

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

ฝุ่น

ฝุ่นเป็นอนุภาคของแข็งใหญ่กว่า Colloid และลอยอยู่ได้ในอากาศชั่วคราวหนึ่ง ฝุ่นละอองมีความหลากหลายด้านกายภาพ และมีองค์ประกอบเป็นของแข็งหรือของเหลว ฝุ่นละอองที่มีอยู่ในอากาศรอบ ๆ ตัวเรา มีขนาดตั้งแต่ 0.002 ไมครอน ซึ่งสามารถมองด้วยตาเปล่าโดยไม่ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ไปจนถึงฝุ่นที่มีขนาดใหญ่กว่า 500 ไมครอน ซึ่งเป็นฝุ่นที่มองด้วยตาเปล่าไม่เห็นมีขนาดเล็กกว่า 50 ไมครอน ฝุ่นละอองที่แขวนลอยอยู่ในอากาศได้นานเป็นฝุ่นละอองขนาดเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 10 ไมครอน เนื่องจากมีความเร็วในการตกตัวต่ำ จึงแขวนลอยอยู่ในอากาศนาน หากมีแรงกระทำจากภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น การไหลเวียนของอากาศ กระแสลม เป็นต้น ฝุ่นละอองขนาดใหญ่กว่า 100 ไมครอนอาจแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศได้เพียง 2 - 3 นาที แต่ฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กกว่า 0.5 ไมครอน อาจแขวนลอยอยู่ในอากาศได้นานเป็นปี ฝุ่นละอองในอากาศแบ่งเป็นฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นและแพร่กระจายสู่อากาศจากแหล่งกำเนิดโดยตรง และฝุ่นละอองซึ่งเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาต่าง ๆ ในอากาศเช่น จากการรวมตัวด้วยปฏิกิริยาทางฟิสิกส์หรือปฏิกิริยาทางเคมี หรือปฏิกิริยาเคมีแสง (Photochemical reaction) ฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจึงมีชื่อเรียกต่างกันไปตามลักษณะการรวมตัวของฝุ่นละออง เช่น ควีน (Smoke) พุ่ม (Fume) หมอก น้ำค้าง (Mist) เป็นต้น

ลักษณะของฝุ่น

ฝุ่นละอองที่ลอยอยู่ในอากาศมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาและมีแหล่งกำเนิดแตกต่างกันสภาพทางภูมิอากาศและลักษณะลมฟ้าอากาศอุตุนิยมวิทยามีผลต่อการแพร่กระจายของฝุ่นละออง จึงทำให้อนุภาคของฝุ่นละอองมีขนาด รูปร่าง ความหนาแน่น องค์ประกอบทางเคมี การเกาะตัวกันและโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป นอกจากนี้ขณะที่อยู่ในอากาศ ฝุ่นละอองจะทำปฏิกิริยาต่อกัน หรือเกิดปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมในอากาศ ทำให้โครงสร้างซับซ้อนมากขึ้นโดยฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอนนั้น มาจากไอเสีรอนด์ การเกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซชนิดต่างๆ ควีนไฟ พายุฝุ่น ละอองน้ำทะเลและโรงงานอุตสาหกรรม ฝุ่นขนาด 0.4 - 0.9 ไมครอน เป็นตัวการในการกระจายแสงทำให้ท้องฟ้าขมุกขมัว

ตาราง 2.1 ส่วนประกอบและแหล่งที่มาของฝุ่น

ส่วนประกอบ	แหล่งที่มา
สารประกอบคาร์บอน	กระบวนการเผาไหม้
สารประกอบอินทรีย์ เช่น ไดออกซิน โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน	กระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์
เกลือแอมโมเนีย	การทำให้เป็นกลางของกรดในอากาศ
เกลือ โซเดียมและแมกนีเซียมคลอไรด์	ทะเล
แคลเซียมซัลเฟต	วัสดุก่อสร้าง เช่น ดินและทราย
ซัลเฟต	การเติมออกซิเจนของซัลเฟอร์ไดออกไซด์
ไนเตรท	การเติมออกซิเจนของไนโตรเจนไดออกไซด์
ตะกั่ว	น้ำมันที่มีสารตะกั่ว
ดิน	แร่ธาตุต่าง ๆ

การจำแนกขนาดคละของอนุภาคฝุ่นละออง

อนุภาคมลสาร (Particulates) ได้แก่มลสารใด ๆ ในบรรยากาศหรือไอเสีย ซึ่งอยู่ในสภาพของแข็งหรือของเหลวที่อุณหภูมิต่ำและความดันปกติ ทั้งนี้ยกเว้นไอน้ำ ขนาดอนุภาคมลสารชนิดต่าง ๆ (วงศ์พันธ์ และคณะ, 2540) แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

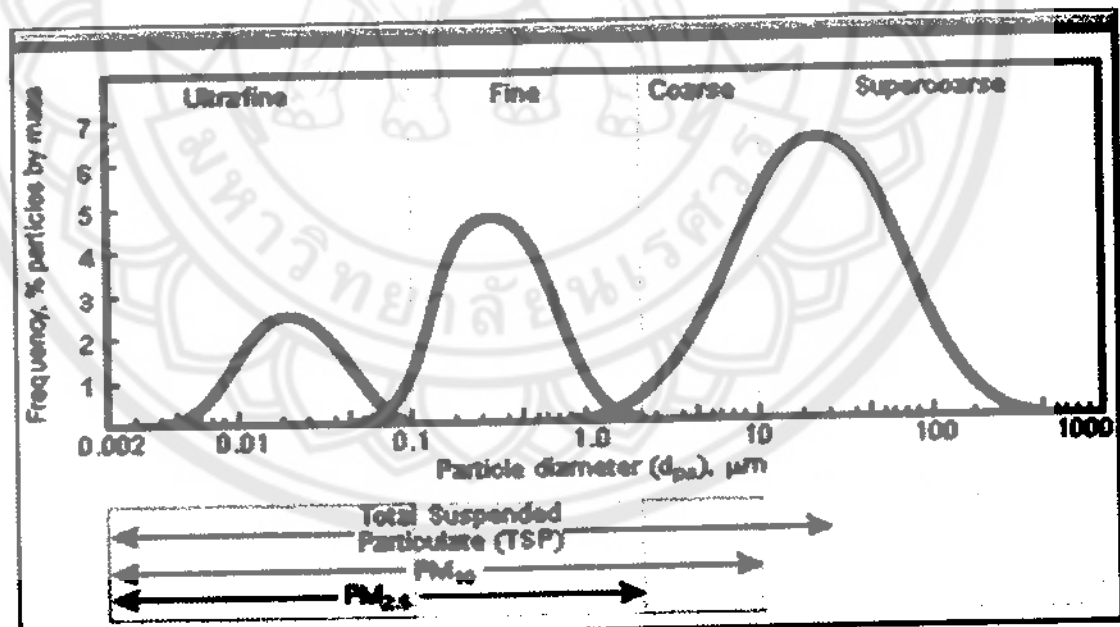
ตารางที่ 2.2 ขนาดทั่วไปของอนุภาคมลสาร

สาร	ขนาดใหญ่สุด (ไมครอน)	ขนาดเล็กสุด (ไมครอน)
ละอองน้ำ	500	40
ผงถ่านหิน	250	25
ฝุ่น	200	20
ฝุ่นโรงถลุงเหล็ก	200	1
ผงซีเมนต์	150	10
จีเถ้า	110	3
เกสรดอกไม้	60	20
หมอก	40	1.5
สปอร์ต้นไม้	30	10
แบคทีเรีย	15	1
ยากำจัดแมลงแบบผง	10	0.4
สีฟัน	4	0.1
สมีอก	2	0.001
ควันทูบรี	1	0.01
ควันท้ำมัน	1	0.03
ควนซิงค์ออกไซด์	0.3	0.01
ควนถ่านหิน	0.2	0.01
ไวรัส	0.05	0.003

