

İklimlendirme Sistemlerinde İç Hava Kalitesi İçin Havanın Filtrelenmesi

Numan HODA

ÖZET

İç hava kalitesini arttırmak için kullanılan yöntemler; dış havadan içeriye gelen havanın filtre edilmesi, kirletici kaynağının olduğu bölümü ayırma, kirletici üretmeyen veya az üreten malzemelerin kullanılması, kullanılan filtrelerin sık değiştirilmesi, iklimlendirme sistemlerinde bakteri üremesini ve yayılmasını önlemek için kondense suyun uzaklaştırılması sayılabilir. İç havada bulunan kirleticilerin uzaklaştırılması; iç hava kirleticilerinin kaynağının yok edilmesi veya azaltılması mümkün olmadığında uygulanan işlemlerdir. En önemli uzaklaştırma metotları; filtrasyon, adsorpsiyon, fotokatalitik oksidasyon, negatif hava iyonları ve termal olmayan plazma uygulamasıdır. İç hava temizlenmesinde kullanılan ekonomik ve etkili metotlardan birisi filtrasyondur. İklimlendirme sistemlerinde filtreler önemli bir komponenttir. Filtreler iç havada bulunan ozon ve bakterileri önemli bir oranda azaltmaktadır. İklimlendirme sistemlerinde iç havada bulunan düşük konsantrasyonlu gaz bileşiklerin uzaklaştırılmasında adsorpsiyon işlemi kullanılır. Kullanılan en yaygın adsorban aktif karbondur. Fotokatalitik oksidasyon yöntemi iç hava temizlemesinde umut veren bir yöntemdir. Bu yöntemde kullanılan fotokatalizörler iç havada bulunan birçok kirleticileri CO_2 ve H_2O gibi çok küçük moleküllere kadar parçalayabilmektedir. Negatif hava iyonları iç havayı temizlemek için kullanılan diğer bir yöntemdir. Negatif hava iyonları iç havada bulunan aerosoller, mikropları, kokuları ve uçucu organik bileşikler uzaklaştırabilir. Termal olmayan plazma reaktörleri düzensiz ve değişken şekilde çalışırlar ve verimlilikleri düşüktür.

Anahtar Kelimeler: İç Hava Kalitesi, İklimlendirme Sistemleri, Filtrasyon, Uçucu Organik Bileşikler, Aktif Karbon, Fotokatalitik Oksidasyon, Negatif Hava İyonları, Termal Olmayan Plazma.

1. İKLİMLERDİRME SİSTEMLERİ

İklimlendirme, (air conditioning) bir bina içerisinde istenen atmosferik koşulları oluşturmak için içerideki havayı veya içeriye verilen havayı ısıtma-soğutma ve nem oranını ayarlama işlemlerinin tümü olarak tanımlanabilir [1]. İklimlendirme sistemleri aynı zamanda sıcaklığın aynı seviyede kalmasını sağlarken, hava hareketini, havanın temizliğini, ses seviyesini ve basınç farkını kontrol altında tutan

Abstract:

The methods that are used to improve indoor air quality (IAQ) are filtration of outdoor air as being pulled indoor, and separation of pollution sources, using materials that do not emit (or emit less) pollution. It is also important to change filters frequently and remove condensed water in air conditioning systems to prevent fungal and bacterial contamination and growth. A process to remove the pollutants in indoor environments is applied when it is not possible to eliminate the pollution sources. The most important methods used in air conditioning systems to remove pollutants in indoor environments are filtration, adsorption, photocatalytic oxidation, negative air ions and non-thermal plasma. Of these methods, filtration is highly effective and economical in removing pollutants. Filters can decrease ozone and bacteria level in indoor air by higher percentages. When the gaseous pollutants are in low concentrations, to remove them adsorption process is applied. The most common adsorbent used in adsorption processes is activated carbon. Photocatalytic oxidation is a promising method in cleaning indoor air. The catalysts used in this method can degrade pollutants to small molecules such as H_2O and CO_2 . The other method to clean indoor air is negative air ions, which can degrade aerosols, bacteria, odors and volatile organic compounds existing in indoor air. Non-thermal plasma operates unsteadily and its efficiency is low.

