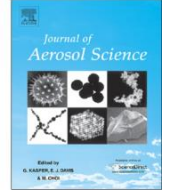


Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Aerosol Science

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jaerosci

Bipolar hava iyonlarının bir kanal hava akışında aerosolize Staphylococcus epidermidis'e karşı tek geçişli antibakteriyel etkinliği



Sang-Gu Lee^a, Junho Hyun^a, Sung Hwa Lee^b, Jungho Hwang^{a,c,*}

^a Department of Clean Technology Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Republic of Korea

^b HAE Research and Development Center, LG Electronics, Seoul 153-802, Republic of Korea

^c Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Republic of Korea

Makale bilgileri

Makale geçişi:

Alım 5 Ağustos 2013

Revize formda alım

10 Kasım 2013

Kabul 6 Aralık 2013

Çevrimiçi erişim 21 Aralık 2013

Anahtar kelimeler:

Biyoaerosol

S. epidermidis

Kanal hava akışı

Tek geçişli

Antibakteriyel performans

Bipolar iyon işlemi

Özet

Isıtma, havalandırma ve iklimlendirme (HVAC) sistemleri sağlıklı ve konforlu iç ortamlar sağlayabilirken, bir HVAC sisteminin hemen hemen her parçası, yeterli besin varsa aktif mikrobiyal büyümeyi destekleyebilir. Bu çalışmada, hava iyonlarının bir havalandırma kanalı akışında aerosol haline gelmiş bakterilere karşı tek geçişli antibakteriyel performansını artırmak için bir metodoloji sunduk. Staphylococcus epidermidis (S. epidermidis) aerosol haline getirildi, kanal hava akışı ile karıştırıldı ve kanalın içine yerleştirilmiş karbon fiber iyonlaştırıcılar tarafından üretilen hava iyonlarına maruz bırakıldı. S. epidermidis daha sonra kanalın çıkışında örneklendi ve iyon maruz kalma süresi, iyon konsantrasyonu ve iyon polaritesinin fonksiyonları olarak kültüre edilebilirliğini değerlendirmek için inkübe edildi. İyonlaştırıcılar 2 saniye boyunca iki kutuplu hava iyonları ürettiklerinde, dört iyonlaştırıcı, iyon polaritesinde üç değişikliğin olduğu bir konfigürasyonda kanalın hem üst hem de alt duvarlarına yerleştirildiğinden% 85'lik yüksek bir antibakteriyel etkinlik elde edildi (bir pozitif iyonlaştırıcı, bir negatif iyonlaştırıcı, bir pozitif iyonlaştırıcı ve hava akış yönü boyunca seri halde bir negatif iyonlaştırıcı). İyon maruziyet süresi 0,2 saniyeye düşürüldüğünde, iyon polaritesinde yedi değişikliğe sahip bir konfigürasyon uygulanarak % 50 antibakteriyel verimlilik sağlandı. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılarak, S. Epidermidis de bipolar iyon uygulamasının neden olduğu hücre büzülmesi gözlemlendi.

© 2013 Elsevier Ltd. Tüm hakları saklıdır.

1. Giriş

Biyoaerosoller, havada taşınan biyolojik kökenli parçacıklardır ve virüsler, bakteriler ve mantarlar gibi çeşitli canlı malzemeleri içerir. Biyoaerosoller, insan çevresinde her yerde bulunur. Kapalı ortamlarda biyo-aerosollere maruz kalma, bulaşıcı hastalıklar, akut toksik etkiler, alerji, astım, iltihaplı akciğer hastalıkları ve kanser gibi çok çeşitli olumsuz sağlık sorunları ile potansiyel olarak ilişkilidir (Ji ve diğerleri, 2007; Main, 2003; Xu vd., 2011).

Isıtma, havalandırma ve iklimlendirme (HVAC) sistemleri, uygun şekilde tasarlandığında, kurulduğunda, çalıştırıldığında ve bakımı yapıldığında modern yaşam için çok önemlidir. HVAC sistemleri sağlıklı ve konforlu iç ortamlar sağlayabilse de, bir HVAC sisteminin hemen hemen her parçası, yeterli besin mevcutsa aktif mikrobiyal büyümeyi destekleyebilir (Batterman & Burge, 1995). Bir HVAC sisteminde büyüyen mikroorganizmalar, uçucu organik bileşikler (VOC'ler) ve aerosoller üretir. Araştırmalar, HVAC sistemlerindeki hava filtrelerinin bakteri ve mantarlar tarafından kolonize edilebileceğini göstermiştir (Kemp ve diğerleri, 1995; Maus ve diğerleri, 2001; Möritz ve diğerleri, 2001; Noris ve diğerleri, 2011).

* Sorumlu yazar: Department of Clean Technology Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Republic of Korea.

Tel.: 082 2 2123 2821; faks:082 2 312 2159.

E-mail address: hwangjh@yonsei.ac.kr (J. Hwang).

0021-8502 / \$ - ön konuya bakın & 2013 Elsevier Ltd. Tüm hakları saklıdır.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jaerosci.2013.12.005>

Bu kolonizasyon, kaçınılmaz olarak filtrasyon kaybına ve mikroorganizmaların nihai olarak salınmasıyla potansiyel filtre bozulmasına yol açar (Ahearn ve diğerleri, 1997; Simmons ve Crow, 1995).

Normal çalışma koşulları altında, HVAC sistemlerindeki havalandırma kanalları da toz partikülleri ile kirlenebilir ve mikroorganizmaların çoğalması için rezervuar görevi görebilir (Zuraimi, 2010). Hava hızları, mikrobiyallerin kanal yüzeyinden yeniden süspansiyonunu etkileyebilir ve böylece mikropların hava akışına yeniden girmesini sağlayabilir. Kanallar dahil biyolojik olarak kirlenmiş HVAC sistemlerinden kaynaklanan emisyonlar, olumsuz sağlık etkileri olan iç mekan hava kirliliği sorunlarına yol açmıştır. Havalandırma kanalı temizliği (DC), ticari olarak HVAC sistemleri içindeki kirlenme kaynakları uzaklaştırmak için savunulmuştur. Bununla birlikte, temizlendikten sonra, kanal biriktirme yoluyla veya mikrobiyallerin yeniden büyümesi durumunda yeniden kirlenebilir (Brosseau ve diğerleri, 2000; Zuraimi, 2010). Buna göre, biyo-aerosollerin HVAC sistemlerinden uzaklaştırılması için alternatif yöntemler geliştirmeye yönelik artan bir ilgi vardır.

Antimikrobiyal kullanım için geliştirmede elektriksel korona deşarjları kullanılmıştır. Korona deşarjları tarafından üretilen hava iyonlarının fiziksel ve kimyasal işlemlerle hücre zarlarına zarar verdiği bilinmektedir. Mendis vd. (2000), hücre zarının elektrostatik bozulmasının, zar yeterli bir elektrostatik yük aldığı anda meydana gelebileceğini ve dışarıya doğru elektrostatik gerilimin çekme mukavemetini aşmasına neden olduğunu bildirmiştir. Noyce & Hughes (2002, 2003), bir DC elektriksel koronanın ürettiği hem negatif hem de pozitif iyonların nitrojen altında sabit faz hücreleri üzerindeki bakterisidal etkilerini araştırdı. Negatif veya pozitif iyonlara maruz kalma, Escherichia coli (E. coli) ve Pseudomonas veronii (P. veronii) koloni sayılarında önemli azalmalara neden oldu. Bu çalışmalarda, bakterilerin ölümünden sorumlu olan mekanizma, hücre duvarındaki çok sayıda yüklü grupla olan elektro-statik etkileşimlerdi. Bu önceki çalışmalar, bakterisidal etkinin, hücre zarındaki iyonik birikimin bir sonucu olarak hücre zarının nihai elektrostatik bozulmasına bağlı olduğunu göstermiştir (Noyce ve Hughes, 2002, 2003). Elektrikle oluşturulan negatif hava iyonuna (ENI) maruz kalmanın biyolojik etkilerini analiz etmek için, Cai ve ark. (2008), Caenorhabditis elegans'ın (C. elegans) germ hattında kuluçka boyutu, ömrü ve apoptotik hücrelerin varlığına odaklandı. Reaktif radikal türlerin, hücre yüzeyine difüzyon ve ikincil radikallerin üretimi yoluyla hücreler üzerinde büyük zarar verici etkileri olduğunu açıkladılar (Cadet ve diğerleri, 1999). Mainelis vd. (2002), havadaki mikrobiyal hücrelere indüksiyon şarjı yoluyla verilen farklı büyüklük ve polaritede elektrik yüklerinin Pseudomonas fluorescens bakterilerinin inaktivasyonunu etkilediğini bildirmişlerdir. Elektrik yükü hassas mikroorganizmaların zar potansiyelini o kadar önemli ölçüde etkiledi ki, hücreleri, özellikle de zaten yaralanmış olanlar cansız hale geldi.

