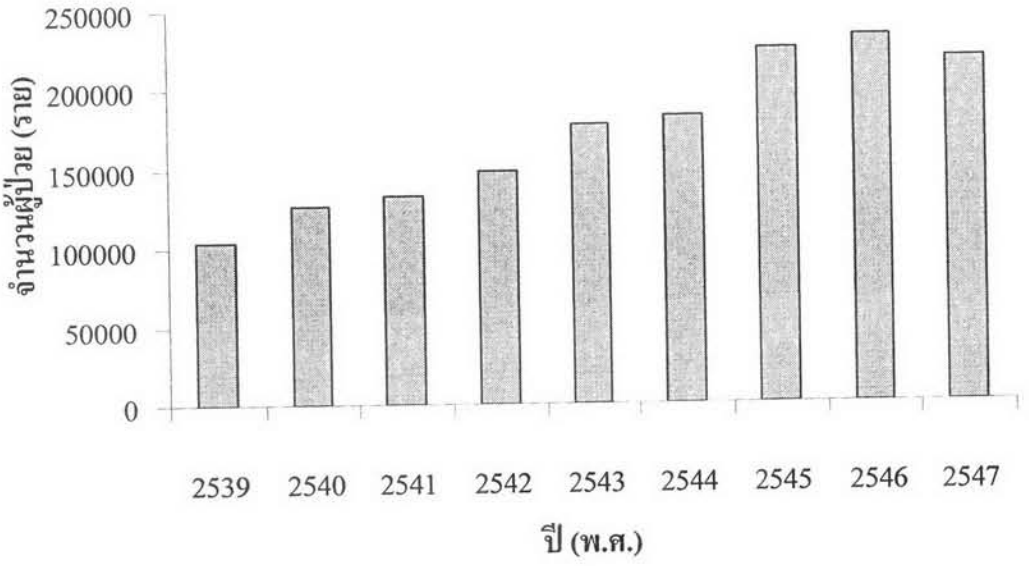
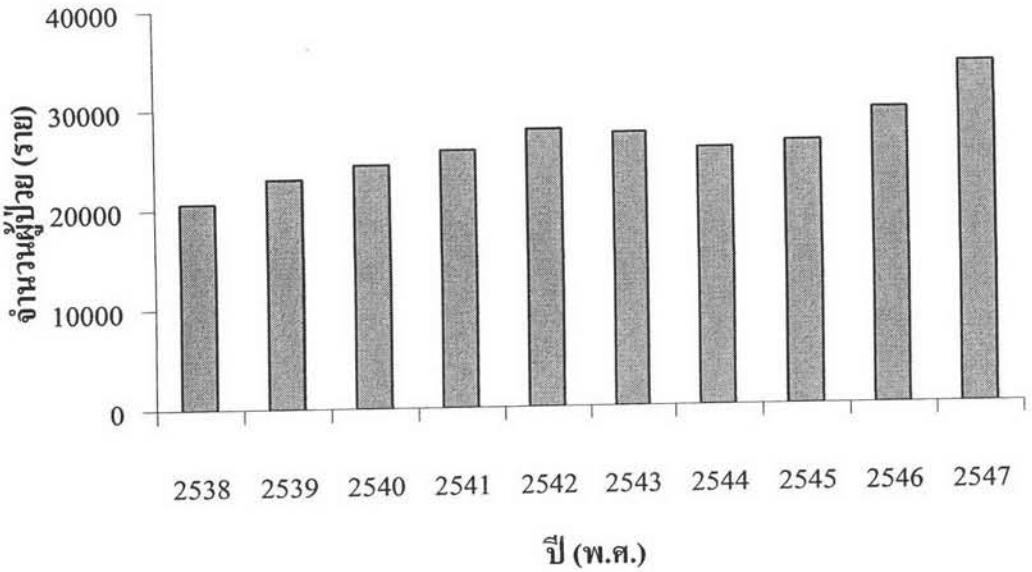
บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัญหาเกี่ยวกับการรับสัมผัสมลสารในอากาศมีความสำคัญมากขึ้น ตามรูปแบบการดำเนินชีวิตในปัจจุบัน การขยายตัว การพัฒนาความเป็นเมือง และการเพิ่มจำนวนประชากรในเขตเมือง ทำให้เมืองใหญ่ในประเทศประสบปัญหาคุณภาพอากาศที่ทวีความรุนแรงมากขึ้น แม้หน่วยงานรัฐที่เกี่ยวข้องพยายามออกมาตรการเพื่อบรรเทาปัญหาดังกล่าว แต่ก็ไม่ได้ผลเท่าที่ควร ดังสถิติผู้ป่วยนอกที่เป็นโรคระบบทางเดินหายใจของโรงพยาบาลในสังกัดสำนักการแพทย์ ในเขตกรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นสาเหตุที่มีจำนวนผู้ป่วยมากที่สุด และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 2.1) (กรุงเทพมหานคร, 2539-2547) และจากรายงานของสำนักระบาดวิทยา กรมควบคุมโรค ใน พ.ศ. 2547 พบผู้ป่วยวัณโรค 34,284 ราย เสียชีวิต 212 ราย และมีแนวโน้มจำนวนผู้ป่วยเพิ่มขึ้นเช่นกัน (รูปที่ 2.2) (กรมควบคุมโรค, สำนักระบาดวิทยา, 2547)



รูปที่ 2.1 จำนวนผู้ป่วยนอกโรคระบบทางเดินหายใจของโรงพยาบาลในสังกัดสำนักการแพทย์ในเขตกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2539-2547 (ดัดแปลงจาก กรุงเทพมหานคร, 2539-2547)



รูปที่ 2.2 จำนวนผู้ป่วยโรควัณโรคปอด พ.ศ. 2538-2547 (ดัดแปลงจาก กรมควบคุมโรค, สำนักระบาดวิทยา, 2547)

2.1 คุณภาพอากาศในอาคาร

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้สภาพแวดล้อมภายในอาคารแตกต่างจากการรับสัมผัสมลสารจากอากาศภายนอก คือ ระยะเวลาในการรับสัมผัส กลุ่มประชากร ความเข้มข้น และชนิดของมลสาร เป็นที่ยอมรับมานานแล้ว และมีหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ยืนยันว่าอากาศภายในอาคารสามารถเกิดภาวะสะสมมลสารได้มากกว่าอากาศภายนอกอาคาร นอกจากนี้คนเราใช้เวลาร้อยละ 89 ในอาคาร ร้อยละ 6 ในยานพาหนะ และอีกร้อยละ 5 นอกอาคาร จึงมีความเสี่ยงต่อการรับสัมผัสมลสารในอาคารมากกว่าจากบรรยากาศภายนอก จากการศึกษาภาคสนามพบว่าอากาศภายในบ้านพักอาศัย อาคารสำนักงาน และอาคารเรียน ปนเปื้อนก๊าซและอนุภาคหลายชนิด ที่อาจมีความเข้มข้นมากพอที่จะก่อให้เกิดอาการเจ็บป่วยทั้งชนิดเฉียบพลันและเรื้อรังต่อผู้ที่รับสัมผัสซึ่งมีเป็นจำนวนมาก ระยะเวลาในการรับสัมผัสจะแตกต่างกัน ตั้งแต่ประมาณ 8 ชั่วโมงต่อวัน ภายในสถานที่ทำงาน อาคารพาณิชย์ และสถาบันการศึกษา ถึงประมาณ 6 - 24 ชั่วโมงต่อวันภายในที่พักอาศัย นอกจากระยะเวลาการรับสัมผัสภายในอาคารจะยาวนานแล้ว กลุ่มประชากรที่รับสัมผัสมลสารยังมีความหลากหลายตั้งแต่เด็กทารกจนถึงผู้สูงอายุ ผู้มีสุขภาพแข็งแรงจนกระทั่งผู้ป่วยที่อ่อนแอ (Jacobson, 2002; Godish, 2004)

2.1.1 แหล่งกำเนิดมลสารในอาคาร

ภายในอาคารมีแหล่งกำเนิดมลสารหลายชนิดที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 2.1) มลสารอาจเกิดจากกิจกรรมการเผาไหม้จากการประกอบอาหาร เครื่องทำความร้อน และการสูบบุหรี่ มลสารบางชนิดเกิดจากวัสดุและอุปกรณ์ตกแต่งอาคาร เช่น ฉนวนกันความร้อนชนิดที่มีแอสเบสตอสเป็นส่วนประกอบ พรมที่เปียกชื้น เฟอร์นิเจอร์ไม้ มลสารจากผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ใช้ภายในอาคาร เช่น ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด หรือสเปรย์ปรับอากาศ มลสารจากระบบปรับอุณหภูมิและความชื้น และมลสารจากภายนอกอาคาร ความสำคัญของแหล่งกำเนิดมลสารขึ้นกับ ความเข้มข้นและชนิดของมลสารที่ถูกปลดปล่อยออกมา นอกจากนี้อายุการใช้งาน และการบำรุงรักษายังเป็นปัจจัยสำคัญต่อการปลดปล่อยมลสารอีกด้วย

ลักษณะการปลดปล่อยมลสารของแหล่งกำเนิดอาจแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ แหล่งกำเนิดที่ปลดปล่อยมลสารอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา เช่น วัสดุก่อสร้าง และอุปกรณ์ตกแต่งอาคาร และแหล่งกำเนิดที่ปลดปล่อยมลสารเป็นครั้งคราว โดยขึ้นอยู่กับกิจกรรมที่เกิดขึ้นภายในอาคาร เช่น การสูบบุหรี่ การประกอบอาหาร การตกแต่งอาคารใหม่ และการใช้สเปรย์ปรับอากาศ หรือยาฆ่าแมลง (U.S. EPA., 1995)

ตารางที่ 2.1 ชนิดและแหล่งกำเนิดของมลสารภายในอาคาร

ชนิดมลสาร	แหล่งกำเนิด	ผลกระทบต่อสุขภาพ
แอสเบสตอส	ฉนวนกันความร้อน, แผ่นไวนิล และผลิตภัณฑ์ซีเมนต์	ระคายเคืองผิวหนัง, มะเร็งปอด
ละอองไอชีวภาพ (bioaerosol)	ผู้ป่วยติดเชื้อ, จุลชีพในระบบปรับอากาศ, บริเวณที่เปียกชื้น	โรคติดเชื้อ, โรคภูมิแพ้ และโรคหอบหืด
คาร์บอนไดออกไซด์	ยานพาหนะ, เตาประกอบอาหาร, เตาผิง, ควันบุหรี่ และมนุษย์	วิงเวียน, ปวดศีรษะ, คลื่นไส้
คาร์บอนมอนอกไซด์	ยานพาหนะ, เตาประกอบอาหาร, เตาผิง, เครื่องทำความร้อน, ควันบุหรี่	วิงเวียน, คลื่นไส้, ปวดศีรษะ, เสียชีวิต
ฟอร์มาลดีไฮด์	โฟมกันไฟ, ไม้อัด, ฝ้าเพดาน, วงกบประตู และโครงสร้างอื่น ๆ	ระคายเคืองผิวหนัง, สารก่อมะเร็ง
ฝุ่นละอองขนาดเล็ก	ควันบุหรี่, เตาผิง, ฝุ่นจากภายนอก, การเผาไหม้อื่น ๆ เช่นการเผาขยะ	ระคายเคืองระบบทางเดินหายใจ, สารก่อมะเร็ง
ฝุ่นอนินทรีย์		
ไนเตรต (NO_3^-)	จากอากาศภายนอก	
ซัลเฟต (SO_4^{2-})	จากอากาศภายนอก	
ฝุ่นโลหะ		เป็นพิษ, สารก่อมะเร็ง
สารหนู (As)	ควันบุหรี่, ยาฆ่าแมลง, ยาเบื่อหนู	
แคดเมียม (Cd)	ควันบุหรี่, ยาฆ่ารา	
ปรอท (Hg)	การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล	
ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2)	เครื่องทำความร้อน, เตาประกอบอาหาร, ยานพาหนะ	ระคายเคืองระบบทางเดินหายใจ
โอโซน (O_3)	เครื่องถ่ายเอกสาร, ชุดอุปกรณ์คอมพิวเตอร์, อากาศภายนอก	ระคายเคืองระบบทางเดินหายใจ

ตารางที่ 2.1 ชนิดและแหล่งกำเนิดของมลสารภายในอาคาร (ต่อ)

ชนิดมลสาร	แหล่งกำเนิด	ผลกระทบต่อสุขภาพ
ยาฆ่าแมลง	การใช้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร	สารก่อมะเร็ง
ก๊าซเรดอน (Rn)	ระเหยจากดินและซึมเข้าอาคาร	มะเร็งปอด
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)	การเผาไหม้ถ่านหินและน้ำมันในเครื่องทำความร้อน, จากภายนอก	ระคายเคืองระบบทางเดินหายใจ
สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs)	ควันบุหรี่, การประกอบอาหาร, สีทาผนัง, น้ำยาทำความสะอาด, พรม, เฟอร์นิเจอร์ ฯ	สารก่อมะเร็ง

ที่มา: Botkin และ Keller, 2003

2.1.2 ผลกระทบต่อสุขภาพของผู้อาศัยในอาคาร

อาการเจ็บป่วยเนื่องจากการรับสัมผัสมลสารในอาคารอาจแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ผลกระทบเฉียบพลันหลังจากการรับสัมผัสทันที หรืออาจมีผลในระยะเวลานานต่อมา ผลกระทบเฉียบพลันอาจเกิดขึ้นเมื่อรับสัมผัสมลสารนั้นทันที หรือเกิดอาการเจ็บป่วยเฉียบพลันเมื่อรับสัมผัสมลสารชนิดเดิมซ้ำ อาการที่เกิดคือ การระคายเคืองตา จมูก และลำคอ ปวดศีรษะ วิงเวียน และอ่อนเพลีย ความเป็นพิษเฉียบพลันสามารถแก้ไขได้โดยป้องกันไม่ให้เกิดการรับสัมผัสอีก แต่อย่างไรก็ตามอาการที่เกิดมีลักษณะคล้ายกับอาการของโรคหวัด จึงยากที่จะระบุว่าอาการดังกล่าวเกิดจากการรับสัมผัสมลสารภายในอาคาร ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องสังเกตช่วงเวลา และสถานที่ที่เกิดอาการ ถ้าอาการหายไปหรือลดลงเมื่อออกจากอาคาร และกลับมาแสดงอาการเมื่ออยู่ภายในอาคาร อาจบ่งชี้ได้ว่าเกิดจากมลสารภายในอาคาร ผลกระทบต่อสุขภาพอาจรุนแรงขึ้นในกรณีที่มีอัตราการระบายอากาศไม่เพียงพอ

ผลกระทบต่อสุขภาพของมลสารอาจปรากฏภายหลังการรับสัมผัสมลสารดังกล่าวเป็นเวลาหลายปี หรือการรับสัมผัสเป็นระยะเวลานาน เช่น โรคระบบทางเดินหายใจบางชนิด โรคหัวใจ และโรคมะเร็ง ซึ่งก่อให้เกิดความเจ็บป่วยร้ายแรง และอาจถึงขั้นเสียชีวิต ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องดูแลคุณภาพอากาศภายในอาคารทั้งบ้านพักอาศัย และสถานที่ทำงานแม้จะไม่มีอาการเจ็บป่วยที่สามารถสังเกตเห็นได้ (U.S. EPA., 1995)