Key Words:

Indoor Air Quality, Air Conditioning Systems, Filtration, Volatile Organic Compounds, Activated Carbon, PhotoCatalytic Oxidation, Negative Air Ions, Non-Thermal Plasma.

Makale

sistemlerdir. Sistem yukarıdaki her bir parametreyi sağlayan sıralı ekipmanlardan oluşur. Birçok iklimlendirme sistemi aşağıdaki fonksiyonları gerçekleştirir;

1. Isıtma ve soğutma için gereken enerjiyi sağlar.
2. Sistemden geçen havayı, soğutarak, ısıtarak, nemlendirerek, kurutarak, temizleyerek, saflaştırarak ve gürültüyü azaltarak sağlar,
3. Yeterli dış havayı alarak şartlanmış havayı iç mekana dağıtır.
4. İç çevre parametrelerini sağlar ve kontrol eder (sıcaklık, nem, hava hareketi, ses seviyesi, temizlik, basınç farkı, CO₂ vb).

İklimlendirme sistemleri uygulama alanlarına göre iki sınıfa ayrılırlar; (1) konfor iklimlendirme sistemleri, (2) proses (endüstriyel) iklimlendirme sistemleri [2]. Konfor iklimlendirme sistemleri iç mekanda yaşayanlara iç hava kalitesi açısından konforlu ve sağlıklı yaşam şartları sağlayan sistemlerdir. Birçok sektörde bu sistemler kullanılmaktadır. Örneğin ofisler, süpermarketler, alışveriş merkezleri, restoranlar gibi ticari alanda faaliyet gösteren kuruluşlar, okullar, üniversiteler, kütüphaneler, kapalı spor salonları, sinemalar, tiyatrolar, müzeler gibi kamu sektöründe kullanılan kuruluşlar, konaklama sektöründe faaliyet gösteren oteller, moteller, pansiyonlar, sağlık sektöründe faaliyet gösteren hastaneler, sağlık ocakları, bakım ve huzur evleri, seyahat sektöründe kullanılan uçaklar, otobüsler, trenler, otomobiller ve gemilerde iç mekanlar konfor iklimlendirme sistemleri ile şartlanmaktadır. Sağlık sektöründe kullanılan filtreler ise özellikle önem taşımaktadır.

Proses iklimlendirme sistemleri üretim, depolama ve diğer araştırma geliştirme mekanlarında iç havanın şartlanmasında kullanılan sistemlerdir. Birçok elektronik aygıt üretimi için temiz oda gereklidir. Temiz odaların şartlanması işlemlerinde proses iklimlendirme sistemleri kullanılır. Bunun yanında ilaç ve kozmetik üretim işlemlerinde kullanılan mekanların şartlanması da proses iklimlendirme sistemleri ile yapılmaktadır.

2. İKLİMLENDİRME SİSTEMLERİNDE İÇ HAVA KALİTESİ KONTROLÜ

İç hava kalitesini arttırmanın en etkili ve ekonomik yolu kirletici kaynağını azaltmak ya da yok etmektir. Yok etmeden kasıt iç mekanda bulunan ve kirlilik yaratan eşyaların veya malzemelerin kirlilik yaratmayanlarla yer değiştirilmesidir ki, bu genellikle yapılamadığından azaltma kullanılan en yaygın yöntemdir. İç hava kalitesini arttırmak için kullanılan genel yöntemler;

- Dış havadan içeriye gelen havanın filtre edilmesi,
 - Kirletici kaynağının olduğu bölümü ayırma,
 - Kirletici üretmeyen veya az üreten malzemelerin kullanılması,
 - Kullanılan filtrelerin sık değiştirilmesi,
 - İklimlendirme sistemlerinde bakteri üremesini ve yayılmasını önlemek için kondense suyun uzaklaştırılması,
- olarak sayılabilir.