Hava iyonlarına ek olarak, korona deşarjları, bakteriler arasında hücre ölümüne neden olan ozon üretebilir (Fletcher ve diğerleri, 2007). Bununla birlikte, ozonun solunmasının sıçanlarda epitel hasarı ve fibroz dahil olmak üzere geniş pulmoner değişikliklere neden olduğu ve insanlarda solunum fonksiyonları üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir (Castillejos ve diğerleri, 1992; Jakober ve Phillips, 2008; Shargawi ve diğerleri, 1999). Ozonun modern iç mekanlara girmesiyle ilgili ek bir endişe, ozonun formaldehit ve ultra ince parçacıklar gibi kirlenme üretebilen terpenler gibi kimyasallarla reaksiyonundan kaynaklanan ikincil emisyonların olası sağlık etkisidir (Weschler, 2000; Jakober & Phillips, 2008). Ozon, ABD'deki altı kriter kirlenmeden biridir ve konsantrasyonu düzenlenmiştir (US EPA, 2013).

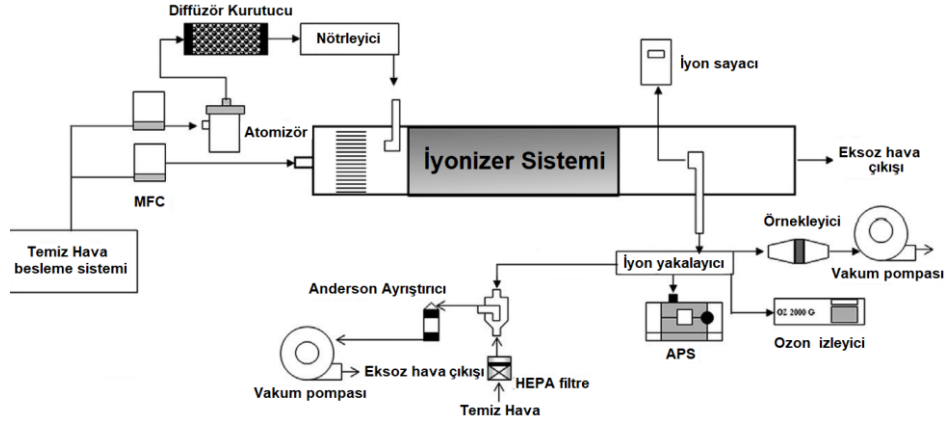
Son zamanlarda, bazı araştırmacılar, karbon fiber iyonlaştırıcıların, az ozon üretimi ile yeterince yüksek konsantrasyonlarda kararlı tek kutuplu iyonlar ürettiğini göstermiştir (Han ve diğerleri, 2008, 2009; Kim ve diğerleri, 2011; Park ve diğerleri, 2009, 2010). Karbon fiberlerin çok küçük çapından dolayı, karbon fiberlerin ucundaki elektrik alanının, daha az oksitlenmiş malzemenin düşük düzeyde ozon üretimine (Boelter & Davidson, 1997; Han ve diğerleri, 2008, 2009) yol açtığı mevcut korona şarj cihazlarına kıyasla nispeten düşük bir uygulanan voltajda korona deşarjı oluşturacak kadar yüksek hale gelebileceği düşünülebilir.

Bir karbon fiber iyonlaştırıcı tarafından üretilen hava iyonlarının etkili antibakteriyel performans sağladığı bulunmuştur. Park vd. (2009), mikron altı aerosol partiküllerinin ve bioaerosollerin uzaklaştırılmasını arttırmak için bir lifli ortam filtresinin önüne bir karbon fiber iyonlaştırıcının yerleştirildiğini bildirdi. Hava iyonlarının antibakteriyel performansı, filtre üzerine E. coli biriktirildikten sonra incelenmiştir. Kim vd. (2011), E. coli ve Staphylococcus epidermidis (S. epidermidis) karbon fiber iyonlaştırıcılar tarafından üretilen hava iyonlarına maruz bırakıldığında, taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri kullanarak hücre zarının bozulduğunu doğruladı. SEM görüntüleri, hava iyonlarının hücreleri parçaladığını ve hücre yüzeylerini aşındırdığını veya böldüğünü gösterdi.

Yukarıda bahsedilen tüm raporlarda, hava iyonlarının antibakteriyel performansı, hava iyonlarının filtre veya agar plakası gibi bir yüzeye yerleştirilen bakterilere uygulanacağı şekilde çalışılmıştır. Bununla birlikte, bir HVAC sistemi içindeki havalandırma kanallarından geçerken havadaki bakterilerin uzaklaştırılmasına yönelik artan bir ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, hava iyonlarının bir kanal akışında aerosol haline gelmiş bakterilere karşı tek geçişli antibakteriyel performansını arttırmak için bir metodoloji sunduk. Bu amaçla S. epidermidis, kanal içerisine yerleştirilen iyonlaştırıcıların ürettiği hava iyonlarına maruz bırakıldığında aerosol haline getirilerek kanal akışı ile karıştırılmıştır. S. epidermidis daha sonra kanalın çıkışında örneklendi ve iyona maruz kalma süresi (akışta kalma süresi), iyon konsantrasyonu ve iyon polaritesinin fonksiyonları olarak kültive edilebilirliğini değerlendirmek için inkübe edildi.

2. Materyaller ve Metotlar

Şekil 1, deneysel düzeneğin bir şemasını göstermektedir. Düzenek, bir partikül oluşturma sistemi, test kanalı, örnekleme sistemi ve hava iyonlaştırıcı (lar) dan oluşuyordu. Akrilden yapılan test kanalının kesit alanı 0,04 x 0,04 m² ve uzunluğu 1 m'dir. Test kanalının sıcaklığı ve bağlı nemi sırasıyla 22.5 °C ve % 10 idi.



2.1. Karbon fiber iyonlaştırıcının karakterizasyonu

Deneylerde ticari olarak temin edilebilen iyonlaştırıcılar (Sejin Electronics, Seoul, Kore) kullanıldı. Her iyonlaştırıcı, bir iyon emisyon ucu ve bir güç paketinden oluşuyordu. İyon emisyon ucu, 200 ± 20 karbon fiber demetinden oluşuyordu. Her bir karbon fiberin çapı 5–10 μm idi. Güç paketinin giriş voltajı ve frekansı sırasıyla 220 V (alternatif akım, AC) ve 60 Hz idi. Çıkış voltajı, bir yüksek voltaj probu (6015A, Tektronix) ve bir osiloskop (6050A, LecroyCorp) kullanılarak ölçülmüştür. Voltajın dalga biçimi testere dişi şekline sahipti ve tepeden tepeye değeri yaklaşık 75.3 kV idi. Gerilimde ciddi bir artış ve kademeli bir düşüş sürekli olarak tekrarlandı. İyonlaştırıcı 16 μs 'lik aralıklarla yükler yaydı. Çalışma akımı birkaç μA 'dan azdı ve çıkış voltajı bir reosta tarafından kontrol edildi. İyon konsantrasyonu, bir hava iyon sayacı (AIC20M, AlphaLab Inc., ABD) ile ölçüldü. Kullanılan iyon sayacı, 1.999×10^8 iyon / cm^3 'e kadar iyon sayısı konsantrasyonunu % ± 25 doğrulukla ölçebilir. İyon sayısal konsantrasyonu, iyon polaritesi, kanal akış hızı ve iyonlaştırıcı sayısı değiştirilerek ölçülmüştür.