ปัญหาคุณภาพอากาศในอาคารทำให้เกิดอาการผิดปกติของผู้ทำงานหรืออาศัยในอาคาร จึงเกิดคำว่า Sick Building Syndrome (SBS) หรือ กลุ่มอาการอาคารป่วย (สมชัย บวรกิตติ, 2542) หรือโรคแพ้ตึก (อารยา หงษ์เพชร, 2543) เป็นคำที่ใช้เรียกสถานการณ์ที่ผู้ที่อาศัยอยู่ในอาคารเกิดอาการผิดปกติทางสุขภาพอย่างเฉียบพลัน โดยมีความสัมพันธ์กับช่วงเวลาที่อยู่ในอาคาร แต่ไม่สามารถระบุสาเหตุที่แน่นอนได้ กลุ่มอาการอาคารป่วยอาจเกิดขึ้นกับเฉพาะส่วนใดส่วนหนึ่งหรือเฉพาะห้องใดห้องหนึ่งของอาคาร หรือเกิดกับพื้นที่อาคารทั้งหมดก็ได้ (U.S. EPA, 2003)

อาการ Sick Building Syndrome เกิดขึ้นตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1967 (พ.ศ. 2510) เป็นต้นมา มีรายงานอาการป่วยที่เกิดขึ้นโดยไม่ทราบสาเหตุ กับบุคลากรที่ปฏิบัติงานในอาคารสำนักงาน ลักษณะอาการที่พบ คือ คัดจมูก น้ำมูกไหล เคืองตา ไอ แน่นหน้าอก อ่อนล้า ปวดศีรษะ และซึมเซา ซึ่งต่อมา ในปี ค.ศ. 1984 (พ.ศ. 2526) สตอลวิชค์, อดิเมนโต และคณะ ได้เสนอชื่อเรียกอาการดังกล่าวว่า Sick Building Syndrome (สมชัย บวรกิตติ, 2542)

ข้อบ่งชี้ว่าเกิดอาการ Sick Building Syndrome (U.S. EPA, 2003) ได้แก่

- ผู้อาศัยในอาคารเกิดอาการไม่สบายเฉียบพลัน เช่น ปวดศีรษะ, ระคายเคืองตา จมูก คอ ไอแห้ง ๆ ผิวหนังแห้ง เวียนศีรษะ และคลื่นเหียน ไม่มีสมาธิ อ่อนเพลีย และไวต่อกลิ่นต่าง ๆ
- ไม่ทราบสาเหตุของอาการ
- ส่วนใหญ่อาการดังกล่าวจะหายไปหลังออกจากอาคารได้ไม่นาน

นอกจาก Sick Building Syndrome แล้วยังมีคำที่ใช้เรียกอาการที่เกิดกับผู้อาศัยในอาคาร เช่น Tight Building Syndrome หรือ กลุ่มอาการอาคารปิดสนิท ซึ่งหมายถึงความเจ็บป่วยที่เกิดจากการระบายอากาศไม่เพียงพอ คำนี้เคยนิยมใช้ในอดีต แต่เนื่องจากสาเหตุของปัญหานั้นมีความหลากหลาย ไม่เฉพาะจากการระบายอากาศเท่านั้น จึงทำให้ชื่อ Sick Building Syndrome ได้รับความนิยม และให้ความหมายครอบคลุมชัดเจนกว่า (มณี เขม้นเขตรการ, 2543)

Building Related Illness (BRI) หรือ ความเจ็บป่วยที่เกี่ยวเนื่องกับอาคาร จะใช้คำนี้ในกรณีที่สามารถระบุสาเหตุของอาการเจ็บป่วยได้ว่าเกิดเนื่องจากสารปนเปื้อนที่อยู่ในอากาศภายในอาคารโดยตรง (U.S. EPA, 2003)

ข้อบ่งชี้ว่าเกิดอาการ BRI ได้แก่

- ผู้ที่อาศัยในอาคารเกิดอาการไม่สบาย เช่น ไอ, แน่นหน้าอก, เป็นไข้ และปวดเมื่อยกล้ามเนื้อ
- สามารถระบุสาเหตุที่ก่อให้เกิดอาการได้อย่างชัดเจน
- ผู้ป่วยจะไม่หายจากอาการอย่างรวดเร็วเมื่อได้ออกจากอาคาร แต่มักจะต้องใช้เวลาในการรักษาตัว

2.1.3 การแก้ปัญหาคุณภาพอากาศภายในอาคาร

วิธีการแก้ปัญหาคุณภาพอากาศภายในอาคาร คือ การสืบสำรวจอาคาร (field investigation) การสืบสำรวจอาคารมีวัตถุประสงค์ คือ หาสาเหตุและแก้ปัญหาคุณภาพอากาศภายในอาคาร เพื่อป้องกันและหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหาดังที่กล่าวมาข้างต้น การสืบสำรวจอาคารจำเป็นต้องพิสูจน์ว่าปัญหานั้นเกี่ยวข้องกับปัญหาคุณภาพอากาศในอาคารจริง หาสาเหตุของปัญหา และหาแนวทางแก้ไขปัญหาต่อไป วิธีการสืบสำรวจอาคารควรทำเป็นวงจร โดยเริ่มจากการรวบรวมข้อมูลตั้งสมมุติฐาน และพิสูจน์สมมุติฐานดังกล่าว ในทางปฏิบัติแล้วมักเริ่มต้นด้วยการเดินสำรวจอาคารในบริเวณที่มีปัญหา เพื่อหาข้อมูลปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่อคุณภาพอากาศในอาคาร ซึ่งมี 4 ด้านด้วยกัน คือ ข้อมูลผู้อาศัยในอาคาร ระบบปรับอุณหภูมิ และระบายอากาศ เส้นทางการเคลื่อนที่ของมลสาร และแหล่งกำเนิดมลสาร

การสืบสำรวจอาคารขั้นต้น ต้องรวบรวมข้อมูลที่สามารถหาได้ง่ายเกี่ยวกับตัวอาคาร เช่น ประวัติของอาคาร จุดที่เกิดปัญหา ระบุปัญหาที่เกิดขึ้น และข้อมูลระบบปรับอากาศ และระบายอากาศ ข้อมูลที่ได้ส่วนใหญ่จะได้จากการเดินสำรวจสถานที่ และการซักถามจากผู้อยู่อาศัยในอาคาร จากการสืบสำรวจอาคาร 529 แห่ง ใน ค.ศ. 1971-1988 โดย The National Institute of Occupational Healthy and Safety (NIOSH) ประเทศสหรัฐอเมริกา พบสาเหตุและปัจจัยของอาการเจ็บป่วยต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สาเหตุของปัญหาคุณภาพอากาศในอาคารจากการสืบสำรวจอาคาร 529 แห่ง ใน ค.ศ. 1971-1988 โดย NIOSH

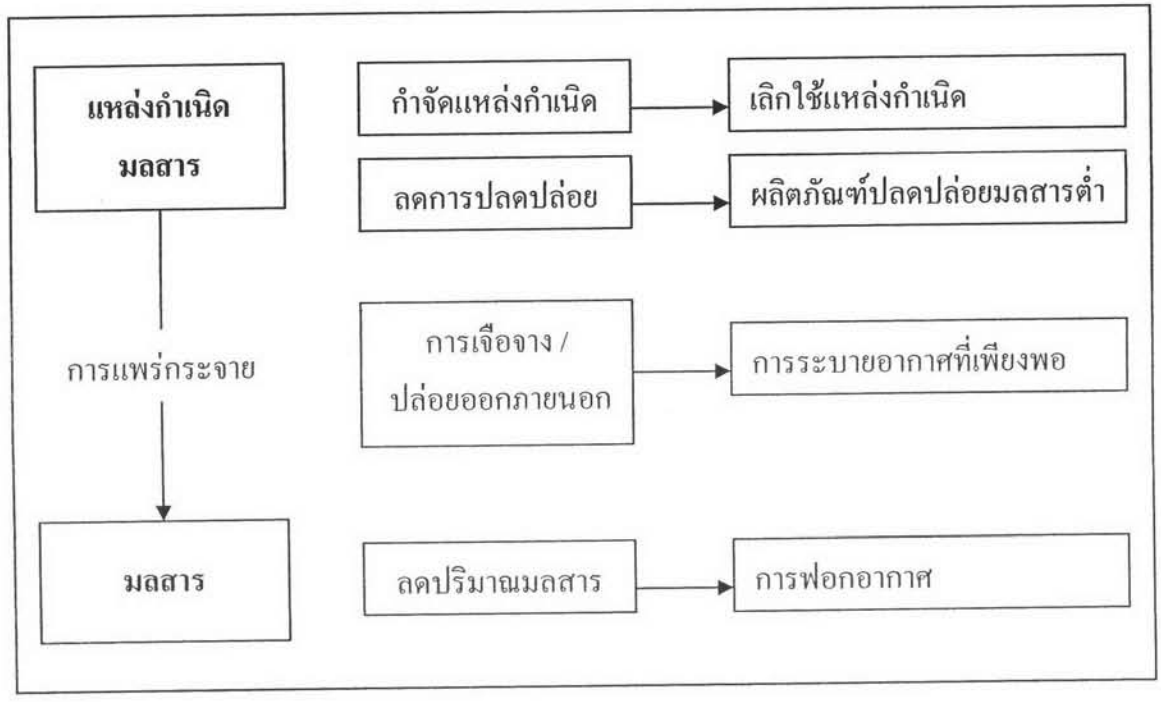
สาเหตุของปัญหา	จำนวนอาคาร	ร้อยละ
การปนเปื้อนจากแหล่งกำเนิดในอาคาร	80	15
การปนเปื้อนจากแหล่งกำเนิดนอกอาคาร	53	10
โครงสร้างอาคาร	21	4
การปนเปื้อนจุลชีพ	27	5
การระบายอากาศไม่เพียงพอ	280	53
ไม่ทราบสาเหตุ	68	13
รวม	**529**	**100**

ที่มา: Godish, 2004

อย่างไรก็ตามแม้จะดูเหมือนว่าการตรวจวัดคุณภาพอากาศเป็นสิ่งที่ควรจะทำเพื่อหาสาเหตุของปัญหา แต่ในความเป็นจริงกลับไม่มีประโยชน์มากนัก เพราะในขณะที่ข้อมูลคุณภาพอากาศ

ทั่วไป เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ คาร์บอนไดออกไซด์ และการเคลื่อนที่ของอากาศ สามารถนำมาอธิบายเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงภายในอาคารได้ แต่ข้อมูลระดับสารมลพิษอื่น ๆ อาจก่อให้เกิดความเข้าใจผิดเกี่ยวกับสาเหตุที่แท้จริงได้ เนื่องจากผลการตรวจวัดมักจะพบว่าระดับสารมลพิษต่ำกว่าค่ามาตรฐาน แต่ผู้อยู่อาศัยก็ยังคงประสบปัญหาด้านสุขภาพ (U.S. EPA., 2003)

หน่วยงาน The United State Environmental Agency (U.S. EPA., 1995) แนะนำแนวทางเพื่อลดหรือแก้ไขปัญหาภายในอาคาร แบ่งออกเป็น 3 วิธี ตามขั้นตอนการกระจายตัวของมลสาร คือ การจัดการแหล่งกำเนิด การระบายอากาศ และการฟอกอากาศ (รูปที่ 2.3)



รูปที่ 2.3 แนวทางแก้ไขปัญหาคุณภาพอากาศภายในอาคาร (Lau, 1999)

2.1.3.1 การจัดการแหล่งกำเนิด

การแก้ปัญหาคุณภาพอากาศในอาคารที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือกำจัดแหล่งกำเนิดของมลสารแต่ละแห่งออกไปจากอาคาร (U.S. EPA., 1995) โดยการไม่ทำกิจกรรมที่เป็นแหล่งกำเนิดมลสารในพื้นที่อาคาร เช่น การสูบบุหรี่ แต่ในบางกรณีไม่สามารถที่จะเลิกใช้แหล่งกำเนิดนั้นได้ จึงอาจเลือกใช้แหล่งกำเนิดชนิดที่ปลดปล่อยมลสารน้อยลง เช่น เปลี่ยนเตาประกอบอาหารจากชนิดใช้ก๊าซ เป็นเตาไฟฟ้า หรือเลือกใช้สี และเฟอร์นิเจอร์ชนิดปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile organic compounds, VOCs) โดยเฉพาะฟอร์มาลดีไฮด์ในปริมาณที่น้อยลง (Turial, 1985)

นอกจากนี้อาจแก้ปัญหาโดยการปรับปรุงแก้ไขแหล่งกำเนิดให้ปลดปล่อยมลสารน้อยลง เช่น การเคลือบฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันการปลดปล่อยแอสเบสตอส เคลือบผลิตภัณฑ์ไม้ด้วยวัสดุไวนิลเพื่อป้องกันการปลดปล่อยฟอร์มัลดีไฮด์ การลดปริมาณเชื้อราโดยใช้ยาฆ่าเชื้อหรือทาสีทับบริเวณที่มีเชื้อรา (Godish, 2004) การแยกหรือกั้นแหล่งกำเนิดออกไปอยู่ในบริเวณที่ไม่มีผู้อาศัย การประกอบกิจกรรมที่ปลดปล่อยมลสารในช่วงเวลาที่มีผู้รับสัมผัสน้อยที่สุด และการเว้นระยะหลังการก่อสร้างหรือตกแต่งอาคารใหม่ เพื่อให้ปริมาณมลสารที่แพร่จากวัสดุก่อสร้างลดลงก่อนเปิดใช้อาคาร หรือเข้าพักอาศัย (Turial, 1985)

2.1.3.2 การระบายอากาศ

จากการศึกษาของ The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) พบว่าร้อยละ 53 ของปัญหาคุณภาพอากาศในอาคารมีสาเหตุมาจากการระบายอากาศที่ไม่เพียงพอ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 (Godish, 2004) การระบายอากาศจะช่วยเจือจางระดับมลสารในพื้นที่อาคารด้วยอากาศจากภายนอกที่มีระดับมลสารต่ำกว่า โดยส่วนใหญ่ปัญหาการระบายอากาศไม่เพียงพอเกิดจาก

(1) การนำอากาศภายนอกเข้าไปในอาคารไม่เพียงพอ

(2) การกระจาย และการผสมผสานอากาศภายในอาคารไม่เพียงพอ เช่น ภายในห้องโถงใหญ่ การระบายอากาศจะดีกว่าห้องที่ถูกกั้นเป็นสัดส่วน

(3) อุณหภูมิและความชื้นสูงหรือไม่คงที่

(4) ระบบฟอกอากาศทำงานไม่มีประสิทธิภาพ (ชัชวาลย์ จันทรวิจิตร, 2542)

การระบายอากาศอาจแบ่งได้ตามกระบวนการ คือ การแทรกของอากาศผ่านทางรอยแยกของอาคาร (infiltration และ exfiltration) การระบายอากาศแบบธรรมชาติ (natural ventilation) และการระบายอากาศเชิงกล (mechanical ventilation) (Godish, 2004)

