

การคำนวณความเสี่ยงในการติดเชื้อทางอากาศ ด้วย Wells-Riley Model

The Wells-Riley approach to assessing risks of infectious airborne diseases



ประพร พงษ์ลาทพันธุ์ LEED AP, WELL AP, mASHRAE, วิศวกรเครื่องกล, สามัญวิศวกรสิ่งแวดล้อม
ผู้จัดการฝ่ายออกแบบระบบสุขาภิบาล, บริษัท มิตรเทคนิคัลคอนซัลแตนท์ จำกัด
กรรมการวิชาการ, สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทย
กรรมการ, ASHRAE Thailand Chapter กรรมการ, สถาบันอาคารเขียวไทย

การแพร่เชื้อทางอากาศของเชื้อโรคในระบบทางเดินหายใจ เช่น โรคหัด (measles) วัณโรค (tuberculosis) โรคทางเดินหายใจเฉียบพลันรุนแรง (SARS) ไข้หวัดใหญ่ (influenza) โรคหวัด (common colds) รวมถึงโรคโควิด-19 (COVID-19) นั้นก่อความเสี่ยงทางสุขภาพและเศรษฐกิจอย่างมหาศาลเพื่อที่จะให้วิศวกรระบบปรับอากาศมีความเข้าใจเพิ่มเติม ถึงความเสี่ยงหรือความน่าจะเป็นในการติดเชื้อ การลดความเสี่ยงในการติดเชื้อด้วยมาตรการทางระบบปรับอากาศและระบายอากาศ วิธีการคำนวณความน่าจะเป็น ในหน่วย เปอร์เซนต์ของโอกาสในการติดเชื้อ เพื่อให้เปรียบเทียบได้ชัดเจน เข้าใจถึงความรุนแรงของการแพร่เชื้อทางอากาศในสภาวะต่างๆ สามารถปรับปรุง ระบบระบายอากาศ ระบบกรองอากาศ ได้เหมาะสม เพิ่มความปลอดภัยให้แก่บุคลากรทางการแพทย์ ประชาชนทั่วไปได้

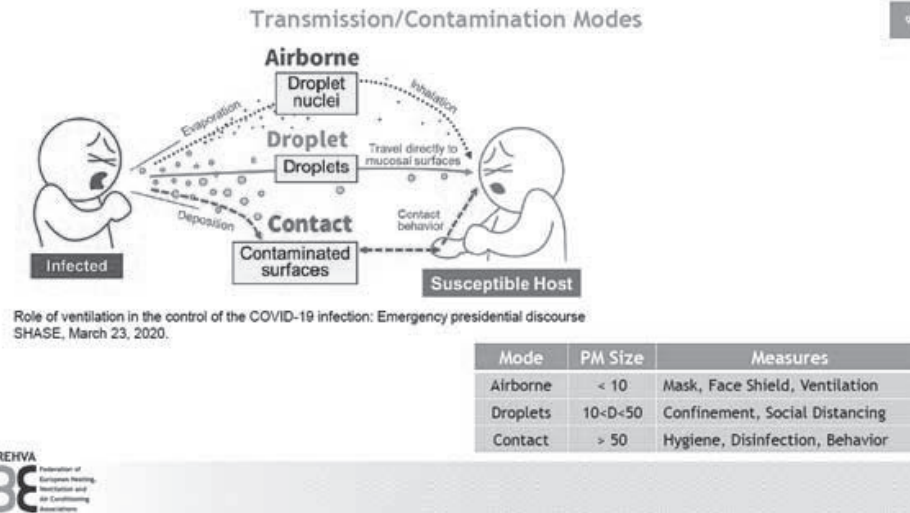
การติดเชื้อทางอากาศ (modes of disease transmission) มีเส้นทางการติดต่อกันได้ 3 ทาง คือ

1. การหายใจ เอาเชื้อที่ลอยในอากาศเข้าไป
ทั้งจาก infectious aerosols, droplet nuclei