2.2. Test bakteri hazırlığı

Bu çalışmada *S. epidermidis* (ATCC 14990) test bakterisi olarak seçilmiştir. *S. epidermidis*, genellikle insanların derisi veya mukoza zarları gibi çeşitli ortamlarda bulunur ve genellikle biyoaerosol araştırmalarında havada taşınan bir mikroorganizma olarak kullanılır (Grinshpun ve diğerleri, 2004; Hwang ve diğerleri, 2010; Jung ve diğerleri, 2009; Ji ve diğerleri, 2007; Kamgang ve diğerleri, 2007). *S. epidermidis*, uluslararası standardizasyon örgütü (ISO) 14698-1'e göre havadaki mikropları saymak için kullanılan hava örnekleyicilerin biyolojik verimliliğini test etmek için uygun bir tür olarak önerilmiştir.

Bir bakteri süspansiyonu gece boyunca 0.1 mL kültürlenerek ve ardından 37 °C'de 18 saat boyunca 15 mL'lik bir besin besiyer kültürü aşılansak hazırlandı. Besin besiyer, 5 g pepton ve 3 g et özütünün 1000 mL sterilize edilmiş deiyonize su içerisinde çözündürülmesiyle hazırlandı. Çözelti daha sonra bir otoklavda (DS-AC 60, Dasol Hi-Tech, Kore) sterilize edildi. İnkübe edilen bakteriyel süspansiyonlar, besleyici et suyu bileşenleri dahil olmak üzere artık partikülleri çıkarmak için 6000 rpm'de 15 dakika süreyle bir santrifüj (VS-1500N, Vision Scientific, Kore) kullanılarak sterilize edilmiş deiyonize su ile üç kez yıkandı.

2.3. Cidar kaybı testi

Seyreltilmiş bakteriyel çözelti, bir collision tipi atomizer (9302, TSI Inc., ABD) kullanılarak aerosol haline getirildi. Bir yağ tutucu, difüzyon kurutucu ve yüksek verimli partikül hava (HEPA) filtresinden oluşan kuru temizlenmiş hava besleme sisteminden gelen basınçlı hava atomizere verildi. Hava akışı ve ortaya çıkan konsantrasyon kontrol edildi. 1.5 L / dk'lık bir akış hızındaki kuru temizlenmiş hava, atomizerdeki bir delikten yüksek hızlı bir jet oluşturdu. Bu jetten gelen basınç düşüşü, bakteri çözeltisini bir tüpten yukarı çekti. Çözelti daha sonra yüksek hızlı hava jeti ile damlacıklara bölündü. Ortaya çıkan daha büyük damlacıklar, ayrıştırma tertibatı tarafından toplanırken, daha küçük damlacıklar temas etmemiştir ve çıkıştan çıkan bir aerosol oluşturmuştur. Biyoaerosol, suydan arındırılmak için bir difüzyon kurutucusundan ve bir Boltzmann yük dağılımını gerçekleştirmek için bir nötrleştiriciden (Yumuşak X-ışını şarj cihazı 4530, HCT Co., Ltd., Kore) geçti.

Biyoaerosoller, iyonlaştırıcı (lar) n yerleştirildiği bir kanaldan geçirildiğinde, hava iyonlaştırıcı (lar) ndan üretilen hava iyonları ile reaksiyona girmişlerdir. 6.5 mm çapında akrilden yapılmış bir izokinetik numune alma sondası, kanalın aşağı akışına yerleştirilmiştir. Kanaldan geçen bakteriler, toplam sayısal konsantrasyonunu ve boyut dağılımını ölçmek için bir aerodinamik partikül boyutlandırma cihazı (APS 3321, TSI Inc. ABD) ile örneklendi. Aerosol numune akış hızı ve kanal hava akış hızı sırasıyla 1 L / dak ve 4 L / dak idi.

Bakteriler kanal içinde hareket ettiğinde, elektrostatik dağılım ve Brownian difüzyonu nedeniyle kanal cidarlarına doğru hareket etme şansı vardır. Bu çalışmada hava iyonu işleminin neden olduğu elektrostatik cidar kayıpları şu şekilde tanımlanabilir.

$$L = 1 - \frac{n_{(w/ion)}}{n_{(w/o ion)}} \quad (1)$$

burada $n_{(w/ion)}$ hava iyonlarının uygulanmasından sonra kanaldan geçen bakteri konsantrasyonudur ve $n_{(w/o ion)}$ hava iyonları uygulanmadan kanaldan geçen bakterilerin sayı konsantrasyonudur.

2.4. Hava iyonlarıyla anti bakteriyel aktivite testi

Hava iyonlarına maruz bırakılan bakteriler, bir Anderson ayrıştırıcı (TE-10-800, Tisch Environmental, ABD) ile örneklendi. 0,65 μm ila 1 μm toplama çapına sahip Anderson ayrıştırıcısının altıncı aşaması, geleneksel kültür bazlı koloni sayma yöntemi için kullanıldı. Ayrıştırıcı plaka olarak bir besleyici agar plakası kullanıldı. Örnekleme akış hızı, örnekleme süresi, inkübasyon sıcaklığı ve inkübasyon süresi sırasıyla 28.3 L / dak, 3 dak, 24 ± 1 °C ve 1 gündü. İnkübasyondan sonra koloni oluşturan birimler (CFU) sayıldı. Hava iyonunun antibakteriyel etkinliği şu şekilde tanımlandı.

$$\eta_{ion} = 1 - \frac{CFU_{(w/ion)}}{CFU_{(w/o ion)} \times (1 - L)} \quad (2)$$

Burada pay, hava iyonlarının uygulanmasından sonra kültürlenmiş bakterilerin CFU'su ve payda da, hava iyonları uygulanmadan kültürlenmiş bakterilerin CFU'sudur. İyon uygulaması olan ve olmayan bakterilerin morfolojisini gözlemlemek için bir alan emisyonu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM, JSM-6701F, JEOL, Tokyo, Japonya) kullanıldı. SEM analizinden önce, her substrat 120 saniye süreyle Pt ile kaplandı.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar

3.1. Karbon fiber iyonlaştırıcının karakterizasyonu

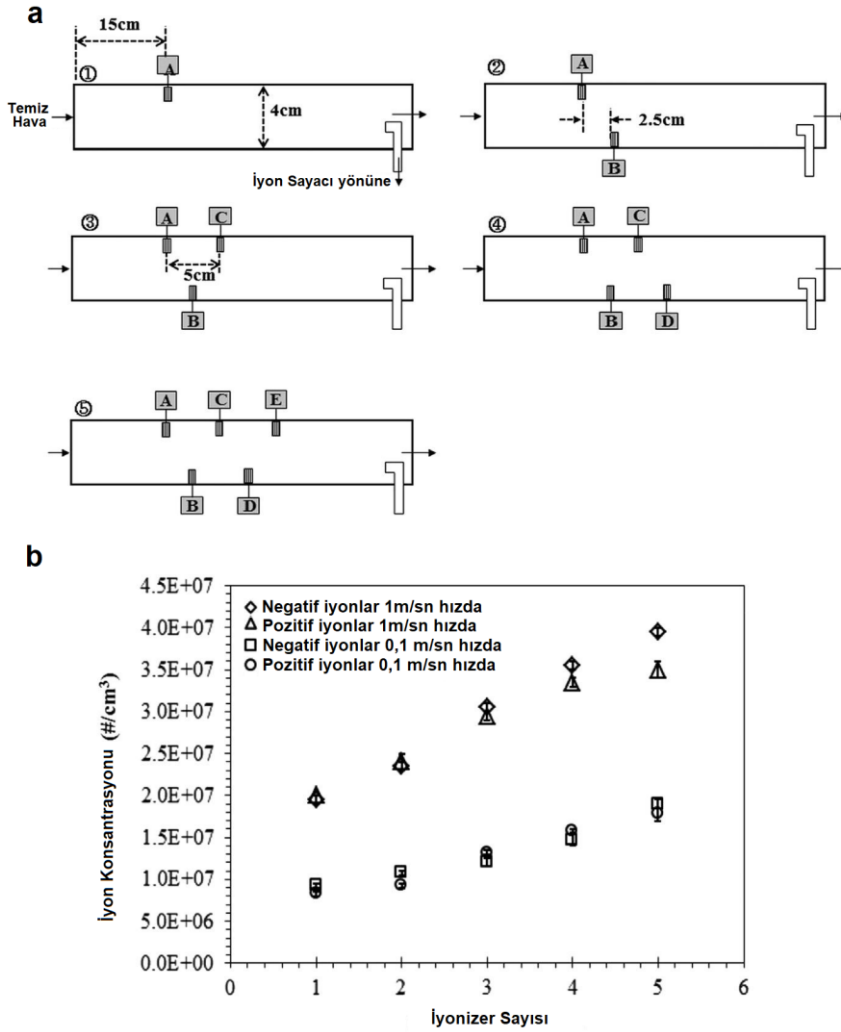
Kanal hava akış hızı, iyon polaritesi ve iyonlaştırıcı sayısının hava iyon konsantrasyonu üzerindeki etkilerini anlamak için deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde, Şekil 2 (a) 'daki şemada gösterildiği gibi bir ila beş iyonlaştırıcı kullanıldı. Kanalın girişinden numune alma portuna olan uzunlamasına mesafe 39 cm idi. Deneyler ilk olarak kanalın üst kısmında, hava akış girişinden 15 cm uzaklıkta bulunan bir iyonlaştırıcı (İyonlaştırıcı A) ile gerçekleştirilmiştir. Sonraki deneyler iki iyonlaştırıcıyla (İyonlaştırıcılar A ve B) gerçekleştirildi. Bu durumda İyonizer B kanalın altına yerleştirildi. Herhangi bir elektriksel paraziti önlemek için İyonizer A ve İyonizer B'nin dikey yönleri arasında 2,5 cm boşluk vardı. Daha sonraki deneyler için, İyonizer C, İyonizer A'dan 5 cm uzağa kanalın tepesine yerleştirildi. İyonlaştırıcı D ve E'nin yerleri aynı şekilde belirlendi. Şekil 2 (b), kurulu iyonlaştırıcıların sayısı ve hava akış hızı değişikçe kanalın çıkışında ölçülen pozitif ve negatif iyon konsantrasyonlarını göstermektedir. Sonuçlar, iyonlaştırıcı sayısının artmasıyla ve aynı zamanda akış hızıyla iyon konsantrasyonunun arttığını göstermektedir. Bu fenomen aşağıdaki yük kayması denklemi ile açıklanabilir (Sigmond, 1982):

