

ฉบับแปลไทย (Thai Translations)

Characterization of infectious aerosols in health care facilities: an aid to effective engineering controls and preventive strategies

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7132666/>

การอธิบายลักษณะของละอองลอยติดเชื้อในสถานพยาบาล: ตัวช่วยสำหรับการควบคุมทางวิศวกรรม (engineering controls) และกลยุทธ์วิธีการเชิงป้องกัน (preventive strategies) ที่มีประสิทธิภาพ

บทคัดย่อ (Abstract)

การประเมินกลยุทธ์วิธีการสำหรับการควบคุมทางวิศวกรรม (engineering controls) ในการป้องกันการแพร่กระจายของโรคติดเชื้อทางอากาศไปสู่ผู้ป่วยและบุคลากรทางการแพทย์ตลอดจนเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง จำเป็นจะต้องมีการพิจารณาเกี่ยวกับปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของละอองลอย (aerosol) ปัจจัยเหล่านี้ได้แก่ การก่อให้เกิดละอองลอย ขนาดและความเข้มข้นของอนุภาค ความสามารถมีชีวิตอยู่ได้ของจุลชีพ ความสามารถในการทำให้ติดเชื้อและความรุนแรง การไหลเวียนของอากาศและภูมิอากาศ ตลอดจนการเก็บตัวอย่างและการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างจากสิ่งแวดล้อม

จุดสนใจหลักในเรื่องความใส่ใจในการควบคุมทางวิศวกรรมมาจากการเพิ่มขึ้นของโรคติดเชื้อเมื่อไม่นานมานี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบรรดาเชื้อชนิดต่าง ๆ ที่ดื้อยาหลายขนาน (multidrug-resistant) ในประชากรทั่วไปของโรงพยาบาล ในผู้ที่มีภาวะภูมิคุ้มกันอ่อนแออย่างรุนแรง (severely immunocompromised) ตลอดจนในผู้ที่มีความเสี่ยงและอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่แออัด เช่น คอก สตางดูแลผู้ป่วยระยะยาว และที่พักสำหรับคนไร้บ้าน บุคลากรจำนวนมากมีการสัมผัสติดต่อกับผู้ที่ติดเชื้อโรคที่ยัง active อยู่ ที่ไม่ได้รับการตรวจวินิจฉัย หรือที่ไม่ได้รับการรักษาอย่างเพียงพอ นอกจากนี้แล้วผู้ป่วยและบุคลากรทางการแพทย์ก็ยังสามารถสัมผัสกับเชื้อไวรัสที่ก่อโรคในมนุษย์ชนิดต่าง ๆ เชื้อราอหิวาต์ ตลอดจนเชื้อแบคทีเรีย ดังนั้นรายงานชิ้นนี้จึงมุ่งเน้นไปที่ลักษณะของการแพร่กระจายละอองลอยติดเชื้อ ในความพยายามที่จะค้นหาว่าปัจจัยใดบ้างที่สามารถได้รับการจัดการแก้ไขอย่างเป็นระบบ เพื่อให้เกิดวิธีการทางวิศวกรรมที่ได้รับการประยุกต์ และได้รับการพิสูจน์ในการควบคุมละอองลอยติดเชื้อในโรงพยาบาล และในสิ่งแวดล้อมของสถานพยาบาล ละอองลอยติดเชื้อที่ได้รับการพิจารณาได้แก่ละอองลอยติดเชื้อที่เป็นอนุภาคที่มีขนาดที่สามารถหายใจเข้าสู่ร่างกายได้ ซึ่งเกิดจากมนุษย์และแหล่งที่มาต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อม และมีความสามารถในการที่ยังคงมีชีวิตอยู่รอดได้ และลอยตัวในอากาศในช่วงระยะเวลาที่ยืดออกไปในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร คำจำกัดความนี้ไม่รวมถึงการสัมผัสกับผิวหนังและเยื่อเมือก ที่เกิดจากการกระเด็นเปื้อนเลือด

หรือของเหลวต่าง ๆ จากร่างกายที่มีเชื้อโรคอยู่ (ไม่ใช่ละอองลอยจริง) ไม่มีการศึกษาวิจัยทางด้านระบาดวิทยาหรือในห้องปฏิบัติการที่บันทึกว่ามีการแพร่กระจายของเชื้อไวรัสในเลือดในรูปแบบของละอองลอย (AJIC Am J Infect Control 1998;26:453-64)

ในระหว่างปี พ.ศ. 2539 มีการรายงานเกี่ยวกับผู้ป่วยวัณโรคจำนวนทั้งสิ้น 21,337 ราย (8.0 รายต่อประชากร 100,000 คน) ไปยังศูนย์ควบคุมและป้องกันโรคแห่งสหรัฐอเมริกา (CDC) จาก 50 รัฐ รวมทั้งจากเขตปกครองพิเศษโคลัมเบียและกรุงวอชิงตัน และยอดรวมนี้เป็นตัวแทนของการลดลง 6.7% จากในปี พ.ศ. 2538 (8.7 รายต่อประชากร 100,000 คน) ถึงแม้ว่าจำนวนของผู้ป่วยวัณโรคมีการลดลงถึง 4 ปีรวด แต่อุบัติการณ์ของวัณโรคสำหรับปี พ.ศ. 2539 ก็สูงเกินตัวเลขเป้าหมายในการกำจัดวัณโรคทั้งประเทศ ความชุกของการติดเชื้อวัณโรคยังคงสูงขึ้นสำหรับผู้ที่เกิดในต่างประเทศและในกลุ่มชนกลุ่มน้อย และยังคงเป็นปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งทางด้านการสาธารณสุข

นอกจากนี้ผู้ติดเชื้อที่ไม่ได้รับการรักษาวัณโรคจนครบก็มีการพัฒนาสายพันธุ์ดื้อยาหลายขนาน (multidrug-resistant strains) ของเชื้อปฐมภูมิที่เป็นสาเหตุ คือเชื้อ *Mycobacterium tuberculosis* ตามข้อมูลของศูนย์ควบคุมและป้องกันโรคแห่งสหรัฐอเมริกา การติดเชื้อรายใหม่แทบจะทั้งหมดในประเทศปัจจุบันนี้เกิดขึ้นผ่านทางละอองลอยจากผู้ติดเชื้อที่ไอและกระจายนิวเคลียสของละอองฝอยที่ทำให้ติดเชื้อ (infective droplet nuclei) เข้าสู่ทางเดินหายใจ บุคลากรทางการแพทย์และเจ้าหน้าที่อื่น ๆ ที่มีการสัมผัสติดต่อกับประชากรที่กักตัวและประชากรที่แพร่เชื้อวัณโรคล้วนมีความเสี่ยงสูงต่อการติดเชื้อ ก่อนปี พ.ศ. 2533 การระบาดของวัณโรคที่ดื้อยาหลายขนานเป็นสิ่งที่ไม่ปกติธรรมดา แต่นับตั้งแต่นั้นมาก็มีการรายงานเกี่ยวกับการระบาดมากกว่า 10 ครั้ง โดยที่ทั้งหมดเกิดขึ้นในบรรดาโรงพยาบาลและคุกในฟากตะวันออกของสหรัฐอเมริกา การที่มีผู้ป่วยวัณโรคระยะ active อยู่ใกล้ ๆ กับผู้ป่วยที่มีภูมิคุ้มกันอ่อนแอ (immunocompromised) ในหออภิบาลที่จัดไว้สำหรับผู้ป่วยเอชไอวีได้นำไปสู่การติดเชื้อของผู้ป่วยเอชไอวีและวัณโรคชนิดดื้อยาหลายขนาน (multidrug-resistant TB) ผู้ซึ่งบ่อยครั้งที่โรควัณโรคของเขาเป็นไปโดยที่ไม่เป็นที่รับทราบ การระบาดในโรงพยาบาลจากการติดเชื้อ *M tuberculosis* ที่ดื้อยาหลายขนานในประเทศสเปนในช่วงระหว่าง 45 เดือนทำให้เกิดการติดเชื้อทั้งในผู้ป่วยและในบุคลากรทางการแพทย์

ในหน่วยดูแลผู้ป่วยวิกฤต 31% ของเจ้าหน้าที่โรงพยาบาล (14 คนจากจำนวน 45 คน) ที่รับสัมผัสในช่วงระหว่างเวลา 5 วันกับผู้ป่วยวัณโรคระยะ active รายหนึ่งที่ไม่ได้รับการตรวจวินิจฉัยเกิดการติดเชื้อขึ้น และพัสดิรายหนึ่งที่ได้รับยากดภูมิคุ้มกัน (immunosuppressive) มีการติดเชื้อวัณโรคชนิดร้ายแรงอย่างรุนแรงและรวดเร็วจากผู้ต้องขังที่ติดเชื้อเอชไอวี วัณโรคได้รับการประกาศให้เป็นการติดเชื้อประจำในศูนย์ดูแลผู้สูงอายุไปแล้ว

วัณโรคเป็นโรคติดเชื้อที่รุนแรงที่ส่วนใหญ่เกิดในปอด มีสาเหตุมาจากเชื้อ *M tuberculosis* และเชื้อ *Mycobacterium africanum* ซึ่งส่วนมากมาจากมนุษย์ และเชื้อ *Mycobacterium bovis* ซึ่งส่วนมากมาจากปศุสัตว์ ผู้ที่ติดเชื้อเอชไอวีก็มีแนวโน้มในการติดเชื้อมายโคแบคทีเรีย (mycobacteria) ชนิดอื่น ๆ อีกด้วย ซึ่งได้แก่เชื้อ *Mycobacterium avium* เชื้อ *Mycobacterium intracellulare* และเชื้อ *Mycobacterium scrofulaceum* วัณโรคเกิดขึ้นเมื่อนิวเคลียสของละอองฝอย (droplet nuclei) ที่แขวนลอยอยู่ในอากาศ ซึ่งมีหน่วยของเชื้อโรคติดเชื้อมากกว่าสามหน่วยหรือแม้แต่หน่วยเดียวสามารถผ่านกลไกการกำจัดอนุภาคในหลอดลม (bronchial mucociliary apparatus) ไปถึงช่องอากาศส่วนปลาย (terminal air space) และเพิ่มจำนวนมากขึ้นในบริเวณนี้ การติดเชื้อในปอดโดยปกติเริ่มต้นขึ้นในส่วนล่างของ lower lobe, middle lobe, lingula, และส่วนด้านหน้าของ upper lobes และในผู้ติดเชื้อส่วนใหญ่จะมีจุดสนใจเริ่มต้นจุดเดียว แต่ผู้ติดเชื้อหนึ่งในสี่หรือมากกว่านั้นมีการแสดงให้เห็นถึงจุดสนใจหลายจุด (multiple foci) เชื้อแบคทีเรียบาซิลลัสถูกจับกินโดยเซลล์ alveolar macrophages แต่ก็ยังคงมีการเจริญเติบโตเพิ่มจำนวน และแพร่กระจายไปสู่ต่อมน้ำเหลืองในบริเวณนั้น ที่ซึ่งการลุกลามของโรคอาจจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วหรือหลายปีหลังจากนั้น ในเด็กและผู้สูงอายุจุดสนใจเบื้องต้น (primary focus) อาจกลายเป็นบริเวณที่มีการลุกลามของโรคปอดบวมก็ได้

