

บทความพินิจ

ระบบระบายอากาศสำหรับควบคุมคุณภาพอากาศในโรงพยาบาล

วรกมล บุญโยธิน¹ และ ชีรยุทธ เหลืองศรีสกุล²

¹ภาควิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ²สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

บทคัดย่อ

โรงพยาบาลเป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดปัญหาคุณภาพอากาศภายในอาคาร เนื่องจากกิจกรรมในการบำบัดและรักษาผู้ป่วยอาจทำให้เกิดการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศ และการใช้สารเคมีหลายชนิดเพื่อการฆ่าเชื้อและทำความสะอาดเครื่องมือ สารเคมีในห้องปฏิบัติการ งานแล็บชันกรรมและอื่นๆ การควบคุมคุณภาพอากาศในโรงพยาบาลจึงมีความจำเป็น บทความนี้ กล่าวถึงข้อมูลปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาคุณภาพอากาศภายในโรงพยาบาล และแนวทางการจัดการระบบระบายอากาศที่เหมาะสมสำหรับควบคุมคุณภาพอากาศในโรงพยาบาล ซึ่งประกอบด้วย การเจือจางมลพิษด้วยการนำอากาศจากภายนอกเข้ามาในอาคาร การกำจัดเชื้อออกจากอากาศภายในอาคาร และการควบคุมทิศทางการไหลของอากาศ

คำสำคัญ: ● ระบบระบายอากาศ ● คุณภาพอากาศภายในอาคาร ● โรงพยาบาล

เวชสารแพทย์ทหารบก 2561;71:51-61.

ได้รับต้นฉบับเมื่อ 8 กุมภาพันธ์ 2561 ได้ตีพิมพ์เมื่อ 13 มีนาคม 2561

ต้องการสำเนาต้นฉบับติดต่อ ดร.วรกมล บุญโยธิน ภาควิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล 420/1 ถนนราชวิถี แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400 E-mail: vorakamol.boo@mahidol.ac.th

Subject Reviews

Ventilation System for Control the Hospital Indoor Air Quality

Vorakamol Boonyayothin¹ and Teerayut Luengsriskul²

¹Department of Occupational Health and Safety, Faculty of Public Health, Mahidol University

²Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Abstract

Hospitals face high risk for indoor air quality due to the activities for treatment of patients which able to airborne transmission of infection and the use of chemicals for disinfecting and sterilising agents, laboratory chemicals, pharmaceutical substances and other. The control measure of hospital indoor air quality is crucial. This article will explain about the factor related hospital indoor air quality and suitable ventilation system approach for control indoor air quality composed of diluting indoor pollutants by outdoor air, removing contaminated air and controlling the direction of air flow.

Keywords: ● Ventilation system ● Indoor air quality ● Hospital

RTA Med J 2018;71:51-61.

บทนำ

คุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality; IAQ) ถือเป็นปัญหาที่ทวีความรุนแรงมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากคนส่วนใหญ่ใช้เวลากว่าร้อยละ 90 ของเวลาทั้งหมดในแต่ละวันอยู่ในอาคารเพื่อทำกิจกรรมต่างๆ¹ ทำให้คุณภาพของอากาศภายในอาคารเป็นปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพได้มากขึ้น โดยคนส่วนใหญ่มักเข้าใจว่า อากาศภายในอาคารมีคุณภาพดีกว่าภายนอกอาคาร โดยเฉพาะเมื่ออยู่ในอาคารที่ติดตั้งระบบปรับอากาศ แต่การจะกล่าวถึงคุณภาพของอากาศ ไม่ได้หมายถึง สภาวะที่ทำให้ผู้อยู่ภายในรู้สึกสบาย ด้วยการควบคุมสภาพอากาศให้เกิดภาวะความสบายเชิงความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ยังหมายถึงรวมถึง อากาศที่ต้องไม่มีสิ่งปนเปื้อนในระดับที่ยอมรับได้ กล่าวคือ อากาศในพื้นที่นั้นต้องสะอาด หรือมีระบบควบคุมให้สารปนเปื้อนหรือเชื้อโรคต่างๆ อยู่ในระดับที่ไม่เกินมาตรฐาน หรือไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ที่อยู่ในอาคาร²

โรงพยาบาลหรือสถานบริการทางการแพทย์ ถือเป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดปัญหาคุณภาพอากาศภายในอาคาร เนื่องจากกิจกรรมในการบำบัดและรักษาผู้ป่วย มีโอกาสก่อให้เกิดการแพร่กระจายของเชื้อจากตัวผู้ป่วย ระหว่างขั้นตอนการตรวจวินิจฉัยหรือการรักษา อาทิ การตรวจระบบทางเดินหายใจโดยการส่องกล้อง (bronchoscope) การดูดเสมหะ แม้กระทั่งการไอหรือจามของผู้ป่วยระหว่างรอรับการตรวจ ล้วนทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของอนุภาคละออง (droplet nuclei) ซึ่งมีขนาดเล็กมาก (≤ 5 ไมครอน) จึงสามารถแขวนลอยอยู่ในอากาศได้นาน และสามารถเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณต่างๆ ของโรงพยาบาลได้ตามทิศทางการไหลของอากาศภายในอาคาร หากบุคลากรทางการแพทย์หรือผู้อื่นที่อยู่ในอาคาร หายใจเอาอนุภาคละอองที่มีเชื้อเข้าไป ก็อาจเกิดการติดเชื้อได้³ ซึ่งข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรม⁴⁻⁶ พบว่า มีอุบัติการณ์การติดเชื้อวัณโรคในกลุ่มบุคลากรทางการแพทย์ รวมถึงพบอัตราความชุกของการติดเชื้อในโรงพยาบาล (health care-associated infection) หรือการติดเชื้อที่เป็นผลจากการที่ผู้ป่วยได้รับเชื้อ ขณะรับการรักษาในโรงพยาบาล โดยผู้ป่วยไม่มีการติดเชื้อนั้นมาก่อนหรือไม่อยู่ในระยะพักตัวของโรค จากการเก็บข้อมูลในโรงพยาบาล 1,023 แห่ง พบอัตราความชุก ร้อยละ 3.98 โดยประเภทโรงพยาบาลที่พบการติดเชื้อสูงสุดคือ กลุ่มของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัย (ร้อยละ 7.6) ซึ่งชี้ให้เห็นถึงปัญหาคุณภาพอากาศภายในโรงพยาบาล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โรงพยาบาลที่มีจำนวนผู้

มารับบริการมาก และมีกิจกรรมการวินิจฉัยโรคด้วยขั้นตอนที่ซับซ้อน ก็ยิ่งเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดปัญหาคุณภาพอากาศได้ นอกจากนี้ ขั้นตอนการทำงานต่างๆ ภายในโรงพยาบาล ยังมีการใช้สารเคมีอันตรายหลายชนิด ทั้งเพื่อฆ่าเชื้อ ทำความสะอาดอุปกรณ์ แชนจ์ส่งตรวจ หรือสารที่ใช้เพื่อทำให้สลับ เช่น ฟอर्मัลดีไฮด์ กลูตารัลดีไฮด์ ไนโตรสออกไซด์ เป็นต้น ก็ล้วนเป็นแหล่งของสารปนเปื้อนในอาคาร (Indoor Air Pollutants; IAP) ได้ทั้งสิ้น

