตัวอย่างอากาศ ในถังทดสอบ 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2552 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

#### 4.1.2 รูปแบบการกระจายตัวของขนาดและความเข้มข้นของฝุ่นละออง ที่เกิดจากการเผาไหม้ ฟางข้าว ในพื้นที่ทำการเกษตร

รูปแบบการกระจายตัวของขนาดและความเข้มข้นของฝุ่นละอองในบรรยากาศ ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าว เพื่อเตรียมพื้นที่การเกษตร ศึกษาโดยเผาฟางข้าวที่มีค่าความชื้น 7.51 % (รายละเอียดแสดงใน ตารางที่ ข-5 ภาคผนวก ข) ในที่นาจำนวน 3 ไร่ บริเวณอำเภอห้างฉัตร บริเวณจังหวัดลำปาง ระหว่างวันที่ 20 มกราคม พ.ศ. 2552 เวลา 12:00 น. ถึงวันที่ 21 มกราคม พ.ศ. 2552 เวลา 22:00 น. เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยเก็บตัวอย่างอากาศที่ระยะห่าง 15 เมตร ในทิศใต้ลม ด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นแบบ 8 ชั้น (8 Stage Cascade Impactor) ที่อัตราการไหลเฉลี่ย 28.145 ลิตรต่อนาที (รายละเอียดแสดงใน ตารางที่ ข-6 ภาคผนวก ข) ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 21.0 °C, ความชื้นสัมพัทธ์ 56 % และความดันบรรยากาศ 1,015.12 มิลลิบาร์ ไม่มีความเร็วและทิศทางลม เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวมีลมสงบ (รายละเอียดแสดงใน ตารางที่ ข-7 ภาคผนวก ข) จากผลการวิเคราะห์ พบว่าขนาดฝุ่นละอองมากที่สุด อยู่ในช่วง 0.4-0.7 ไมโครเมตร (stage 6) มากที่สุดเท่ากับ 30.2 % โดยมีน้ำหนักฝุ่นเท่ากับ 0.0435 กรัม และความเข้มข้นเท่ากับ 1,056.24 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 บรรยากาศ ฝุ่นละอองน้อยที่สุด อยู่ในช่วง 4.7-5.8 ไมโครเมตร (stage 1) เท่ากับ 2.6 % โดยมีน้ำหนักฝุ่นเท่ากับ 0.0039 กรัม และความเข้มข้นเท่ากับ 94.70 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 บรรยากาศ (ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ ตารางที่ 4.2 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข-8) นอกจากนี้ยังพบว่า ความเข้มข้นของฝุ่นละอองสะสมขนาดเล็กกว่า 2.1 ไมโครเมตร เท่ากับ 2,986.60 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (85.3 %) ที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 บรรยากาศ ซึ่งมีค่าเกินมาตรฐาน WHO (AQG) และ U.S. EPA (2006) ที่กำหนดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร ที่ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ที่มีผลต่อสุขภาพ เท่ากับ 25 และ 35 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yang และคณะ (2006) พบการกระจายตัวของอนุภาคฝุ่นละอองมากที่สุด อยู่ในช่วงระหว่าง 0.1-3.2 ไมโครเมตร เท่ากับ 61.0 % ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในพื้นที่ทำการเกษตร



รูปที่ 4.2 รูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคของฝุ่นละออง ที่เกิดจากการเผาฟางข้าว เพื่อเตรียมพื้นที่การเกษตร จังหวัดลำปาง

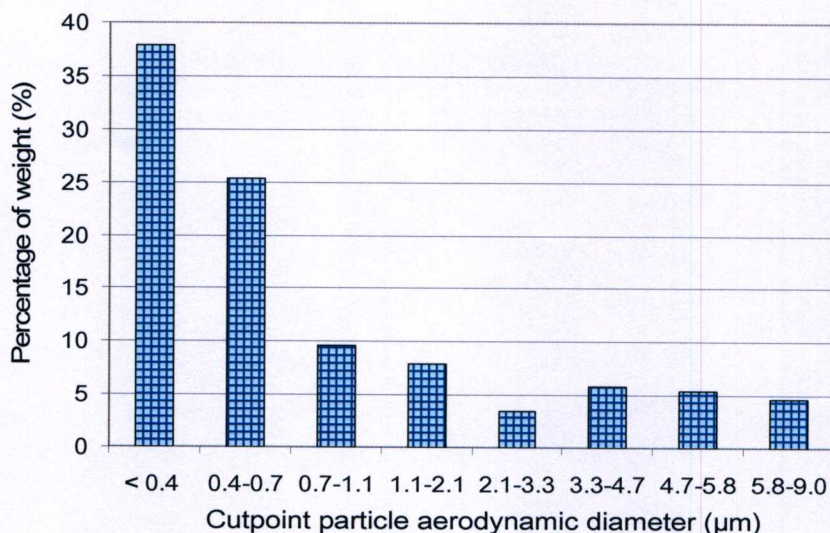
ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นของฝุ่นที่เกิดจากการเผาฟางข้าวในพื้นที่การเกษตร จังหวัดลำปาง

ชั้นที่	ช่วงขนาด (µm)	น้ำหนักฝุ่น (g)	เปอร์เซ็นต์ฝุ่น (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (µg/m <sup>3</sup> ) @ 25 °C 1 atm	ความเข้มข้นสะสมฝุ่น (µg/m <sup>3</sup> )
0	5.8 - 9.0	0.0070	4.9	169.97	3,503.79
1	4.7 - 5.8	0.0039	2.6	94.70	3,333.82
2	3.3 - 4.7	0.0041	2.8	99.55	3,239.12
3	2.1 - 3.3	0.0063	4.3	152.97	3,139.57
4	1.1 - 2.1	0.0125	8.7	303.52	2,986.60
5	0.7 - 1.1	0.0361	25.0	878.55	2,683.08
6	0.4 - 0.7	0.0435	30.2	1,056.24	1,806.53
7	< 0.4	0.0309	21.4	750.29	750.29
รวม		0.1443	100.0	3,503.79	

หมายเหตุ : เก็บตัวอย่างอากาศ จังหวัดลำปาง วันที่ 20-21 มกราคม 2552 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

#### 4.1.3 รูปแบบการกระจายตัวของขนาดและความเข้มข้นของฝุ่นละอองในบรรยากาศ ระหว่าง เกิดปัญหาหมอกควันในจังหวัดลำปาง

การศึกษารูปแบบการกระจายตัวของขนาดและความเข้มข้นของฝุ่นละอองในบรรยากาศ ระหว่างเกิดปัญหาหมอกควัน บริเวณอำเภอเมือง จังหวัดลำปาง โดยเก็บตัวอย่างอากาศเมื่อวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2552 เวลา 10:00 น. ถึง 12 มีนาคม พ.ศ. 2552 เวลา 12:00 น. รวมเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นแบบ 8 ชั้น (8 Stage Cascade Impactor) ที่อัตราการไหลเฉลี่ย 28.389 ลิตร ต่อนาที (รายละเอียดแสดงใน ตารางที่ ข-9 ภาคผนวก ข) ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 27.5 °C, ความชื้นสัมพัทธ์ 55 % และความดันบรรยากาศ 1,009.08 มิลลิบาร์ ไม่มีความเร็วและทิศทางลม เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงฤดูหนาวมีความเร็วลมสงบ และสภาพอากาศนิ่ง (รายละเอียดแสดงใน ตารางที่ ข-10 ภาคผนวก ข) พบว่าขนาดฝุ่นละอองมากที่สุด อยู่ในช่วงน้อยกว่า 0.4 ไมโครเมตร (stage 7) เท่ากับ 37.9 % โดยมีน้ำหนักฝุ่นเท่ากับ 0.0052 กรัม และความเข้มข้นเท่ากับ 14.33 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ฝุ่นละอองน้อยที่สุด อยู่ในช่วง 2.1-3.3 ไมโครเมตร (stage 3) เท่ากับ 3.5 % โดยมีน้ำหนักฝุ่นเท่ากับ 0.00048 กรัม และความเข้มข้นเท่ากับ 1.32 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ ตารางที่ 4.3 (รายละเอียดแสดงใน ตารางที่ ข-11 ภาคผนวก ข) ซึ่งรูปแบบการกระจายตัวของอนุภาคฝุ่นแตกต่างจากรูปแบบการกระจายตัวของฝุ่นที่เกิดจากการเผาฟางข้าว อย่างไรก็ตาม รูปแบบการกระจายตัวของฝุ่นระหว่างเกิดปัญหาหมอกควัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Smith และคณะ (1987) ศึกษาการกระจายตัวของฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้ของไม้ พบว่ามีปริมาณการกระจายตัวของฝุ่นละอองที่มีขนาดน้อยกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามขนาดของฝุ่นละอองที่เล็กลง ซึ่งสอดคล้องกับในช่วงเวลาดังกล่าว จังหวัดลำปางเกิดปัญหาไฟป่า ดังนั้น ปัญหาหมอกควันในช่วงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2552 (รูปที่ 4.5ก) เกิดจากไฟป่า อย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษาขนาดและองค์ประกอบของฝุ่นละอองที่เกิดจากไฟป่าเพิ่มเติม



รูปที่ 4.3 รูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคของฝุ่นละอองระหว่างการเกิดปัญหาหมอกควัน จังหวัดลำปาง

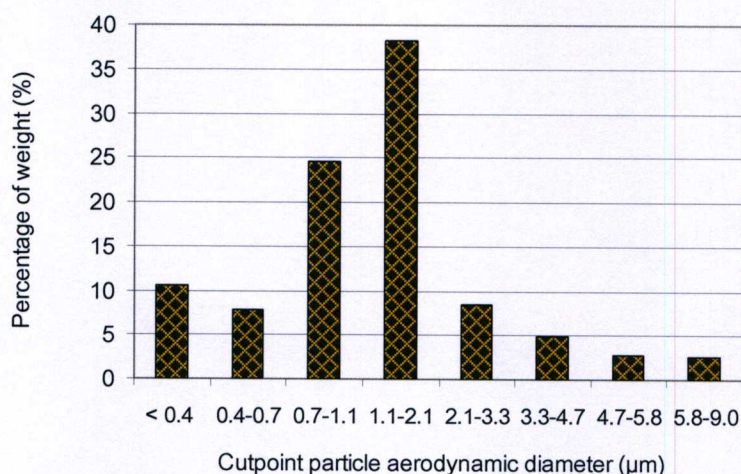
ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นของฝุ่นระหว่างที่เกิดปัญหาหมอกควัน จังหวัดลำปาง

ชั้นที่	ช่วงขนาด (μm)	น้ำหนักฝุ่น (g)	เปอร์เซ็นต์ฝุ่น (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (μg/m <sup>3</sup> ) @ 25 °C 1 atm	ความเข้มข้นสะสมฝุ่น (μg/m <sup>3</sup> )
0	5.8 - 9.0	0.00064	4.7	1.76	37.84
1	4.7 - 5.8	0.00074	5.4	2.04	36.08
2	3.3 - 4.7	0.00079	5.8	2.18	34.04
3	2.1 - 3.3	0.00048	3.5	1.32	31.86
4	1.1 - 2.1	0.00108	7.9	2.98	30.54
5	0.7 - 1.1	0.00132	9.6	3.64	27.56
6	0.4 - 0.7	0.00348	25.3	9.59	23.92
7	< 0.4	0.00520	37.9	14.33	14.33
รวม		0.01373	100.0	37.84	

หมายเหตุ : เก็บตัวอย่างอากาศ จังหวัดลำปาง วันที่ 9-12 มีนาคม 2552 เป็นเวลา 72 ชั่วโมง คิดเทียบเป็น 24 ชั่วโมง

จากผลการวิเคราะห์ฝุ่นละอองในบรรยากาศ ช่วงเวลาสภาพอากาศปกติ (รูปที่ 4.5-ข) บริเวณอำเภอเมือง จังหวัดลำปาง เมื่อวันที่ 10 สิงหาคม พ.ศ. 2552 เวลา 10:00 น. ถึง 11 สิงหาคม พ.ศ. 2552 เวลา 10:00 น. เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยเก็บตัวอย่างอากาศ (บริเวณเดียวกับการเก็บตัวอย่างระหว่างเกิดปัญหาหมอกควัน) ด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นแบบ 8 ชั้น (8 Stage Cascade Impactor) ที่อัตราการไหลเฉลี่ย 28.369 ลิตรต่อนาที (รายละเอียดแสดงใน ตารางที่ ข-12 ภาคผนวก ข)

ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 29.5 °C, ความชื้นสัมพัทธ์ 70.4 % และความดันบรรยากาศ 1,003.90 มิลลิบาร์ ไม่มี ความเร็วและทิศทางลม เนื่องจากลมสงบ (รายละเอียดแสดงใน ตารางที่ ข-13 ภาคผนวก ข) จากการวิเคราะห์ พบว่าขนาดฝุ่นละอองมากที่สุด อยู่ในช่วง 1.1-2.1 ไมโครเมตร (stage 4) เท่ากับ 38.14 % โดยมีน้ำหนักฝุ่นเท่ากับ 0.00049 กรัม และความเข้มข้นเท่ากับ 12.40 ไมโครกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร ที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 บรรยากาศ ฝุ่นละอองน้อยที่สุด อยู่ในช่วง 5.8-9.0 ไมโครเมตร (stage 0) เท่ากับ 2.58 % โดยมีน้ำหนักฝุ่นเท่ากับ 0.00003 กรัม และความเข้มข้น เท่ากับ 0.84 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 บรรยากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ ตารางที่ 4.4 (รายละเอียดแสดงใน ตารางที่ ข-14 ภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.4 รูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคของฝุ่นละออง ในช่วงสภาพอากาศปกติ จังหวัดลำปาง

ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นของฝุ่น ในช่วงสภาพอากาศปกติ จังหวัดลำปาง

ชั้นที่	ช่วงขนาด (µm)	น้ำหนักฝุ่น (g)	เปอร์เซ็นต์ฝุ่น (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (µg/m <sup>3</sup> ) @ 25 °C 1 atm	ความเข้มข้นสะสมฝุ่น (µg/m <sup>3</sup> )
0	5.8 - 9.0	0.00003	2.58	0.84	32.41
1	4.7 - 5.8	0.00004	3.09	0.92	31.57
2	3.3 - 4.7	0.00006	4.90	1.59	30.65
3	2.1 - 3.3	0.00011	8.51	2.76	29.06
4	1.1 - 2.1	0.00049	38.14	12.40	26.30
5	0.7 - 1.1	0.00032	24.48	7.96	13.90
6	0.4 - 0.7	0.00010	7.73	2.51	5.95
7	< 0.4	0.00014	10.57	3.43	3.43
รวม		0.00129	100.00	32.41	

หมายเหตุ : เก็บตัวอย่างอากาศ วันที่ 10-11 สิงหาคม 2552 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



(ก)

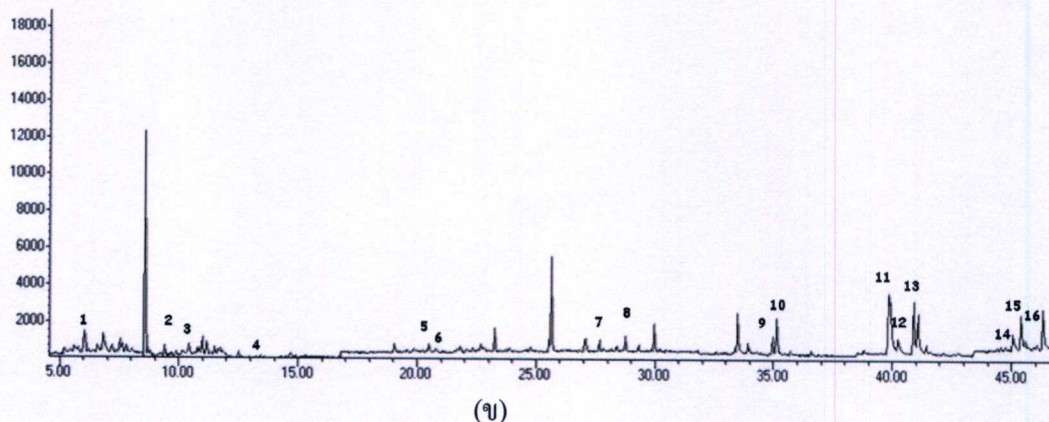
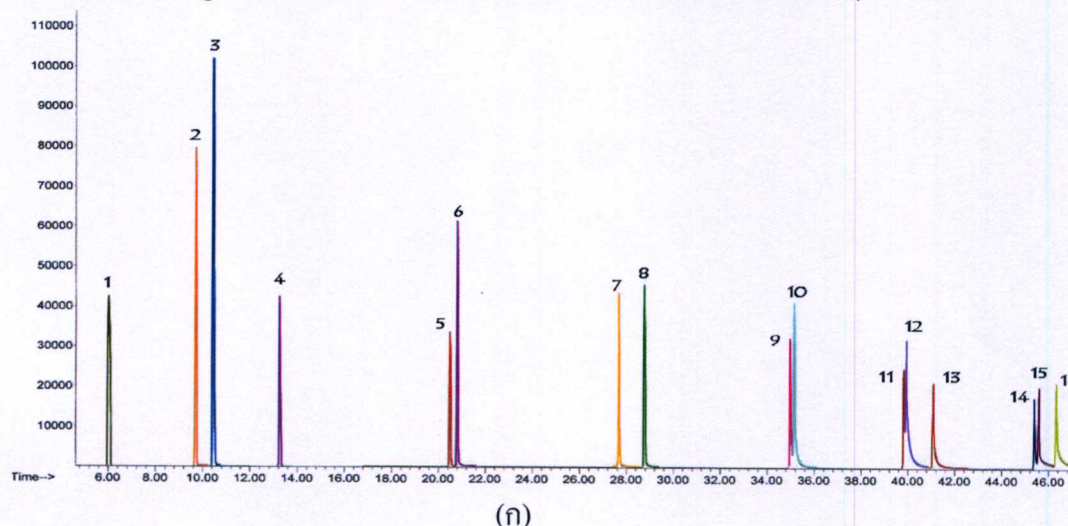
(ข)

**รูปที่ 4.5** สภาพบรรยากาศบริเวณจังหวัดลำปาง ในระหว่างช่วงเวลาที่เกิดปัญหาหมอกควัน (ก) และช่วงสภาพอากาศปกติ (ข)

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็ก ในบรรยากาศทั่วไป ในสภาพอากาศปกติ และในช่วงที่เกิดปัญหาหมอกควัน ในจังหวัดลำปาง มีความแตกต่างกัน นั่นคือการกระจายตัวของฝุ่นละอองขนาดเล็กในช่วงที่เกิดปัญหาหมอกควันมีค่าเกินค่ามาตรฐาน ซึ่งสอดคล้องกับจำนวนผู้ป่วยโรคระบบทางเดินหายใจที่เข้ารับการรักษาตัวในโรงพยาบาลจังหวัดลำปางในช่วงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2552 เพิ่มขึ้นเป็นวันละ 300 ราย จากจำนวนผู้ป่วย 120 ราย ในสถานการณ์ปกติ (<http://region3.prd.go.th/ct/news/viewnews.php?ID=09022817443>)

## 4.2 ผลการศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสาร PAHs ในอนุภาคฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ

ชนิดและปริมาณสาร PAHs ในฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ ศึกษาโดยการสกัดด้วย Acetonitrile จากนั้นนำไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง GC-MS (SIM mode) โดยชนิดของ PAHs วิเคราะห์โดยเทียบกับ Retention time ของสารละลายมาตรฐานผสม PAHs 16 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ร่วมกับ Library ของ GC-MS ส่วนปริมาณของ PAHs คำนวณโดยเปรียบเทียบกับพื้นที่ใต้กราฟของสารละลายมาตรฐานผสม PAHs 16 ชนิด (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค)

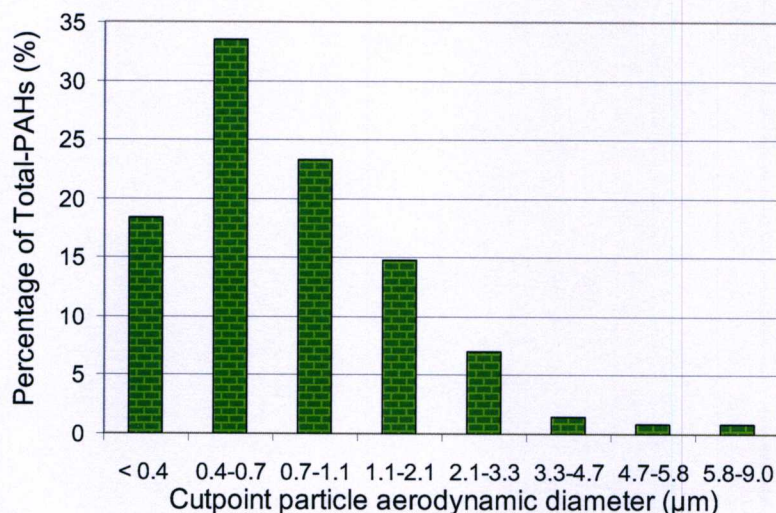


รูปที่ 4.6 โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐานผสม 16 PAHs (ก) และ สาร PAHs ในฝุ่นขนาด 0.4-0.7 ไมโครเมตร ระหว่างการเกิดปัญหาหมอกควัน (ข)

หมายเหตุ: (1) Naphthalene 6.04, (2) Acenaphthylene 9.70, (3) Acenaphthene 10.47, (4) Fluorene 6.04, (5) Phenanthrene 20.51, (6) Anthracene 20.80, (7) Fluoranthene 27.67, (8) Pyrene 28.77, (9) Benz(a)anthracene 35.15, (10) Chrysene 34.97, (11) Benzo(b)fluoranthene 39.94, (12) Benzo(k)fluoranthene 39.83, (13) Benzo(a)pyrene 41.08, (14) Indeno(1,2,3-cd)pyrene 45.73, (15) Dibenzo(a,h)anthracene 45.97, (16) Benzo(g,h,i)perylene 46.93

