

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฝุ่นละออง

ฝุ่นละออง (Suspended Particulate Matter) เป็นสารที่มีความหลากหลายทางด้านกายภาพและองค์ประกอบอาจมีสภาพเป็นของแข็งหรือของเหลวก็ได้ ฝุ่นละอองเป็นอนุภาคแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศ มีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา และมีแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกัน จากสภาพฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นภูมิอากาศและลักษณะทางอุตุนิยมวิทยาต่างมีผลต่อการแพร่กระจายของฝุ่นละออง จึงทำให้อนุภาคของฝุ่นละอองมีขนาด รูปร่าง ความหนาแน่น องค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป (ศิริวรรณ แก้วงาม, 2543) จึงมีชื่อเรียกตามลักษณะการรวมตัวกันของฝุ่นละออง เช่น ควีน (Smoke), หมอกน้ำค้าง (Mist), ฟูม (Fume) เป็นต้น (สโรชา ทองวุฒิสักดิ์, 2550)

2.1.1 แหล่งกำเนิดของฝุ่นละออง

อนุภาคฝุ่นละอองในบรรยากาศโดยทั่วไปอาจแยกได้เป็นฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดโดยตรงแล้วแพร่กระจายสู่บรรยากาศ เช่น ฝุ่นจากดิน ทวาย หรือเกิดจากเขม่าควันจากท่อไอเสียรถยนต์ การจราจร การก่อสร้าง และอุตสาหกรรม และฝุ่นละอองซึ่งเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาต่างๆในบรรยากาศ เช่น การรวมตัวด้วยปฏิกิริยาทางเคมีและฟิสิกส์ หรือปฏิกิริยาเคมีแสง (Photochemical reaction) ทำให้เกิดเป็นอนุภาคขึ้น (สุริยา ตูละยะเสถียร และคณะ, 2544)

แหล่งกำเนิดของฝุ่นละอองสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ

2.1.1.1 แหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ (Natural sources)

เป็นแหล่งกำเนิดที่เป็นไปตามธรรมชาติ ไม่มีการกระทำของมนุษย์เข้าไปเกี่ยวข้อง อาจเกิดจากกระแสลมที่พัดผ่านตามธรรมชาติทำให้เกิดฝุ่น เช่น ดิน ทวาย ภูเขาไฟ เขม่าควันจากไฟฟ้า เป็นต้น หรือเกิดจากปฏิกิริยาโฟโตเคมีคอลของก๊าซ (Photochemical gas

reactions) ซึ่งเกิดระหว่างก๊าซโอโซนในธรรมชาติและสารไฮโดรคาร์บอน ทำให้เกิดอนุภาคขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.2 ไมครอน (ศิริวรรณ แก้วงาม, 2543)

2.1.1.2 แหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Anthropogenic sources)

เป็นแหล่งกำเนิดที่มีมนุษย์เข้าไปเกี่ยวข้องหรือเป็นกิจกรรมที่มนุษย์กระทำ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) แหล่งกำเนิดที่เคลื่อนที่ได้ (Mobile sources) ได้แก่ ยานพาหนะที่ใช้ในการคมนาคมทางบก ทางน้ำ และทางอากาศ ส่วนใหญ่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ การคมนาคมและการขนส่ง เป็นต้น

2) แหล่งกำเนิดที่อยู่กับที่ (Stationary sources) ได้แก่ การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากบ้านเรือน และโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างทุกประเภท การเผาวัสดุต่างๆในที่โล่งแจ้ง เป็นต้น (กัลยกร ตั้งอุไรวรรณ, 2549)

2.1.2 ขนาดของฝุ่นละออง

ฝุ่นละอองจำนวนมากที่แขวนลอยอยู่ในอากาศมีขนาดเล็กไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เรียกว่า ละอองลอย (Aerosol) เมื่อละอองลอยมีจำนวนมากขึ้นจะรวมตัวกันตกสู่พื้นดิน ฝุ่นละอองที่อยู่ในบรรยากาศมีขนาดตั้งแต่ 0.02 ไมครอน ไปจนถึงขนาดใหญ่กว่า 500 ไมครอน โดยทั่วไปมักจะนิยมแบ่งอนุภาคฝุ่นละอองออกเป็น 3 ช่วงขนาด ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ได้แก่

2.1.2.1 ฝุ่นละอองแขวนลอยรวม (Total Suspended Particulate, TSP)

เป็นอนุภาคของแข็งและกึ่งของแข็งที่พบในอากาศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.005 ไมครอน ถึง 100 ไมครอน แหล่งกำเนิดมักเกิดจากการฟุ้งกระจายของดินทรายที่ผิวถนนและสถานที่ก่อสร้าง กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง ทั้งจากการจราจร โรงงานอุตสาหกรรมและกิจกรรมต่างๆ ฝุ่นละอองแขวนลอยรวมเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ อาจแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศได้ 2-3 นาที เมื่อเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์จะถูกกำจัดออกโดยระบบทางเดินหายใจ

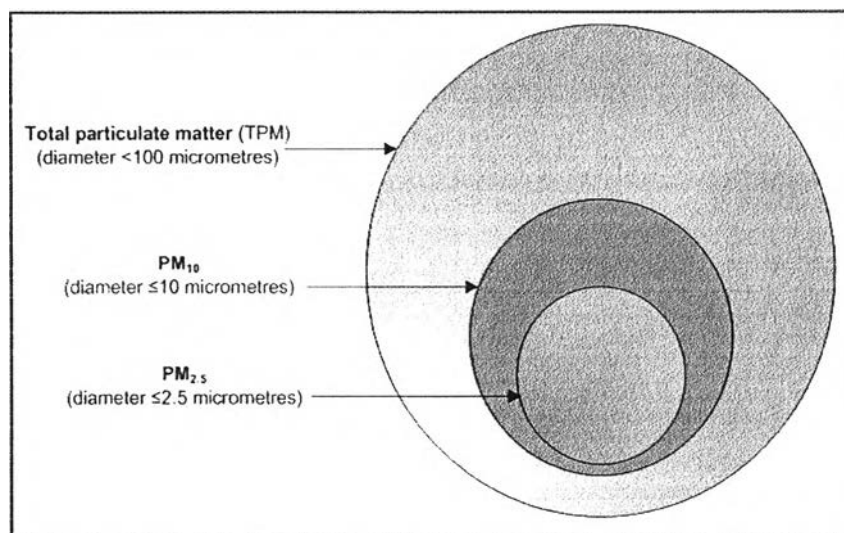
ส่วนต้น เช่น ถูกดักหรือกรองไว้ภายในโพรงจมูก และถูกนำออกจากระบบได้โดยการไอหรือจาม แต่ฝุ่นละอองแขวนลอยอาจมีสารพิษ เช่น สารหนู ตะกั่ว แมงกานีส เป็นต้น ซึ่งจะมีผลต่อระบบประสาทรับความรู้สึกของร่างกาย ทำให้ ตา คอ จมูก เกิดการระคายเคืองและอักเสบได้

2.1.2.2 ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (Particulate Matter, PM₁₀)

เป็นอนุภาคที่ประกอบด้วยอนุภาคของแข็งและกึ่งของแข็งขนาดเล็ก มีมลสารหลายชนิดผสมผสานและมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน มักเกิดจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยเฉพาะจากยานพาหนะที่ใช้ น้ำมันดีเซล การเผาไหม้แบบเปิด เช่น การเผาขยะ และกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดฝุ่นละออง เช่น โรงงานปูนซีเมนต์ โรงไม้หิน เป็นต้น ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน จากแหล่งกำเนิดเหล่านี้มีปริมาณคาร์บอนสูง เมื่อเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์โดยการหายใจจะสามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจในส่วนลึก ก่อให้เกิดผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพได้

2.1.2.3 ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (Particulate Matter, PM_{2.5})

เป็นอนุภาคของแข็งหรือกึ่งของแข็งที่อยู่ในสภาพกึ่งระเหย (Semi-Volatile) โดยส่วนใหญ่จะประกอบด้วยอนุภาคส่วนละเอียดปฐมภูมิ (Primary fine particulate) และอนุภาคส่วนละเอียดทุติยภูมิ (Secondary fine particulate) ผสมกันอยู่ โดยอนุภาคส่วนละเอียดจะเกิดขึ้นในอากาศเมื่อก๊าซต่างๆ เช่น ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂), ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยได้ (Volatile Organic Compound, VOC) ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงถูกเปลี่ยนรูปในอากาศโดยปฏิกิริยาทางเคมีและฟิสิกส์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะก๊าซไปอยู่ในรูปของอนุภาค ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน มีขนาดเล็กมากจึงทำให้มีช่วงเวลาที่อยู่ในอากาศเป็นระยะเวลายาวนานเป็นวันหรือสัปดาห์ และสามารถเคลื่อนที่ไปได้ในระยะไกล โดยมีแนวโน้มที่จะแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอในบริเวณเขตเมือง (วนิดา จินศาสตร์, 2551)



ภาพที่ 2.1 ขนาดของอนุภาคฝุ่นละออง

ที่มา: Environment Canada (2010)

2.1.3 สัณฐานของฝุ่นละออง

ฝุ่นละอองมีลักษณะสัณฐานของอนุภาคแตกต่างกัน โดยปกติฝุ่นละอองในอากาศจะไม่ใช่ทรงกลม ซึ่งส่วนใหญ่จะขึ้นกับแหล่งกำเนิดของอนุภาคนั้นๆ ของแข็งที่เกิดจากการควบแน่น เช่น ฝอยลอย เกสรดอกไม้ จะมีลักษณะค่อนข้างเป็นทรงกลม เส้นใยของฝ้าย ขนสัตว์ แก้ว และเส้นใยสังเคราะห์ต่างๆ จะเป็นทรงกระบอก สินแร่โดยปกติจะมีรูปทรงไม่เป็นระเบียบ อาจเป็นก้อนรวม (Agglomerates) หรือปุยสะเก็ด (Flakelike) อนุภาคที่เกิดจากการรวมตัวกันในขณะลอยอยู่ในอากาศหรือเกิดจากการเย็นตัวของก๊าซร้อน จะมีรูปร่างเหมือนลูกโซ่ (Chainlike) และฟล็อก (Flocs) กลุ่มอนุภาครวมตัวหลวมๆ เช่น ฝุ่นละอองจากท่อไอเสียรถยนต์ และมักเกิดจากการสันดาปอย่างไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง ซึ่งผลิตอนุภาคคาร์บอนจำนวนมาก (วนิดา จีนศาสตร์, 2551) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สัณฐานของอนุภาคฝุ่นละอองที่แขวนลอยในอากาศ

รูปทรง	อนุภาค	ร้อยละของตัวอย่างในอากาศ
ทรงกลม	ควีน ซีไธปลิว เกลร	0.0 – 20.0
ไม่เป็นระเบียบ	แร่	10.0 – 90.0
ปุยสะเก็ด	หนังกำพร้าว แร่	0.0 – 10.0
ฟล็อก	ควีน ไอเสี่ย คาร์บอน	0.0 – 40.0
เส้นใย	เส้นใยพืช ฝ้ายสำลี แอสเบสตอส	3.0 – 35.0

ที่มา: วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล (2528)

2.1.4 องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละออง

องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองมีอยู่หลากหลายชนิด ขึ้นกับแหล่งกำเนิดของฝุ่นละอองชนิดนั้นๆ เช่น ฝุ่นที่มาจากอาคารก่อสร้างจะมีแคลเซียมซึ่งเป็นส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ ฝุ่นดินจะมีซิลิกา แคลเซียม และอลูมิเนียม ซึ่งเป็นองค์ประกอบของดิน ส่วนฝุ่นที่มาจากเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิง โดยเฉพาะน้ำมันดีเซลจะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก การที่ฝุ่นละอองมีแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกัน จะทำให้มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ฝุ่นละอองมีลักษณะเฉพาะ เช่น สี ขนาด และรูปทรง ที่แตกต่างกันตามไปด้วย ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองจากแหล่งกำเนิดต่างๆ