$$\frac{1}{N_{ion}} - \frac{1}{N_0} = \frac{e}{10^{-6}} \frac{\mu}{\epsilon_0} t \quad (3)$$

N_{ion} , ölçüm noktasındaki iyon konsantrasyonudur ($\# / \text{cm}^3$), N_0 başlangıç iyon konsantrasyonudur, e bir elektronun yüküdür (1.6×10^{-19} C), 10^{-6} bir dönüşüm faktörüdür, ϵ_0 havanın geçirgenliğidir (8.85×10^{-12} F/m), t iyon sürüklenme süresidir ve N_{ion} , ölçüm noktasındaki iyon konsantrasyonudur ($\# / \text{cm}^3$), N_0 başlangıç iyon konsantrasyonudur, e bir elektronun yüküdür (1.6×10^{-19} C), 10^{-6} bir dönüşüm faktörüdür, ϵ_0 havanın geçirgenliğidir (8.85×10^{-12} F / m), t iyon sürüklenme zamanıdır ve μ , pozitif veya negatif bir iyonun elektriksel hareketliliğidir ve pozitif ve negatif iyonlar için sırasıyla (1.1×10^{-4} ve 1.9×10^{-4} m² / VS) değerindedir (Kim ve arkadaşlar, 2011). Yük sürüklenme denklemi, iyonların yolu boyunca yük konsantrasyonunun değişim hızı ve difüzyon etkisi dikkate alınmadan yük konsantrasyonunun süreklilik denkleminde elde edilir. Denklem, rastgele ve zamana bağlı bir elektrik alanında sabit bir hareketlilikle sürüklenen bir tek kutuplu iyon bulutunun yolu boyunca yük konsantrasyonunun yayılmasını tam olarak tanımlar (Sigmond, 1982). Sabit sayıda iyonlaştırıcı için akış hızı artırıldığında, iyon sürüklenme süresi azaldı ve iyon konsantrasyonunun artmasına neden oldu. Sabit bir hava akış hızı için iyonlaştırıcıların sayısı artırıldığında, ilk (yukarı akış) iyon konsantrasyonu (N_0) arttı ve iyonların örnekleme portuna ulaşması için toplam süre azaldı, bu da artan bir iyon konsantrasyonuna neden oldu. İyon konsantrasyonu, iyonlaştırıcıya uygulanan voltajın polaritesine duyarlı değildi.

3.2. Cidar kaybı ve antibakteriyel testler

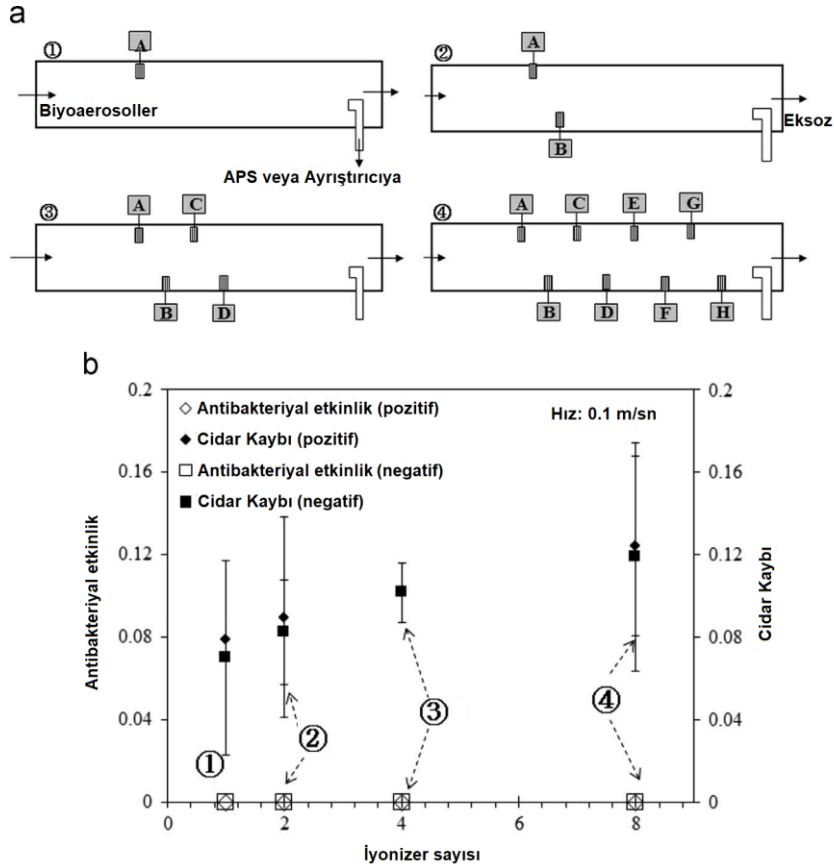
Deneylerde, hava iyonu işlemi (cidar kaybı) nedeniyle kanal yüzeyinde bakteri birikimi meydana geldi. Biyoaerosoller atomizör kullanılarak üretildikten ve kanaldan geçirildikten sonra, bunlar hava iyonları ile işleme tabi tutuldu ve biyoaerosoller, toplam sayı konsantrasyonunu ve boyut dağılımını ölçmek için APS ile örneklendi. Şekil 3, dört farklı iyonlaştırıcı düzenlemesinde pozitif ve negatif iyonların tek kutuplu iyon işlemi ile cidar kaybı ölçüm sonuçlarını gösterir. Akış hızı 0.1 m / s'de sabitlendi (kalma süresi 2 saniye). Cidar kaybı, iyonlaştırıcıların sayısının artmasıyla biraz arttı, ancak sekiz iyonlaştırıcı kullanılsa bile % 17'den fazla değildi.