นอกจากวัณโรคแล้วผู้ป่วยในโรงพยาบาลและบุคลากรทางการแพทย์ตลอดจนเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องก็ยังคงมีความเสี่ยงในการติดเชื้อโรคอื่น ๆ ที่แพร่กระจายเชื้อทางอากาศในสิ่งแวดล้อมภายในอาคาร ซึ่งรวมถึงการติดเชื้อไวรัส (ไข้หวัดใหญ่ หัด อีสุกอีใส) การติดเชื้อคลาไมเดีย (โรคซิตาโคซิส) การติดเชื้อแบคทีเรีย (โรคปอดอักเสบสตีเจียนเนอร์) และการติดเชื้อรา (โรคติดเชื้อราแอสเปอริลโลซิส) การติดเชื้อหัดอย่างรุนแรงที่แพร่กระจายเชื้อทางอากาศมีการแสดงให้เห็นในการแพร่ระบาดในเวชปฏิบัติกุมารเวชศาสตร์ในคลินิกเอกชนแห่งหนึ่ง เมื่อเด็กผู้ชายอายุ 12 ปี ที่เป็นโรคหัดมีอาการไออย่างรุนแรง ต่อมาเมื่อผู้ติดเชื้อทุติยภูมิ (secondary cases) เกิดขึ้นจำนวน 7 รายด้วยกัน 4 รายมีการสัมผัสติดต่อโดยบังเอิญ (transient contact) ก่อนหน้านั้นกับผู้ป่วยรายแรกในขณะที่ผู้ป่วยรายนี้กำลังเข้าสู่คลินิกหรือกำลังออกจากคลินิก ส่วน 3 รายที่เหลือได้เข้าไปในคลินิกแห่งนั้นหลังจากที่ผู้ป่วยรายแรกได้ออกไปแล้วนานถึง 1 ชั่วโมง ผลจากการตรวจวิเคราะห์การไหลของอากาศในเวลาต่อมาได้แสดงให้เห็นว่ามีนิวเคลียสของละอองฝอย (droplet nuclei) เกิดขึ้นตลอดทั่วทั้งห้องนั้น บุคลากรที่เกี่ยวข้องโดยตรงในการดูแลผู้ป่วยโรคระบบทางเดินหายใจ อย่างเช่น โรคซิตาโคซิสจากเชื้อ *Chlamydia psittaci* หรือโรคปอดบวมจากเชื้อ *Chlamydia pneumoniae* มีความเสี่ยงในการติดเชื้อจากละอองลอยเหล่านี้ ในระหว่างการระบาดของโรคซิตาโคซิสในมลรัฐลุยเซียนาเมื่อปี พ.ศ. 2486 มีผู้เสียชีวิตจำนวน 8 รายในบรรดาเจ้าหน้าที่พยาบาลที่ได้รับการวินิจฉัยว่าติดเชื้อจำนวนทั้งสิ้น 19 คน

ระบาดวิทยาของโรคปอดอักเสบลีเจียนแนร์ (Legionnaires' disease) ที่ติดเชื้อในโรงพยาบาลไม่ได้มีการชี้แจงรายละเอียดไว้มากสักเท่าใดนัก มีการประมาณการกันว่ามีผู้ที่ป่วยเป็นโรคนี้จำนวน 10,000 ถึง 15,000 คนในแต่ละปีในสหรัฐอเมริกา นอกจากนี้ก็ยังมีผู้ที่ติดเชื้อและมีอาการเล็กน้อยหรือไม่มีอาการใด ๆ เลยอยู่จำนวนหนึ่งซึ่งไม่ทราบตัวเลขชัดเจน ในจำนวนผู้ป่วยที่ได้รับการวินิจฉัยว่าป่วยเป็นโรคปอดอักเสบลีเจียนแนร์นี้มีอยู่ประมาณ 5% ถึง 15% ที่มีอาการร้ายแรง ในบรรดาผู้ป่วยโรคปอดอักเสบลีเจียนแนร์ที่ติดเชื้อในโรงพยาบาลที่รายงานในประเทศอังกฤษและเวลส์ในระหว่างปี พ.ศ. 2523 ถึง พ.ศ. 2535 จำนวน 196 ราย พบว่า 69% เกิดขึ้นในระหว่างการระบาดในโรงพยาบาลจำนวน 22 ครั้ง และ 9% ของผู้ป่วยเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาอย่างน้อย 6 เดือนก่อนหรือหลังการแพร่ระบาดในโรงพยาบาล อีก 13% อยู่ในโรงพยาบาลที่มีการระบุตัวผู้ป่วยโรคนี้รายอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นประปรายเป็นจุด ๆ (ไม่ใช่การแพร่ระบาด) มีเพียง 9% เท่านั้นที่เกิดขึ้นในสถาบันหรือหน่วยงานที่ไม่มีการแพร่ระบาดหรือที่มีผู้ป่วยโรคนี้เกิดขึ้นประปรายเป็นจุด ๆ ที่เพิ่มเข้ามา

สัดส่วนโดยรวมของโรคปอดบวมที่เกิดขึ้นในโรงพยาบาลที่มีสาเหตุมาจากเชื้อ *Legionella* ในอเมริกาเหนือยังไม่ได้รับการระบุ ถึงแม้ว่าโรงพยาบาลแต่ละแห่งได้มีการรายงานว่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0% ถึง 14% เนื่องจากสำหรับโรงพยาบาลส่วนใหญ่ในสหรัฐอเมริกาแล้วการตรวจวินิจฉัยการติดเชื้อ *Legionella* นี้โดยปกติทั่วไปไม่ได้มีการดำเนินการกับผู้ป่วยทุกคนที่ได้รับเชื้อวัณโรคจากในโรงพยาบาล ค่าช่วงตัวเลขนี้อาจจะเป็นการประมาณการอุปติการณ์ของโรคปอดอักเสบลีเจียนแนร์ที่ต่ำกว่าความเป็นจริง (underestimate)

โรงพยาบาลระดับตติยภูมิตามขนาด 850 เตียงในสังกัดมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่งได้รับการสังเกตการณ์ติดตามสำหรับระบาดวิทยาของโรคติดเชื้อราแอสเพอร์จิลลัสที่ปอดชนิดรุกราน (invasive aspergillosis) ในช่วงระหว่างการก่อสร้างโรงพยาบาล ตัวอย่างจากผู้ป่วยจำนวน 153 คนได้รับการสังเกตการณ์ติดตามโดยวิธีการตรวจหาแอนติเจนและเพาะเลี้ยงเชื้อ *Aspergillus* และมีการพบผู้ป่วยโรคนี้จำนวน 24 รายในระหว่างช่วงเวลา 1 ปี ซึ่งในจำนวนนี้มีอยู่ 7 รายที่เป็นการติดเชื้อจากโรงพยาบาล

การอธิบายลักษณะของละอองลอย (AEROSOL CHARACTERIZATION)

การประเมินลักษณะในการติดเชื้อโดยทางอากาศจำเป็นจะต้องมีการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดละอองลอย รวมทั้งขนาดของอนุภาค คุณสมบัติทางด้านอากาศพลศาสตร์ ความเข้มข้น ความสามารถในการทำให้ติดเชื้อและความรุนแรง ตลอดจนความสามารถมีชีวิตอยู่ได้ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยทางด้านภูมิอากาศ (อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์)

การเกิดละอองลอยชีวภาพ (Bioaerosol generation)

แหล่งกำเนิดจากมนุษย์ (Human source)

การติดเชื้อในระบบทางเดินหายใจส่วนใหญ่ (เชื้อมัคโคแบคทีเรีย เชื้อไวรัส) เกิดจากการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศจากแหล่งกำเนิดจากมนุษย์ผ่านทางหายใจเอานิวเคลียสของละอองฝอย (droplet nuclei) เข้าสู่ร่างกาย นิวเคลียสของละอองฝอยที่ว่าเป็นอนุภาคติดเชื้อซึ่งมีขนาดเล็ก (เล็กกว่า 6 ไมครอน) ของสารคัดหลั่งจากระบบทางเดินหายใจซึ่งกลายเป็นละอองลอยโดยการไอ การจาม การพูดคุ้ย หรือการร้องเพลง ศูนย์ควบคุมและป้องกันโรคของสหรัฐอเมริกาได้ประมาณการว่าขนาดของนิวเคลียสละอองฝอยที่นำพาเชื้อวัณโรค bacilli อยู่ระหว่าง 1 ถึง 5 ไมครอน

การไอหนึ่งครั้งสามารถผลิตนิวเคลียสละอองฝอย (droplet nuclei) ได้ประมาณ 3000 นิวเคลียส ซึ่งเป็นปริมาณที่เท่ากับที่มาจากจากการพูดคุ้ยกันเป็นเวลา 5 นาที การจามหนึ่งครั้งสามารถผลิตละอองฝอยได้มากถึง 40,000 ละออง ซึ่งสามารถระเหยกลายเป็นละอองที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 12 ไมครอน ศูนย์ควบคุมและป้องกันโรคของสหรัฐอเมริการะบุว่าจำนวนของเชื้อมัคโคแบคทีเรีย (mycobacteria) ที่ถูกขับเข้าสู่อากาศจากผู้ที่เป็นวัณโรคมีสหสัมพันธ์กับปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งรวมถึงการมีอาการไอ (หรืออาการอื่น ๆ ที่เป็นการขับละอองออกทางระบบทางเดินหายใจโดยแรงและเฉียบพลัน) และความสมัครใจหรือความสามารถของผู้ป่วยในการที่จะปิดปากขณะที่ไอ อนุภาคที่มีขนาดโตกว่านิวเคลียสละอองฝอยที่ตกจากอากาศก็ยังมีศักยภาพในการที่จะแขวนตัวลอยอยู่ในอากาศภายในอาคารได้ใหม่อีกหลังจากที่มีขนาดเล็กลงจากการระเหยของละอองฝอย ร่วมกับกิจกรรมที่ก่อละอองลอยเช่นการปูเตียง การศึกษาละอองลอยในห้อง (chamber) ได้แสดงให้เห็นถึงการแพร่กระจายตัวทางอากาศของเชื้อ *Staphylococcus aureus* ที่เกิดจากกิจกรรมการผ่าตัดลำไส้ใหญ่ที่เชื่อมโยงกับการติดเชื้อในแผลของผู้ป่วยจำนวน 11 ราย

แหล่งกำเนิดจากสิ่งแวดล้อม (Environmental source)

จุลชีพของโรคติดเชื้อฉวยโอกาสที่แพร่กระจายทางอากาศที่เล็ดรอดกระจายออกมาจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อมเป็นความวิตกกังวลมานานแล้วเกี่ยวกับการติดเชื้อในโรงพยาบาลและเวชปฏิบัติการจำกัดควบคุมการติดเชื้อในโรงพยาบาล การดูแลสุขภาพสำหรับผู้ที่ย่อยง่ายต่อการติดเชื้อและเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องก็มีความเสี่ยงต่อการติดเชือนั้นเช่นกัน

แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศในสถานพยาบาลได้แก่เชื้อ **streptococci** กลุ่ม **A** เชื้อ ***S aureus*** เชื้อ ***Neisseria meningitidis*** และเชื้อ ***Bordetella pertussis*** การแพร่ระบาดของเชื้อ ***S aureus*** ที่ดื้อยา **methicillin** ในหน่วยดูแลผู้ป่วยวิกฤตมีความเชื่อมโยงกันกับท่อระบายอากาศของระบบการระบายถ่ายเทอากาศของห้องแยกผู้ป่วยติดเชื้อทางอากาศที่อยู่ติดกัน โรคปอดอักเสบลิเจียนแนร์ (**Legionnaires' disease**) เกิดขึ้นจากการรับสัมผัสกับละอองลอยที่เกิดจากหอระบายความร้อนที่มีการปนเปื้อน นอกจากนี้แล้วเชื้อ ***Legionella pneumophila*** ที่เป็นสาเหตุก็ได้รับการแยกจากละอองลอยที่เกิดจากก๊อกน้ำและฝักบัวอาบน้ำโดยใช้เครื่องเพิ่มความชื้นในอากาศ (**humidifiers**) และเครื่องพ่นละอองยา (**nebulizers**) และโดยการบีบอุปกรณ์เครื่องช่วยหายใจชนิดมือบีบ (**manual ventilation bags**)