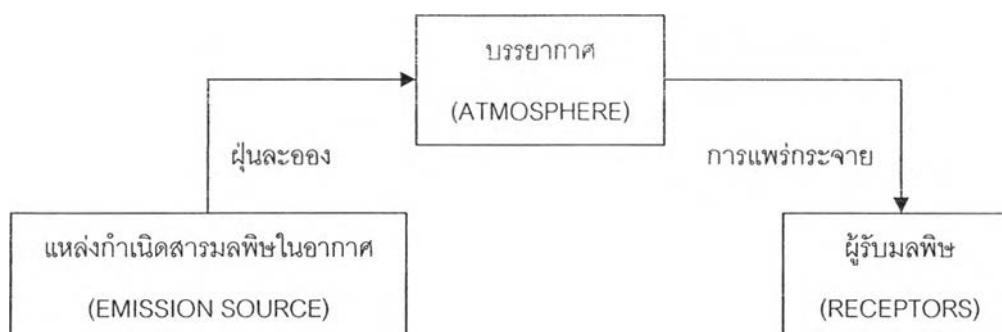
Emission Sources	Markers Elements
Soil	Al, Si, Ti, Sc, Sm, Fe, Ca
Sea salt	Cl, Cl ⁻ , Na, Na ⁺ , Br, I, Mg, Mg ²⁺
Road dust	Al, Si, Sc, Ti, Ca, Sm, Fe
Coal burning	Sc, Co, Se, Ti, S, Th, Al, As
Oil burning	Ni, Fe, As, S, Cr, V, Mn, SO ₄ ²⁻
Straw burning	Br, K, C _{ele} , C _{org}
Glass industry	As, Pb, Sb
Cement industry	Ca
Iron and steel industry	Cr, Mn, Zn, Fe, Rb, W
Non-ferrous metal industry	Cu, As, Zn, Pb, Al, Sb
Automobile gasoline	Ce, Pt, La, Ce, C _{ele} , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻
Automobile diesel	S, C _{ele} , C _{org} , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻
Secondary aerosols	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺
Refuse incineration	Sb, Pb, Zn, K

ที่มา: Hatairatana (1999)

2.1.5 การแพร่กระจายของฝุ่นละออง

ฝุ่นละอองเมื่อถูกปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดประเภทต่างๆ จะเข้าสู่บรรยากาศ ซึ่งเป็นส่วนที่รองรับฝุ่นละออง นอกจากนี้บรรยากาศยังเป็นตัวกลางในการเคลื่อนที่ให้ฝุ่นละอองแพร่กระจายออกไป การแพร่กระจายของฝุ่นละอองในบรรยากาศเป็นกระบวนการเจือจางโดยการแลกเปลี่ยนฝุ่นละอองกับอากาศ เมื่อมวลอากาศปกติมีการเคลื่อนไหว ฝุ่นละอองที่อยู่ในมวลอากาศก็จะถูกพาไปด้วย (กัลยกร ตั้งอุไรวรรณ, 2549) จากนั้นฝุ่นละอองจะถูกพัดพาและแพร่กระจายไปสู่ผู้รับผลกระทบซึ่งเป็นส่วนที่สัมผัสกับฝุ่นละอองในบรรยากาศ ทำให้ได้รับอันตรายหรือความเสียหาย โดยผู้รับผลกระทบอาจเป็นสิ่งมีชีวิต เช่น มนุษย์ พืช สัตว์ เป็นต้น หรืออาจเป็น

สิ่งไม่มีชีวิต เช่น อาคาร บ้านเรือน วัตถุและสิ่งก่อสร้างต่างๆ เป็นต้น (นพภาพร พานิช และแสงสันต์ พานิช, 2544) ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 การแพร่กระจายของฝุ่นละอองในอากาศ

ที่มา: นพภาพร พานิช และแสงสันต์ พานิช (2544)

ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่กระจายของฝุ่นละอองในบรรยากาศ มีดังต่อไปนี้

2.1.5.1 ความเร็วลมและทิศทางลม (Wind speed and Wind direction)

ฝุ่นละอองจะถูกเจือจางโดยลมที่พัดผ่านแหล่งกำเนิด ซึ่งการเจือจางนี้เกิดจากอากาศที่ไม่มีฝุ่นละอองหรือมีฝุ่นละอองในปริมาณที่น้อยเคลื่อนที่เข้ามาทำให้ในบริเวณที่มีความเข้มข้นของฝุ่นละอองมากมีความเข้มข้นของฝุ่นละอองลดลง ในขณะที่ทิศทางลมจะมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของฝุ่นละออง โดยจะเป็นตัวกำหนดว่ามลสารจะถูกพัดไปในทิศทางใด แต่เนื่องจากลมไม่ได้พัดไปในทิศทางเดียวกันตลอดเวลา การแพร่กระจายของฝุ่นละอองไปในทิศทางต่างๆจึงไม่คงที่ (Boubel และคณะ, 1994)

2.1.5.2 อุณหภูมิ (Temperature)

เนื่องจากอุณหภูมิของบรรยากาศที่ระดับความสูงต่างๆจะมีค่าไม่เท่ากัน โดยอุณหภูมิจะลดลงตามระดับความสูง และความแตกต่างของอุณหภูมิที่ความสูงในระดับต่างๆจะมีผลต่อการแพร่กระจายของฝุ่นละออง (วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ และคณะ, 2543) โดยในเวลากลางวันแสงอาทิตย์จะทำให้เกิดความปั่นป่วนของมวลอากาศเป็นผลให้เกิดการแพร่กระจายของ

ฝุ่นละอองในบรรยากาศได้เป็นอย่างดี ส่วนในเวลากลางคืนอุณหภูมิลดต่ำลงมากทำให้มวลอากาศนิ่ง ส่งผลให้ฝุ่นละอองในบรรยากาศแพร่กระจายได้ไม่ดี (นพภาพร พานิช และแสงสันติ พานิช, 2544)

2.1.5.3 ความปั่นป่วน (Turbulence)

ความปั่นป่วน หมายถึง ธรรมชาติการไหลของของไหลซึ่งแสดงให้เห็นอยู่ในรูปของความไม่แน่นอน เป็นการเคลื่อนที่อย่างไม่ราบเรียบในบรรยากาศ ไม่สามารถทำนายได้ (Arya, 1999) ความปั่นป่วนในบรรยากาศเกิดขึ้นเมื่อการไหลของอากาศมีการเคลื่อนที่แบบกระแสวน (Eddy) ซึ่งหมายถึงการเคลื่อนไหวของอากาศแบบอิสระในลักษณะขึ้นลง (Fluctuating) (วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ และคณะ, 2543) โดยกระแสวนนี้สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในแนวราบและแนวตั้ง ซึ่งมีความสำคัญต่อการแพร่กระจายและการเจือจางของฝุ่นละออง โดยพบว่าเมื่อมีความปั่นป่วนของบรรยากาศมากขึ้น ความเข้มข้นของฝุ่นละอองที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดจะมีค่าลดลงเนื่องจากมีการกระจายตัวมากขึ้น แต่หากบรรยากาศมีความปั่นป่วนลดลง ความเข้มข้นของฝุ่นละอองก็จะมีค่าสูงขึ้น (กัลยกร ตั้งอุไรวรรณ, 2549)

2.1.6 ผลกระทบของฝุ่นละออง

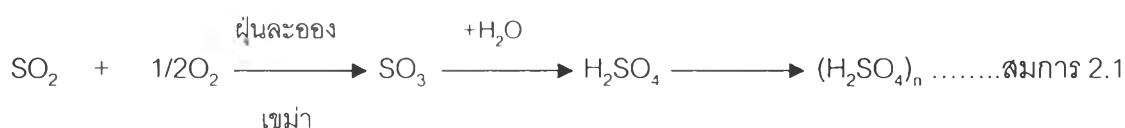
2.1.6.1 ผลกระทบต่อบรรยากาศทั่วไป

ฝุ่นละอองที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศมีทั้งที่เป็นของแข็งและของเหลว สามารถดูดซับและหักเหแสงได้ จึงมีผลทำให้ความสามารถในการมองเห็น (Visibility) ลดลง โดยขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและขนาด รวมถึงองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองแต่ละประเภท (สำนักงานเลขาธิการวุฒิสภา, 2540)

ในประเทศสหรัฐอเมริกาได้ทำการศึกษาผลกระทบของอนุภาคฝุ่นละอองต่อความสามารถในการมองเห็น ผลการศึกษาพบว่าทางด้านทิศตะวันออกของสหรัฐอเมริกาสามารถมองเห็นได้ในระยะทาง 33-90 ไมล์ จากเดิมมองเห็นได้ถึง 140 ไมล์ ส่วนทางด้านทิศตะวันตกสามารถมองเห็นได้ในระยะทาง 14-24 ไมล์ จากเดิมมองเห็นได้ 90 ไมล์ ซึ่งช่วงของการมองเห็น

ลดลงถึงร้อยละ 70 จากสภาวะเดิม สำหรับในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล การมองเห็นเริ่มลดลง สังเกตได้จากสภาพหมอกควัน (Smog) ปกคลุมหนาแน่นมากยิ่งขึ้น (ศิริวรรณ แก้วงาม, 2543)

นอกจากนี้ฝุ่นละอองยังเข้าไปมีส่วนช่วยให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาและทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศรุนแรงขึ้น โดยเฉพาะการเกิดปฏิกิริยาร่วมกับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอากาศ จะได้กรดซัลฟิวริก ซึ่งเป็นอันตรายทั้งต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม



ที่มา: นัทธีรา สรรมณี (2541)

อีกทั้งยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของไฮโดรเจนซัลไฟด์กับโอโซนในบรรยากาศ ได้ก๊าซซัลเฟอร์ออกมา ซึ่งถ้ามีอนุภาคฝุ่นละอองในบรรยากาศมากก็จะช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วยิ่งขึ้น



ที่มา: นัทธีรา สรรมณี (2541)

2.1.6.2 ผลกระทบต่อพืช

เมื่ออนุภาคฝุ่นละอองตกลงมาสู่พืชและไปเกาะติดกับส่วนต่างๆของพืช โดยเฉพาะบริเวณใบซึ่งเป็นส่วนที่มีพื้นที่ผิวมาก อนุภาคฝุ่นละอองจะไปขัดขวางการหายใจของพืช และทำให้ประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงของพืชลดน้อยลง อีกทั้งอนุภาคฝุ่นละอองที่ปิดปากใบ ทำให้เกิดการสะสมความร้อนภายในใบมากขึ้นส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช และถ้าอนุภาคฝุ่นละอองมีสารพิษปะปนอยู่ เช่น โลหะหนัก พืชก็จะได้รับสารพิษนั้นเข้าไปด้วย (วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ และคณะ, 2543)