#### 4.2.1 ชนิดและปริมาณของสาร PAHs ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ

จากผลการวิเคราะห์สาร PAHs 16 ชนิดในฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ พบว่าฝุ่นละอองในช่วงขนาด 0.4-0.7 ไมโครเมตร (stage 6) มีความเข้มข้นของ Total-PAHs มากที่สุดเท่ากับ 33.48 % (24,005.13 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และฝุ่นขนาด 5.8-9.0 ไมโครเมตร (stage 0) มีความเข้มข้นของ Total-PAHs น้อยที่สุดเท่ากับ 0.82 % (585.87 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) โดยแนวโน้มความเข้มข้นของ PAHs เพิ่มขึ้น เมื่อฝุ่นละอองมีขนาดเล็กลง ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.5 (รายละเอียดแสดงใน ตารางที่ ง-2 ภาคผนวก ง) โดยรูปแบบการกระจายตัวของ PAHs จะมีความสัมพันธ์กับรูปแบบการกระจายตัวของฝุ่นละออง พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของ PAHs ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของฝุ่นละออง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Keshtkar และ Ashbaugh (2007)



รูปที่ 4.7 รูปแบบการกระจายตัวของ Total-PAHs ในอนุภาคฝุ่นขนาดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาฟางข้าว ในถังทดสอบ

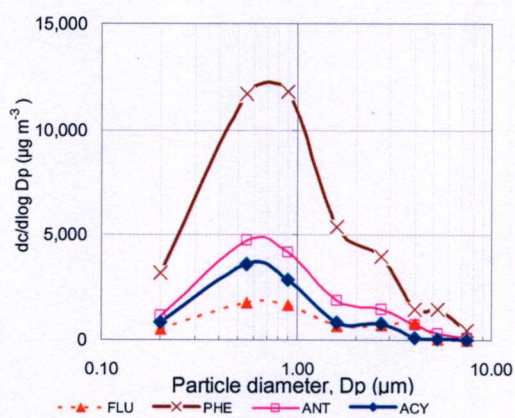
ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นของสาร PAHs ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ

ชั้นที่	ช่วงขนาด ( $\mu\text{m}$ )	ความเข้มข้น PAHs ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) @ 25 °C 1 atm	ความเข้มข้น สะสม PAHs ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	เปอร์เซ็นต์ความ เข้มข้น PAHs (%)	เปอร์เซ็นต์ความ เข้มข้นสะสม PAHs (%)
0	5.8 - 9.0	585.87	71,693.12	0.82	100.00
1	4.7 - 5.8	601.67	71,107.25	0.84	99.18
2	3.3 - 4.7	1,019.98	70,505.59	1.42	98.34
3	2.1 - 3.3	5,040.38	69,485.60	7.03	96.92
4	1.1 - 2.1	10,592.26	64,445.22	14.77	89.89
5	0.7 - 1.1	16,714.72	53,852.95	23.31	75.12
6	0.4 - 0.7	24,005.13	37,138.24	33.48	51.80
7	< 0.4	13,133.10	13,133.10	18.32	18.32
รวม		71,693.12		100.00	

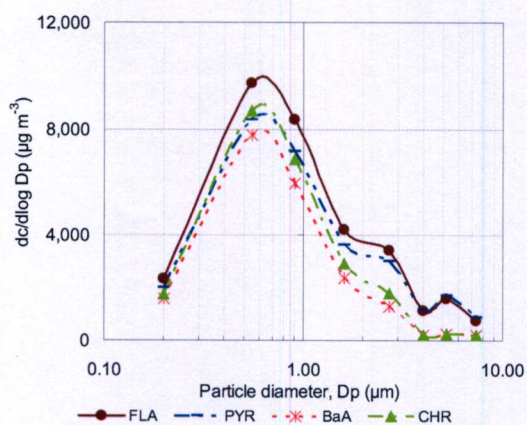
หมายเหตุ : เก็บตัวอย่างอากาศ ในถังทดสอบ วันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2552 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

การกระจายตัวของสารประกอบ PAHs 16 ชนิดในฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ สามารถแบ่งกลุ่มตามจำนวนวงอะโรมาติกออกเป็น 4 กลุ่ม คือ 1) สารประกอบ PAHs 3 วงอะโรมาติก ได้แก่ Acenaphthylene, Acenaphthene, Fluorene, Phenanthrene และ Anthracene 2) สารประกอบ PAHs 4 วงอะโรมาติก ได้แก่ Fluoranthene, Pyrene, Benz(a)anthracene และ Chrysene 3) สารประกอบ PAHs 5 วงอะโรมาติก ได้แก่ Benzo(b)fluoranthene, Benzo(k)fluoranthene Benzo(a)pyrene และ Dibenzo(a,h)anthracene 4) สารประกอบ PAHs 6 วงอะโรมาติก ได้แก่ Indeno(1,2,3-cd)pyrene, และ Benzo(g,h,i)perylene

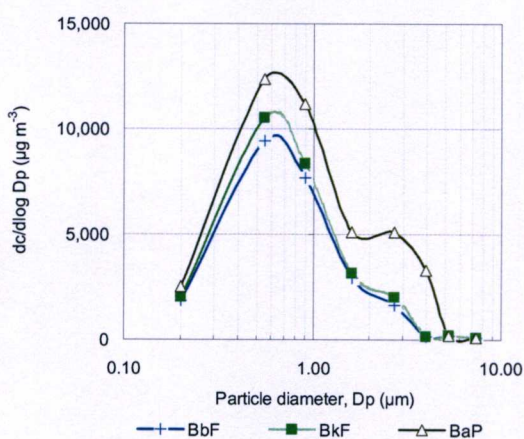
จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นได้ว่าสาร PAHs 3-6 วงอะโรมาติก มีแนวโน้มการกระจายเพิ่มขึ้นในฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กลง และมีการกระจายตัวมากที่สุด ในฝุ่นขนาด 0.4 - 0.7 ไมโครเมตร นอกจากนี้ยังพบว่า PAHs 3 วงอะโรมาติก คือ Phenanthrene มีการกระจายตัวสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Keshtkar และ Ashbaugh (2007) ซึ่งพบลักษณะการกระจายตัวของ Phenanthrene สูงสุดเช่นเดียวกัน และสาร PAHs 3-6 วงอะโรมาติก มีรูปแบบการกระจายตัวในฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ คล้ายคลึงกัน อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้พบว่า การกระจายตัวของสารประกอบ PAHs 5 วงอะโรมาติก มีการกระจายตัวสูงกว่า PAHs 6 วงอะโรมาติก ซึ่งไม่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Keshtkar และ Ashbaugh (2007) พบว่า การกระจายตัวของสารประกอบ PAHs 6 วงอะโรมาติก มีการกระจายตัวสูงกว่า PAHs 5 วงอะโรมาติก ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับสภาวะการเผาไหม้ และปริมาณความชื้นของฟางข้าว ที่มีผลต่อการปลดปล่อยสารประกอบ PAHs ดังแสดงในงานวิจัยของ Korenaga และคณะ (2001) พบว่า ปริมาณความชื้น 0 % มีการปลดปล่อยสาร PAHs มากกว่าปริมาณความชื้น 5 %



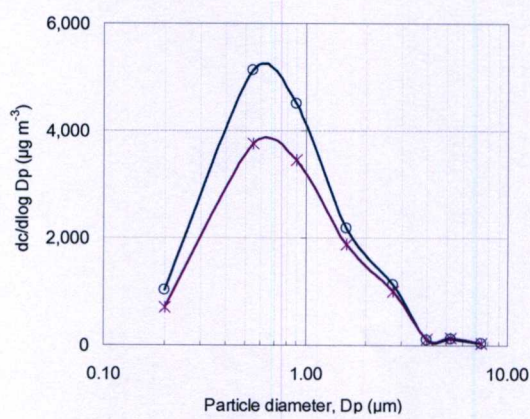
(ก)



(ข)



(ค)

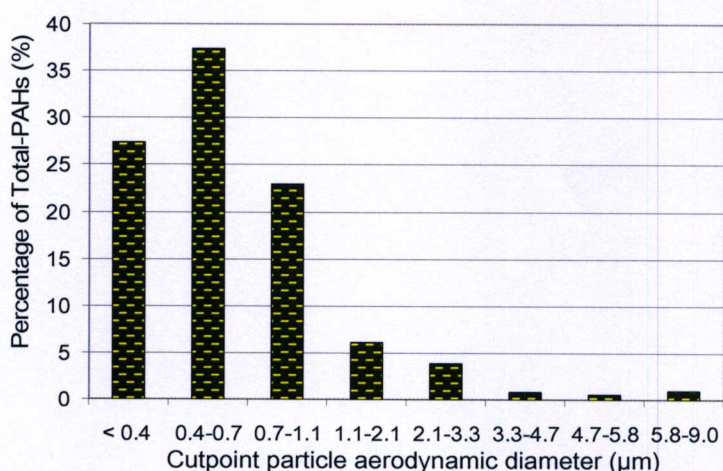


(ง)

รูปที่ 4.8 รูปแบบการกระจายตัวของสาร PAHs ในอนุภาคฝุ่นขนาดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้ ฟางข้าวในถังทดสอบ (ก) 3 วงอะโรมาติก, (ข) 4 วงอะโรมาติก, (ค) 5 วงอะโรมาติก, (ง) 6 วงอะโรมาติก

#### 4.2.2 ชนิดและปริมาณของสาร PAHs ในฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาฟางข้าว ในพื้นที่การเกษตร จังหวัดลำปาง

จากผลการวิเคราะห์สาร PAHs 16 ชนิดในฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ พบว่าฝุ่นละอองในช่วงขนาด 0.4-0.7 ไมโครเมตร (stage 6) มีความเข้มข้นรวมของ Total-PAHs มากที่สุดเท่ากับ 37.38 % (65.88 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 บรรยากาศ และฝุ่น 4.7-5.8 ไมโครเมตร (stage 1) มีความเข้มข้นรวมของ Total-PAHs น้อยที่สุดเท่ากับ 0.60 % (1.05 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 บรรยากาศ จะเห็นได้ว่าในฝุ่นขนาดเล็กกว่า 2.1 ไมโครเมตร พบสารประกอบ Total-PAHs เท่ากับ 93.77 % ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.6 (รายละเอียดแสดงใน ตารางที่ ง-3 และ ง-4 ภาคผนวก ง)

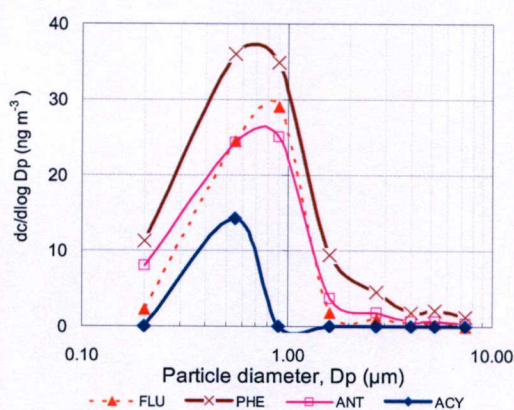


รูปที่ 4.9 รูปแบบการกระจายตัวของ Total-PAHs ในอนุภาคฝุ่นขนาดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในพื้นที่การเกษตร

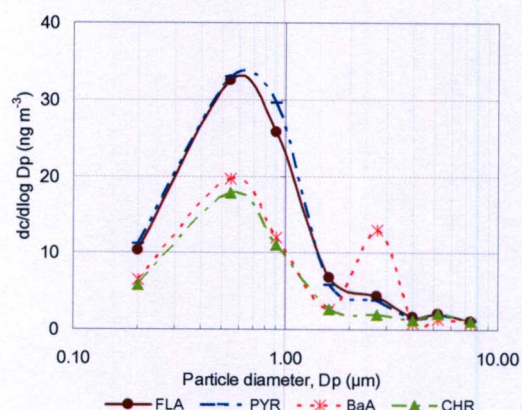
ตารางที่ 4.6 ความเข้มข้นของสารประกอบ PAHs ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าว ในพื้นที่การเกษตร

ชั้นที่	ช่วงขนาด (µm)	ความเข้มข้น PAHs (ng/m <sup>3</sup> ) @ 25 °C 1 atm	ความเข้มข้น สะสม PAHs (ng/m <sup>3</sup> )	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น PAHs (%)	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นสะสม PAHs (%)
0	5.8 - 9.0	1.70	176.23	0.97	100.00
1	4.7 - 5.8	1.05	174.53	0.60	99.03
2	3.3 - 4.7	1.41	173.48	0.80	98.44
3	2.1 - 3.3	6.81	172.07	3.86	97.64
4	1.1 - 2.1	10.63	165.26	6.03	93.77
5	0.7 - 1.1	40.57	154.64	23.02	87.74
6	0.4 - 0.7	65.88	114.07	37.38	64.72
7	< 0.4	48.18	48.18	27.34	27.34
รวม		176.23			

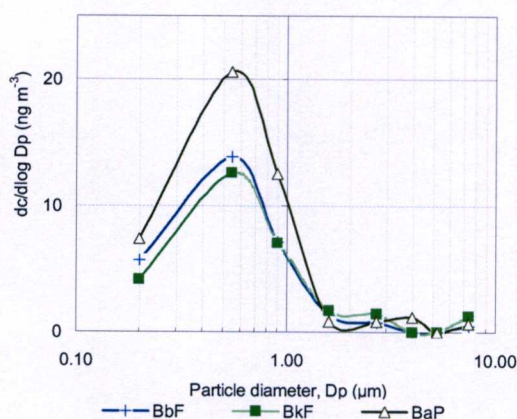
จากรูปที่ 4.10 การกระจายตัวของสารประกอบ PAHs 3-6 วงอะโรมาติก ในอนุภาคฝุ่นขนาดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในพื้นที่การเกษตร พบว่าการกระจายตัวมากที่สุด ในฝุ่นขนาด 0.4-0.7 ไมโครเมตร ซึ่งแนวโน้มการกระจายตัวของ PAHs เพิ่มขึ้นในฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กลง มีลักษณะการกระจายตัวคล้ายคลึงกับการกระจายตัวของ PAHs ในถังทดสอบ แสดงให้เห็นได้ว่า รูปแบบการกระจายตัวของสารประกอบ PAHs สามารถบ่งชี้แหล่งกำเนิดที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวได้ (ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ก-ง) การกระจายตัวของสาร PAHs ในพื้นที่ทางการเกษตร มีปริมาณการกระจายตัวของสาร PAHs ที่ต่ำกว่าการเผาไหม้ในถังทดสอบ ทั้งนี้อาจเกิดจากการเก็บตัวอย่างจากถังทดสอบเก็บตัวอย่างใกล้ปากปล่อง ส่วนพื้นที่ทางการเกษตร เก็บตัวอย่างห่างออกไปประมาณ 15 เมตร จึงเกิดการเจือจางในบรรยากาศ



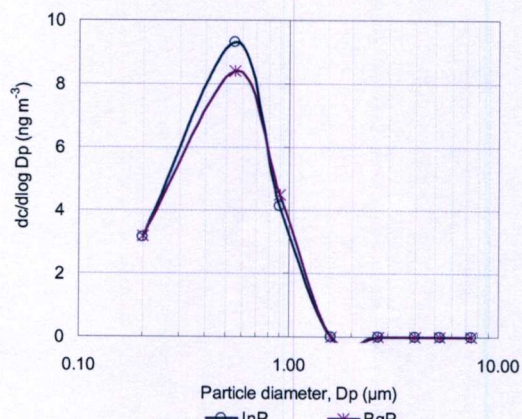
(ก)



(ข)



(ค)

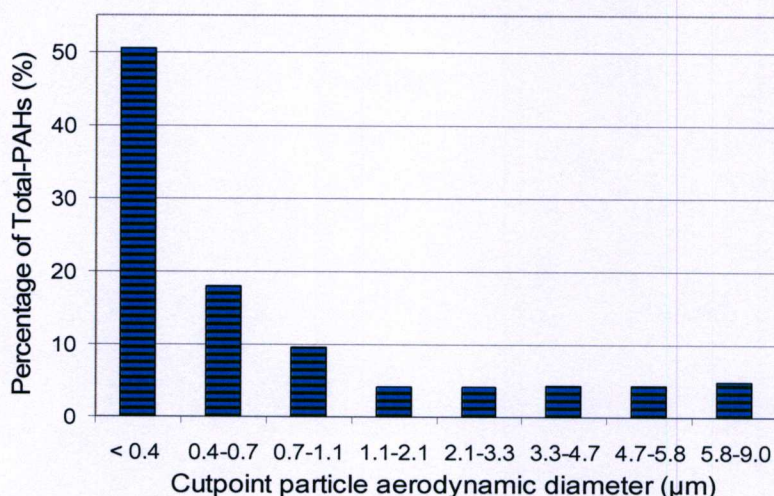


(ง)

**รูปที่ 4.10** รูปแบบการกระจายตัวของสาร PAHs ในอนุภาคฝุ่นขนาดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในพื้นที่สำหรับการเกษตร (ก) 3 วงอะโรมาติก, (ข) 4 วงอะโรมาติก, (ค) 5 วงอะโรมาติก, (ง) 6 วงอะโรมาติก

#### 4.2.3 ชนิดและปริมาณของสาร PAHs ที่เกิดจากปัญหาหมอกควัน จังหวัดลำปาง

จากผลการวิเคราะห์สาร PAHs 16 ชนิดในฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ พบว่าฝุ่นละอองในช่วงขนาดน้อยกว่า 0.4 ไมโครเมตร (stage 7) มีความเข้มข้นรวมของ Total-PAHs มากที่สุดเท่ากับ 50.54 % (4.9407 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 บรรยากาศ ฝุ่นละอองขนาด > 1.1 ไมโครเมตร จะมีความเข้มข้นรวมของ Total-PAHs ใกล้เคียงกัน โดยฝุ่นขนาด 1.1-2.1 ไมโครเมตร (stage 4) มีความเข้มข้นรวมของ Total-PAHs น้อยที่สุดเท่ากับ 4.11 % (0.4023 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 บรรยากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.7 (ดูรายละเอียดในตาราง ง-5 และ ง-6 ภาคผนวก ง)

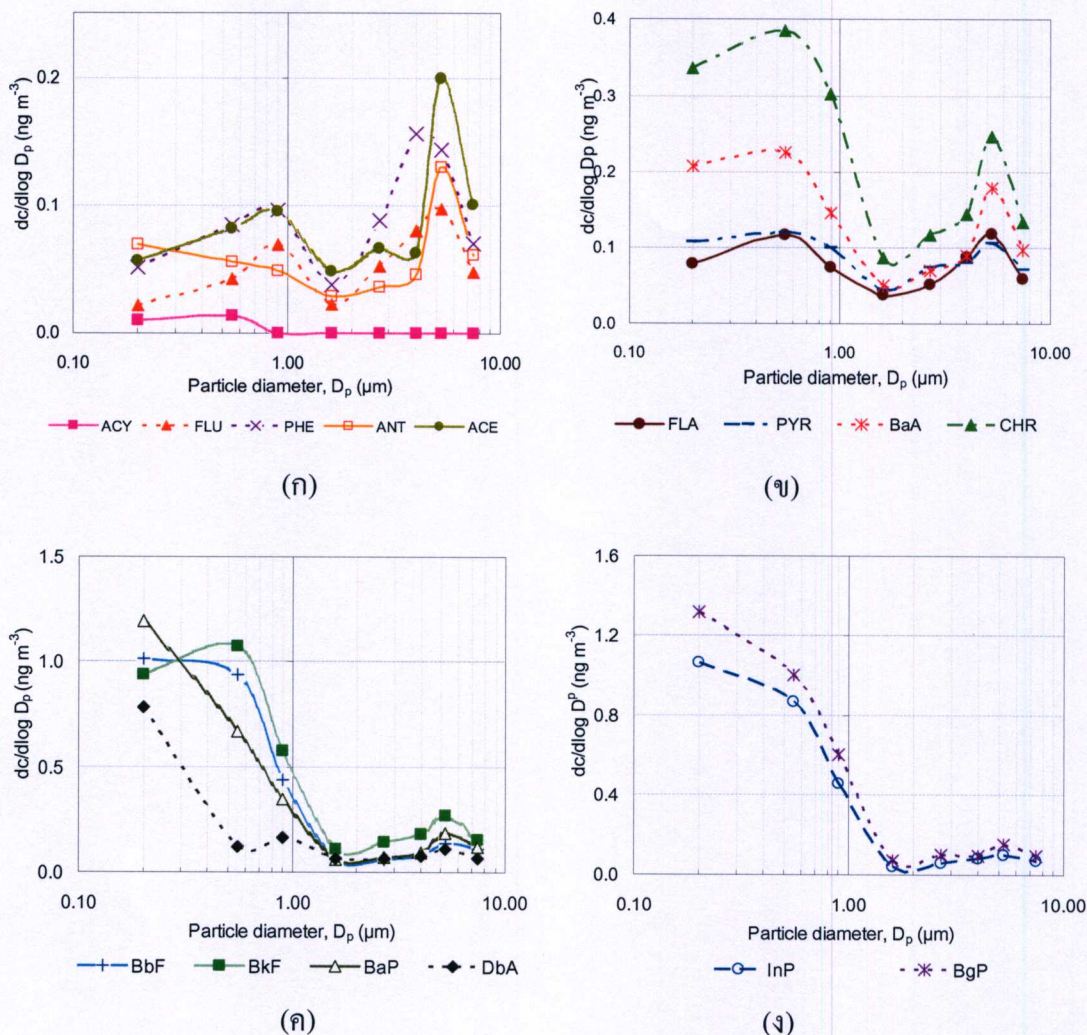


รูปที่ 4.11 รูปแบบการกระจายตัวของ Total-PAHs ในอนุภาคฝุ่นขนาดต่างๆ ระหว่างเกิดปัญหาหมอกควัน

ตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นของสาร PAHs ในอนุภาคฝุ่นขนาดต่าง ๆ ที่เกิดปัญหาหมอกควัน