İç havada bulunan kirleticilerin uzaklaştırılması, iç hava kirleticileri kaynağının yok edilmesi mümkün olmadığında uygulanan işlemlerdir. En önemli uzaklaştırma metotları; filtrasyon, adsorpsiyon, fotokatalitik oksidasyon, negatif hava iyonları ve termal olmayan plazma uygulamasıdır [3].

İç hava kalitesinin arttırılması için yukarıda kullanılan yöntemler sadece iç havayı döngü içerisine alarak, temizleyip tekrar içeriye vermeyi içermemektedir. Ayrıca dış havanın da alınıp içeriye verilirken temizlenmesi gereklidir. İklimlendirme sistemlerinde bulunan tesis bileşenlerinden içeriye mikroorganizmaların yayıldığı kanıtlanmıştır [4]. Dolayısıyla filtre sistemlerinin dışında iklimlendirme sisteminde bulunan komponentlerin bakımı da önemlidir.

3. FİLTRASYON

İç havada bulunan partiküllerin kaynağı iç havaya verilen dış hava ve iç mekanda bulunan; sigara, ocak, fırın, ofis ekipmanları, kimyasal reaksiyonlar vb. yanında evcil hayvanlar, mantarlar, toz akarları ve insanlardır. İç hava temizlenmesinde kullanılan

ekonomik ve etkili metotlardan birisi filtrasyondur. İklimlendirme sistemlerinde de filtreler önemli bir komponenttir. Partikül filtreleri havada bulunan partikülleri tutmak için kullanılır. Bu tür filtreler iç havada tozları, katı veya sıvı kirleticilerin gaz ortamı içerisinde dağılması olarak bilinen aerosolleri ve bakterileri önemli bir oranda azaltmaktadırlar. Tozlar havada bulunan gazların birleşmesi sonucu da oluşabilmektedir. Ayrıca havada bulunan UOB'ler partiküller üzerine absorbe olarak solunum sistemine partiküller ile beraber girmektedirler [5]. Partiküller ile ilgili iç hava kalitesi açısından başka bir önemli problem ise, partiküllerin ozon ile reaksiyona girerek organik bileşikler ve radikaller üretmesidir [6]. Dolayısıyla, partiküller sadece kendilerinden oluşan sağlık problemlerinin dışında da farklı etkileşimleriyle daha fazla sağlık problemlerine neden olmaktadır.

2013 yılında Fisk, partikül filtrasyonunun sağlık üzerine faydaları hakkında, daha önce de bu konuda yayınlanan derlemeleri de göz önüne alarak geniş bir derlemede bulunmuştur [7]. Bu çalışmaya göre partikül solunmasıyla ortaya çıkan sağlık sorunlarının (özellikle alerji ve astım) %7-25'i partikül filtresi kullanımıyla azaltılmıştır. Sonuç olarak Fisk, çalışmasında dört çıkarımda bulunmuştur:

- Özellikle evcil hayvan bulunan evlerde partikül filtrasyonu ile astım ve alerji gibi sağlık sorunlarında az miktarda azalma olmuştur.
- Alerjik veya astımlı kişilerin uyuduğu bölgeye filtrelenmiş hava üfleyen partikül filtre sistemleri, oda veya ev filtrasyon sistemlerinden sağlık açısından daha etkili olabilir.
- Birkaç çalışma partikül filtrasyon sistemlerinin alerji ve astım dışındaki akut sağlık problemleri üzerinde etkisiz olduğunu belirtmektedir.
- Partikül filtrasyon sistemlerinin belki de en büyük yararı dış havadan gelen partiküller sonucu oluşan hastalık ve ölüme azalma sağlamasıdır.