เชื้อราได้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการติดเชื้อจากสิ่งแวดล้อมในโรงพยาบาลมานานแล้ว แหล่งที่มาของสปอร์ของเชื้อ ***Aspergillus*** ในสถานพยาบาลได้รับการระบุว่าได้แก่การก่อสร้างกลางแจ้ง การก่อสร้างภายในตัวอาคารและกระเบื้องเพดาน เครื่องปรับอากาศ และพรมที่ปนเปื้อน แหล่งที่มาอื่น ๆ ของเชื้อ ***Aspergillus*** ชนิดต่าง ๆ ที่เป็นไปได้ในสิ่งแวดล้อมได้แก่ ส่วนประกอบของระบบเครื่องทำความร้อน ระบบการระบายถ่ายเทอากาศ และระบบเครื่องปรับอากาศ ซึ่งรวมทั้งไส้กรอง ระบบคอนเดนเสท คอยล์ระบบหล่อเย็นระบายความร้อน ท่ออากาศเข้า ตลอดจนฉนวนที่เป็นรูพรุนในท่อแอร์ที่มีการปนเปื้อน นอกจากนี้แล้วโรคติดเชื้อราแอสเพอร์จิลโลซิส (**aspergillosis**) ในผู้ป่วยที่มีความเสี่ยงสูงมีภูมิคุ้มกันต่ำหรือได้รับการกดภูมิคุ้มกัน (**immunosuppressed**) ก็มีความสัมพันธ์กันกับแหล่งเก็บเชื้ออื่น ๆ ในสิ่งแวดล้อมของโรงพยาบาล รวมทั้งมูลนกในท่อแอร์ที่เพิ่มความเสี่ยงแก่พื้นที่ของผู้ป่วย ตลอดจนวัสดุกันไฟหรือไม้เปียกชื้นที่ปนเปื้อน อัตราการเสียชีวิตตามที่รายงานว่ามีสาเหตุมาจากโรคติดเชื้อราแอสเพอร์จิลโลซิสที่ปอดชนิดรุกราน (**invasive pulmonary aspergillosis**) มีการเปลี่ยนแปลงผันแปรขึ้นอยู่กับประชากรผู้ป่วยที่ศึกษา อัตราสูงถึง **95%** ในบรรดาผู้ที่ได้รับการปลูกถ่ายไขกระดูกจากเซลล์ที่มีลักษณะทางพันธุกรรมแตกต่างกัน (**allogeneic bone-marrow transplants**) และผู้ป่วยโรคไขกระดูกฝ่อ (**aplastic anemia**) เปรียบเทียบกับอัตรา **13%** ถึง **80%** ในผู้ป่วยโรคมะเร็งเม็ดเลือดขาว (**leukemia**)

นิเวศวิทยาของจุลินทรีย์ (**Microbial ecology**)

อาคารทุกหลังแต่ละหลังมีนิเวศวิทยาหรือความสัมพันธ์ระหว่างจุลินทรีย์กับสภาพแวดล้อม ซึ่งศักยภาพในการก่อให้เกิดผลกระทบทางด้านสุขภาพต่อมนุษย์สามารถจะถูกทำให้ลดน้อยลงที่สุดได้โดยการออกแบบ การก่อสร้าง การใช้งาน การบำรุงรักษา ตลอดจนการทำความสะอาดอย่างถูกต้องเหมาะสม ที่มีความสำคัญมากที่สุดก็คือขอบเขตปริมาณและการคงอยู่ของความชื้นในวัสดุก่อสร้างและวัสดุตกแต่งต่าง ๆ ถ้าหากว่าความชื้นสัมพัทธ์ไม่ได้รับการควบคุม หรือเกิดการรั่วซึม เกิดน้ำท่วมขัง หรือระบบการกำจัดน้ำเสียไม่ได้รับการซ่อมแซมแก้ไขทันทีและอย่างถูกต้อง

เหมาะสม ผลที่จะตามมาคือการเกิดระบบนิเวศวิทยาของจุลินทรีย์ที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะปล่อยให้มีการเพิ่มจำนวนมากขึ้นไปและการแพร่กระจายของเชื้อราและแบคทีเรียชนิดต่าง ๆ ที่มีศักยภาพในการทำให้เกิดเชื้อฉวยโอกาสในโรงพยาบาล

จุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ มีการเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนบนพื้นผิวที่มีความชื้นและภายในเนื้อวัสดุที่เป็นรูพรุน ปริมาณของน้ำบริสุทธิ์ (**free water**) ที่มีอยู่สำหรับการเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์เหล่านี้นบนพื้นผิวหรือในสิ่งแวดล้อมจุลภาค (เช่น แผ่นผนัง กระเบื้องปูเพดาน พรม) ได้รับการอธิบายว่าเป็น **water activity (a_w)** คือ อัตราส่วนของความดันไอ (**vapor pressure**) ของพื้นผิวหารด้วยความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ (**free water**) ในสภาวะมาตรฐาน ค่า **water activity (a_w)** ที่เพิ่มสูงขึ้นจากความชื้นสัมพัทธ์ที่สูง การรั่วซึม หรือน้ำท่วม ถ้าหากว่าปล่อยให้คงอยู่นานเกิน 24 ชั่วโมง ก็จะทำให้สิ่งแวดล้อมตามปกติของสิ่งแวดล้อมจุลภาค (**microenvironment**) หรือของอาคารทั้งหลังเกิดการเปลี่ยนแปลงไปโดยมีการแข่งขันกันของจุลินทรีย์ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความโดดเด่น (**predominance**) ของจุลินทรีย์หนึ่งชนิดหรือมากกว่าหนึ่งชนิดที่อาจจะสามารถสร้างผลกระทบความเสียหายต่อวัสดุต่าง ๆ และต่อสุขภาพอนามัยได้

เชื้อราส่วนมากมีความต้องการ **water activity (a_w)** ต่ำสุดอย่างน้อย 0.88 อย่างไรก็ตามเชื้อราบางชนิดมีขีดจำกัดล่าง (**lower limit**) อยู่ที่ 0.66 ถึง 0.70 ซึ่งหมายถึงว่าพวกมันต้องการน้ำน้อยมากในการเจริญเติบโตเพิ่มจำนวน เชื้อราชนิด *Aspergillus* และ *Penicillium* ที่ติดเชื้อแบบฉวยโอกาส ก่อสารพิษ (**toxigenic**) และก่อภูมิแพ้ (**allergenic**) เป็นตัวแทนที่ดีที่สุดของบรรดาเชื้อราที่ชอบสภาพแห้ง (**xerophilic fungi**) เหล่านี้ ในทางตรงกันข้ามสิ่งแวดล้อมจุลภาคที่เปียกชื้นเป็นอย่างมากโดยเฉพาะที่มีวัสดุที่ทำมาจากเซลลูโลส (เช่น แผ่นฝ้าบุผนังหรือผนังเบา วอลเปเปอร์ และหนังสือ) จะสนับสนุนการเจริญเติบโตของเชื้อราที่มีค่า **water activity (a_w)** สูง ๆ เช่น เชื้อ *Stachybotrys* เชื้อ *Ulocladium* และเชื้อ *Chaetomium* เป็นที่ทราบกันว่าสปอร์ของเชื้อ *Stachybotrys* มีสาร **tricothecene mycotoxins** และการรับสัมผัสกับสารชนิดนี้มีความสัมพันธ์กับอาการเลือดออกในปอด (**pulmonary hemorrhage**) ในเด็กทารกในสิ่งแวดล้อมในบ้านที่มีการปนเปื้อน และสัมพันธ์กับการทำงานของภูมิคุ้มกันที่ลดลงในคนงานในอาคารสำนักงาน

ขนาดและอากาศพลศาสตร์ของละอองลอยชีวภาพ (Bioaerosol size and aerodynamics)

อนุภาคละอองลอยชีวภาพที่ทำให้เกิดการติดเชื้ออาจจะมีรูปร่างอยู่ในรูปแบบของ (1) แบคทีเรียเซลล์เดี่ยวหรือสปอร์เดี่ยว ๆ ของแบคทีเรีย สปอร์เดี่ยว ๆ ของเชื้อราหรือไวรัส (2) รวมกลุ่มกันเป็นหลาย ๆ เซลล์ หลาย ๆ สปอร์ หรือกลุ่มของไวรัส หรือ (3) ชีววัตถุ (biologic material) ที่ถูกนำพาไปโดยอนุภาคอื่น ๆ ที่ไม่ใช่อนุภาคชีววัตถุ เชื้อจุลินทรีย์มีขนาดที่แตกต่างกันอย่างมาก โดยปกติทั่วไปเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการติดเชื้อมีขนาดอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.3 ไมครอน ไปจนถึง 10 ไมครอนสำหรับเซลล์แบคทีเรียและสปอร์ของแบคทีเรีย ตั้งแต่ 2.0 ไมครอนไปจนถึง 5.0 ไมครอนสำหรับสปอร์ของเชื้อรา และตั้งแต่ 0.02 ไมครอนไปจนถึง 0.30 ไมครอนสำหรับเชื้อไวรัส ขนาดของเชื้อที่เจาะจงได้แก่ 0.3 ถึง 0.6×1 ถึง 4 ไมครอนสำหรับเชื้อ *M tuberculosis* ขนาดตั้งแต่ 0.3 ถึง 0.90×2.0 ถึง 20 ไมครอนสำหรับเชื้อ *L pneumophila* ขนาดตั้งแต่ 2.5 ถึง 3.0 ไมครอนสำหรับสปอร์ของเชื้อ *Aspergillus fumigatus* และขนาดตั้งแต่ 0.09 ถึง 0.12 ไมครอนสำหรับเชื้อไวรัสไข้หวัดใหญ่ อนุภาคส่วนใหญ่ที่ทำให้เกิดการติดเชื้อที่เกิดจากแหล่งที่มาในระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ในเบื้องต้นเกิดขึ้นในรูปของนิวเคลียสละอองฝอย (droplet nuclei) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ที่ระหว่าง 0.5 ถึง 5.0 ไมครอน ในขณะที่ละอองฝอยถูกขับออกมาจากทางเดินหายใจ โดยแรงและเลียบพลันนั้น มันก็จะเริ่มระเหยและดังนั้นก็จะมีการเปลี่ยนแปลงของมวล (mass) และขนาดของอนุภาค (aerodynamic diameter) ในขณะที่การระเหยเสร็จสิ้นสมบูรณ์ลงขนาดของอนุภาคอาจจะเล็กเพียงพอในการที่จะคงลอยตัวอยู่ในอากาศภายในอาคาร ตามที่ได้ชี้ให้เห็นเมื่อเกือบจะ 60 ปีมาแล้วขนาดของนิวเคลียสละอองฝอยจะขึ้นอยู่กับปริมาณของแข็ง (solid matter) ที่มีอยู่ในละอองฝอยที่กำลังระเหย

แต่อย่างไรก็ตามเชื้อจุลินทรีย์มีคุณสมบัติในการดูดความชื้น (hygroscopic) และดังนั้นความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมภายในอาคารจึงสามารถมีผลกระทบเป็นอย่างมากต่อขนาด (aerodynamic size) ต่อระยะเวลาที่ลอยตัวอยู่ในอากาศ ตลอดจนต่อความสามารถมีชีวิตอยู่ได้ของอนุภาค (viability) ประเด็นหลังสุดนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งยวด เพราะว่าเฉพาะเชื้อจุลินทรีย์ที่มีชีวิตรอดเท่านั้นที่สามารถเริ่มกระบวนการติดเชื้อ นอกจากนี้ แรงโน้มถ่วงของโลก ความร้อน ตลอดจนไฟฟ้าสถิตก็มีผลต่อพฤติกรรมทางด้านอากาศพลศาสตร์เช่นกัน

ความสามารถในการทำให้ติดเชื้อและความรุนแรงของละอองลอยชีวภาพ (Bioaerosol infectivity and virulence)