ชั้นที่	ช่วงขนาด (μm)	ความเข้มข้น PAHs (ng/m <sup>3</sup> ) @ 25 °C 1 atm	ความเข้มข้นสะสม PAHs (ng/m <sup>3</sup> )	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น PAHs (%)	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นสะสม PAHs (%)
0	5.8 - 9.0	0.4774	9.7760	4.88	100.00
1	4.7 - 5.8	0.4274	9.2985	4.37	95.12
2	3.3 - 4.7	0.4265	8.8711	4.36	90.74
3	2.1 - 3.3	0.4071	8.4446	4.16	86.38
4	1.1 - 2.1	0.4023	8.0375	4.11	82.22
5	0.7 - 1.1	0.9336	7.6352	9.55	78.10
6	0.4 - 0.7	1.7609	6.7016	18.01	68.55
7	<0.4	4.9407	4.9407	50.54	50.54
รวม		9.7760		100.00	

หมายเหตุ : เก็บตัวอย่างอากาศ จังหวัดลำปาง วันที่ 9-12 มีนาคม 2552 เป็นเวลา 72 ชั่วโมง คิดเทียบเป็น 24 ชั่วโมง

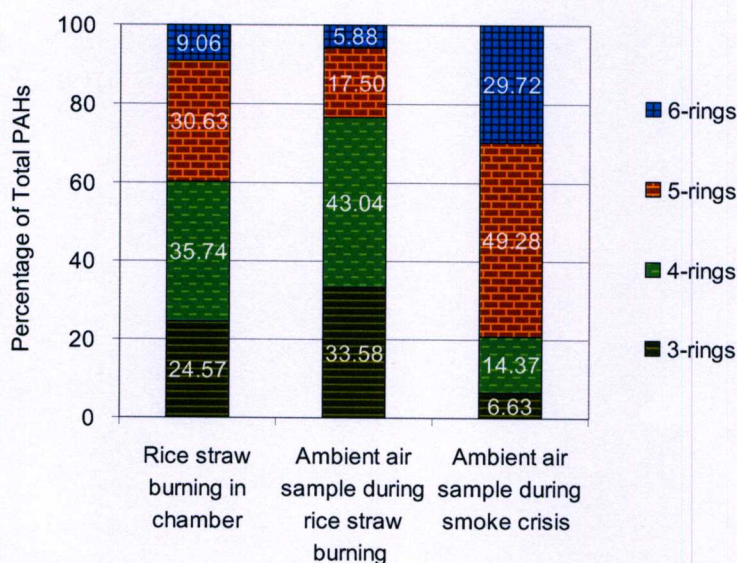


**รูปที่ 4.12** รูปแบบการกระจายตัวของสาร PAHs ในอนุภาคฝุ่นขนาดต่างๆ ระหว่างเกิดปัญหาหมอกควัน (ก) 3 วงอะโรมาติก, (ข) 4 วงอะโรมาติก, (ค) 5 วงอะโรมาติก, (ง) 6 วงอะโรมาติก

จากรูปที่ 4.12 การกระจายตัวของสาร PAHs 3-4 วงอะโรมาติก เป็นแบบ bimodal โดยการกระจายตัวของสาร PAHs 3 วงอะโรมาติก มีการกระจายตัวสูงสุดในฝุ่นขนาด 4.7-5.8 ไมโครเมตร รองลงมา คือ ขนาด 0.7-1.1 ไมโครเมตร (รูปที่ 4.12-ก) ส่วนการกระจายตัวของสาร PAHs 4 วงอะโรมาติก มีการกระจายตัวสูงสุดในฝุ่นขนาด 0.4-0.7 ไมโครเมตร รองลงมา คือ ขนาด 4.7-5.8 ไมโครเมตร (รูปที่ 4.12-ข) ทั้งนี้เนื่องจาก PAHs 3 วงอะโรมาติก มีความดันไอสูง จึงทำให้ระเหยกลายเป็นไอได้ง่าย อย่างไรก็ตาม PAHs นี้สามารถควบแน่นรวมตัวกันอีกครั้ง (Recondensation) กลายเป็นฝุ่นขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้พบ PAHs 3 วงอะโรมาติก ในฝุ่นขนาด 4.7-5.8 ไมโครเมตร มากกว่าฝุ่นขนาดเล็กกว่า 0.4-0.7 ไมโครเมตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Allen และคณะ (1996) พบว่าในช่วงที่สภาพอากาศเย็น อุณหภูมิต่ำ จะพบสาร PAHs 3 วงอะโรมาติกในฝุ่นขนาดใหญ่ มากกว่าฝุ่นที่มีขนาดเล็ก และงานวิจัยของ Duan และคณะ (2005) พบว่า PAHs 3-4 วงอะโรมาติก มี

การดูดซับสะสมแบบหลายชั้น (Multilayer adsorptive accumulation) ในฝุ่นที่มีขนาดใหญ่ สำหรับการกระจายตัวของ PAHs 5-6 วงอะโรมาติก มีการกระจายตัวสูงสุดในฝุ่นขนาด 0.4 ไมโครเมตร รองลงมา คือ ขนาด 4.7-5.8 ไมโครเมตร ทั้งนี้เนื่องจาก สาร PAHs 5-6 วงอะโรมาติก มีค่าความดันไอต่ำ และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง (252-278) มีการดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กได้ดีกว่า (Duan และคณะ, 2005 ; Hien และคณะ, 2007)

การกระจายตัวของสาร PAHs ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ และพื้นที่ทางเกษตร มีความแตกต่างกับการกระจายตัวของสาร PAHs ที่เกิดปัญหาหมอกควัน พบว่า การกระจายตัวของสาร PAHs 3 วงอะโรมาติก ที่เกิดจากการเผาไหม้ของฟางข้าว ในฝุ่นขนาด 0.4-0.7 ไมโครเมตร มีการกระจายตัวสูงกว่า สาร PAHs 3 วงอะโรมาติก ที่เกิดจากปัญหาหมอกควัน ทั้งนี้ อาจจะกล่าวได้ว่า ในสภาพบรรยากาศที่เกิดปัญหาหมอกควัน สาร PAHs เกิดกระบวนการควบแน่นจากฝุ่นที่มีขนาดเล็กกลายเป็นฝุ่นที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งกลไกดังกล่าวขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดของฝุ่นละออง (Zielinska และคณะ, 2004) และปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มแสง และปฏิกิริยาเคมีในบรรยากาศ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวนี้มีผลต่อการกระจายตัวของสารประกอบ PAHs ในฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ (Venkataraman และคณะ, 1994; 1999)



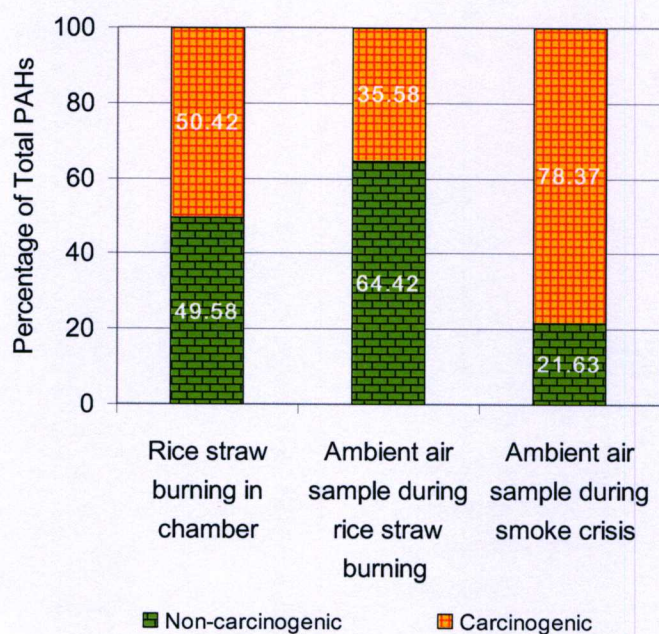
รูปที่ 4.13 การกระจายตัวของสาร PAHs 3-6 วงอะโรมาติก

จากรูปที่ 4.13 แสดงเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของสาร PAHs 3-6 วงอะโรมาติก จากพื้นที่ศึกษาทั้ง 3 แหล่ง พบว่าสาร PAHs ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ มีการกระจายตัวของสาร PAHs 3-6 วงอะโรมาติก เท่ากับ 24.57, 35.74, 30.63 และ 9.06 % ตามลำดับ และ พื้นที่

เตรียมการเกษตร เท่ากับ 33.58, 43.04, 17.50 และ 5.88 % ตามลำดับ ซึ่งสัดส่วนเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของสาร PAHs ของการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบและการเผาฟางข้าวในพื้นที่เตรียมการเกษตร มีค่าใกล้เคียงกัน การกระจายตัวของสาร PAHs 3-6 วงอะโรมาติก ในบรรยากาศระหว่างที่เกิดปัญหาหมอกควัน เท่ากับ 6.63, 14.37, 49.28 และ 29.72 % ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากการกระจายตัวของ PAHs ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ และพื้นที่ทางการเกษตร ทั้งนี้เนื่องจาก PAHs ที่เกิดจากปัญหาหมอกควัน มีแหล่งกำเนิดอื่นร่วมด้วย เช่น ไฟป่า เป็นต้น

#### 4.2.4 ชนิดและปริมาณของสารประกอบ PAHs ที่เป็นสารร่วมก่อมะเร็ง และสารก่อมะเร็ง

จากผลการวิเคราะห์หาสารประกอบ PAHs ในอนุภาคฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ พบว่าสารประกอบ PAHs จำนวน 16 ชนิด สามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ สาร PAHs ที่น่าจะก่อมะเร็งในคน และ สารที่ไม่ก่อมะเร็ง โดย U.S. EPA (1986) ได้กำหนดสาร PAHs ในกลุ่มที่ 2B (Probably carcinogenic to humans) ได้แก่ Benz(a)anthracene, Chrysene, Benzo(b)fluoranthene, Benzo(k)fluoranthene, Benzo(a)pyrene, Indeno(1,2,3-cd)pyrene และ Dibenzo(a,h)anthracene และสารที่ไม่ก่อมะเร็ง Naphthalene, Acenaphthylene, Acenaphthene, Fluorene, Phenanthrene, Anthracene, Fluoranthene, Pyrene และ (Benzo(g,h,i)perylene



รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของสาร PAH ที่เป็นสารก่อมะเร็ง และไม่ใช้สารก่อมะเร็ง

จากการศึกษาสาร PAHs 16 ชนิด ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ พบสารก่อมะเร็ง และไม่ใช้สารก่อมะเร็ง เท่ากับ 50.42 และ 49.58 % ตามลำดับ ในพื้นที่เตรียมการเกษตร พบ

สารก่อมะเร็ง และไม่ใช่สารก่อมะเร็ง เท่ากับ 35.58 และ 64.42 % ตามลำดับ และในช่วงระหว่างการเกิดปัญหาหมอกควัน พบสารก่อมะเร็ง และไม่ใช่สารก่อมะเร็ง เท่ากับ 78.37 และ 21.63 % ตามลำดับ (รูปที่ 4.14) โดยส่วนใหญ่ PAHs 5-6 วงอะโรมาติก เป็นสารก่อมะเร็งมากกว่า PAHs 3-4 วงอะโรมาติก นอกจากนี้ PAHs 5-6 วงอะโรมาติก พบในอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กมากกว่าฝุ่นขนาดใหญ่ จึงทำให้สามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนล่างได้ดีกว่า ซึ่งเป็นสาเหตุในการเกิดโรคมะเร็งในปอด

การพิจารณาความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็งในปอด ซึ่ง WHO/IPCS (1998) ได้กำหนดค่าความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งในปอดของสาร PAHs 7 ชนิด ได้แก่ Benz(a)anthrazene, Chrysene, Benzo(b)fluoranthene, Benzo(k)fluoranthene, Benzo(a)pyrene, Indeno(1,2,3-cd)pyrene และ Dibenzo(a,h)anthracene แล้วนำมาเปรียบเทียบกับสาร PAHs ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ พื้นที่ทางการเกษตรและในระหว่างที่เกิดปัญหาหมอกควัน พบว่า PAHs 7 ชนิด จากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ และพื้นที่ทางการเกษตร มีค่าเกินมาตรฐานของ WHO/IPCS (1998) สำหรับ PAHs ที่เกิดจากปัญหาหมอกควัน พบว่า Benz(a)anthrazene, Chrysene และ Benzo(k)fluoranthene มีค่าเท่ากับ  $0.28 \times 10^{-3}$ ,  $0.47 \times 10^{-3}$  และ  $1.07 \times 10^{-3}$  ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่าเกินมาตรฐาน ส่วน Benzo(b)fluoranthene, Benzo(a)pyrene, Indeno(1,2,3-cd)pyrene และ Dibenzo(a,h)anthracene มีค่าไม่เกินมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 สาร PAHs 7 ชนิด ในฝุ่นละอองที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งในปอด

NO	PAHs carcinogen	Rice straw burning in chamber ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Ambient air sample during rice straw burning ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Ambient air sample during smoke crisis ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	WHO/IPCS, 1998 Unit risk ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
1	Benz(a)anthrazene	5,037.12	14.71	$0.28 \times 10^{-3}$	$4.0 \times 10^{-5}$
2	Chrysene	5,799.14	11.75	$0.47 \times 10^{-3}$	$8.7 \times 10^{-4}$
3	Benzo(b)fluoranthene	6,110.82	8.83	$0.99 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$
4	Benzo(k)fluoranthene	6,733.13	7.96	$1.07 \times 10^{-3}$	$2.8 \times 10^{-4}$
5	Benzo(a)pyrene	8,848.38	12.48	$1.03 \times 10^{-3}$	$8.7 \times 10^{-3}$
6	Indeno(1,2,3-cd)pyrene	3,622.24	4.98	$0.99 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-3}$
7	Dibenzo(a,h)anthracene	-	-	$0.59 \times 10^{-3}$	$1.8 \times 10^{-2}$

### 4.3 การจำแนกแหล่งที่มาของสาร PAHs โดยใช้อัตราส่วนเฉพาะ

การศึกษ้อัตราส่วนเฉพาะ (Characteristic ratios) ของสาร PAHs ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ พบว่าอัตราส่วนของ BgP/InP เท่ากับ 0.77 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Jenkins และคณะ (1996a, b) ที่รายงานอัตราส่วนของ BgP/InP เท่ากับ 0.67 ส่วนในบรรยากาศช่วงระหว่างเกิดปัญหาหมอกควันพบว่า อัตราส่วนเฉพาะของ BaA/Chr มีค่าเท่ากับ 0.60 และอัตราส่วนเฉพาะของ BbF/BkF มีค่าเท่ากับ 0.92 (ตารางที่ 4.9) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Grimmer และคณะ (1983) ที่รายงานอัตราส่วนของ BaA/Chr เท่ากับ 0.62 และงานวิจัยของ Dickhut และคณะ (2000) ที่รายงานอัตราส่วนของ BbF/BkF เท่ากับ 0.76-1.08 นอกจากนี้ จากผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนเฉพาะของ InP/(BgP+InP) ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ การเผาไหม้ฟางข้าวในพื้นที่ทางการเกษตร และในบรรยากาศระหว่างเกิดปัญหาหมอกควัน มีค่าใกล้เคียงกัน เท่ากับ 0.51, 0.56 และ 0.45 ตามลำดับ อัตราส่วนเฉพาะของ Flu/(Flu+Pyr) ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ การเผาไหม้ฟางข้าวในพื้นที่ทางการเกษตร และในบรรยากาศระหว่างเกิดปัญหาหมอกควัน มีค่าเท่ากับ 0.53, 0.49 และ 0.46 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.9) ทั้งนี้อาจเกิดจากเนื่องจกวัตุุดิบที่เป็นแหล่งกำเนิดของ PAHs ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าว และการเกิดปัญหาหมอกควันมีองค์ประกอบคล้ายคลึงกัน

ตารางที่ 4.9 อัตราส่วนเฉพาะของสาร PAHs

Characteristic ratios	BaA/ Chr	BgP/ InP	BaP/BghiP	InP/BgP+InP	InP/ BgP	Flu/ (Flu+Pyr)	BbF/ BkF
1) Rice straw burning in chamber							
<0.4 $\mu\text{m}$	-	0.69	3.52	0.59	-	-	-
0.4-2.1 $\mu\text{m}$	-	0.77	3.13	0.56	-	-	-
2.1-9.0 $\mu\text{m}$	-	0.95	2.94	0.51	-	-	-
Total PAHs	0.87	0.77	3.17	0.56	1.30	0.53	0.91
2) Rice straw burning in agricultural field							
<0.4 $\mu\text{m}$	-	1.01	2.32	0.50	-	-	-
0.4-2.1 $\mu\text{m}$	-	0.95	2.62	0.51	-	-	-
2.1-9.0 $\mu\text{m}$	-	-	-	-	-	-	-
Total PAHs	1.25	0.97	2.57	0.51	1.03	0.49	1.11
3) Ambient air during smoke crisis							
<0.4 $\mu\text{m}$	-	1.24	0.91	0.45	-	-	-
0.4-2.1 $\mu\text{m}$	-	1.22	0.65	0.45	-	-	-
2.1-9.0 $\mu\text{m}$	-	1.42	1.06	0.41	-	-	-
Total PAHs	0.60	1.24	0.84	0.45	0.81	0.46	0.92

#### 4.4 การวิเคราะห์ทางสถิติของวิธีการทดลอง

##### 4.4.1 ผลการทดสอบความเที่ยงและค่าการวิเคราะห์ที่คืนกลับของวิธีวิเคราะห์

จากการทดสอบความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์สารละลายมาตรฐาน PAHs ผสม 16 ชนิด โดยเตรียมสารละลายมาตรฐาน PAHs มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.01 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร จำนวน 3 ขวด โดยขวดที่ 1 วิเคราะห์ด้วย GC-MS จำนวน 3 ครั้ง ขวดที่ 2 และ 3 วิเคราะห์อย่างละ 1 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.10 (รายละเอียดในตาราง ง-11 ภาคผนวก ง)

ตารางที่ 4.10 การทดสอบความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์

ลำดับ	สารประกอบ PAHs	ความเที่ยงของการตรวจวัด (RSD %) <sup>a</sup>	ความเที่ยงของการเตรียมสารละลายมาตรฐาน (RSD %) <sup>b</sup>
1	Naphthalene	2.24	4.90
2	Acenaphthylene	6.19	6.55
3	Acenaphthene	1.57	3.09
4	Fluorene	6.74	9.78
5	Phenanthrene	3.29	7.86
6	Anthracene	3.40	12.22
7	Fluoranthene	4.69	6.92
8	Pyrene	5.68	7.40
9	Benz(a)anthrazene	7.90	6.21
10	Chrysene	2.89	2.42
11	Benzo(b)fluoranthene	4.91	4.10
12	Benzo(k)fluoranthene	2.78	2.34
13	Benzo(a)pyrene	5.73	5.07
14	Indeno(1,2,3-cd)pyrene	3.32	7.71
15	Dibenzo(a,h)anthracene	5.21	3.72
16	Benzo(g,h,i)perylene	5.66	5.05

หมายเหตุ : <sup>a</sup>เตรียมสารละลายมาตรฐาน 1 ขวด วิเคราะห์โดยการฉีดสารในขวดซ้ำ 3 ครั้ง

<sup>b</sup>เตรียมสารละลายมาตรฐาน 3 ขวด วิเคราะห์โดยการฉีดสารในแต่ละขวด 1 ครั้ง

จากผลการทดลอง พบว่าความเที่ยงของการตรวจวัดด้วย GC-MS/SIM ในการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐาน PAHs 16 ชนิด จำนวน 1 ขวด มีค่า RSD อยู่ในช่วง 1.57-7.90 % และความเที่ยงของการเตรียมสารละลายมาตรฐาน จำนวน 3 ขวด มีค่า RSD อยู่ในช่วง 2.34-12.22 %

ตารางที่ 4-11 ค่าการวิเคราะห์ที่คืนกลับของวิธีวิเคราะห์

ลำดับ	สารประกอบ PAHs	% Recovery ( $\bar{X} \pm S.D.$ )
1	Naphthalene	95 $\pm$ 1.03
2	Acenaphthylene	94 $\pm$ 0.79
3	Acenaphthene	97 $\pm$ 1.99
4	Fluorene	97 $\pm$ 2.22
5	Phenanthrene	94 $\pm$ 2.62
6	Anthracene	86 $\pm$ 1.38
7	Fluoranthene	97 $\pm$ 0.93
8	Pyrene	99 $\pm$ 0.64
9	Benz (a) anthrazene	97 $\pm$ 2.13
10	Chrysene	96 $\pm$ 2.38
11	Benzo (b) fluoranthene	91 $\pm$ 1.42
12	Benzo (k) fluoranthene	97 $\pm$ 0.12
13	Benzo(a)pyrene	93 $\pm$ 0.09
14	Indeno (1,2,3-cd) pyrene	87 $\pm$ 4.10
15	Dibenzo(a,h) anthracene	91 $\pm$ 3.82
16	Benzo (g,h,i) perylene	89 $\pm$ 5.45

จากตารางที่ 4.11 แสดงเปอร์เซ็นต์การวิเคราะห์ที่คืนกลับของสาร PAHs 16 ชนิด โดยวิเคราะห์ด้วย GC-MS/SIM อยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ระหว่าง 86  $\pm$  1.38 ถึง 99  $\pm$  0.64 (รายละเอียดในตาราง ง-11 ภาคผนวก ง) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Duan และคณะ (2005) พบเปอร์เซ็นต์อยู่ในช่วงระหว่าง 70-124 จัดเป็นประสิทธิภาพของค่าเปอร์เซ็นต์ recovery ที่ได้จากการวิเคราะห์ที่มีคุณภาพ

#### 4.4.2 ผลการทดสอบขีดต่ำสุดของการตรวจวัดสารมาตรฐาน PAHs

จากการทดสอบขีดต่ำสุดของการตรวจวัดสารมาตรฐาน ตามวิธีมาตรฐานของ Miller, J.N และ Miller, J. N (2000) (รายละเอียดวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก-7)