ปัจจัยสำคัญในการควบคุมคุณภาพอากาศภายในอาคาร ต้องอาศัยการทำงานของระบบปรับและระบายอากาศ ที่การออกแบบให้เหมาะสมกับพื้นที่หรือกิจกรรมภายในอาคาร และมีการควบคุมการทำงานและตรวจสอบระบบอย่างเหมาะสม ในทางตรงข้าม หากระบบปรับและระบายอากาศ ไม่ได้ถูกออกแบบอย่างเหมาะสม หรือไม่มีกระบวนการรักษาให้ระบบยังคงมีประสิทธิภาพดั้งเดิม ก็อาจส่งผลกระทบต่อเพิ่มขึ้นหรือการแพร่กระจายของสารปนเปื้อน จนนำไปสู่เหตุร้ายแรงจากผู้ที่อยู่ในอาคาร หรือการเกิดปัญหาสุขภาพของผู้ใช้อาคารตามมา⁷ โดยองค์การอนามัยโลกได้คาดการณ์ว่า จะมีอาคารทั้งใหม่และอาคารปรับปรุงมีปัญหาคุณภาพอากาศสูงถึงร้อยละ 30 ของจำนวนอาคารทั้งหมด⁸ บทความนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมข้อมูลปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาคุณภาพอากาศภายในโรงพยาบาล และแนวทางการจัดการระบบปรับและระบายอากาศที่เหมาะสมสำหรับควบคุมคุณภาพอากาศในโรงพยาบาล

ปัจจัยเสี่ยงต่อการเกิดปัญหาคุณภาพอากาศภายในอาคารโรงพยาบาล

การปฏิบัติงานในโรงพยาบาล บุคลากรทางการแพทย์มีโอกาสเสี่ยงต่อการเจ็บป่วยจากปัญหาคุณภาพอากาศภายในอาคารได้จากปัจจัยทั้งทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ อาทิ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ภายในอาคาร สารเคมีที่ฟุ้งกระจายอยู่ในพื้นที่การทำงาน รวมถึงการติดเชื้อจากจุลินทรีย์ที่แพร่ผ่านทางอากาศในระหว่างปฏิบัติงานอยู่ภายในโรงพยาบาล โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องหรือส่งเสริมให้เกิดปัญหาคุณภาพอากาศภายในอาคาร ดังนี้

1. การแพร่กระจายของเชื้อโรคทางอากาศ เนื่องจากโรงพยาบาลเป็นแหล่งรวมผู้ป่วยจำนวนมากทำให้มีโอกาสแพร่กระจายเชื้อโรคได้หากขาดการจัดการที่ดี โดยเฉพาะเชื้อที่สามารถแพร่กระจายทางอากาศได้ การแพร่กระจายของเชื้อสามารถเกิดได้จากการพูด ไอหรือจามของผู้ป่วย ตลอดจนการทำหัตถการทางการแพทย์

แพทย์ เช่น การดูดเสมหะ การพ่นยา การส่องกล้องหลอดลม ล้วนทำให้เกิดการแพร่กระจายของละอองของเหลว (droplet) จากตัวผู้ป่วย ละอองของเหลวดังกล่าวนี้อาจมีการปนเปื้อนด้วยเชื้อจากภายในร่างกายผู้ป่วย ข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรม พบว่าการจามเพียง 1 ครั้ง สามารถทำให้เกิดละอองของเหลวขนาด 0.5-12 ไมครอน ได้ถึง 40,000 ละออง (droplet)^{9,10} ซึ่งการจามโดยไม่ปิดปาก พบว่าละอองจะถูกขับออกมาด้วยความเร็วสูงถึง 144 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยการจามของคนแพร่เชื้อ 1 ครั้ง ภายใน 5 นาที สามารถทำให้เกิดการติดเชื้อได้ถึง 150 คน ขณะที่การไอ 1 ครั้ง หรือการพูดคุยก่อนหน้าเป็นเวลา 5 นาที สามารถทำให้เกิดอนุภาคละออง (droplet nuclei) ได้ถึง 3,000 อนุภาคละออง¹¹⁻¹³ ทั้งนี้ ละอองของเหลวที่มีขนาดใหญ่จะตกลงสู่พื้นด้านล่างตามแรงโน้มถ่วงของโลก อย่างไรก็ตาม มีการศึกษาที่ระบุว่า ละอองของเหลวขนาด 60-100 ไมครอน ที่ถูกขับออกมาจากร่างกายจะเกิดการระเหยจนหมดอย่างรวดเร็ว ภายในเวลาไม่เกิน 1.5 วินาที¹⁴ การระเหยทำให้ละอองมีขนาดเล็กลง เหลือเป็นอนุภาคขนาดเล็กมากเรียกว่า อนุภาคละออง (droplet nuclei) ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน (Figure 1) ขนาดของอนุภาคที่กล่าวถึงนี้ เป็นขนาด