2. การรับเชื้อโดยตรง จากละอองน้ำลาย droplets

3. การสัมผัสกับพื้นผิว ที่มีเชื้อตกค้าง และนำเข้าสู่ร่างกาย

เมื่อผู้ป่วย จาม ไอ พุด หรือ หายใจ จะมี การปล่อยละอองน้ำลาย หรือ droplets ออกมาเป็นจำนวนมาก ขึ้นกับกิจกรรมที่ทำ เมื่อ droplets ลอยในอากาศ น้ำใน droplets จะระเหยออกไป เหลือเป็น droplet nuclei ที่มีขนาดเล็กลง ลอยค้างในอากาศได้นานขึ้น และ ลอยได้ไกลขึ้น ทำให้เกิดการติดเชื้อทางอากาศได้



การคำนวณความน่าจะเป็นในการติดเชื้อทางอากาศนั้น มีหลายสมการ แต่หนึ่งในสมการที่ได้รับความนิยม คือ Wells-Riley model (Riley et al., 1978) ซึ่งมีพื้นฐานจากข้อมูลเชิงปริมาณ คือ “quantum of infection” หรือ อัตราการปล่อยเชื้อก่อโรค ซึ่งมีหน่วยเป็น “quanta” มาคำนวณความน่าจะเป็นที่คนทั่วไปจะป่วย (P infection) เมื่อได้อยู่ร่วมกับผู้ป่วยแพร่เชื้อในสภาวะคงที่ ในห้องปิดที่มีความเข้มข้นของเชื้อเท่ากันทั่วทั้งห้อง

$$P_{infection} = \frac{cases}{susceptibles} = 1 - e^{-\frac{Iqpt}{Q_{oa}}}$$

where

- $P_{infection}$ = the probability of infection
- $cases$ = the number of infection cases
- $susceptibles$ = number of susceptible individuals
- I = number of infector individuals
- p = pulmonary ventilation rate of a person (m^3 /hour)
- q = quanta generation rate (1/hr)
- t = exposure time (hr)
- Q_{oa} = room ventilation rate with clean air (m^3 /hour)

q หรือ quanta generation rate นั้น เป็นปริมาณที่บอกความรุนแรงของการแพร่ระบาด ไม่มีหน่วย แต่มีอัตราการปล่อยเชื้อนับเป็นต่อชั่วโมง ใช้กำหนดว่าโรคนั้นระบาดได้ง่ายหรือยาก ไม่ได้หมายถึงความรุนแรงของอาการป่วย โดยโรคติดเชื้อทางอากาศที่มีการวิจัยนั้น มีอัตราการปล่อย quanta ดังนี้ (รายการอ้างอิง ระบุท้ายบทความ)

- Measles (ไข้หัด) = 570 - 5,600 per hour
 - SARS (ซาร์ส) = 10 - 300 per hour
 - Influenza (ไข้หวัดใหญ่) = 67 - 100 per hour
 - Tuberculosis (วัณโรค) = 1 - 50 per hour
 - Rhinovirus (หวัด) = 1 - 10 per hour
 - COVID-19 = 67 - 1,000 per hour
- (*ขึ้นกับสายพันธุ์ที่ระบาด)

ตัวอย่างการคำนวณ ห้องสำนักงาน ขนาด 500 sq.m. มีพนักงาน 24 คน และ คนป่วยอีก 1 คน มีอัตราการหายใจที่ 0.48 CMH มีการเติมอากาศที่ 750 CMH (0.6 ACH) ถ้าผู้ป่วยเป็นโรคไข้หวัดใหญ่ (influenza) ที่มีอัตราการปล่อย quanta ที่ 100 per hour เมื่ออยู่รวมกันเป็นเวลา 8 ชั่วโมง จะหาความน่าจะเป็นในการติดเชื้อ และ จำนวนผู้ป่วยได้ ดังนี้

$$P = 1 - e^{(-1 \times 100 \times 0.48 \times 8 / 750)} = 0.40$$

$$= 40\% = case / 24$$

Case = 9.6 คน (จะมีคนป่วย 9 - 10 คน จากการอยู่ร่วมกัน 8 ชั่วโมง)

ในการลดความเสี่ยงของการแพร่เชื้อทางอากาศนั้น สามารถทำได้โดยการเพิ่มอัตราการเติมอากาศ (Q_{oa}) จาก 750 CMH (0.6 ACH) เพิ่มเป็น 5,000 CMH (4.0 ACH) จะทำให้ความน่าจะเป็นในการติดเชื้อ ลดลงเหลือ 8% เทียบเท่ากับจำนวนคนป่วย 2 คน