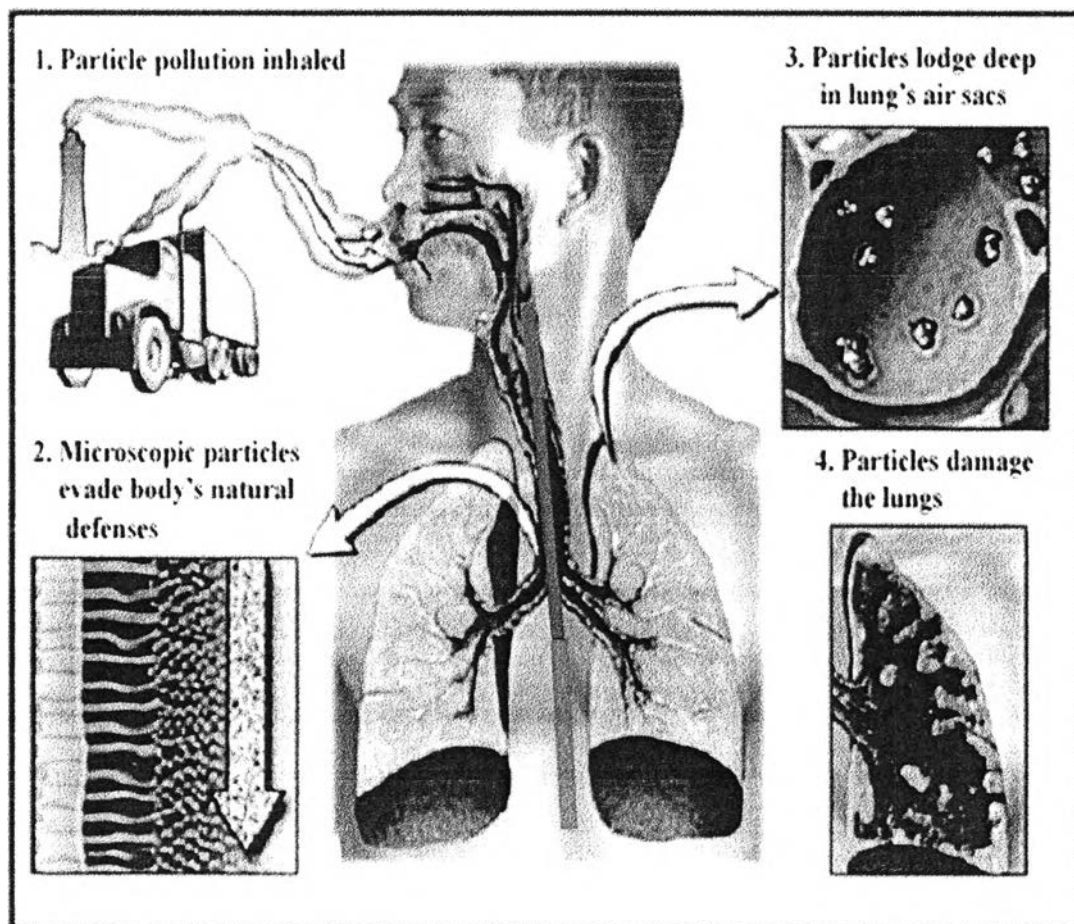
2.1.6.3 ผลกระทบต่อวัตถุและสิ่งก่อสร้าง

ฝุ่นละอองในบรรยากาศสามารถส่งผลกระทบต่อวัตถุและสิ่งก่อสร้างได้ เช่น เกาะติดกับวัตถุและสิ่งก่อสร้าง ก่อให้เกิดความสกปรกเลอะเทอะ ทำลายผิวหน้าของสิ่งก่อสร้าง อีกทั้งฝุ่นละอองยังมีการดูดซับโลหะ สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ไว้ที่ผิว ทำให้เกิดการสึกกร่อนของโลหะสร้างความเสียหายให้กับวัตถุและสิ่งก่อสร้างได้ (ศิริวรรณ แก้วงาม, 2543)

2.1.6.4 ผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์

ฝุ่นละอองในบรรยากาศมีมากมายหลายขนาดทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ซึ่งฝุ่นละอองสามารถเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์ได้จากทางจมูก ปาก และผิวหนัง ซึ่งทางจมูกจะเป็นช่องทางที่ฝุ่นละอองเข้าสู่ร่างกายได้มากที่สุดโดยการหายใจเข้าไป ฝุ่นละอองขนาดใหญ่จะก่อให้เกิดความระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจส่วนบน ส่วนฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน ซึ่งมีขนาดเล็กจะสามารถผ่านเข้าไปถึงระบบทางเดินหายใจส่วนล่างและเกิดการสะสมที่ถุงลมปอดได้ ก่อให้เกิดโรคเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจต่างๆ เกิดเนื้อเยื่อพังผืดในปอด ส่งผลให้ปอดทำงานเสื่อมประสิทธิภาพ มีอาการหอบหืด หลอดลมอักเสบ เกิดการติดเชื้อในระบบทางเดินหายใจ ดังแสดงในภาพที่ 2.3

ในประเทศไทยได้มีการศึกษาวิจัยทางระบาดวิทยาของฝุ่นละออง โดยกรมควบคุมมลพิษ ในปี พ.ศ.2538 ทำการสำรวจประเมินผลกระทบของมลพิษทางอากาศต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ต่างๆในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล พบว่าพื้นที่ชั้นในของกรุงเทพมหานคร (เขตราษฎร์เทพวิ) มีอัตราการเกิดโรคปอดอักเสบจากฝุ่นละอองและก๊าซอื่นๆสูงถึง 27 เปอร์เซ็นต์ และมีการลดลงเรื่อยๆในพื้นที่ที่ห่างออกไปจากใจกลางกรุงเทพมหานคร โดยพบในพื้นที่ชั้นกลาง (เขตราษฎร์บูรณะ) 18 เปอร์เซ็นต์ ในพื้นที่ชั้นนอก (เขตลาดกระบัง) 15 เปอร์เซ็นต์ และเขตปริมณฑล (อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ) 16 เปอร์เซ็นต์ (สำนักงานเลขาธิการวุฒิสภา, 2540) อีกทั้งระดับความรุนแรงของผลกระทบต่อสุขภาพยังขึ้นอยู่กับสารพิษที่มีองค์ประกอบของโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว โครเมียม ทองแดง สังกะสี เป็นต้น ที่ปะปนอยู่ในฝุ่นละอองอีกด้วย



Particle diameter $0.02 \mu\text{m} < \varnothing < 3 \mu\text{m}$ $3 \mu\text{m} < \varnothing < 10 \mu\text{m}$ $\varnothing > 10 \mu\text{m}$

ภาพที่ 2.3 ผลกระทบของฝุ่นละอองขนาดต่างๆต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์

ที่มา: GASP group (2012)

2.1.7 มาตรฐานของฝุ่นละอองในบรรยากาศ

มาตรฐานอนุภาคฝุ่นละออง เป็นการกำหนดระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองสูงสุดที่ยินยอมให้มีได้ในบรรยากาศตามกฎหมาย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายต่อประชาชนและสิ่งแวดล้อม

ค่ามาตรฐานฝุ่นละอองในบรรยากาศของในแต่ละประเทศได้มีการกำหนดค่าความเข้มข้นของฝุ่นละออง โดยองค์การอนามัยโลก ได้กำหนดค่ามาตรฐานอนุภาคแขวนลอยในบรรยากาศที่มีขนาดไม่เกิน 100 ไมครอน ในเวลา 24 ชั่วโมง ต้องมีค่าไม่เกิน 150-230 ไมโครกรัม

ต่อลูกบาศก์เมตร และในเวลา 1 ปี ต้องมีค่าไม่เกิน 60-90 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (World Health Organization, 1979) และในประเทศสหรัฐอเมริกา องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา ได้มีการกำหนดค่าเฉลี่ยของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน ในเวลา 24 ชั่วโมง ต้องมีค่าไม่เกิน 150 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าเฉลี่ยในเวลา 1 ปี ต้องมีค่าไม่เกิน 50 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (United States Environment Protection Agency, 1990)

สำหรับประเทศไทยได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศขึ้นในปี พ.ศ.2538 ตามพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมปี พ.ศ.2535 โดยกรมควบคุมมลพิษ สำนักนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม โดยค่ามาตรฐานฝุ่นละอองในบรรยากาศโดยทั่วไปจะทำการตรวจวัดด้วยวิธี Gravimetric High Volume ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ โดยแบ่งออกเป็น 2 ขนาด ดังตารางที่ 2.3 ได้แก่

1) ฝุ่นละอองแขวนลอยรวม (TSP) ค่ามาตรฐานความเข้มข้นในบรรยากาศเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ต้องมีค่าไม่เกิน 0.33 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าเฉลี่ยในเวลา 1 ปี ต้องมีค่าไม่เกิน 0.10 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2) ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM_{10}) ค่ามาตรฐานความเข้มข้นในบรรยากาศเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ต้องมีค่าไม่เกิน 0.12 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าเฉลี่ยในเวลา 1 ปี ต้องมีค่าไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

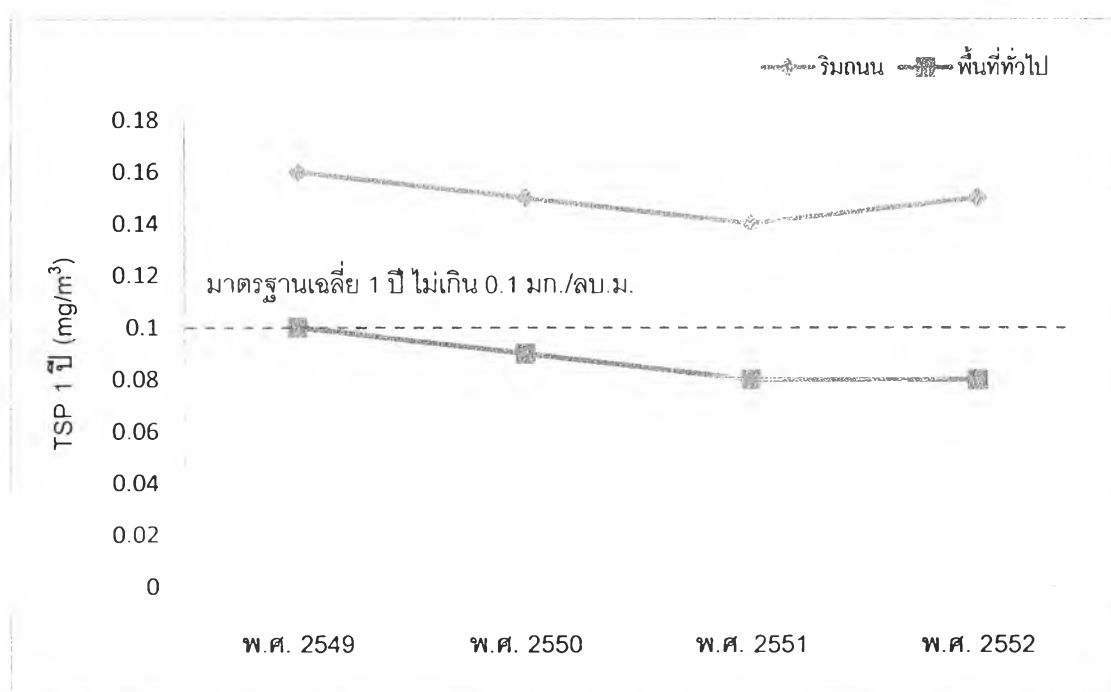
ตารางที่ 2.3 มาตรฐานฝุ่นละอองในบรรยากาศของประเทศไทย

ประเภทของฝุ่นละออง	ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง (mg/m^3)	ค่าเฉลี่ย 1 ปี (mg/m^3)
ฝุ่นละอองแขวนลอยรวม (TSP)	0.33	0.10
ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM_{10})	0.12	0.05

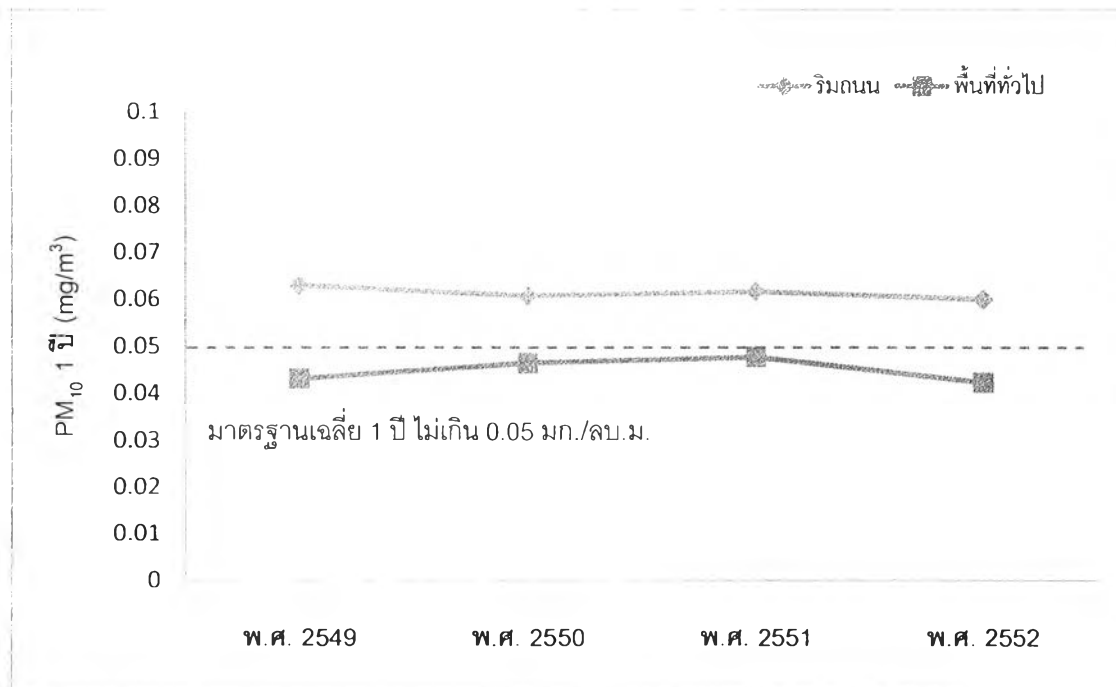
ที่มา: ดัดแปลงจากข้อมูลกรมควบคุมมลพิษ (2549)