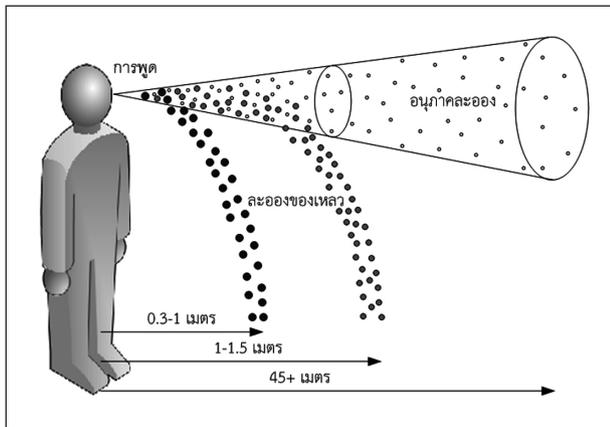


Figure 1 การเกิดละอองของเหลวและอนุภาคละออง

เส้นผ่าศูนย์กลางตามหลักอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic Diameter) กล่าวคือ เป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลม (ความหนาแน่นเท่ากับ 1) ที่มีความเร็วในการตกเท่ากับอนุภาคที่ศึกษา ซึ่งนำมาใช้ในการอธิบายตำแหน่งของระบบทางเดินหายใจที่อนุภาคขนาดต่างๆ สามารถเข้าถึงได้ โดยพบว่า อนุภาคขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน สามารถเคลื่อนที่ผ่านระบบทางเดินหายใจส่วนบน เข้าไปถึงทางเดินหายใจส่วนปลายและสะสมที่ถุงลมปอดได้ ดังนั้น หากเชื้อที่ปนเปื้อนบนอนุภาคละอองยังคงมีชีวิตอยู่ก็สามารถทำให้เกิดการติดเชื้อได้ นอกจากนี้ เนื่องจากขนาดเล็กของอนุภาคละออง ทำให้แขวนลอยอยู่ในอากาศได้นานและแพร่กระจายห่างออกจากแหล่งกำเนิดได้ตามการไหลของอากาศ จึงมีโอกาสเพิ่มความเสี่ยงต่อการแพร่เชื้อได้เป็นวงกว้าง โดยพบว่า อนุภาคละอองที่เกิดจากการจาม สามารถฟุ้งกระจายได้ถึง 45 เมตรหรือมากกว่า (Table 1) และพบว่าอนุภาคละอองขนาด ≤ 5 ไมครอน ซึ่งอยู่ในกระแสอากาศนิ่ง จะมีอัตราการตกลงสู่พื้นเฉลี่ย 1 เมตรต่อ 1 ชั่วโมง หากปล่อยอนุภาคให้ตกจากระดับความสูง 2 เมตร จะใช้เวลาในการตกถึงพื้น ตั้งแต่ 45 นาที ถึง 18 ชั่วโมง ทั้งนี้ หากมีกระแสลมแรงการแขวนลอยในอากาศก็จะนานขึ้น เช่นในหน่วยตรวจผู้ป่วยนอกหรือพื้นที่ที่มีคนอยู่ภายในจำนวนมาก การเดินหรือทำกิจกรรมภายใน สามารถทำให้อนุภาคขนาดเล็กเกิดการลอยตัวกลับ จนอาจกล่าวได้ว่าอนุภาคละอองสามารถจะแขวนลอยอยู่ในอากาศได้ตลอดเวลาโดยไม่ตกลงสู่พื้น¹⁵⁻¹⁸

การแพร่กระจายเชื้อทางอากาศในโรงพยาบาล อาจแบ่งกลุ่มเสี่ยงต่อการติดเชื้อ ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มของการติดเชื้อที่แพร่ผ่านอากาศ ซึ่งคนทั่วไปหรือบุคลากรทางการแพทย์ที่ไม่มีภูมิคุ้มกันต่อโรคมักมีโอกาสเสี่ยงต่อการติดเชื้อ เช่น วัณโรค Varicella-Zoster virus, Smallpox, SARS Corona Virus และ Viral hemorrhagic fever เช่น Ebola, Lassa เป็นต้น การป้องกันการแพร่เชื้อต้องอาศัยการตรวจคัดกรองที่เร็ว เพื่อแยก

Table 1 อัตราเร็วของละอองของเหลวและระยะการกระจายของเชื้อไปในอากาศ

ลักษณะการเกิด	อัตราเร็วในเคลื่อนที่ของละอองของเหลว (เมตร/วินาที)	ระยะการฟุ้งกระจายจากแหล่งกำเนิด (เมตร)	
		ละอองขนาดใหญ่	อนุภาคละออง (Droplet nuclei)
การจาม	50-100	2.5-4, >6	> 45
การไอ	10	0.3-1.5, >2	> 45
การพูด	-	0.3-1	> 45
การหายใจ	1	< 1	> 45

ผู้ป่วยที่มีโอกาสแพร่เชื้อไปอยู่ในห้องแยกสำหรับป้องกันการแพร่กระจายเชื้อทางอากาศ และผู้ปฏิบัติงานต้องปฏิบัติตามหลัก Airborne precautions ทั้งนี้ ห้องแยกสำหรับผู้ป่วยติดเชื้อต้องจัดการระบายอากาศให้เหมาะสมเพื่อลดปริมาณเชื้อในอากาศลง และป้องกันไม่ให้เชื้อหรืออากาศที่ปนเปื้อนจากภายในห้องแพร่ออกไปภายนอก ด้วยการสร้างแรงดันเป็นลบภายในห้อง และ 2) กลุ่มการติดเชื้อที่เกิดกับผู้ที่มิภูมิคุ้มกันบกพร่อง เช่น ผู้ป่วยที่ได้รับการเปลี่ยนถ่ายอวัยวะ เชื้อสำคัญที่ทำให้เกิดโรคในกลุ่มนี้ เช่น เชื้อรา *Aspergillus spp* และ *Rhizopus spp.* หรือแบคทีเรียกลุ่ม *Staphylococcus aureus (S. aureus)* และ *S. epidermidis* ซึ่งพบเป็นสาเหตุหลักของการติดเชื้อของแผลหลังการผ่าตัด การป้องกันในกลุ่มนี้ ต้องอาศัยระบบระบายอากาศที่ต้องสามารถกำจัดสารปนเปื้อนหรือเชื้อโรคออกจากอากาศก่อนจ่ายเข้าสู่ภายในห้อง และต้องป้องกันอากาศที่อาจปนเปื้อนไหลเข้าภายในห้องโดยไม่ผ่านการกรอง ด้วยการสร้างแรงดันเป็นบวก ซึ่งระบบนี้มักใช้ใน ห้องผ่าตัด หรือห้องป้องกันเชื้อ ทั้งนี้ การศึกษาที่ผ่านมา พบว่า ปัญหาของห้องแยกผู้ป่วยยังมีปัญหาเรื่องการสร้างแรงดันที่ไม่มากพอจะป้องกันเชื้อ การรั่วของอากาศผ่านกรอบอาคารหรือประตู การวางสิ่งของกีดขวางทางไหลของอากาศ รวมถึง การขาดการดูแลและบำรุงรักษาแผงกรองอากาศ ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง¹⁹⁻²⁰

2. การใช้สารเคมีภายในโรงพยาบาล การปฏิบัติงานในโรงพยาบาลมีการใช้สารเคมีหลากหลายชนิด อาทิ สารเคมีที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรค (chemical disinfectants) สารเคมีเพื่อการแช่ชิ้นเนื้อส่งตรวจ การใช้สารเคมีในห้องปฏิบัติการ ห้องผ่าตัด และห้องฉีดยาฆ่าเชื้อ เช่น Isopropyl alcohol, Sodium Hypochlorite (chlorine), Iodine, Glutaraldehyde, Formaldehyde, Ethylene oxide เป็นต้น ซึ่งการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าโรงพยาบาลส่วนใหญ่ มีการติดตั้งระบบดูดอากาศเฉพาะที่และระบบกำจัดก๊าซเฉพาะห้องผ่าตัดเพื่อป้องกันการรั่วของก๊าซที่ใช้ในการดมยาสลบ และการใช้ตู้ดูดไอสารเคมี (Chemical Fume Hood) เฉพาะในพื้นที่ห้องปฏิบัติการเท่านั้น แต่ในบริเวณอื่นไม่ได้มีระบบที่ออกแบบเฉพาะเพื่อควบคุมระดับความเข้มข้นของสารเคมีในบรรยากาศการทำงาน มีเพียงการใช้พัดลมดูดอากาศชนิดติดผนังหรืออาศัยการทำงานของเครื่องมือ เพื่อควบคุมปริมาณสาร เช่น เครื่องอบฆ่าเชื้อด้วย Ethylene oxide ซึ่งภายในห้องอบของตัวเครื่องจะมีความดันต่ำกว่า ความดันบรรยากาศ (Vacuum) เพื่อป้องกันการรั่วของก๊าซระหว่างการอบ อย่างไรก็ตาม การเปิดเครื่องเพื่อย้าย