1) <u>การแทรกผ่านรอยแยกอาคาร (exfiltration และ infiltration)</u>

โครงสร้างของอาคารทุกแห่งมีหลายช่องทางที่ยอมให้อากาศแทรกซึมเข้าและออก ไม่ว่าจะเป็นรอยแตกของอาคาร ช่องระหว่างวงกบประตู หน้าต่าง และฐานของอาคาร ปัจจัยที่ส่งผลต่อการแทรกผ่านของอากาศตามรอยแยก คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิภายใน และภายนอกอาคาร และความเร็วลม อากาศจะระบายได้ดีในวันที่อากาศภายในและภายนอกมีอุณหภูมิแตกต่างกันมาก และลมแรง และอากาศจะถ่ายเทได้น้อยในวันที่ลมสงบ และอุณหภูมิภายในและภายนอกมีความแตกต่างกันน้อย เนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างกันส่งผลให้มีความดันอากาศภายในและภายนอกอาคารไม่เท่ากัน เกิดการถ่ายเทอากาศออกจากอาคาร การระบายอากาศ

ชนิดนี้เกิดกับอาคารทุกแห่ง แต่จะมีบทบาทมากในอาคารปิด โดยเฉพาะอาคารที่ไม่มีการระบายอากาศชนิดอื่น เช่น การใช้เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน โดยไม่มีพัดลมดูดอากาศ

2) การระบายอากาศแบบธรรมชาติ (natural ventilation)

การระบายอากาศแบบธรรมชาติเกิดจากการเปิดหน้าต่าง หรือประตู เกิดช่องเปิดที่ยอมให้อากาศจากภายนอกเข้าไปหมุนเวียนในอาคารและเจือจางมลสาร อัตราการระบายอากาศแบบธรรมชาติขึ้นอยู่กับปริมาณและตำแหน่งของหน้าต่าง หรือประตู และปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม คือ อุณหภูมิอากาศ และความเร็วลม ส่วนมากแล้วการระบายอากาศแบบธรรมชาติจะควบคู่ไปกับการใช้พัดลมชนิดต่าง ๆ ในอาคารเพื่อลดอุณหภูมิในห้อง

3) การระบายอากาศเชิงกล (mechanical ventilation)

การระบายอากาศเชิงกลนิยมใช้กันแพร่หลาย เพื่อควบคุมปริมาณสารปนเปื้อนทั้งในอาคารสำนักงานขนาดใหญ่ อาคารพาณิชย์ และอาคารสถาบันการศึกษา โดยอาจแบ่งเป็นการระบายอากาศของทั้งอาคาร หรือเฉพาะพื้นที่บางส่วน การระบายอากาศเชิงกลมีจุดมุ่งหมายหลักเพื่อเจือจาง และกำจัดของเสียจากมนุษย์ซึ่งเป็นต้นเหตุของกลิ่นไม่พึงประสงค์ และยังสามารถเจือจางระดับมลสารในอาคาร โดยเมื่อปริมาตรอากาศหมุนเวียนเป็น 2 เท่าของปริมาตรอากาศภายในอาคาร ระดับมลสารจะลดลงร้อยละ 50 ประสิทธิภาพการเจือจางสิ่งปนเปื้อนในอาคารจะดีที่สุดกับมลสารเกิดขึ้นเป็นครั้งคราว เช่น การสูบบุหรี่ แต่ประสิทธิภาพจะลดลงกับมลสารที่ถูกปลดปล่อยอย่างต่อเนื่องจากการแพร่

การระบายอากาศเฉพาะที่ใช้กับแหล่งกำเนิดที่ระบุได้แน่นอน ปลดปล่อยมลสารปริมาณมาก และปลดปล่อยเฉพาะพื้นที่ นิยมใช้ในการควบคุมกลิ่นจากห้องน้ำ ควบคุมมลสารจากการเผาไหม้ และกลิ่นจากห้องครัว หรือลดกลิ่น และก๊าซจากห้องปฏิบัติการของสถาบันการศึกษา

2.1.3.3 การฟอกอากาศ

ระบบฟอกอากาศถูกออกแบบเพื่อลดปริมาณสารปนเปื้อนในอาคารในรูปของฝุ่นละออง หรือก๊าซ เครื่องฟอกอากาศส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในท้องตลาดถูกออกแบบมาเพื่อลดมลสารในรูปของอนุภาค และไม่สามารถลดปริมาณของก๊าซในอากาศได้ ประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศขึ้นกับความสามารถในการกรองมลสารออกจากอากาศ และปริมาตรอากาศที่ผ่านระบบหรือแผ่นกรองอากาศประกอบกัน จึงไม่ควรเลือกใช้เครื่องที่กรองมลสารได้มากแต่มีอัตราการไหลอากาศต่ำ หรือเครื่องที่มีอัตราการไหลอากาศสูงแต่กรองมลสารได้น้อย นอกจากนี้ประสิทธิภาพของเครื่อง

ฟอกอากาศขึ้นกับการบำรุงรักษาตามคู่มือการใช้งานอย่างเคร่งครัด เช่นการเปลี่ยนแผ่นกรอง หรือทำความสะอาด ตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ (U.S. EPA., 1995)

2.2 ฝุ่นละอองในอากาศ

เนื่องจากกระบวนการเกิดของอนุภาคมีความหลากหลาย ส่งผลให้ขนาด รูปร่าง องค์ประกอบ และผลกระทบของฝุ่นละอองมีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีการกำหนดคำศัพท์ที่กำหนดไว้เรียกฝุ่นละอองมากมาย คำศัพท์ที่พบบ่อยได้แก่

ละอองไอ (aerosol) หมายถึงอนุภาคของเหลวหรือของแข็งที่แขวนลอยในอากาศ

ฝุ่นละอองรวม (suspended particulate matter, SPM หรือ total suspended particulate, TSP) หมายถึงอนุภาคทั้งหมดที่แขวนลอยในอากาศ

ฝุ่นละออง (particulate matter) บางครั้งหมายถึงฝุ่นละอองทั้งหมดที่เป็นอนุภาคของแข็งในอากาศ แต่โดยทั่วไปจะใช้แทนฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมโครเมตร (PM_{10}) หรือฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมโครเมตร ($PM_{2.5}$)

อนุภาคขนาดเล็ก (fine particle) หมายถึงอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 2-3 ไมโครเมตร นิยมใช้แทนฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมโครเมตร ($PM_{2.5}$)

อนุภาคขนาดเล็กมาก (ultrafine particle หรือ nanoparticle) อนุภาคขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตร ใช้สำหรับอนุภาคที่มีขนาดอยู่ในหน่วยนาโนเมตร

ควัน (smoke) หมายถึงอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ประกอบด้วยคาร์บอนและก๊าซระเหยง่ายควบแน่น ส่วนใหญ่มีขนาดต่ำกว่า 1 ไมโครเมตร

inhalable particle หมายถึงอนุภาคที่สามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจได้ แต่ส่วนใหญ่ถูกกำจัดได้ที่ระบบทางเดินหายใจส่วนบน

thoracic particle หมายถึงอนุภาคที่สามารถเข้าถึงทางเดินอากาศและบริเวณแลกเปลี่ยนก๊าซในปอด

respirable particle หมายถึงอนุภาคที่สามารถเข้าถึงบริเวณแลกเปลี่ยนก๊าซในปอด (U.S. EPA., 1996; Colls, 2002)

2.2.1 แหล่งกำเนิดของฝุ่นละอองในอากาศ

อนุภาคสามารถแบ่งตามแหล่งกำเนิดออกเป็น 2 ประเภท คือ แหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ (natural source) และจากกิจกรรมของมนุษย์ (anthropogenic source) และอาจแบ่งตามกระบวนการเกิดได้เป็นอนุภาคปฐมภูมิ (primary particle) และอนุภาคทุติยภูมิ (secondary particle)

อนุภาคปฐมภูมิ คือ อนุภาคที่ถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศโดยตรง ประกอบด้วยอนุภาคที่ถูกปลดปล่อยในรูปฝุ่นละออง และอนุภาคที่เกิดจากการควบแน่นของไอระเหยอย่างรวดเร็วหลังการปลดปล่อยที่อุณหภูมิสูง เช่น ในกระบวนการเผาไหม้ ความเข้มข้นของอนุภาคปฐมภูมิในบรรยากาศขึ้นกับ อัตราการปลดปล่อย การเคลื่อนที่ การกระจายตัว และอัตราการลดของอนุภาค ฝุ่นละอองปฐมภูมิอาจเกิดทั้งในธรรมชาติ เช่น อนุภาคดินที่ถูกพัดพาขึ้นสู่บรรยากาศโดยลม ละอองเกลือทะเล ไฟป่าที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และจากแหล่งกำเนิดชีวภาพ เช่น เกสรดอกไม้ สปอร์เชื้อรา และชิ้นส่วนของพืช ฝุ่นละอองปฐมภูมิที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล และฝุ่นจากถนน เป็นต้น

อนุภาคทุติยภูมิ คือ อนุภาคที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีทำให้ก๊าซเกิดการควบแน่น หรือปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้เกิดกระบวนการอื่น ๆ กับก๊าซอิสระ เช่น การดูดซับ (adsorption) และการละลาย (solution) ทำให้เกิดเป็นอนุภาคใหม่ หรือเกิดเป็นสารประกอบที่ทำให้เกิดอนุภาคได้ต่อไป ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดอนุภาคทุติยภูมิ คือ ความเข้มข้นของก๊าซที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น โอโซน (O_3) หมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และสภาวะในบรรยากาศ เช่น ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ และความชื้นสัมพัทธ์ ฝุ่นละอองทุติยภูมิที่เกิดจากธรรมชาติ เช่น ก๊าซบางชนิดที่ปลดปล่อยจากพืช เช่น เทอร์พีน (terpene) เกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยแสง (photochemical reaction) กับโอโซน หรือหมู่ไฮดรอกซิลในบรรยากาศ เกิดเป็นอนุภาคอินทรีย์ ฝุ่นละอองทุติยภูมิที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีด้วยแสง ของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) หรือก๊าซอินทรีย์ที่เกิดจากมนุษย์ เป็นต้น (ตารางที่ 2.3)

อย่างไรก็ตาม การแบ่งประเภทแหล่งกำเนิดอนุภาคจากธรรมชาติ และจากกิจกรรมของมนุษย์ยังไม่ชัดเจนนัก เช่น อนุภาคที่ถูกลมพัดพาขึ้นมาจากดินที่ถูกมนุษย์รบกวนโดยการปรับหน้าดินเพื่อทำการเกษตร หรือไฟป่าที่ส่วนใหญ่เกิดจากการเผาป่า หรืออุบัติเหตุ ซึ่งเกิดจากการกระทำของมนุษย์ แต่ถูกกำหนดเป็นอนุภาคฝุ่นละอองที่เกิดจากธรรมชาติ (U.S. EPA., 1996)

องค์ประกอบของละอองไอขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด องค์ประกอบสำคัญของละอองไอในอากาศ คือ ซัลเฟต ไนเตรต สารประกอบคาร์บอน น้ำ ไฮโดรเจนไอออน แอมโมเนียมไอออน และธาตุกลุ่มต่าง ๆ องค์ประกอบของอนุภาคโดยเฉลี่ยจะแตกต่างกันตามขนาดของอนุภาค สภาพภูมิศาสตร์ เช่นพื้นที่ใกล้ทะเล และฤดูกาล (U.S. EPA., 1996)

ตารางที่ 2.3 การประมาณการณ์ปริมาณอนุภาคที่ถูกปลดปล่อยทั่วโลกใน ค.ศ. 1968

แหล่งกำเนิด	การปลดล่อย (Tg)	
	จากธรรมชาติ	จากกิจกรรมของมนุษย์
อนุภาคปฐมภูมิ		
เถ้าจากการเผาไหม้ถ่านหิน	-	36.0
อุตสาหกรรมเหล็ก และเหล็กกล้า	-	9.0
เชื้อเพลิงที่ไม่ใช่ชนิดฟอสซิล (ไม้, มูลสัตว์)	-	8.0
การเผาไหม้ปิโตรเลียม	-	2.0
การเผาขยะ	-	4.0
การเกษตรกรรม	-	10.0
อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์	-	7.0
อื่น ๆ	-	16.0
เกลือทะเล	1,000	-
ฝุ่นดินที่ถูกลมพัดพา	200	-
ภูเขาไฟ	4.0	-
ไฟป่า	200	-
รวม	1,404	92.0
อนุภาคทุติยภูมิ		
ซัลเฟตจาก H_2S	202	-
ซัลเฟตจาก SO_2	-	147
ไนเตรตจาก NO_x	430	30
แอมโมเนียมจาก NH_3	269	-
อนุภาคอินทรีย์จากเทอร์พีน ไฮโดรคาร์บอน ฯ	198	27
รวม	1,099	204
รวมทั้งหมด	**2,503**	**296**

ที่มา: Seinfeld, 1975

2.2.2 การกระจายตัวของฝุ่นละออง

อนุภาคในบรรยากาศมีรูปทรงที่แตกต่างกัน ขึ้นกับแหล่งกำเนิดของอนุภาค อนุภาคทรงกลมมีทั้งเกสรดอกไม้ และของแข็งที่เกิดจากการควบแน่น เช่น เถ้าลอย อนุภาคทรงกระบอก ได้แก่ เส้นใยของขนสัตว์ ฝ้าย ใยแอสเบสตอส และเส้นใยสังเคราะห์ต่าง ๆ สินแร่โดยปกติจะมีรูปทรงไม่เป็นระเบียบ (irregular) เป็นระเบียบ หรือเป็นปุยหรือสะเก็ด (flakelike) ก้อนรวม (agglomerate) สามารถเกิดจากอนุภาคที่รวมตัวกันในขณะที่ลอยอยู่ในอากาศ หรืออาจเกิดจากการเย็นตัวของก๊าซร้อน ซึ่งทำให้เกิดรูปร่างเหมือนลูกโซ่ (chainlike) และเป็นฟล๊อก (floc คือ กลุ่มรวมตัวหลวม ๆ ของอนุภาค) และมักเกิดขึ้นในระหว่างการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง ซึ่งทำให้เกิดอนุภาคคาร์บอนจำนวนมาก ตัวอย่างของผลการวัดรูปทรงของอนุภาคฝุ่นละอองที่อยู่ในอากาศ แสดงในตารางที่ 2.4 ด้วยเหตุที่อนุภาคในอากาศมีความหลากหลาย จึงจำเป็นต้องมีนิยามเพื่อบ่งชี้ขนาดอนุภาค โดยทำการกำหนดตามพฤติกรรมเชิงแอโรไดนามิก (aerodynamic) ของอนุภาคนั้น เนื่องจากอนุภาคในบรรยากาศไม่ใช่สารบริสุทธิ์ แต่เกิดจากวัสดุต่าง ๆ ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้จึงสะดวกกว่าที่จะนิยามรัศมีสมมูลเชิงแอโรไดนามิก (equivalent aerodynamic radius) ให้เป็นรัศมีของทรงกลมที่มีความเร็วบั้นปลายของการตกตามกฎของสโตกส์ (Stokes' law) เท่ากับอนุภาคนั้น แต่มีความหนาแน่นของอนุภาคทรงกลมเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และคณะ, 2542)

