



Pozitif ve negatif hava iyonlarının dezenfeksiyon etkinliğinin farklı havalandırma kanalı koşullarında deneysel değerlendirilmesi

Sunday S. Nunayon, Hui H. Zhang, Xin Jin, Alvin CK. Lai

Department of Architecture and Civil Engineering, City University of Hong Kong, Tat Chee Avenue, Kowloon, Hong Kong, Çin Halk Cumhuriyeti



MAKALE BİLGİLERİ

Ahantar Kelimeler:
Dezenfeksiyon etkinliği
Hava iyonizerler
Havalandırma kanalları
İç mekan hava kalitesi

ÖZET

Bu çalışma, bir kanal akışı koşulunda biyo-aerosollerin inaktive edilmesinde iyonlaştırıcıların farklı polaritelerinin etkinliğini araştırmıştır. Üç bakteri türü - Escherichia coli (E. coli), Salmonella typhimurium (S. typhimurium) ve Staphylococcus epidermidis (S. epidermidis) - 3,0 ila 6,5 m / s arasında değişen üç hava akımı hızı altında kanala aerosol halinde püskürtüldü. Pozitif iyonlaştırıcı, negatif iyonlaştırıcıdan % 29-% 41 oranında daha iyi dezenfeksiyon performansı gösterdi. Sonuçlarımız, hava hızı ve dezenfeksiyon etkinlikleri arasında ters bir ilişki olduğunu gösterdi. Hız 3,0'dan 6,5 m / s'ye yükseldikçe, pozitif iyonlaştırıcının karşılık gelen dezenfeksiyon etkililiği E. Coli, S. Typhimurium ve S. Epidermidis için sırasıyla % 88,5'ten % 44,0'a, % 49,0'dan % 38,7'ye ve % 35,1'den % 19,8'e düştü. Sırasıyla S. epidermidis. Negatif iyonlaştırıcı karşılık gelen dezenfeksiyon etkililiği E. Coli, S. Typhimurium ve S. Epidermidis için sırasıyla % 62,9'dan % 35,4'e, % 54,2'den % 30,0'a ve % 42,9'dan % 30,2'ye düşmüştür. Pozitif iyonlaştırıcı ayrıca üç bağıl nem seviyesinde (% 50, % 70 ve % 90) ve üç sıcaklık seviyesinde (17,5 °C, 21,0 °C ve 25,0 °C) test edildi. E. coli, S. typhimurium ve S. epidermidis için dezenfeksiyon etkinliği % 50'den % 90'a kadar aralıktaki bağıl nemde sırasıyla % 46,0'dan % 23,6'ya, % 35,2'den % 22,5'e ve % 24,8'den % 20,7'ye düşmüştür. Aynı zamanda, iyonlaştırıcının etkinliği sıcaklık düştükçe artmıştır. Bu nedenle, sonuçlarımız 17,5 °C'den 25,0 °C'ye çıkan bir ısı aralığında E. coli, S. typhimurium ve S. epidermidis için dezenfeksiyon etkinliklerinin sırasıyla % 56,0'dan % 32'ye, % 38,8'den % 22,6'ya ve % 24,8'den % 21,5'e düştüğünü göstermektedir. Her iki iyonlaştırıcının ozon emisyon oranları ölçüldü ve çok küçük bulundu.

1. Giriş

İç ortamın bulaşıcı patojenler tarafından sürekli istila edilmesi, küresel bir endişeye yol açmış ve biyo-aerosollere karşı savunmasızlık konusunda farkındalığı artırmıştır. İnsanların zamanlarının çoğunu kapalı alanlarda geçirdikleri düşünüldüğünde [1], bu kirlenici maddelere uzun süre maruz kalmak, bulaşıcı, alerjik, toksijenik ve hatta kanserojen olabilen akut veya kronik hastalıklar gibi daha kötü ve yıkıcı sağlık etkilerine yol açabilir [2]. Aralarında ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme (HVAC) sistemleri, birçok zararlı kirlenici için ana giriş noktaları ve dağıtım sistemleri oldukları için son derece endişe verici olan çeşitli iç mekân kirlenici kaynaklar tanımlanmıştır [3]. Bu kirlenicilere maruziyetten kaynaklanan sağlık riskini azaltmak için, çeşitli kontrol teknolojileri önerilmiştir.

Bir HVAC sistemi içindeki patojenik bakterilerin varlığını azaltmanın bir yöntemi, kanal temizliğidir [4], ancak bu, tüm mevcut sistemler için geçerli değildir. Hava filtreleme mekanizmaları, biyolojik kirlenicileri havadan uzaklaştırabilir ve iç mekan hava kalitesini (IAQ) artırabilir. Hava filtreleri, hem aerosollerini hem de bioaerosollerini uzaklaştırmak için en geleneksel yaklaşımdır.

Kurulum basittir. Filtrelerin önemli bir özelliği, geniş bir filtre sınıfı yelpazesinin mevcut olması ve bu özel iç ortam için farklı iç mekan hava kalitesi kriterlerine göre farklılığın seçilebilmesidir. Ancak, sistemin toplam enerji tüketimini ve işletim maliyetini artırır [5]. Filtre yüzeyleri, sonunda odaya giren insan patojenlerinin üretimi için çoğalma bölgeleri olabileceğinden, genellikle bir HVAC sistemine bir filtre dâhil edilir ve bu önemli bir sorun oluşturur [6]. İç mekân ortamında bulaşıcı mikroorganizmalarla insan temasını kontrol etmek için enerji açısından sürdürülebilir bir müdahale önerilmemiştir. Patojen içermeyen ve sürdürülebilir iç ortamlar elde etmek için, bu sorunların verimli ve sürdürülebilir modern teknolojilerin uygulanmasıyla ele alınması gerekir [7].

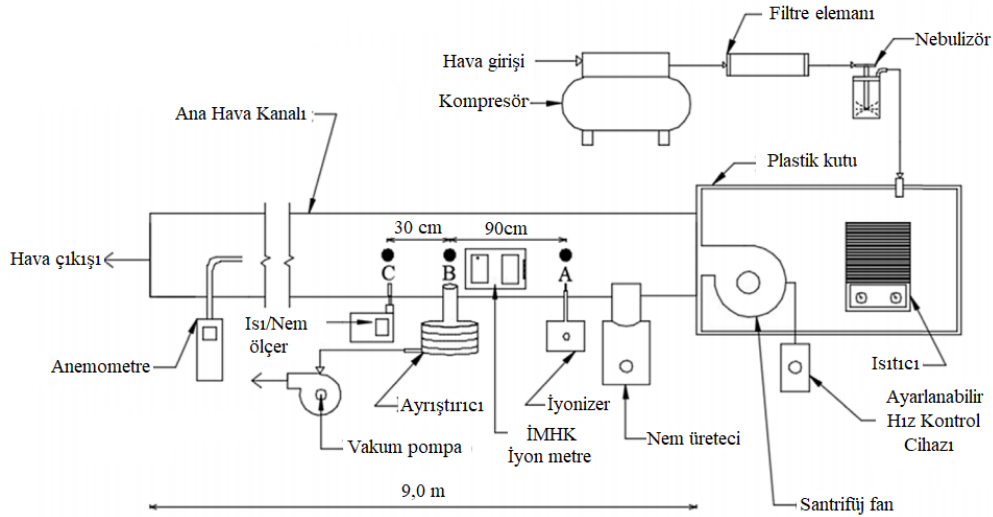
Hava iyonizasyonu uzun yıllardır endüstriyel baca gazlarındaki toz ve diğer partikül kirlenicilerin giderilmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır [8]. Elektrostatik çöktürücüler (ESP'ler), etkililikleri nedeniyle baskın seçim olmuştur [9]. Gaz-katı ayırımı sağlamak için, partiküller bir korona dışarıda yüklenir ve ESP'deki elektrik alanı tarafından tutulur [10].