เครื่องมือออก ยังมีโอกาสทำให้สารที่ตกค้างเกิดการฟุ้งกระจายในบรรยากาศการทำงานได้ ระบบภายในห้องจึงควรต้องออกแบบเพื่อนำอากาศจากภายนอกเข้ามาเจือจางระดับความเข้มข้นของสารภายในอาคารที่มากพอ และควบคุมความดันภายในห้องให้เป็นลบเพื่อป้องกันการรั่วของสารออกสู่ภายนอก

3. สถานะอากาศภายในอาคาร อาจส่งเสริมให้เกิดเจริญเติบโตและการแพร่กระจายของเชื้อภายในอาคารได้ หากความชื้นในอากาศต่ำ (< 40%RH) จะทำให้แบคทีเรียและไวรัสเจริญเติบโตได้มากขึ้น และยังเสริมให้ละอองของเหลวที่ออกมาจากผู้ป่วยระเหยได้ดีขึ้น และเกิดเป็นอนุภาคละอองจำนวนมาก ซึ่งยิ่งเสริมการแพร่กระจายของเชื้อในอากาศ แต่หากความชื้นสัมพัทธ์สูงเกินไป (> 70%) มีความสัมพันธ์ต่อการเจริญเติบโตของเชื้อรา ดังนั้น ความชื้นของอากาศที่เหมาะสมในการควบคุมเชื้อ ควรมีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง 40-60% เนื่องจากเป็นช่วงที่มีการอยู่รอดของเชื้อในอากาศต่ำที่สุด และส่งผลเสียต่อผู้ที่อยู่ในอาคารน้อยที่สุด โดยพบว่า ความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงที่ต่ำกว่า 20% อาจทำให้เกิดการระคายเคืองของเยื่อจมูกและผิวหนังได้²¹⁻²²

4. ปัจจัยทางกายภาพอื่นๆ ที่อาจส่งผลต่อปัญหาคุณภาพอากาศภายในอาคาร อาทิ การรั่วของท่อน้ำ หรือพื้นผิวที่มีความเปียกชื้นภายในท่ออากาศ อาจเป็นแหล่งสะสมของเชื้อ และทำให้เกิดการแพร่กระจายเชื้อไปตามส่วนต่างๆ ของอาคารได้ การไม่ดูแลระบบปรับอากาศ หรือคุณภาพของน้ำในระบบ มีความสัมพันธ์ต่อการแพร่ของเชื้อแบคทีเรีย *Legionella pneumophila* ในระบบน้ำหล่อเย็น ซึ่งทำให้เกิดโรค Legionnaires' Disease และ Pontiac Fever ได้^{1,22}

นอกจากนี้ การปรับปรุงอาคารโดยไม่คำนึงถึงการระบายอากาศหรือการกันแยกบริเวณที่เหมาะสมอาจเป็นสาเหตุของปัญหาคุณภาพอากาศได้ โดยพบว่า มีการติดเชื้อที่เพิ่มขึ้น ในระหว่างการปรับปรุงอาคาร โคนคนไข้ที่มีภูมิคุ้มกันต่ำหรือต่ำกว่าปกติ (Immunocompromised) เกิดการติดเชื้อ *Aspergillus* และการตรวจสภาพอากาศ พบว่า มีสปอร์เชื้อรา เพิ่มมากขึ้นในระหว่างการปรับปรุงอาคาร²³⁻²⁴

แนวทางการจัดการระบบระบายอากาศภายในโรงพยาบาล

1. การนำอากาศจากภายนอก (Outdoor Air) เข้ามาภายในอาคาร การนำอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในห้องหรืออาคาร มีวัตถุประสงค์เพื่อเจือจางความเข้มข้นของสารเคมีภายในบรรยากาศการทำงาน หรือการลดความเข้มข้นของเชื้อโรคที่ฟุ้งกระจายในรูป

ของอนุภาคละออง (Dilution Principle) ทั้งนี้ ปริมาณการนำอากาศเข้ามาจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับระดับการปนเปื้อนของอากาศภายใน และระดับความสะอาดของอากาศที่ต้องการ เช่น ห้องผ่าตัดหรือห้องคลอด ต้องการความสะอาดของอากาศมากเพื่อป้องกันการติดเชื้อ จึงมีความจำเป็นต้องดึงอากาศจากภายนอกเข้ามาไม่น้อยกว่า 5 เท่าของปริมาตรห้องต่อชั่วโมง (5 Air Change per Hour; ACH) ขณะที่พื้นที่ห้องพักผู้ป่วย ควรนำอากาศจากภายนอกเข้ามาไม่น้อยกว่า 2 เท่าของปริมาตรห้องต่อชั่วโมง (Table 2)²⁵

การนำอากาศจากภายนอกเข้ามาเพื่อเจือจางมลพิษภายในอาคารนั้น จำเป็นต้องพิจารณาความสะอาดของอากาศภายนอกอาคารก่อน โดยเฉพาะโรงพยาบาลซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่การจราจรหนาแน่น อาจทำให้อากาศในบริเวณนั้นปนเปื้อนด้วยฝุ่นละอองขนาดเล็กหรือสารที่ถูกปล่อยจากไอเสียรถยนต์ การนำอากาศนั้นๆ เข้ามาในอาคารอาจเป็นการเพิ่มปัญหาคุณภาพอากาศภายในอาคารได้ ทั้งนี้ ได้รวบรวมเกณฑ์สำหรับพิจารณาความสะอาดของอากาศภายนอก (Table 3) หากผลการตรวจสอบสภาพอากาศภายนอกอาคาร โรงพยาบาลสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน หรือโรงพยาบาลตั้งอยู่ในพื้นที่ที่มีความเสี่ยง กล่าวคือ มีบางช่วงของการตรวจวัดสภาพอากาศ โดยกรมควบคุมมลพิษ หรือการตรวจประเมินเองเกินมาตรฐาน และอยู่ในพื้นที่การจราจรหนาแน่น ควรติดตั้งแผงกรองอากาศที่

บริเวณท่อนำอากาศเข้า (outdoor air grille) โดยควรใช้แผงกรองที่มีการรายงานค่าประสิทธิภาพต่ำสุด (Minimum Efficiency Reporting Value: MERV) ตั้งแต่ระดับ 8 ขึ้นไป สำหรับการกรองฝุ่นขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน และระดับ 11 ขึ้นไป สำหรับการกรองฝุ่นขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน²