ตารางที่ 4-12 ค่าขีดต่ำสุดของการตรวจวัดสารมาตรฐาน PAHs

ลำดับ	สารประกอบ PAHs	Limits of detection ( $\mu\text{g/ml}$ )
1	Naphthslene	0.0026
2	Acenaphthylene	0.0021
3	Acenaphthene	0.0009
4	Fluorene	0.0011
5	Phenanthrene	0.0491
6	Anthracene	0.2612
7	Fluoranthene	0.0051
8	Pyrene	0.0189
9	Benz(a)anthrazene	0.1165
10	Chrysene	0.1094
11	Benzo(b)fluoranthene	0.4222
12	Benzo(k)fluoranthene	0.1170
13	Benzo(a)pyrene	0.2896
14	Indeno(1,2,3-cd)pyrene	0.0725
15	Dibenzo(a,h)anthracene	0.0352
16	Benzo(g,h,i)perylene	0.0096

จากตารางที่ 4.12 แสดงค่าขีดต่ำสุดของการตรวจวัดสารมาตรฐาน PAHs 16 ชนิด โดยวิเคราะห์ด้วย GC-MS/SIM อยู่ในช่วง 0.0011 ถึง 0.4222 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (รายละเอียดในตาราง ง-12 ภาคผนวก ง)

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคฝุ่นขนาดต่าง ๆ และ PAHs ที่ดูดซับบนอนุภาคฝุ่นขนาดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้วัสดุชีวมวล โดยเก็บตัวอย่างอากาศด้วย 8-Stages Cascade Impactor ที่มีขนาดแตกต่างกัน 8 ขนาด คือ > 9.0, 9.0-5.8, 5.8-4.7, 4.7- 3.3, 3.3-2.1, 2.1-1.1, 1.1-0.7, 0.7-0.4 และ < 0.4 ไมครอน โดยสกัด PAHs ด้วย Acetonitrile โดยใช้ Ultrasonicator และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS/SIM จากผลการวิเคราะห์พบว่า การกระจายตัวของฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ และพื้นที่ทางการเกษตร พบการกระจายตัวของอนุภาคฝุ่นละอองขนาด 0.4-0.7 ไมครอนมากที่สุด เท่ากับ 28.70 และ 30.20 % ตามลำดับ โดยมีปริมาณ Total-PAHs เท่ากับ 33.48 และ 37.38 % ตามลำดับ ในขณะที่การกระจายตัวของฝุ่นละอองที่เกิดจากปัญหาหมอกควัน พบการกระจายตัวของฝุ่นละอองขนาดน้อยกว่า 0.4 ไมครอนมากที่สุด เท่ากับ 37.9 % ปริมาณ Total-PAHs เท่ากับ 50.54 %

การกระจายตัวของสาร PAHs 3-6 วงอะโรมาติก ในอนุภาคฝุ่นขนาดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ และพื้นที่ทางการเกษตร พบว่าการกระจายตัวมากที่สุด ในฝุ่นขนาด 0.4-0.7 ไมครอน ซึ่งแนวโน้มการกระจายตัวของ PAHs เพิ่มขึ้นในฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กลง

การกระจายตัวของสาร PAHs 3 วงอะโรมาติก ที่เกิดจากปัญหาหมอกควัน มีลักษณะการกระจายตัวแบบ bimodal ในฝุ่นละอองขนาด 4.7-5.4 ไมครอนมากที่สุด และรองลงมาคือ ฝุ่นละอองขนาด 0.7-1.1 ไมครอน สาร PAHs 4, 5 และ 6 วงอะโรมาติก พบในฝุ่นขนาด 0.4-0.7 ไมครอนมากที่สุด

เปอร์เซ็นต์ของสาร PAHs ที่น่าจะก่อมะเร็งในคน และสารที่ไม่ก่อมะเร็งที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบเท่ากับ 50.42 และ 49.58 % ตามลำดับ ในพื้นที่เตรียมการเกษตร พบสารก่อมะเร็ง และไม่ใช่สารก่อมะเร็ง เท่ากับ 35.58 และ 64.42 % ตามลำดับ และในช่วงระหว่างการเกิดปัญหาหมอกควัน พบสารก่อมะเร็ง และไม่ใช่สารก่อมะเร็ง เท่ากับ 78.37 และ 21.63 % ตามลำดับ

อัตราส่วนเฉพาะของ InP/(BgP+InP) ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ พื้นที่ทางการเกษตร และในบรรยากาศระหว่างเกิดปัญหาหมอกควัน มีค่าใกล้เคียงกัน เท่ากับ 0.51, 0.56 และ 0.45 ตามลำดับ อัตราส่วนเฉพาะของ Flu/(Flu+Pyr) ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในถังทดสอบ พื้นที่ทางการเกษตร และในบรรยากาศระหว่างเกิดปัญหาหมอกควัน เท่ากับ 0.53, 0.49 และ 0.46 ตามลำดับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการกระจายตัวของขนาด และความเข้มข้นของฝุ่นละอองที่มีขนาดต่าง ๆ จากการเผาไหม้ชีวมวลชนิดอื่น ๆ เนื่องจากการเผาในที่โล่งก่อให้เกิดปัญหาหมอกควัน ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดอีกหลายชนิด เช่น ไฟป่า การเผาไร่อ้อย และไร่ข้าวโพด เป็นต้น

2. ควรศึกษาการกระจายตัวของ PAHs ในอนุภาคฝุ่นละอองที่มีขนาดต่าง ๆ จากแหล่งกำเนิดอื่น ๆ และหาอัตราส่วนเฉพาะของ PAHs อื่น ๆ ที่สามารถใช้บ่งชี้แหล่งกำเนิด

## บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ. 2543. เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการของสารเคมีเฉพาะเรื่อง โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ ฯ
- กรมควบคุมมลพิษ. 2546. คู่มือการตรวจวัดฝุ่นละอองในบรรยากาศ. สำนักจัดการคุณภาพอากาศและเสียง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ ฯ
- กรมควบคุมมลพิษ. 2549. สถานการณ์และการจัดการปัญหามลพิษทางอากาศและเสียง. สำนักจัดการคุณภาพอากาศและเสียง.กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ ฯ
- กรมควบคุมมลพิษ. 2550. สถานการณ์และการจัดการปัญหามลพิษทางอากาศและเสียง.สำนักจัดการคุณภาพอากาศและเสียง. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ ฯ
- กรมควบคุมมลพิษ. 2552. สถานการณ์และการจัดการปัญหามลพิษทางอากาศและเสียง.สำนักจัดการคุณภาพอากาศและเสียง. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ.
- Available: [Online]. <http://www.pcd.go.th/Public/News/GetNewsThai.cfm?task=lt2009&id=15313>.
- กิติโรจน์ หวันตาหลา. 2546. การศึกษาปริมาณโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในบรรยากาศ ณ บริเวณสถานีขนส่งสายใต้. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.
- มงคล ราชเนากร และคณะ. 2550. โครงการวิเคราะห์เพื่อหามลพิษทางอากาศในอนุภาคฝุ่นในจังหวัดเชียงใหม่และจังหวัดลำพูน. รายงานฉบับสมบูรณ์. สกว.
- ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป Available: [Online].
- [http://infofile.pcd.go.th/law/2\\_51\\_air.pdf?CFID=1399571&CFTOKEN=92673250](http://infofile.pcd.go.th/law/2_51_air.pdf?CFID=1399571&CFTOKEN=92673250). 2547.
- ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (ร่าง). เรื่อง กำหนดมาตรฐานค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กเกิน ๒.๕ ไมครอนในบรรยากาศโดยทั่วไป Available : [Online].
- [http://www.aqnis.pcd.go.th/activity\\_event/PM2/mainactivity01.htm](http://www.aqnis.pcd.go.th/activity_event/PM2/mainactivity01.htm). 2552.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). 1995. "Toxicological profile for polycyclic aromatic hydrocarbons." US Department of Health and Human Services, Public Health Services. Available : [Online].<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp69.html>
- Allen, J.O., Dookeran, N.M., Smith, K.A., Sarofim, A.F., Taghizadeh, K. and Lafleur, A., 1996. " Measurement of polycyclic aromatic hydrocarbons associated with size-segregated atmospheric aerosols in Massachusetts." **Environmental Science and Technology** 30, 1023–1031.

- ✓ Bae, S.Y., Yi, S.M. and Kim, Y. P. 2002. "Temporal and spatial variation of the particle size distribution of PAHs and their dry deposition flux in Korea." **Atmospheric Environment**. 36: 5491-5500.
- ✓ Baek, S.O., Field R.A. and Goldstone, M.E. 1991. "A review of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Sources, fate and behavior." **Water, Air and Soil Pollution**. 60 : 279-300.
- ✓ Behymer, T., and Hites, R. 1988. "Photolysis of polycyclic aromatic hydrocarbons adsorbed on fly ash." **Environmental Science and Technology**. 22 : 1311-1319.
- ✓ Bjørseth, A and Olufsen, B.S. 1983. Long-range transfer of polycyclic aromatic hydrocarbons. In: Bjørseth, A. ed. **Handbook of PAH**. Marcel Dekker, Inc. New York., 507.
- ✓ Bjørseth, A. and Ramdahl, T. 1985. **Handbook of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: volume 2**. Bjørseth, A and Ramdahl, T. ed. Marcel Dekker, Inc. New York.
- ✓ Butler, J.D. and Crossley, P. 1981. "Reactivity of polycyclic aromatic hydrocarbons adsorbed on soot particles." **Atmospheric Environment** 15 : 91-94.
- ✓ Chaloulakou, A., Kassomenos, P., Spyrellis, N., Demokritou, P. and Koutrakis, P. 2003. "Measurement of PM 10 and PM 2.5 particle concentration in Athens." **Atmospheric Environment**. 39 : 649-660.
- ✓ Chetwittayachan, T., Shimazaki, D. and Yamamoto, K. 2002 . "A comparison of temporal variation of particle-bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (pPAHs) concentration in different urban environments: Tokyo, Japan, and Bangkok, Thailand." **Atmospheric Environment**. 36 : 2027-2037.
- ✓ Daisey, J.M., Cheney, J.L. and Lioy, P.J. 1986. "Profiles of organic particulate emission from air pollution sources: status and needs for receptor sources apportionment modeling." **Journal of the Air Pollution Control Association**. 36 : 17-33.
- ✓ Dickhut, R.M., Canuel, E.A., Gustafson, K.E., Liu, K., Arzayus, K.M., Walker, S.E., Edgecombe, G., Gaylor, M.O. and Macdonald, E.H. 2000. "Automotive sources of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons associated with particulate matter in the Chesapeake Bay region." **Environmental Science and Technology**, 34 : 4635-4640.
- ✓ Dockery, D.W., Pope, C.A., Xu, X., Spengler, J.D., Ware, J.H., Fay, M.E., Ferris, B.G. and Speizer, F.E. 1993. "An association between air pollution and mortality in six U.S. cities." **Journal of Medicine**, 329 : 1753-1759.

- Douben, P.E.T. 2003. "PAHs : An Ecotoxicological Perspective" .Chichester, England ; Hoboken, NJ, USA : Wiley. 404.
- Duan, J., Bi, X., Tan, T., Sheng, G. and Fu, J. 2005. "The differences of the size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) between urban and rural sites of Guangzhou, China." **Atmospheric Environment**. 78 : 190-203.
- Fang, G.C., Yuh-shen, W., Fu, P., Yang, I-L. and Chen, M-H. 2004. "Polycyclic aromatic hydrocarbons in the ambient air of suburban and industrial regions of central Taiwan." **Chemosphere**. 54 : 443-452.
- Forest Fire Control Division National Park, Wildlife and Plant Conservation Department Wildlife and Plant Conservation Department. 2009. Available : [Online].  
<http://www.dnp.go.th/forestfire/2546/firestatistic%20Th.htm>
- Guo, H., Lee, S.C., Ho, K.F., Wang, X.M. and Zou, S.C. 2003. "Particle - associated polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) in urban air of Hong Kong." **Atmospheric Environment**: 37 : 5307-5317.
- Grimmer, G., Jacob, J. and Naujack, K.W., 1983. "Profile of the polycyclic aromatic compounds from crude oils-inventory by GC GC-MS. PAH in environmental materials." **Journal for Analytical Chemistry**. 316 : 29-36.
- Holloway, M.P., Bigalow, M.C., McCoy, E.C., Anders, M., Rosenkranz, H.S. and Howard, P.C., 1987. Photochemical instability of 1-nitropyrene, 3-nitrofluoranthene, 1,8-dinitropyrene and their parent polycyclic aromatic hydrocarbons. *Mutation Research* 187: 199-207.
- International Agency for the Research on Cancer (IARC), 1984. "Evaluation of the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans. " **Polynuclear Aromatic Hydrocarbons**. Vol 32.
- IPCS, 1998. " International Program on Chemical Safety Selected Non-Heterocyclic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons." **Environmental Health Criteria 202**. World Health Organization, Geneva.
- Jenkins, B.M., Jones, A.D., Turn, S.Q and Williams, R.B., 1996a. "Emission factors for polycyclic aromatic hydrocarbons from biomass burning." **Environmental Science & Technology**. 30 : 2462-2469.
- Jenkins, B.M., Jones, A.D., Turn, S.Q. and Williams, R.B., 1996b. "Particle concentrations, gas-particle partitioning, and species inter correlations for polycyclic aromatic hydrocarbons emitted during biomass burning." **Atmospheric Environment**. 30 : 3825-3835.

- Kameda, Y., Shirai, J., Komai, T., Nakanishi, J. and Masunaga, S. 2005. "Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons : size distribution, estimation of their risk and their depositions to the human respiratory tract." **Science of the Total Environment**. 340 : 71–80.
- ✓Kamens, R.M., Bell, D.A., Perry, J.M. Goodman, R.G., Dietrich, A. and Tejada, S. 1985. "Airborne Mutagenic Transformations of Dilute Wood Smoke Systems : Analysis of Selected HPLC Fractions from Wood Smoke Particle Extracts." **Environmental Science & Technology**. 19 : 63-70.
- ✓Kamens., R.M, Fulcher., J.N. and Zhishi G., 1986. "Effects of temperature on wood soot: PAH decay in atmospheres with sunlight and low NO<sub>x</sub>." **Atmospheric Environment** 20 : 1579-1587.
- Kamens, R.M., Guo, Z., James, N.F. and Bell, D.A. 1988. "Influence of Humidity, Sunlight, and Temperature on the daytime Decay of Polyaromatic Hydrocarbons on Atmospheric Soot Particle." **Environmental Science & Technology**. 22 : 103-108.
- ✓Kamens, R.M., Karam, H., Guo, J., Perry, J. and Stockburger, L. 1989. "The Behavior of Oxygenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on Atmospheric Soot Particles." **Environmental Science & Technology**. 23 : 801-805.
- ✓Kamens, R.M. and Jang, M. 1998, "A Thermodynamic Approach for Modeling Partitioning of Semivolatile Organic Compounds on Atmospheric Particulate Matter, Humidity Effects." **Environmental Science & Technology**. 32: 1237-1243.
- ✓Kavouras, I.G., Koutrakis, P., Tsapakis, M., Lagoudaki, E., Stephanou, E.G., Von Baer, D. and Oyola, P. 2001, "Source apportionment of urban particulate aliphatic and polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs) using multivariate methods." **Environmental Science and Technology**. 35: 2288-2294.
- Kawanaka, Y., Matsumoto, E., Sakamoto, K., Wang, N. and Yun, S. 2004. "Size distributions of mutagenic compounds and mutagenicity in atmospheric particulate matter collected with a low-pressure cascade impactor." **Atmospheric Environment**. 38: 2125–2132.
- ✓Keshtkar, H. and Ashbaugh, L.L. 2007. "Size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon particulate emission factors from agricultural burning." **Atmospheric Environment**. 41 : 2729–2739.

- ✓ Kiss, G., Varga, Z., T.T., Rohrbacher, G. and Hlavay, J. 1998. "Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons on atmospheric aerosol particle of different sizes." **Atmospheric Research**. 46 : 253-261.
- Korenaga, T., Liu, X. and Huang, Z. 2001. "The influence of moisture content on polycyclic aromatic hydrocarbons emission during rice straw burning." **Chemosphere**. Global Change Science. 3 : 117-122.
- Lai, C.H., Chen K.H. and Wang., H.K. 2009. "Influence of rice straw burning on the levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural county of Taiwan." **Journal of Environmental Sciences**. 21 : 1200-1207.
- ✓ Lee, M.L. and Wright, B.W. 1980. "Capillary column gas chromatography of polycyclic aromatic compound (A review)." **Journal chromatography**. 18 : 345-358.
- Lee, M.L., Novotny, M.V. and Bartle, K.D. 1980. "Analytical chemistry of polycyclic aromatic compound. Academic press, Inc., New York, 443-444.
- ✓ Li, C.K. and Kamens, R.M. 1993. "The use of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons as source signatures in receptors modeling." **Atmospheric Environment**. 27: 523-532.
- ✓ Lindskog, A. 1983. "Transformation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons during Sampling." **Environmental Health Perspectives**. 47 : 81-84.
- ✓ Masclet, P., Bresson, MA. and Mouvier, G. 1987. "Polycyclic Aromatic Hydrocarbons emitted by power stations, and influence of combustion condition." **Fuel**. 66 : 556-562.
- ✓ Menichini, E., Monfredini, F. and Merli, F. 1999. "The temporal variability of the profile of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in urban air: a study in medium traffic area in Rome". **Atmospheric Environment**. 33 : 3739-3750.
- Miller, J.C. and Miller, J.N. "Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry." 4<sup>th</sup> edition. Ellis Horwood Limited. 2000. 116-122.
- ✓ Rogge, W.F., Hildemann, L.M., Mazurek, M.A., Cass, G.R., and Simoneit, B.R.T. 1993 . "Sources of fine organic aerosol 2, noncatalyst and catalyst-equipped automobiles and heavy-duty diesel trucks". **Environmental Science and Technology**. 27 : 636-651.
- Pankow, J.F., 1991. "Common y-intercept and single compound regressions of gas-partitioning data VS 1/T". **Atmospheric Environment**. 25. : 2229-2239.

- ✓ Panther, B.C., Hooper, M.A. and Tapper, N.J. 1999. "A comparison of air particulate matter and associated polycyclic aromatic hydrocarbons in some tropical and temperate urban environments." **Atmospheric Environment**. 33 : 4087-4099.
- ✓ Park, S.S., Kim, Y. J. and Kang, C.H. 2002. "Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in Seoul, Korea." **Atmospheric Environment**. 36: 2917-2924.
- Polynuclear aromatic hydrocarbons (PAH). 1987. "In Air quality guidelines for Europe, Copenhagen, World Health Organization Regional Office for Europe, 105-117.
- ✓ Possazini, M., Palo, V.D., Gigliucci, P., Sciano, M.C.T., and Cecinato, A. 2004. "Determination of phase-distributed PAH in Rome ambient air by denuder/GC-MS method". **Atmospheric Environment**. 38 : 1727-1734.
- Saez, F., Cabanas, A., Gonzalez, A., Murillo, J.M., Martinerz, J.M., Rodriguez, J.J and Dorronsoro, J.L. 2003. "Cascade Impactor Sampling to measure polycyclic aromatic hydrocarbon from biomass combustion process." **Biosystems Engineering**. 86 : 103-111.
- ✓ Smith, D.J.T and Harrison, R.M. 1996. "Concentrations, trends and vehicle source profile of polynuclear aromatic hydrocarbons in the UK." **Atmospheric Environment**. 30 : 2513-2525.
- Tsai, P.J., Shieh, H.Y., Lee, W.J and Loi, S.O. 2002. "Characterization of PAHs in the atmosphere of carbon black manufacturing workplaces." **Journal of Hazardous Material**. A91 : 25- 42.
- U.S. EPA. 1984. "List of the Sixteen PAHs with Highest Carcinogenic Effect." IEA Coal Research, London.
- ✓ U.S. EPA. 1986. "Carcinogen Classification, National Center for Environmental Assessment. Office of Research and Development." Washington, EPA-600/R-93-089.
- U.S. EPA. 1999. "Compendium Method TO-13A, Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Ambient Air using Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS)."
- U.S. EPA. 1999. "Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment, Washington Office, Washington," DC, EPA/600/P-99/002.
- ✓ Venkataraman, C., Liroy, P.J. and Friedlander, S.K. 1994. "Size distribution polycyclic aromatic hydrocarbon of and element carbon". **Environment Science and Technology**. 28 : 555-562.