Şekil 2. İyonlaştırıcıların sayısı ve püskürtme hızlarına bağlı olarak pozitif hava iyonları ve negatif hava iyonlarının konsantrasyonları değişiyordu. A, B, C, D ve E iyonlaştırıcılarıdır. Her bir hata çubuğu, üç tekrarın ortalamasından standart sapmayı gösterir. (a) İyonlaştırıcıların konumları ve (b) İyon sayısal konsantrasyonları

Tek kutuplu hava iyonları ile antibakteriyel testler de Şekil 3 (a) 'da gösterilen konfigürasyon ile gerçekleştirildi. Bu amaçla, bakteriler Anderson ayrıştırıcı tertibatı kullanılarak örnekledi. Şekil 3 (b) 'deki sonuçlar, tek kutuplu hava iyonu işleminin antibakteriyel olarak etkili olmadığını göstermektedir. Kim ve ark. (2011) ve Noyce & Hughes (2002), iyon maruziyet süresi 5 dakikadan uzun olduğunda % 40'tan fazla antibakteriyel verimlilik elde edildi. Grinshpun vd. (2004) 1 dakika süreyle hava iyonlarına maruz kalma sonrasında *S. epidermidis* için % 53 ± 20 P. *Fluorescens* için % 71 ± 11 ve *E. Coli* için % 93 ± 2 . Gram negatif bakteriler, Gram pozitiften daha fazla etkilendi. Bununla birlikte, bu çalışmada, hava iyonlarının test biyo-aerosollerine maruz kalma süresi yaklaşık 2 saniyeydi ve bu muhtemelen bakterilere herhangi bir zarar vermek için çok kısaydı.

İki kutuplu iyon uygulamasının antibakteriyel etkinlik üzerindeki etkisini araştırmak için, iyonlaştırıcıların düzeni Şekil 4'te gösterildiği gibi iki durum arasında değiştirildi. Her iki durumda da aynı sayıda iyonlaştırıcı kullanıldı. Bununla birlikte, iyon polaritesindeki (NCP) değişiklik sayısı Durum 2 için üç ve Durum 1 için bir idi. Her durumda, % 23'lük en yüksek cidar kaybı en düşük akış hızında (0.1 m / s) elde edilmiştir ve cidardaki kayıp hava akış hızı arttıkça kademeli olarak azaldı. Şekil 5, Durum 2'de 0.1 m / s'lik bir akış hızında APS ile ölçülen aerosol bakterilerin boyut dağılımlarını göstermektedir. İyonlaştırıcıları kullanırken toplam sayısal konsantrasyonu 24.5 # / cm^3 'ten 18.9 # / cm^3 'e düşüdü. Bununla birlikte, geometrik ortalama çaplar sırasıyla $0.909 \text{ } \mu\text{m}$ ve $0.913 \text{ } \mu\text{m}$ idi, bu da bipolar iyonların kullanımıyla bile aglomerasyon olmadığını gösterir. Bu nedenle, toplam sayısal konsantrasyonundaki azalma yalnızca cidar kayıplarından kaynaklanıyordu. Şekil 4 (b) 'de gösterilen antibakteriyel test sonuçları, hava iyonlarının test bakterisine maruz kalma süresinin azalması nedeniyle, antibakteriyel etkinliğin akış hızındaki (veya akış oranındaki) artışa göre azaldığını göstermektedir. Öte yandan, iyon polaritesindeki (NCP) değişiklik sayısının antibakteriyel etkinlik ile pozitif korelasyonlu olduğu bulundu. Durum 2'nin 0.1 m / s'lik bir akış hızındaki antibakteriyel etkinliği, Durum 1'den biraz daha yüksekti (Durum 1 için % 78 ve Durum 2 için % 85). Diğer akış hızları için, Durum 2'nin (NCP=3) verimleri, Durum 1'den (NCP=1) çok daha yüksekti.



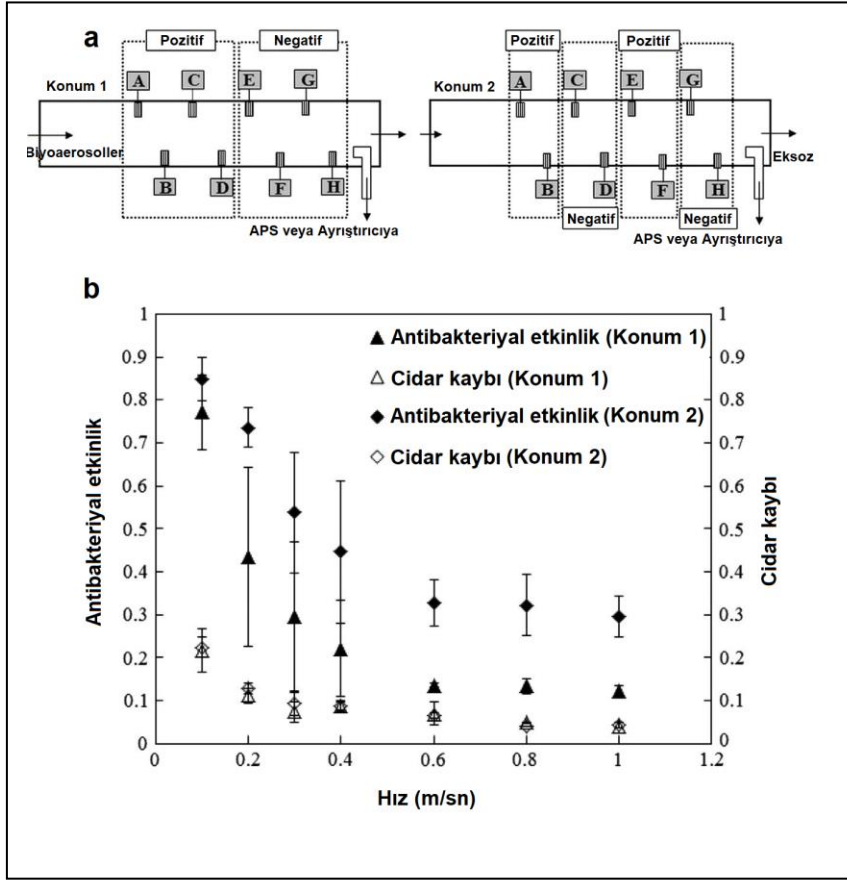
Şekil 3. Tek kutuplu iyon uygulamasıyla antibakteriyel etkinlik ve cidar kaybı. A, B, C, D ve H iyonlaştırıcılardır. Her bir hata çubuğu, dört tekrarin ortalamasından standart sapmayı gösterir. (a) Tek kutuplu iyonlaştırıcıların konumları ve (b) antibakteriyel etkinlik ve cidar kaybı..

Sonuç olarak, iyon polaritesindeki (NCP) değişiklik sayısının, 0.1 m/s ($p=0.138$) haricinde iyonların antibakteriyel etkinliğini önemli ölçüde etkilediği gösterilmiştir (bkz. Şekil 4). Veri analizi, SPSS Statistics Version 21 ile varyans analizi (ANOVA) kullanılarak yapıldı, $P<0.05$, istatistiksel olarak anlamlı kabul edildi. NCP'nin antibakteriyel etkinlik üzerindeki etkisini daha fazla araştırmak için Şekil 6 (a) 'da gösterilen konfigürasyon kullanılarak ek deneyler gerçekleştirildi. Bu deneyler için akış hızı 1 m/s olarak sabitlendi. Çeşitli test durumları Şekil 6 (b) 'de özetlenmiştir, burada [A – H], akış hızının 1 m/s olduğu Durum 2'yi (Şekil 4) temsil etmektedir. Beklendiği gibi, antibakteriyel etkinlik artan NCP ile arttı. (Pozitif) iyonlaştırıcılar A ve B kullanıldığında (tek kutuplu iyon uygulaması, $NCP=0$), verimlilik neredeyse sıfırdı. Ek (negatif) iyonlaştırıcılar C ve D'nin (iyon polaritesinde tek değişiklik, $NCP=1$ ile bipolar iyon uygulaması) kullanımıyla verimlilik yaklaşık % 12'ye yükseldi. Verimlilik ayrıca % 22'ye (iyon polaritesinde iki değişiklikle bipolar iyon işlemi, $NCP=2$), % 30'a (iyon polaritesinde üç değişiklikle, $NCP=3$) ve sonunda % 50'ye (iyon polaritesinde yedi değişiklik, $NCP=7$) yükseldi.