กระบวนการของโรคติดเชื้อในเจ้าบ้าน (host) ที่เป็นสัตว์เป็นพंगค์ขึ้นของความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ (ปริมาณหรือจำนวนของเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการติดเชื้อ) และความรุนแรง (ปัจจัยที่สนับสนุนการเกิดโรค) ที่ทำให้เชื้อสามารถเอาชนะการป้องกันทางกายภาพตามปกติและการป้องกันของภูมิคุ้มกันของเจ้าบ้าน (host) ได้ สำหรับมนุษย์แล้ว การเริ่มต้นของโรคบางอย่างที่เกิดจากเชื้อจุลินทรีย์จำเป็นจะต้องมีปริมาณหรือจำนวนของเชื้อจุลินทรีย์ (infective doses) แค่น้อยเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากว่าเชื้อเหล่านั้นมีความสัมพันธ์ (affinity) กับเนื้อเยื่อจำเพาะและมีปัจจัยสำหรับความรุนแรงที่มีศักยภาพหนึ่งอย่างหรือมากกว่านั้น ซึ่งทำให้เชื้อเหล่านั้นมีความต้านทานต่อการหมดฤทธิ์ (inactivation) ตัวอย่างเช่น มีการรายงานเกี่ยวกับการติดเชื้อ *Francisella tularensis* (เชื้อนี้เป็นสาเหตุของโรคทูลารีเมียหรือโรคไข้กระต่าย) ทางอากาศว่าเกิดจากเชื้อจุลินทรีย์ชนิดหนึ่ง ซึ่งความรุนแรงของมันมีความสัมพันธ์กับแคปซูลของเซลล์ (cellular capsule) ในการเอาชนะการกำจัดเชื้อในปอดตามปกติและกลไกการทำให้หมดฤทธิ์ (inactivation mechanisms) ในเจ้าบ้าน (host) ที่อ่อนแอจำเป็นต้องใช้เซลล์ของเชื้อ *M tuberculosis* ซึ่งมีโครงสร้างผนังเซลล์ที่มีลักษณะเฉพาะตัว (unique) และต้านทาน (resistant) แค่น้อยเพียงเล็กน้อยไม่ก็เซลล์เท่านั้น ความอ่อนแอต่อการเกิดโรค (susceptibility) มีการเพิ่มขึ้นเมื่อมีการรับสัมผัสเชื้อระยะยาวและการทำงานของภูมิคุ้มกันที่ลดน้อยลง ซึ่งอาจจะเกิดจากปัจจัยเสี่ยงต่าง ๆ ตามธรรมชาติหรือที่ตัวเองกระตุ้น (self-induced) ที่มีมาก่อนหน้า เช่น ความแก่ตัว สภาพที่อยู่อาศัยที่หนาแน่น แออัด สูดบุหรี่จัด ภาวะโภชนาการไม่ดี ตลอดจนเป็นโรคพิษสุราเรื้อรัง การระบาดของวัณโรคสามารถเกิดขึ้นได้ในผู้ที่ชุมนุมรวมตัวกันในพื้นที่ปิด เช่น ที่พักพิงคนไร้บ้าน สถานดูแลผู้ป่วยระยะยาว โรงพยาบาล โรงเรียน คูก ตลอดจนอาคารสำนักงาน ความสามารถในการทำให้ติดเชื้อและความจำเป็นจะต้องมีการควบคุมทางด้านวิศวกรรมในการทำ ความร้อน การระบายถ่ายเทอากาศ และการปรับอากาศสำหรับผู้ป่วยวัณโรคได้มีการแสดงให้เห็นเมื่อ 30 กว่าปีมาแล้ว มีการทดลองซึ่งให้หนูตะเภาสัมผัสกับอากาศที่ระบายออกจากหออภิบาลผู้ป่วยซึ่งผู้ป่วยวัณโรคกำลังได้รับการรักษาด้วยยา ในระหว่างช่วงระยะเวลา 2 ปี หนูตะเภาจำนวน 71 ตัวจากจำนวนเฉลี่ย 156 ตัวที่สัมผัสกับอากาศจากหออภิบาลผู้ป่วยวัณโรคขนาด 6 เตียงอย่างต่อเนื่องเกิดการติดเชื้อ ที่ใหม่มกกว่านั้นก็คือการติดเชื้อ *M tuberculosis* ได้รับการพบพบ

ความสามารถในการทำให้ติดเชื้อของไวรัส (viral infectivity) และความรุนแรง (virulence) ของเชื้อ เป็นสิ่งที่เห็นได้ชัดเจนมากขึ้นต่อสาธารณชนทั่วไปโดยไม่ต้องสงสัย ในแต่ละปีมีการแพร่ระบาดของไวรัสไข้หวัดใหญ่เกิดขึ้นทั่วโลกโดยที่บางครั้งก็มีความรุนแรงมากกว่าครั้งอื่น ๆ ในระหว่างการระบาดครั้งใหญ่ ๆ จำนวนการเข้าพักรักษาตัวในโรงพยาบาลเพราะติดเชื้อไข้หวัดใหญ่สำหรับผู้ที่มีความเสี่ยงสูงอาจจะเพิ่มสูงขึ้นสองถึงห้าเท่า ซึ่งทำให้

บุคลากรทางการแพทย์มีความเสี่ยงในการติดเชื้อเพิ่มสูงขึ้น มีการคิดกันว่าปริมาณหรือจำนวนเล็กน้อยของเชื้อก็สามารถทำให้เกิดการติดเชื้อได้ เนื่องจากความเร็วที่โรคแพร่กระจายไปทั่วกลุ่มประชากร การแพร่กระจายเชื้อ **coxsackie A virus type 21** ทางอากาศตามธรรมชาติได้รับการศึกษาวิจัยในอาสาสมัครผู้ใหญ่ 2 กลุ่ม กลุ่มหนึ่งถูกทำให้ติดเชื้อไวรัสชนิดนี้ อีกกลุ่มหนึ่งซึ่งไม่มีการติดเชื้อและไม่มีแอนติบอดีถูกแยกจากกลุ่มแรกโดยใช้ตาข่ายมุ้งลวดขนาดกว้าง 4 ฟุต 2 ชั้น มีการแสดงให้เห็นถึงการแพร่กระจายของการติดเชื้อในวันที่ 6 ในขณะที่เกิดระลอกการติดเชื้อขึ้นในกลุ่มที่ไม่มีการติดเชื้อมาก่อนหน้านั้น โรคหัดก็เป็นอีกโรคหนึ่งจากไวรัสที่ติดต่อได้ง่ายมาก (**highly contagious**) ซึ่งแพร่กระจายเชื้อทางอากาศ ปริมาณหรือจำนวนเชื้อเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดการติดเชื้อได้แล้ว และการได้รับเชื้อแค่เพียง 4 ครั้ง (**4 doses**) ต่อมาที่จากผู้ที่ติดเชื้อก็สามารถเริ่มต้นการแพร่ระบาดได้แล้ว นอกจากนี้แล้วไวรัสrubella (โรคหัดเยอรมัน) และไวรัสvaricella (โรคอีสุกอีใส) ก็สามารถแพร่กระจายได้อย่างง่ายดายทางละอองลอยในอากาศภายในอาคาร

เชื้อราที่แพร่กระจายทางอากาศที่ชัดเจนมากที่สุดคือเชื้อ *A fumigatus* และเชื้อราชนิดอื่น ๆ ก็ก่อให้เกิดภัยคุกคามของโรคติดเชื้อที่ร้ายแรงเป็นอย่างมากต่อผู้ที่มีภาวะภูมิคุ้มกันอ่อนแอ (**immunocompromised**) ที่เป็นผลมาจากการได้รับยากดภูมิคุ้มกัน (**immunosuppressive**) หรือยาที่มีผลข้างเคียงโดยมีอันตรายต่อเซลล์ของร่างกาย (**cytotoxic**) การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อราแอสเพอร์จิลลัสที่ปอด (**pulmonary aspergillosis**) ในโรงพยาบาลส่วนใหญ่เกิดขึ้นในผู้ป่วยที่มีภาวะเม็ดเลือดขาวต่ำ (**granulocytopenia**) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในหน่วยปลูกถ่ายไขกระดูก (**bone-marrow transplants**) ถึงแม้ว่าจะมีการรายงานการพบโรคติดเชื้อราแอสเพอร์จิลลัสที่ปอดชนิดรุกราน (**invasive aspergillosis**) ในผู้ที่ได้รับการปลูกถ่ายอวัยวะที่ไม่มีโพรงเป็นก้อน ๆ (เช่น หัวใจ) แต่อุบัติการณ์ของการติดเชื้อ *Aspergillus* ในผู้ป่วยเหล่านี้ก็ต่ำกว่าในผู้ที่ได้รับการปลูกถ่ายไขกระดูก ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากว่าภาวะเม็ดเลือดขาวต่ำ (**granulocytopenia**) มีความรุนแรงน้อยกว่าในผู้ที่ได้รับการปลูกถ่ายอวัยวะที่ไม่มีโพรงเป็นก้อน ๆ (**solid-organ transplant**) และการใช้ยาคอร์ติโคสเตียรอยด์ (**corticosteroids**) ลดลงจากการเข้ามาของยาไซโคลสปอรีน (**cyclosporine**)

โดยธรรมชาติในกระบวนการติดเชื้อ ที่เริ่มต้นด้วยการหายใจเข้ารับเอานิวเคลียสละอองฝอยติดเชื้อเข้าสู่ร่างกาย จะมีการสะสมเชื้อจุลินทรีย์ในบริเวณภายในระบบทางเดินหายใจ การสะสมเชื้อจุลินทรีย์นี้ได้รับอิทธิพลจากการดูดความชื้น (**hygroscopicity**) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของขนาดละอองลอยที่หายใจเข้าไป โดยผ่านการเก็บสะสมความชื้นในขณะที่มันเคลื่อนที่อยู่ภายในทางเดินหายใจ Knight ได้ประมาณการว่าอนุภาคดูดความชื้น (**hygroscopic particle**) ที่มีขนาด 1.5 ไมครอนซึ่งเป็นขนาดปกติทั่วไปในการไอและจามจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเป็น 2.0 ไมครอนเมื่อเคลื่อนที่ผ่านจมูก และจะเพิ่มขนาดเป็น 4.0 ไมครอนในอากาศที่อิ่มตัว (**saturated air**) ในบริเวณโพรงจมูกต่อกับคอหอย (**nasopharynx**) และปอด เขายังได้ตั้งทฤษฎี

ว่าผลกระทบของการดูดความชื้นและการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคซึ่งเป็นผลตามมานั้นจะทำให้มีการเก็บรักษา (retention) เพิ่มมากขึ้นในหลอดลมฝอยส่วนที่อยู่ในปอด (tertiary bronchioles) และในท่อลม (alveolar ducts) ซึ่งเป็นผลกระทบที่อาจจะมีผลสำคัญสำหรับละอองลอยของไวรัสซึ่งสามารถทำให้เกิดการติดเชื้อได้อย่างมากสำหรับบริเวณปอดส่วนนั้น

ความสามารถมีชีวิตอยู่ได้ของละอองลอยชีวภาพและปัจจัยทางด้านภูมิอากาศ (Bioaerosol viability and climate factors)