- Venkataraman, C., Thomas, S. and Kulkarni, P. 1999. " Size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon gas-particle partitioning to urban aerosols." **Journal of Aerosol Science.** 30 : 759-770.
- WHO/IPCS. 1998. Selected non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons. Environmental Health Criteria 202; Geneva.
- World Health Organization. 2006. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide Global update 2005.  
Available : [Online].[www.euro.who.int/document/e87950.pdf](http://www.euro.who.int/document/e87950.pdf)
- Yang, H.H., Tai, C.H., Chao, M.R., Su, Y.L and Chien, SM. 2006. "Source identification and size distribution of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbon during rice straw burning period." **Atmospheric Environment.** 40 : 1266-1274.
- Yamasaki, H., Kuwata, K. and Miyamoto, H., 1982. " Effect of ambient temperature on aspects of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons. " **Environment Science and Technology.** 16(4) : 84-89.
- Zander, M. 1983. Physical and chemical properties of polycyclic aromatic hydrocarbons,. *In* Bjørseth. ed, "**Handbook of polycyclic aromatic hydrocarbons.**" Marcel Dekker, Inc., New York.
- Zou, Y.L., Zhang, W and Atkiston, S. 2003. The characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons emissions from burning of different firewood species in Australia." **Environmental pollution.** 124 : 283-289.  
<http://www.epa.gov/air/oaqps/eog/bces/module3/diameter/diameter.htm>  
<http://region3.prd.go.th/ct/news/viewnews.php?ID=090228174431>

**ภาคผนวก ก**

**การเตรียมกระดาษกรอง การคำนวณความเข้มข้นของฝุ่นละออง  
และสาร PAHs**

**ภาคผนวก ก-1 การทำความสะอาดเครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นแบบ 8 Stage Cascade Impactor**

- 1) ทำความสะอาดเครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่น ด้วยน้ำยาซักล้าง และฟองน้ำชนิดอ่อน เพื่อป้องกัน Cascade Impactor เป็นรอยขีดข่วน จากนั้น ล้างน้ำให้สะอาด
- 2) นำ Cascade Impactor และแผ่นเพลต ใส่ลงในเครื่องล้างความถี่สูง (sonicator) เพื่อทำความสะอาดฝุ่นที่เกาะบริเวณรูที่ตัดแยกฝุ่นของในแต่ละ Stage
- 3) เติมน้ำกลั่น หรือน้ำกรอง เพื่อป้องกันการเกิดคราบตะกอนติดบน Cascade Impactor และใส่น้ำยาซักล้างหรือน้ำยาล้างจาน ลงไปในเครื่องล้างความถี่สูง โดยให้น้ำกลั่นท่วมบริเวณ Cascade Impactor จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ซักควรระวัง ให้นำเอา O-ring ออกจาก Cascade Impactor แต่ละ stage เนื่องจากความร้อนจะทำให้ O-ring เสื่อมสภาพ
- 4) ล้าง Cascade Impactor ด้วยน้ำสะอาด และล้างด้วยน้ำกลั่นอีกรอบ
- 5) อบ Cascade Impactor ที่ 50-60 องศาเซลเซียส จนแห้ง

**ภาคผนวก ก-2 การเตรียมกระดาษกรองด้วยวิธีมาตรฐานของ U.S. EPA, 1999b และ  
กรมควบคุมมลพิษ, 2546**

งานวิจัยนี้ใช้กระดาษกรอง Quartz fiber filter มีประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคฝุ่น  
ละออง 98.5 % สภาพพิเศษเป็นกลาง ความหนาแน่น 6.51 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทนต่อ  
การกัดกร่อนของสภาพอากาศ และทนอุณหภูมิได้สูงสุด 900 องศาเซลเซียส ซึ่งเหมาะสำหรับการ  
เก็บตัวอย่างฝุ่น เพื่อวิเคราะห์หาสารประกอบ PAHs

1) ออบกระดาษกรอง Quartz fiber filter ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 81.0 มิลลิเมตร ที่  
อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (U.S. EPA, 1999b) เพื่อไล่สารปนเปื้อนออกให้  
หมด

2) นำกระดาษที่ผ่านการอบในเตาเผา เก็บไว้ใน Desiccator Cabinet ที่ควบคุม  
ความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า  $50\% \pm 5\%$  (หากความชื้นสัมพัทธ์สูงเกิน แก้ไขโดยการนำ  
ถาดซิลิกาเจลไปวางในตู้ทุกครั้ง จนค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ก่อนอบกระดาษ  
กรองใน Desiccator cabinet ให้ทำความสะอาดก่อนตู้ก่อนทุกครั้ง) อุณหภูมิห้อง ระหว่าง 15-30  
องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบ 24 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างกระดาษกรองไว้ในถุงซิปป  
พลาสติก และเก็บไว้ใน Desiccator cabinet อีก 2-3 ชั่วโมง เพื่อให้มีการดูดความชื้นในถุงซิปปอีก  
ครั้ง

3) ชั่งน้ำหนักกระดาษกรองก่อนเก็บตัวอย่าง ก่อนชั่งเปิดเครื่องชั่งไว้อย่างน้อย 2 ชั่วโมง  
เพื่อให้ค่านิ่ง ทำการสอบเทียบเครื่องชั่งวางกระดาษกรองให้อยู่จุดกึ่งกลาง และรอให้ได้ค่านิ่ง  
บันทึกค่า โดยทำการชั่งซ้ำรวมทั้งหมด 3 ครั้ง คำนวณค่าเฉลี่ยและค่าความเบี่ยงเบนของน้ำหนักที่  
อ่านได้ โดยความเบี่ยงเบน ต้องไม่เกิน  $\pm 0.5$  มิลลิกรัม

4) บันทึกน้ำหนักที่ชั่งได้ทั้ง 3 ครั้งและหาค่าเฉลี่ย นำกระดาษกรองใส่ในถุงซิปปพลาสติก  
และนำมาเก็บไว้ในกล่องพลาสติกอีกครั้ง เพื่อนำไปเก็บตัวอย่างภาคสนาม

### ภาคผนวก ก-3 การหาความชื้นของฟางข้าว

#### ทำการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3173

1. อบด้วยซามระเหยที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที ทิ้งให้เย็นใน โถดูดความชื้นประมาณ 1 ชั่วโมง บันทึกน้ำหนักของด้วยซามระเหย
2. ชั่งตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการบด ประมาณ 1 กรัม ใส่ในด้วยซามระเหย
3. นำซามระเหยที่ใส่ฟางข้าว เข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นประมาณ 1 ชั่วโมง
4. ชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักของด้วยซามระเหยและฟางข้าวหลังอบ
5. คำนวณหาร้อยละความชื้นของฟางข้าว จากสมการที่ 1

$$\% \text{ Moisture} = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (\text{ก-1})$$

เมื่อ

A = น้ำหนักฟางข้าวก่อนอบ (กรัม)

B = น้ำหนักฟางข้าวหลังอบ (กรัม)

## ภาคผนวก ก-4 การคำนวณความเข้มข้นของฝุ่น

- 1) หาอัตราการไหลเฉลี่ยที่สภาวะความดันและอุณหภูมิมาตรฐาน ( $\bar{Q}_{std}$ ) โดยคำนวณจากสมการที่ 2

$$\bar{Q}_{std} = \bar{Q}_a \left( \frac{P_{av}}{T_{av}} \right) \left( \frac{T_{std}}{P_{std}} \right) \dots\dots\dots (ก-2)$$

เมื่อ

$\bar{Q}_{std}$  = อัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศที่สภาวะมาตรฐาน ( $m^3 \text{ std/min}$ )

$\bar{Q}_{av}$  = อัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง ( $m^3/\text{min}$ )

$P_{av}$  = ความกดอากาศเฉลี่ยของบรรยากาศขณะการเก็บตัวอย่าง (kPa)

$T_{av}$  = อุณหภูมิบรรยากาศเฉลี่ยขณะดำเนินการเก็บตัวอย่าง (K)

$T_{std}$  = อุณหภูมิที่สภาวะมาตรฐาน เท่ากับ 298 K

$P_{std}$  = ความกดอากาศที่สภาวะมาตรฐาน เท่ากับ 1013.250 kPa

- 2) หาปริมาตรอากาศทั้งหมดที่เก็บตัวอย่างที่สภาวะความดันและอุณหภูมิมาตรฐาน จากสมการที่ ก-3

$$V_{std} = (\bar{Q}_{std})(t) \dots\dots\dots (ก-3)$$

เมื่อ

$V_{std}$  = ปริมาตรตัวอย่างอากาศทั้งหมดที่สภาวะมาตรฐาน ( $m^3$ )

$t$  = ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง (min)

3) หาความเข้มข้นของฝุ่นแต่ละขนาดคัดแยก จากสมการที่ ก-4

$$C = \frac{(W_f - W_i) \times 10^6}{V_{std}} \dots\dots\dots (ก-4)$$

เมื่อ

C = ความเข้มข้นของฝุ่นที่สภาวะมาตรฐาน หน่วยเป็น ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

$W_f$  = น้ำหนักกระดาศกรองหลังการเก็บตัวอย่าง หน่วยเป็น กรัม

$W_i$  = น้ำหนักกระดาศกรองก่อนการเก็บตัวอย่าง หน่วยเป็น กรัม

$10^6$  = การแปลงหน่วยจาก กรัม เป็น ไมโครกรัม

ตัวอย่างที่ ก-4.1 การคำนวณหาปริมาณน้ำฝนที่ตกจากเมฆฟ้าผ่าในถึงทดสอบ ในคณะ  
วิทยาศาสตร์ สจล. วันที่ 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2552

1) หาอัตราการไหลเฉลี่ยที่สภาวะมาตรฐาน จากสมการ ก-2

$$\bar{Q}_{std} = \bar{Q}_a \left( \frac{P_{av}}{T_{av}} \right) \left( \frac{T_{std}}{P_{std}} \right)$$

$$\bar{Q}_{av} = 28.354 \text{ l/min}$$

$$P_{av} = 1012.50 \text{ mbar}$$

$$T_{av} = 303.5 \text{ K}$$

$$T_{std} = 298 \text{ K}$$

$$P_{std} = 1,013.25 \text{ mbar}$$

$$t = 60 \text{ mins}$$

แทนค่า

$$Q_{std} = 28.354 \frac{\text{l}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} \left( \frac{1,012.50 \text{ mbar}}{303.5 \text{ K}} \right) \left( \frac{298 \text{ K}}{1,013.250 \text{ mbar}} \right)$$

$$Q_{std} = 0.0278 \text{ m}^3/\text{min}$$

2) หาปริมาตรอากาศทั้งหมดที่สภาวะมาตรฐาน จากสมการ ก-3

$$V_{std} = (Q_{std})(t)$$

แทนค่า

$$V_{std} = \left( 0.0278 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right) (60 \text{ min})$$

$$V_{std} = 1.668 \text{ m}^3$$

3) หาคความเข้มข้นของฝุ่นแต่ละขนาดคัตแยกที่สภาวะมาตรฐาน จากสมการ ก-4

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

ที่ stage 0 แทนค่า

$$C = (0.0098 \text{ g} \times 10^6 \text{ } \mu\text{g}) / 1.668 \text{ m}^3$$

$$C = 5,875.30 \text{ } \mu\text{g/m}^3$$

\*หมายเหตุ : ความเข้มข้นของของฝุ่นแต่ละขนาดคัตแยกที่ stage 1-7 คำนวณเช่นเดียวกันตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น

ตัวอย่างที่ ก-4.2 การคำนวณหาหน้าหนักฝุ่นที่เกิดจากการพื้นที่นาข้าว ในบรรยากาศจังหวัดลำปาง ระหว่างวันที่ 20-21 มกราคม พ.ศ. 2552

1) จำนวนหาอัตราการไหลที่สภาวะมาตรฐาน จากสมการ ก-2

$$\bar{Q}_{std} = \bar{Q}_{av} \left( \frac{P_{av}}{T_{av}} \right) \left( \frac{T_{std}}{P_{std}} \right)$$

$$\bar{Q}_{av} = 28.146 \text{ l/min}$$

$$P_{av} = 1,015.115 \text{ mbar}$$

$$T_{av} = 294 \text{ K}$$

$$T_{std} = 298 \text{ K}$$

$$P_{std} = 1,013.250 \text{ mbar}$$

$$t = 24 \text{ hrs}$$

แทนค่า

$$Q_{std} = 28.146 \frac{\text{l}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} \left( \frac{1,015.115 \text{ mbar}}{294 \text{ K}} \right) \left( \frac{298 \text{ K}}{1,013.250 \text{ mbar}} \right)$$

$$\bar{Q}_{std} = 0.0286 \text{ m}^3/\text{min}$$

- 2) หาปริมาตรอากาศทั้งหมดที่สภาวะมาตรฐาน จากสมการ ก-3

$$V_{std} = (Q_{std})(t)$$

แทนค่า

$$V_{std} = \left( 0.0286 \frac{m^3}{min} \right) \left( 24hr \times \frac{60min}{1hr} \right)$$

$$V_{std} = 41.184 \text{ m}^3$$

- 3) หาความเข้มข้นของฝุ่นแต่ละขนาดคัตแบกที่สภาวะมาตรฐาน จากสมการ ก-4

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

ที่ stage 0 แทนค่า

$$C = (0.0070 \text{ g} \times 10^6 \text{ } \mu\text{g}) / 41.184 \text{ m}^3$$

$$C = 169.969 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

\*หมายเหตุ : ความเข้มข้นของของฝุ่นแต่ละขนาดคัตแบกที่ stage 1-7 คำนวณเช่นเดียวกันตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น

ตัวอย่างที่ ก-4.3 การคำนวณการเก็บตัวอย่างฝุ่น ในบรรยากาศจังหวัดลำปาง ระหว่างเกิดปัญหาหมอกควัน วันที่ 9-12 มีนาคม พ.ศ. 2552 เก็บตัวอย่างเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

- 1) คำนวณหาอัตราการไหลเฉลี่ยตลอดช่วงเวลากการเก็บตัวอย่าง ก-2

$$\bar{Q}_{std} = \bar{Q}_a \left( \frac{P_{av}}{T_{av}} \right) \left( \frac{T_{std}}{P_{std}} \right)$$

$$\bar{Q}_{av} = 28.390 \text{ l/min}$$

$$P_{av} = 1009.08 \text{ mbar}$$

$$T_{av} = 300.5 \text{ K}$$

$$T_{std} = 298 \text{ K}$$

$$P_{std} = 1,013.25 \text{ mbar}$$

$$T = 72 \text{ hrs}$$

แทนค่า

$$Q_{std} = 28.390 \frac{l}{min} \times \frac{1m^3}{1,000l} \left( \frac{1,009.08 \text{ mbar}}{300.5 \text{ K}} \right) \left( \frac{298 \text{ K}}{1,013.250 \text{ mbar}} \right)$$

$$Q_{std} = 0.0280 \text{ m}^3/\text{min}$$

2) หาปริมาตรอากาศทั้งหมดที่สภาวะมาตรฐาน จากสมการ ก-2

$$V_{std} = (Q_{std})(t)$$

แทนค่า

$$V_{std} = \left( 0.0280 \frac{m^3}{min} \right) \left( 72hr \times \frac{60min}{1hr} \right)$$

$$V_{std} = 120.96 \text{ m}^3 @ 72 \text{ hrs}$$

3) หาคความเข้มข้นของฝุ่นแต่ละขนาดคัดแยกที่สภาวะมาตรฐาน จากสมการ ก-4

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

ที่ stage 0 แทนค่า

$$C = (0.00064 \text{ g} \times 10^6 \mu\text{g}) / 120.96 \text{ m}^3$$

$$C = 5.291 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$C = 1.764 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ (ค่าเฉลี่ยที่ 24 ชั่วโมง)}$$

ตัวอย่างที่ ก-4.5 การคำนวณหาน้ำหนักฝุ่น ในช่วงสภาพอากาศปกติ ระหว่างวันที่ 10-11 สิงหาคม พ.ศ. 2552

1) การคำนวณหาอัตราการไหลที่สภาวะมาตรฐาน จากสมการ ก-2

$$\bar{Q}_{std} = \bar{Q}_{av} \left( \frac{P_{av}}{T_{av}} \right) \left( \frac{T_{std}}{P_{std}} \right)$$

$$\bar{Q}_{av} = 28.369 \text{ l/min}$$

$$P_{av} = 1,003.9 \text{ mbar}$$

$$T_{av} = 303 \text{ K}$$

$$T_{std} = 298 \text{ K}$$

$$P_{std} = 1,013.25 \text{ mbar}$$

$$t = 24 \text{ hrs}$$

แทนค่า

$$Q_{std} = 28.369 \frac{\text{l}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} \left( \frac{1,003.90 \text{ mbar}}{303 \text{ K}} \right) \left( \frac{298 \text{ K}}{1,013.250 \text{ mbar}} \right)$$

$$\bar{Q}_{std} = 0.0276 \text{ m}^3/\text{min}$$

2) หาปริมาตรอากาศทั้งหมดที่สภาวะมาตรฐาน จากสมการ ก-3

$$V_{std} = (\bar{Q}_{std})(t)$$

แทนค่า

$$V_{std} = \left( 0.0276 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right) \left( 24 \text{ hr} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \right)$$

$$V_{std} = 39.744 \text{ m}^3$$

3) หาคความเข้มข้นของฝุ่นแต่ละขนาดคัตแยกที่สภาวะมาตรฐาน จากสมการ ก-4

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

\*หมายเหตุ: ความเข้มข้นของของฝุ่นแต่ละขนาดคัตแยกที่ stage 1-7 คำนวณเช่นเดียวกับในตัวอย่างที่ ก-4.3 ในข้อ 3

**ภาคผนวก ก-5 การเตรียมสารละลายมาตรฐานผสม 16 PAHs ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )**

วิธีการคำนวณความเข้มข้นของ PAHs ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ในตัวอย่างฝุ่นละออง จากกราฟสารละลายมาตรฐาน PAHs ดังนี้ ฉีดสารละลายมาตรฐานผสม PAHs จำนวน 16 ชนิด ปริมาตร 1  $\mu\text{l}$  ที่มีความเข้มข้น 0.0025, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0 และ 5.0  $\mu\text{g}/\text{ml}$  เนื่องจากสารละลายมาตรฐานผสม 16 PAHs แต่ละชนิดมีความเข้มข้นไม่เท่ากัน ตัวอย่างเช่น ขวด Stock 16 PAHs คือ NAP มีความเข้มข้น 1000  $\mu\text{g}/\text{ml}$  และ BaA มีความเข้มข้น 500  $\mu\text{g}/\text{ml}$  เป็นต้น

ตัวอย่างวิธีคำนวณ จาก stock 10  $\mu\text{g}/\text{ml}$  เตรียม  $C_2 = 1.0 \mu\text{g}/\text{ml}$  และ  $V_2 = 1000 \mu\text{l}$

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

$$10 \mu\text{g}/\text{ml} \times V_1 = 1.0 \mu\text{g}/\text{ml} \times 1000 \mu\text{l}$$

$$V_1 = 100 \mu\text{l}$$

ปีเปตสารละลายจาก stock 10  $\mu\text{g}/\text{ml}$  จำนวน 100  $\mu\text{l}$  ปรับให้ครบปริมาตรครบ 1000  $\mu\text{l}$  ด้วย Acetonitrile

หมายเหตุ : การคำนวณที่ความเข้มข้นอื่น ๆ ทำเช่นเดียวกับวิธีข้างต้น โดยใช้  $C_1 V_1 = C_2 V_2$

การหาคความเข้มข้นของสาร PAHs โดยการพล็อตพื้นที่ใต้กราฟของ PAH และ ความเข้มข้นของ PAHs  $\mu\text{g}/\text{ml}$  ดังสมการที่ ก-5

$$y = mx \pm c \dots \dots \dots (ก-5)$$

เมื่อ

y = พื้นที่ใต้กราฟ

x = ความเข้มข้นของ PAHs ( $\mu\text{g}/\text{ml}$ )

m = ความชันของ linear regression

c = จุดตัดบนแกนของ linear regression

- 1) การคำนวณความเข้มข้นของตัวอย่าง PAHs ( $\mu\text{g/ml}$ ) ดังสมการที่ ก-6

$$x = \frac{y \pm c}{m} \dots\dots\dots(\text{ก-6})$$

เมื่อ

X = ความเข้มข้นของ PAHs ( $\mu\text{g/ml}$ )

- 2) การคำนวณความเข้มข้นของ PAHs ในหน่วย ( $\mu\text{g/m}^3$ ) ดังสมการที่ ก-7

$$C_{\text{std}} = \frac{C}{V_{\text{std}}} \times \left( V_{\text{final}} \right) \dots\dots\dots(\text{ก-7})$$

เมื่อ

$C_{\text{std}}$  = ความเข้มข้นของ PAHs ( $\mu\text{g/m}^3$ ) ที่สภาวะมาตรฐาน

C = ความเข้มข้นของ PAHs ( $\mu\text{g/ml}$ ) ที่วิเคราะห์ได้

$V_{\text{std}}$  = ปริมาตรตัวอย่างอากาศทั้งหมดที่สภาวะมาตรฐาน ( $\text{m}^3$ )

$V_{\text{final}}$  = ปริมาตรตัวอย่างสารละลายสุดท้าย (ml) เท่ากับ 1 ml

- 3) การคำนวณความเข้มข้นของ PAHs ในหน่วย ( $\mu\text{g/mg PM}$ ) ดังสมการที่ ก-7

$$C_m = \frac{C}{W_{\text{PM}}} \times \left( V_{\text{final}} \right) \dots\dots\dots(\text{ก-8})$$

เมื่อ

$C_m$  = ความเข้มข้นของ PAHs ที่สภาวะมาตรฐานในหน่วย w/w ( $\mu\text{g/mg PM}$ )

C = ความเข้มข้นของ PAHs ( $\mu\text{g/ml}$ ) ที่วิเคราะห์ได้

$W_{\text{PM}}$  = น้ำหนักของฝุ่น (mg)

$V_{\text{final}}$  = ปริมาตรตัวอย่างสารละลายสุดท้าย (ml) เท่ากับ 1 ml

การคำนวณความเข้มข้นของตัวอย่าง Naphthalene ที่ stage-0 ในถังทดสอบ

Weight PM (mg)	Peak area	Linear regression	c	m
Stage-0	(y)			
7.0000	802,550	$y = 4,494,187.77x - 848,794.14$	848,794.14	4,494,187.77

- 1) คำนวณความเข้มข้นของตัวอย่าง Naphthalene ( $\mu\text{g/ml}$ ) แทนค่า ดังสมการที่ ก-6

$$\begin{aligned} \text{Naphthalene } (\mu\text{g/ml}) &= (802,550+848,794.14)/4,494,187.77 \\ &= 0.3674 \mu\text{g/ml} \\ &= 0.3674 \mu\text{g/ml} \times 1000 \text{ (dilution)} \\ &= 367.40 \mu\text{g/ml} \end{aligned}$$

- 2) คำนวณความเข้มข้นของ PAH ในหน่วย ( $\mu\text{g/m}^3$ ) แทนค่า ดังสมการที่ ก-7

$$\begin{aligned} \text{Naphthalene } (\mu\text{g/m}^3) &= (367.40 \mu\text{g/ml} \times 1.0 \text{ ml})/1.668 \text{ m}^3 \\ &= 217.64 \mu\text{g/m}^3 \end{aligned}$$

\*หมายเหตุ : ความเข้มข้นของตัวอย่างสารประกอบ PAHs ชนิดอื่น คำนวณเช่นเดียวกันตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น