Sorumlu yazar.

E-posta adresi: alvinlai@cityu.edu.hk (A.C. Lai).

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.05.027>

26 Aralık 2018'de alındı; 24 Nisan 2019'da revize edilmiş biçimde alındı; 14 Mayıs 2019'da kabul edildi
Çevrimiçi yayınlama 15 Mayıs 2019



Şekil 1. Experimental setup.

Bu yaklaşım aynı zamanda yoğun bakım ünitelerinde [11], dış kliniklerinde [12] ve kümes hayvanları binalarındaki [13] yüzey ve hava kaynaklı mikroorganizmaların [14] seviyelerini ve bulaşmasını azaltmak için yapılan klinik çalışmalarda yararlı olmuştur.

Korona deşarj teknolojisindeki önemli gelişmeler nedeniyle, düşük basınç düşüş özelliklerine sahip olan [7] korona tipi iğne uçlu iyonlaştırıcılar [15] kullanarak havalandırma kanallarında hava kalitesini iyileştirmede hava iyonizasyonu uygulanmıştır. Lee vd. [16], $4 \times 4 \text{ cm}^2$ lik küçük bir kanalda iki kutuplu bir hava iyonu kullandı ve hava iyonizasyonunun aerosol haline getirilmiş *Staphylococcus epidermidis*'i sırasıyla 2 sn ve 0,2 sn'de % 85 ve % 50 azaltabileceğini gösterdiler. Ancak, her iyon polaritesinin dezenfeksiyon etkinliğini araştırmadılar.

Terrier vd. [17] ve Lai ve ark. [7], negatif hava iyonları oluşturmak için soğuk plazma kullandı ve önemli azalmalar kaydetti. Daha yakın zamanlarda, 2,0 ila 6,5 m / s giriş hızları ve çeşitli iyon yoğunlukları için inaktivasyon etkinlikleri bildirilmiştir [18]. Ancak sonuçları ümit verici olsa da, bu çalışmaların testleri tek bir çevresel koşul altında gerçekleştirildi. Ek olarak, çalışmalar iyonlaştırıcılar üzerindeki nemin etkileri için uyumsuz eğilimler göstermiştir [7,19]. Sıcaklık ayrıca dezenfeksiyonu etkileyebilir. Mezofilik patojenlerin bulaşması en verimli şekilde sıcaklık 15°C ile 25°C arasında ve bağıl nem (RH) yüksek olduğunda gerçekleşir [20]. Bununla birlikte, bir kanal ortamında bu gibi sıcaklık koşullarında iyonlaştırıcıların dezenfeksiyon etkinliğine ilişkin bilgilendirici sonuçlar yetersizdir.

Son olarak, havalandırma kanallarında hangi iyon polaritesinin en uygun biyoaerosol dezenfeksiyonu sağladığı tam olarak belirlenmemiştir. Ek olarak, iyonlaştırıcıların ozon yaydığı ve iç mekânlara sokulmasının yolcuların solunum fonksiyonları üzerinde olumsuz etkileri olabileceği kaydedildi. Ozon, bina sakinleri üzerindeki birincil etkisinin yanı sıra, iç mekân kimyası zorluklar başlatabileceğinden birçok ikincil etkiye neden olabilir. Bu çalışmada, pratik uygulama olanağı sağlayan havalandırma kanallarındaki havadan yayılan bakteriler üzerinde iyonlaştırıcıların farklı polaritelerinin dezenfeksiyon etkinliğini değerlendirdik. Ayrıca hava akım hızının, sıcaklığın ve bağıl nemin iyonlaştırıcıların dezenfeksiyon etkinliği üzerindeki etkilerini değerlendirdik ve kanaldaki ozon emisyonlarını ölçtük.

2. Malzemeler ve Metotlar

2.1. Mikroorganizmaların seçimi

Bu çalışmada, biyo-aerosollerde yaygın olarak bulunan organizmaların üç temsili vekili kullanılmıştır. Biyogüvenlik seviyelerine göre seçildiler ve laboratuvar personeli tarafından kullanım için güvenliydi [21]. İlki, $0,96 \mu\text{m}$ çapında, yaygın olarak insan derisinde bulunan organizmaları özetleyen gram-

pozitif bir kok, *Staphylococcus epidermidis* (*S. epidermidis*) (ATCC 12228) idi. Diğer ikisi, genellikle tozda ve iç mekânlarda bulunan nesnelere yüzeylerinde yaygın bulunan sırasıyla $1,0 \mu\text{m}$ ve $0,4\text{-}0,8 \mu\text{m}$ çaplı gram-negatif basil *Escherichia coli* (*E. coli*) (ATCC 10536) ve *Salmonella typhimurium* (*S. typhimurium*) (ATCC 53648) idi. Bu organizmalar, bulaşıcı hastalıkları yayabilirler [22].

2.2. Mikroorganizmaların ve petri kaplarının hazırlanması

Test edilen bakterilerin hazırlanması başka bir yerde rapor edilmiştir [7,23,24]. Bakteri süspansiyonu, nebulizasyon için 50 mL sterilize edilmiş deiyonize su içinde yaklaşık 10^8 ila 10^9 koloni oluşturan birimden oluşan popülasyonları içeren baz süspansiyonları sağlamak için çeşitli oranlarda seyreltildi.

Ayrıca, agar plakalarını hazırlamak için, 12 g agar ve 8 g besleyici besiyer karışımı ters ozmoz (RO) su içinde çözüldü. Çözelti daha sonra mevcut bakterileri öldürmek için bir otoklavda (IKA® KS 4000 i kontrol) sterilize edildi. Daha sonra 15 mL çözelti, her bir Petri kabına (Thermo Scientific) dağıtıldı ve en az 2 saat soğumaya bırakıldı. Son olarak, Petri kapları katılaşma üzerine toplandı ve 4°C 'de soğuk odada saklandı.

2.3. Parametre seçimi

Seçilen parametreler, pratikte genel olarak karşılaşılan koşullara uygundur. Seçilen hız ayarları, tipik olarak hava havalandırma sistemlerinde kullanılan hava akımı hızları aralığına göre 3,0, 5,0 ve 6,5 m / s idi. Reynolds sayıları, 40.000 ile 87.000 arasında değişen değerlerle türbülanslı akışa eşdeğerdi. RH ve ısı olarak iki çevresel koşul dikkate alınmış, bunlar düşük, orta ve daha yüksek seviyelerde teste tabi tutulmuş RH için % 50, % 70 ve % 90 ve sırasıyla $17,5^\circ\text{C}$, 21°C ve 25°C 'ye karşılık gelen değerler kullanılmıştır.

