

การระบายอากาศ การกรองและการใช้ UVGI (Ventilation Filtration and UVGI)

ผู้เขียน: Jonathan Burkett, P.E., HFDP, Member ASHRAE

แปลและเรียบเรียงโดย: พศ.ดร. จิตกร กนกนัยการ, Member ASHRAE

บทความนี้เขียนโดย Jonathan Burkett, Member ASHRAE ใน ASHRAE Journal ประจำเดือน August 2021 ในส่วนของ Technical Feature ผู้แปลและเรียบเรียงพิจารณาแล้วเห็นว่าบทความนี้มุ่งเน้นด้านการติดเชื้อ การส่งผ่าน และการแพร่ของเชื้อไวรัสภายในห้องปิด บทความนี้เน้นด้านยุทธศาสตร์ของการลดผลกระทบจากเชื้อโคโรนาไวรัสที่เกิดขึ้นอยู่ในขณะนี้ และการประยุกต์ใช้กับงานระบบปรับอากาศแบบโซนเดี่ยว (Single zone HVAC system) ซึ่งสามารถแจกแจงบทความนี้ออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ การระบายอากาศ (Ventilation) การกรองอากาศ (Filtration) และการฆ่าเชื้อด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UVGI) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การระบายอากาศ (Ventilation) หรือ การเจือจางอากาศ (Dilution)

ความจำเป็นในการระบายอากาศเพื่อให้เกิดคุณภาพอากาศภายในพื้นที่ปรับอากาศที่ดีได้รับการยอมรับตลอดมา ในอดีตที่ผ่านมากาลมีการใช้การระบายอากาศแบบธรรมชาติ (Natural Ventilation) เป็นเวลาหลายศตวรรษเพื่อ ระบายควัน (smoke) ฝุ่นผง (dust) และกลิ่น (odor) ในช่วงสงครามกลางเมืองที่

ไครเมียและสหรัฐอเมริกา นักฟิสิกส์สังเกตเห็นว่าทหารที่ได้รับบาดเจ็บมีอาการดีขึ้นเมื่ออยู่ในกระโจม (barn) ที่การระบายอากาศในปริมาณมาก ในจำนวนที่มากกว่าผู้บาดเจ็บที่อยู่ในโรงพยาบาลที่แออัดซึ่งมีการระบายอากาศที่ไม่ดี [1] ASHRAE standard 62-2019 กำหนดปริมาณอากาศที่ต้องระบายเป็นสัดส่วนของอากาศที่จ่ายต้องเข้าห้องซึ่งคืออากาศจากภายนอก (outdoor air) ร่วมกับอากาศที่หมุนเวียนภายในห้องที่คงไว้เพื่อจุดประสงค์ในการรักษาคุณภาพของอากาศภายในที่ยอมรับได้ (acceptable I.A.Q.) [2]

สมการที่ (1) เรียกว่า Wells-Riley Equation [3] แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราการระบายอากาศสามารถลดความเสี่ยงในการติดเชื้อได้อย่างมีนัยสำคัญ [4,5]

$$P_i = \frac{C}{S} = 1 - \exp\left(-\frac{Iqpt}{Q}\right) \quad (1)$$

เมื่อ P_i = ความน่าจะเป็นของการติดเชื้อ
(Probability of Infection)

C = จำนวนของกรณีติดเชื้อ
(Number of Infection Case)

S = จำนวนของความอ่อนแอ
(Number of Susceptible)

- I = จำนวนของผู้ติดเชื้อ (Number of Infector)
- q = อัตราปริมาณการก่อกำเนิด
(Quanta Generation Rate)
- p = อัตราการระบายอากาศจากปอดของบุคคล
(Pulmonary Ventilation Rate of a Person)
- t = ช่วงเวลาของการสัมผัส
(Exposure Time Interval)
- Q = อัตราการระบายอากาศของห้องด้วยอากาศ
สะอาด (Room Ventilation Rate with
Clean Air)

สมการการระบายอากาศ (Equation of Ventilation) [แสดงในสมการที่ (2)] แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง “อัตราการระบายอากาศ (Ventilation Rate) และความเข้มข้น (Concentration)” คล้ายกับสมการที่ (1) [Wells-Riley Equation] สมการการระบายอากาศนี้แสดงว่า อัตราการระบายยิ่งสูงส่งผลให้แกนของหยดละออง (Droplet Nuclei) เสื่อมสลายได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น จากงานของ Li et al. ทำการ review งานวิจัยมากกว่า 40 บทความที่เกี่ยวข้องกับการระบายอากาศและการติดเชื้อทางอากาศ (Airborne Infection) จนพบหลักฐานที่หนักแน่นและพอเพียงในการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างการระบายอากาศและการควบคุมทิศทางการไหลของอากาศในอาคาร และระหว่างการส่งผ่านและการแพร่กระจายของเชื้อโรค เช่น โรคหัด (Measles) วัณโรค (T.B.) โรคอีสุกอีใส (Chicken Pox) โรคแอนแทรกซ์ (Anthrax) ไข้หวัดใหญ่ (Influenza) ไข้ทรพิษ (Small Pox) และโรคซาร์ (SARS)