สายงานที่เกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมด้านอากาศได้แบ่งอนุภาคฝุ่น ในสิ่งแวดล้อมแบ่งออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ ๆ ตามขนาด คือ ขนาดใหญ่มาก (super coarse) ขนาดใหญ่ (coarse) ขนาดเล็ก (fine) และขนาดเล็กมาก (ultra fine) ดังตารางที่ 2.3 อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 10 ไมครอน มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า (PM10: Particulate matters with aerodynamic diameter of less than 10 microns) อนุภาคที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 2.5 ไมครอน มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า (PM2.5: Particulate matters with aerodynamic diameter of less than 2.5 microns) และ อนุภาคทุกขนาดที่ลอยอยู่ในอากาศมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า (TSP: Total Suspended Particulates) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1

ตารางที่ 2.3 ประเภทขนาดอนุภาคในสิ่งแวดล้อมด้านอากาศ

EPA Description	Particle Size
Super coarse	$d_{pa} > 10 \mu\text{m}$
Coarse	$2.5 \mu\text{m} < d_{pa} \leq 10 \mu\text{m}$
Fine	$0.1 \mu\text{m} < d_{pa} \leq 2.5 \mu\text{m}$
Ultra fine	$d_{pa} \leq 0.1 \mu\text{m}$



รูปที่ 2.1 อนุภาคทุกขนาดที่แขวนลอยในอากาศ

ส่วนสายงานสิ่งแวดล้อมด้านดินนั้นได้แบ่งอนุภาคฝุ่นในสิ่งแวดล้อมออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ ๆ ตามขนาด คือ ดินเหนียว(Clay) ดินตะกอน (silt) ทราย (sand) และกรวด (gravel) ดังตารางที่ 2.4 ช่วงของขนาดอนุภาคฝุ่นที่จำแนกโดย United States Public Roads Administration ซึ่งเป็นหน่วยงานที่ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับสิ่งสกปรกที่สะสมบนผิวถนน ที่ถูกน้ำฝนชะล้างลงสู่แหล่งรองรับน้ำได้แบ่งช่วงของขนาดอนุภาคไว้ดังนี้ ดินเหนียว (clay) < 5µm ดินตะกอน(silt)5-50 µm ทรายละเอียด (fine sand)50-250 µm ทรายหยาบ (coarse sand) 250-2000 µm กรวด (gravel) > 2000 µm ทั้งนี้ขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าฝุ่น(Dust) คือมากกว่า 60 µm จะเรียกว่าเศษสิ่งสกปรกบนถนน(street dirt) ส่วนขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 2000 µm จะเรียกว่า เศษขยะ(litter) เช่น กระป๋อง ขวด เศษวัสดุก่อสร้าง ฯลฯ

ชนิดของฝุ่นละออง

ชนิดของฝุ่นละอองสามารถแบ่งตามองค์ประกอบ แหล่งที่กำเนิดและขนาดได้ดังนี้

1. แบ่งตามองค์ประกอบทางเคมี

1.1 ฝุ่นละอองจากสารอินทรีย์(Organic dust) มีองค์ประกอบของคาร์บอนไฮโดรเจน และออกซิเจน แบ่งเป็น

- ฝุ่นละอองจากสารอินทรีย์ที่ไม่มีชีวิต ซึ่งเกิดจากวัชพืช หญ้าและต้นไม้มีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบา สามารถลอยในบรรยากาศได้ ขึ้นอยู่กับความชื้นในอากาศและอุณหภูมิ เช่น ละอองเกสรของพืชหรือหญ้าทำให้เกิดอาการแพ้พิษหรือทำให้เกิดโรคภูมิแพ้ได้

- ฝุ่นละอองจากสารอินทรีย์ที่มีชีวิต เช่น แบคทีเรีย เชื้อรา, ไวรัส และสปอร์ นั้นพบได้เสมอในอากาศ โดยเฉพาะเชื้อราที่พบในอากาศทำให้เกิดโรคได้หลายชนิด เช่น บาดทะยัก, คอตีบ, วัณโรค, ไทฟอยด์ เป็นต้น สิ่งมีชีวิตเล็กเหล่านี้อาจล่องลอยอยู่ตามลำพังด้วยตัวของมันเองหรืออาจติดอยู่กับอนุภาคต่าง ๆ

1.2 ฝุ่นละอองจากสารอนินทรีย์ที่มี (Inorganic dust) มีองค์ประกอบต่าง ๆ เช่น SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , Br^- หรือประกอบด้วยโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว แคดเมียม แอสเบสตอส เมื่อร่างกายได้รับฝุ่นนี้เข้าไปและสะสมในร่างกาย ทำให้เกิดอันตรายอย่างร้ายแรง

2. แบ่งตามแหล่งที่กำเนิด

อนุภาคฝุ่นละอองที่แขวนลอยฟุ้งกระจายอยู่ในบรรยากาศทั่วไปนั้น อาจเกิดได้จากแหล่งกำเนิดโดยตรงแล้วแพร่กระจายสู่บรรยากาศจากแหล่งกำเนิดนั้น หรือเกิดจากปฏิกิริยาต่าง ๆ ในบรรยากาศ เช่น การรวมตัวด้วยปฏิกิริยาทางฟิสิกส์ หรือปฏิกิริยาทางเคมี หรือปฏิกิริยาทางแสง (Photochemical reaction) ทำให้เกิดเป็นอนุภาคขึ้นและแพร่กระจายเข้าสู่ภายในอาคารที่อยู่ในบริเวณแหล่งกำเนิดนั้นด้วย โดยแหล่งกำเนิดอนุภาคฝุ่นละออง แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.1 อนุภาคฝุ่นที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (Natural particles)

- ภูเขาไฟ เมื่อเกิดการระเบิดของภูเขาไฟจะมีเถ้าถ่านและควันถูกปล่องออกมาสู่บรรยากาศจำนวนมาก ซึ่งอาจลอยขึ้นไปสูงมากเป็นหมื่น ๆ ฟุต และคงอยู่ในอากาศได้นานนับกว่าปีที่จะตกกลับคืนสู่โลก

- ไฟป่า ควันและเถ้าถ่านที่เกิดจากไฟป่าเป็นตัวการที่เพิ่มปริมาณมลพิษในอากาศได้มากอย่างหนึ่ง ซึ่งอาจทำให้ทัศนวิสัยในการมองเห็นเลวร้ายลง อันเป็นสาเหตุอุบัติเหตุทางรถยนต์หรือทางเครื่องบินได้

- มลสารต่าง ๆ จากดิน ลม พายุ ซึ่งสามารถพัดพาเอาอนุภาคมลสารจากผิวดินให้ขึ้นไปแขวนลอยอยู่บรรยากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าผิวดินมีลักษณะที่ไม่จับกันแน่น เช่น ดินที่มีเพิ่มผ่านการคราด ไถ ดินที่ปราศจากต้นไม้ใบหญ้าปกคลุม หรือดินที่ถูกกระบวนการอื่น ๆ รบกวน เช่น มีรถวิ่งผ่านไปมา อนุภาคต่าง ๆ จากดินจะถูกลมพัดพาเข้าสู่บรรยากาศได้ง่าย อนุภาคมลสารขนาดเล็กและแขวนลอยอยู่ได้นานกว่าพวกที่มีขนาดใหญ่