2.4. Deneysel düzenek

Pratik durumlarla karşılaştırılabilir boyut ve hava akışı özelliklerine sahip tam ölçekli modüler galvanizli çelik havalandırma kanalı sistemi tasarlanmış ve inşa edilmiştir. 9 m uzunluğundaki kanal, 200 mm genişliğinde \times 200 mm yüksekliğinde bir kesite sahip iklimli bir laboratuvara monte edildi. Deney düzeneğinin şeması Şekil 1'de gösterilmektedir. Deneysel işlemler sırasında, oda sıcaklığı ve bağıl nem, $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ve % 55 ± 5 sabit koşullarda muhafaza edilmiştir. Th Kanal sistemi içinden akan hava, gelen havayı ön işleme tabi

tutmak ve havayı laboratuvara yöneltmeden önce kalan tüm patojenleri filtrelemek için kanal sisteminin her iki ucuna monte edilmiş iki HEPA filtresi yerleştirilmiştir. Kanal sistemi içerisindeki hava hızı deneyin gerekliliklerine göre değiştirilmiştir.

Patojenler, 103.42 kPa (15 psi) giriş basıncına sahip 24-jet nebulizör (Çarpışma Nebülizör, BGI) ile atomize edilmiş ve aerosol haline getirilmiştir. Atomize edilmiş patojenler, tampon haznesi içindeki olası bakteri kaybını azaltmak ve taşıma verimliliğini artırmak için fan pervanesinin giriş tarafında doğrudan tampon haznesine yaklaşık 3 cm uzakta bir bakır borudan beslendi. Güçlü hava akışı emişi nedeniyle, bu düzenleme, iyonlaştırıcının yukarı akışına ulaşmadan önce bakterilerin karıştırılmasında son derece etkilidir.

Çalışma için bir pozitif iyonlaştırıcı ve bir negatif iyonlaştırıcı kullanıldı (Model SJ-1000, Sejin Electronics, Güney Kore). Her iyonlaştırıcı, bir iyon emisyon ucuna ve plastik bir muhafaza içine yerleştirilmiş bir cereyan beslemeye sahipti. Negatif iyonlaştırıcı için iyon emisyon ucu yumuşak tellerden oluşurken, pozitif iyonlaştırıcı fırça tipi bir iyon emisyon ucuna sahipti. Her bir ionizer, iyon emisyon ucunun "A" konumunda kanalın altından sokulmasıyla kuruldu.

Havadaki mikrobiyal konsantrasyonu örneklemek için uygun tek aşamalı bir Andersen kademeli ayırıştırıcı (N6, Thermo Scientific) "B" konumunda (iyonlaştırıcıdan 90 cm uzakta) hava akışı yönünde yerleştirildi. Ayırıştırıcı tüzeneekli bir vakum pompasına bağlandı ve örneklem hacmi 28.3 LPM'ye ayarlandı.

İyon konsantrasyonunu ölçmek için polaritesi ayarlanabilen bir hava iyon sayacı (Air Ion Counter, AlphaLab, Salt Lake City) kullanıldı. Üreticinin teknik özelliklerine göre, iyon sayacının çalışma aralığı 1.99×10^8 ions/cm³e kadar çıkabiliyordu. Kanal havasının sıcaklığını ve bağıl nemini ölçmek için ayrılmış tipte bir sensör setinden (SK-LTH II a-2) oluşan bir hafızalı veri kaydedici (SK-L200THIIα) kullanıldı. Sensörün doğruluğu, sıcaklık için $\pm 0,5$ °C ve bağıl nem için $\pm 3,0$ idi. Sensör, kanalın galvanizli çelik bölümünün alt kısmına yerleştirildi ve "C" konumunda hava akış yönünün tersine konumlandırıldı. Benzer şekilde, kanaldaki hava hızını ölçmek için portatif termal anemometreden ($\pm 3,0$) oluşan çok fonksiyonlu bir iç hava kalitesi ölçer (9555, Velocicalc, TSI) kullanılmıştır. Kanalın temperli cam bölümündeki bir açıklıktan ölçüm probu yerleştirildi ve akış yönüne dik merkezi düzlemde ayarlandı.

3. Deneysel işlemler

Deney, % 70 etanolün nebülize edildiği ve 15 dakika süreyle kanala beslendiği bir temizleme işlemi ile başladı. Her deneysel koşulda test edilen her mikroorganizma türü için üç set deney gerçekleştirilmiştir. Her set için, iyonlaştırıcı AÇIK ve KAPALI konumdayken bağımsız olarak beş numune toplandı. Gerekliğinde fan hızı kademeli olarak artırılarak veya azaltılarak gerekli hava hızına ulaşıldı ve anemometre okuması izlendi. Her iyonlaştırıcı, deneyin başlamasından önce 10 dakika ısıtıldı. Her test için, aynı stoktan 50 mL mikroorganizma çözeltisi test tüpünden nebulizöre aktarıldı, atomize edildi ve örneklemeden önce tampon odasına beslendi. 10 dakika sistem durağanlaştırıldıktan sonra, vakum pompası çalıştırıldı ve agar plakasını içeren ayırıştırıcı düzeneğe, hava numunelerinin toplanması için numune alma konumuna sabitlendi. Her numune toplama süresi 106 s idi ve 50 L'lik toplam örneklenmiş hava hacmine eşdeğeri.

Örneklemeden sonra, toplanan tüm plakalar hemen inkübe edildi. İnkübasyon sırasında, her tür bakteri Shel-Lab 3040 Su Ceketli inkübatörde 37 °C sabit sıcaklıkta 24 saat süreyle saklandı ve üretildi. İnkübasyonu takiben, her plakadaki kolonilerin miktarı sayıldı.

İyonlaştırıcıların dezenfeksiyon özelliklerini değerlendirmek için çeşitli deneyler için kanal havasının farklı özellikleri gerekiyordu. Kanal havasının oda havasından daha yüksek bir sıcaklıkta olmasını gerektiren deneylerde,

kanalı sıcak hava ile beslemek için tampon haznesinin içine bir ısıtıcı yerleştirildi. Isıtıcı, sıcaklığı kademeli olarak ayarlamak için bir kontroler sahipti. Kanalda daha düşük hava sıcaklığı elde etmek için, soğutulmuş havayı tampon odasına beslemek için ayrı bir klima ünitesi kullanıldı. Isıtıcının bağıl nem oranını düşürdüğü ve dolayısıyla yaklaşık % 50'de tutmak için aynı anda ek bir sis üreticinin çalıştırıldığı belirtilmelidir.

Ek olarak, iyonlaştırıcılar test edilen tüm mikroorganizmalar için aynı hava akımı hızı, sıcaklığı ve bağıl nem koşulları altında çalıştırmadan tam set kontrol deneyleri gerçekleştirildi.

3.1. Ozon ölçümleme

İyonlaştırıcıların çalışma koşulları altında ozon üretme potansiyelini araştırmak için, ozon konsantrasyonunu ölçen bir ozon monitörü (2B Technologies Model 205) kullanıldı. Gerçek zamanlı ölçümler, hem iyonlaştırıcılar (pozitif ve negatif) çalışırken hem de "B" noktasında çalışmıyorken alınmıştır. Ozon konsantrasyonu alınmadan önce her iyonlaştırıcının en az 10 dakika çalışmasına izin verildi. Pozitif ve negatif iyonlaştırıcıların yaklaşık ozon emisyon oranları Eşitlik (1) ile belirlenmiştir:

$$E = Q \times (C_{on} - C_{off}) \quad (1)$$

burada E emisyon hızıdır (mg / saat), Q akış hızıdır (m³ / saat), C_{on} , iyonlaştırıcı açıldığında maksimum ozon konsantrasyonudur (mg / m³) ve C_{off} , ionizer kapalıyken en yüksek ozon konsantrasyonudur. (mg / m³).