2.1.8 ฝุ่นละอองในกรุงเทพมหานคร

จากข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพอากาศในกรุงเทพมหานคร ช่วงปี พ.ศ.2549-2552 โดยสำนักจัดการคุณภาพอากาศและเสียง กรมควบคุมมลพิษ พบว่าฝุ่นละอองขนาดเล็กยังคงเป็นปัญหาหลักของมลพิษในอากาศ ซึ่งพบว่าในบางพื้นที่ค่าที่วัดได้มีระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองเกินมาตรฐาน และบริเวณพื้นที่ริมถนนมีแนวโน้มปริมาณฝุ่นละอองเพิ่มขึ้นอีกด้วย ดังแสดงในภาพที่ 2.4 และภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.4 ฝุ่นละอองแขวนลอยรวม (TSP) เฉลี่ย 1 ปี ในกรุงเทพมหานคร ปี พ.ศ.2549-2552
ที่มา: ดัดแปลงจากข้อมูลกรมควบคุมมลพิษ (2552)



ภาพที่ 2.5 ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM_{10}) เฉลี่ย 1 ปี ในกรุงเทพมหานคร ปี พ.ศ.2549-2552

ที่มา: ดัดแปลงจากข้อมูลกรมควบคุมมลพิษ (2552)

2.2 สารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

สารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) เป็นสารที่มีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยวงอะโรมาติก (Aromatic ring) ตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป เชื่อมต่อกัน ซึ่งการเชื่อมต่อกันได้ทั้งแบบมุงงอ เส้นตรง หรือต่อกันเป็นกลุ่ม โดยปกติสาร PAHs จะประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนเท่านั้น แต่อาจมีอะตอมของธาตุอื่นๆ เช่น ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และไนโตรเจนแทนที่ในวงแหวนได้ (จีตา อินทเสน, 2551)

2.2.1 แหล่งกำเนิดของสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

สาร PAHs พบได้ทั้งในน้ำ ดิน ดินตะกอน อากาศ น้ำใต้ดิน และบริเวณริมถนน ความเข้มข้นของสาร PAHs ในสิ่งแวดล้อมขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างบริเวณที่ปนเปื้อนกับแหล่งกำเนิดสาร PAHs โดยแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ

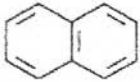
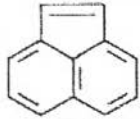
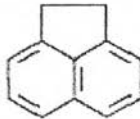
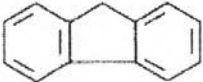
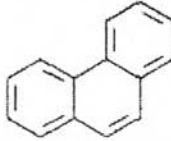
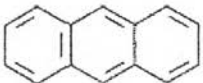
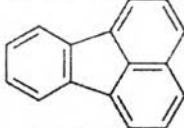
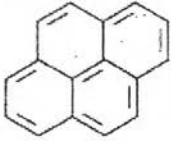
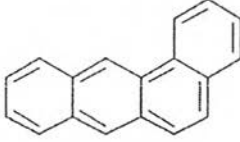
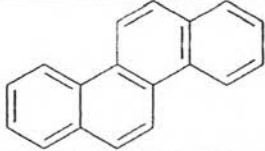
2.2.1.1 แหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ (Natural sources) ได้แก่ ปฏิกิริยาความร้อนทางธรณีวิทยาที่เกิดขึ้นในการผลิตเชื้อเพลิงฟอสซิลและพวกแร่ธาตุต่างๆ การเผาไหม้ของไฟฟ้า ภูเขาไฟระเบิด เป็นต้น

2.2.1.2 แหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Anthropogenic sources) ได้แก่ การเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงแบบไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ หรือจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น (กมลนารี ลายคราม, 2546)

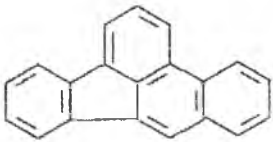
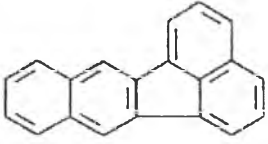
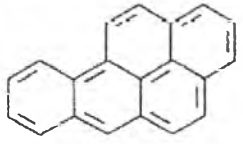
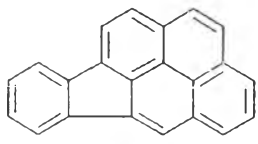
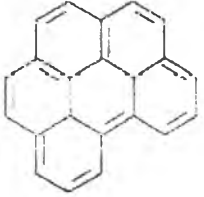
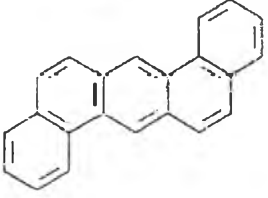
2.2.2 คุณสมบัติของสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

โมเลกุลของสาร PAHs เกิดจากการรวมตัวกันของวงแหวนอะโรมาติก 2 วง หรือมากกว่า ในแต่ละโมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจน ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ที่อุณหภูมิปกติ สาร PAHs จะเป็นของแข็ง ความดันไอต่ำ มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง สาร PAHs มักจะรวมตัวกับอนุภาคในบรรยากาศ กลายเป็น particulate PAHs โดยแต่ละตัวจะมีสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์แตกต่างกัน (ธิดา อินทเสน, 2551)

ตารางที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

ชื่อเคมี	ชื่อย่อ	สูตรเคมี	น้ำหนัก โมเลกุล	สูตรโครงสร้าง
Naphthalene	Nap	$C_{10}H_8$	128	
Acenaphthylene	Acy	$C_{12}H_8$	152	
Acenaphthene	Ace	$C_{12}H_{10}$	154	
Fluorene	Flu	$C_{13}H_{10}$	166	
Phenanthrene	Phen	$C_{14}H_{10}$	178	
Anthracene	Anth	$C_{14}H_{10}$	178	
Fluoranthene	Fluo	$C_{16}H_{10}$	202	
Pyrene	Pyr	$C_{16}H_{10}$	202	
Benzo(a)anthracene	B(a)A	$C_{18}H_{12}$	228	
Chrysene	Chry	$C_{18}H_{12}$	228	

ตารางที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (ต่อ)

ชื่อเคมี	ชื่อย่อ	สูตรเคมี	น้ำหนัก โมเลกุล	สูตรโครงสร้าง
Benzo(b)fluoranthene	B(b)F	$C_{20}H_{12}$	252	
Benzo(k)fluoranthene	B(k)F	$C_{20}H_{12}$	252	
Benzo(a)pyrene	B(a)P	$C_{20}H_{12}$	252	
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	Ind	$C_{22}H_{12}$	276	
Benzo(g,h,i)perylene	B(g,h,i)P	$C_{22}H_{12}$	276	
Dibenzo(a,h)anthracene	D(a,h)A	$C_{22}H_{14}$	278	

ที่มา: IPCS (1998)

2.2.3 การกระจายตัวของสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในบรรยากาศ

การกระจายตัวของสาร PAHs ในบรรยากาศจะขึ้นอยู่กับความคงตัวของสาร PAHs ที่ถูกปล่อยออกมาสู่บรรยากาศ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับสภาวะของบรรยากาศและการเคลื่อนที่ของอากาศนั้นด้วย เมื่อสาร PAHs ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ อนุภาคเหล่านี้จะเข้าสู่กระบวนการต่างๆ ดังนี้

- 1) กระบวนการทางกายภาพ เป็นการตกกลับโดยมวลของอนุภาคตามแรงโน้มถ่วงของโลกในแบบแห้ง (Dry deposition) หรือถูกชะด้วยอนุภาคน้ำ (Wet deposition)
- 2) การแลกเปลี่ยนสถานะระหว่างก๊าซและตัวดูดซับอนุภาค เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสมดุลของสถานะ
- 3) การเคลื่อนย้ายและการเคลื่อนที่ด้วยการยกตัวของมวลอากาศ ความปั่นป่วนและการเคลื่อนที่เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิความร้อนในบรรยากาศ
- 4) การย่อยสลายของอนุภาค (Degradation) และการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ (Conversion) โดยกระบวนการทางเคมี หรือทำปฏิกิริยากับแสง

2.2.3.1 การย่อยสลายด้วยแสง (Photodegradation)

กระบวนการสำคัญของการย่อยสลายด้วยแสงของสาร PAHs ในบรรยากาศ คือ กระบวนการ Photodegradation เป็นผลจากการถูกออกซิเดชันด้วยแสง เช่น ในเดือนที่มีอากาศร้อน แสงแดดจัด มีความเข้มแสงมาก ก็เกิดปฏิกิริยาได้ดี เพราะมีจำนวนชั่วโมงที่มีแสงสว่างมากกว่า (Panther และคณะ, 1999) สาร PAHs ในบรรยากาศส่วนใหญ่จะถูกดูดซับอยู่บนเถ้าลอย ถึงแม้ว่าสาร PAHs จะเป็นกลุ่มเดียวกัน แต่การย่อยสลายด้วยแสงจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเถ้าลอย เช่น สี พื้นที่ผิว องค์ประกอบคาร์บอน เป็นต้น ยิ่งเถ้าลอยมีสีเข้มมาก ค่าครึ่งชีวิตของสาร PAHs ก็ยิ่งมาก สลายตัวได้ช้า เนื่องจากเถ้าลอยสีเข้มจะดูดกลืนแสงได้ดี ทำให้แสงเข้าทำปฏิกิริยากับสาร PAHs ได้น้อย ถ้าเถ้าลอยมีสีจาง ค่าครึ่งชีวิตของสาร PAHs น้อย ทำให้สลายตัวได้เร็ว (Behymer และ Hites, 1998)

2.2.3.2 การกลายเป็นไอ (Evaporation)

สาร PAHs เกือบทุกชนิด เกิดการระเหยกลายเป็นไอได้น้อยมากที่อุณหภูมิห้อง เช่น Naphthalene มีค่าความดันไอที่ 1 mmHg ที่ 53 องศาเซลเซียส และระเหิดได้ที่อุณหภูมิห้อง และ Benzo(g,h,i)Perylene มีค่าความดันไอ 1×10^{-10} mmHg ที่ 20 องศาเซลเซียส ดังนั้นการกลายเป็นไอของสาร PAHs จึงไม่เป็นกระบวนการสำคัญที่ทำให้สาร PAHs เข้าสู่บรรยากาศ (ริตา อินทเสน, 2551)

2.2.3.3 การรวมตัวของสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนกับอนุภาคในบรรยากาศ

สาร PAHs จะแตกต่างกันตามกระบวนการที่เกิดขึ้นในบรรยากาศ ได้แก่ การควบแน่น (Condensation) และการดูดซับ (Absorption) ทำให้พบสาร PAHs ได้ 2 สถานะ คือ สถานะก๊าซ (Gas phase) เป็นสารระเหย อยู่ในสถานะก๊าซที่อุณหภูมิสูงกว่า 150 องศาเซลเซียส และสถานะฝุ่นละออง (Particulate phase หรือ pPAHs) โดยจะดูดซับหรือเกาะกับอนุภาคฝุ่นละออง สาร PAHs จะเกาะอยู่บนอนุภาคที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ และมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบชั้น (Shell structure) โดยมีสารกลุ่ม High volatile ซึ่งมีความสามารถในการกลายเป็นไอสูงปกคลุมอีกชั้นหนึ่ง (Chetwittayachan, 2001) ซึ่งสามารถจำแนกลักษณะของอนุภาคออกเป็น 3 ประเภท คือ