2.2 ฝุ่นละอองที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Anthropogenic)

2.2.1 เกิดจากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงจากยานพาหนะหรือรถประเภทต่าง ๆ เช่น เครื่องยนต์ดีเซลจะปล่อยควันดำ ซึ่งเป็นอนุภาคของคาร์บอนจำนวนมากที่เกิดจากการสันดาปไม่สมบูรณ์ของน้ำมันดีเซล หรือการปล่อยควันขาวซึ่งเป็นฝุ่นละอองไอของน้ำมันหล่อลื่นเป็นต้น นอกจากนี้ การขนส่งหิน ดินทราย ซีเมนต์ หรือวัสดุอื่น ๆ ที่ไม่ได้คลุมด้วยผ้าใบ หรือถนนสกปรกทำให้เกิดฝุ่นละอองติดอยู่ที่ล้อหรือถนน ซึ่งขณะรถแล่นจะทำให้เกิดการกระจายตัวของฝุ่นละอองอยู่ในอากาศ

2.2.2 การก่อสร้าง

- การก่อสร้างหลายชนิดมักมีการเปิดหน้าดินก่อนการก่อสร้าง ซึ่งทำให้เกิดฝุ่นได้ง่าย เช่น อาคารตึ่งก่อสร้าง การปรับปรุงสาธารณูปโภค

- การก่อสร้างอาคารสูง ทำให้ฝุ่นซีเมนต์ถูกลมพัดออกจากอาคาร

- การรื้อถอนทำลายอาคารหรือตึ่งก่อสร้าง

2.2.3 โรงงานอุตสาหกรรม

- การเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น น้ำมันเตา, ฟืน, แกลบ, เพื่อนำพลังงานไปใช้ในกระบวนการการผลิต ทำให้ฝุ่นละออง เช่น ฝุ่นเถ้าบิน(Coal fly ash) จากโรงไฟฟ้า

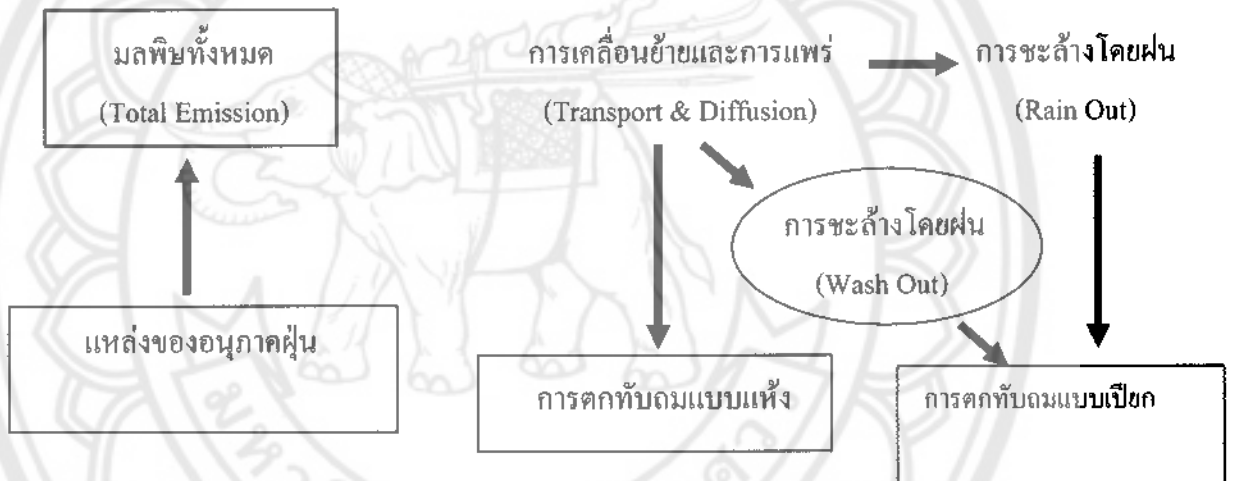
- กระบวนการผลิตที่มีฝุ่นออกมา เช่น การโม่หิน, การผลิตปูนซีเมนต์

นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจนและไฮโดรคาร์บอนออกสู่บรรยากาศ ยังสามารถทำให้เกิดอนุภาคฝุ่นละอองในอากาศ ได้จากการปฏิกิริยาโฟโตเคมีคอลระหว่างออกไซด์ของไนโตรเจนและไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเรียกว่า Smog Reaction ได้อนุภาคที่มีรัศมีเล็กกว่า 0.2 ไมครอน

2.2.4 การเผาวัสดุในที่โล่งแจ้ง

ได้แก่ การเผาขยะมูลฝอยหรือวัสดุต่าง ๆ จะเกิดเขม่าขี้เถ้าเป็นจำนวนมากฟุ้งกระจายไปในอากาศและลอยไปตามกระแสลมปกคลุมพื้นที่กว้าง

รูปที่ 2.2 แสดงวัฏจักรของฝุ่นในบรรยากาศ ฝุ่นละอองที่เกิดจากแหล่งกำเนิดชนิดต่าง ๆ จะถูกปลดปล่อยออกสู่อากาศ แล้วอาจจะแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศ หรือถูกพัดพาไปโดยการพัดพาของอากาศได้ไม่นานก็ตกกลับมาแรงโน้มถ่วงของโลกเรียกว่า การตกกลับแบบแห้ง (Dry Deposition) ส่วนฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็ก เส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 10 ไมครอน จะแขวนลอยในบรรยากาศได้นานกว่า ฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กนี้สามารถตกกลับแบบเปียก (Wet Deposition) ได้ 2 รูปแบบ คือ อนุภาคฝุ่นจะเข้าไปแกนกลางให้น้ำเกาะแล้วรวมตัวอยู่ในเมฆ เรียกว่า Rain out และการตกกลับโดยฝนตกชะเอาอนุภาคฝุ่นในบรรยากาศลงมาเรียก Wash out



รูปที่ 2.2 วัฏจักรของฝุ่นในบรรยากาศ

ที่มา : คู่มือปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมและพลังงาน

3. แบ่งตามขนาดของอนุภาค ซึ่ง U.S.EPA (The united state of America environmental protection agency, 1992) กำหนดขนาดฝุ่นละออง 2 ขนาด คือ

3.1 ฝุ่นละอองที่ขนาดเล็ก (Fine particulate matter) กำหนดขนาดไว้ว่า มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 2.5 ไมครอน

3.2 ฝุ่นละอองที่ขนาดใหญ่ (Coarse particulate matter) กำหนดขนาดไว้ว่า มีเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่า 2.5 ไมครอน