เมื่อจุลินทรีย์ที่ก่อโรคออกจากตัวเจ้าบ้าน (host) และกลายเป็นละอองลอยนั้น พวกมันมีความเป็นไปได้ที่อาจจะได้รับการบาดเจ็บเสียหายในระหว่างกระบวนการก่อตัว นอกจากนี้แล้วทันทีที่มันลอยตัวอยู่ในอากาศมันก็ได้อยู่นอกแหล่งที่อยู่อาศัยตามธรรมชาติของมันแล้ว และก็ตกอยู่ในภาวะที่จะมีการสูญเสียเพิ่มมากขึ้นต่อความสามารถในการมีชีวิตรอดเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ความสามารถมีชีวิตอยู่ได้ (viability) สามารถได้รับการนิยามว่าเป็นความสามารถของจุลินทรีย์ในการแพร่พันธุ์เพิ่มจำนวน ถึงแม้ว่าจุลินทรีย์จะยังคงมีชีวิตอยู่ แต่ถ้าหากว่ามันไม่สามารถแพร่พันธุ์เพิ่มจำนวนได้ มันก็สามารถได้รับการพิจารณาว่าไม่สามารถมีชีวิตรอดอยู่ได้ (nonviable) เนื่องจากว่ามันได้สูญเสียความสามารถในการสร้างประชากรขึ้นมาใหม่ภายในสิ่งแวดล้อมจุลภาคนั้น ๆ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการอยู่รอดของละอองลอยชีวภาพได้แก่ สีสีกกลางที่เชื้อจุลินทรีย์แขวนลอยอยู่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความไวต่อออกซิเจน และการรับสัมผัสกับแสงอัลตราไวโอเลตหรือรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการใช้แบบที่เรียกกันต่าง ๆ กัน Wells และ Stone ได้สร้างข้อมูลที่บ่งชี้ว่าเชื้อจุลินทรีย์ยังคงสามารถมีชีวิตรอดอยู่ในอากาศนานพอที่จะเกิดการแพร่กระจายออกไปในวงกว้าง ทันทีที่มันอยู่ในรูปของละอองลอยในสิ่งแวดล้อมภายในตัวอาคารแล้ว มันก็จะตกอยู่ภายใต้การ(ทำให้)แห้งน้ำที่อันตรายถึงชีวิต (lethal desiccation) ได้ ซึ่งเกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างสัณฐานวิทยา (morphology) สรีรวิทยา ความไวต่อออกซิเจน และสีสีกกลางที่เชื้อจุลินทรีย์นั้นแขวนลอยอยู่ กับระดับของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่มีการผันแปรเปลี่ยนแปลง นอกเหนือจากการเคลื่อนที่ในอากาศ การขึ้น ๆ ลง ๆ ของความกดอากาศ ไอออนในอากาศ ตลอดจนสารมลพิษอื่น ๆ ที่อยู่ในอากาศอีกด้วย ด้วยเหตุนี้ศักยภาพในการอยู่รอดของจุลินทรีย์ก็ถดถอยลง ๆ เมื่ออยู่ในรูปละอองลอยแล้วจึงมีลักษณะเฉพาะตัวต่อจุลินทรีย์ชนิดนั้นภายใต้สภาวะเงื่อนไขเฉพาะ ณ จุดเวลานั้น ๆ การประเมินปัจจัยต่าง ๆ ทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กับการอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรียและไวรัสในละอองลอยได้มีการทบทวนมาแล้ว

อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (Temperature and relative humidity)

อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เป็นปัจจัยสำคัญในการอยู่รอดของละอองลอย เราจะสามารถศึกษาถึงผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ที่มีการผันแปรเปลี่ยนแปลงก็เฉพาะต่อเมื่อมีการควบคุมอุณหภูมิ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีการศึกษาใน

ห้องปฏิบัติการมากมายที่ได้ชี้ให้เห็นว่าผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่อเชื้อจุลินทรีย์ในอากาศเป็นปัจจัยสำคัญ แต่เป็นปัจจัยที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ (**unpredictable**) งานวิจัยชิ้นหนึ่งที่ดำเนินการโดย **Harper** ได้ศึกษาเกี่ยวกับการอยู่รอด (นานถึง 23 ชั่วโมง) ของเชื้อไวรัส 4 ชนิด (ไวรัสวัชเชเนีย ไวรัสไข้หวัดใหญ่ชนิด **A** ไวรัสโปลิโอ และไวรัสไข้สมองและไขสันหลังอักเสบเวเนซุเอลาในม้า) ที่อยู่ในรูปละอองลอยที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ กันในความมืด **Harper** ได้พบว่าโดยปกติทั่วไปแล้วการอยู่รอดของไวรัสที่ความชื้นสัมพัทธ์แต่ละระดับเป็นไปได้ด้วยดีที่อุณหภูมิต่ำ ๆ มากกว่าที่อุณหภูมิสูง ๆ นอกจากนี้แล้ว ไวรัสวัชเชเนีย ไวรัสไข้หวัดใหญ่และไวรัสไข้สมองและไขสันหลังอักเสบเวเนซุเอลาในม้าก็ยังสามารถอยู่รอดได้ดีขึ้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ๆ (17% ถึง 25%) ในขณะที่ไวรัสโปลิโอแสดงให้เห็นถึงการอยู่รอดมากที่สุดที่ความชื้นสัมพัทธ์ระดับสูง ๆ (80% ถึง 81%) งานวิจัยอีกชิ้นหนึ่งศึกษาเกี่ยวกับการอยู่รอดของเชื้อไวรัสระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ 3 ชนิดที่อยู่ในรูปละอองลอย (ไวรัสอะดีโน ซีโรไทป์ 4 และ 7 และไวรัสพาราอินฟลูเอนซา ซีโรไทป์ 3) ในตู้เก็บอากาศสถิต (**static chambers**) ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 3 ระดับ (20%, 50%, 80%) และพบว่าไวรัสอะดีโนอยู่รอดได้ดีขึ้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 80% ในขณะที่ไวรัสพาราอินฟลูเอนซาอยู่รอดได้ดีขึ้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 20% งานวิจัยเหล่านี้ดำเนินการกับละอองลอยที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของมวลโดยเฉลี่ย (ค่ากลางมัธยฐาน) อยู่ที่ประมาณ 2.0 ไมครอน **Davis** และคณะซึ่งดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับพลวัตของละอองลอยของเชื้อไวรัสอะดีโน ซีโรไทป์ 12 ที่อุณหภูมิ 28° ถึง 30°C และระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่ 89%, 51%, และ 32% ได้พบว่าการอยู่รอดเพิ่มมากขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น และมีความสัมพันธ์อย่างเดียวกันนี้ในการกู้คืน (**recovery**) เชื้อไวรัสจากปอดของหนูแฮมสเตอร์แรกเกิดที่ได้รับสัมผัสเชื้อ **Schaffer** และคณะได้ศึกษาผลกระทบของวิธีการต่าง ๆ ในการเพิ่มปริมาณหรือจำนวนเชื้อไวรัส (การเพาะเลี้ยงเซลล์ การเพาะเลี้ยงไข่) ที่มีต่อเสถียรภาพ (**stability**) ของไวรัสไข้หวัดใหญ่ชนิด **A** ที่ความชื้นสัมพัทธ์ระดับกลาง ๆ (50% to 80%) และแสดงให้เห็นว่าการอยู่รอดที่ผันแปรเปลี่ยนแปลงมีความสัมพันธ์กันกับวิธีการในการเพิ่มจำนวน งานวิจัยที่ใหม่ว่านั้นเป็นการวิจัยของ **Ijaz** และคณะซึ่งศึกษาเกี่ยวกับการอยู่รอดของเชื้อไวรัสโคโรนา 229E ในมนุษย์ที่อยู่ในอากาศที่สภาพเงื่อนไขต่าง ๆ กันของอุณหภูมิ (20°C และ 6°C) และความชื้นสัมพัทธ์ (30%, 50%, 80%) ได้พบว่าการอยู่รอดที่มากที่สุดของไวรัสในรูปของละอองลอยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอย่างที่สุด (**extremely temperature dependent**) ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 80% **Theunissen** และคณะได้แสดงให้เห็นถึงการอยู่รอดในอากาศอย่างมีประสิทธิภาพของเชื้อ **Chlamydia pneumoniae** ที่อุณหภูมิ 15° ถึง 25°C และระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่สูง ๆ

งานวิจัยทั้งหมดเหล่านี้ตลอดจนงานวิจัยชิ้นอื่น ๆ อีกมากมายบ่งชี้ว่าบทบาทของสิ่งแวดล้อมในการอยู่รอดของจุลินทรีย์ในอากาศมีความสลับซับซ้อนอย่างที่สุด สำหรับการประยุกต์นำไปใช้ในทางปฏิบัติเพื่อการควบคุมเชื้อก่อโรคทางอากาศนั้นการศึกษาวิจัยจะต้องย้ายจากตู้ทดสอบในห้องปฏิบัติการไปสู่ในสิ่งแวดล้อมจริงภายในอาคาร โดยใช้เทคนิควิธีการต่าง ๆ ที่เป็นมาตรฐานซึ่งได้พัฒนามาแล้วก่อนหน้านี้

การเก็บตัวอย่างสิ่งแวดล้อมและการตรวจวิเคราะห์ (ENVIRONMENTAL SAMPLING AND ANALYSIS)

วิธีการทั้งหมดที่มีอยู่ในการเก็บตัวอย่างละอองลอยชีวภาพมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ได้กับการกู้คืน (recovery) เชื้อที่ก่อโรคติดเชื้อจากอากาศภายในอาคาร รายละเอียดการทบทวนวิธีการต่าง ๆ ในการเก็บตัวอย่างละอองลอยชีวภาพก็มีอยู่ การเก็บตัวอย่างมีจุดสนใจเบื้องต้นไปที่การกู้คืนจุลินทรีย์ที่สามารถมีชีวิตอยู่รอดโดยใช้วิธีการกีด (impingement) การอัดแน่น (impaction) การกรอง (filtration) การปั่นแยก (centrifugal separation) หรือการตกลงมา (precipitation) โดยใช้ไฟฟ้าสถิตและความร้อน อุปกรณ์เก็บตัวอย่างละอองลอยชีวภาพทั้งหมดสามารถสร้างความเสียหายอย่างร้ายแรงต่อบางส่วนของจุลินทรีย์ที่เก็บมาทั้งหมด การบาดเจ็บเสียหายที่ว่ามันอาจจะเกิดขึ้นจากการอัดแน่น (impaction) กับอาหารเลี้ยงเชื้อ (culture media) หรือพื้นผิวอื่น ๆ หรือจากการสูญเสียในบริเวณผนังของอุปกรณ์เก็บตัวอย่าง ความปั่นป่วน (turbulence) ในของเหลวที่ใช้ในการกีด (impingement fluid) หรือการดูดความชื้น (desiccation) บนสื่อตัวกรอง (filter media) การสูญเสียเชื้อจุลินทรีย์ก็ยังมีความเกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของอากาศที่เก็บตัวอย่างอีกด้วย วิธีที่ใช้ตัวกรองอาจจะเก็บตัวอย่างที่อัตราเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที ในขณะที่วิธีที่ใช้หลอดบรรจุของเหลวที่ใช้วัสดุเป็นแก้วทั้งหมด (all-glass impinge) จะเก็บตัวอย่างที่อัตราเท่ากับ 12.5 ลิตรต่อนาที วิธีที่ใช้ตัวอัดที่มีตะแกรงร่อน (sieve impactor) จะเก็บตัวอย่างที่อัตราเท่ากับ 28.3 ลิตรต่อนาที วิธีที่ใช้ตัวอัดปริมาตรสูง (high-volume impactor) จะเก็บตัวอย่างที่อัตราเท่ากับ 180 ลิตรต่อนาที และอุปกรณ์เก็บตัวอย่างปริมาตรสูงชนิดอื่น ๆ จะเก็บตัวอย่างที่อัตรานับเป็นร้อย ๆ หรือพัน ๆ ลิตรต่อนาที อุปกรณ์เก็บตัวอย่างจะต้องได้รับการปรับเทียบ (calibrated) สำหรับอัตราการไหลก่อนนำไปใช้ และประสิทธิภาพในการเก็บตัวอย่างของมันจะต้องได้รับการชี้ให้เห็นก่อนหน้านั้นในฐานะที่เป็นฟังก์ชันของขนาดและรูปร่างของอนุภาค