3.2. Dezenfeksiyon etkinliğinin hesaplanması

Basitlik ve filtrelerin doğrudan performans karşılaştırmalarına olanak sağlamak için iyonlaştırıcıların dezenfeksiyon performansı, filtre performansının tanımlanmasında en doğrudan ve yaygın olarak kullanılan yaklaşım tek geçişli dezenfeksiyon etkinliği ölçülerek değerlendirilmiştir. İyonlaştırıcı birimin dezenfeksiyon etkinliği Denklem (2) 'de tanımlanmıştır:

$$\eta(\%) = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^3 CFU_{ionizer-on,i}}{\sum_{i=1}^3 CFU_{ionizer-off,i}} \right] \times 100 \quad (2)$$

burada i , üç farklı numune setini belirtir ve $CFU_{ionizer-on}$ ve $CFU_{ionizer-off}$ sırasıyla bakterilerin iyon konsantrasyonlarına maruz kaldığındaki ve maruz kalmadığındaki koloni oluşturan birimlerdir.

Dezenfeksiyon etkinliğindeki değişkenliği hesaba katmak için, üç denemeden ortalamalar ve standart sapmalar hesaplanmıştır.

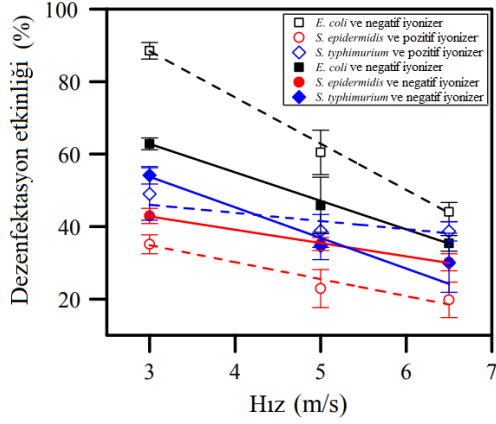
4. Sonuçlar ve tartışmalar

4.1. Pozitif ve negatif hava iyonizasyonunun dezenfeksiyon etkinliği

Genel olarak, test edilen üç bakteri için hem pozitif hem de negatif iyonlaştırıcıların dezenfeksiyon etkileri aynı eğilimi gösterdi. Şekil 2'de gösterilen sonuçlarımız, iyonlaştırıcıların ortalama veriminin hava hızı arttığında düştüğünü göstermektedir.

Hava hızı 3.0'dan 6.5 m / s'ye çıkarıldığında, pozitif iyonlaştırıcının dezenfeksiyon etkinliği *E. coli* için % 88.54 \pm 2.27'den % 44.03 \pm 2.65'e, *S. typhimurium* için % 49.02 \pm 7.23'den % 38.69 \pm 2.64'e ve *S. epidermidis* için % 35.12 \pm 2.63'den % 19.77 \pm 4.9'a düştü. Bunlar, sırasıyla *E. coli*, *S. typhimurium* ve *S. epidermidis* için % 50.3, % 21.1 ve % 43.7'lik bir düşüş yüzdesini temsil etmektedir (Şekil 2).

Aynı şekilde, hava hızının 3.0'dan 6.5 m / s'ye yükselmesi, negatif ionizer'ın dezenfeksiyon etkinliğinin *E. coli* için 62.85 \pm 1.63'ten % 35.37 \pm 2.15'e, *S. typhimurium* için % 54.15 \pm 2.44'den % 30.03 \pm 8.14'e ve *S. epidermidis* için % 42.93 \pm 2.1'den % 30.17 \pm 2.35 düşmesine neden oldu. Bunlar, *E. coli*, *S. typhimurium* ve *S. epidermidis* için negatif hava iyonizasyonu yüzde azalmanın sırasıyla % 43.7, % 44.5 ve % 29.72 olduğu



Şekil 2. Pozitif ve negatif iyonlaştırıcıların dezenfeksiyon etkinliği.

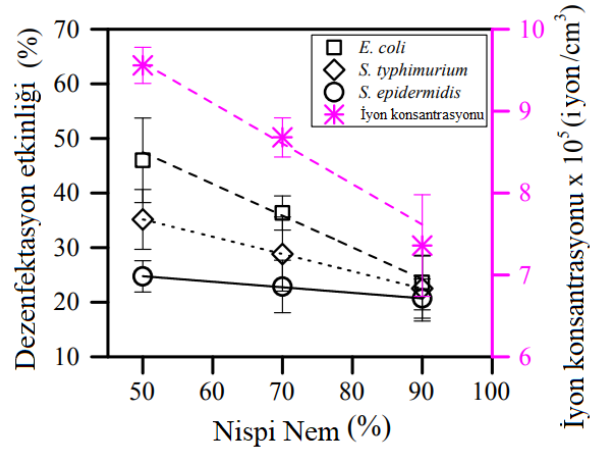
anlamına gelir (Şekil 2). Yüksek hava hızında gözlemlenen düşük dezenfeksiyon etkinliği, hava hızındaki artışın, pozitif ya da negatif hava iyonlarının zararlı etkisine maruz kalan bioaerosollerin temas süresinin kısaltmasına bağlanabilir. Kanal içi UV ve soğuk plazma için önceki gözlemlerle çok iyi uyumaktadır [7,18]. İyonlaştırıcıların polaritesinin bakterinin canlılığı üzerindeki etkisi de gözlemlendi. Şekil 2'de gösterildiği gibi, negatif hava iyonizasyonu için ortalama dezenfeksiyon etkinliği, pozitif hava iyonizasyonuna nispeten daha düşüktü. Pozitif iyonlaştırıcının mikroorganizmalar üzerinde daha büyük bir inaktive edici etkiye sahip olabileceği daha önceki çalışmalarda gözlemlenmiş ve bildirilmiştir. Hem sıvı kaynaklı [25] hem de hava yoluyla taşınan [26] bakteriler için elektrik yükü hareketliliği çalışmaları yüklerin büyüklüğü gerinimden gerinime değişse de bakteri hücrelerinin dış yüzeylerinde net bir negatif yük taşıdığını bildirmiştir. Sonuç olarak, bazı bakteriler pozitif hava iyonlarından kaynaklanan hasara daha duyarlıdır, ancak negatif hava iyonları tarafından bakteri hücre duvarlarına verilen fazla negatif yükleri geri püskürtür. Buna rağmen, negatif hava iyonları, belirgin dezenfeksiyon etkinliği gösterdi. Net negatif yüklü bakteri negatif hava iyonizasyonuna maruz kaldığında, yüklerin yeniden yönlendirilmesi nedeniyle bakterilerin potansiyel zar yapısında değişiklikler meydana gelmiş olabilir. Bakteriler, temel metabolik aktivite için potansiyel membran yapısına bağlı olduğundan, bu sonuç olarak hücre hasarına neden oldu [27,28]. Bir başka makul neden ise, negatif iyonların dağılım ve hava akışı yoluyla net negatif yüklü bakterilerin itici hücre duvarlarını aşarak ulaşmasıdır [29].