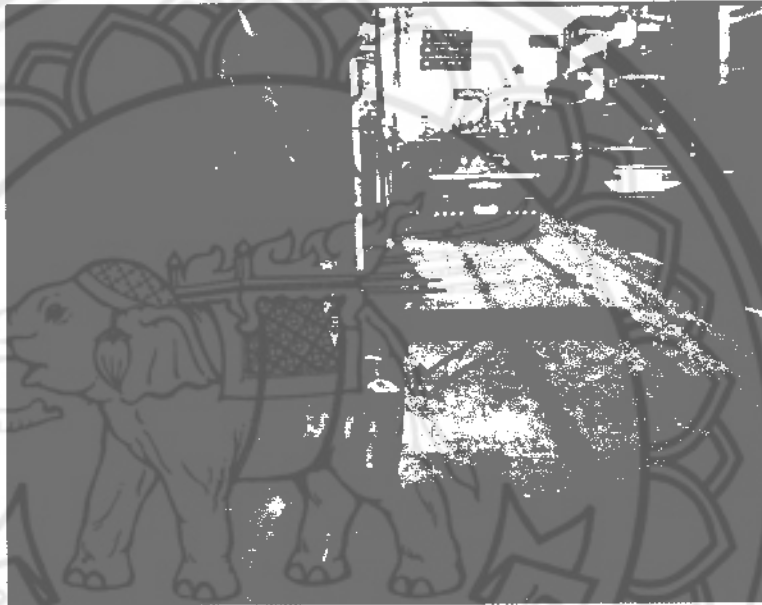
ชนิดของฝุ่นละอองอธิบายตามลักษณะ โครงสร้างหรือองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นหรือประเภทของอุตสาหกรรมที่ทำให้เกิดฝุ่นได้ เช่น ฝุ่นถ่านหิน, ฝุ่นปูน, ฝุ่นซิลิกา และฝุ่นคาร์บอน เป็นต้น

ตารางที่ 2.4 ขนาดต่าง ๆ ของอนุภาคมลสาร (USEPA, 1992)

	U.S. Department of Agriculture	ASTM-USCS	International Society of Soil Science	United States Public Road Adm In Istration
Particle Size in Millimeters				
Clay	<0,002	<0,005	<0,002	<0,005
Silt	0,002-0,05	0,005-0,074	0,002-0,02	0,005-0,05
Very Fine Sand	>0,05-0,10	-	-	-
Fine Sand	<0,10-0,25	>0,074-0,420	>0,02-0,2	0,05-0,25
Medium Sand	>0,25-0,5	>0,420-2,0		
Coarse Sand	>0,5-1,0	>2,0-4,76	>0,2-2,0	>0,25-2,0
Very Coarse Sand	>1,0-2,0			
Gravel	>2,0	>4,76	>2,0	>2,0

ทฤษฎีการสะสมแบบแห้ง (Dry Accumulation) ของสารต่าง ๆ บนพื้นผิว

Lager et al. (1997) และ James and Boregowda (1985) อธิบายถึงการสะสม (Build up) ว่าเป็นหลักการที่ซับซ้อนของกระบวนการ "Dry Weather Processes" ที่เกิดขึ้นในการทับถมของอนุภาคบนพื้นผิวแบบที่บดน้ำ (Impervious Surface) ซึ่งอนุภาคต่าง ๆ อาจมีแหล่งกำเนิดมาจากสารกัมมันตภาพรังสีในบรรยากาศ พืชหรือเศษใบไม้ที่ร่วงหล่น การสีกร่อนบริเวณผิวหน้าของดิน การเสื่อมสลายของผิวดิน สารที่แพร่กระจายจากรถยนต์หรือการเสื่อมสภาพรถยนต์และการก่อสร้าง เป็นต้น Sartor and Boyd (1972) กล่าวว่า 78% ของอนุภาคของแข็งทั้งหมดบนหน้าตัดถนนจะสะสมอยู่ในช่วงระยะประมาณ 1 ม. จากขอบข้างถนน ดังตัวอย่างถนนสายหนึ่งทีแสดงในรูปที่ 2.3

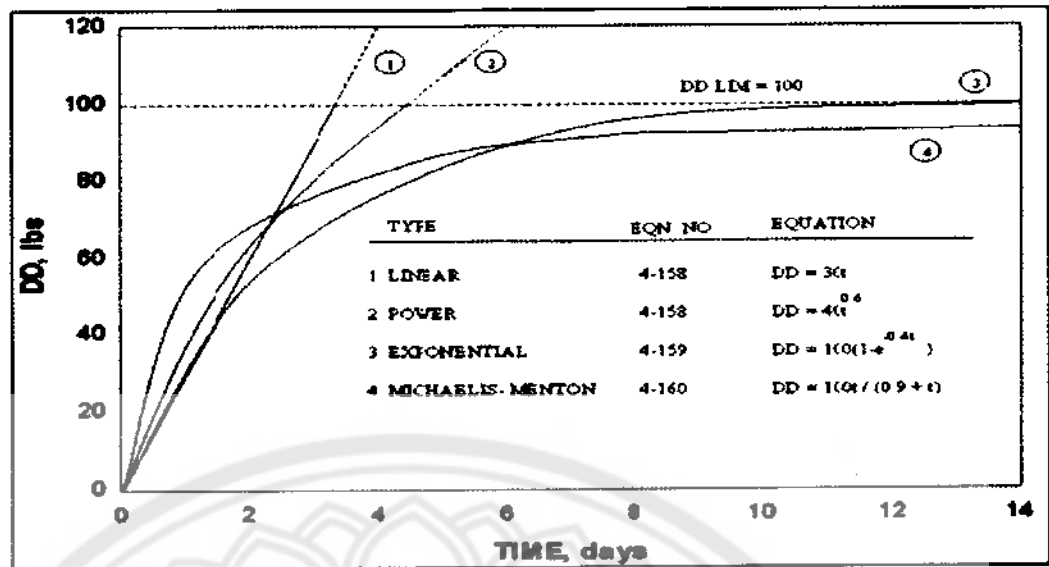


รูป 2.3 ตัวอย่างการสะสมของฝุ่นถนน

สมการการสะสมแบบแห้ง (Alternative Buildup Formulations)

Vaze et al. (2002) ได้กล่าวว่าแบบจำลองที่ใช้สำหรับวัดคุณภาพของ storm water เกิดขึ้นครั้งแรกในช่วงทศวรรษที่ 70 โดยมีผู้คิดค้นแบบจำลองชนิดต่าง ๆ ขึ้นมากมาย อย่างไรก็ตามกล่าวโดยรวมได้ว่าแบบจำลองส่วนใหญ่จะพิจารณาการปนเปื้อนของน้ำฝน ออกเป็น 2 กระบวนการที่ต่อเนื่องกัน กระบวนการแรก คือ pollutant buildup หมายถึงขั้นตอนของการสะสมแบบแห้งของมลสารบนพื้นผิวที่รับน้ำฝนในช่วงที่ไม่มีฝนตกส่วนขั้นตอน wash off จะหมายถึงขั้นตอนที่มลสารต่าง ๆ ถูกทำให้หลุดออกไปกับน้ำ (runoff) เมื่อฝนตก

Harry et al. (1985) ได้ทำการทดลองการสะสมแบบแห้งของมลพิษบนพื้นผิว (buildup) โดยทั่วไปจะมีความสัมพันธ์กับเวลาในลักษณะที่เป็นเส้นตรง (linear) หรือเส้นโค้ง (exponential, power หรือ Michaelis Menton) ดังแสดงไว้ในรูป 2.4



รูป 2.4 รูปแบบสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการสะสมฝุ่นและเศษสิ่งสกปรกบนพื้นถนนกับเวลา (Ammon,1979)

Ammon (1979) ได้รวบรวมรายงานของนักวิจัยหลายคนและได้รายงานว่า ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการสะสมบนพื้นถนนกับระยะเวลาในการสะสมแสดงได้ด้วยหนึ่งในสี่ของรูปแบบสมการ Liner, สมการ Power function, สมการ exponential, สมการ Michaelis - Menton ดังต่อไปนี้

สมการ Liner :

$$P = a.t \quad (1)$$

เมื่อ P คือ มวลของสารมลพิษบนพื้นผิว (mass of pollutant on surface)

t คือ ระยะเวลาใด ๆ นับตั้งแต่เริ่มการสะสมของสารมลพิษจะสิ้นสุดเมื่อมีการทำความสะอาดหรือการชะล้างของฝน(time since last cleaning or storm runoff)

a คือ ค่าสัมประสิทธิ์ (coefficient)