ประสิทธิภาพในการเก็บตัวอย่างได้รับการกำหนดเป็นแบบฉบับตามปกติในการศึกษาวิจัยกับอนุภาคที่ทราบขนาดและรูปร่างภายใต้สภาพเงื่อนไขที่มีการควบคุมในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุม การศึกษาวิจัยในห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการเก็บตัวอย่างของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างละอองลอยชีวภาพที่ใช้กันปกติทั่วไปได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่เมื่อไม่นานมานี้ และปัจจัยทางด้านกายภาพต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างละอองลอยชีวภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เกี่ยวกับแนวคิดเรื่องระยะหยุด (stopping distance) ก็ได้มีการกล่าวถึงอย่างเข้มข้น การประเมินประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างเชิงเปรียบเทียบก็ได้รับการดำเนินการด้วยเช่นเดียวกันภายใต้สภาวะเงื่อนไขในสนามที่มีละอองลอยตามธรรมชาติ การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับละออง

ลอยเมื่อไม่นานมานี้ได้อธิบายถึงประสิทธิภาพในการเก็บตัวอย่าง ณ จุดทางเข้า (inlet) ของอุปกรณ์เก็บตัวอย่าง
 ละอองลอยชีวภาพเชิงพาณิชย์จำนวนหนึ่ง รวมทั้งการออกแบบตัวอัดชั้นตอนเดียว (single-stage impactor
) ซึ่งสามารถใช้ในการศึกษาตัวแปรในการเก็บตัวอย่างและการตรวจวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลกระทบต่อ
 ความสามารถในการมีชีวิตอยู่รอดของละอองลอยชีวภาพ เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ อัตราการไหลของอากาศในการเก็บ
 ตัวอย่าง และระยะเวลาในการดูดความชื้น การศึกษาวิจัยเช่นที่ว่่นี้มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการกำหนด
 เครื่องมือและวิธีการในการเก็บตัวอย่าง เพื่อที่จะกู้คืน (recover) เชื้อก่อโรคที่อาจจะมีชีวิตอยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นพิษต่อ
 การเก็บตัวอย่างและมีอยู่ในจำนวนแค่เพียงเล็กน้อยเท่านั้นในอากาศภายในตัวอาคาร อย่างเช่นเชื้อ *M
 tuberculosis* เทคนิควิธีการในการเก็บตัวอย่างละอองลอยที่มีประสิทธิภาพสำหรับการเก็บตัวอย่างเชื้อ *M
 tuberculosis* จากอากาศภายในตัวอาคารยังไม่เคยมีการอธิบายมาก่อน อย่างไรก็ตามเชื้อมัยโคแบคทีเรีย
 (mycobacteria) ชนิดอื่นๆ ในอากาศก็ได้รับการกู้คืน (recovered) อย่างประสบความสำเร็จจากอากาศ
 กลางแจ้ง โดยใช้อุปกรณ์เก็บตัวอย่างชนิดตัวอัด (impactor samplers) ที่มีสื่อ (media) ที่ได้รับการเพิ่ม
 (enriched) ที่ระบุ เทคนิควิธีการต่าง ๆ ในการเก็บตัวอย่างละอองลอยและขั้นตอนการดำเนินการตรวจวิเคราะห์
 ที่ใช้สำหรับการกู้คืนเชื้อไวรัสในมนุษย์ได้รับการทบทวน ขอบเขตของปัญหาเกี่ยวกับการเก็บตัวอย่างเชื้อก่อโรคใน
 อากาศได้รับการแสดงตัวอย่างโดยผลที่ได้จากการวิจัยกับละอองลอยของเชื้อไวรัสคอกซากิ
 เอ 21 (coxsackie A-21) ในธรรมชาติ มีการพบว่าถ้าหากว่าบุคคลเป็นที่พักพิง (harbor) ให้แก่ปริมาณไวรัส
 เฉลี่ย (ค่ากลางมัธยฐาน) ที่ 10^4 tissue culture infectious dose ต่อปริมาณสารคัดหลั่งจากช่องปาก 1
 มิลลิลิตร มีการจาม 100 ครั้งในห้องที่ปิดอยู่ (ปริมาตร 70,000 ลิตร) และเกิดสารคัดหลั่งที่ทำให้เป็นละออง
 (atomized) ในปริมาณ 5.9×10^{-6} มิลลิลิตรในการจามแต่ละครั้งแล้วละก็ น่าจะต้องมีการเก็บตัวอย่าง
 อากาศปริมาณถึง 12,000 ลิตร เพื่อที่จะกู้คืน (recover) ปริมาณไวรัสเฉลี่ย (ค่ากลางมัธยฐาน) เท่ากับ 1
 tissue culture infectious dose

การตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างที่เก็บมาไม่ได้จำกัดอยู่เฉพาะการเก็บตัวอย่างละอองชีวภาพสำหรับการเพาะเลี้ยงเซลล์เพื่อ
 ดูความสามารถในการมีชีวิตอยู่รอด (viability culturing) อีกต่อไป เทคนิควิธีการใหม่ ๆ ที่ใช้กันอยู่เป็นปกติ
 ทั่วไปในห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยาทางคลินิกในปัจจุบันนี้มีการประยุกต์ใช้ในการเฝ้าติดตามสังเกตการณ์ด้าน
 สิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อจุดมุ่งหมายเป็นการเพื่อแสดงให้เห็นถึงเชื้อก่อโรคในอากาศ เทคนิควิธีการต่าง ๆ
 อย่างเช่น fluorescent antibody, monoclonal antibody, gene probe, และ
 polymerase chain reaction ในปัจจุบันนี้สามารถเป็นทางเลือกอื่น ๆ ในการแยก (isolation) การ
 ระบุชนิด (identification) และการยืนยัน (confirmation) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อการตรวจวิเคราะห์และ
 การประเมินผลที่รวดเร็วและสะดวกต่อการใช้งานสำหรับอากาศภายในตัวอาคารได้กลายเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเพิ่ม
 มากขึ้น โดยเฉพาะวิธี Polymerase chain reaction ซึ่งมีศักยภาพมหาศาลสำหรับการประเมินเชื้อก่อโรค

ทางอากาศได้อย่างรวดเร็วและเด็ดขาด ซึ่งไม่ยากต่อการกู้คืน (recovery) โดยเทคนิควิธีการเพาะเลี้ยงเซลล์อย่างง่าย เช่น ไวรัสเชื้อคลาไมเดีย (chlamydia) เชื้อ มัยโคแบคทีเรีย (mycobacteria) และเชื้อรา เช่น เชื้อ *Histoplasma* ถึงแม้ว่าเทคนิควิธีการในการกู้คืนละอองลอยชีวภาพและการตรวจวิเคราะห์อย่างรวดเร็ว จะได้มีการกล่าวถึงมาแล้ว แต่ก็ยังคงจะต้องมีการศึกษาวิจัยอีกมากเพื่อปรับแต่งและทำให้ขั้นตอนปฏิบัติที่เหมาะสมที่สุดเหล่านั้นซึ่งจะพิสูจน์ได้ว่ามีประสิทธิภาพเกี่ยวกับการอธิบายลักษณะของละอองลอยของโรคติดเชื้อเป็นมาตรฐานเดียวกัน

ความจำเป็นในการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ (RESEARCH NEEDS AND RECOMMENDATIONS)

การคัดเลือกและการใช้งานจุลินทรีย์สำหรับโมเดล (Model microorganism selection and use)

ไม่ว่าข้อมูลจากห้องปฏิบัติการและข้อมูลจากห้องทดสอบละอองลอยที่ระบุชี้ถึงประสิทธิภาพของการควบคุมทางด้านวิศวกรรมที่เฉพาะเจาะจงจะเป็นเช่นไรก็ตาม การประยุกต์ใช้งานที่มีศักยภาพอย่างที่ว่านั้นก็จะต้องได้รับการประเมินขั้นสุดท้ายในสภาพสิ่งแวดล้อมจริงในตัวอาคารอยู่ดี การศึกษาวิจัยอย่างที่ว่านั้นในอาคารที่ไม่มีใครอยู่ (unoccupied) จะต้องมีการทำให้เป็นละออง (aerosolization) ของจุลินทรีย์โมเดล (model microorganisms) หรือจุลินทรีย์ชี้วัด (indicator microorganisms) ที่เหมาะสมหนึ่งชนิดหรือมากกว่าหนึ่งชนิด จุลินทรีย์ที่ว่านี้จะต้องเป็นจุลินทรีย์ที่ไม่ก่อโรคกับมนุษย์ จะต้องมีความเกี่ยวข้องกับเชื้อเป้าหมายในมนุษย์ จะต้องมีลักษณะทางจลนศาสตร์ของละอองลอยและลักษณะทางจลนศาสตร์การหมดฤทธิ์ (inactivation kinetics) ที่คล้ายคลึงกัน ตลอดจนจะต้องสามารถกู้คืนได้ (recoverable) จากอากาศภายในตัวอาคาร การคัดเลือกจุลินทรีย์เช่นที่ว่านั้นจะต้องเป็นไปสอดคล้องกับการกำหนดบ่งชี้จากวรรณกรรม (literature) ของงานศึกษาวิจัยที่มีศักยภาพความเป็นไปได้ ซึ่งมีการอธิบายลักษณะของจุลินทรีย์ในห้อง (chamber characterization) ซึ่งตามมาในสภาวะที่เป็นละอองลอย รวมทั้งการประเมินเทคนิควิธีการในการกู้คืนที่มีศักยภาพความเป็นไปได้ ยกตัวอย่างเช่น เชื้อ *Mycobacterium phlei* น่าจะเป็นจุลินทรีย์โมเดลที่มีคุณสมบัติครบ (candidate model organism) สำหรับใช้ในการประเมินการควบคุมทางด้านวิศวกรรมในตัวอาคารสำหรับการป้องกันการแพร่กระจายเชื้อวัณโรคทางอากาศ เชื้อ *M. phlei* ไม่ก่อโรค (nonpathogenic) ในมนุษย์ เป็นเชื้อ mycobacterium ชนิดหนึ่งในสิ่งแวดล้อมที่เจริญเติบโตเพิ่มจำนวนได้อย่างรวดเร็วและมีรงควัตถุ (pigmented) และได้รับการค้นพบว่าสามารถต้านทานรังสีอัลตราไวโอเลตได้มากกว่าเชื้อ *M. tuberculosis* ชนิดร้ายแรงถึง 10 เท่า การก่อตัวเป็นละอองลอยของเชื้อชนิดนี้ ซึ่งบางที่

อาจจะเป็นใน **artificial sputum** จำเป็นจะต้องได้รับการประเมินในห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับลักษณะของมัน เมื่อลอยตัวอยู่ในอากาศ นอกจากนี้แล้วสื่อกลางในการเก็บตัวอย่าง (**collection medium**) และอุปกรณ์เก็บ ตัวอย่างละอองลอยชีวภาพที่เหมาะสมก็จำเป็นจะต้องได้รับการกำหนดด้วย

ในทำนองเดียวกันไวรัสโมเดล (**model viruses**) และเทคนิควิธีการในการกู้คืน (**recovery**) ก็อาจจะถูกเลือกใช้ในการประเมินการควบคุมทางด้านวิศวกรรมที่มีศักยภาพความเป็นไปได้ในสิ่งแวดล้อมภายในตัวอาคาร มีการใช้เชื้อไวรัส **murine influenza** ที่กลายเป็นละอองลอยเป็นโมเดลของโรคติดเชื้อในระบบทางเดินหายใจ และมีการใช้เชื้อ **poliovirus type 1** และ **simian rotavirus SA11** ในการประเมินประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อของแสงอุลตราไวโอเลต แบคทีริโอเฟจ (**bacteriophages**) ได้ทำหน้าที่เป็นโมเดลที่ยอดเยี่ยมนานมาแล้วสำหรับการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการฆ่าเชื้อ (**disinfection**) ที่เกี่ยวข้องกับการหมดฤทธิ์ (**inactivation**) ของเชื้อไวรัสในมนุษย์ในน้ำและในน้ำเสีย จำเป็นจะต้องมีการศึกษาวิจัยเพื่อที่จะค้นหาว่าแบคทีริโอเฟจชนิดใดที่อาจจะสามารถใช้เป็นโมเดลของเชื้อไวรัสที่ทำให้ติดเชื้อในระบบทางเดินหายใจในมนุษย์ในการศึกษาวิจัยอากาศภายในตัวอาคารที่มีเป้าหมายในการที่จะประเมินการควบคุมทางด้านวิศวกรรม