- 1) สาร PAHs ที่เกาะอยู่บนอนุภาคที่มีแกนเป็นคาร์บอน ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอน
- 2) สาร PAHs ที่เกาะอยู่บนอนุภาคที่มีขนาดเล็ก หรือถูกดูดซับบนอนุภาคที่มีขนาด 0.1-2 ไมครอน
- 3) สาร PAHs ที่เกาะอยู่บนอนุภาคที่มีขนาด 2-10 ไมครอน ซึ่งมีขนาดใหญ่

2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในบรรยากาศ

2.2.4.1 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีผลต่อการกระจายตัวของสาร PAHs โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำ สาร PAHs จะมีปริมาณสูง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูง สาร PAHs จะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นก๊าซ Guo และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาความเข้มข้นของสาร PAHs ในฝุ่นละอองขนาด 2.5 ไมครอน และขนาด 10 ไมครอน ในฮ่องกงช่วงฤดูร้อน (เดือนมิถุนายน-สิงหาคม) และช่วงฤดูหนาว (เดือนพฤศจิกายน-มีนาคม) โดยเก็บตัวอย่างในพื้นที่ริมเส้นทางจราจร ย่านธุรกิจการค้า และพื้นที่อยู่อาศัย พบว่าสาร PAHs ในช่วงฤดูร้อนมีค่าต่ำกว่าในช่วงฤดูหนาว ทั้งในฝุ่นละอองขนาด 2.5 ไมครอน และ 10 ไมครอน โดยในฤดูร้อน สาร PAHs ในฝุ่นขนาด 2.5 ไมครอน และ 10 ไมครอน มีค่า 4.87 และ 5.82 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และในฤดูหนาว สาร PAHs ในฝุ่นขนาด 2.5 ไมครอน และ 10 ไมครอน มีค่า 41.75 และ 54.72 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

2.2.4.2 ความเร็วและทิศทางลม (Wind speed and Wind direction)

ความเร็วและทิศทางลมมีผลต่อความเข้มข้นของสาร PAHs โดยเมื่อความเร็วลมสูง จะทำให้สาร PAHs เกิดการกระจายตัวได้ดี ทำให้ความเข้มข้นของสาร PAHs ลดต่ำลง แต่ถ้าความเร็วลมต่ำ จะทำให้สาร PAHs มีความเข้มข้นสูง

2.2.4.3 ความเข้มแสง (Light Intensity)

ความเข้มของแสงจากดวงอาทิตย์มีผลกับสาร PAHs เนื่องจากสาร PAHs สามารถเกิดปฏิกิริยา Photodegradation ซึ่งเป็นการถูกย่อยสลายด้วยแสง โดยพบว่าการสลายตัวของสาร PAHs จะช้าเมื่อมีปริมาณแสงแดดน้อย (IPCS, 1998)

2.2.4.4 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)

ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศจะแปรผันตรงกับปริมาณน้ำที่ดูดซับบนฝุ่นละออง ยิ่งน้ำที่ดูดซับบนฝุ่นละอองมาก ทำให้มีน้ำหนักมากขึ้น เปอร์เซ็นต์ความชื้นก็จะสูงขึ้นด้วย และยังมีส่วนประกอบของน้ำใน Particle organic layer มากขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยา Photodegradation ของสาร PAHs ก็จะมากขึ้น (McDow และคณะ, 1999)

2.2.5 ระดับความเข้มข้นของสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในบรรยากาศ

เนื่องจากสาร PAHs เป็นสารที่มีความเป็นพิษ ซึ่งเป็นส่วนประกอบอยู่ในอนุภาคฝุ่นละอองที่แขวนลอยอยู่ในอากาศ ทำให้บริเวณริมเส้นทางจราจร หรือในเขตเมืองที่มีปริมาณของฝุ่นละอองเยอะ สาร PAHs ก็จะมีค่าความเข้มข้นสูง ส่งผลโดยตรงต่อความเสี่ยงในการรับสาร PAHs เข้าไปสู่ร่างกายของประชาชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้น อีกทั้งยังพบว่าในฤดูหนาวจะมีปริมาณของสาร PAHs สูงกว่าในฤดูร้อน ได้มีการศึกษาถึงความเข้มข้นของสาร PAHs ในบรรยากาศของเมืองต่างๆในต่างประเทศ และในบรรยากาศของกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ดังแสดงในตารางที่ 2.5 และตารางที่ 2.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.5 ความเข้มข้นของสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (ng/m³) ในบรรยากาศของ
ประเทศต่างๆ

Location	Rome, Italy ^a	Taichung, Taiwan ^b	Heraklion, Greece ^c
Area	Urban	Urban	Urban
Period	2004	2004	2005
Acenaphthene	59.2	143.1	-
Fluorene	18.9	95.7	5.2
Phenanthrene	78.2	63.2	20.0
Anthracene	6.1	109.1	3.3
Fluoranthene	21.5	58.9	4.9
Pyrene	16.8	54.5	6.6
Benzo(a)Anthracene	1.8	20.3	1.1
Chrysene	4.4	34.3	-
Benzo(b)Fluoranthene	-	9.1	1.5
Benzo(k)Fluoranthene	-	12.6	1.8
Benzo(a)Pyrene	2.7	6.4	1.2
Indeno(1,2,3-cd)Pyrene	1.6	4.2	2.5
Dibenzo(a,h)Anthracene	-	2.9	0.1
Benzo(g,h,i)Perylene	2.9	5.5	3.4
Total	211.2	619.8	51.5

ที่มา: ^aPossanzini และคณะ (2004)

^bFang และคณะ (2004)

^cTsapakis และ Stephanou (2005)

ตารางที่ 2.6 ความเข้มข้นของสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (ng/m³) ในบรรยากาศของ กรุงเทพมหานคร

Area	RATB ^a	OEPP ^b
Pyrene	19.2	14.0
Benzo(a)Anthracene	0.89	0.66
Benzo(e)Pyrene	2.79	1.29
DiBenzo(a,c)Anthracene	0.09	0.06
Benzo(k)Fluoranthene	0.71	0.48
Benzo(a)Pyrene	1.33	0.72
Dibenzo(a,h)Anthracene	0.11	0.03
Benzo(g,h,i)Perylene	3.62	2.16

ที่มา: Hathairatana (1999)

^aRatburana Post Office Sampling Station

^bOffice of the Environmental Policy and Planning Sampling Station

2.2.6 ความเป็นพิษของสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

2.2.6.1 การเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogenicity)

หน่วยงาน International Agency for Research on Cancer, IARC (1983)

ได้แบ่งสาร PAHs ออกเป็น 3 กลุ่ม ตามความสามารถในการก่อมะเร็ง ได้แก่ กลุ่มที่น่าจะก่อมะเร็ง กลุ่มที่อาจก่อมะเร็ง และกลุ่มที่ไม่ก่อมะเร็ง โดยใช้ข้อมูลที่แสดงศักยภาพในการก่อมะเร็งในมนุษย์ และสัตว์ทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 กลุ่มของสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนตามความสามารถในการก่อมะเร็ง

กลุ่ม 2A	สารที่น่าจะก่อมะเร็ง (Probably carcinogen to humans) จำนวน 3 ชนิด		
	Benzo(a)Anthracene	Dibenzo(a,h)Anthracene	
	Benzo(a)Pyrene		
กลุ่ม 2B	สารที่อาจก่อมะเร็ง (Possibly carcinogen to humans) จำนวน 11 ชนิด		
	Naphthalene	Dibenzo(a,i)Pyrene	
	Benzo(b)Fluoranthene	Dibenzo(a,l)Pyrene	
	Benzo(j)Fluoranthene	Dibenzo(a,j)Pyrene	
	Benzo(k)Fluoranthene	Dibenzo(a,h)Acridine	
	Dibenzo(a,e)Pyrene	Indeno(1,2,3-cd)Pyrene	
	Dibenzo(a,h)Pyrene		
กลุ่ม 3	สารที่ไม่ก่อมะเร็ง (Unclassifiable as to carcinogenicity to humans) จำนวน 23 ชนิด		
	Antracene	Benzo(a)Acridine	Benzo(a,h)Phenanthrene
	Fluorene	Benzo(c)Acridine	Benzo(e)Pyrene
	Fluoranthene	Benzo(g,h,i)Fluoranthene	Cyclopenta(c,d)Pyrene
	Perylene	Benzo(a)Fluorene	Dibenzo(a,c)Anthracene
	Pyrene	Benzo(b)Fluorene	Dibenzo(a,j)Anthracene
	Phenanthrene	Benzo(c)Fluorene	Dibenzo(a,e)Fluoranthene
	Chrysene	Benzo(g,h,i)Perylene	Dibenzo(h,r,s,t)Pentaphene
	Coronene	Triphenylene	

ที่มา: IARC (1983)

จากการแบ่งกลุ่มสาร PAHs ของหน่วยงาน IARC จะเห็นได้ว่าไม่มีการระบุอย่างชัดเจนว่า สาร PAHs ชนิดใดที่จัดเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ แม้ว่าสาร PAHs บางชนิดเป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์ทดลอง และยังเป็นส่วนประกอบอยู่ในสารผสม เช่น ควันบุหรี่ เขม่าควัน ซึ่งได้รับการยืนยันทางระบาดวิทยาว่าเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ เนื่องจากเป็นการยากที่จะตรวจยืนยันปริมาณความเข้มข้นของสาร PAHs แต่ละชนิดที่มนุษย์ได้รับ อีกทั้งยังมีสารก่อมะเร็งอื่นๆปะปนอยู่ในสารผสมเหล่านั้นด้วย (กรมควบคุมมลพิษ, 2543)

2.2.6.2 การเป็นสารก่อการกลายพันธุ์ (Mutagenicity)

สาร PAHs จะมีความสามารถในการก่อการกลายพันธุ์ เนื่องจากสาร PAHs บางชนิดเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกเมตาบอลิซ์ด้วยเอนไซม์ Cytochrom P-450 ทำให้เกิดการเติมหมู่ไฮดรอกซี (-OH) ที่วงเบนซิน เกิดเป็นสารอนุพันธ์ epoxide ซึ่งเป็นสารที่มีความว่องไวมาก สามารถสร้างพันธะโควาเลนต์ได้ดีกับพวกโปรตีน และกรดนิวคลีอิก จากการศึกษาโครงสร้างของ DNA พบว่าตำแหน่งของเบสและหมู่ฟอสเฟตจะเป็นตำแหน่งที่สร้างพันธะโควาเลนต์กับสารก่อมะเร็ง (ไพลิน ไบผกา, 2546)

ในประเทศที่มีการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีและอุตสาหกรรม ได้มีข้อกำหนดเกี่ยวกับการรับสัมผัสสาร PAHs ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ โดยกำหนดให้ไม่ควรเกินจากระดับดังนี้ Acenaphthene 0.06 มิลลิกรัม, Anthracene 0.3 มิลลิกรัม, Fluorene 0.04 มิลลิกรัม, Fluoranthene 0.04 มิลลิกรัม และ Pyrene 0.03 มิลลิกรัม ต่อน้ำหนักร่างกาย 1 กิโลกรัม และหากได้รับสาร Benzo(a)pyrene จากอากาศในปริมาณ 1.2, 0.12 และ 0.012 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะมีความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งปอด 1/10,000, 1/100,000 และ 1/1,000,000 คน ตามลำดับ (Callen และคณะ, 2011)

2.3 การทดสอบการก่อการกลายพันธุ์โดยวิธี Ames test

2.3.1 การกลายพันธุ์

การกลายพันธุ์ (Mutation) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางพันธุกรรมซึ่งต่างไปจากลักษณะเดิมและลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปนี้สามารถถ่ายทอดจากรุ่นหนึ่งไปยังรุ่นต่อไปได้ (ประดิษฐ์พงศ์ทองคำ, 2550)

2.3.2 ระดับการกลายพันธุ์

การกลายพันธุ์ แบ่งออกได้เป็น 2 ระดับ คือ

2.3.2.1 การกลายพันธุ์ระดับโครโมโซม (Chromosome mutation) เป็นการกลายพันธุ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครโมโซม อาจจะเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโครโมโซม หรือการเปลี่ยนแปลงจำนวนโครโมโซม