สมการ Power :

$$P = a.t^b \quad (2)$$

เมื่อ b คือ เลขชี้กำลัง (exponent)

สมการ Exponential:

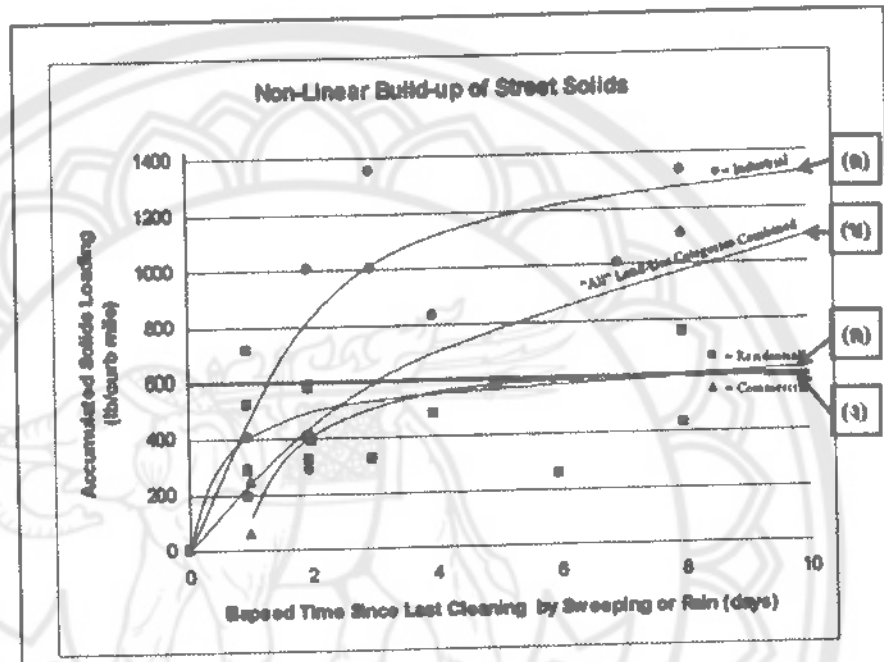
$$P = P_L(1 - e^{-bt}) \quad (3)$$

เมื่อ P_L คือ ขีดจำกัดปริมาณการสะสมที่พื้นผิว (limiting<asymptotic>surface load)

สมการ Michaelis - Menton :

$$P = P_L.t / (a + t) \quad (4)$$

Harry et al. (1985) พบว่าข้อมูลจากการศึกษาและทดลองบนสถานที่จริงจำนวนมากพบว่า การสะสมเป็นสมการแบบเส้นตรง อาจจะมีหน่วยเป็น เมตร/วัน, เมตร/วัน/พื้นที่, เมตร/วัน/ความยาวข้างถนน อย่างไรก็ตามในบางกรณีก็มีหลักฐานอ้างอิงพอที่จะบอกได้ว่า การสะสมไม่ได้เป็นสมการแบบเส้นตรงเสมอไป ดังเช่น ข้อมูลของ Sartor and Boyd (1972) ที่ได้จากการปฏิบัติการทดสอบและติดตามดูการสะสมของมลสารบนพื้นผิวถนน Sartor and Boyd พบว่าปริมาณการสะสมแบบแห้งของมลสารมีความสัมพันธ์กับเวลาในลักษณะที่ไม่เป็นสมการเส้นตรง ดังรูป 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการสะสมอนุภาคฝุ่นของแข็งบนผิวถนนในเมือง

จากรูป (ก) คือ (●) ย่านอุตสาหกรรม (Industrial)

(ข) คือ บริเวณพื้นที่ที่นอกเหนือจากพื้นที่ (ก),(ค),และ(ง)

("All" Land - Use Categories Combined)

(ค) คือ (■) พื้นที่เขตชุมชน (Residential)

(ง) คือ (▲) พื้นที่ที่มีการติดต่อค้าขาย (Commercial)

Novotny and Olem (1994) กล่าวว่าอย่างไรก็ตามเนื่องจากสมการการสะสมแบบแห้ง 4 แบบ ที่กล่าวข้างต้นไม่ได้แสดงถึงกลไกการรับมลสารจากแหล่งกำเนิดและกลไกการสูญหายของมลสาร อีกทั้งสามารถใช้คาดคะเนการสะสมได้เฉพาะในสถานที่ที่ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ a และ b ไว้

แล้วเท่านั้นภายหลังจึงได้มีการนำเสนอสมการการสะสมแบบหนึ่งที่แจกแจงกลไกการรับมลสารจากแหล่งกำเนิดและกลไกการสูญหายของมลสารดังได้แสดงไว้ในสมการข้างล่างนี้

$$\left(\frac{dP}{dt}\right) = I - \zeta P \quad (5)$$

$$P(t) = \left(\frac{I}{\zeta}\right)(1 - e^{-\zeta t}) + P(0) e^{-\zeta t} \quad (6)$$

โดย ζ แทนสัมประสิทธิ์การสูญหาย

P คือ มวลมลพิษในรูปของแข็งสะสมบนขอบถนน

(The amount of solid pollutants in curb storage)

I คือ มวลทั้งหมดของมลพิษในรูปของแข็งที่เข้าระบบ (the sum of all inputs)

t คือ เวลา (time)

e คือ จำนวนธรรมชาติ (2.7828)

$P(0)$ คือ มวลพิษในรูปของแข็งสะสมที่มีในตอนแรก (initial load of pollutions)

$P(t)$ คือ มวลพิษในรูปของแข็งที่สะสมที่เวลาต่าง ๆ (the load of pollutions after time)

ζ คือ สัมประสิทธิ์การสูญหาย (a removal coefficient)

ทั้งนี้ Novitny and Olem (1994) ยังค้นพบว่าสัมประสิทธิ์การสูญหาย ζ แสดงได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\zeta = 0.0116e^{-0.08H} (TS+WS)$$

เมื่อ

H คือ ความสูงขอบถนน, ซม.