4.2. Çevresel etkiler

Bioaerosollerin hava iyonlarına karşı savunmasızlığı farklı olsa da, çevresel faktörler de bu bioaerosollerin inaktivasyonunun derecesini etkileyebilir. Bioaerosolün ortam havasında hayatta kalması, sıcaklık ve bağıl nem gibi çevresel parametrelere büyük ölçüde bağlıdır ve mikroorganizmaların koloniler oluşturması için uygun koşulları garanti eder. Pozitif hava iyonları için bu iki parametrenin etkilerini inceledik; sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

4.2.1. Nem etkisi

RH, havalandırma kanallarının hava iyonizasyonu ile dezenfeksiyonunda dikkate alınması gereken önemli ve hassas bir değişken olabilir. Bu çalışmada, her bir bağıl nem seviyesi için kanal sıcaklığının 21 °C'de muhafaza edildiği unutulmamalıdır. Sonuçlarımız, pozitif iyonlaştırıcıların etkinliğinin RH'deki değişikliklerle önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Şekil 3'te gösterildiği gibi, RH'nin dezenfeksiyon üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve yüksek RH'nin iyonlaştırıcının aşağı doğru trenddeki etkilerini önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur.



Şekil 3. Bir pozitif iyonlaştırıcının dezenfeksiyon etkinliğine bağlı nemin etkisi ve bağıl nem ile iyon konsantrasyonu arasındaki ilişki.

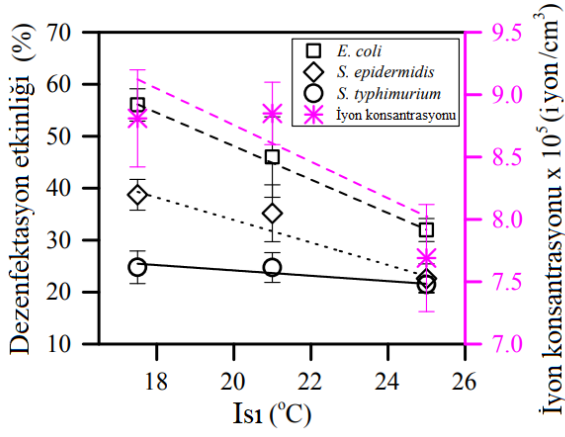
E. coli için, dezenfeksiyon etkinliği % 50 bağıl nemde % 46,0 ± 7,7'den % 70 bağıl nemde 36,4 ± 3,1'e ve 90 bağıl nemde % 23,6 ± 5,0'a düşmüştür. Benzer şekilde, dezenfeksiyon etkinliği % 50, % 70 ve % 90 RH değerlerinde sırasıyla S. typhimurium için % 35,2 ± 5,5'ten % 28,8 ± 6,8'e ve son olarak % 22,5 ± 6,0'a ve S. epidermidis için % 24,8 ± 2,9'dan % 22,9 ± 4,8'e ve son olarak % 20,7 ± 3,6'ya düşmüştür. Buna uygun olarak, bağıl nem % 50'den % 90'a doğru çıkarken dezenfeksiyon etkinliğinde ki yüzde azalma, E. coli, S. typhimurium ve S. epidermidis için sırasıyla % 48,7, % 36,1 ve % 16,5 olmuştur. Ultraviyole ışınlama kullanılan laboratuvar çalışmalarında, yüksek bağıl nem koşulları altında önemli ölçüde artan bioaerosol sağkalım eğilimi gözlemlenmiştir [30,31].

Artan bağıl nem ile biyo-aerosol inaktivasyon oranlarındaki azalmayı açıklayan mekanizmalar tam olarak anlaşılmamış olsa da, [32,33] gibi su emilim araştırmaları, bakterilerin, kuru ağırlıklarına göre önemli miktarda suyu havadan emebildiklerini bildirmiştir. Bioaerosol hücrelerin bu su emilimi, RH arttıkça hava iyonizasyonunun neden olduğu DNA hasarına karşı takviye direnç sağlayabilir. Ayrıca, nükleik asitlerin, proteinlerin ve hücre duvarı bileşenlerinin hidrasyonu, kanalın mikro ortamından suyun emilmesi nedeniyle de meydana gelebilir, bu nedenle, hava iyonlaşmasının üzerlerindeki inaktivasyon etkisini azaltan bir şekilde bakterinin hücre duvarı özelliklerinde, DNA yapısında veya diğer polimerik maddelerinde değişikliklere yol açabilir. Bununla birlikte, bakterilerin fizyolojik bileşimindeki farklılıklar nedeniyle, hücre ve su buharı arasındaki etkileşim organizmalar arasında değişebilir [33].

Bir başka olası ve daha doğrudan neden, Şekil 3'te gösterilen iyon konsantrasyonu üzerindeki nemin doğrudan ve öngörülebilir etkisinden gözlemlenebilir. Bağıl nemdeki bir artış iyonlaştırıcının yoğunluğunu düşürdüğünden, buradan hareketle, mikroorganizmaların aldığı iyon dozu düşeceğinden iyon konsantrasyonu nemle azalır.

4.2.2. Isı etkisi

Şekil 4, ısının pozitif iyonlaştırıcının dezenfeksiyon etkinliği üzerindeki etkisini göstermektedir. Her ısı seviyesi için, kanalın RH'si % 50'de tutuldu. Sonuçlarımız, E. coli için 17,5 °C, 21,0 °C ve 25,0 °C'de dezenfeksiyon etkinliklerinin sırasıyla % 56,0 ± 3,1, % 46,0 ± 7,7 ve % 32,0 ± 2,2; S. typhimurium için sırasıyla % 38,8 ± 3,0, % 35,2 ± 5,5 ve % 22,6 ± 2,8; S. epidermidis için sırasıyla % 24,8 ± 3,4, % 24,8 ± 2,9 ve % 21,5 ± 1,5 bulundu. Buna göre, 17,5 °C – 25,0 °C ısıdan itibaren, E. coli, S. typhimurium ve S. epidermidis için dezenfeksiyon etkisindeki azalma yüzdesi sırasıyla % 42,9, % 41,8 ve % 13,3'tür. Dezenfeksiyonun 17,5 °C'de 25 °C'de olduğundan daha iyi olması ilgi çekicidir. Küçük farklılığa rağmen, bu tutarlıydı ve incelenen tüm bakteriler için meydana geldi, ancak E. coli ve S. typhimurium için S. epidermidis'ten daha belirgindi.



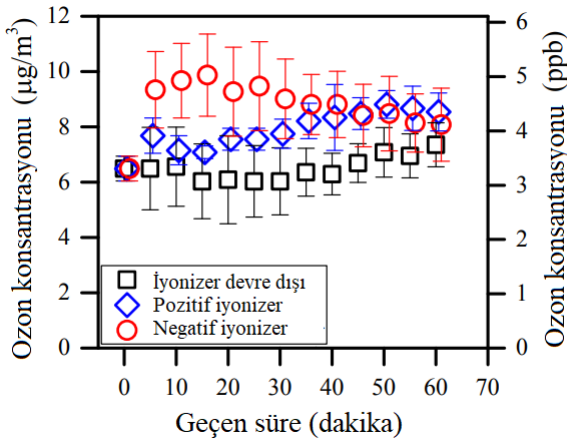
Şekil 4. Pozitif iyonlaştırıcının dezenfeksiyon etkinliğine sıcaklığın etkisi ve sıcaklık ile iyon konsantrasyonu arasındaki ilişki.