### ภาคผนวก ก-6 การคำนวณการกระจายตัวของฝุ่นละออง (Particle Size Distribution)

การกระจายตัวของฝุ่นละอองจาก 8 stage cascade impactor แสดงลักษณะความถี่สะสม (Cumulative Frequency) คำนวณมาจากการแบ่งชั้น การนับจำนวนขนาดของฝุ่น นำค่าที่ได้มาหาผลรวมในแต่ละชั้นแสดงข้อมูลเป็นกราฟลอการิทึม ดังสมการที่ ก-9

$$SD = \frac{dc}{d \log dp} \dots\dots\dots(ก-9)$$

เมื่อ

SD = การกระจายตัวของฝุ่นละออง

Dc = ความเข้มข้นของสาร PAHs ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) แต่ละชนิด ในแต่ละชั้นของอนุภาคฝุ่น

d log dp = log ขนาดชั้นบน - log ขนาดชั้นล่าง

ตัวอย่างการคำนวณการกระจายตัวของฝุ่นละออง

1) Stage 0 ขนาดของอนุภาคฝุ่น 5.8-9.0 ไมครอน

$$SD = \frac{dc}{d \log dp}$$

เมื่อ

Dc = ความเข้มข้นของ Naphthalene ที่ Stage 0 =  $217.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$

d log dp = log ช่วงขนาดชั้นบน - log ช่วงขนาดชั้นล่าง  
= log 9.0 - log 5.8 = 0.9542 - 0.7634 = 0.1908

dp =  $(9.0 + 5.8) / 2 = 7.4 \mu\text{m}$

$$SD = \frac{217.64}{0.1908}$$

Particle Size Distribution ( $dc/d \log dp$ ) =  $1140.60 \mu\text{g m}^{-3} \mu\text{m}^{-1}$

หมายเหตุ : stage 1-7 ทำตามวิธีเดียวกันกับข้างต้น และนำค่า dc/d log dp ที่ได้ไปพล็อตเป็นแกน y และ dp เป็นแกน x แสดงกราฟลอการิทึม

ภาคผนวก ก-7 การคำนวณขีดต่ำสุดของการตรวจวัด (Miller และ Miller, 2000)

การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของพื้นที่ได้กราฟ คำนวณดังสมการที่ ก-10

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}} \dots\dots\dots (ก-10)$$

เมื่อ

- $S_{y/x}$  = ค่าความคลาดเคลื่อนของพื้นที่ได้กราฟ ( $y_i$ )  
 $y_i$  = พื้นที่ได้กราฟ  
 $\hat{y}_i$  = พื้นที่ได้กราฟที่คำนวณจากความเข้มข้นของสาร PAHs ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )  
 จากสมการเส้นตรง Linear regression  
 $n$  = จำนวนข้อมูลความเข้มข้นของสาร PAHs ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

การคำนวณขีดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limits of detection) คำนวณดังสมการที่ ก-11

$$\text{L.D.} = y_B + 3S_{y/x} \dots\dots\dots (ก-11)$$

เมื่อ

- L.D. = ค่าขีดต่ำสุดของการตรวจวัด  
 $y_B$  = จุดตัดแกน y  
 $S_{y/x}$  = ค่าความคลาดเคลื่อนของพื้นที่ได้กราฟ ( $y_i$ )

**ภาคผนวก ข**

**ตารางแสดงอัตราการไหลของน้ำเก็บอากาศ และน้ำหนักของฝุ่นละออง**

ตารางที่ ข-1 ร้อยละความชื้นของฟางข้าวในถังทดสอบ

ครั้งที่	นน.ฟางข้าวก่อนอบ (กรัม)	นน.ฟางข้าวหลังอบ (กรัม)	นน.ก่อน-หลัง (กรัม)	นน.ร้อยละความชื้น*	ค่าเฉลี่ย (กรัม)	ค่าเฉลี่ย (กรัม)
1	1.0422	0.9976	0.0446	4.28	4.28	4.34
	1.0422	0.9977	0.0445	4.27		
	1.0423	0.9976	0.0447	4.29		
2	1.0537	1.0076	0.0461	4.38	4.38	
	1.0541	1.0079	0.0462	4.38		
	1.0541	1.0080	0.0461	4.37		
3	1.0271	0.9824	0.0447	4.35	4.36	
	1.0271	0.9825	0.0446	4.34		
	1.0272	0.9823	0.0449	4.37		

หมายเหตุ : ดูรายละเอียดวิธีการคำนวณ ในภาคผนวก ก-3

ตารางที่ ข-2 อัตราการไหลของบีมก่อนและหลังเก็บตัวอย่างอากาศ จากการเผาฟางข้าวในถังทดสอบ วันที่ 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2552 เก็บตัวอย่างเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ครั้งที่	อัตราการไหล (ลิตร/นาที)		อัตราการไหลเฉลี่ย (ลิตร/นาที)
	ก่อนเก็บตัวอย่าง	หลังการเก็บตัวอย่าง	
1	28.360	28.280	28.354
2	28.360	28.410	
3	28.410	28.360	
4	28.360	28.484	
5	28.252	28.179	
6	28.410	28.385	
7	28.410	28.385	
8	28.360	28.311	
9	28.380	28.228	
10	28.405	28.335	
ค่าเฉลี่ย	28.371	28.336	

**ตารางที่ ข-3 ข้อมูลค่าเฉลี่ยอุตุนิยมวิทยา ในระหว่างการเผาในถังทดสอบ**

วันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2552	เวลา	อุณหภูมิ (° C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ความกดอากาศ (มิลลิบาร์)
	11:00 -12:00 น.	30.5	46	1,012.500

หมายเหตุ : ไม่มีทิศทางลม และความเร็ว เนื่องจากลมสงบ

และข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ได้จากการวัดโดยใช้เครื่องอุตุนิยมวิทยา ใน 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2552

ระหว่างเวลา 11.00-12.00 น.

ตารางที่ ข-4 น้ำหนักฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาฟางข้าวในถึงทดสอบ วันที่ 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2552 เก็บตัวอย่างเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ชั้นที่	ช่วงขนาด (ไมครอน)	ครั้งที่	น้ำหนักกระดาศกรอง (กรัม)		น้ำหนักฝุ่น (กรัม)	ความเข้มข้นของฝุ่น (ไมโครกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)
			ก่อนเก็บตัวอย่าง	หลังเก็บตัวอย่าง		
Stage 0	9.0-5.8	1	0.4532	0.4629	0.0098	238.45
		2	0.4532	0.4630		
		3	0.4531	0.4630		
		เฉลี่ย	0.4532	0.4630		
Stage 1	5.8-4.7	1	0.4529	0.4616	0.0087	211.68
		2	0.4529	0.4616		
		3	0.4529	0.4615		
		เฉลี่ย	0.4529	0.4616		
Stage 2	4.7- 3.3	1	0.4534	0.4630	0.0095	231.15
		2	0.4534	0.4629		
		3	0.4534	0.4629		
		เฉลี่ย	0.4534	0.4629		
Stage 3	3.3-2.1	1	0.4455	0.4630	0.0147	357.67
		2	0.4457	0.4629		
		3	0.4534	0.4629		
		เฉลี่ย	0.4482	0.4629		
Stage 4	2.1-1.1	1	0.4479	0.4855	0.0374	910.00
		2	0.4481	0.4855		
		3	0.4483	0.4854		
		เฉลี่ย	0.4481	0.4855		
Stage 5	1.1-0.7	1	0.4531	0.5302	0.0771	1,875.96
		2	0.4531	0.5301		
		3	0.4531	0.5302		
		เฉลี่ย	0.4531	0.5302		

ตารางที่ ข-4 น้ำหนักฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาฟางข้าวในถังทดสอบ วันที่ 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2552 เก็บตัวอย่างเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ต่อ)

ชั้นที่	ช่วงขนาด (ไมครอน)	ครั้งที่	น้ำหนักกระดาศกรอง (กรัม)		น้ำหนักฝุ่น (กรัม)	ความเข้มข้นฝุ่น (ไมโครกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)
			ก่อนเก็บตัวอย่าง	หลังเก็บตัวอย่าง		
Stage 6	0.7-0.4	1	0.4505	0.5491	0.0985	2,396.65
		2	0.4505	0.5490		
		3	0.4505	0.5490		
		เฉลี่ย	0.4505	0.5490		
Stage 7	< 0.4	1	0.4461	0.5005	0.0542	1,318.77
		2	0.4464	0.5005		
		3	0.4463	0.5005		
		เฉลี่ย	0.4463	0.5005		

หมายเหตุ : ความเข้มข้นของฝุ่นคิดเทียบที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 บรรยากาศ

ตารางที่ ข-5 ร้อยละความชื้นของฟางข้าวในพื้นที่ทางการเกษตร

ครั้งที่	นน.ฟางข้าวก่อนอบ (กรัม)	นน.ฟางข้าวหลังอบ (กรัม)	นน.ก่อน-หลัง (กรัม)	ร้อยละความชื้น* (กรัม)	ค่าเฉลี่ย (กรัม)	ค่าเฉลี่ย (กรัม)
1	1.0459	0.9676	0.0783	7.49	7.49	7.51
	1.0462	0.9679	0.0783	7.48		
	1.0462	0.9678	0.0784	7.49		
2	1.0297	0.9518	0.0779	7.57	7.54	
	1.0296	0.9520	0.0776	7.54		
	1.0298	0.9523	0.0775	7.53		
3	0.7969	0.7370	0.0599	7.52	7.51	
	0.7973	0.7374	0.0599	7.51		
	0.7973	0.7376	0.0597	7.49		

หมายเหตุ : ดูรายละเอียดวิธีการคำนวณ ในภาคผนวก ก-3

ตารางที่ ข-6 อัตราการไหลของบีมก่อนและหลังเก็บตัวอย่างอากาศ จากการเผาฟางข้าวในพื้นที่ทำการเกษตร จังหวัดลำปาง วันที่ 20 -21 มกราคม พ.ศ. 2552 เก็บตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ครั้งที่	อัตราการไหล (ลิตร/นาทีก)		อัตราการไหลเฉลี่ย (ลิตร/นาทีก)
	ก่อนเก็บตัวอย่าง	หลังการเก็บตัวอย่าง	
1	28.311	27.985	28.146
2	28.335	28.053	
3	28.335	28.005	
4	28.335	27.985	
5	28.360	28.005	
6	28.331	27.937	
7	28.311	27.985	
8	28.228	28.005	
9	28.252	27.985	
10	28.228	27.937	
ค่าเฉลี่ย	28.303	27.988	

ตารางที่ ข-7 ข้อมูลค่าเฉลี่ยอุตุนิยมวิทยา ในระหว่างการเผาฟางข้าวเพื่อเตรียมพื้นที่การเกษตร จังหวัดลำปาง เก็บตัวอย่างวันที่ 20-21มกราคม พ.ศ. 2552 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

วันที่	เวลา	อุณหภูมิ (° C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ความกดอากาศ (มิลลิบาร์)
20 มกราคม พ.ศ. 2552	12:00 - 24:00 น.	21.0	56	1,015.12
21 มกราคม พ.ศ. 2552	24:00 - 22:00 น.			

หมายเหตุ : ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา สถานีจังหวัดลำปาง

ตารางที่ ข-8 น้ำหนักฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาฟางข้าวในพื้นที่ทำการเกษตร จังหวัดลำปาง เก็บตัวอย่าง วันที่ 20 มกราคม พ.ศ. 2552 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ชั้นที่	ช่วงขนาด (ไมครอน)	ครั้งที่	น้ำหนักกระดาศกรอง (กรัม)		น้ำหนักฝุ่น (กรัม)	ความเข้มข้นฝุ่น (ไมโครกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)
			ก่อนเก็บตัวอย่าง	หลังเก็บตัวอย่าง		
Stage 0	9.0-5.8	1	0.4436	0.4507	0.0070	169.97
		2	0.4437	0.4507		
		3	0.4437	0.4507		
		เฉลี่ย	0.4437	0.4507		
Stage 1	5.8-4.7	1	0.4550	0.4588	0.0039	94.70
		2	0.4550	0.4587		
		3	0.4548	0.4588		
		เฉลี่ย	0.4549	0.4588		
Stage 2	4.7-3.3	1	0.4432	0.4467	0.0041	99.55
		2	0.4430	0.4482		
		3	0.4431	0.4468		
		เฉลี่ย	0.4431	0.4472		
Stage 3	3.3-2.1	1	0.4428	0.4488	0.0063	152.97
		2	0.4426	0.4491		
		3	0.4428	0.4490		
		เฉลี่ย	0.4427	0.4490		
Stage 4	2.1-1.1	1	0.4550	0.4679	0.0125	303.52
		2	0.4558	0.4682		
		3	0.4556	0.4680		
		เฉลี่ย	0.4555	0.4680		
Stage 5	1.1-0.7	1	0.4472	0.4832	0.0361	878.55
		2	0.4472	0.4832		
		3	0.4471	0.4834		
		เฉลี่ย	0.4472	0.4833		

ตารางที่ ข-8 น้ำหนักฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาฟางข้าวในที่โล่ง ในจังหวัดลำปาง วันที่ 20-21 มกราคม พ.ศ.2552 เก็บตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ต่อ)

ชั้นที่	ช่วงขนาด (ไมครอน)	ครั้งที่	น้ำหนักกระดาศกรอง (กรัม)		น้ำหนักฝุ่น (กรัม)	ความเข้มข้นฝุ่น (ไมโครกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)
			ก่อนเก็บตัวอย่าง	หลังเก็บตัวอย่าง		
Stage 6	0.7-0.4	1	0.4516	0.4950	0.0435	1,056.24
		2	0.4516	0.4950		
		3	0.4515	0.4952		
		เฉลี่ย	0.4516	0.4951		
Stage 7	< 0.4	1	0.4413	0.4722	0.0309	750.29
		2	0.4413	0.4722		
		3	0.4414	0.4723		
		เฉลี่ย	0.4413	0.4722		

หมายเหตุ : ความเข้มข้นของฝุ่นคิดเทียบที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 บรรยากาศ

ตารางที่ ข-9 อัตราการไหลของบ่อก่อนและหลังการเก็บตัวอย่าง ในบรรยากาศจังหวัดลำปาง ช่วงที่เกิดปัญหาหมอกควัน วันที่ 9-12 มีนาคม พ.ศ.2552 เก็บตัวอย่างเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

ครั้งที่	อัตราการไหล (ลิตร/นาท)		อัตราการไหลเฉลี่ย (ลิตร/นาท)
	ก่อนเก็บตัวอย่าง	หลังการเก็บตัวอย่าง	
1	28.434	28.335	28.389
2	28.430	28.380	
3	28.385	28.410	
4	28.459	28.385	
5	28.484	28.360	
6	28.385	28.385	
7	28.405	28.311	
8	28.311	28.335	
9	28.459	28.335	
10	28.434	28.360	
ค่าเฉลี่ย	28.419	28.360	

ตารางที่ ข-10 ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา จากการเก็บตัวอย่างอากาศ ในบรรยากาศจังหวัดลำปาง วันที่ 9-12 มีนาคม 2552 เก็บตัวอย่างเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

วันที่	เวลา	อุณหภูมิ (° C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ความกดอากาศ (มิลลิบาร์)
9 มีนาคม 2009	10:00 น.	25.9	58	1,013.32
	13:00 น.	35.2	26	1,009.75
	16:00 น.	38.0	18	1,006.49
	19:00 น.	32.5	32	1,006.79
	22:00 น.	20.8	53	1,010.00
10 มีนาคม 2009	01:00 น.	22.5	68	1,011.15
	04:00 น.	20.7	75	1,010.12
	07:00 น.	18.3	85	1,012.21
	10:00 น.	26.8	54	1,013.65
	13:00 น.	36.5	25	1,009.36
	16:00 น.	38.5	23	1,005.82
	19:00 น.	31.5	39	1,005.93
	22:00 น.	26.0	55	1,009.08
11 มีนาคม 2009	01:00 น.	23.0	59	1,009.41
	04:00 น.	19.8	74	1,009.27
	07:00 น.	18.0	84	1,010.85
	10:00 น.	26.2	51	1,011.69
	13:00 น.	35.0	26	1,008.17
	16:00 น.	38.0	24	1,004.63
	19:00 น.	38.0	41	1,005.35
	22:00 น.	26.0	60	1,008.39
12 มีนาคม 2009	01:00 น.	23.5	67	1,009.15
	04:00 น.	21.0	76	1,007.96
	07:00 น.	19.0	90	1,009.83
	10:00 น.	26.8	56	1,010.92
	13:00 น.	36.1	26	1,007.05
ค่าเฉลี่ย		27.5	55	1,009.08

หมายเหตุ : ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา สถานีจังหวัดลำปาง

ตารางที่ ข-11 น้ำหนักฝุ่นละออง ในช่วงเวลาที่เกิดปัญหาหมอกควัน วันที่ 9-12 มีนาคม พ.ศ. 2552  
เก็บตัวอย่างเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

ชั้นที่	ช่วงขนาด (ไมครอน)	ครั้งที่	น้ำหนักกระดาศกรอง (กรัม)		น้ำหนักฝุ่น (กรัม)	ความเข้มข้นฝุ่น (ไมโครกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร) @ 24 hrs
			ก่อนเก็บตัวอย่าง	หลังเก็บตัวอย่าง		
Stage 0	9.0-5.8	1	0.44386	0.44450	0.00064	1.76
		2	0.44387	0.44452		
		3	0.44387	0.44452		
		เฉลี่ย	0.44387	0.44451		
Stage 1	5.8-4.7	1	0.44497	0.44572	0.00074	2.04
		2	0.44498	0.44572		
		3	0.44498	0.44572		
		เฉลี่ย	0.44498	0.44572		
Stage 2	4.7- 3.3	1	0.45340	0.45419	0.00079	2.18
		2	0.45341	0.45419		
		3	0.45339	0.45419		
		เฉลี่ย	0.45340	0.45419		
Stage 3	3.3-2.1	1	0.44495	0.44544	0.00048	1.32
		2	0.44496	0.44544		
		3	0.44496	0.44544		
		เฉลี่ย	0.44496	0.44544		
Stage 4	2.1-1.1	1	0.45519	0.45628	0.00108	2.98
		2	0.45520	0.45628		
		3	0.45521	0.45628		
		เฉลี่ย	0.45520	0.45628		
Stage 5	1.1-0.7	1	0.45201	0.45406	0.00132	3.64
		2	0.45310	0.45406		
		3	0.45310	0.45405		
		เฉลี่ย	0.45274	0.45406		

ตารางที่ ข-11 นำหนักฝุ่นละอองที่เกิดจากไฟฟ้า เก็บตัวอย่างในช่วงเวลาที่มีเกิดปัญหาหมอกควัน วันที่ 9-12 มีนาคม พ.ศ. 2552 เก็บตัวอย่างเป็นเวลา 72 ชั่วโมง (ต่อ)

ชั้นที่	ช่วงขนาด (ไมครอน)	ครั้งที่	น้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)		น้ำหนักฝุ่น (กรัม)	ความเข้มข้นฝุ่น (ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) @ 24 hrs
			ก่อนเก็บตัวอย่าง	หลังเก็บตัวอย่าง		
Stage 6	0.7-0.4	1	0.44939	0.45288	0.00348	9.59
		2	0.44940	0.45288		
		3	0.44940	0.45288		
		เฉลี่ย	0.44940	0.45288		
Stage 7	< 0.4	1	0.45207	0.45730	0.00520	14.33
		2	0.45210	0.45729		
		3	0.45212	0.45730		
		เฉลี่ย	0.45210	0.45730		

หมายเหตุ : ความเข้มข้นของฝุ่นคิดเทียบที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 บรรยากาศ

ตารางที่ ข-12 อัตราการไหลของบีมก่อนและหลังการเก็บตัวอย่างอากาศ ในช่วงสภาพอากาศปกติ จังหวัดลำปาง วันที่ 10-11 สิงหาคม 2552 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ครั้งที่	อัตราการไหล (ลิตร/นาที)		อัตราการไหลเฉลี่ย (ลิตร/นาที)
	ก่อนเก็บตัวอย่าง	หลังการเก็บตัวอย่าง	
1	28.434	28.345	28.369
2	28.311	28.380	
3	28.335	28.420	
4	28.310	28.345	
5	28.385	28.350	
6	28.384	28.385	
7	28.385	28.315	
8	28.385	28.343	
9	28.459	28.330	
10	28.434	28.340	
ค่าเฉลี่ย	28.382	28.355	

ตารางที่ ข-13 ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ในช่วงสภาพอากาศปกติ จังหวัดลำปาง วันที่ 10-11 สิงหาคม 2552 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

วันที่	เวลา	อุณหภูมิ (° C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ความกดอากาศ (มิลลิบาร์)	ลม
10 สิงหาคม 2009	10:00 น.	30.0	64	1,004.06	ลมสงบ
	13:00 น.	33.9	56	1,002.48	SW/9.3
	16:00 น.	35.3	49	1,000.16	ลมสงบ
	19:00 น.	32.0	63	1,001.36	ลมสงบ
	22:00 น.	28.0	77	1,004.27	ลมสงบ
11 สิงหาคม 2009	01:00 น.	26.8	80	1,004.59	ลมสงบ
	04:00 น.	24.7	88	1,004.85	ลมสงบ
	07:00 น.	24.2	91	1,006.55	ลมสงบ
	10:00 น.	30.8	66	1,006.84	ลมสงบ
ค่าเฉลี่ย		29.5	70.4	1,003.90	

หมายเหตุ : ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา สถานีจังหวัดลำปาง

ตารางที่ ข-14 น้ำหนักฝุ่นละออง ในช่วงสภาพอากาศปกติ จังหวัดลำปาง วันที่ 10-11 สิงหาคม 2552 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ชั้นที่	ช่วงขนาด (ไมครอน)	ครั้งที่	น้ำหนักกระดาศกรอง (กรัม)		น้ำหนักฝุ่น (กรัม)	ความเข้มข้นฝุ่น (ไมโครกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร) @ 24 hrs
			ก่อนเก็บตัวอย่าง	หลังเก็บตัวอย่าง		
Stage 0	9.0-5.8	1	0.44740	0.44742	0.00003	0.84
		2	0.44738	0.44741		
		3	0.44737	0.44742		
		เฉลี่ย	0.44738	0.44742		
Stage 1	5.8-4.7	1	0.44723	0.44729	0.00004	0.92
		2	0.44726	0.44728		
		3	0.44725	0.44728		
		เฉลี่ย	0.44725	0.44728		
Stage 2	4.7- 3.3	1	0.45365	0.45370	0.00006	1.59
		2	0.45364	0.45371		
		3	0.45364	0.45371		
		เฉลี่ย	0.45364	0.45371		
Stage 3	3.3-2.1	1	0.45347	0.45357	0.00011	2.76
		2	0.45345	0.45357		
		3	0.45345	0.45356		
		เฉลี่ย	0.45346	0.45357		
Stage 4	2.1-1.1	1	0.45585	0.45637	0.00049	12.40
		2	0.45582	0.45630		
		3	0.45582	0.45630		
		เฉลี่ย	0.45583	0.45632		
Stage 5	1.1-0.7	1	0.45297	0.45330	0.00032	7.96
		2	0.45295	0.45327		
		3	0.45296	0.45326		
		เฉลี่ย	0.45296	0.45328		