İklimlendirme sistemlerinde bulunan filtrelerin ortamda bulunan ozonu azalttığı birkaç çalışmada rapor edilmiştir [8-11]. Ozonun iç havadan alınması

iç hava kalitesi açısından önemlidir. Fakat ozon filtreleri üzerinde biriken partiküller ile yukarıda da bahsedildiği gibi kimyasal reaksiyona girmekte ve istenmeyen formaldehit, formik asit, radikaller gibi sağlığa zararlı bileşikler oluşturmaktadır [8, 11]. Bunun yanında partikül filtrasyonu ile hava bulunan bakteriler, mantarlar ve toz akarları tutularak temizlenmektedir. Burada ise farklı bir sorunla karşılaşmakta, kullanılan filtrelerin üzerinde mikrobiyal birikme ve büyüme olmaktadır. Filtrelerin antimikrobiyal yapılmasıyla da bu sorun tamamıyla çözümlenebileceği kısmen aşılabilir.

4. ADSORPSİYON

İklimlendirme sistemlerinde iç havada bulunan düşük konsantrasyonlu inorganik ya da organik gazların uzaklaştırılmasında adsorpsiyon işlemi kullanılır. UOB'ler sağlık problemlerine yol açan önemli iç hava kirleticileridir. UOB'lere maruziyet hem akut hem de kronik sağlık problemlerine yol açmaktadır. UOB'leri uzaklaştırmak için dört farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlar, adsorpsiyon filtreleri, ozon üreteçleri, iyonlaştırıcılar ve HEPA filtrelerdir. İklimlendirme sistemlerinde genellikle adsorpsiyon filtreleri kullanılmaktadır. Filtrelerde kullanılan adsorbanlar genellikle, aktif karbon, zeolit, aktif alumina, silika jel ve moleküler eleklerdir. İç hava temizlenmesi işlemlerinde en çok tercih edilen ve kullanılan yüksek adsorpsiyon kapasitesi ve yüzey alanına sahip olması nedeniyle aktif karbonlardır. Aktif karbonlar genel olarak üç formda bulunurlar; toz, granül ve fiber/kumaş formları.

Aktif karbon fiber/kumaşları (AKK) diğer formlara göre avantajlara sahiptirler. Örneğin, AKK'nın kinetik adsorplama hızı granüler aktif karbona göre 5-10 kat daha fazla olarak tespit edilmiştir [12]. Balanay vd. [13] toluen adsorpsiyonunu hem AKK için hem de granüler aktif karbon için denemiler ve AKK'nın daha az kalınlıkta olmasına rağmen daha kalın olan granüler aktif karbondan daha iyi performans gösterdiğini belirterek, havalandırma sistemleri için AKK'nın daha iyi performans göstereceğini öngörmüşlerdir. Daha kritik bir bulgu Cal vd. [14] tarafından gerçekleştirilmiştir. Buna göre AKK %50 nisbi

Makale

nem oranında bile performansından bir şey kaybetmeyerek adsorplamaya devam etmektedir. Sonuç olarak iç hava kalitesinin artırılması açısından gaz adsorpsiyon işlemlerinde AKK kullanımı en uygun yöntem olarak gözükmektedir. 2014 yılında aktif karbon liflerinin taşınabilir iç hava temizleme cihazlarında kullanılabilirliği ile ilgili çalışma Jo ve Chun tarafından yayınlanmıştır [15]. Çalışmaya göre nem oranı %20'den %90'a çıkartıldığında aktif karbon liflerinin doyuma ulaşma zamanları da benzer için 11 saatten 3 saate, toluene için 17 saatten 8 saate, etil benzene için 52 saatten 17 saate ve ksilen için 54 saatten 27 saate düşmektedir. Ayrıca buna paralel olarak kullanılan kimyasalların adsorpsiyon kapasitesi nem oranı arttıkça azalmaktadır. Hava akış hızı 1'den 7 L/dak'ya çıkartıldığında benzenin adsorpsiyon kapasitesi 55'ten 3,1 mg/g'a ve toluenin adsorpsiyon kapasitesi ise 308'den 36 mg/g'a düşmektedir. Ozon eser miktarda olsa bile akut ve kronik etkilere sahiptir. İç mekanlarda bulunan ozonun ana kaynağı içeriye alınan dış havadır. Bunun yanında iç mekanlarda bulunan fotokopi makineleri, lazer yazıcılar ve ozonlu hava temizleme cihazları da ozon kaynaklarıdır. Ozon çok reaktif bir ajan olması nedeniyle iç mekan yüzeyleri ile çok çabuk reaksiyona girmekte ve yeni kimyasal ürünler oluşturarak iç hava kirlenmesine neden olmaktadır. Bunun yanında ozon iç mekanda bulunan gazlar ve tozlar ile de reaksiyona girerek yine yeni kimyasal ürünler ve radikaller oluşturmaktadır. Aktif karbon filtreler ozon uzaklaştırmada oldukça etkindir. Fakat ozon olan yerler aktif karbon filtreler uzun süreli kullanılamazlar. Çünkü ozon aktif karbon ile de kimyasal reaksiyona girerek aktif karbonun kimyasal ve fiziksel yapısında bozulmalara yol açar.