Böyle bir dezenfeksiyon modeli, hücrenin, düşük ısılarla sınırlandırılan organizmanın hücrelerinin içindeki yaşamın sürdürülmesini sağlayan kimyasal dönüşümlere olan ihtiyacı yansıtabilir. Elde ettiğimiz sonuçlardan, iyonlaştırıcının yakın çevresinin ısısının, biyo-aerosollerin stabilitesi üzerindeki hava iyonizasyonunun etkisinde önemli bir rol oynayabileceği açıktır. Ne yazık ki, mikroorganizma dezenfeksiyonu için ısının hava iyonizasyonu üzerindeki doğrudan etkisi dair herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bununla birlikte, Şekil 4'ten 17.5 °C ile 25.0 °C arasındaki bir ısı aralığında iyon konsantrasyonunu da gözlemleyebiliriz. Bu, biyo-aerosollerin maruz kaldığı iyonların dozunun, ısı arttığında azaldığını onaylar. Bu, bulgularımızı daha da doğrular.

4.2.3. Ozon konsantrasyonu

Yıllar geçtikçe, ozonun hava temizleme ürünlerinden modern iç mekânlara salınımı ve girişi, özellikle yüksek potansiyel deşarjı içeren herhangi bir mekanizma için artan sağlık endişeleri yaratmıştır. Ancak iyonlaştırıcılar tarafından yayılan ozon konsantrasyonu nadiren ölçülür veya rapor edilir. Bu çalışmada, iyonlaştırıcılarımızın ozon üretim seviyelerini rapor ettik. Havalandırma kanalındaki 3.0 m / s hava hızında ozon üretimi üzerindeki deşarj polaritesinin etkisi Şekil 5'te çözülmüştür. Takılan her iyonlaştırıcı polaritesi için, kanaldaki ozon konsantrasyonu 5 ppb'den daha düşüktü ve bu kanalın arka plandaki ozon konsantrasyonundan biraz daha yüksekti. Bu, iyonlaştırıcılarımızın pozitif veya negatif olarak nispeten daha az miktarda ozon ürettiğini göstermektedir. Üstelik, üretilen ozon miktarı iyonlaştırıcıların polaritesine göre değişiyordu.

Sonuçlarımız, negatif iyonlaştırıcıdan kanalın ozon konsantrasyonundaki artışın, pozitif iyonlaştırıcıdan daha büyük olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. Ozon konsantrasyonu

Negatif iyonlaştırıcı tarafından üretilen maksimum ozon konsantrasyonu 1.27 ppb idi ve tahmini emisyon oranı 1.09 mg / saat idi. Pozitif iyonlaştırıcı için ölçülen ozon konsantrasyonu 0,73 ppb ve tahmini emisyon oranı 0,63 mg / saattir. İlginç bir şekilde, bu bulgu Fletcher ve ark. [34], pozitif iyonların ürettiği mekanizmanın, negatif koronalara neden olan negatif iyonlardan çok daha az ozon üretebileceğini ve daha fazla sayıda serbest elektronla ilişkili olduğunu ve ozonun nispeten düşük enerjili reaksiyonlarla üretildiğini bildirmiştir. Önceki çalışmalar, hava kanalı akışlarında soğuk plazma [7] için 42 mg / saat ve negatif iyonlaştırıcı [18] için 29 mg / saat tahmini emisyon oranları bildirmiştir. Bu emisyon oranları, çalışmamızda tahmin edilen maksimum ozon emisyon oranının sırasıyla yaklaşık 40,78 ve 28,16 katıdır.

Fletcher vd. [34], iyonlaştırıcıların havadaki mikroorganizmalar üzerindeki dezenfeksiyon mekanizmalarının esas olarak ozon varlığı ile ilişkili olduğunu savundu. İyonlaştırıcılarımızın ürettiği son derece düşük ozon göz önüne alındığında, ozonun bu çalışmada bildirilen dezenfeksiyon etkinliği üzerinde çok az veya ihmal edilebilir bir etkiye sahip olabileceği tahmin edilmektedir. Bu aynı zamanda hava iyonlarının hücre zarlarını bozabileceği ve oksidatif hasara neden olabileceği argümanını da güçlendirir [35,36]. Bu bulgu, Park ve diğerlerinin sonuçlarıyla tutarlıdır. [37].

İMHK'sini iyileştirmek için hava iyonizasyonu kullanmanın en büyük endişesi ozon emisyonudur. Bu bağlamda, mevcut çalışmada iyonlaştırıcıların ozon emisyon oranlarını diğer çalışmalarda diğer kanal içi ve taşınabilir hava temizleyicilerle karşılaştırdık (Tablo 1). Yine sonuçlar, bu çalışmada kullanılan iyonlaştırıcıların ozon emisyon oranlarının, çoğu kanal içi / taşınabilir hava temizleyicisinden önemli ölçüde daha düşük olduğunu gösterdi. Ozonlu hava temizleyicileri için California standardı 4,1 mg / saattir [38].

5. Vargılar

Bu çalışma, iyonlaştırıcıların çeşitli çevresel koşullar altında farklı hava akımı hızlarında havalandırma kanallarında bulunan biyo-aerosollerin inaktive etmedeki etkinliğini araştırmıştır. Test edilen üç bakteri türü (*E. coli*, *S. typhimurium* ve *S. epidermidis*), pozitif iyonlaştırıcıyla daha iyi performans elde edilmekle birlikte, hava iyonizasyonuna karşı belirgin bir hassasiyet göstermiştir. Bununla birlikte, sonuçlar hem pozitif hem de negatif iyonlaştırıcılar için hava hızı ile dezenfeksiyon etkinlikleri arasında ters bir korelasyonu temsil ediyordu. Pozitif iyonlaştırıcının 3,0 ila 6,5 m / s artan hava hızındaki karşılık gelen dezenfeksiyon etkinliği *E. coli*, *S. typhimurium* ve *S. epidermidis* için sırasıyla % 88.5'ten % 44.0'a, % 49.0'dan % 38.7'ye ve % 35.1'den % 19.8'e düşmüştür. Benzer şekilde, negatif iyonlaştırıcı için dezenfeksiyon etkinliği sırasıyla *E. coli*, *S. typhimurium* ve *S. epidermidis* için sırasıyla % 62.9'dan % 35.4'e, % 54.2'den % 30.0'a ve % 42.9'dan % 30.2'ye düşmüştür.

Tablo 1

İyonlaştırıcılar, diğer iç mekân / taşınabilir hava temizleyicileri ve elektronik cihazların ozon emisyon oranlarının mevcut çalışma ile karşılaştırılması.