Equation of Ventilation:

$$V \frac{dc}{dt} = q(c_o - c) + \dot{V}_{pol} \quad (1)$$

วิธีการหาค่า c ที่ใช้สำหรับ Equation of Ventilation ดังนี้:

$$c = (c_o - c_G)(1 - e^{-nt}) + c_I e^{-nt}$$

- V = ปริมาตรของห้อง (Volume of Space), m^3
- c = ความเข้มข้น (Concentration), % or kg/m^3
- q = อัตราการระบายอากาศ (Ventilation Rate), m^3/s
- c_o = ความเข้มข้นของอากาศที่จ่ายเข้า
(Supply Air Concentration), % or kg/m^3
- dc = การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น
(Change in Concentration)
- dt = การเปลี่ยนแปลงอากาศ (Change in Time),
- V_{pol} = อัตราการก่อกำเนิดมลพิษในห้อง (Pollutant generation Rate in the room), m^3/s or kg/m^3
- $c_G = \frac{\dot{V}_{pol}}{q}$ = ความเข้มข้นที่แหล่งกำเนิด
(Source Concentration)
- c_I = ความเข้มข้นตอนต้นที่เวลา $t = 0$
(Supply Air Concentration)
- n = อัตราการเปลี่ยนอากาศ (Air Change Rate)

ใน “Guidelines for Environmental Infection Control in Health-Care Facilities” นี้ ศูนย์ควบคุมและป้องกันโรค (Centers for Disease Control and Prevention, CDC) ระบุเวลาเชิงทฤษฎีสำหรับการกำจัดเชื้อที่ปนเปื้อนในอากาศออกประมาณ 99% และ 99.9% ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (Air changes per hour, ach) แสดงใน Table 1 [7] ค่าที่แสดงใน Table 1 เป็นไปตามสูตรการกำจัดสารปนเปื้อนทางอากาศในสมการที่ (3) และแสดงเวลาในการเข้าสู่การกำจัดที่ระบุเป็นเปอร์เซ็นต์หลังจากที่การกำเนิดของการปนเปื้อนสิ้นสุดลง

Table 1 Airborne contaminant removal in mixed, empty room with no aerosol-generating source.

ACH	TIME (MIN) REQUIRED FOR REMOVAL (99% EFFICIENCY)	TIME (MIN) REQUIRED FOR REMOVAL (99.9% EFFICIENCY)
2	138	207
4	69	104
6	46	69
8	35	52
10	28	41
12	23	35
15	18	28
20	14	21
50	6	8

Note: Data taken from CDC’s “Guidelines for Environmental Infection Control in Health-Care Facilities,” Appendix B. [7]

Airborne contaminant removal formula [7]

$$t_2 - t_1 = - \left(\frac{\ln \left(\frac{C_2}{C_1} \right)}{\frac{Q}{V}} \right) \times 60 = - \left(\frac{\ln \left(1 - \frac{E_r}{100} \right)}{\text{ach}} \right) \times 60, \text{ where } t_1 = 0 \quad (3)$$

t_1 = เวลาเริ่มต้น (Initial time) in min.

V = ปริมาตรห้อง (Volume of space) in ft^3

Q = อัตราการไหลของอากาศ (Airflow rate) in ft^3/h

E_r = ประสิทธิภาพในการกำจัด (Removal efficiency)

t_2 = เวลาสุดท้าย (Final time) in min.

C_1 = ความเข้มข้นสารปนเปื้อนเริ่มต้น (Initial contaminant Concentration)

C_2 = ความเข้มข้นสารปนเปื้อนสุดท้าย (Final contaminant Concentration)

พิจารณาห้องเรียนตัวอย่าง (ในตัวอย่างที่ 1) ที่มีอัตราการระบายอากาศภายนอก (Outdoor Air Ventilation Rate)

เป็น 3.5 ach

ตัวอย่างที่ 1 High School Classroom.

ห้องเรียนมีพื้นที่ 800 ft² มีระดับฝ้าเพดานสูง 10 ft มีนักเรียนในห้องจำนวน 27 คน และครูผู้สอน 1 คน ห้องเรียนติดตั้งระบบปรับอากาศขนาด 3 TR ที่ 1200 cfm มีการใช้การระบายอากาศแบบผสมเหนือศีรษะที่มีค่า $E_z = 0.8$ พิจารณาจาก Table 6-1 ใน ASHRAE Standard 62.1-2019, ได้ค่า people outdoor air rate = 10 และ the area outdoor air rate = 0.12

$$V_{bz} = R_p P_z + R_a A_z = 10 \times 28 + 0.12 \times 800 = 376 \text{ cfm}$$

$$V_{ot} = V_{oz} = \frac{V_{bz}}{E_z} = \frac{376}{0.8} = 470 \text{ cfm OA}$$

$$\text{ach} = \frac{470 \text{ cfm} \times 60 \text{ min}}{800 \text{ ft}^2 \times 10 \text{ ft}} = 3.5 \text{ ach}$$

V_{bz} = Outdoor airflow required in breathing zone (cfm)

R_p = Outdoor airflow rate required per person (cfm/person)

P_z = Zone population

R_a = Outdoor air rate required per unit area (cfm/ft²)

A_z = Zone floor area (ft²)

V_{ot} = Outdoor air intake flow (cfm)