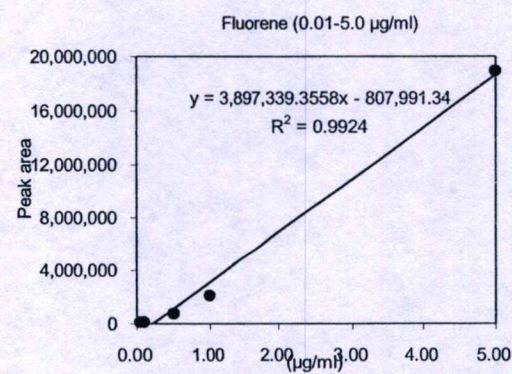
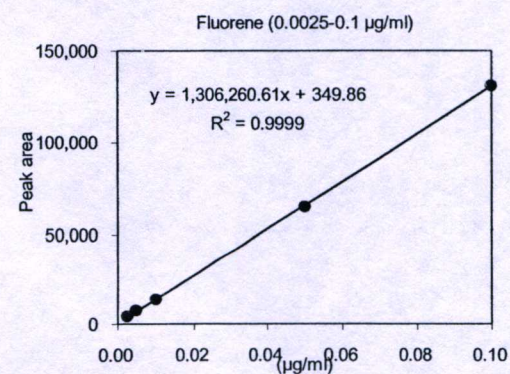
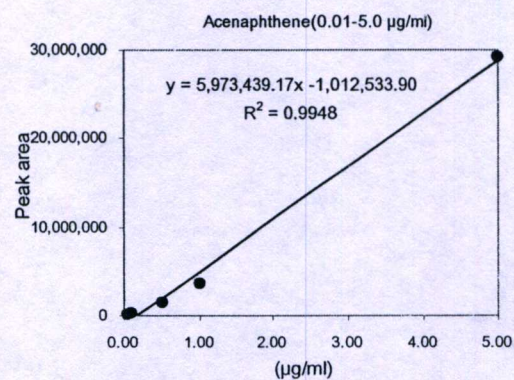
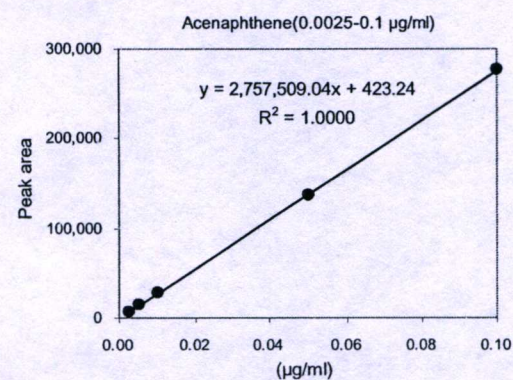
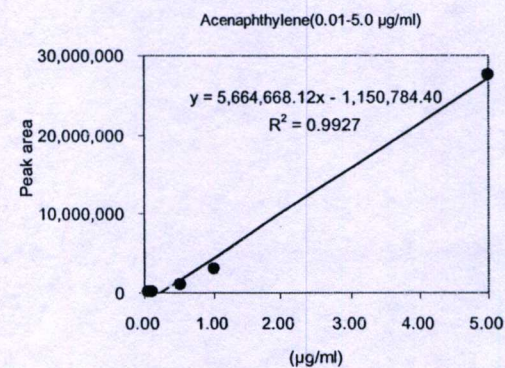
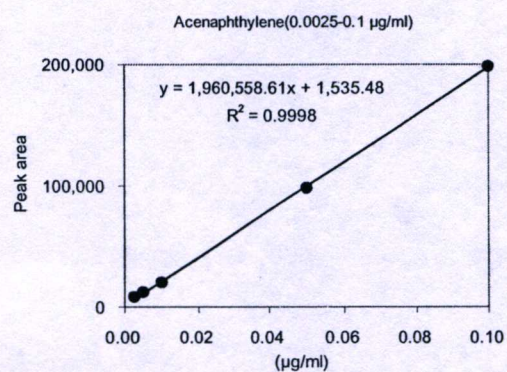
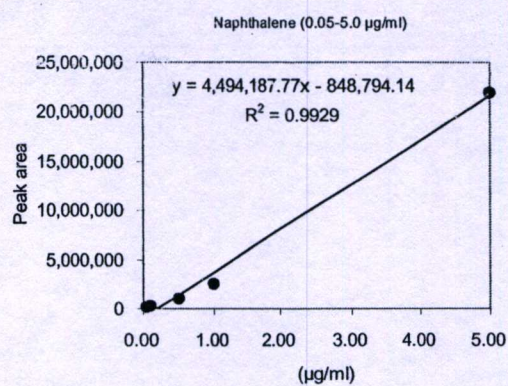
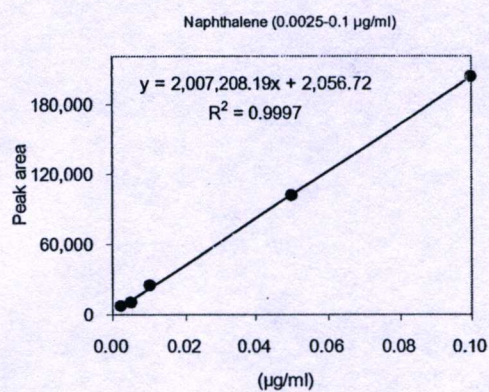
ตารางที่ ข-14 น้ำหนักฝุ่นละออง ในช่วงสภาพอากาศปกติ จังหวัดลำปาง วันที่ 10-11 สิงหาคม 2552 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ต่อ)

ชั้นที่	ช่วงขนาด (ไมครอน)	ครั้งที่	น้ำหนักกระดาศกรอง (กรัม)		น้ำหนักฝุ่น (กรัม)	ความเข้มข้นฝุ่น (ไมโครกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร) @ 24 hrs
			ก่อนเก็บตัวอย่าง	หลังเก็บตัวอย่าง		
Stage 6	0.7-0.4	1	0.45531	0.45536	0.00010	2.51
		2	0.45528	0.45541		
		3	0.45528	0.45540		
		เฉลี่ย	0.45529	0.45539		
Stage 7	< 0.4	1	0.45362	0.45376	0.00014	3.43
		2	0.45362	0.45375		
		3	0.45362	0.45376		
		เฉลี่ย	0.45362	0.45376		

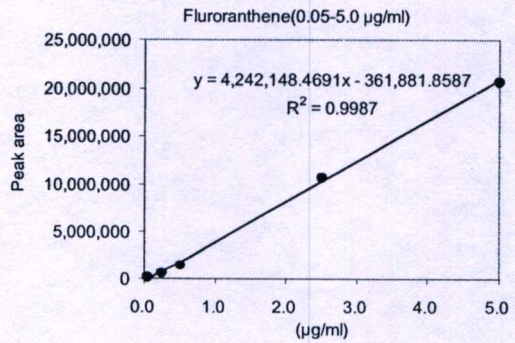
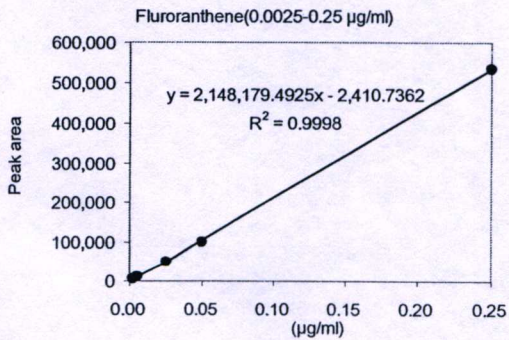
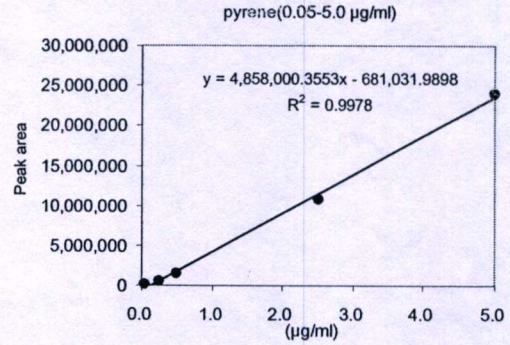
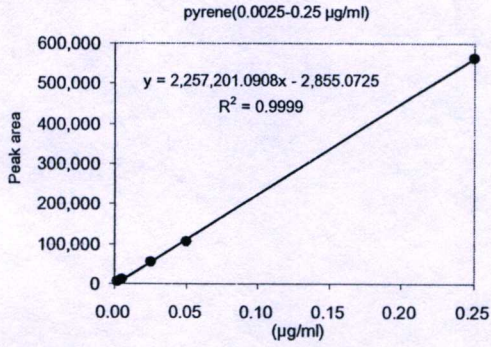
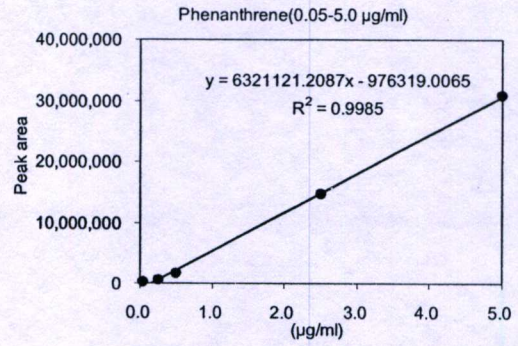
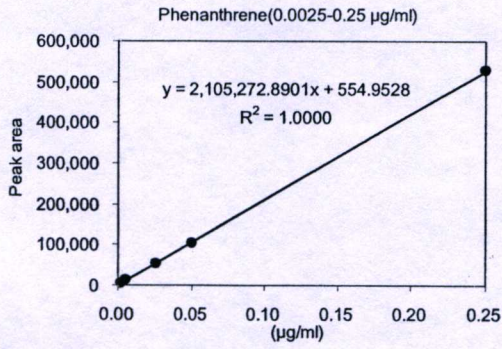
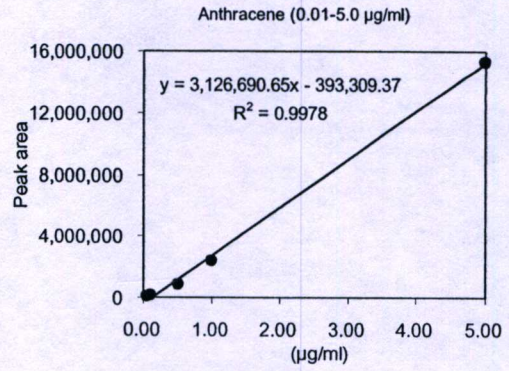
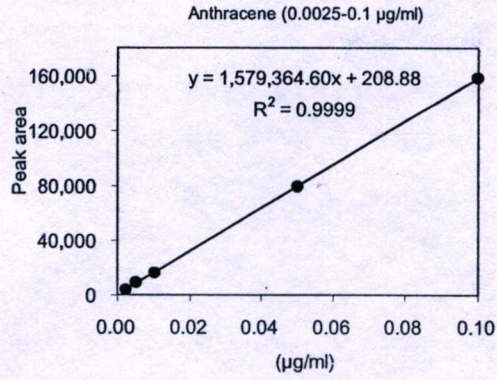
หมายเหตุ : ความเข้มข้นของฝุ่นคิดเทียบที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 บรรยากาศ

**ภาคผนวก ก**

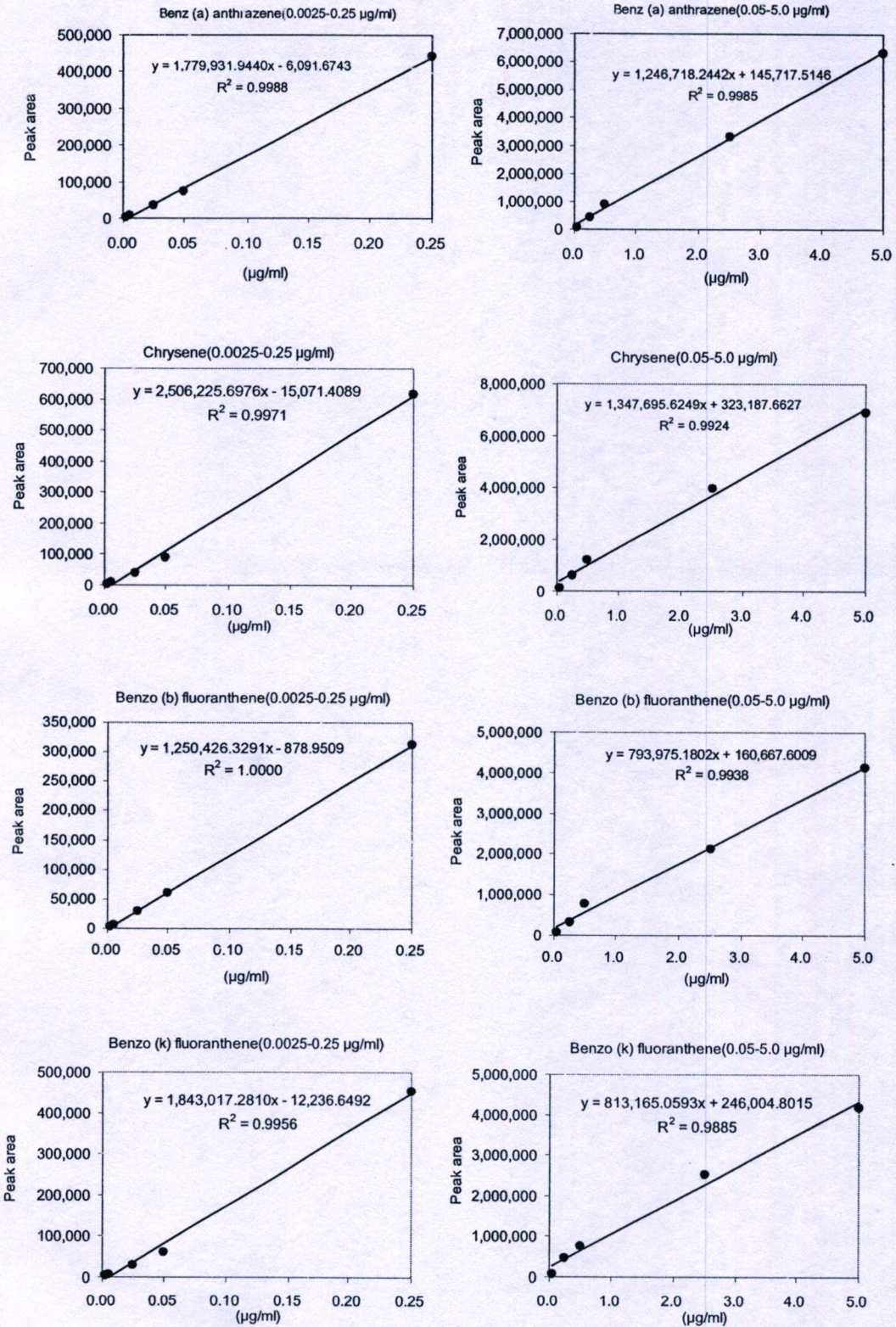
**กราฟมาตรฐานสาร PAHs 16 ชนิด**



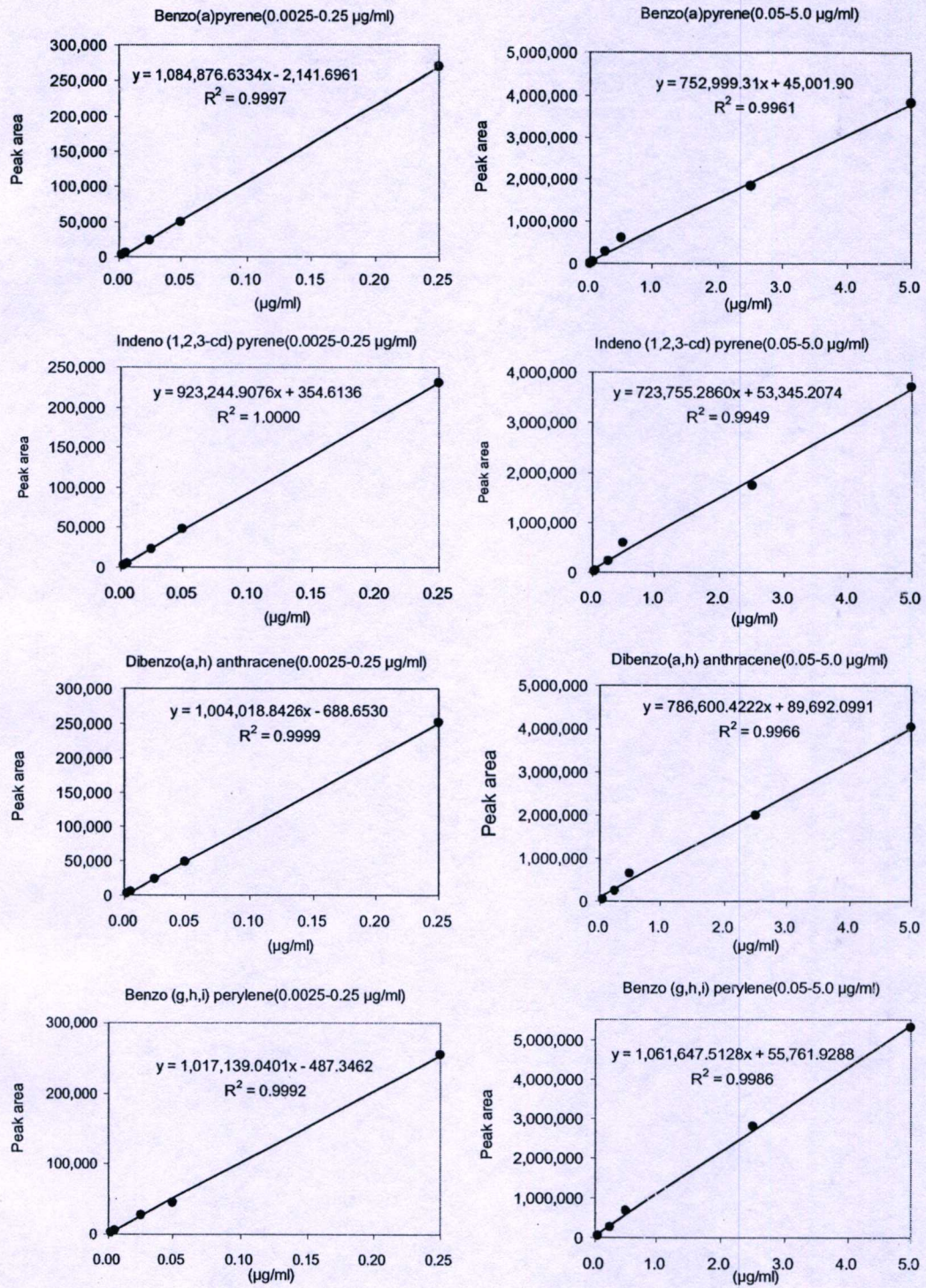
รูปที่ ก-1 Naphthalene, Acenaphthylene, Acenaphthene และ Fluorene



รูปที่ ค-2 Phenanthrene, Anthracene, Fluoranthene และ Pyrene



รูปที่ ก-3 Benz (a) anthrazene, Chrysene, Benzo (b) fluoranthene,  
และ Benzo (k) fluoranthene



รูปที่ ๓-4 Benzo(a)pyrene, Indeno(1,2,3-cd)pyrene, Dibenzo(a,h)anthracene  
และ Benzo(g,h,i)perylene

**ภาคผนวก ง**

**ตารางแสดงผลความเข้มข้นของสาร PAHs ในฝุ่นขนาดต่าง ๆ**

ตารางที่ ง-1 พื้นที่ใต้กราฟของสาร PAHs จากการเผาไหม้ฟางข้าว ในถังทดสอบ เก็บตัวอย่างเป็นเวลา 1 ชั่วโมง วันที่ 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2552

Peak NO.	Compound	Peak area							
		stage 7	stage 6	stage 5	stage 4	stage 3	stage 2	stage 1	stage 0
1	NAP	802,550	1,218,318	743,013	209,382	78,538	31,815	21,043	18,305
2	ACY	3,787,952	7,192,004	4,234,507	1,149,818	324,505	66,513	10,328	9,982
3	ACE	558,671	1,029,648	618,994	218,656	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
4	FLU	1,206,989	2,071,601	1,329,427	492,418	165,829	33,598	6,797	4,605
5	PHE	19,463,174	29,343,386	23,760,474	15,213,611	7,334,044	1,402,902	476,788	310,902
6	ANT	3,286,177	5,727,251	3,935,392	2,412,682	1,136,078	214,650	81,557	60,206
7	FLA	9,648,347	16,606,567	11,406,953	8,086,810	4,453,672	852,857	675,663	684,191
8	PYR	9,149,894	16,045,893	10,824,580	7,648,471	4,177,863	743,582	609,740	661,877
9	BaA	2,370,673	4,351,942	2,827,012	1,772,339	887,383	92,673	64,973	110,311
10	CHR	2,743,459	5,139,825	3,397,844	2,179,076	1,117,309	129,724	87,773	166,772
11	BbF	1,653,248	3,229,625	2,184,872	1,261,942	588,698	49,346	29,513	36,389
12	BkF	1,892,279	3,745,707	2,491,527	1,463,382	791,162	62,733	41,423	58,614
13	BaP	1,973,604	3,845,300	2,838,762	1,880,697	898,407	54,444	33,996	28,852
14	InP	831,590	1,629,420	1,171,268	826,062	325,555	25,449	17,382	13,661
15	DbA	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
16	BgP	821,760	1,688,029	1,273,368	1,005,019	414,120	34,040	22,504	15,454