นอกเหนือจากการลดความเสี่ยง ด้วยการเพิ่มอัตราการเติมอากาศแล้ว การเลือกใช้แผงกรองอากาศ ที่มีความสามารถในการกรองอนุภาค ก็จะช่วยทำให้ปริมาณเชื้อที่ลอยในอากาศลดลง ลดความเสี่ยง หรือความน่าจะเป็นในการติดเชื้อได้ โดยมีสมการที่คิดรวมถึงตัวคุณลดจากการเลือกใช้ แผงกรองอากาศ ซึ่งพัฒนาโดย (Fennelly, Nardell, Nazaroff, Fisk) ดังนี้

$K_{deposition}$ จะขึ้นกับ ขนาดอนุภาค ความหนาแน่น รูปแบบห้อง เช่น ความเร็วลม พื้นที่ผิวในห้อง โดยทั่วไปจะมีค่า 0.7

$K_{filtration}$ ไม่ได้หมายถึงประสิทธิภาพของแผงกรองอากาศเพียงอย่างเดียว แต่เป็นผลรวมของ ชั่วโมงการทำงานของระบบกรองอากาศ อัตราลมที่ไหลผ่านแผงกรองอากาศ ประสิทธิภาพของแผงกรองอากาศต่อเชื้อโรคด้วย ซึ่งในละอองน้ำลายที่ปล่อยออกมาจากจมูก ปาก ของผู้ป่วยนั้น ถ้าเป็นหยดที่มีขนาดใหญ่ก็จะมีจำนวนเชื้อโรคมกกว่า หยดที่มีขนาดเล็ก ได้มีการวิจัยโดย Lindsley et al.(2010) พบว่า

15% ของ infectious droplet nuclei

มีขนาด 0.3-1.0 micron

25% ของ infectious droplet nuclei

มีขนาด 1.0-3.0 micron

60% ของ infectious droplet nuclei

มีขนาด 3.0-10.0 micron

ในส่วนของแผงกรองอากาศนั้น จะมีประสิทธิภาพแตกต่างกันไป ตามขนาดของอนุภาค และ ตามระดับความสามารถที่ระบุไว้ของแผงกรองอากาศ (MERV) ตามตาราง

เมื่อนำปริมาณของเชื้อโรคในละอองน้ำลายขนาดต่าง ๆ ไปคูณกับประสิทธิภาพของแผงกรองอากาศ ที่ขนาดอนุภาคต่าง ๆ นั้น จึงจะได้ประสิทธิภาพการกรองเชื้อโรคของแผงกรองอากาศ ตามตาราง

$$P_{infection} = 1 - \exp\left[-\frac{Iqpt}{V} / (\lambda_{ventilation} + k_{filtration} + k_{deposition})\right]$$

where

V = indoor air volume (m^3)

$\lambda_{ventilation}$ = clean air ventilation rate (Q_{oa}/V , 1/hr)

$k_{filtration}$ = infectious particle removal rate due to filtration (1/hr)

$k_{deposition}$ = infectious particle deposition rate (1/hr)

$$k_{filtration} = f_{HVAC} \frac{Q_{filter} \eta_{filter}}{V} = \lambda_{recirculated} \eta_{filter}$$

where

f_{HVAC} = fractional HVAC operation time (-)

Q_{filter} = airflow rate through filter (m^3/hr)

η_{filter} = particle removal efficiency of the filter (-)

$\lambda_{recirculated}$ = recirculation rate through the HVAC filter (1/hr)

Table 3. Minimum Efficiency Reporting Values (MERV) and associated particle removal efficiencies (%)

MERV	Composite particle removal efficiency (%)		
	0.3-1 μm	1-3 μm	3-10 μm
1			<20
2			<20
3			<20
4			<20
5			20-35
6			35-50
7			50-70
8			70+
9		<50	85+
10		50-65	85+
11		65-80	85+
12		80+	90+
13	<75	90+	90+
14	75-85	90+	90+
15	85-95	90+	90+
16	95+	95+	95+

Table 4. Assumed filter removal efficiency for 0.3-1 μm , 1-3 μm , 3-10 μm and total weighted-average droplet nuclei particles