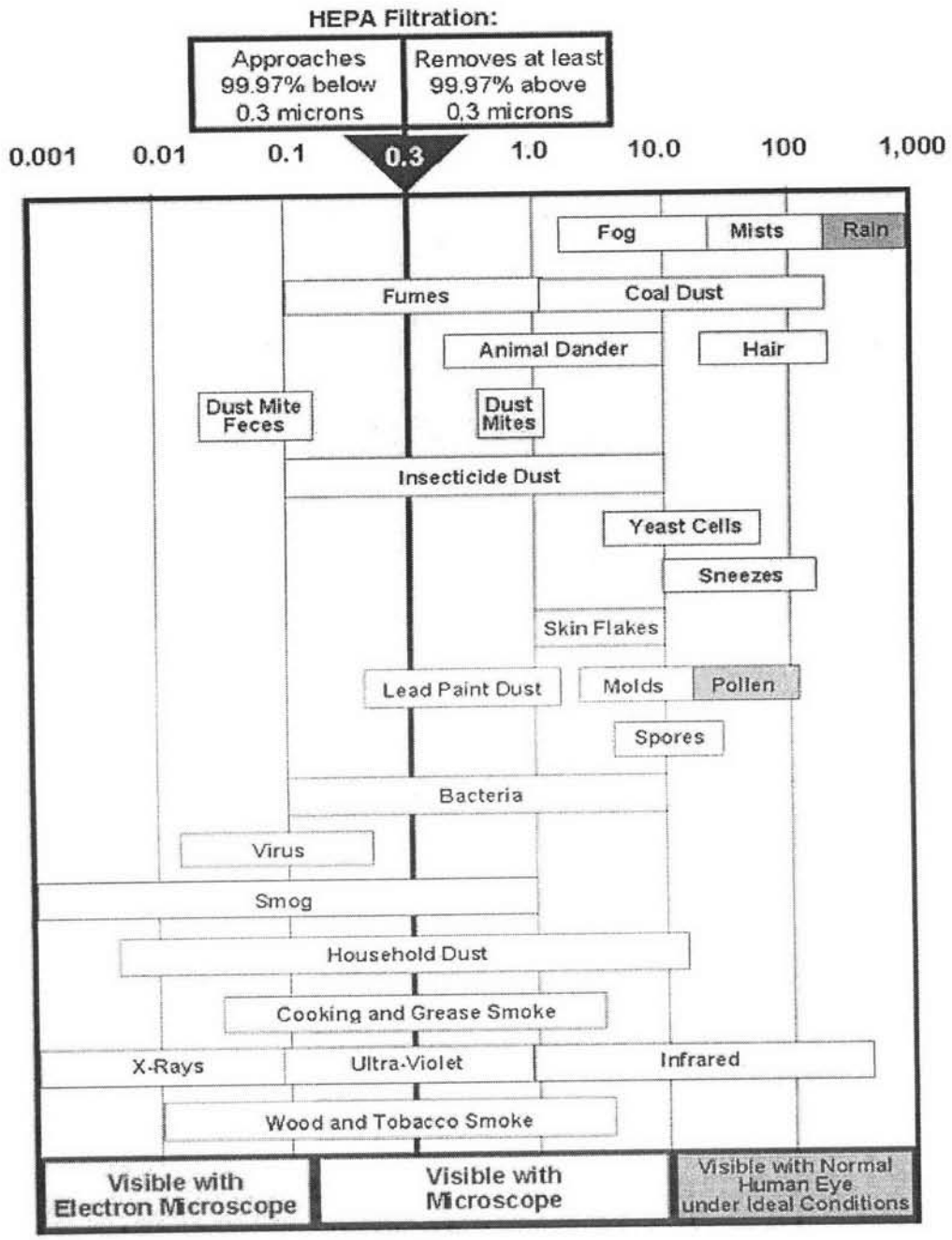
ตารางที่ 2.4 รูปร่างของอนุภาคฝุ่นละอองในอากาศ

รูปร่าง	อนุภาค [1]
ทรงกลม	ควัน, เกสร, เถ้าลอย
ไม่มีระเบียบ (irregular)	แร่
ลูกบาศก์	ถ่านไฟ
สะเก็ด (ปุย)	แร่, หนังกำพร้า (epidermis)
เส้นใย	ผ้าสำลี, เส้นใยพืช
ฟล๊อก (floc) จากการควบแน่น	คาร์บอน, ควัน, ฟูม (fume)

หมายเหตุ : [1] ขนาดใหญ่กว่า 0.1 ไมโครเมตร

ที่มา: ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และคณะ, 2542

ขนาดอนุภาคในอากาศแตกต่างกันมากตั้งแต่ขนาดใกล้เคียงกับโมเลกุลก๊าซ (ประมาณ 2-3 นาโนเมตร) ที่เกิดจากการควบแน่นของก๊าซ จนถึงอนุภาคขนาดใหญ่ที่เกิดจากกระบวนการเชิงกล เช่น การบด และการกระแทก (รูปที่ 2.4)

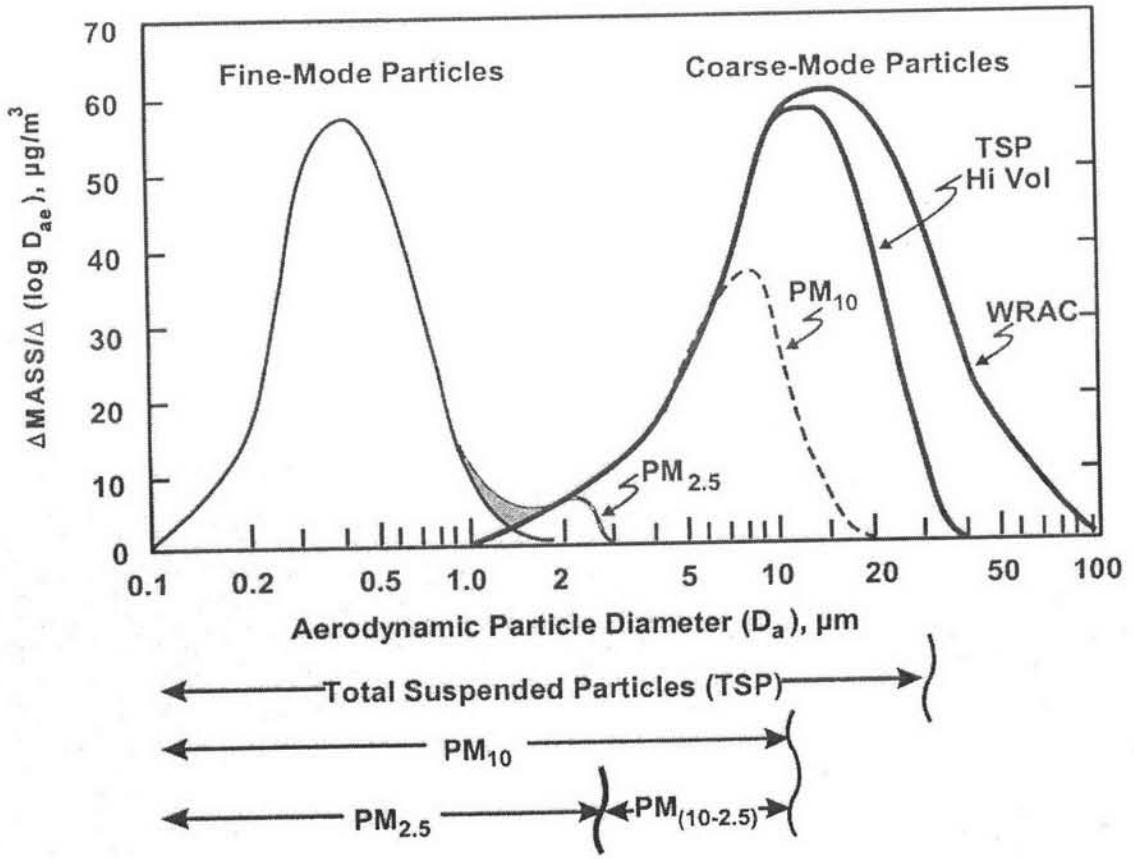


รูปที่ 2.4 ขนาดของอนุภาคในอากาศ (Dust Collector Source, (n.d.))

การกระจายตัวของอนุภาคตามขนาดอาจแบ่งได้เป็น 2 ช่วง โดยค่ามวลอนุภาคน้อยที่สุดอยู่ที่ขนาดระหว่าง 0.1 - 3 ไมโครเมตร แบ่งช่วงขนาดอนุภาคที่มีปริมาณหนาแน่นในบรรยากาศออกเป็น 2 กลุ่ม คืออนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในช่วงที่มีขนาดใหญ่กว่าค่าน้อยที่สุดดังกล่าว เป็นอนุภาคขนาดใหญ่ (coarse mode particle) อนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในช่วงที่มีขนาดเล็กกว่าค่าน้อย

ที่สุด เป็นอนุภาคขนาดเล็ก (fine mode particle) (รูปที่ 2.5) จากผลการตรวจวัดบ่งชี้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคขนาดเล็กและขนาดใหญ่แตกต่างกัน ตามกระบวนการเกิดที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.5 ซึ่งจะแสดงให้เห็นได้ว่าฝุ่นละอองขนาดเล็กเกิดจากกระบวนการเชิงเคมี และส่วนใหญ่เป็นอนุภาคทุติยภูมิ ในขณะที่อนุภาคขนาดใหญ่ส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการเชิงกล ช่วงการแบ่งช่วงขนาดอนุภาคไม่แน่นอนอยู่ในช่วงระหว่าง 0.1 - 3 ไมโครเมตร ในปัจจุบันนิยมใช้อนุภาคขนาดใหญ่แทนอนุภาคขนาดไม่เกิน 10 ไมโครเมตร และอนุภาคขนาดเล็กแทนอนุภาคขนาดไม่เกิน 2.5 ไมโครเมตร (U.S. EPA., 1996; Panyacosit, 2000)

ขนาด รูปร่าง ความหนาแน่น และแรงที่กระทำต่ออนุภาค เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการตกตะกอนของอนุภาค และบริเวณที่อนุภาคจะตกตะกอนในร่างกาย อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะเข้าไปตกในเส้นทางเดินหายใจได้ลึกขึ้น อนุภาคขนาดที่มีความสำคัญต่อสุขภาพของมนุษย์ คืออนุภาคขนาดไม่เกิน 10 ไมโครเมตร ซึ่งถูกเรียกเป็น inhalable particle เนื่องจากเป็นอนุภาคขนาดที่สามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจได้ ขนาดของอนุภาคที่สามารถเข้าสู่ส่วนต่าง ๆ ของระบบทางเดินหายใจแสดงในตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.5 การกระจายตัวของอนุภาคขนาดเล็กและขนาดใหญ่ในอากาศ (U.S. EPA., 1996)

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของอนุภาคขนาดเล็ก และอนุภาคขนาดใหญ่

	อนุภาคขนาดเล็ก	อนุภาคขนาดใหญ่
องค์ประกอบ	- ซัลเฟต (SO_4^{2-}), ไนเตรต (NO_3^-), แอมโมเนียม (NH_4^+), ไฮโดรเจนไอออน (H^+), ธาตุคาร์บอน (C) - สารประกอบอินทรีย์ (PAHs) - โลหะ (Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn) - ละอองน้ำ - สารอินทรีย์ชีวภาพ (biogenic organic)	- ฝุ่นจากการฟุ้งกระจายกลับ (resuspension) - ฝุ่นจากดินและถนน - เถ้าลอยจากถ่านหิน และน้ำมัน - ออกไซด์ของโลหะ Si, Al, Mg ,Ti, Fe - $CaCO_3$, NaCl, เกลือทะเล - เกสรดอกไม้, สปอร์เชื้อรา, ชิ้นส่วนของพืช
แหล่งกำเนิด	- การเผาไหม้ถ่านหิน น้ำมัน - การเปลี่ยนรูปของ NO_x, SO_2 และสารอินทรีย์ รวมทั้งสารอินทรีย์ชีวภาพ เช่น terpenes - กระบวนการต่าง ๆ ในอุณหภูมิสูง - การถลุงแร่, เหมืองเหล็ก เป็นต้น	- การฟุ้งกระจายกลับของละอองดินทราย และฝุ่นถนน - การแขวนลอยของดินที่ถูกรบกวน เช่น จากการเกษตร การทำเหมือง ฯ - การฟุ้งกระจายกลับของฝุ่นจากอุตสาหกรรม - การก่อสร้าง - การเผาไหม้ถ่านหินและน้ำมัน - ละอองน้ำทะเล และมหาสมุทร
ช่วงชีวิต (lifetime)	หลายวัน ถึงหลายสัปดาห์	หลายนาที ถึงหลายชั่วโมง
ระยะการเคลื่อนที่	100s ถึง 1000s กิโลเมตร	1 ถึง 10s กิโลเมตร

ที่มา: Panyacosit, 2000

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบขนาดอนุภาคในระบบทางเดินหายใจ

ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	ระบบทางเดินหายใจ
11	ไม่สามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจได้
7 - 11	nosal passage
4.7 – 7	pharynx
3.3 – 4.7	trachea และ primary bronchi
2.1 – 3.3	secondary bronchi
1.1 – 2.1	terminal bronchi
0.65 – 1.1	bronchioli
0.43 – 0.65	alveoli

ที่มา: Panyacosit, 2002

2.2.3 พลวัตศาสตร์ของอนุภาคในบรรยากาศ

อนุภาคที่ถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ หรืออาจเกิดขึ้นในบรรยากาศ จะอยู่ในอากาศเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งก่อนตกลงมาจากอากาศ อนุภาคตกลงสู่พื้นผิวด้วยกระบวนการหลัก 4 กระบวนการ คือ การตกตะกอน การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน การรวมตัว และกลไกเชิงเฉื่อย แต่ละกระบวนการจะมีอิทธิพลต่างกันตามขนาดและคุณสมบัติของอนุภาค และแรงที่กระทำต่ออนุภาค (ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และคณะ, 2542; Colls, 2002)

1) <u>การตกตะกอน (sedimentation) และแรงเสียดทาน (drag force)</u>

เมื่ออนุภาคเคลื่อนผ่านอากาศซึ่งเป็นของไหล จะเกิดแรงต้านทานของของไหลจากความหนืดของของไหลกระทำต่ออนุภาค สมการแรงเสียดทานอนุมานว่าอนุภาคมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับโมเลกุลอากาศ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง จะเพิ่มโอกาสให้อนุภาคเคลื่อนที่โดยไม่เกิดการชนมากขึ้น ดังนั้นขนาดของอนุภาคจึงเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคและอากาศ

การตกตะกอนเกิดจากเมื่ออนุภาคอยู่ในสนามแรงดึงดูดของโลกจะถูกกระทำโดยแรงดึงดูดไปยังจุดศูนย์กลางของมวลโลก ดังนั้นเมื่ออนุภาคถูกปลดปล่อยออกสู่อากาศแรงโน้มถ่วงจะดึงอนุภาคลงสู่พื้นผิวโลก เมื่อความเร็วในการตกเพิ่มขึ้นแรงเสียดทานจะเพิ่มขึ้นแต่จะกระทำในทางตรงข้ามคือดึงอนุภาคขึ้น แรงสุทธิจากความแตกต่างของแรง 2 ชนิดจะทำให้ความเร่งลดลงจนกระทั่งแรงดึงดูดมีค่าคงที่ ความเร็วคงที่โดยไม่มีความเร่งนี้เรียกว่าความเร็วท้าย หรือความเร็ว

ในการตกตะกอน อนุภาคจะออกจากบรรยากาศภายใต้แรงโน้มถ่วงโลกที่ความเร็วในการตกนี้ตามกฎของสโตกส์ (Stokes' law) กฎของสโตกส์จะมีอิทธิพลมากต่ออนุภาคขนาดใหญ่เท่านั้น เนื่องจากมีขนาดและมวลมาก จึงได้รับผลกระทบจากแรงโน้มถ่วงมากกว่าอนุภาคขนาดเล็ก

2) การแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion)

อนุภาคขนาดเล็กมากจะได้รับอิทธิพลจาก 2 กระบวนการ กระบวนการแรก คือ เมื่อขนาดอนุภาคลดลงส่งผลให้อัตราการชนกับโมเลกุลอากาศลดลง จนกระทั่งมีความเป็นไปได้ที่การชนจากทิศทางใดทิศทางหนึ่งไม่สมดุลกับการชนจากทิศทางตรงข้าม และกระบวนการที่สอง คือ มวลของอนุภาคน้อยมากพอที่ผลรวมโมเมนตัมของการชนระหว่างอนุภาคกับโมเลกุลอากาศมีทิศทางไม่สมดุลเป็นครั้งคราว จากผลของทั้ง 2 กระบวนการ ส่งผลให้อนุภาคเคลื่อนที่แบบสุ่มเกิดเป็นการแพร่แบบบราวเนียน โดยการแพร่แบบบราวเนียนจะมีอิทธิพลสูงต่ออนุภาคขนาด 0.01 - 0.1 ไมโครเมตร เมื่อเทียบกับอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงโลก แต่อิทธิพลของการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนจะน้อยลงในอนุภาคที่มีขนาดอนุภาคใหญ่

3) การรวมตัว (coagulation)

เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ทั้งการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน หรือโดยความปั่นป่วนของอากาศ (atmospheric turbulent) ทำให้เกิดการชนกันระหว่างอนุภาค และอนุภาคจะเกาะติดกันเมื่อสัมผัสหรือชนกัน กระบวนการรวมตัว (coagulation process) ดังกล่าวจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาในอากาศ และนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงการแจกแจงตามขนาดและปริมาตรของละอองไอในอากาศ โดยอนุภาคขนาดเล็กจะรวมตัวกัน ทำให้ความเข้มข้นของอนุภาคขนาดเล็กลดลงอย่างรวดเร็ว และเกิดเป็นอนุภาคใหม่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและถูกกำจัดโดยกระบวนการเชิงเฉื่อย และเกิดการตกตะกอนตามแรงโน้มถ่วงของโลก ในบรรยากาศกลไกสำคัญที่ทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาค คือ การเคลื่อนที่แบบบราวเนียนของอนุภาค กระบวนการรวมตัวของอนุภาคเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ปริมาณอนุภาคขนาดต่ำกว่า 0.1 ไมโครเมตร ในบรรยากาศลดลงอย่างรวดเร็วและมีขนาดใหญ่ขึ้น อนุภาคใหม่นี้อาจอยู่ในรูปทรงกลมในกรณีที่อนุภาคเริ่มต้นอยู่ในรูปของเหลว เช่น ละอองไอกรดซัลฟิวริก แต่ส่วนมากอนุภาคใหม่จะอยู่ในรูปไม่สมมาตรที่เกิดจากการรวมตัวด้วยแรงระหว่างประจุไฟฟ้า และแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล อนุภาคที่มีขนาดต่ำกว่า 0.1 ไมโครเมตร จะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูง ทำให้มีโอกาสเกิดการชนมากขึ้น ส่งผลให้มีอัตราการรวมตัวสูงตามไปด้วย อนุภาคขนาดที่มีขนาดใหญ่มากขึ้นที่ประมาณ 0.3 ไมโครเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่น้อยกว่าอนุภาคขนาดต่ำกว่า 0.1 ไมโครเมตรมาก และทำหน้าที่เสมือนตัวจับ (acceptors) อนุภาคขนาดเล็กกว่าที่แพร่อย่างรวดเร็ว

4) การชน (impaction) และการสกัดกั้น (interception)

เมื่ออากาศพัดผ่านสิ่งกีดขวาง กระแสอากาศจะแยกออกอยู่ในรูปเส้นโค้งรอบเส้นกีดขวางนั้น เส้นทางการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคที่เคลื่อนที่อยู่ในกระแสอากาศดังกล่าวขึ้นอยู่กับสมดุลระหว่างแรงเฉื่อย (แรงกระทำที่พยายามให้อนุภาคอยู่ในเส้นทางเดิม) แรงดัน (แรงกระทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ตามกระแสอากาศ) และแรงเสียดทาน (แรงกระทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านอากาศช้าลง) สำหรับอนุภาคขนาดเล็กมีแรงเฉื่อยน้อย จึงเคลื่อนที่ไปตามกระแสอากาศเช่นเดียวกับพฤติกรรมของโมเลกุลก๊าซ แต่อนุภาคขนาดใหญ่ที่มีแรงเฉื่อยมากกว่า จะเคลื่อนที่ตามหรือใกล้เคียงกับทิศทางเดิมตัดกระแสอากาศไปตกบนวัตถุ เรียกว่า การชน (impaction) แต่ในบางกรณีเมื่ออนุภาคยังคงอยู่ในกระแสอากาศโดยไม่เกิดการชนกับวัตถุกีดขวาง แต่อนุภาคเคลื่อนที่เข้าใกล้สิ่งกีดขวางจนเกิดการสัมผัสระหว่างอนุภาคกับผิวของสิ่งกีดขวาง จะเกิดกลไกการกำจัดอนุภาคที่เรียกว่า การสกัดกั้น (interception)

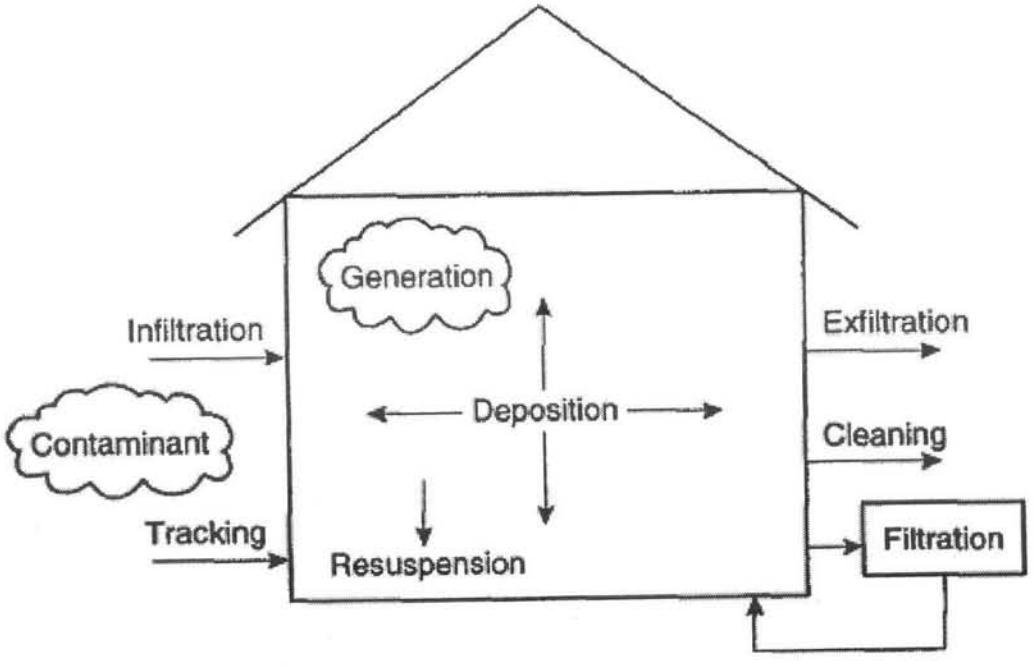
ตามธรรมชาติทั้ง 4 กระบวนการเกิดขึ้นพร้อมกัน ความสำคัญของแต่ละกระบวนการขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ขนาดอนุภาค ขนาดวัตถุกีดขวาง และความเร็วลม โดยอนุภาคขนาดต่ำกว่า 0.01 ไมโครเมตร การแพร่แบบบราวเนียนจะมีอิทธิพลมากกว่ากระบวนการอื่น ๆ อนุภาคขนาดประมาณ 1.0 ไมโครเมตร กระบวนการตกตะกอนจะมีความสำคัญมากที่สุด และในอนุภาคขนาดระหว่าง 0.01-1.0 ไมโครเมตร อนุภาคจะได้รับอิทธิพลของทั้ง 2 กระบวนการ จากการศึกษาโดยการทดลองยืนยันว่าอนุภาคขนาดดังกล่าวจะ มีช่วงชีวิตยาวนาน ตกลงสู่พื้นได้ช้า และก่อให้เกิดฟ้าหลัว (haze) จนกระทั่งถูกฝนชะออกจากบรรยากาศ กระบวนการตกตะกอน การแพร่แบบบราวเนียน การรวมตัว และกลไกเชิงเฉื่อยของอนุภาค ส่งผลทำให้เกิดรูปแบบการกระจายตัวของอนุภาคตามขนาดในบรรยากาศ โดยแบ่งออกเป็นอนุภาคขนาดเล็กและอนุภาคขนาดใหญ่ดังที่ได้กล่าวถึงข้างต้น (Colls, 2002)

2.2.4 ฝุ่นละอองภายในอาคาร

จากการศึกษาระหว่างความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในและนอกอาคารในกรุงเทพ ฯ พบว่าในสภาวะไม่มีเครื่องปรับอากาศ และมีแหล่งกำเนิดฝุ่นในอาคาร ระดับฝุ่นละอองในอาคารมีค่าสูงแต่ไม่สูงกว่าภายนอก ในกรณีที่ไม่มีแหล่งกำเนิดในอาคารและมีเครื่องปรับอากาศ ความเข้มข้นฝุ่นละอองมีค่าตั้งแต่ร้อยละ 50-100 ของความเข้มข้นภายนอก การศึกษาในประเทศเนเธอร์แลนด์พบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในและภายนอกอาคาร แต่ความสัมพันธ์จะลดลงตามแหล่งกำเนิดในอาคารที่เพิ่มขึ้น เช่น ควันบุหรี่ในสิ่งแวดล้อม (environmental tobacco

smoke, ETS) จากผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกันว่าโดยทั่วไปความเข้มข้นภายนอกอาคารมีแนวโน้มมากกว่าภายในอาคาร ยกเว้นในกรณีที่มีแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองสำคัญภายในอาคาร เช่น การศึกษาในเกาหลีใต้ พบความเข้มข้นของฝุ่นละอองภายในมากกว่าภายนอกในช่วงฤดูหนาว เกิดจากการใช้เครื่องทำความร้อน ประกอบกับการระบายอากาศของอาคารมีค่าต่ำ แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของความเข้มข้นภายในและภายนอกขึ้นกับกิจกรรมในอาคาร ช่วงเวลาที่คนอาศัยในอาคาร การระบายอากาศ ชนิดของเตาประกอบอาหารและเครื่องทำความร้อน และควันบุหรี่ (Panyacosit, 2000)

แหล่งกำเนิดของฝุ่นละอองภายในอาคาร ได้แก่ ฝุ่นละอองจากภายนอกอาคารที่แทรกเข้ามาในอาคาร (penetration) ฝุ่นละอองจากการฟุ้งกระจายกลับ (resuspension) ซึ่งเกิดจากการปั่นป่วนของอากาศในห้องเนื่องจากกิจกรรมต่าง ๆ เช่น การเปิดพัดลม การทำความสะอาด และจากการเคลื่อนไหวของคนในห้อง และฝุ่นละอองจากแหล่งกำเนิดภายในอาคาร (indoor source) เช่น จากการเผาไหม้ การสูบบุหรี่ และอนุภาคทุติยภูมิที่เกิดจากการใช้ผลิตภัณฑ์เคมีในอาคาร (รูปที่ 2.6) และความเข้มข้นฝุ่นละอองในอาคารจะลดลงตามกระบวนการตกตะกอนของอนุภาค (deposition) และฝุ่นละอองภายในอาคารออกสู่ภายนอกอาคารตามการระบายอากาศ (Thatcher และ Layton, 1995; Abt et al., 1999)



รูปที่ 2.6 กระบวนการเพิ่ม และลดความเข้มข้นฝุ่นละอองในอากาศภายในอาคาร (Thatcher และ Layton, 1995)

2.3 เชื้อรา

รา เป็นจุลชีพแบบยูคาริโอต (eukaryotic) ไม่มีคลอโรฟิลล์ มีลักษณะเป็นทัลลัส ส่วนใหญ่แล้วสามารถสร้างสปอร์เพื่อใช้ในการสืบพันธุ์ ซึ่งมีทั้งแบบอาศัยเพศ (sexual) และไม่อาศัยเพศ (asexual) ผนังเส้นใยของราประกอบด้วยสารไคติน หรือเซลลูโลส (วิจัย รักวิทยาศาสตร์, 2546)

2.3.1 สัณฐานวิทยา

รามีทั้งชนิดเป็นเซลล์เดียว เช่น ยีสต์ และที่เป็นหลายเซลล์เรียงเป็นเส้นใย (hypha) กลุ่มของเส้นใย เรียกว่า ไมซีเลียม (mycelium) เส้นใยทั่วไปมีความกว้าง 5 - 10 ไมโครเมตร และมีความยาวมาก ประกอบด้วยผนังเซลล์ เยื่อหุ้มเซลล์ และช่องว่างภายในที่บรรจุโพรโทพลาซึม เยื่อหุ้มเป็นเยื่อ 2 ชั้นล้อมรอบโพรโทพลาซึม ผนังเซลล์ประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) หรือไคติน ในราชั้นต่ำผนังเซลล์ประกอบด้วยเซลลูโลส เส้นใยแบ่งเป็น 3 แบบ คือ ไม่มีผนังกั้น มีผนังกั้นและมีนิวเคลียสอันเดียว และมีผนังกั้นและมีนิวเคลียสหลายอัน

รานอกจากมีรูปร่างเป็นเส้นใยและเป็นเซลล์เดี่ยวแล้ว บางชนิดยังมีรูปร่างสองแบบ (dimorphism) คือ ถ้าเจริญในดินหรือในอาหารเลี้ยงเชื้อที่อุณหภูมิห้องจะมีรูปร่างเป็นเส้นใย แต่ถ้าเจริญที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส หรือในร่างกาย host จะมีรูปร่างเป็นเซลล์เดียวแบบยีสต์ ได้แก่ ราที่ทำให้เกิดโรคต่าง ๆ เช่น กลาก เกลื้อน และที่ทำให้เกิดโรคกับธัญพืช เป็นต้น