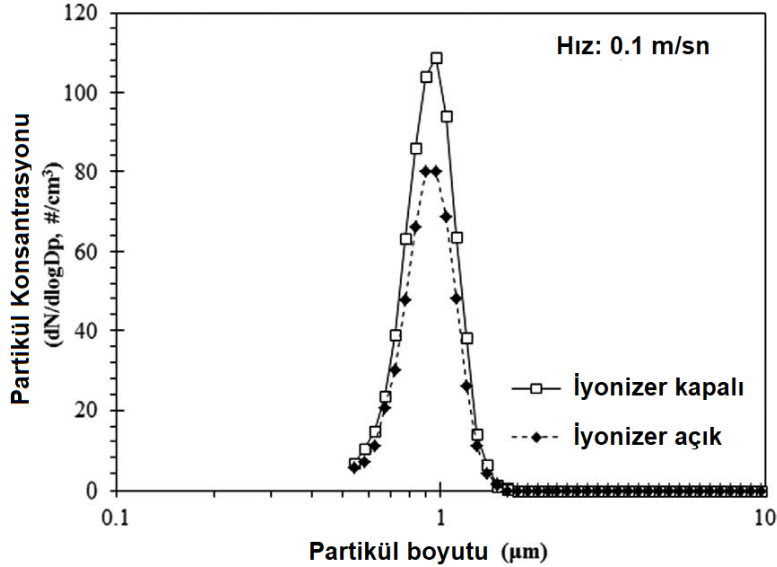
Şekil 4, iyon polaritesindeki (NCP) değişikliklerin sayısı sabit olduğunda, antibakteriyel verimliliğin artan akış hızı (veya akış hızı) ile azaldığını ve bunun sonucunda $\eta_{ion} = 1 - \exp(-k_1/Q)$ ile sonuçlandığını göstermektedir; burada Q akış oranı ve k_1 bir sabittir. Benzer şekilde, $\eta_{ion} = 1 - \exp(-k_2 NCP)$, k_2 'nin bir sabit olduğu Şekil 6'da gösterilen sonuçlardan türetilir. Kim ve ark. (2011), antibakteriyel etkinlik, N_{ion} iyon konsantrasyonu ve k_3 'ün sabit olduğu $\eta_{ion} = 1 - \exp(-k_3 N_{ion})$ sabit bir akış hızı için iyon sayısı konsantrasyonu ile artmıştır. Bu nedenle, genel olarak iyon konsantrasyonu, akış hızı ve iyon polaritesinin hava iyonlarının antibakteriyel verimliliği üzerindeki etkileri aşağıdaki denklem kullanılarak açıklanabilir:

$$\eta = 1 - \exp\left[-\frac{NCP N_{ion} k}{Q}\right] \quad (4)$$

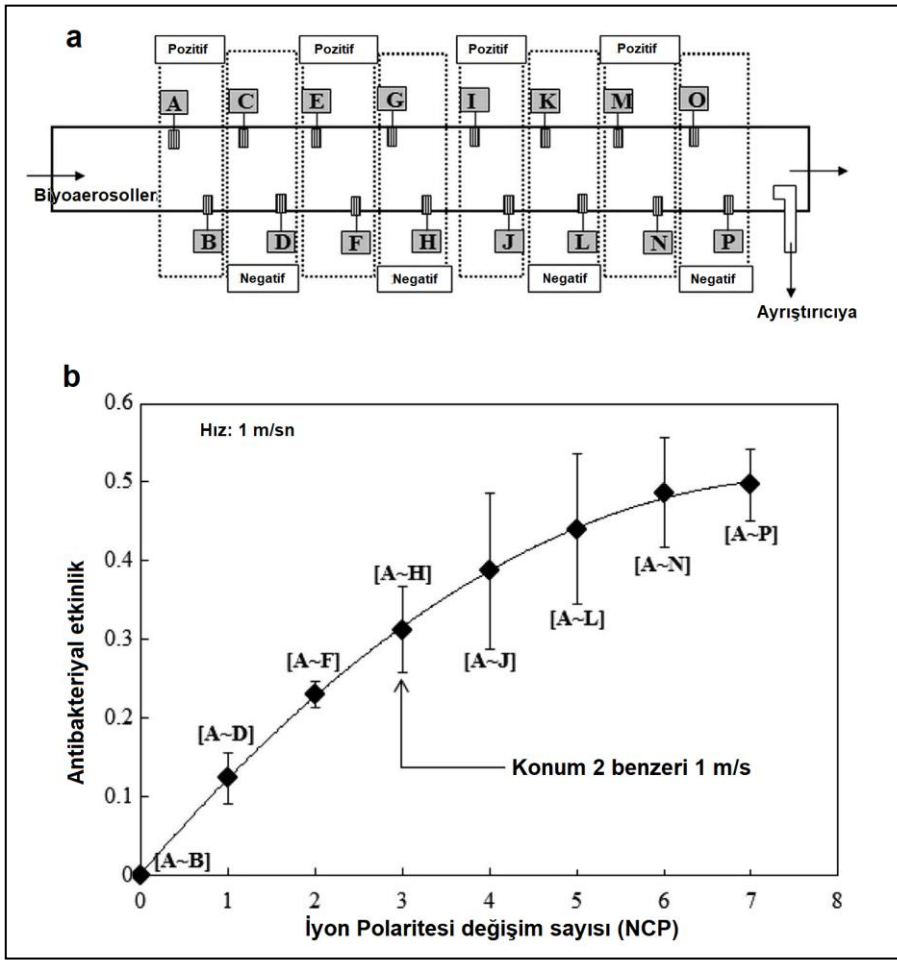
burada k (m^6/s) bir dönüşüm faktörüdür.



Şekil 4. Bipolar iyon uygulamasıyla antibakteriyel etkinlik ve cedar kaybı. A, B, C, D ve H iyonlaştırıcılardır. Her bir hata çubuğu, dört tekrarın ortalamasından standart sapmayı gösterir. (a) Bipolar iyonlaştırıcıların konumları ve (b) antibakteriyel etkinlik ve cedar kaybı.



Şekil 7, S. epidermidis'in APS ve impactor için kullanılan aynı konumda iyon işlemlili ve iyon işlemlisiz SEM görüntülerini vermektedir. İyon uygulaması olmadan ve tek kutuplu iyon işlemlisi ile örneklenen bakteriler aynı dairesel şekle sahipti. Ancak bipolar iyon uygulaması sonrası elde edilen görüntü, hücre yüzeylerinin yırtıldığını ve koptuğunu göstermektedir. Noyce vd. (2002), hücre duvarındaki çok sayıda yüklü grupla elektrostatik etkileşimlerin hücre duvarı yapısında fizyolojik bir değişikliğe neden olabileceğini açıklamıştır. Digel vd. (2005), test bakterisine negatif ve pozitif yüklü iyonlar uygulandığında, bipolar iyonların bakteriyel yüzeylere teması ve çökmesi sonrasında, pozitif iyonlar ile negatif iyonlar arasındaki kimyasal etkileşimler sonucu hücre duvarında hidroksil radikallerinin ortaya çıktığını bildirmiştir.



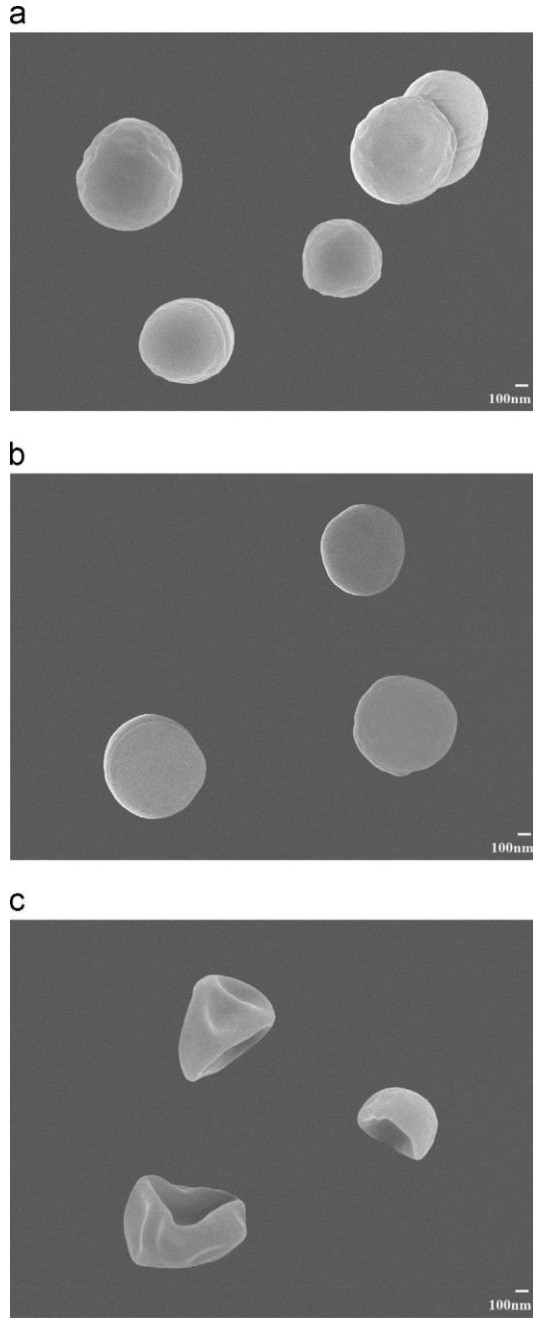
Şekil 6. İyon polaritesinin farklı sayıda değişimleri ile elde edilen antibakteriyel verimlilik. A, B, C, D ve P iyonlaştırıcılarıdır. Her bir hata çubuğu, dört tekrardan ortalamasından standart sapmayı gösterir. (a) İyonlaştırıcıların konumları ve (b) antibakteriyel etkinlik.