รวมถึง ตรวจสอบจุดนำอากาศเข้าให้ห่างจากแหล่งมลพิษ อาทิ จุดปล่อยอากาศเสียจากห้องปฏิบัติการ ห้องน้ำหรือพื้นที่อื่นๆ อย่างน้อย 5 เมตร และควรสูงกว่าระดับพื้นไม่น้อยกว่า 1.5 เมตร ทั้งนี้ การนำอากาศจากภายนอกเข้ามาภายในอาคาร ในปริมาณมาก แม้จะมีผลดีต่อคุณภาพอากาศภายในอาคาร แต่กลับส่งผลต่ออัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศที่สูงมาก โดยเฉพาะอาคารที่มีการใช้พื้นที่ที่เกือบตลอดเวลา เช่น โรงพยาบาล การออกแบบระบบเพื่อลดอุณหภูมิของอากาศภายนอกอาคารด้วยหลักการถ่ายเทความร้อน (heat exchanger) ก่อนนำอากาศเข้าสู่ระบบทำความเย็นเป็นแนวทางหนึ่งในการอนุรักษ์พลังงานของอาคารได้

2. การกำจัดเชื้อออกจากอากาศภายในอาคาร กิจกรรมต่างๆ ภายในโรงพยาบาลล้วนเพิ่มความเสี่ยงต่อการฟุ้งกระจายของเชื้อโรคหรือสารปนเปื้อนต่างๆ การกำจัดเชื้อออกจากพื้นที่ภายในอาคารทำได้โดยการเพิ่มอัตราการหมุนเวียนอากาศ (recirculation air) ไปผ่านระบบปรับอากาศ ซึ่งติดตั้งแผงกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพเหมาะสม เมื่ออากาศถูกดึงให้หมุนเวียนแผงกรอง

Table 2 อัตราการนำอากาศจากภายนอก อัตราการหมุนเวียนอากาศ และระบบกรองอากาศที่แนะนำสำหรับพื้นที่ต่างๆ ของโรงพยาบาล^{33,34}

สถานที่	อัตราการนำอากาศภายนอก (ACH)	อัตราการหมุนเวียนอากาศภายในห้อง (ACH)	จำนวนแผงกรองอากาศ	ประสิทธิภาพแผงกรองขั้นต่ำ	
				แผงกรองชั้นที่ 1	แผงกรองชั้นที่ 2
ห้องผ่าตัด	5	25	2	25-30% / MERV 7	99.97% / MERV 17
ห้องคลอด	5	25	2	25-30% / MERV 7	90-95% / MERV 14
หอผู้ป่วยหนัก (ICU)	2	6	2	25-30% / MERV 7	90-95% / MERV 14
ห้องรักษาผู้ป่วย	2	12	2	25-30% / MERV 7	90-95% / MERV 14
ห้องฉุกเฉิน	3	15	2	25-30% / MERV 7	90-95% / MERV 14
บริเวณพักคอยแผนกผู้ป่วยนอก	2	12	2	25-30% / MERV 7	90-95% / MERV 14
ห้องพักผู้ป่วย	2	6	1	25-30% / MERV 7	-
ห้องแยกผู้ป่วยติดเชื้อ	2	6	1	25-30% / MERV 7	-
ห้องปฏิบัติการ	2	6	1	80-85% / MERV 13	-
ห้องชันสูตรศพ	2	12	-	-	-

หมายเหตุ : MERV = Minimum Efficiency Reporting Value ตามมาตรฐาน ASHRAE 52.2

ประสิทธิภาพแผงกรอง (%) อ้างอิงการทดสอบ Average Dust Spot Efficiency ตามมาตรฐาน ASHRAE 52.1

Table 3 มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศทั่วไป

สารมลพิษ	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ในช่วงเวลา	ค่ามาตรฐาน	
		ส่วนในล้านส่วน	มก./ลบ.ม.
ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ²⁶	1 ชั่วโมง	30	34.2
	8 ชั่วโมง	9	10.26
ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO ₂) ^{26,28,29}	1 ชั่วโมง	0.17	0.32
	1 ปี	0.03	0.057
ก๊าซโอโซน (O ₃) ^{26,29}	1 ชั่วโมง	0.10	0.20
	8 ชั่วโมง	0.07	0.14
ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂) ^{26,27}	1 ปี	0.04	0.10
	24 ชั่วโมง	0.12	0.30
	1 ชั่วโมง	0.30	0.78
ตะกั่ว (Pb) ²⁶	1 เดือน	-	0.0015
ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 100 ไมครอน ^{26,27}	24 ชั่วโมง	-	0.33
	1 ปี	-	0.10
ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน ^{26,27}	24 ชั่วโมง	-	0.12
	1 ปี	-	0.05
ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ³⁰	24 ชั่วโมง	-	0.05
	1 ปี	-	0.025

หมายเหตุ : มาตรฐานค่าเฉลี่ยระยะสั้น (1, 8 และ 24 ชั่วโมง) กำหนดขึ้นเพื่อป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพเฉียบพลัน (acute effect) และมาตรฐานระยะยาว (1 เดือน และ 1 ปี) เพื่อป้องกันผลกระทบเรื้อรังที่อาจเกิดขึ้นต่อสุขภาพ (chronic effect)

ในปริมาณมากขึ้น เชื่อที่เขว่นลอยก็จะถูกกรองออกจากกระแสอากาศมากขึ้นด้วย จากการศึกษา³¹ พบว่าร้อยละ 99.4 ของแบคทีเรียที่พบในโรงพยาบาล ซึ่งมักรวมตัวอยู่ด้วยกัน โดยมีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน สามารถกำจัดออกได้โดยแผงกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพร้อยละ 90-95 (อ้างอิงมาตรฐานการทดสอบแผงกรองตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 52.1) อย่างไรก็ตามในห้องที่ต้องการความสะอาดมาก ควรเลือกใช้แผงกรองอากาศชนิด HEPA (High Efficiency Particulate Air Filter) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคขนาด 0.3 ไมครอน ได้ถึงร้อยละ 99.97 ทั้งนี้ได้รวบรวมอัตราการหมุนเวียนอากาศ และแผงกรองอากาศที่แนะนำสำหรับพื้นที่ต่างๆ ของโรงพยาบาล (Table 2) ซึ่งเป็นค่าขั้นต่ำที่หลายหน่วยงานเสนอแนะ อย่างไรก็ตาม มีการศึกษาที่พบว่า ปริมาณเชื้อที่แพร่กระจายในอาคารมีความสัมพันธ์กับจำนวนผู้ผู้อยู่ภายในอาคาร³² ดังนั้น โรงพยาบาลที่มีผู้รับบริการจำนวนมาก อาจพิจารณาปรับอัตราการระบายอากาศและประสิทธิภาพแผงกรองให้สูงขึ้นได้ สำหรับพื้นที่ซึ่งแนะนำให้ใช้แผงกรอง

2 ชั้น แผงกรองชั้นแรก (pre filter) ควรติดตั้งก่อนแผงคอยล์ทำความเย็น ส่วนแผงกรองชั้นที่ 2 (final filter) ควรติดตั้งด้านหลังออกจากพัดลม ก่อนจ่ายเข้าสู่ภายในห้องหรืออาคาร สำหรับห้องที่ต้องการความสะอาดของอากาศมาก อาจติดตั้งแผงกรองชั้นที่ 1 เพิ่ม (medium filter) ไว้ด้านหน้าคอยล์เย็น และแผงกรอง HEPA ไว้ก่อนจ่ายอากาศเข้าห้อง (Figure 2)