S/N	Cihazlar	Ozon emisyon oranları (mg/hr)	Referanslar
1	Negatif iyonizer	1.09	Mevcut inceleme
2	Pozitif iyonizer	0.63	Mevcut inceleme
3	Kanal içi Elektrostatik Çökeltici	21.80–60.40	[39]
4	Elektriksel bağlantılı kanal içi hava temizleyiciler	0.0–349	[38]
5	Ozonoliz hava temizleyiciler	0.16–220	[40]
6	Fotokopi cihazları	1.30–7.90	[41]
7	Laser jet yazıcılar		
	- Monokrom baskı	0.032–5.82	[42]
	- Renkli baskı	0.726–10.50	[42]
8	Elektrostatik Çökeltici	3.80	[43]
9	İyon güreçleri	3.30–4.30	[43]
10	Negatif iyon hava temizleyiciler	13.40–24.50	[44]
11	İşık bazlı hava temizleyiciler	7.19–10.40	[44]

Havadaki bakterilerin inaktivasyon oranlarını etkileyen çevresel faktörlerin tam olarak anlaşılması, bioaerosol dezenfeksiyonu için uygun stratejilerin benimsenmesi için gereklidir. Bu nedenle, iyonlaştırıcıların etkinliği üzerindeki etkilerini daha iyi anlamak için çeşitli bağıl nem ve sıcaklık seviyeleri de çalışıldı. Sonuçlar, bağıl nemin artmasının iyonlaştırıcının performansını düşüş eğiliminde önemli ölçüde etkilediğini gösterdi. Ayrıca, değişikliklere en duyarlı *E. coli* olduğu da fark edilmiştir; bağıl nem oranının % 50'den % 90'a yükselmesi, pozitif iyonlaştırıcının dezenfeksiyon etkinliğini % 23,6'ya kadar düşürürken, sıcaklık 25,0 °C'den 17,5 °C'ye düştüğünde etkinliği % 56,0'a kadar yükseldi. Son olarak, bu çalışmada kullanılan iyonlaştırıcıların emisyon oranları çoğu hava temizleyiciden çok daha düşüktü. Bu nedenle, iyonlaştırıcıların uygulanması, patojenik organizmaları havalandırma kanallarından uzaklaştırmak için zararsız, tehlikesiz ve kimyasal olmayan bir yöntem olan umut verici modern bir teknolojidir.

İlgili beyanları

Yok.

Teşekkür

Bu araştırma, General Research Fund of the Research Grants Council of the Hong Kong Special Administrative Region of China [CityU 11210015] tarafından tam olarak desteklenmiştir.