การประเมินการควบคุมทางด้านวิศวกรรมที่มีอยู่ (Evaluation of existing engineering controls)

จุลินทรีย์โมเดล (**model microorganisms**) และวิธีการเก็บตัวอย่างที่ได้รับการคัดเลือกอาจจะถูกใช้ในการประเมินการควบคุมทางด้านวิศวกรรมที่มีอยู่หรือการควบคุมแบบผสมผสาน สำหรับการป้องกันการแพร่กระจายเชื้อก่อโรคทางอากาศในสถานพยาบาล 3 วิธีในการควบคุมคุณภาพอากาศที่มีอยู่ได้แก่ การควบคุมแหล่งที่มา (**source control**) การควบคุมโดยการกำจัดออกไป (**removal control**) และการควบคุมโดยการเจือจาง (**dilution control**) การควบคุมแหล่งที่มาเป็นการทำให้การปนเปื้อนเกิดขึ้นน้อยที่สุดภายในพื้นที่ที่มีคนอยู่ (**occupied space**) ตัวอย่างเช่น การใช้เตียงผู้ป่วยชนิด **laminar-flow** ซึ่งทำให้มีการควบคุมเฉพาะจุด (**local control**) หรือการควบคุมแหล่งที่มา (**source control**) สำหรับผู้ป่วยที่ได้รับการวินิจฉัยมาใหม่ ๆ ว่าเป็นวัณโรค การควบคุมโดยการกำจัดออกไป (**removal control**) เป็นการใช้อุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ ในการทำความสะอาดอากาศ เพื่อที่จะควบคุมอนุภาคต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นกลไกเชิงรุก (**active mechanism**) หรือกลไกเชิงตั้งรับ (**passive mechanism**) การกำจัดออกไปที่เป็นเชิงรุก (**active removal**) เป็นการใช้อุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ ที่มีตัวกรองสื่อกลาง (**media filters**) หรือมีเครื่องทำความสะอาดอากาศอิเล็กทรอนิกส์ เช่น การใช้เครื่องกรองอนุภาคในอากาศประสิทธิภาพสูงแบบพกพาในห้องผู้ป่วยวัณโรค ในขณะที่การกำจัดออกไปที่เป็นเชิงตั้งรับ (**passive removal**) เป็นกลไกอย่างเช่น การทำให้อนุภาคตกลงมากองรวมกัน (**particle settling**)

การอัดประจุการแพร่กระจายของไอออน (ion diffusion charging) การใช้ปรากฏการณ์เทอร์โมโฟเรซิส (thermophoresis) และการรวมตัวเกาะกัน (coalescence) การควบคุมโดยการเจือจาง (dilution control) เป็นการลดปริมาณสิ่งปนเปื้อนในอากาศโดยการนำเอาอากาศที่ปนเปื้อนน้อยกว่าเข้าสู่พื้นที่ที่มีคนอยู่ เพื่อให้เจือจาง ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นได้ผ่านการระบายถ่ายเทอากาศตามธรรมชาติหรือใช้กลไกก็ได้

การควบคุมคุณภาพอากาศอีกวิธีหนึ่งที่จะใช้ร่วมกับวิธีการกำจัดอนุภาคออกไปหรือวิธีการเจือจางได้แก่ การฆ่าเชื้อในอากาศด้วยแสงอัลตราไวโอเลต เป้าหมายของวิธีการนี้คือเพื่อทำให้จุลินทรีย์ที่ก่อโรคในมนุษย์ที่อยู่ในนิวเคลียสละของฝอยในอากาศที่เข้าสู่พื้นที่ที่มีคนอยู่ซึ่งมีผู้ที่อาจจะมีความอ่อนแอต่อการติดเชื้อเกิดการหมดฤทธิ์ (inactivate) ถึงแม้ว่าเป็นที่ยอมรับกันว่าเชื้อจุลินทรีย์ต่างชนิดกันมีความแตกต่างกันในด้านความอ่อนแออ่อนไหวต่อแสงอัลตราไวโอเลต แต่การใช้เทคโนโลยีนี้ในการควบคุมเชื้อวัณโรคในอากาศในสถานพยาบาลและในสิ่งแวดล้อมการทำงานอื่น ๆ ก็ได้แสดงให้เห็นแล้วว่ามีความคุ้มค่าและได้รับการอธิบายเป็นอย่างดีจาก Riley และ Nardell มีการแสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของแสงอัลตราไวโอเลตผสมผสานกับระบบการระบายถ่ายเทอากาศและการกรองอากาศ

การประเมินการควบคุมทางด้านวิศวกรรมเชิงทดลองและอุปกรณ์ (Evaluation of experimental engineering controls and devices)

การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีในการควบคุมทางด้านวิศวกรรมสำหรับละอองลอยชีวภาพที่เป็นเชิงทดลองอาจจะให้วิธีการเพิ่มเติมในการควบคุมการแพร่กระจายโรคติดเชื้อในสิ่งแวดล้อมภายในตัวอาคาร ตัวอย่างเช่น การวิจัยขั้นพื้นฐานเกี่ยวกับการใช้สนามไฟฟ้าชนิดพัลส์แรงสูง (pulsed high electric fields) เพื่อทำให้เชื้อจุลินทรีย์หมดฤทธิ์ซึ่งถึงความจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาเกี่ยวกับเทคนิควิธีการนี้ สำหรับการใช้งานที่มีศักยภาพความเป็นไปได้ในการควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในอากาศในระบบการจัดการอากาศ

ถึงแม้ว่าเทคนิควิธีการต่าง ๆ ซึ่งเป็นการดำเนินการ ณ. จุดกำเนิด (in situ) จะให้ทรัพยากรที่ทรงพลังสำหรับการวัดการกระจายขนาดของอนุภาค (particle size distributions) ก็ตาม แต่ในขณะนี้ก็ไม่มีเทคนิควิธีการใดที่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างอนุภาคชีวภาพที่สามารถมีชีวิตอยู่รอด (viable) กับอนุภาคชีวภาพที่ไม่สามารถมีชีวิตอยู่รอด (nonviable) หรือกับอนุภาคที่ไม่ใช่อนุภาคชีวภาพ (nonbiologic) ความพยายามในการศึกษาวิจัยอย่างทุบเทที่มีเป้าหมายในการพัฒนาเครื่องมือชนิด real-time เพื่อที่จะตรวจหาอนุภาคที่สามารถมีชีวิตอยู่รอด (viable) ในอนุภาคที่ไม่สามารถมีชีวิตอยู่รอด (nonviable) หรือในอนุภาคที่ไม่ใช่อนุภาคชีวภาพ (nonbiologic) ในอากาศอาจจะสามารถทำให้การเฝ้าสังเกตติดตามอย่างต่อเนื่องมีความเป็นไปได้ในอนาคตอันใกล้ ซึ่งจะเป็นการเตือนภัยแต่เนิ่น ๆ ให้มีระบบการตรวจหาหรือระบบการควบคุมใน

สถานพยาบาลและสถานที่อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง สิ่งประดิษฐ์ที่วุ่นวายในทางทฤษฎีน่าจะได้รับการออกแบบให้ใช้การกระเจิงของแสง (light scattering) หรือวิธีการอื่น ๆ ทางฟิสิกส์ในการตรวจหาเฉพาะเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคบางกลุ่มเท่านั้น เช่น เชลล์ของเชื้อ mycobacteria สปอร์ของเชื้อ *Aspergillus* หรือบางทีแม้แต่หน่วย (units) ของเชื้อไวรัสระบบทางเดินหายใจ จำเป็นจะต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมต่อไปเพื่อแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ (feasibility) ของแนวคิดในการใช้การกระเจิงของแสง (light scattering) ในการแยกความแตกต่างระหว่างอนุภาคชีวภาพที่สามารถมีชีวิตอยู่รอดกับอนุภาคชีวภาพที่ไม่สามารถมีชีวิตอยู่รอด หรือกับอนุภาคที่ไม่ใช่อนุภาคชีวภาพ การวิจัยขั้นพื้นฐานเกี่ยวกับการกระเจิงของแสงกับสมดุลทางไดนามิก (electrodynamic balance) ได้เคยมีการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว

ข้อเสนอแนะสำหรับการป้องกันการแพร่กระจายละอองลอยติดเชื้อ (RECOMMENDATIONS FOR PREVENTION OF TRANSMISSION OF INFECTIOUS AEROSOLS)

ความเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการก่อเกิด การอยู่รอด ตลอดจนการแพร่กระจายของละอองลอยติดเชื้อในโรงพยาบาลและในสถานพยาบาลดูแลสุขภาพอื่น ๆ มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อภารกิจในการป้องกันการติดเชื้อในโรงพยาบาลที่สัมพันธ์กับอากาศ หนทางที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้ก็คือกลไกต่าง ๆ สำหรับการลดการติดเชื้อที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมให้มีน้อยที่สุดควรได้รับการจัดการล่วงหน้าในทุก ๆ ด้านของการออกแบบอาคาร การก่อสร้าง การดำเนินการ ตลอดจนการซ่อมบำรุง

สิ่งแวดล้อมทั้งหมดภายในตัวอาคารของสถานพยาบาลดูแลสุขภาพจะต้องได้รับการมองว่าเป็นระบบนิเวศที่แตกต่างกัน (distinct ecosystem) ซึ่งภายในระบบนิเวศนี้ผู้ป่วยมีปฏิสัมพันธ์กับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างมากมายในสิ่งแวดล้อมรอบตัวอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้แน่ใจว่าเหตุการณ์เหล่านี้จะไม่เพิ่มความเสี่ยงของการแพร่กระจายการติดเชื้อทางอากาศ ควรจะต้องมีชุดกลยุทธ์วิธีการจัดการสิ่งแวดล้อมขั้นพื้นฐานที่รวบรวมจากชุมชนการศึกษาวินิจฉัยเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมภายในตัวอาคาร ซึ่งรวมถึงการบริหารจัดการแหล่งที่มา (source management) การบริหารจัดการกิจกรรม (activity management) การแทรกแซงการออกแบบ (design intervention) การแทรกแซงการเจือจาง (dilution intervention) และการทำความสะอาด (cleaning)

การบริหารจัดการแหล่งที่มา (Source management)