E_z = Zone air distribution effectiveness

การใช้สูตรการกำจัดสารปนเปื้อนทางอากาศ พบว่าการกำจัดที่ประสิทธิภาพ 99% การกำจัดสามารถบรรลุในเวลา 79 นาที หรือการกำจัดที่ประสิทธิภาพ 99.9% การกำจัดสามารถบรรลุในเวลา 118 นาที จากตัวอย่างสมมติว่าอากาศภายนอกที่ไม่มีสารปนเปื้อน ประสิทธิภาพการกรองอากาศ (Filtration effectiveness) มีค่าต่ำเพียงพอที่จะไม่ใส่ใจ และมีการผสมผสานที่สมบูรณ์ภายในห้อง ถ้าอากาศภายนอกเพิ่มขึ้น 150% ทำให้เวลาในการกำจัดที่ประสิทธิภาพ 99% สามารถทำให้อลดลงได้เหลือ 52

นาที คู่มือเหล่านี้สามารถนำมาใช้เวลาในการชำระล้างระหว่างชั่วโมงเรียน (Classes) หรือก่อนเวลาเริ่มเรียนในวันที่เปิดเรียน สมมุติฐานในการผสมผสานที่สมบูรณ์มักไม่แม่นยำ บริเวณที่อากาศหยุดนิ่งที่เกิดขึ้นจากระบบการกระจายอากาศทำให้ระยะเวลาการกำจัดเพิ่มขึ้น

สมการการกำจัดสารปนเปื้อนในอากาศแสดงว่า 63% ของสิ่งปนเปื้อนในอากาศจะถูกกำจัดที่แต่ละครั้งของการแลกเปลี่ยนอากาศ (air change) แต่ช่วงที่แท้จริงมีค่าระหว่าง 20% - 60% [8] ASHRAE Building Readiness Guide แนะนำว่าพื้นที่ที่ถูกชำระล้างในช่วงเวลาที่เพียงพอในการลดความเข้มข้นของเชื้อโรคในอากาศระหว่างการใช้อาคารที่มีค่าประมาณ 95% ซึ่งมีค่าเท่ากับการแลกเปลี่ยนอากาศประมาณ 3 ครั้งของปริมาตรห้องโดยใช้อากาศภายนอกเทียบเท่าสำหรับพื้นที่ที่มีการผสมผสานอย่างดี [9]

การศึกษาของ Qian และคณะ (Qian, et. al) เพื่อหาว่าโดยทั่วไปแล้วอัตราการระบายอากาศที่เพิ่มขึ้นสามารถลดความเสี่ยงของการส่งผ่านทางอากาศในระยะยาวได้ Li และคณะ (Li et. al) พบหลักฐานที่หนักแน่นในการแสดงความสอดคล้องระหว่างการระบายอากาศและการแพร่กระจายของโรคติดเชื้อ (infectious diseases) องค์การอนามัยโลก (WHO) ในการศึกษาการตั้งค่าการระบายอากาศแบบธรรมชาติสำหรับควบคุมการติดเชื้อในสถานพยาบาล (Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Setting) พบว่าอัตราการระบายอากาศที่มีค่าต่ำส่งผลให้การติดเชื้อเพิ่มขึ้น ขณะที่การศึกษาทั้งหมดบ่งชี้ไปที่ความสำคัญของการระบายอากาศ อัตราอากาศสะอาดน้อยที่สุดในการป้องกันการติดเชื้อไม่เคยทำการกำหนดไว้ อัตราการระบายอากาศมีผลกระทบต่อ droplet-borne transmission ขนาดใหญ่เพียงเล็กน้อย การมีอยู่ของเชื้อโรค (pathogen) ภายในห้องเป็นส่วนหนึ่งของปัจจัยความอ่อนไหวที่

เกี่ยวข้องกับกระบวนการการติดเชื้อซึ่งมีความซับซ้อนในการหาอัตราการระบายอากาศที่น้อยที่สุดในพื้นที่เหล่านี้

ขณะที่ Wells-Riley Equation แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราการระบายอากาศจะช่วยลดความเสี่ยงในการติดเชื้อ การศึกษาที่ทำโดย Memarzadeh และคณะ (Memarzadeh, et. al) แสดงถึงสิ่งสำคัญของเส้นทางระหว่างแหล่งกำเนิดสิ่งปนเปื้อนและอากาศเสีย (exhaust) ในห้องผู้ป่วย การศึกษาวิจัยพบว่า การเพิ่มอัตราการระบายอากาศจาก 4 ach ถึง 12 ach มีผลกระทบต่อเพียงเล็กน้อยต่อความเสี่ยงในการติดเชื้อในแบบจำลองที่ดำเนินการเมื่ออากาศเสียไม่ได้ยู่เหนือศีรษะผู้ป่วย การศึกษาอื่นๆแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราการระบายอากาศไปที่ 12 ach ไม่ได้ลดความเสี่ยงในการติดเชื้อจากการไอ (coughing) อย่างเลี่ยนไม่ได้สำหรับการระบายอากาศแบบผสม [11, 12] การศึกษาเหล่านี้แสดงถึงความสำคัญของระยะห่างและทิศทางของการไอภายในห้อง

การศึกษาที่ดำเนินการโดย Nardell และคณะ (Nardell, et. al) ที่ทำนายจำนวนของผู้ติดเชื้อในสำนักงานขึ้นอยู่กับ ประเด็นที่อ่อนไหว 67 ข้อที่เปิด