2.3.2.2 การกลายพันธุ์ระดับยีน (Gene mutation หรือ Point mutation) เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของยีนจากอัลลีลหนึ่งไปเป็นอีกอัลลีลหนึ่ง ซึ่งเป็นผลมาจากเกิดการเปลี่ยนแปลงนิวคลีโอไทด์ในดีเอ็นเอ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1) การแทนที่คู่เบส (Base-pair substitution) เป็นการแทนที่คู่เบสในสายโพลีนิวคลีโอไทด์ของดีเอ็นเอ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- ทรานซิชัน (Transition) เป็นการแทนที่เบสพวกพิวรีนชนิดหนึ่งด้วยเบสพิวรีนอีกชนิดหนึ่ง หรือการแทนที่เบสพวกไพริมิดีนชนิดหนึ่งด้วยเบสไพริมิดีนอีกชนิดหนึ่ง เช่น คู่เบส A-T ถูกแทนที่ด้วย G-C หรือคู่เบส G-C ถูกแทนที่ด้วย A-T หรือคู่เบส T-A ถูกแทนที่ด้วย C-G หรือคู่เบส C-G ถูกแทนที่ด้วย T-A เป็นต้น

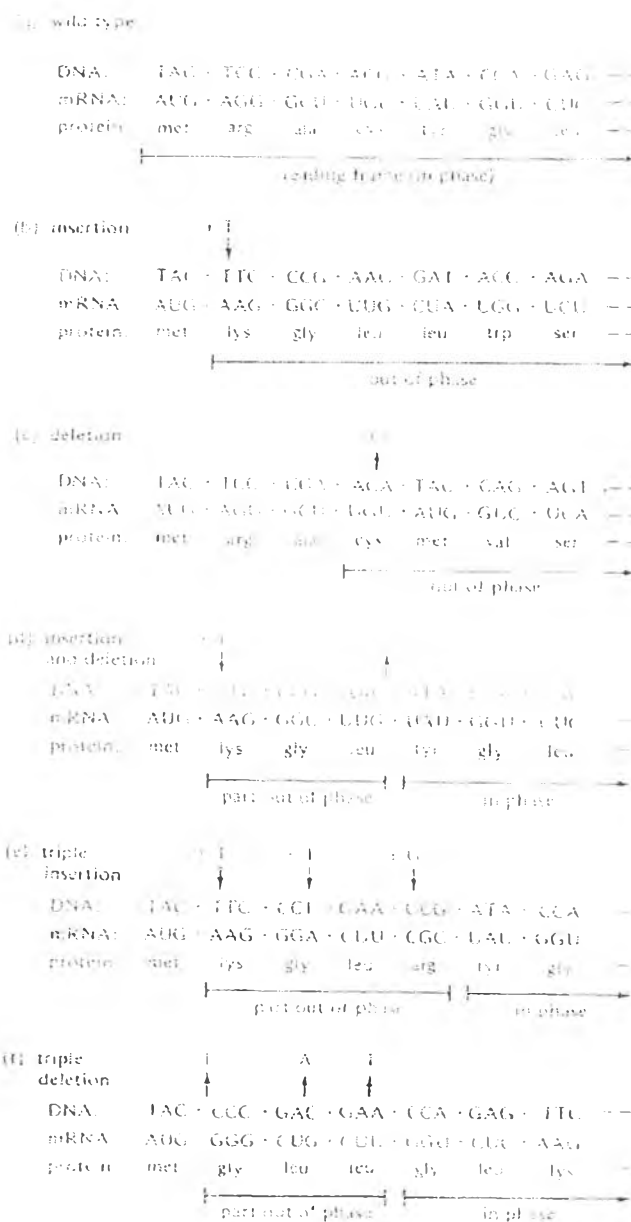
- ทรานสเวอร์ชัน (Transversion) เป็นการแทนที่เบสพวกพิวรีนด้วยเบสพวกไพริมิดีน หรือเบสพวกไพริมิดีนถูกแทนที่ด้วยเบสพวกพิวรีน เช่น คู่เบส A-T ถูกแทนที่ด้วย C-G หรือคู่เบส T-A ถูกแทนที่ด้วย G-C หรือคู่เบส A-T ถูกแทนที่ด้วย T-A เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การเกิดทรานซิชัน (Transition) และทรานสเวอร์ชัน (Transversion)

ที่มา: ประดิษฐ์ พงศ์ทองคำ (2550)

2) การเคลื่อนของรหัสพันธุกรรม (Frameshift mutation) เป็นการกลายพันธุ์ที่เกิดจากมีการสูญเสียนิวคลีโอไทด์ 1 นิวคลีโอไทด์หรือมากกว่า หรือการที่มีนิวคลีโอไทด์เพิ่มขึ้นมา 1 นิวคลีโอไทด์หรือมากกว่า หรือมีการเพิ่มหรือการขาดของนิวคลีโอไทด์ในสายโพลีนิวคลีโอไทด์ของดีเอ็นเอ ทำให้กรอบของรหัสพันธุกรรม (genetic code) เปลี่ยนแปลงไป (ประดิษฐ์ พงศ์ทองคำ, 2550) ดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 การเกิดการเคลื่อนของรหัสพันธุกรรม (Frameshift mutation)

ที่มา: ประดิษฐ์ พงศ์ทองคำ (2550)

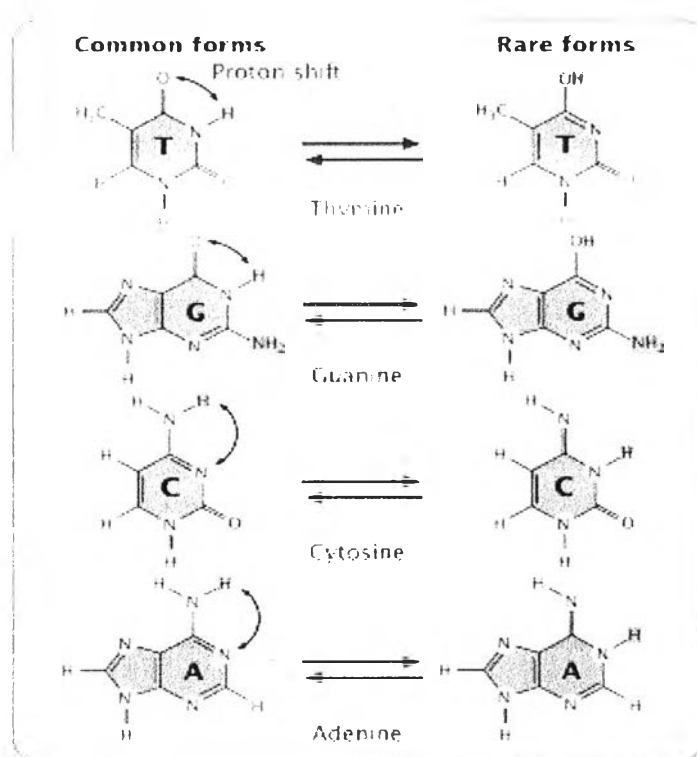
2.3.3 การเกิดการกลายพันธุ์

การเกิดการกลายพันธุ์ แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

2.3.3.1 การกลายพันธุ์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Spontaneous mutation)

เป็นผลมาจากอุณหภูมิ รังสี สารเคมี ที่มีอยู่ในธรรมชาติ กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาทวิโหมเอริกชิฟท์ (tautomeric shift) หรือการก่อให้เกิดไอออน (ionization) ในโมเลกุลของเบสในดีเอ็นเอ ซึ่งมีผล ทำให้เกิดการแทนที่คู่เบสในสายโพลีนิวคลีโอไทด์ของดีเอ็นเอ

ปฏิกิริยาทวิโหมเอริกชิฟท์ (tautomeric shift) เป็นการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งไฮโดรเจนอะตอมในโมเลกุลของเบสในดีเอ็นเอ ซึ่งมีผลทำให้โครงสร้างโมเลกุลของเบสเปลี่ยนแปลงจากรูปอะมิโน (amino form) ไปเป็นรูปอิมิโน (imino form) หรือเปลี่ยนแปลงจากรูปคีโต (keto form) ไปเป็นรูปเอนอล (enol form) ดังแสดงในภาพที่ 2.8

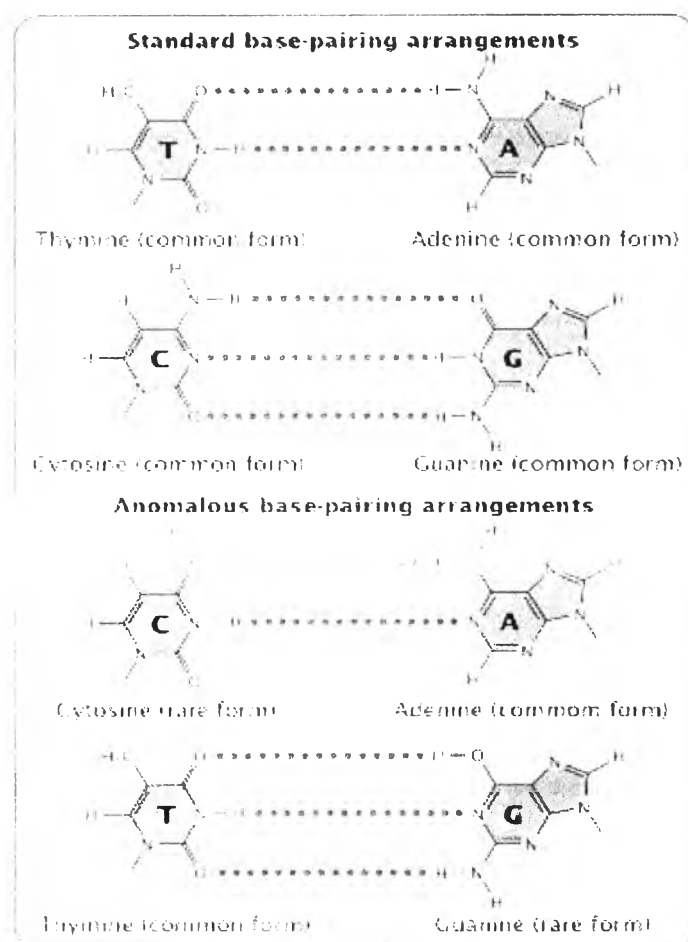


ภาพที่ 2.8 การเกิดปฏิกิริยาทวิโหมเอริกชิฟท์ (tautomeric shift) ในโมเลกุลของเบสในดีเอ็นเอ

ที่มา: Benjamin Pierce (2005)

เมื่อเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งไฮโดรเจนอะตอมในโมเลกุลของเบสในดีเอ็นเอ แล้ว จะทำให้การจับคู่เบสผิดปกติไป ดังแสดงในภาพที่ 2.9 คือ

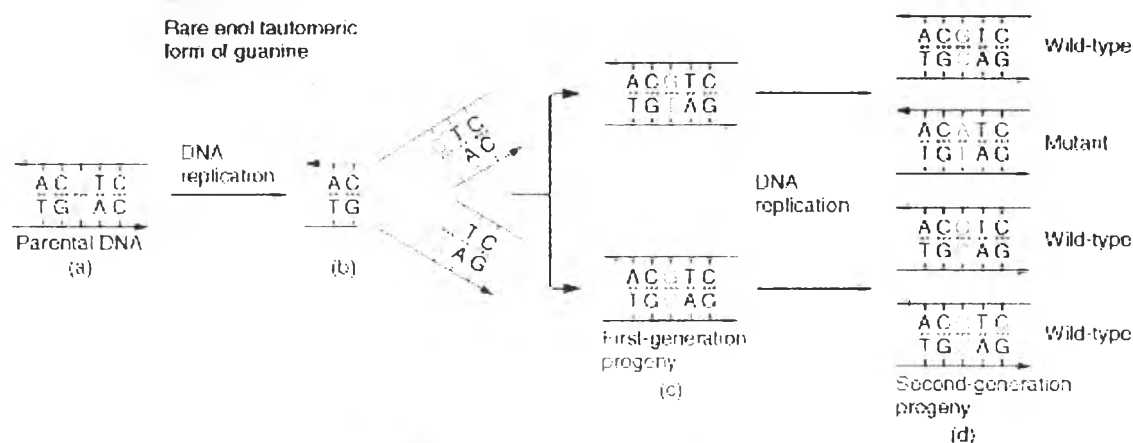
- อะดีนีน เมื่อเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งไฮโดรเจนอะตอมแล้วจะจับคู่กับไซโตซีน
 กัวนีน เมื่อเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งไฮโดรเจนอะตอมแล้วจะจับคู่กับไทมีน
 ไทมีน เมื่อเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งไฮโดรเจนอะตอมแล้วจะจับคู่กับกัวนีน
 ไซโตซีน เมื่อเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งไฮโดรเจนอะตอมแล้วจะจับคู่กับอะดีนีน