เส้นใยของราที่เจริญแตกแขนงออกไป หรือไมซีเลียม แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ส่วนที่ยึดเกาะอาหาร (somatic หรือ vegetative mycelium) มีหน้าที่ดูดซึมอาหารที่ย่อยแล้วไปเลี้ยงทัลลัสส่วนต่าง ๆ และส่วนที่ยื่นไปในอากาศ (aerial หรือ reproductive mycelium) ทำหน้าที่สร้างสปอร์เพื่อการสืบพันธุ์ เส้นใยของราสามารถเปลี่ยนรูปร่างเพื่อทำหน้าที่พิเศษ ได้แก่ ไรซอยด์ (rhizoid) ซึ่งมีลักษณะคล้ายรากพืชยื่นออกมาจากไมซีเลียม ยึดให้ราติดกับผิวอาหาร และช่วยดูดซึมอาหาร ส่วนฮอสทอเรีย (haustoria) เป็นเส้นใยที่ยื่นเข้าเซลล์ host เพื่อดูดอาหารของ host พบในราที่เป็นปรสิตอย่างแท้จริง (นงลักษณ์ สุวรรณพินิจ และ ปรีชา สุวรรณพินิจ , 2547)

2.3.2 การสืบพันธุ์ของรา

รามีการสืบพันธุ์ 2 แบบ คือ การสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ และการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ

2.3.2.1 การสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ (asexual reproduction) ได้แก่

(1) การแตกหักเป็นท่อน ๆ (fragmentation) เส้นใยที่ฉีกขาดเป็นท่อน ๆ เจริญเป็นเส้นใยใหม่ได้

(2) การแตกหน่อ (budding) โดยเซลล์แม่มีส่วนยื่นออกมาเป็นหน่อเล็ก ๆ หน่อเจริญเติบโตขึ้นจนแยกจากเซลล์แม่

(3) การแบ่งตัว (fission) เซลล์แต่ละเซลล์จะคอดตรงกลาง แล้วแบ่งออกเป็นสองส่วน พบในยีสต์บางชนิด

(4) การสร้างสปอร์ (sporulation) สปอร์แบบไม่อาศัยเพศ (asexual spore) ของราเกิดขึ้นโดยการแบ่งไมโทซิส และไม่มีการรวมกันของนิวเคลียสของเซลล์ มีหลายชนิด คือ

ก) โคนิดิโอสปอร์ หรือโคนิเดีย (conidiospore หรือ conidia) เกิดที่ปลายเส้นใย มีทั้งขนาดเล็ก เรียกว่า ไมโครโคนิเดีย (microcronidia) และขนาดใหญ่ เรียกว่า แมโครโคดิเนีย (macroconidia)

ข) สปอร์แรงกิโอสปอร์ (sporangiospore) เกิดภายในถุงหรืออับสปอร์ (sporangium) ซึ่งอยู่ที่ปลายเส้นใยที่เรียกว่าสปอร์แรงกิโอฟอร์ (sporangiophore) สปอร์แรงกิโอสปอร์ที่เคลื่อนที่ได้ด้วยแฟกเจลลาเรียกว่า ซูโอสปอร์ (zoospore) ส่วนสปอร์ที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เรียกว่า อะพลาโนสปอร์ (aplanospore)

ค) อาร์โธรสปอร์ หรือออยเดีย (arthrospore หรือ oidia) เป็นสปอร์เซลล์เดียวที่เกิดจากเส้นใยหลุดออกมากลายเป็นสปอร์ ตัวอย่างเช่น *Coccidioides immitis*

ง) แคลมิโดสปอร์ (chlamydospore) เป็นสปอร์เซลล์เดียวผนังหนา คงทนต่อสภาพที่ไม่เหมาะสมได้ ตัวอย่างเช่น *Candida albicans*

จ) บลาสโตสปอร์ (blastospore) เกิดโดยการแตกหน่อของสปอร์เดิม

2.3.2.2 การสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ (sexual reproduction)

ออร์แกเนลล์ที่เกี่ยวกับเพศ เรียกว่า แกมีแทนเจียม (gametangium) ภายในมีเซลล์สืบพันธุ์ (gamete) แกมีแทนเจียมเพศผู้ เรียกว่า แอนเทอริเดียม (antheriduim) แกมีแทนเจียมเพศเมีย เรียกว่า โอโอโกเนียม (oogonium) และแอสโคโกเนียม (ascogonium)

วิธีสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศที่มีการรวมกันของนิวเคลียสเกิดได้หลายวิธี คือ

(1) การรวมกันของแกมีต (gametic copulation) มีการรวมกันของเซลล์สืบพันธุ์ ซึ่งแกมีตอันใดอันหนึ่งหรือทั้งสองอันอาจเคลื่อนที่ได้

(2) การรวมกันของแกมีต-แกมีแทนเจียม (gamete-gametangial copulation) โดยการที่แกมีแทนเจียม 2 อัน มาใกล้กันและสัมผัสกัน แต่ไม่เชื่อมกัน นิวเคลียสเพศผู้จะเคลื่อนที่ผ่านรู (fertilization tube) เข้าในแกมีแทนเจียมเพศเมีย

(3) การรวมกันของแกมีแทนเจียม (gametangial copulation) โดยแกมีแทนเจียม 2 อันมาเชื่อมกันได้ไซโกต ซึ่งจะเจริญเป็นไซโกสปอร์ (zygospore)

(4) การรวมตัวกันของโซมาติกเซลล์ (somatic copulation) โดยเกิดการเชื่อมกันของโซมาติกเซลล์ หรือเวเจเตตีฟเซลล์ โดยไม่สร้างอวัยวะเพศ

(5) สเปอร์มาไตเชชัน (spermatization) เป็นการรวมกันของเซลล์สืบพันธุ์เพศผู้เรียกว่า สเปอร์มาเตียม (spermatium) ซึ่งเป็นเซลล์เล็ก ๆ มีนิวเคลียสเดียว กับเซลล์สืบพันธุ์เพศเมียที่มีลักษณะเซลล์กลมใหญ่ในแอสโคโกเนียม โดยผ่านทางเส้นใยที่เรียกว่า ทริโคไจน์ (tricogyne)

สปอร์แบบอาศัยเพศที่เกิดจากการรวมกันของสองนิวเคลียสกลายเป็นไซโกตนิวเคลียส (zygote nucleus) ที่มีโครโมโซม 2n หลังจากนี้จึงแบ่งไมโอซิสได้นิวเคลียสที่มีโครโมโซม n กลายเป็นสปอร์ สปอร์แบบนี้มีจำนวนน้อยกว่าที่ได้จากสปอร์แบบไม่อาศัยเพศ สปอร์แบบอาศัยเพศมีหลายชนิด ได้แก่

(1) แอสโคสปอร์ (ascospore) เป็นสปอร์ที่เกิดภายในถุง (ascus) มักมี 8 แอสโคสปอร์ต่อ 1 ถุง พบใน class Ascomycetes

(2) เบสิดิโอสปอร์ (basidiospore) เป็นสปอร์ที่สร้างบนเบสิเดียม (basidium) โดยสร้างภายนอกที่ปลายก้านสเตอริกมา (sterigma) มักมี 4 สปอร์เกิดบนก้านแต่ละก้าน พบใน class Basidiomycetes

(3) ไซโกสปอร์ (zygospore) เป็นสปอร์ขนาดใหญ่ผนังหนา เกิดจากการรวมนิวเคลียสของเส้นใย 2 สายมาพบกัน พบในเชื้อ *Rhizopus*, *Mucor*

(4) โอโอสปอร์ (oospore) เป็นสปอร์ที่เกิดภายในโครงสร้างที่เรียกว่า โอโอโกเนียม (oogonium) เกิดจากการรวมนิวเคลียสของไข่หรือโอโอสเฟียร์ (oosphere) กับแกมีตเพศผู้ที่สร้างจากแอนเทอริเดียม พบใน class Oomycetes

สปอร์ทั้งแบบอาศัยเพศ และแบบไม่อาศัยเพศ ยังอาจมีโครงสร้างมาห่อหุ้ม เรียกว่า ฟรุตติงบอดีส์ (fruiting bodies) ฟรุตติงบอดีของการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ เช่น อะเคอวูลัส (acervulus) พิคนิเดียม (pycnidium) การสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ เช่น เพอริทีเดียม (perithecium) อะโพทีเดียม (apothecium) (นงลักษณ์ สุวรรณพินิจ และ ปรีชา สุวรรณพินิจ , 2547)

2.3.3 สปอร์

สปอร์ทำหน้าที่สำคัญ 2 ประการ คือ เป็นหน่วยแพร่กระจาย และเพื่อการอยู่รอด ราแต่ละชนิดส่วนใหญ่สร้างสปอร์ได้มากกว่า 1 แบบ เป็นไปได้ว่าสปอร์แต่ละแบบนั้นทำหน้าที่แตกต่างกัน ลักษณะของสปอร์เพื่อการแพร่กระจาย ต้องแยกออกจากเส้นใยแม่ได้ง่าย และมักจะมีกลไกพิเศษในการแยกตัว มีการสร้างเป็นจำนวนมากแต่มักมีขนาดเล็ก สามารถงอกได้ทันทีเมื่อตกลงในที่ที่มีอาหาร และมีรูปร่างหลากหลาย ลักษณะของสปอร์เพื่อการอยู่รอดมักติดแน่นอยู่กับเส้นใยแม่ มีการสร้างจำนวนไม่มาก แต่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ สามารถอยู่รอดในสภาพแวดล้อมได้ดี ผนังค่อนข้างหนา มีรูปร่างหลากหลาย

หลังจากที่สปอร์หลุดออกจากเส้นใยแม่แล้ว สปอร์เพื่อการแพร่กระจายส่วนใหญ่ไม่สามารถปลิวไปถึงที่หมายที่เหมาะสมทุกสปอร์ แต่บางสปอร์อาจไปถึงที่ที่มีสปอร์อื่นครอบครองอยู่แล้ว จึงอาจเกิดการผสมพันธุ์เนื่องจากสปอร์ที่มาใหม่มีเพศที่แตกต่างออกไป

2.3.3.1 การปลดปล่อยสปอร์

สปอร์เพื่อการอยู่รอดแยกตัวออกโดยการย่อยสลายของเส้นใยเดิม หรือจากฟรุตติงบอดีหลังจากที่อยู่ด้วยกันมานาน แต่สปอร์เพื่อการแพร่กระจายจะแยกตัวเร็วที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ อาจโดยกระแสลมพัดพา หรือมีกลไกของเอนไซม์ ทำให้เกิดรอยแยกระหว่างสปอร์กับก้านชูสปอร์

การปลดปล่อยสปอร์ที่ต้องอาศัยสิ่งแวดล้อม (passive spore dispersal) มี 2 วิธี ได้แก่ สปอร์เปียก และสปอร์แห้ง

(1) กลไกในการปล่อยสปอร์เปียก โดยการหยดออกจากปลายก้านชูสปอร์ มีการสร้างกลุ่มของสปอร์พร้อมของเหลวที่ปลายก้านชูสปอร์ ความยาวของก้านประมาณ 0.5-1 มิลลิเมตร ก้านทำหน้าที่ชูสปอร์เข้าหาตัวแพร่กระจายแล้วกระจายออกไปทั้งกลุ่ม พบในรา *Dictyostelium*, *Mucor*, *Ceratiocystis*, *Cephalosporium* และ *Fusarium*

ก) โดยการกระเด็นของน้ำ (ฝน) หยดน้ำฝนขนาด 0.2 - 5 มิลลิเมตร หยดลงมากระทบกับฟิล์มของน้ำลึก 0.1 มิลลิเมตร ด้วยความเร็ว 8 เมตรต่อวินาที สามารถทำให้เกิดหยดน้ำเล็ก ๆ ประมาณ 5,000 หยด พร้อมกับดึงเอาสปอร์กระเด็นขึ้นสู่อากาศ และไปได้ไกลเป็นวงกว้าง

ข) โดยละอองของหมอก ละอองหมอกที่ปลิวไปตามกระแสลมช่วยดูดสปอร์ให้หลุดติดไปได้

(2) กลไกการปล่อยสปอร์แห้ง สปอร์ที่แห้งลอยขึ้นสู่อากาศได้ง่ายเพราะไม่ติดอยู่กับผิวของส่วนของเส้นใยแม่ โดย

ก) การรบกวนด้วยแรงกล มีหลายกลไกที่เกี่ยวข้อง เช่น ลมที่ความเร็ว 0.2 - 0.4 เมตรต่อวินาที สามารถทำให้สปอร์หลุดได้ การลอยตัวขึ้นของลมที่ร้อนเพราะความร้อนจากแสงอาทิตย์ หยดฝนที่หยดลงมากระทบกิ่งไม้แล้วแกว่ง เขย่าให้สปอร์หลุดออก โดย Bellow mechanism (หยดน้ำที่หยดลงบนเห็ด puffballs แล้วมีผลให้เห็ดพ่นสปอร์เป็นจำนวนมาก) อาจโดย censor mechanism เกิดในราเมือก เมื่อลมพัดมาทำให้ก้านชูฟรุตติงบอดีสั่น หรืออาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นทำให้มีการบิดตัวของก้านชูสปอร์ในราน้ำค้าง หรือทำให้ elators ภายในฟรุตติงบอดีของราเมือกบิดตัวแล้วดีดสปอร์ออกไป เกิดได้ทั้งในราเมือก และราแกสทีโรมาซีตีสบางชนิด

ข) แรงดันของประจุไฟฟ้า ในสปอร์และก้านชูสปอร์มีประจุไฟฟ้า เมื่อสปอร์แก่จึงเกิดการผลักกันทำให้สปอร์หลุดไปได้

การปล่อยสปอร์ด้วยตนเอง (active spore dispersal) มีหลายขั้นตอน และมักเกี่ยวข้องกับราที่มีฟรุตติงบอดีขนาดใหญ่

(1) การแตกตัวของเซลล์ (bursting of turgid cells) เช่น การปลดปล่อยสปอร์ของรา *Nigrospora*, *Pilobolus*, *Sordaria*, *Neurospora* และ *Claviceps*

(2) การเปลี่ยนรูปร่าง (cell shape change) รา *Puccinia* สปอร์มีรูปร่างหลายเหลี่ยม เมื่อได้รับความชื้นจะเปลี่ยนรูปร่างเป็นทรงกลม ทำให้เกิดแรงดันและสปอร์แยกออกจากกัน หรือในรา *Sphaerobolus* มีดอกเห็ดคล้ายถ้วย เมื่อได้รับความชื้นส่วนของดอกที่เว้าจะนูนขึ้นแล้วเทสปอร์ให้หลุดออกไป

(3) สปอร์ที่มีแรงดันในตัวเอง (ballistotpore) พบในราเบสิดิโอมายโคตาหลายชนิด ส่วนของสปอร์กับสเตอริกมาจะขาดออกจากกันเมื่อสปอร์แก่ ส่วนของของเหลวไหลเข้าสู่สปอร์ ดันให้สปอร์กระเด็นไป พบในรา *Coprinus*