การกำจัดเชื้อออกจากกระแสอากาศ นอกจากระบบกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพ และดึงอากาศมาหมุนวนผ่านตัวกรองด้วยอัตราที่เหมาะสมแล้ว การตรวจสอบระบบการทำงานและเปลี่ยนแผงกรองเมื่อเสื่อมสภาพหรือประสิทธิภาพการทำงานลดลงเป็นสิ่งจำเป็น การเปลี่ยนแผงกรองสามารถกำหนดรอบระยะเวลาการตรวจสอบหรือเปลี่ยนแผงกรอง เช่น ตรวจสอบทุกเดือน เปลี่ยนทุก 6 เดือน แต่สำหรับห้องที่มีอัตราการใช้งานไม่แน่นอน และต้องการความสะอาดของอากาศมาก เช่น ห้องสำหรับผู้ป่วยที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อ หรือห้องผ่าตัด ควรติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันตกคร่อมระหว่างแผงกรองและหน้าจอสถาปัตยกรรมในห้อง เพื่อให้บุคลากร

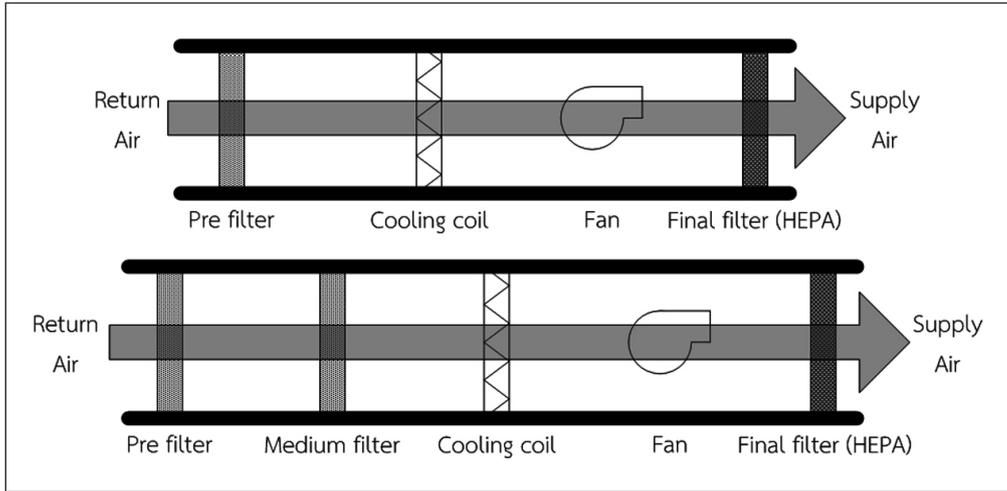


Figure 2 ตำแหน่งการติดตั้งแผงกรองอากาศ

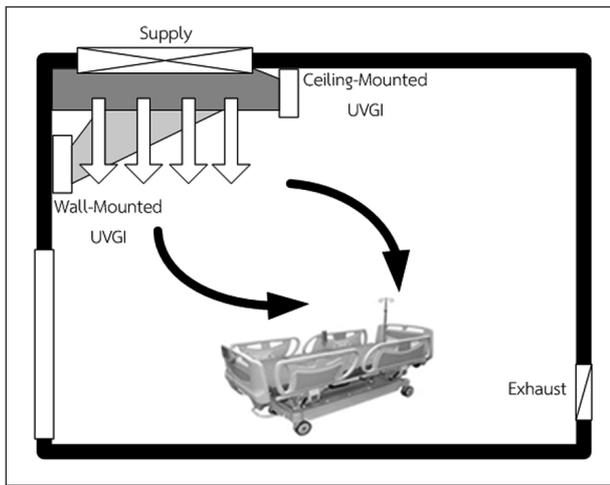


Figure 3 ตำแหน่งการติดตั้ง UVGI Unit

ทางการแพทย์ทราบสถานะทำงานของระบบ ในกรณีที่แรงดันตกคร่อมแผงกรองสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการมีฝุ่นอุดตันที่ผิวหน้าของแผงกรองในปริมาณมาก ผู้ปฏิบัติงานสามารถแจ้งหน่วยดูแลอาคารให้ทำการตรวจสอบและเปลี่ยนแผ่นกรองได้ทันที

การกำจัดเชื้อด้วยการกรองได้ผลดีกับเชื้อแบคทีเรียในอากาศ แต่สำหรับเชื้อไวรัสซึ่งมีขนาดเล็กมากในระดับ Submicron เช่น Varicella-zoster, Rubella, Rubeola นอกจากการกรองด้วยแผงกรองประสิทธิภาพสูง เช่น HEPA หรือ ULPA (Ultra Low Penetration Air Filter) แล้ว ยังมีการศึกษาที่พบว่า การประยุกต์ใช้รังสีอัลตราไวโอเลตในการฆ่าเชื้อ (Ultraviolet Germicidal Irradiation; UVGI) สามารถเสริมประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อในอากาศได้ โดยรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 250-265 นาโนเมตร การติดตั้งหลอด

UVGI สามารถทำได้ 2 รูปแบบ คือ การติดตั้งใหม่ต่อลม โดยรังสีจะฆ่าเชื้อในอากาศที่ผ่านท่อลมก่อนจ่ายเข้ามาในห้อง หรือการติดตั้งที่ส่วนบนของห้อง โดยติดตั้ง UVGI (UVGI Unit) บนเพดานหรือผนังห้อง และมีการกั้นไม่ให้แสงส่องลงมาภายในห้อง (Figure 3) ประสิทธิภาพการทำงานของ UVGI ขึ้นกับอัตราการไหลของอากาศและระยะเวลาที่รังสีสัมผัสอากาศ โดยประสิทธิภาพจะลดลงอย่างมาก เมื่ออากาศมีความชื้นสัมพัทธ์เกิน 70%^{35,36}