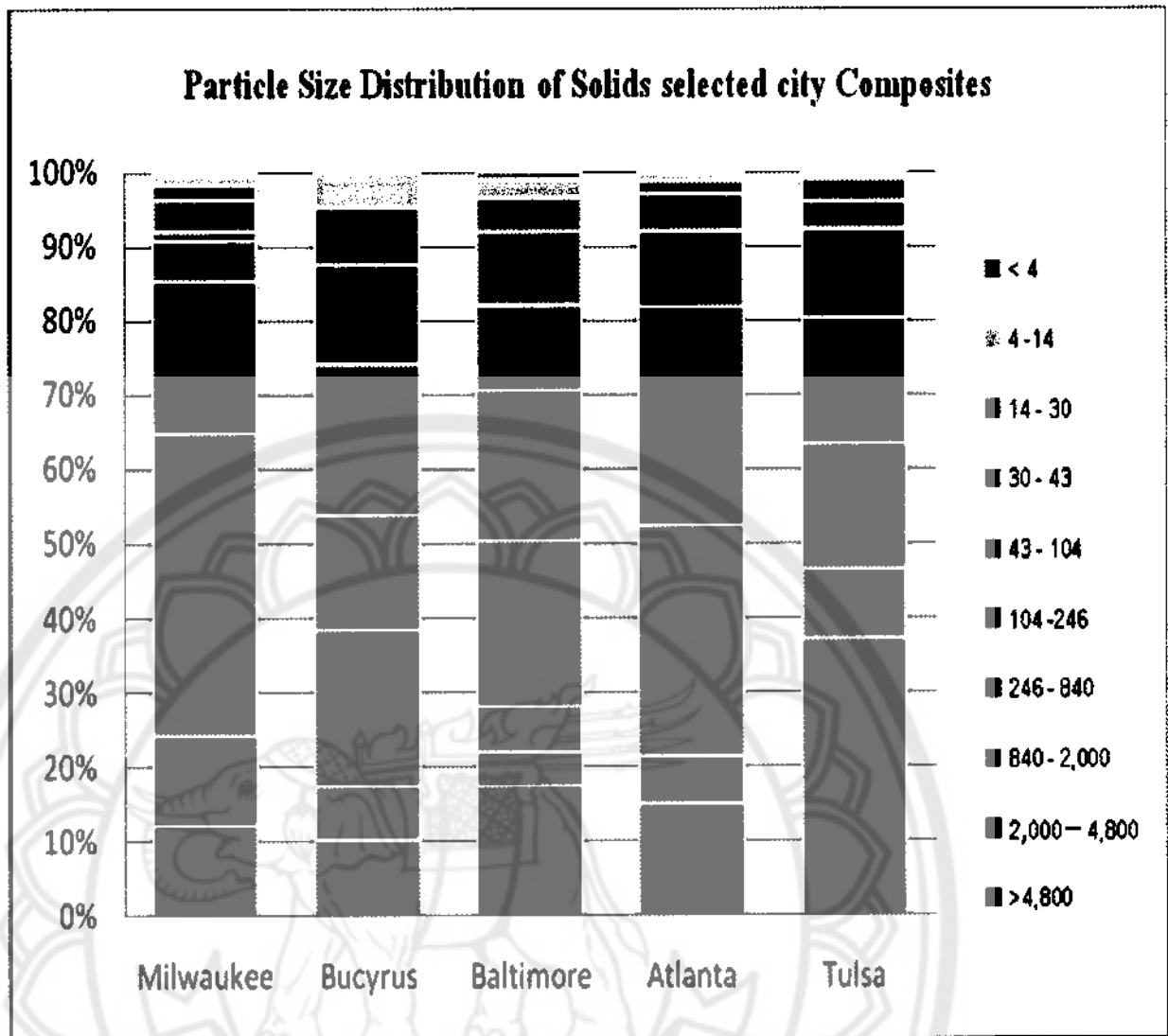
TS คือ ความเร็วการจราจร, กม./ชม.

WS คือ ความเร็วลม, กม./ชม.

จากการศึกษาของ Sartor and Boyd (1972) พบว่าบนถนนมีฝุ่นขนาดต่าง ๆ สะสมอยู่ดังแสดงในตาราง 2.5 และรูป 2.6 จะเห็นได้ว่าทรายสะสมอยู่บนพื้นถนนในปริมาณมากกว่าฝุ่นขนาดอื่นและฝุ่นที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 10 μm จะสะสมบนพื้นถนนในปริมาณน้อยมากกล่าวคือไม่ถึง 5% ของปริมาณฝุ่นทั้งหมดที่ตรวจวัด

ตารางที่ 2.5 ขนาดของการสะสมอนุภาคผลสารที่เมือง Milwaukee Bucyrus Baltimore Atlanta
และ Tulsa (Sartor and Boyd, 1972)

Size Ranges (μm)	Milwaukee	Bucyrus	Baltimore	Atlanta	Tulsa
>4,800	12.0%	- %	17.4%	- %	- %
2,000 - 4,800	12.1%	10.1%	4.6%	14.8%	37.1%
840 - 2,000	40.8%	7.3%	6.0%	6.6%	9.4%
246 - 840	20.4%	20.9%	22.3%	30.9%	16.7%
104 - 246	5.5%	15.5%	20.3%	29.5%	17.1%
43 - 104	1.3%	20.3%	11.5%	10.1%	12.0%
30 - 43	4.2%	13.3%	10.1%	5.1%	3.7%
14 - 30	2.0%	7.9%	4.4%	1.8%	3.0%
4 - 14	1.2%	4.7%	2.6%	0.9%	0.9%
< 4	0.5%	-	0.9%	0.3%	0.1%
Sand%, 43 - 4,800 μm	92.1	74.1	82.1	91.9	92.3
Silt%, 4 - 43 μm	7.4	0.5	17.1	7.8	7.6
Clay%, < 4 μm	0.5	-	0.9	0.3	0.1
Gram Sand/ Curb meter	694.4	285.6	236.6	110.32	84
Gram Silt/ Curb meter	56	99.68	49.28	9.38	8.4
Gram Clay/ Curb meter	3.78	-	2.60	0.364	0.84

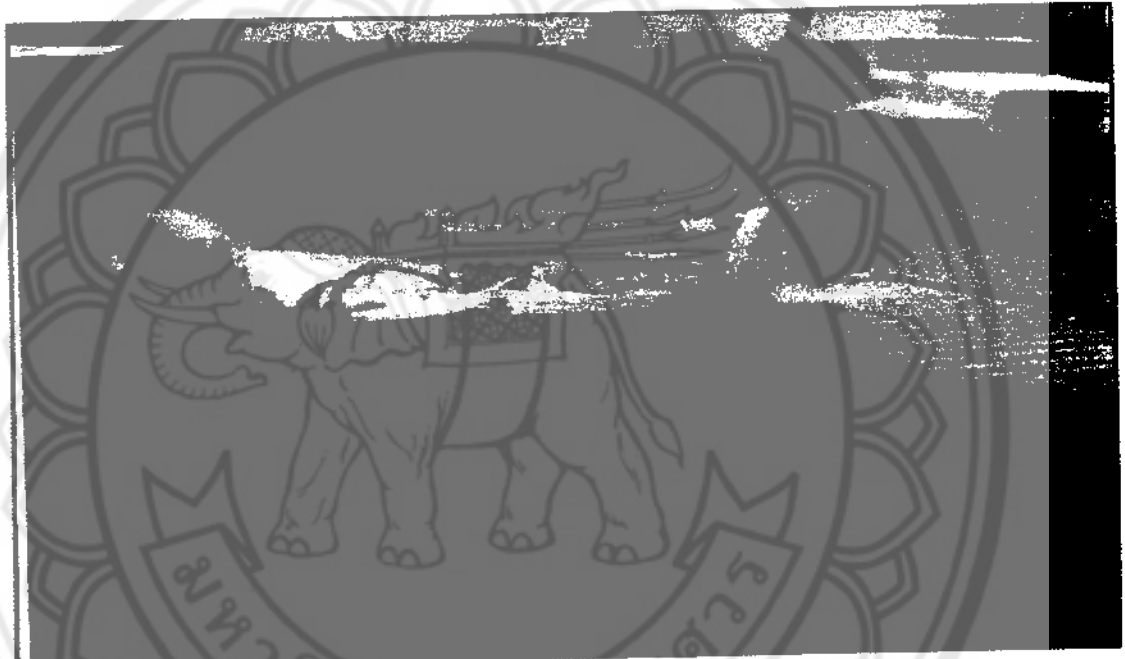


รูป 2.6 การสะสมอนุภาคฝุ่นที่เมือง เมือง Milwaukee Bucyrus
Baltimore Atlanta และ Tulsa (ดัดแปลงจาก : Sartor and Boyd, 1972)