หมายเหตุ : n.d. = Not detectable

ตารางที่ ง-2 ความเข้มข้นของสาร PAHs ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ในอนุภาคฝุ่นขนาดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้  
ฟางข้าว ในถังทดสอบ วันที่ 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2552

Peak NO.	Abbrev.	PAHs Concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) @ 1 hr								Total PAHs @ 1 hr ( $\text{ng}/\text{m}^3$ )
		stage 7	stage 6	stage 5	stage 4	stage 3	stage 2	stage 1	stage 0	
1	NAP	217.68	272.48	209.83	139.49	22.57	8.78	5.60	4.80	881.23
2	ACY	516.50	872.50	563.20	240.60	154.29	19.63	2.66	2.55	2371.93
3	ACE	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
4	FLU	306.29	437.71	324.90	197.67	148.03	127.93	2.92	1.93	1547.38
5	PHE	1915.59	2841.57	2318.34	1517.32	778.85	222.98	134.01	87.33	9816.00
6	ANT	697.16	1159.67	820.16	531.65	289.77	115.19	30.51	22.50	3666.62
7	FLA	1397.93	2369.65	1643.52	1179.86	672.49	169.64	144.89	146.08	7724.07
8	PYR	1198.85	2039.79	1403.07	1015.76	592.53	173.73	157.41	163.76	6744.89
9	BaA	954.54	1896.00	1171.38	670.22	249.71	32.87	23.65	38.74	5037.12
10	CHR	1063.90	2117.29	1351.55	815.81	349.08	34.23	24.31	42.98	5799.14
11	BbF	1113.67	2289.87	1510.34	821.71	319.37	23.80	14.40	17.66	6110.82
12	BkF	1199.36	2549.65	1635.94	886.90	397.16	24.10	17.25	22.77	6733.13
13	BaP	1505.35	3001.59	2196.96	1431.08	645.84	30.90	19.73	16.92	8848.38
14	InP	618.84	1246.53	886.08	614.49	220.72	16.10	10.93	8.54	3622.24
15	DbA	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
16	BgP	427.44	910.83	679.44	529.70	199.97	20.11	13.39	9.28	2790.17
Total PAHs ( $\text{ng}/\text{m}^3$ )		13133.10	24005.13	16714.72	10592.26	5040.38	1019.98	601.67	585.87	

หมายเหตุ : n.d. = Not detectable

ตารางที่ ง-3 พื้นที่ใต้กราฟของสาร PAHs ในอนุภาคฝุ่นละออง ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าว ในพื้นที่ทางการเกษตร จ. ลำปาง วันที่ 20-21 มกราคม พ.ศ. 2552

Peak NO.	Compound	Peak area							
		stage 7	stage 6	stage 5	stage 4	stage 3	stage 2	stage 1	stage 0
1	NAP	64,497	90,460	71,427	30,645	18,327	14,205	7,013	11,145
2	ACY	n.d.	280,616	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
3	ACE	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
4	FLU	72,093	144,902	103,573	28,192	11,331	3,440	2,386	n.d.
5	PHE	784114	1,301,679	803,613	229,493	77,801	24,849	17,309	20,936
6	ANT	225260	364,910	238,807	67,395	23,534	6,883	4,333	5,994
7	FLA	727,658	1,020,188	520,027	165,937	72,502	20,088	14,507	17,861
8	PYR	660,408	922,230	479,350	146,665	65,894	17,757	13,403	16,558
9	BaA	279,294	343,432	166,090	47,856	180,011	4,210	3,803	5,219
10	CHR	344,742	432,425	208,502	64,234	24,242	6,035	5,020	7,102
11	BbF	176,081	172,939	71,484	18,256	6,453	n.d.	n.d.	4,153
12	BkF	178,981	220,329	92,621	23,892	9,178	n.d.	n.d.	5,700
13	BaP	196,125	221,393	107,534	7,996	8,050	n.d.	n.d.	3,624
14	InP	72,643	86,494	31,347	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
15	DbA	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
16	BgP	79,673	85,229	36,719	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

หมายเหตุ : n.d. = Not detectable

ตารางที่ ง-4 ความเข้มข้นของสารPAHs ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าว ในพื้นที่ทาง  
การเกษตร จ. ลำปาง วันที่ 20-21 มกราคม พ.ศ. 2552

Peak NO.	Abbrev.	PAHs Concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) @ 24 hr								Total-PAHs @ 24 hr ( $\text{ng}/\text{m}^3$ )
		stage 7	stage 6	stage 5	stage 4	stage 3	stage 2	stage 1	stage 0	
1	NAP	0.7553	1.0694	0.8392	0.3458	0.1968	0.1470	0.0600	0.1099	5.86
2	ACY	n.d.	3.4564	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2.88
3	ACE	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
4	FLU	1.3336	5.9367	5.6792	0.5175	0.2041	0.0574	0.0378	0.0000	7.33
5	PHE	6.7623	8.7505	6.8372	2.6405	0.8909	0.2802	0.1932	0.2351	37.91
6	ANT	4.8037	5.8882	4.9089	1.0329	0.3586	0.1026	0.0634	0.0889	12.98
7	FLA	6.2363	7.9107	5.0479	1.9029	0.8468	0.2543	0.1912	0.2291	29.17
8	PYR	6.7048	8.0134	5.7998	1.6084	0.7396	0.2217	0.1749	0.2088	25.23
9	BaA	3.8931	4.7681	2.3488	0.7359	2.5388	0.1405	0.1350	0.1543	14.65
10	CHR	3.4860	4.3355	2.1661	0.7683	0.3809	0.2045	0.1947	0.2148	11.49
11	BbF	3.4363	3.3753	1.4052	0.3716	0.1424	n.d.	n.d.	0.0977	8.78
12	BkF	2.5192	3.0640	1.3815	0.4760	0.2821	n.d.	n.d.	0.2363	7.89
13	BaP	4.4375	5.0031	2.4547	0.2269	0.2281	n.d.	n.d.	0.1290	12.44
14	InP	1.9012	2.2655	0.8151	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	5.11
15	DbA	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
16	BgP	1.9136	2.0462	0.8882	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4.32
Total-PAHs ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		48.1831	65.8829	40.5718	10.6268	6.8090	1.4083	1.0502	1.7041	

หมายเหตุ : n.d. = Not detectable

ตารางที่ ง-5 พื้นที่ใต้กราฟของสาร PAHs ในอนุภาคฝุ่น ระหว่างการเกิดปัญหาหมอกควันใน  
จังหวัดลำปาง เก็บตัวอย่างเป็นเวลา 72 ชั่วโมง วันที่ 9-12 มีนาคม พ.ศ. 2552

Peak NO.	Compound	Peak area							
		stage 7	stage 6	stage 5	stage 4	stage 3	stage 2	stage 1	stage 0
1	NAP	94,699	74,216	61,612	8,814	51,657	66,624	76,720	81,065
2	ACY	5,912	3,796	n.d.	1,067	n.d.	n.d.-	n.d.	
3	ACE	34,379	20,274	19,059	13,946	13,427	10,153	18,638	19,678
4	FLU	3,493	2,172	3,782	1,284	3,181	3,183	2,550	2,632
5	PHE	24307	16,297	15,007	8,694	13,827	18,928	10,612	10,735
6	ANT	24041	7,921	4,686	2,832	3,249	3,208	7,035	6,891
7	FLA	34,699	19,731	8,904	3,868	4,547	8,152	4,995	5,302
8	PYR	49,944	20,847	13,339	7,191	8,973	7,246	4,132	8,259
9	BaA	74,881	29,306	12,307	2,903	2,822	2,776	4,456	5,904
10	CHR	169,234	70,107	38,978	6,881	5,702	4,930	5,410	8,114
11	BbF	275,275	102,214	37,936	6,916	4,255	4,346	4,742	8,401
12	BkF	363,876	162,091	63,130	7,980	6,320	6,308	4,309	7,204
13	BaP	280,959	61,681	24,705	4,446	3,406	3,379	4,523	6,853
14	InP	215,093	70,673	30,491	4,180	4,224	4,419	3,297	4,680
15	DbA	170,769	9,870	10,884	6,027	3,922	3,522	2,581	3,861
16	BgP	291,784	88,991	42,980	6,779	6,613	4,661	4,606	5,914

ตารางที่ ง-6 ความเข้มข้นของสาร PAHs (ng/m<sup>3</sup>) ในอนุภาคฝุ่น ระหว่างการเกิดปัญหาหมอกควัน  
เก็บตัวอย่างเป็นเวลา 72 ชั่วโมง วันที่ 9-12 มีนาคม พ.ศ. 2552

Peak NO.	Compound	PAHs Concentration (ng/m <sup>3</sup> ) @ 24 hr								Total-PAHs @ 24 hr (ng/m <sup>3</sup> )
		stage 7	stage 6	stage 5	stage 4	stage 3	stage 2	stage 1	stage 0	
1	NAP	0.1272	0.0991	0.0818	0.0093	0.0681	0.0886	0.1025	0.1085	0.6850
2	ACY	0.0062	0.0032	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.0093
3	ACE	0.0339	0.0198	0.0186	0.0135	0.0130	0.0097	0.0182	0.0192	0.1461
4	FLU	0.0130	0.0102	0.0136	0.0062	0.0102	0.0123	0.0089	0.0090	0.0833
5	PHE	0.0311	0.0206	0.0189	0.0107	0.0174	0.0240	0.0132	0.0133	0.1492
6	ANT	0.0416	0.0135	0.0096	0.0081	0.0070	0.0070	0.0119	0.0117	0.1103
7	FLA	0.0476	0.0284	0.0145	0.0106	0.0102	0.0136	0.0108	0.0112	0.1469
8	PYR	0.0645	0.0289	0.0198	0.0123	0.0144	0.0123	0.0098	0.0136	0.1755
9	BaA	0.1254	0.0548	0.0285	0.0139	0.0138	0.0137	0.0163	0.0186	0.2850
10	CHR	0.2027	0.0937	0.0594	0.0241	0.0228	0.0220	0.0225	0.0255	0.4727
11	BbF	0.6086	0.2272	0.0855	0.0172	0.0113	0.0115	0.0124	0.0205	0.9942
12	BkF	0.5624	0.2607	0.1127	0.0302	0.0277	0.0277	0.0247	0.0291	1.0752
13	BaP	0.7191	0.1621	0.0682	0.0167	0.0141	0.0140	0.0169	0.0228	1.0341
14	InP	0.6410	0.2099	0.0900	0.0114	0.0115	0.0121	0.0088	0.0129	0.9976
15	DbA	0.4706	0.0290	0.0318	0.0184	0.0127	0.0116	0.0098	0.0125	0.5963
16	BgP	0.7918	0.2424	0.1178	0.0197	0.0192	0.0139	0.0138	0.0173	1.2361
	Total-PAHs	4.9407	1.7609	0.9336	0.4023	0.4071	0.4265	0.4274	0.4774	

หมายเหตุ : n.d. = Not detectable

ตารางที่ ง-7 พื้นที่ใต้กราฟของสารละลายมาตรฐานผสม 16 PAHs

Peak NO.	Compound	Std PAHs Concentration ( $\mu\text{g/ml}$ )							
		0.0025	0.005	0.01	0.05	0.1	0.5	1.0	5.0
		Peak area							
1	NAP	6,886	10,281	24,453	102,044	202,827	992,045	2,466,148	21,879,314
2	ACY	7,898	11,683	19,804	98,466	198,220	1,047,244	3,073,423	27,498,768
3	ACE	7,210	15,161	27,640	137,347	276,641	1,427,617	3,674,931	29,144,165
4	FLU	3,801	7,271	13,105	65,114	131,257	688,952	2,085,065	18,906,962
5	PHE	3,309	8,627	16,288	79,327	158,037	878,988	2,377,007	15,332,587
Peak NO.	Compound	Std PAHs Concentration ( $\mu\text{g/ml}$ )							
		0.0025	0.005	0.025	0.05	0.25	0.5	2.5	5.0
		Peak area							
6	ANT	6,062	12,103	52,939	104,544	527,130	1,528,857	14,637,838	30,785,342
7	FLA	5,392	10,382	50,418	100,460	535,564	1,419,251	10,669,793	20,675,355
8	PYR	5,025	10,307	53,090	105,484	562,338	1,489,124	10,798,676	23,960,621
9	BaA	3,798	7,621	36,173	72,790	440,987	902,101	3,322,070	6,338,401
10	CHR	4,239	8,418	39,858	89,365	616,083	1,218,407	3,974,003	6,903,954
11	BbF	2,985	6,098	29,958	60,318	312,013	775,267	2,120,782	4,124,952
12	BkF	3,423	6,287	29,399	59,829	452,682	767,691	2,514,429	4,184,663
13	BaP	2,079	4,874	23,982	49,409	269,669	608,978	1,843,226	3,832,165
14	InP	2,217	4,973	22,976	47,583	231,003	590,750	1,732,521	3,720,501
15	DbA	2,750	4,992	23,082	49,050	250,519	643,734	1,993,267	4,040,674
16	BgP	3,125	6,011	26,875	45,140	254,611	674,951	2,803,427	5,312,355

หมายเหตุ: กราฟสารละลายมาตรฐานผสม 16 PAHs มีความเข้มข้นของสาร PAHs แต่ละชนิดไม่เท่ากัน จึงแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ 1) ความเข้มข้นในช่วง 0.0025-0.25  $\mu\text{g/ml}$  และ 2) ความเข้มข้นในช่วง 0.05-5.0  $\mu\text{g/ml}$  (แสดงรูปกราฟมาตรฐานสารละลายมาตรฐานผสม 16 PAHs ในภาคผนวก ค และรายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก-5)

ตารางที่ ง-8 พื้นที่ใต้กราฟการทดสอบความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์สาร PAHs

Peak NO.	Compound	Vial 1(1)	Vial 1(2)	Vial 1(3)	Vial 2	Vial 3
1	Naphthalene	27,352	27,708	26,604	25,393	25,049
2	Acenaphthylene	27,487	24,611	25,299	23,358	23,134
3	Acenaphthene	29,614	29,476	28,769	27,594	28,786
4	Fluorene	23,895	21,408	24,219	20,526	19,216
5	Phenanthrene	12,511	11,765	12,015	10,913	10,487
6	Anthracene	18,810	17,663	17,885	14,616	15,011
7	Fluoranthene	10,683	10,902	9,766	9,259	8,865
8	pyrene	11,460	10,841	9,925	9,516	8,915
9	Benz (a) anthrazene	8,876	7,593	6,705	6,857	6,114
10	Chrysene	9,580	8,399	8,375	7,880	7,758
11	Benzo(b)fluoranthene	7,372	6,782	6,652	6,405	6,959
12	Benzo(k) fluoranthene	6,447	7,204	6,199	5,832	5,922
13	Benzo(a)pyrene	6,812	5,867	6,566	5,786	5,645
14	Indeno (1,2,3-cd) pyrene	2,519	2,615	2,716	2,436	2,896
15	Dibenzo(a,h)anthracene	3,358	2,977	3,066	2,870	2,941
16	Benzo(g,h,i)perylene	4,127	4,669	4,318	4,883	4,577

ตารางที่ ง-9 ความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์สาร PAHs

No.	Compound	Vial 1(1)	Vial 1(2)	Vial 1(3)	Vial 1 — ( $\bar{X}$ )	Vial 1 (RSD)	Vial 2	Vial 3	Vial 1-3 (RSD)
1	NAP	0.0126	0.0128	0.0122	0.0125	2.24	0.0116	0.0115	4.90
2	ACY	0.0132	0.0118	0.0121	0.0124	6.19	0.0111	0.0110	6.55
3	ACE	0.0106	0.0105	0.0103	0.0105	1.57	0.0099	0.0103	3.09
4	FLU	0.0180	0.0161	0.0183	0.0175	6.74	0.0154	0.0144	9.78
5	PHE	0.0057	0.0053	0.0054	0.0055	3.29	0.0049	0.0047	7.86
6	ANT	0.0118	0.0111	0.0112	0.0113	3.40	0.0091	0.0094	12.22
7	FLA	0.0061	0.0062	0.0057	0.0060	4.69	0.0054	0.0052	6.92
8	PYR	0.0063	0.0061	0.0057	0.0060	5.68	0.0055	0.0052	7.40
9	BaA	0.0084	0.0077	0.0072	0.0078	7.90	0.0073	0.0069	6.21
10	CHR	0.0098	0.0094	0.0094	0.0095	2.89	0.0092	0.0091	2.42
11	BbF	0.0066	0.0061	0.0060	0.0062	4.91	0.0058	0.0063	4.10
12	BkF	0.0101	0.0105	0.0100	0.0102	2.78	0.0098	0.0099	2.34
13	BaP	0.0083	0.0074	0.0080	0.0079	5.73	0.0073	0.0072	5.07
14	InP	0.0031	0.0032	0.0033	0.0032	3.32	0.0030	0.0035	7.71
15	DbA	0.0040	0.0037	0.0037	0.0038	5.21	0.0035	0.0036	3.72
16	BgP	0.0045	0.0051	0.0047	0.0048	5.66	0.0053	0.0050	5.05

ตารางที่ ง-10 พื้นที่ได้กราฟของสารมาตรฐาน PAHs

No.	Compound	พื้นที่ได้กราฟของสารละลายมาตรฐาน			
		Stock	ขวดที่ 1	ขวดที่ 2	ขวดที่ 3
1	Naphthalene	190,501	137,280	142,114	121,708
2	Acenaphthylene	202,656	112,347	121,214	133,652
3	Acenaphthene	159,343	100,557	147,199	123,671
4	Fluorene	189,894	155,029	138,917	182,740
5	Phenanthrene	261,604	226,224	178,662	164,143
6	Anthracene	275,494	175,888	194,388	184,662
7	Fluoranthene	212,627	200,060	190,631	199,626
8	Pyrene	208,994	202,573	199,574	191,504
9	Benz (a) anthrazene	69,945	67,561	53,289	50,381
10	Chrysene	84,611	77,544	64,986	58,422
11	Benzo (b) fluoranthene	68,226	43,283	49,578	47,865
12	Benzo (k) fluoranthene	55,211	45,823	45,313	45,095
13	Benzo(a)pyrene	55,107	45,604	45,710	45,462
14	Indeno (1,2,3-cd) pyrene	63,952	52,594	51,659	44,434
15	Dibenzo(a,h) anthracene	72,763	64,869	52,447	58,687
16	Benzo (g,h,i) perylene	89,337	82,270	70,461	67,246

ตารางที่ ง-11 ค่าการคืนกลับของสารมาตรฐาน PAHs

No.	Compound	Stock	ขวดที่ 1	ขวดที่ 2	ขวดที่ 3	Recovery (%)	S.D.
1	Naphthalene	0.2313	0.2194	0.2205	0.2159	95	1.03
2	Acenaphthylene	0.2389	0.2230	0.2245	0.2267	94	0.79
3	Acenaphthene	0.1962	0.1863	0.1941	0.1902	97	1.99
4	Fluorene	0.2560	0.2471	0.2430	0.2542	97	2.22
5	Phenanthrene	0.1958	0.1902	0.1827	0.1804	94	2.62
6	Anthracene	0.2139	0.1820	0.1880	0.1849	86	1.38
7	Fluoranthene	0.1354	0.1325	0.1302	0.1324	97	0.93
8	Pyrene	0.1832	0.1819	0.1813	0.1796	99	0.64
9	Benz (a) anthrazene	0.3464	0.3445	0.3330	0.3307	97	2.13
10	Chrysene	0.3026	0.2973	0.2880	0.2832	96	2.38
11	Benzo (b) fluoranthene	0.2883	0.2569	0.2648	0.2626	91	1.42
12	Benzo (k) fluoranthene	0.3704	0.3589	0.3583	0.3580	97	0.12
13	Benzo(a)pyrene	0.1965	0.1837	0.1838	0.1835	93	0.09
14	Indeno (1,2,3-cd) pyrene	0.1447	0.1296	0.1284	0.1188	87	4.10
15	Dibenzo(a,h) anthracene	0.2065	0.1965	0.1807	0.1886	91	3.82
16	Benzo (g,h,i) perylene	0.1367	0.1300	0.1189	0.1159	89	5.45

ตารางที่ ง-12 การคำนวณขีดต่ำสุดของการตรวจวัด PAHs

No.	Compound	ค่าความคลาดเคลื่อน ของพื้นที่ใต้กราฟ ( $S_{y/x}$ )	L.D. ( $\mu\text{g/ml}$ )
1	Naphthalene	1,718.69	0.0026
2	Acenaphthylene	1,371.25	0.0021
3	Acenaphthene	849.79	0.0009
4	Fluorene	469.47	0.0011
5	Phenanthrene	34,429.74	0.0491
6	Anthracene	137,506.35	0.2612
7	Fluoranthene	5,262.56	0.0051
8	Pyrene	16,139.99	0.0189
9	Benz (a) anthrazene	73,178.28	0.1165
10	Chrysene	101,430.42	0.1094
11	Benzo (b) fluoranthene	176,544.40	0.4222
12	Benzo (k) fluoranthene	80,059.19	0.1170
13	Benzo(a)pyrene	106,155.58	0.2896
14	Indeno (1,2,3-cd) pyrene	22,297.28	0.0725
15	Dibenzo(a,h) anthracene	12,226.25	0.0352
16	Benzo (g,h,i) perylene	3,255.73	0.0096

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายสุวรรณต์ ภูริวุฒิ
วัน เดือน ปีเกิด	19 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2525
ที่อยู่	89 ถนนสุขสวัสดิ์ 7 ต.พระบาท อ.เมือง จ.ลำปาง 52000
ประวัติการศึกษา	2546 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาปฐพีวิทยา เกรตเฉลี่ย 3.23 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 2552 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม เกรตเฉลี่ย 3.51 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ
ผลงานวิชาการ	เรื่อง การกระจายตัวของสารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ในฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้ฟางข้าวในที่โล่ง (SIZE DISTRIBUTION OF PARTICULATE BOUND POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS EMITTED FROM RICE STRAW OPEN BURNING) การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 35 (วทท 35) ระหว่างวันที่ 15-17 เดือนตุลาคม 2552 ณ เดอะ ไทด์ รีสอร์ท (หาดบางแสน) จังหวัดชลบุรี