Bu reaksiyonların bir sonucu olarak, hidroksil radikalleri proteinlere ve lipitlere hasar verdi (Nishikawa & Nojima, 2003). Şekil 7 (c) 'de gösterilen hücre duvarlarındaki hasar ve hücre daralması, yukarıda atıfta bulunulan raporları destekler ve sonuçlarımız Kim ve ark. (2011) bulguları ile uyumludur.

Son olarak, Şekil 4 (a) 'da gösterilen Durum 1 ve 2 için ozon konsantrasyonlarını ölçtük. Ozon konsantrasyonları bir O₃ monitörü (OZ 2000G, SERES, Fransa) ile ölçüldü. Şekil 8, her durumda, ozon konsantrasyonunun 0.1 m / s'lik bir akış hızında 25 ppb'den daha düşük olduğunu ve artan akış hızı ile azaldığını göstermektedir. Park (2013), bir karbon fiber iyonlaştırıcı tarafından üretilen ozonun antibakteriyel performansını inceledi. Deneylerinde, iyonlaştırıcıdan üretilen tüm hava iyonları bir iyon tuzağı (20 V) kullanılarak elimine edildi ve iyonlaştırıcıdan 12 mm ölçülen ozon konsantrasyonu 21.8-26.0 ppb idi. Ozonun test bakterisine (*S. epidermidis*) maruz kalma süresi 180 saniyeye ayarlandı ve *S. epidermidis*'in hayatta kalma oranı 0.96 idi. Hunt & Mariñas (1999) tarafından yapılan bir çalışmada da, yaklaşık 420 ppb'lik bir ozon konsantrasyonu için 0.868'lik bir hayatta kalma fraksiyonu rapor edilmiştir; bu, çalışmamızda 0.1 m / s'lik bir yüzey hızında kullanılan ozon konsantrasyonundan yaklaşık 17 kat daha yüksektir. Bu nedenle, karbon fiber iyonlaştırıcımız tarafından üretilen ozonun hücre bozulması üzerindeki etkisinin deneysel koşullarımızda önemsiz olması beklenmektedir.

Şimdiye kadar, hava iyonu uygulamasının *S. epidermidis*'in hayatta kalma yeteneği üzerindeki etkisini tartıştık. *S. epidermidis*'e ek olarak, *Bacillus subtilis* (dayanıklı bir bakteri türü), ABD Savunma Bakanlığı ve diğer kurumlar tarafından yürütülen birçok çalışmada kullanılmıştır (Grinshpun ve diğerleri, 2004). Digel vd. (2005) *Staphylococcus* ve *Bacillus* için Plazma Kümesi İyonuna (PCI) maruz kaldıktan sonra göreceli CFU sayısının zaman süreci hakkında bir grafik gösterdi. Sonuç, aynı PCI maruziyet süresi için *Staphylococcus* CFU'sunun *Bacillus*'unkinden daha düşük olmasıydı. Bu nedenle, çalışmamızda *B. subtilis* kullanılırsa biraz farklı sonuçların alınabileceği unutulmamalıdır.

İyon sayısı konsantrasyonu yüksek olduğunda uzun süreli hava iyonunun insanlara zararlı etkileri olduğunu bildiren bazı makalelerde önemlidir (Krueger & Reed, 1976; Ryushi ve diğerleri, 1998; Sulman ve diğerleri, 1978). Negatif iyonlar serotonin seviyelerini düşürürken pozitif iyonlar serotonin seviyelerini yükseltir.

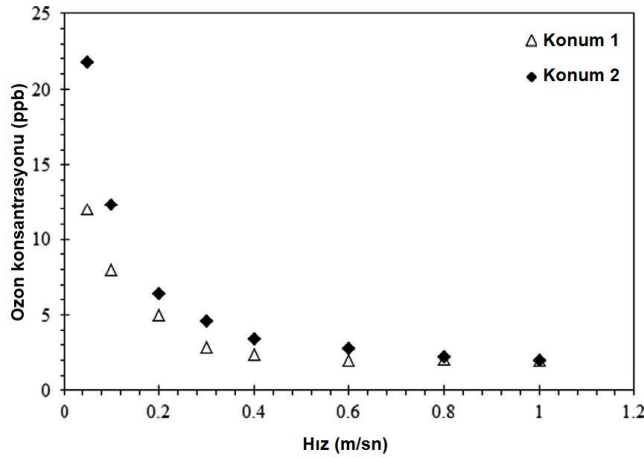


Şekil 7. *S. epidermidis*'in SEM görüntüleri. (a) İyon uygulaması olmadan, (b) tek kutuplu iyon uygulamasıyla (sekiz pozitif iyonlaştırıcı kullanılır) ve (c) bipolar iyon uygulamasıyla (Şekil 4a'daki Durum 2).

Yüksek serotonin konsantrasyonları migren baş ağrısı atakları ile ilişkilendirilmiştir. Azalan serotonin seviyeleri, zihinsel olarak rahatlamış bir duruma ve depresyon duygularında azalmaya neden olur.

4. Vargılar

Bu çalışmada, hava iyonlarının bir havalandırma kanalı akışında aerosolleşmiş bakterilere karşı tek geçişli antibakteriyel performansını artırmak için bir metodoloji sunduk. *S. epidermidis* aerosol haline getirildi, kanal akışı ile karıştırıldı ve kanalın içine yerleştirilmiş karbon fiber iyonlaştırıcılar tarafından üretilen hava iyonlarına maruz bırakıldı. Tek kutuplu hava iyonu uygulaması antibakteriyel bakış açısından etkili değildi.



Bununla birlikte, bipolar iyon uygulaması iyon polaritesindeki (NCP) değişiklik sayısı arttıkça ve akış hızı (veya akış oranı) düştükçe artan antibakteriyel etkinliği etkiledi. SEM görüntüleri kullanılarak, *S. epidermidis*'in bipolar iyon uygulamasının neden olduğu hücre daralması gözlemlendi.

Teşekkürler

Bu araştırma Kore Çevre Bakanlığı tarafından “Eko-Yenilik projesi” (402-111-005) olarak desteklenmiştir.