วิธีการเก็บตัวอย่างฝุ่นถนน

ในการศึกษาด้านฝุ่นที่สะสมบนพื้นผิวชนิดต่างๆ โดยเฉพาะฝุ่นบนถนนมีวิธีที่นิยมอยู่ 6 วิธี โดยวิธีที่ 1 ถึงวิธีที่ 3 เป็นการเก็บตัวอย่างฝุ่นแบบแห้ง และวิธีที่ 4 ถึงวิธีที่ 6 เป็นการเก็บตัวอย่างฝุ่นแบบเปียก ซึ่งพื้นที่ทำการศึกษเก็บตัวอย่างฝุ่นจะต้องไม่ผ่านการทำความสะอาดใดๆมาก่อน เช่น เกิดเหตุการณ์ฝนตก การดูดฝุ่น การล้าง การทำความสะอาดพื้นผิว ดังรายละเอียดต่อไปนี้ (Sartor และ Boy's, 1972 และ San Francisco Estuary Institute, 2005)

1. Vacuum Sweeping an Upswept Street Area เป็นการเก็บตัวอย่างฝุ่นโดยใช้รถกวาดขยะ และมีเครื่องดูดฝุ่นแบบสูญญากาศ ดูดฝุ่นเก็บไว้ในภาชนะ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเก็บตัวอย่างฝุ่น โดยใช้รถกวาดขยะและมีเครื่องดูดฝุ่นแบบสูญญากาศ

(Thomas J. Martinelli, 2002)

2. Hand sweeping an Unstreet Area เป็นการใช้เครื่องดูดฝุ่นเก็บตัวอย่างฝุ่นในพื้นที่ที่กำหนดไว้และให้ปริมาณฝุ่นที่ตรวจวัดได้เป็น free load หลังจากนั้นใช้แปรงปิดกวาด เอาฝุ่นที่ตึงที่เหลืออยู่บนพื้นผิวเก็บใส่ภาชนะและให้ปริมาณฝุ่นที่ตรวจวัดได้เป็น fixed load ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเก็บตัวอย่างฝุ่น โดยเครื่องดูดฝุ่นและใช้แปรงปัดกวาด
(J. Vaze and Francis H.S. Chiew, 2002)

3. Surrogate Surface เป็นการเก็บตัวอย่างฝุ่นที่สะสมบนพื้นผิวชนิดต่างๆ โดยใช้พื้นผิวที่จำลองที่ประดิษฐ์ขึ้นมาตามชนิด วัสดุ และขนาดของพื้นที่ผิวที่ต้องการศึกษา และติดตั้งตามตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้ในการศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเก็บตัวอย่างฝุ่น โดยใช้พื้นผิวจำลอง

4.Sprinkling an Upswept Street Area with Simulated Rainfall เป็นวิธีการโปรยน้ำลงบนพื้นผิวเลียนแบบการเกิดฝนตกให้น้ำชะล้างพื้นผิวถนนไหลลงแหล่งรองรับน้ำ แล้วเก็บน้ำตัวอย่างจากกระบายน้ำข้างถนนหรือบ่อตรวจระบายของท่อระบายน้ำฝน ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การเก็บตัวอย่างฝุ่นแบบเปียกโดยอุปกรณ์โปรยน้ำลงบนพื้นผิวถนน

5.Sprinkling a Previously Vacuum Swept Stree Area by Simulated Rainfall เป็นวิธีที่คล้ายกับวิธีที่ 4 แต่หลังจากโปรยน้ำแล้วจะใช้เครื่องดูดน้ำชะล้างพื้นผิวเก็บไว้ในถังที่เตรียมไว้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การเก็บตัวอย่างฝุ่นแบบเปียกโดยอุปกรณ์โปรยน้ำลงบนพื้นผิวถนน (Pitt,1987)

6. Flushing a Previously Hand Swept Street Area Using a of water เป็นการฉีดพ่นน้ำแรงดันสูงลงบนพื้นผิวเพื่อกำจัดอนุภาคฝุ่นที่ยึดติดแน่นซ่อนอยู่ในพื้นผิว แล้วจึงใช้แปรงกวาดเก็บเอาตัวอย่างฝุ่นใส่ภาชนะ หรืออาจติดตั้งถุงทรายไว้ที่ทางน้ำเข้าบริเวณฝาบ่อตรวจระบายน้ำข้างถนน

รูป 2.12

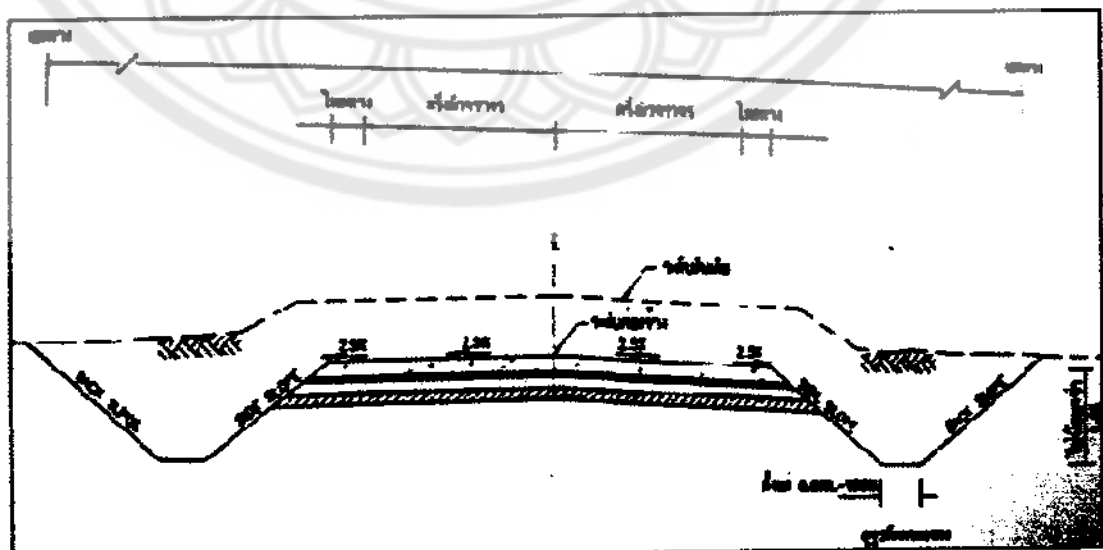


รูปที่ 2.12 การเก็บตัวอย่างฝุ่นแบบเปียก โดยใช้เครื่องฉีดน้ำแรงดันสูง (Goff K, 1999)

ประเภทของผิวทาง

การจำแนกประเภทของพื้นผิวทาง ได้แบ่งตามลักษณะวัสดุที่นำมาก่อสร้างชั้นผิวทาง ออกเป็น 2 ประเภท คือ 1. พื้นผิวทางแบบลาดยาง พื้นผิวลาดยางประกอบด้วยชั้นวัสดุต่างๆ วางซ้อนกันโดยชั้นบนสุดเป็นผิวทางบางๆ ซึ่งเป็นชั้นของมวลรวมผสมยาง ชั้นรองลงมาเป็นชั้นพื้นทาง รองพื้นทาง และชั้นดินถมหรือดินเดิม ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.13

2. พื้นผิวทางแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก ประกอบด้วยชั้นผิวทางเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสม หิน ทราย และน้ำ มีเหล็กเสริมภายในชั้นผิวทางคอนกรีต อาจจะมียันผิวทางแทรกอยู่ระหว่างชั้นผิวทางกับผิวดินฐานรากหรือไม่ก็ได้



รูปที่ 2.13 รูปตัดแสดงโครงสร้างถนนลาดยาง (สำนักวิศวกรรมทางหลวงชนบท, 2543)