เผยถึงกรณีศึกษาหนึ่งที่เกิดปริมาณการติดเชื้อต่อชั่วโมง (infectious quanta per hour, qph)[13] จาก 1.25 qph ถึง 250 qph เป็นเวลา 160 ชั่วโมง ที่ 1.2 qph ต้องเตรียมการระบายอากาศภายนอกมากกว่า 15 cfm (7 L/s) ต่อคนยังผลให้ลดการติดเชื้อได้เล็กน้อย และที่ 13 qph การเพิ่มการระบายอากาศภายนอกจาก 15 cfm (7 L/s) ไปที่ 25 cfm (12 L/s) ต่อคนจะลดอัตราการติดเชื้อได้ 1 ใน 3 ขณะที่การลดการระบายอากาศภายนอกจาก 15 cfm (7 L/s) ไปที่ 5 cfm (2.4 L/s) ต่อคนทำให้อัตราการติดเชื้อเพิ่มขึ้น 78% และหากเพิ่มการระบายอากาศจาก 25 cfm (12 L/s) ไปที่ 35 cfm (17 L/s) สามารถลดอัตราการติดเชื้อได้อีก 19% จาก 25 cfm (12 L/s) การเพิ่มการระบายอากาศภายนอกทำให้การติดเชื้อลดลงได้ดีขึ้น

Table 2 แสดงอัตราปริมาณการเกิดก่อเกิด (quanta generation rates) สำหรับเชื้อโรคชนิดต่างๆ การศึกษาของ Liao และคณะ (Liao, et. al) เจาะลึกถึงเนื้อหาและเตรียมแบบจำลองสำหรับประเมินวิธีการควบคุมต่างๆและจำนวนผลลัพธ์ของการติดเชื้อที่สามารถเกิดขึ้นได้ [15]

Table 2 Quanta generation rates [14]	
INFECTIOUS DISEASE	REPORTED QUANTA GENERATION RATES
Rhinovirus (Common cold)	~ 1 to 10 Per Hour
Tuberculosis	~ 1 to 50 Per Hour
SARS	~ 10 to 300 Per Hour
Influenza	~ 15 to 500 Per Hour
Measles	~ 570 to 5,600 Per Hour

การกรองอากาศหรือทำให้สะอาด (Filtration or Cleaning)

การกรองอากาศยอมให้จัดเตรียมการอัตราการระบายอากาศที่เพิ่มขึ้นโดยปราศจากการเพิ่มอากาศภายนอก แผงกรองอากาศใช้หลักกลไกในการกักเก็บอนุภาค 5 กลไก [16, 17] ดังต่อไปนี้

1. การกรอง (Straining)

การที่อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างของแผงกรองอากาศถูกกักจัดออกจากกระแสอากาศและติดอยู่ที่พื้นผิวของแผงกรอง

2. การสกัดกั้น (Interception)

การที่อนุภาคเข้าใกล้รัศมีของพื้นผิวของเส้นใยและมีเวลาสัมผัสกับเส้นใยเพียงพอสามารถยึดติดกับเส้นใย

3. การกระทบจากความหนืด (Inertial impaction)

การที่อนุภาคขนาดใหญ่หรืออนุภาคที่หนาแน่นมีความหนืดเพียงพอในการเบี่ยงเบนจากเส้นทางการไหลของอากาศเมื่อพบว่าเส้นโค้งการไหลสามารถกระทบโดยตรงกับพื้นผิวเส้นใยและถูกจับยึดไว้

4. การแพร่ (Diffusion)

การที่อนุภาคขนาดเล็กที่อ่อนไหวต่อ Brownian motion และรัศมีเส้นทางการไหลของอากาศโดยการชนของโมเลกุล นำพาให้เข้าใกล้กับเส้นใยแผงกรองถูกจับโดยการสกัดกั้น

5. อิทธิพลของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic effect)

การที่อนุภาคหรือประจุไฟฟ้าสถิตสร้างแรงดึงดูดที่แข็งแรงเมื่อเกิดมีประจุไฟฟ้าตรงข้าม

แผงกรองอากาศประสิทธิภาพสูง (High Efficiency Particle Air Filter, HEPA filter) กำหนดขึ้นระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 กองทัพสหรัฐอเมริกาต้องการแผงกรองที่ใช้ในการป้องกันอาวุธสงครามทางเคมี อากาศชีวภาพ และกัมมันตภาพรังสีที่จำกัดการปล่อยออกจากโรงงานผลิตอาวุธนิวเคลียร์ [18, 19] แผงกรอง

ในอดีตผลิตจากวัสดุที่คล้ายกระดาษกรองที่ใช้ในหน้ากากกันแก๊สในเวลานั้น

HEPA Filter ใช้กลไกที่แตกต่างในการยึดจับอนุภาคที่มีขนาดต่างกัน อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า $0.1 \mu\text{m}$ ใช้วิธีการเริ่มต้นเป็นแบบกลไกการแพร่ สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า $1 \mu\text{m}$ ใช้วิธีการเริ่มต้นเป็นแบบกลไกผลกระทบของความเฉื่อยและกลไกการสกัดกั้น ในทั้งสองกรณีนี้ ประสิทธิภาพของ HEPA Filter มีค่าเข้าใกล้ 100% [17] อนุภาคที่มีขนาดระหว่าง $0.1 \mu\text{m}$ และ $1 \mu\text{m}$ ประสิทธิภาพในการกรองของแผงกรองอากาศลดลงเหลือ 99.97% (เนื่องจากผลกระทบของกลไกการแพร่แคบลงก่อนกลไกการกระทบจากความหนืดและกลไกการสกัดกั้นเริ่มมีอิทธิพล) พร้อมกับขนาดอนุภาคที่ผ่านทะลุส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นมีค่าระหว่าง $0.2 \mu\text{m}$ และ $0.3 \mu\text{m}$ [17]