Referanslar

- Ahearn, D.G., Crow, S.A., Simmons, R.B., Price, D.L., Mishra, S.K., & Pierson, D.L. (1997). Fungal colonization of air filters and insulation in a multi-story office building: production of volatile organics. *Current Microbiology*, 35, 305–308.
- Batterman, S.A., & Burge, H. (1995). HVAC systems as emission sources affecting indoor air quality: a critical review. *HVAC&R Research*, 1, 61–80.
- Boelter, K.J., & Davidson, J.H. (1997). Ozone generation by indoor, electrostatic air cleaners. *Aerosol Science and Technology*, 27, 689–708.
- Brosseau, L.M., Vesley, D., Kuehn, T.H., Melson, J., & Han, H.S. (2000). Duct cleaning: a review of associated health effects and results of company and expert surveys. *ASHRAE Transactions*, 106, 180–187.
- Cadet, J., Delatour, T., Douki, Thierry, Gasparutto, Didier, Pouget, P.J., Ravanat, L.J., & Sauvaigo, S. (1999). Hydroxyl radicals and DNA base damage. *Mutation Research*, 424, 9–21.
- Cai, K., Liu, X., Xu, Y., Ren, C., Chen, H., Xu, J., & Yu, Z. (2008). Damage effects induced by electrically generated negative air ions in *Caenorhabditis elegans*. *Science of the Total Environment*, 401, 176–183.
- Castillejos, M., Gold, D.R., Dockery, D., Tosteson, T., Baum, T., & Speizer, F.E. (1992). Effects of ambient ozone on respiratory function and symptoms in Mexico City school children. *American Review of Respiratory Disease*, 145, 276–282.
- Digel, I., Artmann, A.T., Nishikawa, K., Cook, M., Kurulgan, E., & Artmann, G.M. (2005). Bactericidal effects of plasma-generated cluster ions. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 43, 800–807.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). (<http://www.epa.gov/air/criteria.html>) (accessed 23.10.2013). Fletcher, L.A., Gaunt, L.F., Beggs, C.B., Shepherd, S.J., Sleigh, P.A., Noakes, C.J., & Kerr, K.G. (2007). Bactericidal action of positive and negative ions in air. *BMC Microbiology*, 7, 32.
- Grinshpun, S.A., Adhikari, A., Lee, B.U., Trunov, M., Mainelis, G., Yermakov, M., & Reponen, T. (2004). In C.A. Brebbia (Ed.), *Air Pollution XII*. Wessex Institute of Technology, WIT Press: Southampton, pp. 689–704.
- Han, B., Kim, H.J., Kim, Y.J., & Sioutas, C. (2008). Unipolar charging of fine and ultra-fine particles using carbon fiber ionizers. *Aerosol Science and Technology*, 42, 793–800.
- Han, B., Hudda, N., Ning, Z., Kim, H.J., Kim, Y.J., & Sioutas, C. (2009). A novel bipolar charger for submicron aerosol particles using carbon fiber ionizers. *Journal of Aerosol Science*, 40, 285–294.
- Hunt, N.K., & Mariñas, B.J. (1999). Inactivation of *Escherichia coli* with ozone: chemical and inactivation kinetics. *Water Research*, 33, 2633–2641. Hwang, G.B., Jung, J.H., Jeong, T.G., & Lee, B.U. (2010). Effect of hybrid UV-thermal energy stimuli on inactivation of *S. epidermidis* and *B. subtilis* bacterial bioaerosols. *Science of the Total Environment*, 408, 5903–5909.
- Jakober, C., & Phillips, T. (2008). Evaluation of Ozone Emissions From Portable Indoor Air Cleaners: Electrostatic Precipitators and Ionizers. Staff Technical Report to the California Air Resources Board, February.
- Ji, J.H., Bae, G.N., Yun, S.H., Jung, J.H., Noh, H.S., & Kim, S.S. (2007). Evaluation of a silver nanoparticle generator using a small ceramic heater for inactivation of *S. epidermidis* bioaerosols. *Aerosol Science and Technology*, 41, 786–793.
- Jung, J.H., Lee, J.E., & Kim, S.S. (2009). Thermal effects on bacterial bioaerosols in continuous air flow. *Science of the Total Environment*, 407, 4723–4730. Kamgang, J.O., Briandet, R., Brisset, J.L., & Naitali, M. (2007). Destruction of planktonic, adherent and biofilm cells of *Staphylococcus epidermidis* using a gliding discharge in humid air. *Journal of Applied Microbiology*, 103, 621–628.
- Kemp, S.J., Kuehn, T.H., Pui, D.Y.H., Vesley, D., & Streifel, A.J. (1995). Growth of microorganisms on HVAC filters under controlled temperature and humidity conditions. *ASHRAE Transactions*, 101, 305–316.
- Kim, Y.S., Yoon, K.Y., Park, J.H., & Hwang, J.H. (2011). Application of air ions for bacterial de-colonization in air filters contaminated by aerosolized bacteria. *Science of the Total Environment*, 409, 748–755.
- Krueger, A.P., & Reed, E.J. (1976). Biological impact of small air ions. *Science*, 193, 1209–1212.
- Main, C.E. (2003). Aerobiological, ecological, and health linkages. *Environment international*, 29, 247–249.
- Mainelis, G., G⁰orny, R.L., Reponen, T., Trunov, M., Grinshpun, S.A., Yadav, J., Baron, P.A., & Willeke, K. (2002). Effect of electrical charges and fields on injury and viability of airborne bacteria. *Biotechnology and Bioengineering*, 79, 229–241.
- Maus, R., Goppelsröder, A., & Umhauer, H. (2001). Survival of bacterial and mold spores in air filter media. *Atmospheric Environment*, 35, 105–113.

- Mendis, D.A., Rosenberg, M., & Azam, F. (2000). A note on the possible electrostatic disruption of bacteria. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28, 1304–1306.
- Möritz, M., Peters, H., Nipko, B., & Rüdén, H. (2001). Capability of air filters to retain airborne bacteria and molds in heating, ventilating and air-conditioning (HVAC) systems. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 203, 401–409.
- Nishikawa, K., & Nojima, H. (2003). Airborne virus inactivation technology using cluster ions generated by discharge plasma. *Sharp Technical Journal*, 86, 10–15.
- Noris, F., Siegel, J.A., & Kinney, K.A. (2011). Evaluation of HVAC filters as a sampling mechanism for indoor microbial communities. *Atmospheric Environment*, 45, 338–346.
- Noyce, J.O., & Hughes, J.F. (2002). Bactericidal effects of negative and positive ions generated in nitrogen on *Escherichia coli*. *Journal of Electrostatics*, 54, 179–187.
- Noyce, J.O., & Hughes, J.F. (2003). Bactericidal effects of negative and positive ions generated in nitrogen on starved *Pseudomonas veronii*. *Journal of Electrostatics*, 57, 49–58.
- Park, C.W. (2013). Control and Monitoring of Air Contaminants Using Optical and Electrical Methods. Mechanical Engineering of Yonsei University: Republic of Korea (Ph.D. thesis).
- Park, J.H., Yoon, K.Y., Kim, Y.S., Byeon, J.H., & Hwang, J. (2009). Removal of submicron aerosol particles and bioaerosols using carbon fiber ionizer assisted fiber ionizer assisted fibrous medium filter media. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 23, 1846–1851.
- Park, J.H., Yoon, K.Y., Noh, K.C., Byeon, J.H., & Hwang, J. (2010). Removal of PM_{2.5} entering through the ventilation duct in an automobile using a carbon fiber ionizer-assisted cabin air filter. *Journal of Aerosol Science*, 41, 935–943.
- Ryushi, T., Kita, I., Sakurai, T., Yasumatsu, M., Isokawa, M., Aihara, Y., & Hama, K. (1998). The effect of exposure to negative air ions on the recovery of physiological responses after moderate endurance exercise. *International Journal of Biometeorology*, 41, 132–136.
- Shargawi, J.M., Theaker, E.D., Drucker, D.B., MacFarlane, T., & Duxbury, A.J. (1999). Sensitivity of *Candida albicans* to negative air ion streams. *Journal of Applied Microbiology*, 87, 889–897.
- Sigmond, R.S. (1982). Simple approximate treatment of unipolar space-charge-dominated coronas: the Warburg Law and saturation current. *Journal of Applied Physics*, 53, 891–898.
- Simmons, R.B., & Crow, S.A. (1995). Fungal colonization of air filters for use in heating, ventilating, and air conditioning (HVAC) systems. *Journal of Industrial Microbiology*, 14, 41–45.
- Sulman, F.G., Levy, D., Lunkan, L., Pfeifer, Y., & Tal, E. (1978). Absence of harmful effects of protracted negative air ionisation. *International Journal of Biometeorology*, 22, 53–58.
- Weschler, C.J. (2000). Ozone in indoor environments: concentration and chemistry. *Indoor Air*, 10, 269–288.
- Xu, Z., Wu, Y., Shen, F., Chen, Q., Tan, M., & Maosheng, Y. (2011). Bioaerosol science, technology, and engineering: past, present, and future. *Aerosol Science and Technology*, 45, 1337–1349.
- Zuraimi, M.S. (2010). Is ventilation duct cleaning useful? A review of the scientific evidence. *Indoor Air*, 20, 445–457.