3. การควบคุมทิศทางการไหลของอากาศ เป็นมาตรการสำคัญในการควบคุมคุณภาพอากาศภายในอาคาร ทำได้โดยควบคุมให้อากาศไหลจากพื้นที่ซึ่งมีความสะอาดมาก ไปสู่พื้นที่ที่อากาศสะอาดน้อย ก่อนปล่อยออกจากอาคาร หรือหมุนวนกลับเข้าระบบ ทำโดยการสร้างความแตกต่างของแรงดันในแต่ละห้อง กล่าวคือ หากต้องการควบคุมทิศทางการไหลของอากาศของห้องแยกผู้ป่วยติดเชื้อ ควรจัดการให้อากาศไหลจากภายนอกห้องหรือบริเวณอื่นๆ ซึ่งมีการปนเปื้อนน้อย เข้าสู่ในห้องแยกผู้ป่วยติดเชื้อ ที่อากาศภายในมีโอกาสสูงต่อปนเปื้อนเชื้อจากผู้ป่วย หรือมีความสกปรกมาก และดึงอากาศปนเปื้อนในห้องระบายทิ้งภายนอกอาคาร การให้อากาศไหลในทิศทางที่ต้องการนี้ ต้องอาศัยความแตกต่างของแรงดันอากาศ โดยภายในห้องแยกเชื้อ ต้องมีแรงดันต่ำกว่าพื้นที่ใกล้เคียง (Table 4) ซึ่งระดับความดันแตกต่างกันตามที่แนะนำสำหรับควบคุมทิศทางการไหลของอากาศ คือ ไม่น้อยกว่า 2.5 ปาสคาล ซึ่งการเปิดประตูทิ้งไว้ หรือการวางอุปกรณ์ทางการแพทย์ในห้องเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้ระดับความดันอากาศเปลี่ยนแปลงไปได้ ดังนั้น จึงควรติดอุปกรณ์วัดความดัน พร้อมหน้าจอแสดงผลไว้ภายในห้อง กรณีที่ระดับความดันเปลี่ยนแปลงไป หรือไม่สามาร

Table 4 ระดับความดันในห้องต่างๆ ของโรงพยาบาล

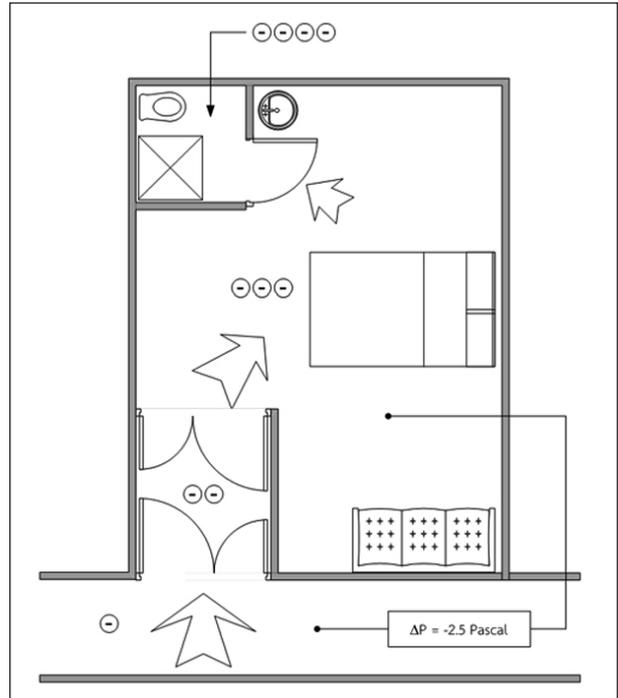
ระดับความดันในห้องเมื่อเทียบกับพื้นที่ข้างเคียง	
สูงกว่า	ต่ำกว่า
ห้องผ่าตัด	ห้องแยกผู้ป่วยติดเชื้อ
ห้องคลอด	ห้องปฏิบัติการ
หอผู้ป่วยหนัก (ICU)	ห้องชันสูตรศพ
ห้องรักษาผู้ป่วย	บริเวณพักคอยแผนกผู้ป่วยนอก
ห้องฉุกเฉิน	
ห้องพักผู้ป่วย	

สร้างความแตกต่างของแรงดัน ให้อากาศไหลในทิศทางที่ต้องการ ผู้ที่ทำงานอยู่ในห้องสามารถทราบและแจ้งให้หน่วยงานที่ดูแลเข้ามาตรวจสอบได้ หรืออาจออกแบบระบบให้ส่งสัญญาณเสียงแจ้งเตือน เมื่อค่าความดันต่ำกว่าค่าที่ออกแบบไว้³⁷

สำหรับห้องที่มีความสกปรกของอากาศสูง และต้องควบคุมไม่ให้อากาศปนเปื้อน เล็ดลอดออกไปยังพื้นที่อื่นๆ จำเป็นต้องมีการตรวจสอบรอยรั่วของกรอบอาคาร ประตู เพื่ออุดช่องเปิดต่างๆ ซึ่งมีผลให้แรงดันอากาศเปลี่ยนแปลงไป และอาจกระทบต่อทิศทางการไหล รวมถึง การสร้างแรงดันอากาศให้มีความแตกต่างและเชื่อมโยงกันในแต่ละบริเวณ เพื่อป้องกันเชื้อหรืออากาศปนเปื้อนไหลไปในบริเวณที่ไม่ต้องการ หรือการไหลวนกลับเข้ามา ทำได้โดยการสร้างระดับความต่างของแรงดันให้สัมพันธ์กัน (Figure 4) ไล่เรียงตามความสะอาดของอากาศ โดยแต่ละบริเวณต้องมีความต่างแรงดันไม่น้อยกว่า 2.5 ปาสกาล³⁸

สรุป

การควบคุมระบบปรับและระบายอากาศให้เหมาะสมกับการทำงานให้พื้นที่ต่างๆ ของโรงพยาบาล ถือเป็นองค์ประกอบสำคัญในการควบคุมปัญหาคุณภาพอากาศภายในโรงพยาบาล เพื่อสร้างความปลอดภัยให้กับบุคลากรทางการแพทย์และผู้มารับบริการ ทำได้โดยการนำอากาศจากภายนอกเข้ามาเจือจางระดับความเข้มข้นของเชื้อหรือสารปนเปื้อนภายในอาคาร การทำความสะอาดอากาศภายในห้องด้วยการกรองหรือเทคโนโลยีอื่นๆ ที่นำมาใช้เสริมประสิทธิภาพกัน รวมไปถึง การสร้างความแตกต่างของแรงดันอากาศ เพื่อควบคุมทิศทางการไหลของอากาศให้ไหลในทิศทางที่ลดความเสี่ยงต่อการแพร่กระจายเชื้อ ร่วมกับการกำหนดสถานะการทำงานของระบบ อาทิ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ เพื่อลดความเสี่ยงต่อการเจริญเติบโตและการแพร่กระจายของเชื้อ

**Figure 4** ระดับแรงดันอากาศเพื่อควบคุมทิศทางการไหลอากาศ

ภายในอาคาร อย่างไรก็ตาม พื้นที่ต่างๆ ของโรงพยาบาลมีความแตกต่างกัน การควบคุมระบบปรับและระบายอากาศ จึงต้องปรับให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้พื้นที่และปัญหาคุณภาพอากาศ และการตรวจสอบการทำงานของระบบอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้มั่นใจว่าระบบยังทำงานเพื่อควบคุมคุณภาพอากาศได้อย่างต่อเนื่องเป็นสิ่งจำเป็น