การแทรกซึมของอนุภาคผ่านทะลุแผงกรองมีผลจากความเร็วของการไหล Rule of thumb ทั่วไปเป็นไปได้ด้วยการลดความเร็วที่ผ่านแผ่นกรองลงครึ่งหนึ่ง ความดันตกคร่อมถูกลดลงเป็นครึ่งหนึ่งและทำให้การผ่านทะลุของอนุภาคเกือบทุกระดับของขนาดลดลง [17]

วิธีทดสอบ HEPA filter กำหนดขึ้นโดยสถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม (Institute of Environmental Sciences and Technology, IEST) คือ IEST-RP-CC001 และ IEST-RP-CC007 กำหนดโดยองค์การนาชาติเพื่อกำหนดมาตรฐาน (International Organization for Standardization's, ISO) คือ ISO 29463-5:2011 หรือ คณะกรรมการยุโรปเพื่อกำหนดมาตรฐาน (European Committee for Standardization's, CEN) คือ EN 1822:2009 HEPA filter ที่แท้จริงจะมีการยืนยันการตรวจสอบสมรรถนะตามข้อกำหนดของมาตรฐานที่เชื่อถือได้สำหรับแผงกรองที่ถูกขายเป็น HEPA filter ซึ่งไม่ได้รับการทดสอบตามมาตรฐานใดมาตรฐานหนึ่งข้างต้น เหล่านี้อาจมีสมรรถนะที่ด้อยลงไป

MERV	Composite Average Particle Size Efficiency, % in Size Range		
	Range 1 (0.3µm to 1.0µm)	Range 2 (1.0µm to 3.0µm)	Range 3 (3.0µm to 10.0µm)
8	N/A	20 ≤ E ₂	70 ≤ E ₃
9	N/A	35 ≤ E ₂	75 ≤ E ₃
10	N/A	50 ≤ E ₂	80 ≤ E ₃
11	20 ≤ E ₁	65 ≤ E ₂	85 ≤ E ₃
12	35 ≤ E ₁	80 ≤ E ₂	90 ≤ E ₃
13	50 ≤ E ₁	85 ≤ E ₂	90 ≤ E ₃
14	75 ≤ E ₁	90 ≤ E ₂	95 ≤ E ₃
15	85 ≤ E ₁	90 ≤ E ₂	95 ≤ E ₃
16	95 ≤ E ₁	95 ≤ E ₂	95 ≤ E ₃

Note: Data taken from ASHRAE Standard 52.2-2017 Table 12-1

แผงกรองแบบอื่นที่จำหน่ายเชิงพาณิชย์ถูกประเมินค่าตาม ASHRAE Standard 52.2 และได้รับกำหนดค่ารายงานประสิทธิภาพต่ำสุด (Minimum Efficiency Reporting Value, MERV) อยู่ระหว่าง 1 ถึง 16 ASHRAE Standard 52.2-2017 จัดเตรียมประสิทธิภาพของขนาดอนุภาคสำหรับช่วงของขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน 3 ช่วง ดังแสดงใน Table 3[20] การศึกษาแสดงให้เห็นว่า ส่วนใหญ่ของอนุภาคไวรัสที่ถูกขบออกระหว่างการไอ ประมาณ 80% ถึง 90% มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 1 µm ถึง 2 µm แต่จากการศึกษาในเร็ววันนี้มุ่งไปที่อนุภาคที่ถูกจากร่างกายเหล่านี้คือไวรัส

งานวิจัยที่จัดทำโดย Azimi และคณะ(Azimi, et. al) ทำการทบทวนงานจากการศึกษาที่หลากหลายที่ซึ่งตัวอย่างของไวรัสไข้หวัดใหญ่ (Influenza virus) ที่ถูกตรวจพบในสภาพแวดล้อมในอาคารและพบการกระจายเฉลี่ยซึ่งนำไปประยุกต์ใช้ใน ASHRAE Standard 52.2 จากการศึกษากการกระจายของไวรัสเฉลี่ยให้ผลลัพธ์

ว่าประมาณ 20% อยู่ในช่วงขนาด 0.3 µm ถึง 1 µm 29% อยู่ในช่วงขนาด 1 µm ถึง 3 µm และ 51% อยู่ในช่วงขนาด 3 µm ถึง 10 µm [14]

งานวิจัยที่จัดทำโดย Zhang และคณะ (Zhang, et. al) ทำการศึกษาประสิทธิภาพเชิงไวรัส(viral performance) ของแผงกรองประสิทธิภาพสูงแบบใช้ตามที่พักอาศัยที่อัดประจุด้วยไฟฟ้า (high-efficiency electrically charged residential type filter) การทดสอบแสดงว่าแผงกรอง MERV 12 ที่นำมาทดสอบมีประสิทธิภาพการกรองไวรัสเฉลี่ยที่ 78% สำหรับแผงกรอง MERV 13 มีประสิทธิภาพการกรองไวรัสเฉลี่ยที่ 89% และแผงกรอง MERV 14 มีประสิทธิภาพการกรองไวรัสเฉลี่ยที่ 97% แผงกรองแบบ MERV 5 นำไปใช้สำหรับการเปรียบเทียบและมีประสิทธิภาพเฉลี่ยที่ 32%[21] ประสิทธิภาพเหล่านี้ขึ้นอยู่กับ viral load และ สภาพภาวะการไหลของอากาศ แต่โดยทั่วไปแสดงการเพิ่มประสิทธิภาพที่ MERV rating ที่สูงกว่า