(4) การปล่อยซูโอสปอร์ออกจากสปอแรงเจียมต้องการความแตกต่างของแรงดันออสโมติก อาจเป็นแรงดัน hydrostatic ที่พบในรา *Pythium* และ *Phytophthora* หรือแรงดัน forcibly ในรา *Saprolegnia* และว่ายน้ำออกไปโดยตรงในรา *Allomyces*

2.3.3.2 การแพร่กระจายของสปอร์

ส่วนใหญ่ราแพร่กระจายโดยอาศัยกลไกที่เกิดจากสิ่งแวดล้อมเป็น passive mechanism เช่น โดยกระแสลม กระแสน้ำ แมลง พืช และสัตว์ใหญ่หลายชนิด

(1) สปอร์ที่แพร่โดยลม ส่วนใหญ่สปอร์แพร่โดยวิธีนี้ ราที่พบในอากาศบ่อย ๆ เช่น *Cladosporium* และ *Alternaria*

(2) การลอยตัวขึ้นของอากาศร้อน ลมม้วนตัวขึ้น และ Eddy diffusion อากาศร้อนลอยตัวสูงขึ้นพร้อมกับพาเอาสปอร์ลอยขึ้นตามแนวดิ่งสู่อากาศ ลมที่พัดผ่านวัตถุ เช่น พุ่มไม้ จะก่อให้เกิดการม้วนตัวแล้วช้อนเอาสปอร์ให้ลอยตัวขึ้นสู่เบื้องบน หลังจากที่สปอร์ที่ลอยตัวขึ้นแล้ว การเคลื่อนไหวของสปอร์จะไม่ลอยตัวเป็นเส้นตรง อาจขึ้นหรือลงเฉียงเป็นมุม และความเข้มข้นของสปอร์ก็จะแตกต่างกันออกไปในทิศทางจางลงเรื่อย ๆ เรียกการเคลื่อนที่ของสปอร์แบบนี้ว่า Eddy diffusion

(3) การกระจายโดยอาศัยการกระเด็นของน้ำฝน หยดเล็ก ๆ ของน้ำฝนที่กระเด็นหลังจากกระทบพื้น อาจไปไกลถึง 1 เมตร หยดฝนหลาย ๆ หยดสามารถพาสปอร์ไปไกลเกินกว่าจะคาดหมายได้ เช่น สปอร์ของรา *Cellototrichum*

(4) การกระจายโดยน้ำ ซูโอสปอร์ของราหลายชนิดสามารถว่ายน้ำไปได้ไกล ๆ ตามน้ำที่เคลือบบนผิวพืชหรือผิวดิน ซูโอสปอร์ของรา *Phytophthora* ว่ายน้ำไปเองหรือน้ำพาไหลไป บางส่วนน้ำจะพาให้กระจายออกไป ส่วนคอนิเดียของรา*น้ำ*พวกไฮโฟมายซีตีส กระแสน้ำจะเป็นตัวพาไหลไปโดยที่รูปร่างของสปอร์มีลักษณะเหมาะกับการลอยตัวไปตามน้ำ รูปร่างอาจเป็นเกลียว (sigmoid) หรือมี 4 ระยางค์ (tetraradiate) รอบสปอร์

(5) แพร่กระจายไปกับสัตว์ เช่น แมลงนำรา *Ophiostoma ulmi* ไปยังพืชต้นใหม่ รา *Claviceps* และ *Puccinia graminis* สร้างสารเหนียวล่อแมลงให้มาเกาะแล้วพาสปอร์ไป และรา *Pilobolus*, *Basidiobolus* ติดไปในท้องของสัตว์แล้วออกมาพร้อมกับมูลสัตว์

(6) ติดไปกับเมล็ดพันธุ์พืช โดยเฉพาะราสาเหตุโรคพืชหลายชนิดสามารถติดไปกับเมล็ดพันธุ์ได้ (นิวัฒ เสนาะเมือง, 2543)

2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของรา

2.3.4.1 ความต้องการธาตุอาหาร

ราต้องการอาหารเช่นเดียวกับสิ่งมีชีวิตอื่น วิธีการได้อาหารของราเป็นแบบ chemoheterotrophs โดยส่งเอนไซม์ (extracellular depolycymerase) ออกไปย่อยอาหารโดยเฉพาะอินทรีย์สาร แล้วดูดอาหารที่ย่อยได้ผ่านเข้าสู่เซลล์ ทางพลาสมาเมมเบรน (plasma membrane) จึงจัดได้ว่าราเป็นตัวย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพ และพบทุกหนทุกแห่ง (นิวัฒ เสนาะเมือง, 2543)

ราส่วนใหญ่ประกอบด้วยธาตุอโลหะ คือ คาร์บอน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และฟอสฟอรัส และธาตุโลหะ คือ โพแทสเซียม และแมกนีเซียม ธาตุเหล่านี้เป็นธาตุอาหารจำเป็นที่ราต้องการในปริมาณมาก โดยคาร์บอน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน และออกซิเจน

ถูกใช้ในโครงสร้างเซลล์ และธาตุทุกชนิดที่กล่าวถึงข้างต้นมีบทบาทในกระบวนการหายใจของเซลล์ (Moore-Landecker, 1990)

ธาตุอาหารสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ตามประเภทของสารประกอบคาร์บอน คือ ธาตุอาหารอนินทรีย์ และอินทรีย์ ธาตุอาหารอนินทรีย์เป็นอะตอมเดี่ยวหรือโมเลกุลที่ไม่ซับซ้อน ประกอบด้วยการรวมตัวของอะตอมกับคาร์บอน และไฮโดรเจน แหล่งของสารประกอบอนินทรีย์ตามธรรมชาติ คือ แร่ที่อยู่ในดิน น้ำ และในบรรยากาศโดยทั่วไป เช่น โลหะ และเกลือของโลหะ (เช่น แมกนีเซียมซัลเฟต และเฟอร์ริกไนเตรต) ก๊าซ (ก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์) และน้ำ ธาตุอาหารอินทรีย์ คือ โมเลกุลที่ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน และไฮโดรเจน ที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต ตั้งแต่โมเลกุลขนาดเล็ก เช่น มีเทน (CH_4) จนถึงโพลีเมอร์ขนาดใหญ่ (คาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน และกรดนิวคลีอิก) (Talaro และ Talaro, 2005)

1) <u>คาร์บอน</u>

ประมาณครึ่งหนึ่งของน้ำหนักแห้งของราประกอบด้วยคาร์บอน ซึ่งเป็นธาตุสำคัญของสารประกอบคาร์บอนภายในเซลล์ สารประกอบอินทรีย์ดังกล่าวเป็นทั้งองค์ประกอบของโครงสร้างเซลล์ และให้พลังงานกับเซลล์โดยกระบวนการออกซิเดชัน

ราเป็น heterotroph ที่ได้รับคาร์บอนในรูปของสารอินทรีย์จากสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ เช่น อยู่ในรูปของโปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และกรดนิวคลีอิก ส่วนใหญ่แล้วในสารประกอบเหล่านี้มีธาตุอื่น ๆ นอกเหนือจากคาร์บอนประกอบอยู่ด้วย ธาตุอาหารอินทรีย์บางชนิดอยู่ในรูปที่ราสามารถดูดซึมได้ แต่ธาตุอาหารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะต้องถูกย่อยให้เล็กลงก่อนดูดซึม (Talaro และ Talaro, 2005)

ปริมาณคาร์บอนที่ได้รับจากแหล่งคาร์บอนชนิดเดียว อาจไม่เพียงพอกับความต้องการของรา จึงจำเป็นต้องใช้สารประกอบอินทรีย์หลายชนิด เช่น น้ำตาล คาร์โบไฮเดรต และกรดอินทรีย์ ราต่างชนิดมีความสามารถในการใช้คาร์บอนต่างชนิดกัน เมื่อมีแหล่งคาร์บอนหลายชนิดในบริเวณแหล่งที่อยู่อาศัย จะทำให้ราเจริญเติบโตได้ดีกว่ามีเพียงชนิดเดียว เช่น เมื่อมีกาแลคโตส และกลูโคสผสมกัน จะทำให้ราเจริญเติบโตได้ดีกว่ากาแลคโตส หรือกลูโคสเพียงชนิดเดียว (Moore-Landecker, 1990)

ราส่วนใหญ่ต้องการใช้น้ำตาลกลูโคสเพื่อการเจริญเติบโต บทบาทสำคัญในขบวนการนำกลูโคสเข้าสู่เซลล์อยู่ที่โปรตีนที่มีความจำเพาะสูงที่ผนังเมมเบรน เป็นตัวช่วยย่อยสลายน้ำตาลแลคโตสให้เป็นน้ำตาลกลูโคส และกาแลคโตส แต่ราจะนำกลูโคสเข้าไปใช้ในการเจริญเติบโตก่อน เมื่อกลูโคสหมดลงจะสร้างโปรตีนที่สามารถนำกาแลคโตสเข้ามาใช้ได้ต่อไป

กรณีของน้ำตาลซูโครสก็เช่นเดียวกัน ต้องเปลี่ยนเป็นน้ำตาลกลูโคส และฟรุกโตส ราหลายชนิด เช่น *Rhizopus* และ *Sordaria* ไม่สามารถใช้น้ำตาลซูโครสได้ (นิวัฒ เสนาะเมือง, 2543)

2) ไนโตรเจน

ไนโตรเจนส่วนใหญ่อยู่ในรูปก๊าซไนโตรเจน (N_2) คิดเป็นร้อยละ 79 ของบรรยากาศโลก ธาตุไนโตรเจนประกอบอยู่ในโครงสร้างของโปรตีน ดีเอ็นเอ (DNA) อาร์เอ็นเอ (RNA) และเอทีพี (ATP) แหล่งไนโตรเจนของรา คือ ไนเตรต (NO_3^-) ไนไตรต์ (NO_2^-) แอมโมเนีย (NH_3) และกรดอะมิโน โดยมีเพียงแอมโมเนียที่สามารถรวมตัวกับคาร์บอนโดยตรง เพื่อสังเคราะห์กรดอะมิโนและสารประกอบอื่น ๆ (Moore-Landecker, 1990)

ไนโตรเจนอาจเป็นธาตุที่เป็นปัจจัยกำหนดการเจริญเติบโตของราได้ เนื่องจากราต้องการไนโตรเจนในปริมาณมาก ราไม่สามารถตรึงไนโตรเจน แต่สามารถใช้ไนโตรเจนจากแหล่งต่าง ๆ โดยมีปัจจัยพื้นฐานดังนี้

- ต้องการกรดอะมิโนเพียงชนิดเดียว เช่น ต้องการกรดกลูตามิก แล้วสามารถสังเคราะห์กรดอะมิโนอื่น ๆ ได้
- ราเกือบทุกชนิดสามารถใช้แอมโมเนียเป็นแหล่งไนโตรเจนได้
- ราบางชนิดใช้ไนเตรตเพียงอย่างเดียวเป็นแหล่งของไนโตรเจน แล้วจึงเปลี่ยนไนเตรตไปเป็นแอมโมเนีย แต่ราส่วนใหญ่เลือกใช้แอมโมเนียเป็นแหล่งไนโตรเจน เมื่อในแหล่งที่อยู่มีไนโตรเจน 2 ชนิดอยู่ด้วยกัน (นิวัฒ เสนาะเมือง, 2543)

3) ฟอสฟอรัส

แหล่งของฟอสฟอรัสอนินทรีย์ของรา คือ ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ซึ่งเป็นอนุพันธุ์ของกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) และพบในแร่และตะกอนแร่ในมหาสมุทร ฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบในการสร้างกรดนิวคลิอิก นิวคลีโอไทด์ เอทีพี ฟอสฟอลิปิด (phospholipids) และโคเอนไซม์ (coenzyme) เช่น NAD และ NADP (Talaro และ Talaro, 2005)

ฟอสเฟตหาได้ยากในสิ่งแวดล้อม เพราะส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ บางครั้งฟอสเฟตจึงเป็นปัจจัยจำกัดการเจริญเติบโต แต่ราสามารถดึงสารประกอบฟอสฟอรัสดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ ด้วยการปลดปล่อยเอนไซม์ phosphotase เพื่อแยกฟอสเฟตจากอินทรีย์สาร และปล่อยกรดอินทรีย์ให้มีสภาวะเป็นกรด เพื่อละลายฟอสเฟตที่เป็นสารอนินทรีย์ (นิวัฒ เสนาะเมือง, 2543)

4) ซัลเฟอร์

ซัลเฟอร์กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อมในรูปของแร่ หิน และตะกอน (เช่น ยิปซั่ม) โดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปซัลเฟต (SO_4^{2-}) ซัลไฟด์ (FeS) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และธาตุซัลเฟอร์ (S) ซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบในกรดอะมิโน (cysteine, cystine และ methionine) วิตามิน (thiamine และ biotin) และสารปฏิชีวนะ (penicillin และ gliotoxin) กรดอะมิโนที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบจะมีโครงสร้างที่มีเสถียรภาพ และทำให้เกิดรูปร่างของโปรตีนโดยการสร้างพันธะไดซัลไฟด์ (Moore-Landecker, 1990)

5) ธาตุอาหารที่ราต้องการในปริมาณน้อย (microelement หรือ trace element)

นอกจากธาตุอาหารหลักดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ราต้องการธาตุโลหะบางชนิดในปริมาณที่น้อยมากเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต เช่น เหล็ก สังกะสี ทองแดง แมงกานีส โมลิบดีนัม แคลเซียม และสตรอนเทียม ราต้องการธาตุอาหารดังกล่าวที่ความเข้มข้น 0.0001 - 0.5 ppm โดยมีบทบาทสำคัญในการทำงานของเอนไซม์ เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของวิตามิน และสารที่ใช้ในกระบวนการหายใจ (metabolite) ถ้าปริมาณธาตุอาหารเหล่านี้ไม่เพียงพอ จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อราตามบทบาทของธาตุอาหารชนิดนั้น

ราอาจดูดซึมธาตุโลหะบางชนิดที่เป็นพิษเมื่อความเข้มข้นสูง เช่น ปรอท นิกเกิล ยูเรเนียม และอื่น ๆ องค์ประกอบหลักของสารฆ่าราคือ ปรอท และทองแดง ในระดับความเข้มข้นที่เป็นพิษต่อรา จะรบกวนการขนส่งภายในเซลล์ ทองแดงที่ราดูดซึมเข้าไปในเซลล์อาจทำให้เกิดการกลายพันธุ์ (Moore-Landecker, 1990)

2.3.4.2 ปัจจัยทางกายภาพ

ราสามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะทางสิ่งแวดล้อมที่หลากหลาย เกิดจากความสำเร็จในเชิงนิเวศวิทยา โดยการปรับตัวซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ซับซ้อนในระดับชีวเคมี หรือพันธุกรรมเพื่อการอยู่รอดในระยะยาว และสามารถเจริญเติบโตในสิ่งแวดล้อมได้

1) อุณหภูมิ

เซลล์ของจุลชีพไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของเซลล์ แต่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงกว่าอุณหภูมิต่ำสุด กิจกรรมการหายใจของราจะถูกยับยั้ง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเกินค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ราทนได้เพียงเล็กน้อย ราจะหยุด