เอกสารอ้างอิง

- Bradford O. Brooks, William F. Davis. *Understanding indoor air quality*. Boca Raton : CRC Press, 1992.
- สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทย : มาตรฐานการตรวจสอบคุณภาพอากาศภายในอาคาร. กรุงเทพฯ : บริษัท จุดทอง จำกัด, 2549.
- Centers for Disease Control and Prevention. *Guidelines for preventing the transmission of Mycobacterium tuberculosis in health-care setting, 2005*. *Morbidity and Mortality Weekly Report*; 2005 [cited 2018 Jan 20]. Available from: <https://www.cdc.gov/mmwr/pdf/rr/rr5417.pdf>
- ภาณุมาศ ภูมิศาสตร์, ดวงรัตน์ โพธิ์, วิษณุ ธรรมลิขิตกุล, อาทร รุ่งไพบูลย์, ภูษิต ประคองสาย, สุพล ลิ้มวัฒนานนท์. ผลกระทบด้านสุขภาพและเศรษฐศาสตร์จากการติดเชื้อดื้อยาต้านจุลชีพในประเทศไทย : การศึกษาเบื้องต้น. *วารสารวิจัยระบบสาธารณสุข*. 2555;6:352-60.
- ศิริลักษณ์ อภิวัฒน์ชัย, ถนอมวงศ์ มั่นทนต์จิตร, กำธร มาลาธรรม. การเฝ้าระวังการติดเชื้อวัณโรคของบุคลากรในทีมสุขภาพโรงพยาบาลรามธิบดี. *รามธิบดีพยาบาลสาร*. 2555;18:273-86.

6. สมหวัง ดำนชัยวิจิตร, บรรณานิติกร. โรคติดเชื้อในโรงพยาบาล. กรุงเทพฯ: แอล ที เพรส, 2544.
7. Shirley J Hansen. *Managing Indoor Air Quality*. Lilburn : Fairmont Press, 1928.
8. United States Environmental Protection Agency. *Indoor Air Facts No.4 Sick Building Syndrome: Air and Radiation* [cited 2018 Jan 20]. Available from: https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-08/documents/sick_building_factsheet.pdf
9. Cole EC, Cook CE. Characterization of infectious aerosols in health care facilities: an aid to effective engineering controls and preventive strategies. *American Journal of Infection Control*. 1998;26:453-64.
10. Tang JW, et al. Factors involved in the aerosol transmission of infection and control of ventilation in healthcare premises. *J Hospital Infection*. 2006;64:100-14.
11. Wells WF. *Airborne contagion and air hygiene. An Ecological Study of Droplet Infections*. Cambridge : Harvard University Press; 1955.
12. ศิริลักษณ์ วงษ์วิจิตรสุข, ชัญญา เจียมใจ. มลพิษอากาศภายในห้องปิดบังจ่ายที่เกี่ยวข้องต่อการเกิดกลุ่มอาการอาคารป่วยและความชุกของกลุ่มอาการอาคารป่วย กรณีศึกษา มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ. *สมุทราสาร: มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ*, 2552.
13. Fitzgerald D, Haas DW. *Mycobacterium tuberculosis*. In: Mandell GL, Bennett JE, Dolin R, editors. *Principles and practice of infectious diseases*. 6th ed. Philadelphia : Elsevier Churchill Livingstone. 2005:2852-86.
14. Wells WF. On air-borne infection. Study II. Droplets and droplet nuclei. *American Journal of Hygiene*. 1934;20:611-8.
15. Tang JW, et al. Door-opening motion can potentially lead to a transient breakdown in negative-pressure isolation conditions: the importance of vorticity and buoyancy air-flows. *J Hospital Infection*. 2005;61:283-6.
16. Edge BA, Paterson EG, Settles GS. Computational study of the wake and contaminant transport of a walking human. *J Fluids Engineering*. 2005;127:967-77.
17. Hayden CS, et al. Air volume migration from negative pressure isolation rooms during entry/exit. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*. 1998;13:518-27.
18. Duguid JP. The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet-nuclei. *J Hygiene*. 1946;44:471-9.
19. เจริญ ชูโชติถาวร. โรคติดเชื้อ *Mycobacterium*. ใน : พรหมทิพย์ ฉายากุล และคณะ บรรณานิติกร. ตำราโรคติดเชื้อ 1. กรุงเทพฯ : โอเอสดีที แพ็บลิชซิง. 2548:683-719.
20. จริยา แสงสังข์จา. คู่มือการปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคารสถานพยาบาล. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์สำนักงานพระพุทธศาสนาแห่งชาติ, 2550.
21. Rycroft R. Low humidity and microtrauma. *American Journal of Industrial Medicine*. 1985;8:371-3.
22. Burton DJ. *IAQ and HVAC Workbook*. Salt Lake City : IVE; 1995.
23. Overberger PA, Wadowsky RM, Schaper MM. Evaluation of airborne particulates and fungi during hospital renovation. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 1995;56:706-12.
24. Dewhurst AG, Cooper MJ, Khan SM, Pallett AP, Dathan JR. Invasive aspergillosis in immunocompromised patients: potential hazard of building work. *British Medical Journal*. 1990;301:802-4.
25. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. *Standard 170-2017 Ventilation of Health Care Facilities*. USA : 2017.
26. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 10 (พ.ศ. 2538) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 112 ตอนที่ 52ง. วันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2538
27. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 24 (พ.ศ. 2547) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 121 ตอนที่พิเศษ 104 ง. วันที่ 22 กันยายน พ.ศ. 2547
28. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 28 (พ.ศ. 2550) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 124 ตอนที่พิเศษ 58ง วันที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2550
29. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 33 (พ.ศ. 2552) เรื่อง กำหนดมาตรฐานค่าก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในบรรยากาศโดยทั่วไป ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 126 ตอนที่พิเศษ 114ง วันที่ 14 สิงหาคม พ.ศ. 2552
30. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 36 (พ.ศ. 2553) เรื่อง กำหนดมาตรฐานฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ในบรรยากาศโดยทั่วไป ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 127 ตอนที่พิเศษ 37ง วันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2553
31. Luciano JR. New concept in French hospital operating room HVAC system. *ASHRAE J*. 1984;26:30-4.
32. Centers for Disease Control and Prevention. *Guideline for prevention of surgical site Infection, 1999*. *Infection Control and Hospital Epidemiology*; 1999 [cited 2018 Jan 20]. Available from: <https://www.cdc.gov/hai/pdfs/ssiguilines.pdf>
33. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. *ASHRAE 1999 HVAC Applications Handbook*. USA: 1999.

34. คณะกรรมการวิชาการวิศวกรรมเครื่องกล. มาตรฐานระบบปรับอากาศและระบายอากาศ. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2559.
35. Riley RL, Kaufman JE. Effect of relative humidity on the inactivation of airborne *Serratia marcescens* by ultraviolet radiation. *Appl Microbiol.* 1972;23:1113-20.
36. Centers for Disease Control and Prevention. Guidelines for Preventing the Transmission of *Mycobacterium tuberculosis* in Health-Care Facilities, 1994 [cited 2018 Jan 20]. Available from: <https://wonder.cdc.gov/wonder/prevguid/m0035909/m0035909.asp#head007000000000000>
37. The American Institute of Architects. Guidelines for Design and Construction of Hospital and Health Care Facilities. USA : 2001.
38. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. HVAC Design Manual for Hospitals and Clinics. USA: 2013.