ประสิทธิภาพแผ่นกรองที่แจกแจงไว้เป็นแบบ single-pass filter efficiencies ประสิทธิภาพของแผ่นกรองได้รับการเพิ่มแบบจำลองการกำเนิดสิ่งปนเปื้อน (contaminant generation model) หรือแบบจำลองการประเมินความเสี่ยงในการติดเชื้อ (infection risk assessment model) ในการทำการสังเกตทั่วไปบางอย่าง การศึกษาที่ทำโดย Mousavi และคณะ (Mousavi, et. al) มุ่งพิจารณาที่ประสิทธิภาพแผ่นกรองและทำการเปรียบเทียบเวลาการเสื่อมสภาพของสิ่งปนเปื้อนกับสัดส่วนอากาศภายนอกมากมาย (10% ถึง 100%)[22] จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสำหรับประสิทธิภาพแผ่นกรองที่มีค่าต่ำ (ตั้งแต่ MERV 12 ลงไป) แนะนำให้เพิ่มอากาศภายนอกเข้าสู่พื้นที่ทำให้เวลาการเสื่อมสภาพสิ่งปนเปื้อนลดต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับ MERV 13 MERV 14 และ MERV 15 เวลาการเสื่อมสภาพได้รับผลเล็กน้อยโดยอากาศภายนอกที่เพิ่มขึ้นเพียงอย่างเดียว และสำหรับ HEPA filter อากาศภายนอกที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลกับเวลาการเสื่อมสภาพ (decay time)[22]

Bohanon ทำการศึกษาโดยมุ่งเป้าที่สถานการณ์ที่แตกต่างกันหลายสถานการณ์ที่เกี่ยวข้องกับคนที่ติดเชื้อและความเสี่ยงในการติดเชื้อของผู้คนที่พักอาศัยในที่เดียวกัน[23] พบว่าหากทำการปรับปรุงการกรองอากาศในระบบ (โดยใช้แผ่นกรอง MERV 14 ขึ้นไป) แล้วความเสี่ยงในการติดเชื้อของผู้พักอาศัยในบ้านเดียวกันจะลดลงถึง 2 ใน 3 ส่วน แผ่นกรอง MERV 11 ยังใช้งานได้ดีและสามารถจัดการป้องกันต่ำกว่า MERV 14 ประมาณ 2% - 3% การศึกษาของ Azimi และคณะ ทำการจำลองอาคารสำนักงานสมมุติที่มีผู้ปฏิบัติงาน 25 คนและมีผู้ติดเชื้อ 1 คน ความเสี่ยงสัมพัทธ์ของการติดเชื้อถูกทำการเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายตลอดปีของการกรองอากาศพบว่าแผ่นกรอง MERV 13 และ MERV 14 เป็น combination ที่เหมาะสมของความเสี่ยงที่ต่ำบรรลู่ถึงค่าใช้จ่ายที่ลดลงสำหรับอาคารสำนักงานแล้วการกรองอากาศด้วย

HEPA filter มีข้อได้เปรียบในด้านค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานเหนือกว่า MERV 13 ถึง MERV 16 ประมาณ 1.6 ถึง 2.3 เท่า

ขณะที่แผ่นกรองเริ่มการสะสมที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพเกิดการเปลี่ยนแปลง วัสดุแผ่นกรองที่ไม่ได้ประจุไฟมักเพิ่มประสิทธิภาพตามไหลด ขณะที่แผ่นกรองแบบตัวกลางเก็บประจุจะสูญเสียประสิทธิภาพเมื่อเวลาผ่านไป (ลดลงมากกว่า 50% จากค่าเริ่มต้นสำหรับอนุภาคขนาดเล็ก)[24] ASHRAE Standard 52.2-2017, Appendix J แสดงการคำนวณทางเลือกที่สามารถทำนายการลดประสิทธิภาพของวัสดุสื่อแผ่นกรองเก็บประจุ สังเกตว่าแผ่นกรองที่มีการสะสมสามารถทำให้การไหลของอากาศลดลงในอุปกรณ์ที่พัดลมมีความเร็วคงที่

Filter bypass ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแผ่นกรองอากาศอย่างมาก โดยการศึกษาของ Ward และคณะ (Ward, et.al.) ทำการจำลองผลกระทบของ filter bypass กับ filter efficiency[25] โดยทำการเปรียบเทียบช่องว่างขนาด 0.04 in.[1mm] และ 0.4 in.[10mm] ใน 2 องค์ประกอบที่ต่างกัน พบว่าช่องว่างขนาด 0.04 in.[1mm] มีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับประสิทธิภาพของแผ่นกรอง สำหรับช่องว่างขนาด 0.4 in.[10mm] มีประสิทธิภาพเข้าใกล้ศูนย์ (zero) สำหรับอนุภาคระดับจุลภาค (submicron) [25] และยังทำการคำนวณประสิทธิภาพของ MERV Rating ที่ร่วมกับ bypass แผ่นกรอง MERV 6 ยังคงเป็น MERV 6 พร้อมกับช่องว่างขนาด 0.04 in.(1mm) แต่จะลดลงเหลือ MERV 5 หากมีช่องว่าง 0.4 in.(10mm) แผ่นกรอง MERV 11 ยังคงเป็น MERV 11 พร้อมกับช่องว่างขนาด 0.04 in.[1mm] แต่จะลดลงเหลือ MERV 8 หากมีช่องว่าง 0.4 in.(10mm) แผ่นกรอง MERV 15 จะลดลงเหลือ MERV 14 หากมีช่องว่างขนาด 0.04 in.(1mm) และลดลงเหลือ MERV 8 หากมีช่องว่าง 0.4 in.(10mm) [25] แผ่นกรองที่มีประสิทธิภาพมาก อิทธิพลของอากาศ bypass ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพแผ่นกรองยิ่งมาก

Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI)

UVGI เป็นวิธีการอากาศบำบัด (treating air) หรือพื้นผิวของ inactivate microorganisms เราเรียนรู้ว่าจุลชีพตอบสนองต่อแสงเมื่อปี ค.ศ. 1845 และประสบความสำเร็จในปี ค.ศ. 1877 เมื่อ Downes และ Blunt ค้นพบความสามารถของแสงแดดในการป้องกันการเติบโตของจุลชีพ [26] ในปี ค.ศ. 1933 Wells และ Fair พิสูจน์ความสามารถของ UVGI ที่ส่งผลต่อ inactivate airborne microorganisms [26] สเปกตรัมของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) ถูกแบ่งออกเป็น UV-A UV-B UV-C และ Vacuum UV ผลงานของ UV-C (ความยาวคลื่น 280 nm ถึง 200 nm) ที่นำมาใช้ใน UVGI ที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับการหยุดการทำงานของจุลชีพอยู่ที่ความยาวคลื่น 265 nm [16] UV-C ในระบบเชิงพาณิชย์จ่ายออกโดยหลอดไอปรอท (mercury vapor lamp) ซึ่งปล่อยออกที่ความยาวคลื่นใกล้กับ 253.7 nm ประสิทธิภาพของ UVGI ที่มีต่อจุลชีพขึ้นอยู่กับ UV dose [27]

เมื่อทำการบำบัดกระแสอากาศ หลอด UV-C ถูกวางอยู่ใน เครื่องส่งลมเย็นหรือท่อลมต้องมีความเข้มแสงและความถี่ของการจัดวางที่เพียงพอเพื่อให้ได้เวลาในการสัมผัสที่ต้องการสำหรับ inactivation 2019 ASHRAE Handbook-HVAC Applications แนะนำให้วางในระบบท่อลมที่ถูกลอยแบบให้ได้ตาม desired single-pass inactivation rate ตามสมการที่ (4) ภายใต้เงื่อนไขที่เลวร้ายที่สุดของอุณหภูมิอากาศและความเร็วของอากาศใน irradiated zone [27] เมื่อทำการติดตั้งใน AHU ที่มีความเร็ว 500 fpm (2.5 m/s) เขตปล่อยรังสี (irradiance zone) มีช่วงระยะประมาณ 8 ft หรือ 2.40 m จะส่งผลใน 1 วินาทีที่สัมผัส

Survival Fraction (S)

$$S = e^{-kD_{UV}} \quad (4)$$

Single-pass inactivation rate (η)

$$\eta = 1 - S$$

$$D_{UV} = \text{UV Dose } (\mu\text{J}/\text{cm}^2) = I \times t$$

$$k = \text{Pathogen-dependent inactivation rate constant } (\text{cm}^2 / \mu\text{J})$$

$$I = \text{Average irradiance } (\mu\text{W}/\text{cm}^2)$$

$$t = \text{Exposure time (s)}$$

2019 ASHRAE Handbook ยังแนะนำอีกว่า ระบบนี้ถูกติดตั้งในตำแหน่งที่สามารถให้ค่าที่น้อยที่สุดที่ 0.25 s ของการสัมผัส UV เพื่อให้เกิดค่าใช้จ่ายระบบและสิ้นเปลืองกำลังที่น้อยที่สุด วัสดุสะท้อนรังสี เช่นอลูมิเนียมสามารถช่วย boost สนามความเข้มจากการสะท้อนรังสีโดยตรงและเพิ่ม UV dose [27, 28] เมื่อหลอด UV-C ติดตั้งในท่อลมมักใช้อิทธิพลของการสะท้อนเสริมและพื้นผิวมีการสะท้อนและอยู่ในปริมาตรปิดการสะท้อนไปมาระหว่างพื้นผิวมีส่วนที่นำไปสู่สนามรวม (total field) [28]

unสรุป (Conclusion)

บทความนี้มุ่งเน้นที่กลยุทธ์ในการบรรเทาและการใช้งาน การขาดแคลนการระบายอากาศที่เหมาะสม แสดงไว้ในโอกาสของการติดเชื้อ การเพิ่มการระบายอากาศดังกล่าวข้างต้นปริมาณการระบายอากาศน้อยที่สุดที่กำหนดตามกฎหมายที่มีความสามารถในการลดการความเข้มข้นของอนุภาคในห้อง ข้อจำกัดมีอยู่ว่าต้องเพิ่มในปริมาณเท่าใดที่จะช่วยลดความเสี่ยงในการติดเชื้อ ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสิ่งปนเปื้อนทิศทางของการไอ และ quanta generation rate สามารถลดผลของการระบายอากาศที่มีต่ออัตราการติดเชื้อ การกรองอากาศและ UVGI เป็นอีก 2 แนวทางในการเพิ่มอัตราการระบายอากาศของระบบโดยไม่ต้องนำเอาอากาศภายนอกมาเพิ่มเข้าไปได้