MERV	Droplet nuclei-weighted ^b			
	0.3-1 μm	1-3 μm	3-10 μm	η_{filter}
4 ^a	1%	9%	15%	11%
7 ^a	17%	46%	50%	44%
11 ^a	30%	65%	85%	72%
13	70%	90%	90%	87%
14	80%	90%	90%	89%
15	90%	90%	90%	90%
16	95%	95%	95%	95%
HEPA	99.9%	99.9%	99.9%	99.9%

^a Values for 0.3-1 and 1-3 μm are taken from Stephens and Siegel (2012)

^b Assuming 15% are 0.3-1 μm , 25% are 1-3 μm , and 60% are 3-10 μm

ตัวอย่างการคำนวณความเสี่ยงในการติดเชื้อของพื้นที่ต่าง ๆ ได้แก่ Office, School, Hospital สำหรับโรค Influenza และ Rhinovirus โดยจะกำหนดให้พื้นที่ต่าง ๆ มีค่าที่ใช้คำนวณเหมือนกัน ดังนี้

- K deposition = 0.7 per hour
- Influenza (ไข้หวัดใหญ่) = 100 quanta per hour
- Rhinovirus (ไข้หวัด) = 5 quanta per hour
- Adult pulmonary ventilation rate = 0.67 CMH
- Child pulmonary ventilation rate = 0.50 CMH
- มาตรฐานการระบายอากาศสำหรับ Office & School = ASHRAE Standard 62.1
- มาตรฐานการระบายอากาศสำหรับ Hospital = ASHRAE Standard 170

ค่า K filtration สำหรับ Office ที่มีอัตราการเติมอากาศ 0.51 ACH อัตราการกรองอากาศ 1.52 ACH

Table 5. Droplet nuclei particle removal rates ($k_{filtration}$) for a range of MERV filters for use in modeling risk inside the office building with a recirculation rate of 1.52 per hour

MERV	Droplet nuclei removal efficiency (η_{filter})	Assumed filter removal rate ($\lambda_{recirculated} \times \eta_{filter}$, 1/hr)
4	11%	0.17
7	44%	0.67
11	72%	1.09
13	87%	1.32
14	89%	1.35
15	90%	1.37
16	95%	1.45
HEPA	99.9%	1.52

จะคำนวณความเสี่ยงในการติดเชื้อของ Office เมื่อใช้แผงกรองอากาศชนิดต่าง ๆ ได้ ดังนี้

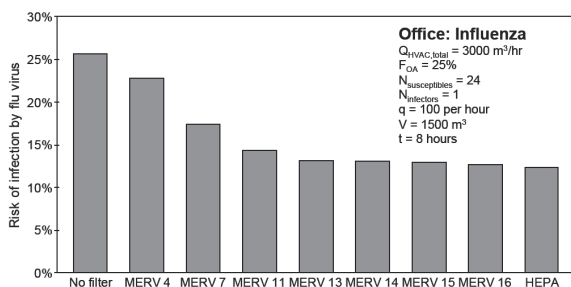


Figure 6. Projected risk of infection by influenza virus during an 8-hour workday in a hypothetical office building with 25 occupants and 25% outdoor air supply using a range of HVAC filters installed in a system with a recirculation rate of 1.5 per hour

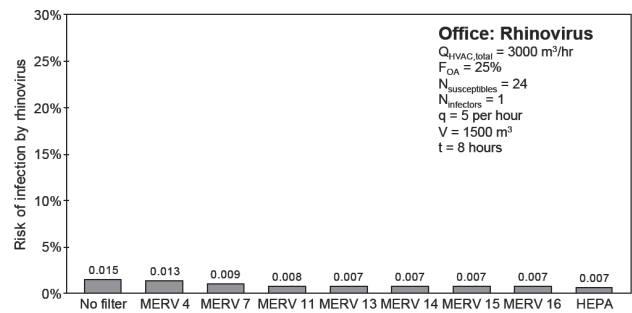


Figure 7. Predicted risk of infection by rhinovirus (common cold) in the hypothetical office building. Note that the y-axis values are in percentages for this and subsequent figures; the values noted above the bars are fractional (i.e., 0.015=1.5%).