การเจริญเติบโต แต่ถ้าอุณหภูมิยังคงเพิ่มสูงขึ้นไปอีก เอนไซม์ และกรดนิวคลีอิกจะเสื่อมสภาพอย่างถาวร และทำให้เซลล์ตาย (Talaro และ Talaro, 2005)

ราสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามช่วงอุณหภูมิที่ราสามารถเจริญเติบโตได้ คือ psychrophile, mesophile และ thermophile ราประเภท psychrophile คือ ราที่อุณหภูมิช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตมีค่าต่ำกว่า 15 °ซ และโดยส่วนใหญ่แล้วไม่สามารถโตได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 20 °ซ พบในสิ่งแวดล้อมที่เย็นจัด มีน้ำแข็งหรือหิมะปกคลุมเป็นเวลาส่วนใหญ่ของทั้งปี เช่น ในอาร์คติก และในบริเวณยอดเขาสูง เช่น เทือกเขาแอลป์ ราประเภท mesophile เป็นรากลุ่มใหญ่ที่สุด ช่วงอุณหภูมิที่สามารถเจริญเติบโตได้อยู่ที่ประมาณ 10 - 40 °ซ อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้ราประเภทนี้มีอัตราการเจริญเติบโตสูงที่สุดอยู่ในช่วง 15 - 30 °ซ ราบางชนิดสามารถทนอุณหภูมิที่ต่ำถึง 0 - 5 °ซ และมีราเพียงไม่กี่ชนิดที่สามารถโตได้ที่อุณหภูมิ 35 - 40 °ซ แต่อัตราการเจริญเติบโตต่ำ และราประเภท thermophile ซึ่งมีปริมาณน้อย พบในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง เช่น บริเวณภูเขาไฟ อุณหภูมิต่ำสุดที่ราสามารถโตได้ คือ 20 °ซ หรือมากกว่า และอุณหภูมิสูงสุดมีค่ามากกว่า 50 °ซ (Moore-Landecker, 1990)

2) <u>ค่าพีเอช (pH)</u>

ราทุกชนิดต้องสัมผัสกับสารละลายทั้งในธรรมชาติ และในห้องปฏิบัติการ ค่าพีเอช หรือระดับความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย จึงเป็นอีกปัจจัยที่ควบคุมการเจริญเติบโตของรา โดยจะส่งผลต่อความสามารถในการส่งผ่านสารเข้าออกเซลล์ (Moore-Landecker, 1990) โดยค่าพีเอช 4 - 8 เป็นช่วงที่เหมาะสมกับการทำงานของเอนไซม์ ทำให้เป็นช่วงที่ราส่วนใหญ่มีอัตราการเจริญเติบโตสูง (นิวัฒ เสนาะเมือง, 2543)

3) <u>ความชื้น</u>

ราต้องการแหล่งที่อยู่ที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง อัตราการเจริญเติบโตของราสูงที่สุดที่ความชื้นสัมพัทธ์ 95 - 100 % มีราเพียงไม่กี่ชนิดที่สามารถโตได้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 65 % (Moore-Landecker, 1990)

4) <u>แสง</u>

แสงเป็นปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่พบได้ทั่วไป ผลกระทบของแสง คือ เมื่อมีค่าความเข้มของแสงสูง จะยับยั้งการเจริญเติบโตของรา แสงส่งผลต่อการสร้างโครงสร้างสืบพันธุ์ คือ โคนิเดีย หรือสปอร์ หรืออาจควบคุมการเคลื่อนที่ของโครงสร้างสืบพันธุ์ที่ตอบสนองต่อแสง (Moore-Landecker, 1990)

5) ก๊าซออกซิเจน

ราส่วนใหญ่ต้องใช้ก๊าซออกซิเจนใช้ในกระบวนการหายใจของเซลล์ (aerobe) เกิดกระบวนการออกซิไดซ์ ได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และพลังงาน ยกเว้นบางสกุล เช่น ยีสต์ ที่สามารถโตได้ในภาวะขาดออกซิเจน (anaerobe) โดยกระบวนการหมัก (fermentation) (นิวัฒ เสนาะเมือง, 2543)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Belanger และคณะ (2003) ทำการศึกษาเด็กทารก 849 คนในช่วงปีแรก โดยให้แม่ของเด็กที่ทำการศึกษาบันทึกวันที่เด็กเกิดอาการหายใจขัด และไอเรื้อรัง ตั้งแต่เด็กอายุ 2-4 เดือน จนเด็กมีอายุ 12 เดือน หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองที่เตียงเด็ก เก้าอี้ในห้องนั่งเล่น และพื้นห้องนั่งเล่น เก็บตัวอย่างสปอร์เชื้อราในอากาศในห้องนั่งเล่น และในห้องนอนเด็ก พบว่าในกลุ่มเด็กที่แม่เป็นหอบหืด (n = 256) อาการหายใจขัดและไอในเด็กทารกมีความสัมพันธ์กับปริมาณเชื้อรา ส่วนกลุ่มเด็กที่แม่ไม่เป็นหอบหืด ปริมาณเชื้อรามีความสัมพันธ์กับอาการไอ แต่ไม่สัมพันธ์กับอาการหายใจขัดของเด็กทารกอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ปัจจัยทางกายภาพภายในอาคาร ได้แก่ การระบายอากาศ ความชื้น อุณหภูมิ และวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างอาคาร รวมถึงลักษณะการใช้งาน มีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคสปอร์ของเชื้อรา

Meklin และคณะ (2002) ทำการศึกษาราอนุภาคขนาด 0.67 - >7 ไมโครเมตร ในอากาศภายในอาคารเรียน 32 แห่ง ในประเทศฟินแลนด์ โดยแบ่งประเภทอาคารเรียนเป็น 4 ประเภท ตามวัสดุโครงสร้างอาคาร คือ อาคารไม้ที่ไม่ถูกทำลายด้วยความชื้น อาคารไม้ที่ถูกทำลายด้วยความชื้น อาคารคอนกรีตที่ไม่ถูกทำลายด้วยความชื้น และอาคารคอนกรีตที่ถูกทำลายด้วยความชื้น พบว่า ทั้งในอาคารเรียนไม้และคอนกรีต พบอนุภาคเชื้อรามากที่สุดที่ขนาด 1.1 - 4.7 ไมโครเมตร ในอาคารที่ถูกทำลายด้วยความชื้นอนุภาคของเชื้อราขนาด 1.1 - 2.1 ไมโครเมตรมากกว่าในอาคารที่ไม่ถูกทำลายด้วยความชื้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) และอนุภาคของเชื้อราในอาคารไม้มีขนาดโดยเฉลี่ยเล็กกว่าในอาคารคอนกรีต ($p < 0.001$)

สุทธิพร แสนเรือง (2519) ทำการศึกษาเชื้อราในอากาศภายในและภายนอกอาคาร ที่บริเวณถนนหลานหลวง และอาคารพฤกษศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดย plate method

เปิด plate ในเวลา 11.00 น. เป็นเวลา 15 นาที ตั้งแต่เดือนมกราคม – ธันวาคม พ.ศ. 2518 ตั้งไว้ในห้องที่อุณหภูมิประมาณ 30 ± 2 °ซ เป็นเวลา 4 – 10 วัน ตรวจและจำแนกเชื้อรา พบราในอากาศคล้ายกันทั้ง 2 แห่ง และภายในและนอกอาคาร โดยราที่พบสูงที่สุด ได้แก่ *Cladosporium*, *Curvularia*, *Aspergillus* และ *Pullularia* ตามลำดับ

Jaffal และคณะ (1997) ทำการศึกษาเชื้อราภายในโรงพยาบาลแห่งหนึ่ง ในประเทศสหรัฐ-อาหรับเอมิเรสต์ เก็บตัวอย่างใน 7 แผนก ได้แก่ ห้องผ่าตัด แผนกผู้ป่วยวิกฤติ หอผู้ป่วยศัลยกรรมชาย หอผู้ป่วยศัลยกรรมหญิง หอผู้ป่วยอายุรกรรมชาย หอผู้ป่วยอายุรกรรมหญิง และหอผู้ป่วยสูติ-นรีเวชกรรม พบจำนวนเชื้อราใกล้เคียงกันในหอผู้ป่วย ยกเว้นภายในหอผู้ป่วยสูติ-นรีเวชกรรม พบเชื้อราน้อยที่สุด และยังพบว่าเชื้อราภายในหอผู้ป่วยหญิงมีปริมาณมากกว่าหอผู้ป่วยชาย สำหรับแผนกผู้ป่วยวิกฤตินั้นพบเชื้อราน้อยกว่าหอผู้ป่วยมาก และไม่พบเชื้อราในห้องผ่าตัด

Branis, Rezacava และ Domasova (2005) ตรวจวัดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10, 2.5 และ 1 ไมโครเมตร ภายในห้องบรรยายของมหาวิทยาลัย ในเมืองปราก ประเทศเชก เก็บตัวอย่างเป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยแบ่งเป็น 4 ช่วง คือ กลางวันในวันทำการ กลางคืนในวันทำการ กลางวันในวันหยุด และกลางคืนในวันหยุด พบความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมโครเมตรสูงสุดในเวลากลางวันของวันทำการ มีค่าสูงกว่าช่วงเวลาอื่นที่มีกิจกรรมน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่พบความแตกต่างของฝุ่นขนาดไม่เกิน 2.5 และ 1 ไมโครเมตร ระหว่างกลางวันกับกลางคืน และระหว่างวันทำการกับวันหยุด และเมื่อเปรียบเทียบค่าสัดส่วนฝุ่นภายในอาคารทั้ง 3 ขนาดกับฝุ่นขนาดไม่เกิน 10 ไมโครเมตรภายนอกอาคาร (I/O ratio) พบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างฝุ่นภายในและภายนอกสูง (I/O เข้าใกล้ 1) เมื่อไม่มีนักศึกษาในห้องบรรยาย และค่า I/O ของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมโครเมตร มีค่ามากกว่า 1 ในช่วงกลางวันของเวลาทำการ แสดงว่ามีแหล่งกำเนิดของฝุ่นละอองขนาดใหญ่ภายในห้องขณะมีการใช้งานห้อง บ่งชี้ว่ากิจกรรมภายในห้องมีบทบาทสำคัญต่อความเข้มข้นของฝุ่นขนาดใหญ่ (PM_{10}) ในห้องบรรยาย

Wang และคณะ (2006) ทำการศึกษาความเข้มข้นฝุ่นละอองในอากาศของโรงพยาบาล 4 แห่ง ในเมือง Guangzhou ประเทศจีน โดยพบว่ากิจกรรมของคนที่อยู่ในอาคารส่งผลต่อความเข้มข้นของฝุ่นละอองในห้อง โดยพบระดับความเข้มข้นสูงสุดภายในห้องตรวจ (treatment room) ที่มีผู้ป่วยหนาแน่นที่สุด และพบความเข้มข้นต่ำสุดภายในสำนักงานของแพทย์ (doctor office) ที่ไม่มีคนอยู่ นอกจากนี้ยังพบค่า I/O ในทุกห้องที่มีกิจกรรมพลุกพล่านมีค่ามากกว่า 1 ยกเว้นในสำนักงานแพทย์ที่ไม่มีกิจกรรม และในห้องฉุกเฉิน 1 แห่ง ที่มีความถี่ในการทำ

ความสะอาดสูงกว่าที่อื่น ทำให้ปริมาณฝุ่นละอองบนพื้นลดลง แสดงว่าในโรงพยาบาลซึ่งไม่มีแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองพิเศษชนิดอื่น กิจกรรมภายในอาคารเป็นแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองที่มีความสำคัญ เนื่องจากก่อให้เกิดการฟุ้งกระจายกลับ (resuspension) ของฝุ่นละอองที่ตกตะกอนอยู่บนพื้นผิวของพื้นห้อง และเฟอร์นิเจอร์ และการทำความสะอาดจะช่วยลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดใหญ่ในห้อง และลดอัตราการฟุ้งกระจายกลับได้

Pei และคณะ (2004) ทำการศึกษาปริมาณเชื้อราในบรรยากาศของประเทศไต้หวัน เมื่อเกิดเหตุการณ์พายุทรายในทะเลทรายของประเทศจีน โดยทำการเก็บตัวอย่างรายวันในช่วงเดือนธันวาคม 2000 ถึงเดือน เมษายน 2001 พบว่าในขณะที่เกิดพายุทราย ปริมาณฝุ่นละอองขนาดอนุภาคไม่เกิน 10 ไมโครเมตรในบรรยากาศของประเทศไต้หวันเพิ่มขึ้น จำนวนสปอร์ของเชื้อราในบรรยากาศเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่สัดส่วนของสปอร์ของเชื้อราชนิดต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ ขณะเกิดพายุทราย พบว่า Basidiospore และ *Penicillium/Aspergillus* เพิ่มจำนวนขึ้น แต่ *Periconia, Botrytis* และ *Fusarium* กลับมีจำนวนลดลง ในขณะที่ *Cladosporium* และ Ascospore เป็นเชื้อราชนิดที่มีจำนวนสปอร์มากที่สุดเป็นอันดับหนึ่งและสอง ของทั้งวันที่เกิดและไม่เกิดพายุทราย

Hargreaves และคณะ (2003) ทำการศึกษาอนุภาคและเชื้อราภายในอากาศในบ้าน 14 หลังในประเทศออสเตรเลีย โดยใช้ Regression ในการวิเคราะห์ผลทางสถิติ พบว่า อนุภาคขนาดตั้งแต่ 0.54-19.81 ไมโครเมตร มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณเชื้อราทั้งในสภาวะนอกอาคาร ($R^2 = 0.4$, $p = 0.03$) และภายในอาคาร ($R^2 = 0.3$, $p = 0.4$) ในขณะที่อนุภาคขนาด 0.007 - 0.808 ไมโครเมตรและอนุภาคขนาดต่ำกว่า 2.5 ไมโครเมตร ($PM_{2.5}$) ไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณเชื้อรา

Li และ Hou (2006) ทำการเก็บตัวอย่างอนุภาคขนาด 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1 และ 5 ไมโครเมตร แบคทีเรีย และเชื้อรา ภายในห้องที่ควบคุมความสะอาดภายในโรงพยาบาล ได้แก่ หอผู้ป่วยวิกฤติ (ICU) หน่วยปลูกถ่ายไขกระดูก (BMT) และห้องผ่าตัด (OR) พบว่าความเข้มข้นอนุภาคที่เตียงผู้ป่วยมีค่าสูงกว่าในอากาศอย่างมีนัยสำคัญ และความเข้มข้นของอนุภาคในห้องสัมพันธ์กับกิจกรรมในห้องและการผ่าตัด ซึ่งแสดงว่ากิจกรรมภายในห้องมีบทบาทส่งผลให้ความเข้มข้นของอนุภาคแต่ละห้องแตกต่างกัน นอกจากนี้พบปริมาณเชื้อราในหอผู้ป่วยวิกฤติสูงที่สุด ในห้องผ่าตัดรองลงมา และไม่พบเชื้อราในหน่วยปลูกถ่ายไขกระดูก โดยพบ *Penicillium* สูงที่สุด และไม่พบว่ามีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคและเชื้อรา