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Janssen, J. 1999. "The first century of air conditioning. Article 11: The history of ventilation and temperature control." *ASHRAE Journal* 41(10).
- [2] ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.
- [3] Burkett, J. 2021. "Virus transmission modes and mitigation strategies, Part 1 : Defining viruses and droplet release." *ASHRAE Journal* (3):24-29
- [4] Qian, H., X. Zheng. 2018. "Ventilation control for airborne transmission of human exhaled bio-aerosols in buildings." *Journal of Thoracic Disease* 10(Suppl 19): S2295 – S2304. <http://doi.org/10.21037/jtd.2018.01.24>
- [5] Atkinson, J., Y. Chartier, C.L. Pessoa-Silva, P. Jensen, et al., Eds. 2009. *Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings*. World Health Organization.
- [6] Li, Y., G.M. Leung, J.W. Tang, X. Yang, et al. 2007. "Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment — a multidisciplinary systematic review." *Indoor Air* 17(1):2-18. <http://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2006.00445.x>
- [7] Sehulster, L., R. Chinn, M. Arduino, J. Carpenter, et al. 2004. "Guidelines for Environmental Infection Control in Health-Care Facilities: Recommendations from CDC and Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee (HICPAC)." American Society for Healthcare Engineering/ American Hospital Association.
- [8] Brickner, P.W., R.L. Vincent, M. First, E. Nardell, et al. 2003. "The application of ultraviolet germicidal irradiation to control transmission of airborne disease: bioterrorism countermeasure." *Public Health Reports* 118(2):99-114. <http://doi.org/10.1093/phr/118.2.99>
- [9] ASHRAE. 2021. "Building Readiness." ASHRAE Epidemic Task Force. <http://tinyurl.com/899sfp7s>
- [10] Memarzadeh, F., W. Xu. 2012. "Role of air changes per hour(ach) in possible transmission of airborne infections." *Building Simul.* 5:15-28. <https://doi.org/10.1007/s12273-011-0053-4>
- [11] Bolashikov, Z.D., A.K. Melikov, M. Brand, W. Kierat, Z. Popioek. 2012. "Exposure of health care workers and occupants to coughed airborne pathogens in a double-bed hospital patient room with overhead mixing ventilation." *HVAC&R Research* 18(4): 602-615. <https://tinyurl.com/4k3udnwd>
- [12] Olmedo, I., P.V. Nielsel, M. Ruiz de Adana, R.L. Jensen, P. Grzelecki. 2012. "Distribution of exhaled contaminants and personal exposure in a room using three different air distribution strategies." *Indoor Air* 22(1): 64-76. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.0073.x>
- [13] Nardell, E.A., J. Keegan, S.A. Cheney, S.C. Etkind. 1991. "Airborne infection: Theoretical limits of protection achievable by building ventilation." *American Review of Respiratory Disease* 144(2):302-306. <http://doi.org/10.1164/ajrccm/144.2.302>



- [14] Azimi, P., B. Stephens, M. First. 2013. "HVAC filtration for controlling infectious airborne disease transmission in indoor environments: Predicting risk reductions and operational costs." *Building and Environment* 70:150-160. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.025>
- [15] Liao, C.M., S.C. Chen, C.F. Chang. 2008. "Modelling respiratory infection control measure effects." *Epidemiology and Infection* 136(3):299-308. <https://doi.org/10.1017/S0950268807008631>
- [16] 2020 ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment.
- [17] Perry, J.L., J. Agui, R. Vijayakumar. 2016. "Submicron and Nanoparticulate Matter Removal by HEPA-Rated Media Filters and Packed Beds of Granular Materials." National Aeronautics and Space Administration. Report M-1414, NASA/TM-2016-218224.
- [18] First, M.W. 1998. "Hepa filters." *Applied Biosafety* 3(1):33-42. <https://doi.org/10.1177/10913505980030011>
- [19] DOE. 2003. "DOE Handbook: Nuclear Air Cleaning Handbook." DOE-HDBK-1169-2003. U.S. Department of Energy. <https://tinyurl.com/dsvyxw2k>
- [20] ASHRAE Standard 52.2-2017, Method of Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size.
- [21] Zhang, J., D. Huntley, A. Fox, B. Gerhardt, et al. 2020. "Study of viral filtration performance of residential HVAC filters." *ASHRAE Journals* 62(8).
- [22] Mousavi, E.S., N. Kananizadeh, R.A. Martinello, J.D. Sherman. 2021. "COVID-19 outbreak and hospital air quality: A systematic review of evidence on air filtration and recirculation." *Environmental Science & Technology* 55(7):4134-4147. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03247>
- [23] Bohanon, H., M. Zaatari. 2020. "Effect of ventilation and filtration on viral infection in residences." *ASHRAE Journals* 62(12): 38-45.
- [24] Owen, K., C. Kerr. 2020. "What you can and can't do with ASHRAE Standard 52.2." *ASHRAE Journals* 62(12).
- [25] Ward, M., J.A. Siegel. 2005. "Modeling filter bypass: Impact on filter efficiency." *ASHRAE Transactions* 111(1):1091-1144.
- [26] Reed, N.G. 2010. "The history of ultraviolet germicidal irradiation for air disinfection." *Public Health Reports* 125(1):15-27. <https://doi.org/10.1177/003335491012500105>
- [27] 2019 ASHRAE Handbook - HVAC Applications.
- [28] Kowalski, W.J., W.P. Bahnfleth. 2000. "Effective UVGI system design through improved modeling." *ASHRAE Transactions* 106.