ค่า Kfiltration สำหรับ School ที่มีอัตราการเติมอากาศ 2.70 ACH อัตราการกรองอากาศ 8.14 ACH

Table 6. Droplet nuclei particle removal rates ($k_{filtration}$) for a range of MERV filters for use in modeling risk inside the school classroom with a recirculation rate of 8.14 per hour

MERV	Droplet nuclei removal efficiency (η_{filter})	Assumed filter removal rate ($\lambda_{recirculated} \times \eta_{filter}$, 1/hr)
4	11%	0.93
7	44%	3.59
11	72%	5.84
13	87%	7.08
14	89%	7.20
15	90%	7.33
16	95%	7.73
HEPA	99.9%	8.13

จะคำนวณความเสี่ยงในการติดเชื้อของ School เมื่อใช้แผงกรองอากาศชนิดต่าง ๆ ได้ ดังนี้

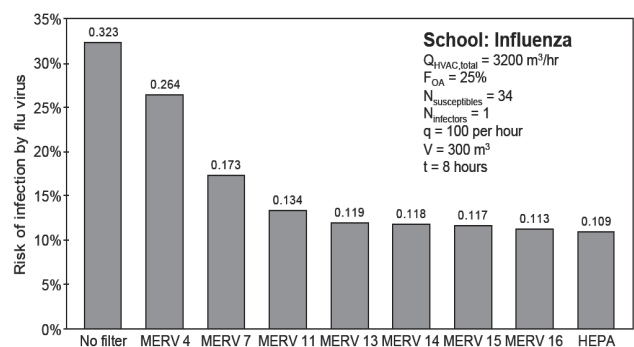


Figure 9. Projected risk of infection by influenza virus during an 8-hour day in a hypothetical classroom environment with 35 child occupants and 25% outdoor air supply using a range of HVAC filters installed in a system with a recirculation rate of 8.14 per hour

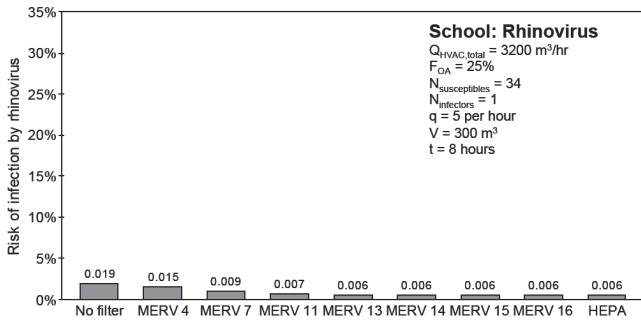


Figure 10. Predicted risk of infection by rhinovirus (common cold) in the hypothetical classroom environment

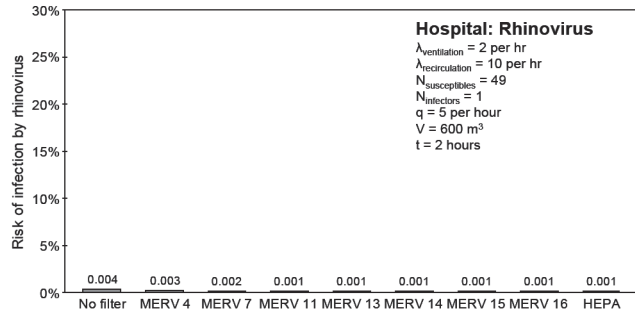


Figure 13. Predicted risk of infection by rhinovirus (common cold) in the hypothetical hospital environment

ค่า K filtration สำหรับ Hospital ที่มีอัตราการเติมอากาศ 2.00 ACH อัตราการกรองอากาศ 10.00 ACH

Table 7. Droplet nuclei particle removal rates ($k_{\text{filtration}}$) for a range of MERV filters for use in modeling risk inside the hospital waiting room environment

MERV	Droplet nuclei removal efficiency (η_{filter})	Assumed filter removal rate ($\lambda_{\text{recirculated}} \times \eta_{\text{filters}}$ 1/hr)
4	11%	1.14
7	44%	4.41
11	72%	7.18
13	87%	8.70
14	89%	8.85
15	90%	9.00
16	95%	9.50
HEPA	99.9%	9.99

จะคำนวณความเสี่ยงในการติดเชื้อของ Hospital เมื่อใช้แผงกรองอากาศชนิดต่าง ๆ ได้ ดังนี้