เชื้อทุกชนิดในอากาศมาจากแหล่งที่มาไม่ว่าจะเป็นจากมนุษย์ สัตว์ วัตถุสิ่งของ หรือพื้นผิวก็ตาม แหล่งที่มาสามารถ จะได้รับการจัดการโดยการกำจัดออกไป เช่นในกรณีของวัสดุก่อสร้างที่ปนเปื้อนเชื้อรา หรือโดยการแก้ไขปรับเปลี่ยน เช่นโดยการล้างด้วยระบบน้ำร้อนเพื่อกำจัดเชื้อสายพันธุ์ *Legionella* ผู้ป่วยโรคระยะ **active** สามารถพักอยู่ในห้องความดันลบ (**negative-pressure rooms**) ต้องสวมเครื่องช่วยหายใจ (**respirators**) หรือนอนบนเตียงชนิด **laminar-flow** จนกระทั่งมีการแสดงว่าไม่ติดเชื้อแล้ว แหล่งที่มาสามารถจะได้รับการจัดการ โดยโครงการซ่อมบำรุงอาคาร ที่ทำให้มั่นใจได้ว่าจะมีการตรวจสอบแหล่งที่มาที่มีศักยภาพความเป็นไปได้ อย่างละเอียด เป็นประจำและเหมาะสม เช่น ช่องอากาศเข้า (**air intakes**) และธนาคารตัวกรอง (**filter banks**) ส่วนประกอบของระบบเครื่องทำความร้อน ระบบระบายถ่ายเทอากาศ และระบบปรับอากาศ ท่อนำอากาศ หอหล่อเย็น (**cooling towers**) ตลอดจนระบบน้ำร้อน แหล่งที่มาในสิ่งแวดล้อมก็สามารถจะได้รับการจัดการได้ เช่นเดียวกัน โดยการทำมาสะอาดอย่างมีประสิทธิภาพและเป็นปกติประจำ ซึ่งเป็นการกำจัดอนุภาคที่มีศักยภาพความเป็นไปได้ในการทำให้เกิดเชื้อออกไป และลดจำนวนแหล่งสะสมที่มาของมลพิษ เช่นพรมปูพื้นและพื้นผิวที่ปนเปื้อนฝุ่นอื่น ๆ การศึกษาวิจัยเมื่อไม่นานมานี้เกี่ยวกับแหล่งที่มาของมลพิษภายในอาคารและอ่างล้างมือแสดงให้เห็นถึง สหสัมพันธ์กันในเชิงบวกระหว่างมวลของฝุ่นในอากาศกับแบคทีเรียและเชื้อราในอากาศ ระหว่างมวลของฝุ่นในพรมปูพื้นกับเชื้อราในฝุ่นจากพรมปูพื้น และระหว่างเชื้อแบคทีเรียในฝุ่นจากพรมปูพื้นกับเชื้อแบคทีเรียในอากาศ สาเหตุต้น ๆ อย่างหนึ่งของการแพร่กระจายละอองลอยติดเชื้อในโรงพยาบาลคือการปนเปื้อนเชื้อราที่เกิดจากการก่อสร้างและการปรับปรุงอาคารในบริเวณใกล้เคียง แนวทางเชิงรุกที่ยอดเยี่ยมในการจัดการกับการจำกัดควบคุมฝุ่นจากการก่อสร้างที่ชื่อ *Infection Control Issues in Construction and Renovation* ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่เมื่อเร็ว ๆ นี้

การจัดการกิจกรรม (Activity management)

การจัดการกิจกรรมเป็นกระบวนการในการทำให้มั่นใจได้ว่าจะมีการใช้อาคารสำหรับกิจกรรมตามที่อาคารนั้นได้รับการออกแบบมา การพบมลพิษอยู่ในอากาศภายในอาคารบางครั้งก็เป็นผลมาจากการใช้งานอาคารหรือส่วนของอาคาร เพื่อเหตุผลอื่น ๆ นอกเหนือจากที่อาคารนั้นได้รับการออกแบบมาตั้งแต่แรก ตัวอย่างได้แก่ห้องปฏิบัติการในอาคารที่ได้รับการออกแบบให้เป็นสำนักงานหรือห้องพักอาศัย หรือสำนักงานในบริเวณพื้นที่ที่เคยเป็นห้องปฏิบัติการมาก่อน หน้า การใช้ประโยชน์จากอาคารในลักษณะที่เป็นไปตามจุดมุ่งหมายแรกเริ่มก็ยังทำให้เป็นการสะดวกและส่งเสริมสนับสนุนโครงการตรวจสอบอย่างละเอียด การซ่อมบำรุง และการทำความสะอาดเป็นปกติประจำ โครงการเช่นที่ว่านี้สามารถกลายเป็นความคิดหรือการพิจารณาภายหลัง (**afterthought**) เมื่อโรงพยาบาลมีการปรับปรุง (**renovate**) อาคารที่มีอยู่อย่างต่อเนื่อง การก่อสร้างต่อเติม หรือดัดแปลงปรับเปลี่ยนสิ่งแวดล้อมใหม่

การแทรกแซงการออกแบบ (Design intervention)

ตัวอาคารพร้อมทั้งเครื่องตกแต่ง (furnishings) จำเป็นจะต้องได้รับการออกแบบ เพื่อให้ว่ามันจะสามารถได้รับการตรวจสอบอย่างละเอียด ได้รับการทำความสะอาด และการซ่อมบำรุงได้อย่างมีประสิทธิภาพ การแทรกแซงการออกแบบ (design intervention) เป็นสิ่งที่สำคัญเมื่อมีการออกแบบอาคารใหม่ รวมทั้งเมื่อมีการปรับปรุงใหม่ (remodeling) อาคารเก่าสำหรับใช้ประโยชน์ใหม่ การแทรกแซง (interventions) ที่ว่านี้อาจจะรวมถึงการระบายถ่ายเทไอเสียที่สร้างขึ้นเป็นพิเศษ หรือความต้องการการไหลเวียนของอากาศ หรือการกำจัดทั้งวัสดุก่อสร้างหรือวัสดุตกแต่งบางอย่างที่ปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ได้ง่ายเป็นพิเศษ เช่น กระเบื้องเพดานและพรมปูพื้น

การแทรกแซงการเจือจาง (Dilution intervention)

การเจือจางเป็นกระบวนการที่ใช้เพื่อทำให้มลพิษในอากาศมีความเข้มข้นลดน้อยลง โดยการแทนที่อากาศที่ปนเปื้อนด้วยอากาศสะอาด อนุภาคในอากาศที่ทำให้ติดเชื้ออาจจะถูกเคลื่อนย้ายโดยอากาศ และถูกจับโดยตัวกรองอากาศ ตัวอย่างเช่น มีการดำเนินการศึกษาวิจัยเพื่อที่จะศึกษาถึงประสิทธิภาพของการกรองอากาศในห้องร่วมกับการระบายถ่ายเทอากาศเพื่อเจือจาง (dilution ventilation) ในการจำกัดควบคุมการติดเชื้อวัณโรค ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการระบายถ่ายเทอากาศที่ผสมผสานกับการกรองอากาศที่หมุนเวียน (recirculating air filtration) สามารถบรรลุเป้าหมายในการลดความเข้มข้นของนิวเคลียสละอองฝอยโดยที่มีประสิทธิภาพ 30% ถึง 90% วิธีนี้เมื่อรวมกันกับการควบคุมการบริหารจัดการแหล่งที่มา เช่น treatment booths และเครื่องช่วยหายใจ (respirators) สามารถลดศักยภาพในการแพร่กระจายในสถานการณ์ที่มีความเสี่ยงสูงลงได้อย่างมีนัยสำคัญ ในทำนองเดียวกันในการควบคุมโรคติดเชื้อราแอสเพอร์จิลลัส (aspergillosis) ในโรงพยาบาลก็พบว่าอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศที่ระดับสูง ๆ เป็นสิ่งที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อดำเนินการร่วมกับการกรอง ณ จุดที่ใช้ (point-of-use filtration) แนวทางในการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมงและระยะเวลาที่ต้องการ (เป็นนาฬิกา) สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดที่ระดับ 90%, 99%, และ 99.9% ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่แล้ว ภาพประกอบในหนังสือนี้มีประโยชน์แต่ค่าตัวเลขต่าง ๆ ค่อนข้างจำกัด เนื่องจากว่าพวกเขาที่กักเอาว่ามีการผสมที่สมบูรณ์แบบของอากาศภายในบริเวณพื้นที่ และไม่คิดถึงการแขวนลอยขึ้นมาใหม่ (resuspension) ของอนุภาคที่ตกลงไปแล้วและต่อมาก็ได้รับการกวน (stirred up) ผ่านทางกิจกรรม ตามที่ได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ว่าอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศที่ระดับสูง ๆ มีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อรวมกับการกรอง

การทำความสะอาด (Cleaning)

การทำความสะอาดเป็นกระบวนการในการแยกแยะ จำกัดวง และกำจัดทั้งสิ่งปนเปื้อนจากพื้นผิวหรือสิ่งแวดล้อมอย่างถูกต้องเหมาะสม เป็นแนวปรกการป้องกันด่านสุดท้ายในการบริหารจัดการการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมภายในอาคาร ถึงแม้ว่าได้มีการใช้วิธีการบริหารจัดการแหล่งที่มา การบริหารจัดการกิจกรรม การแทรกแซงการออกแบบ และ

การระบายถ่ายเทอากาศเพื่อให้อากาศมาอย่างเหมาะสมทั้งหมดทุกวิธีในการควบคุมละอองลอยติดเชื้อแล้ว แต่การทำความสะอาดก็ยังเป็นสิ่งจำเป็น แม้ว่าการทำความสะอาดน่าจะง่ายขึ้นเพราะแต่ละกลยุทธ์วิธีการได้รับการปรับปรุงแล้วก็ตาม ความสำคัญของการทำความสะอาดได้รับการแสดงให้เห็นในการศึกษาที่ใช้เวลานานถึง 1 ปี ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของการทำความสะอาดในอาคารเอนกประสงค์ที่ไม่มีปัญหาชัดเจน การใช้เครื่องดูดฝุ่นประสิทธิภาพสูงเป็นปกติประจำ การบำบัดฝุ่นโดยใช้ผ้าเปียกขนาด ๆ และผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดที่ได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มีผู้คนพลุกพล่าน และโดยที่ให้ความสนใจไปที่เหตุการณ์อย่างเช่นการหกรั่วซึม เป็นต้น ได้ส่งผลให้เกิดการลดลงอย่างมีความหมายของการปนเปื้อนอนุภาคและจุลินทรีย์ หลังจาก 7 เดือนของการทำความสะอาดที่ได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้นและการเฝ้าติดตามสังเกตการณ์สิ่งแวดล้อม ข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นถึงการลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (50%) ของมวลฝุ่นในอากาศ การลดลง 61% ของเชื้อราในอากาศ การลดลง 40% ของเชื้อแบคทีเรียในอากาศและเชื้อราในฝุ่นจากพรมปูพื้น และการลดลง 84% ของเชื้อแบคทีเรียในฝุ่นจากพรมปูพื้น ตลอดจนการลดลง 72% ของสารเอนโดท็อกซิน (endotoxin) ในฝุ่นจากพรมปูพื้น

บทสรุป (SUMMARY)

การควบคุมและการป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อโรคในอากาศในสิ่งแวดล้อมสถานพยาบาล เริ่มต้นจากการที่มีความเข้าใจเกี่ยวกับจุดกำเนิด ลักษณะทางด้านอากาศพลศาสตร์ การอยู่รอด และความสามารถในการติดเชื้อมัน เพื่อที่ว่าการควบคุมทางด้านวิศวกรรมสามารถได้รับการดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภายในกรอบงานการบริหารจัดการด้านสิ่งแวดล้อมของกลยุทธ์วิธีการเชิงป้องกัน ซึ่งรวมถึงการบริหารจัดการแหล่งที่มา การบริหารจัดการกิจกรรม การแทรกแซงการออกแบบ การแทรกแซงการเฝ้าระวัง และการทำความสะอาด แนวคิดทางด้านสิ่งแวดล้อมทั้งหมดที่ว่านี้เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างแน่นนอนในการลดความเสี่ยงของการแพร่กระจายการติดเชื้อทางอากาศในโรงพยาบาลให้มีระดับต่ำสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยเฉพาะโรงพยาบาลและสถานพยาบาลอื่น ๆ ที่มีผู้ป่วยในควรทำให้แน่ใจว่าทั้งบุคลากรควบคุมการติดเชื้อและนักสุขศาสตร์อุตสาหกรรม (industrial hygienist) ที่ได้รับการรับรองมีส่วนเกี่ยวข้องในงานทั้งก่อนหน้าและในระหว่างการปรับปรุงอาคารและการก่อสร้างอาคาร