Referanslar

- [1] Y. Al horr, M. Arif, M. Katafygiotou, A. Mazroei, A. Kaushik, E. Elsarrag, Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: a review of the literature, *Int. J. Sustainable Built Environ.* 5 (1) (2016) 1–11 <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.03.006>.
- [2] E. Traistaru, R. Moldovan, A. Menelaou, P. Kakourou, C. Georgescu, A comparative study on the quality of air in offices and homes, *J. Environ. Sci. Health A.* 48 (14) (2013) 1806–1814 <https://doi.org/10.1080/10934529.2013.823335>.
- [3] M.J. Mendell, Q. Lei-Gomez, A.G. Mirer, O. Seppanen, G. Brunner, Risk factors in heating, ventilating, and air-conditioning systems for occupant symptoms in US office buildings: the US EPA BASE study, *Indoor Air* 18 (4) (2008) 301–316 <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2008.00531.x>.
- [4] L.M. Brosseau, D. Vesley, T.H. Kuehn, J. Melson, H.S. Han, Duct cleaning: a review of associated health effects and results of company and expert surveys, *ASHRAE Trans.*, vol. 106, 2000, pp. 180–187.
- [5] G. Liu, M. Xiao, X. Zhang, C. Gal, X. Chen, L. Liu, S. Pan, J. Wu, L. Tang, D. Clements-Croome, A Review of air filtration technologies for sustainable and healthy building ventilation, *Sustain. Cities Soc.* 32 (2017) 375–396 <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.04.011>.
- [6] M.S. Zuraimi, Is ventilation duct cleaning useful? A review of the scientific evidence, *Indoor Air* 20 (6) (2010) 445–457 <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00672.x>.
- [7] A.C.K. Lai, A.C.T. Cheung, M.M.L. Wong, W.S. Li, Evaluation of cold plasma inactivation efficacy against different airborne bacteria in ventilation duct flow, *Build. Environ.* 98 (2016) 39–46 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.005>.
- [8] Y. Huang, Z. Yin, Y. Chen, X. Guo, Experimental study on gaseous elemental mercury removal by wet electrostatic precipitators, *Fuel* 234 (2018) 1337–1345 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.019>.
- [9] J.D. Bapat, Application of ESP for gas cleaning in cement industry — with reference to India, *J. Hazard Mater.* 81 (3) (2001) 285–308 [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(00\)00352-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00352-6).
- [10] C. Zheng, C. Liang, S. Liu, Z. Yang, Z. Shen, Y. Guo, Y. Zhang, X. Gao, Balance and stability between particle collection and re-entrainment in a wide temperature-range electrostatic precipitator, *Powder Technol.* 340 (2018) 543–552 <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.09.056>.
- [11] K.G. Kerr, C.B. Beggs, S.G. Dean, J. Thornton, J.K. Donnelly, N.J. Todd, P.A. Sleight, A. Qureshi, C.C. Taylor, Air ionization and colonization/infection with methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* and *Acinetobacter* species in an intensive care unit, *Intensive Care Med.* 32 (2) (2006) 315–317 <http://doi.org/10.1007/s00134-005-0002-8>.
- [12] J. Gabbay, O. Bergerson, N. Levi, S. Brenner, I. Eli, Effect of ionization on microbial air pollution in the dental clinic, *Environ. Res.* 52 (1) (1990) 99–106 [https://doi.org/10.1016/S0013-9351\(05\)80154-9](https://doi.org/10.1016/S0013-9351(05)80154-9).
- [13] R.K. Gast, B.W. Mitchell, P.S. Holt, Application of negative air ionization for reducing experimental airborne transmission of *Salmonella enteritidis* to chicks, *Poultry Sci.* 78 (1) (1998) 57–61 <https://doi.org/10.1093/ps/78.1.57>.
- [14] Y. Kampmann, Y. Klingshirn, K. Kloft, J. Kreyenschmidt, The application of ionizers in domestic refrigerators for reduction in airborne and surface bacteria, *J. Appl. Microbiol.* 107 (6) (2009) 1789–1798 <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04359.x>.
- [15] R. Huang, I. Agranovski, O. Pyankov, S. Grinshpun, Removal of viable bioaerosol particles with low-efficiency HVAC filter enhanced by continuous emission of unipolar air ions, *Indoor Air* 18 (2) (2008) 106–112 <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2007.00512.x>.
- [16] S. Lee, J. Hyun, S.H. Lee, J. Hwang, One-pass anti-bacterial efficacy of bipolar air ions against aerosolized *Staphylococcus epidermidis* in a duct flow, *J. Aerosol Sci.* 69 (2014) 71–81 <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2013.12.005>.
- [17] O. Terrier, B. Essere, M. Yver, M. Barthelemy, M. Bouscambert-Duchamp, P. Kurtz, D. VanMechelen, F. Morfin, G. Billaud, O. Ferraris, B. Lina, M. Rosa-Calatrava, V. Moules, Cold oxygen plasma technology efficiency against different airborne respiratory viruses, *J. Clin. Virol.* 45 (2) (2009) 119–124 <https://doi.org/10.1016/j.jcv.2009.03.017>.
- [18] P. Zhou, Y. Yang, G. Huang, A.C.K. Lai, Numerical and experimental study on airborne disinfection by negative ions in air duct flow, *Build. Environ.* 127 (2018) 204–210 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.11.006>.
- [19] C.C. Wu, G.W.M. Lee, S. Yang, K.P. Yu, C.L. Lou, Influence of humidity and the distance from the source on negative air ion concentration in indoor air, *Sci. Total Environ.* 370 (1) (2006) 245–253 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.07.020>.
- [20] H.J.H. Theunissen, N.A.L. Toom, A. Burggraaf, E. Stolz, M.F. Michel, Influence of temperature and relative humidity on the survival of *Chlamydia pneumoniae* in aerosols, *Appl. Environ. Microbiol.* 59 (8) (1993) 2589–2593.
- [21] J. Versalovic, K.C. Carroll, G. Funke, J.H. Jorgensen, M.L. Landry, D.W. Warnock, tenth ed., *Manual of Clinical Microbiology* vol. 1, ASM Press, Washington, DC, 2011.
- [22] S.W. Lemmen, H. Hafner, D. Zoldann, S. Stanzel, R. Lütticken, Distribution of multi-resistant Gram-negative versus Gram-positive bacteria in the hospital inanimate environment, *J. Hosp. Infect.* 56 (3) (2004) 191–197 <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2003.12.004>.
- [23] A.C.K. Lai, S.S. Nunayon, T.F. Tan, W.S. Li, A pilot study on the disinfection efficacy of localized UV on the flushing-generated spread of pathogens, *J. Hazard Mater.* 358 (2018) 389–396 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.003>.
- [24] Y. Yang, H. Zhang, S.S. Nunayon, V. Chan, A.C.K. Lai, Disinfection efficacy of ultraviolet germicidal irradiation on airborne bacteria in ventilation ducts, *Indoor Air* 28 (6) (2018) 806–817 <https://doi.org/10.1111/ina.12504>.
- [25] G.V. Sherbet, M.S. Lakshmi, Characterisation of *Escherichia coli* cell surface by isoelectric equilibrium analysis, *Biochim. Biophys. Acta* 298 (1) (1973) 50–58 [https://doi.org/10.1016/0005-2736\(73\)90008-4](https://doi.org/10.1016/0005-2736(73)90008-4).
- [26] G. Mainelis, R.L. Gorny, T. Reponen, M. Trunov, S.A. Grinshpun, P. Baron, J. Yadav, K. Willeke, Effect of electrical charges and fields on injury and viability of airborne bacteria, *Biotechnol. Bioeng.* 79 (2) (2002) 229–241 <https://doi.org/10.1002/bit.10290>.
- [27] Y. Wu, J. Bai, K. Zhong, Y. Huang, H. Qi, Y. Jiang, H. Gao, Antibacterial activity and membrane-disruptive mechanism of 3-p-trans-Coumaroyl-2-hydroxyquinic acid, a novel phenolic compound from pine needles of *Cedrus deodara*, against *Staphylococcus aureus*, *Molecules* 21 (8) (2016) 1084 <https://doi.org/10.3390/molecules21081084>.
- [28] N. Miyazawa, M. Hakamada, M. Mabuchi, Antimicrobial mechanisms due to hyperpolarisation induced by nanoporous Au, *Sci. Rep.* 8 (1) (2018) 3870 <http://doi.org/10.1038/s41598-018-22261-5>.
- [29] Y.S. Kim, K.Y. Yoon, J.H. Park, J. Hwang, Application of air ions for bacterial decolonization in air filters contaminated by aerosolized bacteria, *Sci. Total Environ.* 409 (4) (2011) 748–755 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.11.012>.
- [30] P. Xu, E. Kujundzic, J. Peccia, M.P. Schafer, G. Moss, M. Hernandez, S.L. Miller, Impact of environmental factors on efficacy of upper-room air ultraviolet germicidal irradiation for inactivating airborne mycobacteria, *Environ. Sci. Technol.* 39 (24) (2005) 9656–9664 <http://doi.org/10.1021/es0504892>.
- [31] K. Ryan, K. McCabe, N. Clements, M. Hernandez, S.L. Miller, Inactivation of air-borne microorganisms using novel ultraviolet radiation sources in reflective flow-through control devices, *Aerosol Sci. Technol.* 44 (7) (2010) 541–550 <https://doi.org/10.1080/02786821003762411>.
- [32] G.O. Rubel, Measurement of water vapor sorption by single biological aerosols, *Aerosol Sci. Technol.* 27 (4) (1997) 481–490 <https://doi.org/10.1080/02786829708965488>.
- [33] J. Peccia, H.M. Werth, S. Miller, M. Hernandez, Effects of relative humidity on the ultraviolet-induced inactivation of airborne bacteria, *Aerosol Sci. Technol.* 35 (3) (2001) 728–740 <https://doi.org/10.1080/02786820152546770>.
- [34] L.A. Fletcher, L.F. Gaunt, C.B. Beggs, S.J. Shepherd, P.A. Sleight, C.J. Noakes, K.G. Kerr, Bactericidal action of positive and negative ions in air, *BMC Microbiol.* 7 (1) (2007) 32 <https://doi.org/10.1186/1471-2180-7-32>.
- [35] D.A. Mendis, M. Rosenberg, F. Azam, A note on the possible electrostatic disruption of bacteria, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 28 (4) (2000) 1304–1306 <http://doi.org/10.1109/27.893321>.
- [36] S.L. Daniels, "On the ionization of air for removal of noxious effluvia" (air ionization of indoor environments for control of volatile and particulate contaminants with nonthermal plasmas generated by dielectric-barrier discharge), *IEEE Trans. Plasma Sci.* 30 (4) (2002) 1471–1481 <http://doi.org/10.1109/TPS.2002.804211>.
- [37] J. Park, B. Sung, K. Yoon, C. Jeong, The bactericidal effect of an ionizer under low concentration of ozone, *BMC Microbiol.* 16 (1) (2016) 173, <https://doi.org/10.1186/s12866-016-0785-5>.
- [38] G. Morrison, R. Shaughnessy, J. Siegel, In-duct Air Cleaning Devices: Ozone Emission Rates and Test Methodology, California Resources Board and the California Environmental Protection Agency, 2014 Contract No. 09-342 <http://www.arb.ca.gov/research/apr/past/09-342.pdf>, Accessed date: 12 November 2018.
- [39] D.G. Poppendieck, D. Rim, A.K. Persily, Ultrafine particle removal and ozone generation by in-duct electrostatic precipitators, *Environ. Sci. Technol.* 48 (3) (2014) 2067–2074 <http://doi.org/10.1021/es404884p>.

- [40] N. Britigan, A. Alshawa, S.A. Nizkorodov, Quantification of ozone levels in indoor environments generated by ionization and Ozonolysis air purifiers, *J. Air Waste Manag. Assoc.* 56 (5) (2006) 601–610 <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464467>.
- [41] K.W. Leovic, L.S. Sheldon, D.A. Whitaker, R.G. Hetes, J.A. Calcagni, J.N. Baskir, Measurement of indoor air emissions from dry-process photocopy machines, *J. Air Waste Manag. Assoc.* 46 (9) (1996) 821–829 <https://doi.org/10.1080/10473289.1996.10467517>.
- [42] C. He, L. Morawska, H. Wang, R. Jayaratne, P. McGarry, G.R. Johnson, T. Bostrom, J. Gonthier, S. Authemayou, G. Ayoko, Quantification of the relationship between fuser roller temperature and laser printer emissions, *J. Aerosol Sci.* 41 (6) (2010) 523–530 <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2010.02.015>.
- [43] M.S. Waring, J.A. Siegel, R.L. Corsi, Ultrafine particle removal and generation by portable air cleaners, *Atmos. Environ.* 42 (20) (2008) 5003–5014 <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.02.011>.
- [44] K. Yu, G.W. Lee, C. Hsieh, C. Lin, Evaluation of ozone generation and indoor organic compounds removal by air cleaners based on chamber tests, *Atmos. Environ.* 45 (1) (2011) 35–42 <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.051>.