ออกซิเจนละลาย (DISSOLVED OXYGEN, DO)

ออกซิเจนเป็นก๊าซที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตต่างๆ ทั้งที่อาศัยอยู่บนพื้นดินและในน้ำ สิ่งมีชีวิตในน้ำได้รับออกซิเจนจากการสังเคราะห์แสงของพืชที่ปล่อยออกซิเจนอิสระออกมาละลายอยู่ในน้ำและจากการแพร่ของออกซิเจนจากบรรยากาศลงสู่พื้นน้ำ ออกซิเจนเป็นก๊าซที่ละลายน้ำได้น้อยมากและไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำ การละลายของออกซิเจนขึ้นอยู่กับความดัน อุณหภูมิและปริมาณของแข็งละลายปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำธรรมชาติและน้ำเสียขึ้นอยู่กับลักษณะทางเคมี กายภาพ และกระบวนการชีวเคมีในสิ่งมีชีวิต ถ้าออกซิเจนละลายมีความสำคัญใช้บอกให้ทราบได้ว่าน้ำนั้นมีความเหมาะสมเพียงใดต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำและใช้ในการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสีย และมลภาวะทางน้ำ

บีโอดี (BOD)

การวิเคราะห์หาค่าบีโอดี (BOD) เป็นการวัดความสกปรกของน้ำเสียในเทอมของออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดที่ย่อยสลายได้ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน การหาบีโอดีเป็นกระบวนการทดสอบทางชีววิทยาเพื่อหาปริมาณค่าออกซิเจนซึ่งแบคทีเรียใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียภายใต้สภาวะที่เหมือนกับที่เกิดในธรรมชาติที่สุด เพื่อที่จะให้การวิเคราะห์เป็นปริมาณวิเคราะห์ จึงต้องทำให้แฟลคเตอร์ต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่ออัตราการย่อยสลายคงที่

ซีโอดี (COD)

การวิเคราะห์หาซีโอดีเป็นวิธีวิเคราะห์หาความสกปรกของน้ำเสียต่างๆ โดยเป็นการวัดปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ของน้ำเสียเพื่อให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำเป็นผลปฏิกิริยาสุดท้าย นอกจากนี้พวกกรดอะมิโนจะถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน เงื่อนไขสำคัญในการวิเคราะห์ซีโอดีคือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันต้องเกิดขึ้นโดยอาศัยออกซิไดส์ซิงเอเจนต์ (Oxidizing Agent) อย่างแรง ภายใต้สภาวะที่เป็นกรดเข้มข้นและมีอุณหภูมิสูง หลักการของซีโอดีจะคล้ายกับบีโอดี คือ สารอินทรีย์ในน้ำจะถูกออกซิไดส์จนได้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ เพียงแต่บีโอดีต้องใช้แบคทีเรียในการย่อยสลาย ส่วนซีโอดีใช้ออกซิไดวิงเอเจนต์ ซีโอดีและบีโอดีต่างเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำ แต่ซีโอดีไม่สามารถจะบอกได้ถึงความยากง่ายในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ เนื่องจากสารอินทรีย์จะถูกออกซิไดส์ได้หมดหรือเกือบหมดไม่ว่าจะสามารถออกซิไดส์ได้ทางชีวภาพหรือไม่ แม้กระนั้นซีโอดีก็มีข้อดีที่ใช้เวลาในการหาเพียง 3 ชม. ในขณะที่การหาบีโอดีใช้เวลาถึง 5 วัน มีตัวแปรผันน้อยกว่าค่าที่ได้มีความแน่นอนน่าเชื่อถือกว่าและสารมีพิษไม่ขัดขวางการหาซีโอดีมักมีค่าสูงกว่า บีโอดีมักมีค่าสูงกว่าบีโอดี อัตราส่วนของค่าซีโอดีและค่าบีโอดีสำหรับน้ำเสียชนิดต่างๆ มีค่าไม่เท่ากันเพราะสารประกอบของน้ำเสียไม่เหมือนกัน อัตราส่วนระหว่างบีโอดีและซีโอดี (BOD:

COD) อาจเป็นไปได้ตั้งแต่ 0.1 – 0.8 แต่ไม่เกิน 1 บีโอดีอาจมีค่าสูงกว่าซีโอดีได้แต่มีโอกาสน้อยมาก

ของแข็ง (SOLIDS)

ของแข็ง หมายถึงสารหรือสิ่งเจือปนที่เหลืออยู่หลังจากผ่านการนำน้ำออกแล้ว ไม่รวมถึงสารที่ระเหยไปกับน้ำ สิ่งที่เหลืออยู่หรือตะกอนมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งอาจจะละลายน้ำหรือไม่ละลายก็ได้สามารถแบ่งของแข็งออกเป็นชนิดต่างๆ ดังนี้

1. ของแข็งทั้งหมด (Total Solids) คือของแข็งทั้งหมดที่เหลืออยู่หลังจากระเหยน้ำออกหมดแล้ว
2. ของแข็งละลายน้ำ (Dissolved Solids) คือของแข็งส่วนที่ละลายในน้ำได้ ได้แก่ เกลือ อนินทรีย์ต่างๆ หรืออินทรีย์สาร
3. ของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ (Un dissolved Solids หรือ Total Suspended Solids) แบ่งเป็น 2 ชนิด
 - Un dissolved Solids คือของแข็งที่ไม่ละลายน้ำและสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ ตะกอนมีขนาดเล็กน้ำหนักเบา
 - Settle able Solids คือของแข็งที่ไม่ละลายน้ำตะกอนที่ขนาดใหญ่และมีความถ่วงจะเพาะสูงกว่าน้ำเมื่อตั้งทิ้งไว้สามารถจะตกลงมาอนที่ก้นภาชนะได้
4. ของแข็งระเหย (Volatile Solids) คือ ของแข็งซึ่งระเหยได้เมื่อนำไปเผาในอากาศที่อุณหภูมิ 550-600°ซ ของแข็งนี้ ได้แก่ สารอินทรีย์ซึ่งเมื่อถูกเผาจะเปลี่ยนไปเป็น CO₂ และ H₂O ของแข็งระเหยมี 2 รูป คือ
 - Total Volatile Solids คือ ของแข็งระเหยทั้งหมดซึ่งจะถูกเผาที่อุณหภูมิสูงเปลี่ยนไปเป็น CO₂ และ H₂O ได้ทั้งหมด
 - Volatile Suspended Solids คือ ของแข็งระเหยแขวนลอยซึ่งจะเปลี่ยนไปเป็น CO₂ และ H₂O ได้เมื่อถูกนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง
5. ของแข็งคงตัว (Fixed Solids) คือ ของแข็งหรือขี้เถ้าซึ่งเหลือจากการเผาของแข็งที่อุณหภูมิสูง 550-600°ซ ของแข็งนี้ ได้แก่ สารอนินทรีย์ เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมินี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในบทนี้จะกล่าวถึงของแข็งเพียง 4 ชนิด ที่ใช้วิเคราะห์กันบ่อยๆ คือ ของแข็งทั้งหมด ของแข็งละลายน้ำ ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและของแข็งคงตัว วิเคราะห์จะเป็นแบบ Gravimetric ค่าที่ได้บอกในรูปน้ำหนักของสารต่อปริมาตรของน้ำตัวอย่าง

ของแข็งแขวนลอย

ของแข็งแขวนลอย คือสารแขวนลอยที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เช่น อนุภาคของดิน เกลือของโลหะ สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ หาได้จากการนำน้ำมากรองด้วยกระดาษกรอง GF/C