ภาพที่ 2.9 การจับคู่กันของเบสในดีเอ็นเอเปรียบเทียบกับแบบมาตรฐานและแบบผิดปกติ

ที่มา: Benjamin Pierce (2005)

ถ้าเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนตำแหน่งไฮโดรเจนอะตอมในโมเลกุลของเบสขึ้น ระหว่างที่เกิดการจำลองโมเลกุลของดีเอ็นเอจะทำให้เกิดการกลายพันธุ์ เช่น กัวนีนในโมเลกุลเดิมของดีเอ็นเอ เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งไฮโดรเจนอะตอม เมื่อเกิดการจำลองโมเลกุลของดีเอ็นเอ แทนที่กัวนีนจะจับคู่กับไซโตซีนเหมือนเดิม ก็จะไปจับคู่กับไทมีนแทน แต่การเปลี่ยนแปลงในโมเลกุลของกัวนีนนี้ไม่ถาวร จะเปลี่ยนแปลงคืนสู่สภาพเดิมได้อีก ดังนั้นเมื่อเกิดการจำลองโมเลกุลของดีเอ็นเอครั้งต่อไป กัวนีนจะจับคู่กับไซโตซีนตามปกติ และไทมีนที่จับคู่กับกัวนีนแต่เดิมนั้นก็จะจับคู่กับอะดีนีน จะทำให้ได้โมเลกุลของดีเอ็นเอ 2 ชนิด โมเลกุลหนึ่งจะเหมือนกับโมเลกุลเดิม (wild type) และอีกโมเลกุลหนึ่งจะเกิดการแทนที่คู่เบส G-C ด้วย A-T หรือเกิดการทรานซิชันขึ้นนั่นเอง ซึ่งจะทำให้เกิดการกลายพันธุ์ขึ้น (ประดิษฐ์ พงศ์ทองคำ, 2550) ดังแสดงในภาพที่ 2.10



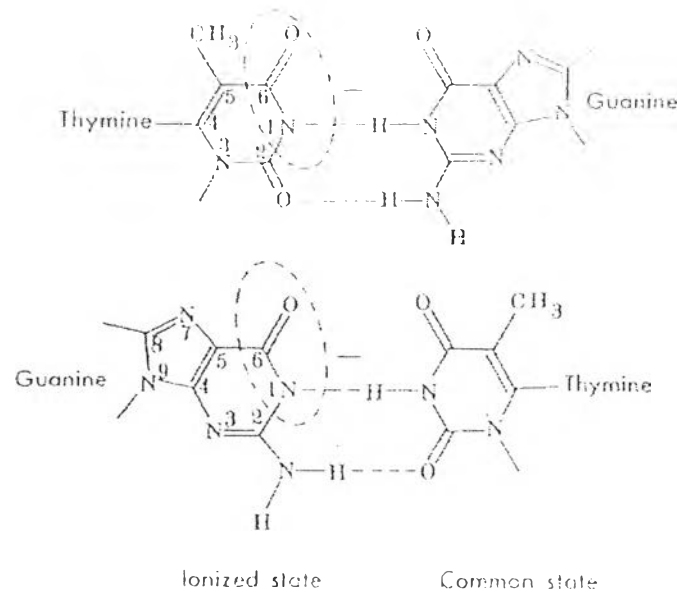
ภาพที่ 2.10 การเกิดการกลายพันธุ์เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาทวิโตะเมอร์กซิฟฟิในโมเลกุลของกัวนีน

ที่มา: W. H. Freeman and Company (1999)

ถ้าการกลายพันธุ์ที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรหัสพันธุกรรม และรหัสพันธุกรรมที่เปลี่ยนแปลงไปนี้เปลี่ยนแปลงเป็นนอนเซนส์โคดอน (nonsense codon: UAA UAG และ UGA) การแปลรหัสพันธุกรรมบนสาย mRNA จะหยุดลงที่ตำแหน่งนี้ ทำให้ได้สายโพลีเปปไทด์ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งอาจจะส่งผลทำให้เกิดการตายได้ (lethal effect)

ปฏิกิริยาการก่อให้เกิดไอออน (ionization) เป็นปฏิกิริยาสูญเสียไฮโดรเจนอะตอมในโมเลกุลของเบสในดีเอ็นเอทำให้เกิดไอออนขึ้น มีผลทำให้การจับคู่ของเบสเปลี่ยนแปลงไป เช่น ไทมีนเมื่อเกิดปฏิกิริยา ionization แทนที่จะจับคู่กับอะดีนีนเหมือนเดิม กลับไปจับคู่กับกัวนีนแทน ในทำนองเดียวกัน กัวนีนเมื่อเกิดปฏิกิริยา ionization แทนที่จะจับคู่กับไซโตซีนกลับไป

จับคู่กับไทมีนแทน เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.11 ซึ่งผลของการเกิดปฏิกิริยาการก่อให้เกิดไอออนในโมเลกุลของเบสแล้วทำให้เกิดการจับคู่ของเบสเปลี่ยนแปลงไปนี้ จะทำให้เกิดทรานซิชันชั่น เช่น A-T ถูกแทนที่ด้วย G-C หรือ G-C ถูกแทนที่ด้วย A-T ซึ่งมีผลทำให้เกิดการกลายพันธุ์ได้ (ประดิษฐ์ พงศ์ทองคำ, 2550)



ภาพที่ 2.11 การจับคู่แบบผิดปกติของไทมีนและกวีนีนที่เกิดจากปฏิกิริยาการก่อให้เกิดไอออน
ที่มา: ประดิษฐ์ พงศ์ทองคำ (2550)

2.3.3.2 การกลายพันธุ์ที่เกิดจากการชักนำ (Induced mutation)

เป็นการกลายพันธุ์ที่เกิดจากมนุษย์ใช้สิ่งก่อการกลายพันธุ์ (Mutagen) ชักนำให้เกิดขึ้น ซึ่งสิ่งก่อการกลายพันธุ์ มีดังต่อไปนี้

1) สิ่งก่อการกลายพันธุ์ทางกายภาพ (Physical mutagen) ได้แก่ อุณหภูมิ และรังสีต่างๆ ซึ่งรังสีเป็นสิ่งก่อการกลายพันธุ์ที่สำคัญในการชักนำให้เกิดการกลายพันธุ์ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

- รังสีที่ก่อให้เกิดไอออน (Ionizing radiation) มีอำนาจในการทะลุทะลวงผ่านสิ่งต่างๆ ได้สูง ทำให้เกิดการแตกหักและเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซม ได้แก่ รังสีเอ็กซ์แกมมา อัลฟา อิเล็กตรอน นิวตรอน โปรตอน เป็นต้น

- รังสีที่ไม่ก่อให้เกิดไอออน (Nonionizing radiation) มีอำนาจในการทะลุทะลวงผ่านสิ่งต่างๆ ต่ำ ได้แก่ รังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น

2) สิ่งก่อการกลายพันธุ์ทางเคมี (Chemical mutagen) ได้แก่ สารเคมีต่างๆ แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

- สารเคมีที่มีสูตรโครงสร้างคล้ายคลึงกับเบสชนิดต่างๆ ของดีเอ็นเอ (Base analogues) สารเคมีเหล่านี้สามารถเข้าแทนที่เบสของดีเอ็นเอได้ในระหว่างที่มีการจำลองโมเลกุลของดีเอ็นเอ (DNA replication) ซึ่งมีผลทำให้เกิดการแทนที่ของเบสชนิดหนึ่งด้วยเบสอีกชนิดหนึ่ง ทำให้โมเลกุลของดีเอ็นเอที่ได้ แตกต่างไปจากโมเลกุลเดิม สารเคมีดังกล่าว ได้แก่ 5-โบรมูราซิล (5-bromouracil, 5-BU) 2-อะมิโนพิวรีน (2-aminopurine, 2-AP) เป็นต้น

- สารเคมีที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเบส ได้แก่ กรดไนโตรัส (nitrous acid, HNO_2) สารไฮดรอกซีลามีน (hydroxylamine) และสารที่ให้หมู่ไฮดรอกซี (OH) สารไนโตรเจน มัสตาร์ด (nitrogen mustard) เอธิล อีเทนซัลโฟเนต (ethyl ethanesulfonate, EES) และสารเอธิลมีเทนซัลโฟเนต (ethyl methanesulfonate, EMS) เป็นต้น สารเคมีเหล่านี้มีผลทำให้เกิดการแทนที่คู่เบส ทำให้รหัสพันธุกรรมเปลี่ยนแปลงไป

- สารเคมีที่ทำให้เกิดการเพิ่มหรือการขาดหายไปของนิวคลีโอไทด์ในโมเลกุลของดีเอ็นเอ ได้แก่ สีย้อมต่างๆ (acridine dye) เช่น โพรฟลาวิน (proflavin) และอะคริดิน ออเรนจ์ (acridine orange) เป็นต้น ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีผลโดยตรงต่อโมเลกุลของดีเอ็นเอ ทำให้รหัสพันธุกรรมเปลี่ยนแปลงไป (ประดิษฐ์ พงศ์ทองคำ, 2550)

2.3.4 การทดสอบการก่อการกลายพันธุ์

การทดสอบการก่อการกลายพันธุ์ สามารถทำได้หลายวิธี เช่น Recombination assay, Micronucleus test, SOS chromotest และ Ames test เป็นต้น ซึ่งเป็นการตรวจสอบสารก่อการกลายพันธุ์ด้วยวิธีระยะสั้น ปกติแล้วการทดสอบการก่อการกลายพันธุ์นิยมทำการทดลองในสัตว์ ซึ่งทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง จึงได้มีการแนะนำจากองค์การ Environmental Protection Agency, EPA ให้ใช้การทดสอบการกลายพันธุ์ด้วยวิธี Ames test เป็นการทดสอบเบื้องต้น ทำให้วิธี Ames test ซึ่งเป็นการทดสอบในแบคทีเรียเป็นที่ได้รับความนิยม เนื่องจากสามารถทำได้ง่าย สะดวก ค่าใช้จ่ายถูก และให้ผลทดสอบเร็ว (Kada และคณะ, 1974)

วิธี Ames test เป็นการทดสอบที่พัฒนาขึ้นโดย Dr. Bruce Ames เมื่อปี พ.ศ. 2514 เพื่อใช้คัดกรองหาฤทธิ์ก่อการกลายพันธุ์ของสารเคมี โดยเป็นการทดสอบในแบคทีเรีย เนื่องจากแนวคิดที่ว่าสารที่ทำให้เกิด DNA damage และเหนี่ยวนำให้เกิดการก่อการกลายพันธุ์ในแบคทีเรีย อาจส่งผลทำให้เกิดการก่อการกลายพันธุ์ใน mammalian cells ได้เช่นเดียวกัน โดยเชื้อแบคทีเรียที่ใช้ทดสอบได้มีการพัฒนาให้มีความไวต่อการกลายพันธุ์ได้แก่ การทำให้ยีนที่สร้างผนังเซลล์มีความบกพร่อง ซึ่งยอมให้สารเคมีผ่านเข้าไปในเซลล์ได้ง่ายกว่าแบคทีเรียทั่วไป และโดยปกติเมื่อสารก่อความเสียหายแก่หน่วยพันธุกรรมของเซลล์ เซลล์จะมีระบบซ่อมแซมความเสียหายให้กลับมาเป็นปกติ แต่แบคทีเรียที่ใช้ทดสอบนี้จะมีการเติมหน่วยพันธุกรรมขนาดเล็กที่เรียกว่า พลาสมิด (plasmid) มีหน้าที่สร้างโปรตีนไปทำลายระบบซ่อมแซมหน่วยพันธุกรรมของเชื้อแบคทีเรียที่เสียหาย จึงทำให้เชื้อแบคทีเรียนี้เกิดการกลายพันธุ์ได้ง่ายกว่าปกติ ซึ่งเป็นการเพิ่มความไวในการทดสอบ (สมชัยยา สุริฉันท, 2541)