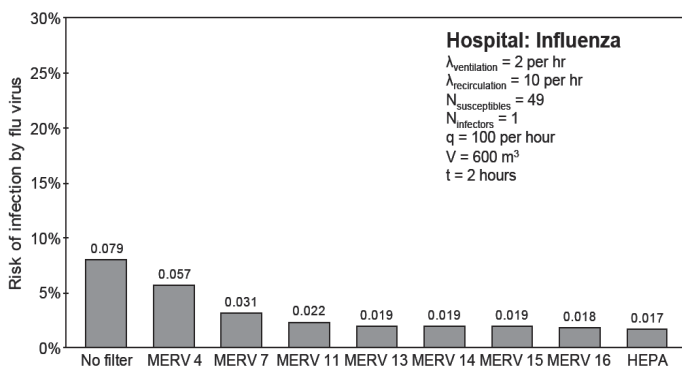


Figure 12. Projected risk of infection by influenza virus during a 2-hour stay in a hypothetical hospital waiting room environment with 50 adult occupants and ASHRAE 170 minimum ventilation rates

จากตัวอย่างการคำนวณ ด้วยสมการ Wells-Riley จะเห็นได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการลดความเสี่ยง หรือ ลดความน่าจะเป็นในการติดเชื้อทางอากาศ ที่คำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ นั้น ได้แก่

1. การลดจำนวน ผู้ป่วยแพร่เชื้อ (I=number of infector individuals) เพื่อลดการปล่อยเชื้อในห้อง
2. การลดจำนวน ผู้ใช้งานในห้อง (S=number of susceptible individuals) เพื่อลดปริมาณคนรับเชื้อ
3. การลดการปล่อย quanta โดยการใส่หน้ากาก เพื่อกรอง droplets, droplet nuclei จากการ จาม ไอ พุด
4. การลดการหายใจแรง โดยงดเว้นกิจกรรมที่ทำให้หายใจถี่ขึ้น เช่น การออกกำลังกาย ตะโกน
5. การลดเวลาการอยู่ร่วมกัน เพื่อลดเวลาในการรับเชื้อให้สั้นลง
6. การเพิ่มอัตราการเติมอากาศจากภายนอก เพื่อเจือจางเชื้อ
7. การใช้แผงกรองอากาศประสิทธิภาพสูง เพื่อกรองเชื้อ
8. การเพิ่มอัตราการกรองอากาศ เพื่อกรองเชื้อในการออกแบบ ก่อสร้าง ระบบปรับอากาศสำหรับห้องผู้ป่วยนั้น มีมาตรฐานกำหนด อัตราการเติมอากาศ อัตราการระบายอากาศ อัตราการกรองอากาศ ประสิทธิภาพแผงกรองอากาศ ตาม ASHRAE-170 และ มาตรฐาน วสท.ไว้แล้ว ควรใช้ค่าอ้างอิงตามมาตรฐานข้างต้นเป็นเกณฑ์ เนื่องจากเป็นค่าที่ผ่านการทดลองใช้งานจริงเป็นเวลานาน มีการเก็บข้อมูลปรับปรุง ให้ค่าตามมาตรฐาน เหมาะสมต่อการป้องกันโรค และประหยัดพลังงานแล้ว

สำหรับการคำนวณตามสมการ Wells-Riley ที่ได้นำเสนอนั้น เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยอื่นเพิ่มเติม ที่มีผลต่อการติดเชื้อทางอากาศ จะได้ปรับเพิ่มมาตรการให้ดีขึ้นกว่ามาตรฐาน เพื่อเพิ่มความปลอดภัย หรือเพื่อลดความเสี่ยงที่เพิ่มมากกว่าปกติ เช่น กรณีคนหนาแน่น กรณีผู้ป่วยไม่สามารถใส่หน้ากาก กรณีเชื้อโรคอุบัติใหม่รุนแรง ที่ยังไม่มีวัคซีน หรือ ยังไม่มียารักษา ซึ่งต้องมีความเสี่ยงในการติดเชื้อน้อยที่สุด

รายละเอียดเพิ่มเติมสามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

1. Brent Stephens, NAFA, 2013. HVAC filtration and the Wells-Riley approach to assessing risks of infectious airborne diseases.
2. Manuel Gameiro da Silva, Jarek Kurnitski, REHVA, 2020. Indoor Air Quality (IAQ) Concepts Case Study COVID-19.