2.3.4.1 หลักการของวิธี Ames test

เป็นการทดสอบการกลายพันธุ์แบบย้อนกลับ (Backward หรือ Reverse mutation) ในแบคทีเรีย *Salmonella typhimurium* เนื่องจากแบคทีเรียที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้ ได้ถูกทำให้กลายพันธุ์ไปจนไม่สามารถสังเคราะห์กรดอะมิโน histidine ได้ ทำให้ไม่สามารถเจริญในตัวกลางที่ขาดกรดอะมิโนชนิดนี้ได้ เรียกว่า Histidine dependent (His-) สารทดสอบที่มีฤทธิ์ก่อการกลายพันธุ์จะทำให้แบคทีเรียชนิดนี้เกิดการกลายพันธุ์ย้อนกลับ สามารถสร้างกรดอะมิโน histidine ได้เอง เป็น Histidine independent (His+)

2.3.4.2 คุณสมบัติของแบคทีเรียที่ใช้ทดสอบ

นอกจากแบคทีเรียจะถูกทำให้เกิดการกลายพันธุ์ขึ้นที่ยีนที่ควบคุมการสร้างกรดอะมิโนแล้ว แบคทีเรียที่นำมาทดสอบต้องมีคุณสมบัติอื่นๆ อีก ซึ่งจะช่วยให้แบคทีเรียมีความไวต่อการเกิดการกลายพันธุ์ คือ

1) rfa mutation เป็นการเพิ่ม cell wall permeability โดยทำให้ความสามารถในการสร้าง lipopolysaccharide ซึ่งเคลือบอยู่บนผนังเซลล์ของแบคทีเรียลดลงหรือขาดหายไป ทำให้สารโมเลกุลใหญ่เข้าไปภายในเซลล์ได้มากขึ้น

2) uvrB mutation เป็นการทำให้แบคทีเรียสูญเสียความสามารถในการซ่อมแซมดีเอ็นเอที่ผิดปกติ เมื่อมีดีเอ็นเอที่กลายพันธุ์เกิดขึ้นก็จะไม่เกิดการซ่อมแซมให้เป็นปกติ ดีเอ็นเอที่ผิดปกตินี้ก็เลยถ่ายทอดต่อไป

3) R-factor plasmids เป็นการใส่พลาสมิด เช่น pKM101 หรือ pAQ1 เข้าไปในแบคทีเรีย เพื่อช่วยให้แบคทีเรียมีความไวต่อสารก่อการกลายพันธุ์มากขึ้น

2.3.4.3 แบคทีเรียที่ใช้ทดสอบ

ในการทดสอบการก่อการกลายพันธุ์ใช้แบคทีเรีย *Salmonella typhimurium* สายพันธุ์ TA98, TA100, DMST2069 และ ATCC13311 เป็นตัวทดสอบ โดยเชื้อแต่ละสายพันธุ์ได้มีการทำให้กลายพันธุ์ที่ตำแหน่งของยีนแตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ลักษณะเฉพาะของเชื้อ *Salmonella typhimurium* ที่ใช้ทดสอบ Ames test

<i>S. typhimurium</i> strain	Gene Affected	DNA-repair	LPS	Plasmids	Mutational event
TA98 ^a	<i>hisD</i>	<i>uvrB</i>	<i>rfa</i>	pKM101	frameshift
TA100 ^b	<i>hisG</i>	<i>uvrB</i>	<i>rfa</i>	pKM101	base-pair substitution
DMST2069 ^c	<i>hisG</i>	<i>uvrB</i>	<i>rfa</i>	pKM101	base-pair substitution
ATCC13311 ^d	<i>hisC</i>	<i>uvrB</i>	<i>rfa</i>	pKM101	frameshift

ที่มา: ^{a,b}Maron D. และ Ames B. (1983)

^cDepartment of Medical Science, Ministry of Public Health Thailand (2011)

^dAmerican Type Culture Collection (2013)

เชื้อแบคทีเรีย *Salmonella typhimurium* ทั้ง 4 สายพันธุ์ ได้ถูกนำมาใช้ในการทดสอบสารก่อการกลายพันธุ์ โดยสายพันธุ์ TA98 และ ATCC13311 ใช้ทดสอบการก่อการกลายพันธุ์แบบการเคลื่อนขงรหัสพันธุกรรม (Frameshift mutation) โดยเป็นการเพิ่มหรือลดจำนวนคู่เบสในดีเอ็นเอ ส่วนสายพันธุ์ TA100 และ DMST2069 ใช้ทดสอบการก่อการกลายพันธุ์แบบการแทนที่คู่เบสหนึ่งด้วยคู่เบสอีกชนิดหนึ่ง แต่จำนวนคู่เบสยังเท่าเดิม (Base-pair substitution)

นอกจากนี้การทดสอบการก่อการกลายพันธุ์ด้วยวิธี Ames test ยังมีการเพิ่มการกระตุ้นด้วยเอนไซม์ที่ได้จากตับหนู (S9) โดยปกติเมื่อคนได้รับสารพิษเข้าไปในร่างกาย จะเกิดกระบวนการเพื่อช่วยสลายความเป็นพิษให้ลดลงโดยอาศัยเอนไซม์จากตับ การเติม S9 เข้าไปในการทดสอบ คล้ายกับเป็นการจำลองการเกิดเมแทบอลิซึม (metabolism) ในร่างกายคนที่ได้รับสารพิษ อาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของดีเอ็นเอให้ผิดปกติไปได้ (อุษณีย์ วิณิชเขตคำนวณ, 2534)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศิริวรรณ แก้วงาม (2543) ศึกษาลักษณะทางสัณฐานและองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน ในกรุงเทพมหานคร โดยทำการตรวจวัดในช่วงฤดูฝน (สิงหาคม-กันยายน 2542) และฤดูหนาว (ธันวาคม 2542-มกราคม 2543) ในบริเวณพื้นที่ทั่วไปและบริเวณพื้นที่ริมถนน จากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองในฤดูหนาวมีค่าสูงกว่าฤดูฝน โดยบริเวณพื้นที่ริมถนนจะมีความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน สูงกว่าบริเวณพื้นที่ทั่วไป และพบว่าฝุ่นละอองที่มาจากเครื่องยนต์ดีเซล มีคาร์บอน ออกซิเจน และกำมะถัน เป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้ยังพบว่าแหล่งกำเนิดของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน ในกรุงเทพมหานคร ส่วนใหญ่มาจากการจราจร และรองลงมาคือการทำก่อสร้าง

Celis และคณะ (2004) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน ในประเทศชิลี โดยทำการตรวจวัดในบริเวณพื้นที่ในเขตเมืองที่มีความแตกต่างกันของประเทศชิลี ซึ่งแต่ละบริเวณเป็นตัวแทนของพื้นที่ในเขตเมือง พาณิชยกรรม อุตสาหกรรม และที่พักอาศัย จากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน ในช่วงฤดูหนาวมีค่าสูงกว่า ในฤดูร้อน และยังพบว่าฝุ่นละอองในเขตเมืองจะมีธาตุคาร์บอน ไนโตรเจน และสารอินทรีย์วัตถุ ซึ่งมาจากการเผาไหม้เครื่องยนต์ของยานพาหนะ

Xinhui (2002) ได้ศึกษาสารอินทรีย์ที่มีอยู่ใน PM_{10} โดยเก็บตัวอย่าง PM_{10} โดยเครื่องเก็บฝุ่นชนิดไฮโดรลูม เก็บฝุ่นในเมืองลิวาน ประเทศจีน ช่วงเดือนเมษายนถึงเดือนกรกฎาคม ปี 2001 และนำผลมาวิเคราะห์โดยใช้วิธีแก๊สโครมาโตกราฟี และแมสสเปกโตรเมตรี พบว่าสารประกอบอัลเคน และ สารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน แยกเป็นแต่ละชนิด อยู่ในช่วง 26.4-719.2 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 7.4-159.4 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

วนิดา จินศาสตร์ และปาจริย์ ทองสนิท (2544) ได้เก็บตัวอย่างฝุ่น โดยทำการเก็บ 24 ชั่วโมง ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2542 ถึงเดือนเมษายน 2543 จำนวน 190 ตัวอย่าง ในเขตกรุงเทพมหานคร แล้วนำมาวิเคราะห์สารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน พบสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเฉลี่ย 24 ชั่วโมง 53.93 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และพบว่าร้อยละ 97 ของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน อยู่ในฝุ่นขนาดเล็กกว่า 0.95 ไมครอนเมตร และ

ผลจากการวิเคราะห์ฝุ่นจากบรรยากาศเทียบกับตัวอย่างจากแหล่งกำเนิด พบว่าแหล่งกำเนิดหลักของสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน คือไอเสียรถยนต์

โพลิน โบฆกา (2546) ได้ศึกษาความเข้มข้นของสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน บริเวณสถานีรถไฟฟ้าพระโขนง ระหว่าง 23 กันยายน ถึง 6 ตุลาคม 2545 โดยใช้เครื่อง Realtime PAH Monitor (PAS2000CE) พบความเข้มข้นเฉลี่ยเป็น 717.66 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และพบว่าปริมาณและความหนาแน่นของรถประเภทบรรทุกขนาดใหญ่และรถบรรทุกขนาดเล็ก 4 ล้อ เป็นปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการปลดปล่อยสารดังกล่าว และมีปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วและทิศทางลม ความเข้มแสง และความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

Kawanaka และคณะ (2006) ศึกษาการก่อการกลายพันธุ์ของอนุภาคฝุ่นในบรรยากาศ บริเวณริมถนนและบริเวณชานเมือง ในเขตเมืองไซตามะ ประเทศญี่ปุ่น โดยเก็บตัวอย่างระหว่างเดือนมกราคมถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2005 แล้วนำไปทดสอบการก่อการกลายพันธุ์โดยใช้การทดสอบแอมส์ โดยใช้เชื้อ *Salmonella typhimurium* สายพันธุ์ TA98 ปรากฏจากการเติมเอนไซม์กระตุ้น (S9) พบว่าการก่อการกลายพันธุ์ส่วนใหญ่จะพบใน fine particle fraction ในทั้งสองบริเวณ และกิจกรรมการก่อการกลายพันธุ์ในอนุภาค ultrafine particles บริเวณชานเมืองคิดเป็น 5.7 เปอร์เซ็นต์ และบริเวณริมถนนคิดเป็น 12 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าผลกระทบต่อสุขภาพอันเกิดจากอนุภาค ultrafine particles บริเวณริมถนนมีความเสี่ยงค่อนข้างสูงกว่าบริเวณชานเมือง

Gilli และคณะ (2007) ศึกษาการก่อการกลายพันธุ์ของ $PM_{2.5}$ ในบรรยากาศ เมืองตูริน ประเทศอิตาลี โดยทำการเก็บตัวอย่างตั้งแต่เดือนกันยายน 2001 ถึงเดือนธันวาคม 2004 วัดค่าเฉลี่ยของ $PM_{2.5}$ ได้ 48.76 ± 24.12 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และนำไปทดสอบการก่อการกลายพันธุ์โดยใช้การทดสอบแอมส์ โดยใช้เชื้อ *Salmonella typhimurium* สายพันธุ์ TA98 และ TA100 ในภาวะที่เติมและไม่เติมเอนไซม์กระตุ้น (S9) ผลการทดสอบให้ผลบวกในเชื้อ *Salmonella typhimurium* สายพันธุ์ TA98 ทั้งในภาวะมีและไม่เอนไซม์กระตุ้น (S9) และวัดค่าระดับ PAHs เฉลี่ยได้ 8.24 ± 6.30 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อีกทั้งยังพบว่า $PM_{2.5}$ และระดับของ PAHs มีความสัมพันธ์กัน