5. FOTOKATALİTİK OKSİDASYON

Fotokatalitik oksidasyon yöntemi iç hava temizlemede umut veren bir yöntemdir. Bu yöntemde kullanılan fotokatalizörler iç havada bulunan alkanlar, alkenler, alkoller, aromatikler, klorlu hidrokarbonlar, aldehitler ve ketonlar gibi birçok uçucu organik bileşikler CO_2 ve H_2O gibi çok küçük moleküllere kadar parçalayabilmektedir [16-20]. Üstelik fotokatalizör reaktörlerinin biyolojik kontaminas-

yonları da parçaladığı birçok çalışma ile kanıtlanmıştır [21-23]. Katalitik oksidasyonda kullanılan katalizörler yüksek sıcaklıkta (termal katalizörler) veya normal sıcaklıkta (termal olmayan katalizörler) uçucu organik bileşikler parçalayabilir. İklimlendirme sistemlerinde termal olmayan katalizörler kullanılmasından dolayı sadece termal olmayan katalizörlerden bahsedilecektir.

En yaygın fotokatalizörler metallerin oksitleri ya da sülfidleridir. Örneğin en bilinenleri TiO_2 , SnO_2 , ZnO , CdS , Fe_2O_3 , WO_3 , MnO_2 , ZnS ve CdS gibi yarı iletkenlerden ve UV ışınından oluşmaktadır [24]. En popüler olanları ise TiO_2 ve ZnO 'dir. Çok sayıda metal oksitin fotokatalitik aktivitesinin gaz fazındaki etkinliğin araştırıldığı bir çalışmada hidrokarbonların parçalanmasında etkinlik sırasının TiO_2 (anataz) > ZnO > WO_3 olduğu rapor edilmiştir [25]. Fotokatalizörlerin yarı iletkenlerle veya V, Cr, Fe, Co, Cu gibi geçiş metalleri ile katkılanması görünür bölge ışınlarının absorplanma aralığını arttırmaktadır [26]. Örneğin Bosc vd. [27] yaptığı bir çalışmaya göre mezoporlu anataz TiO_2 'nin WO_3 ile katkılanmasıyla toluen bozunmasında fotokatalitik etki hem UV hem de görünür bölgede artmıştır.

Fotokatalizör ile bozunma mekanizmasında fotokatalizörde bulunan değerlik elektronlarından birisi yerinde bir pozitif boşluk bırakarak ışın ile iletkenlik bandına çıkar [28]. İletkenlik bandına çıkan elektronlar ve geride bıraktıkları pozitif boşluklar fotokatalizör yüzeyine adsorbe olmuş bileşikler ile oksidasyon ve indirgeme reaksiyonuna girerler [29]. Fotokatalizör reaktörlerin verimliliğinde ve etkinliğinde reaksiyon hızı önemli bir parametredir. Reaksiyon hızını nem, ışın kaynağı, giren kirlenici konsantrasyonu, fotokatalizörün özellikleri ve reaktörün türü etkilemektedir [3]. Fotokatalizör yüzeyinde adsorbe olmuş su molekülleri yüzeyde bulunan elektron boşluğu ile tepkimeye girerek $-OH$ gibi hidroksil grupları oluştururlar ve bu ürünler kirlenici moleküllerini okside ederler. Fotokatalitik oksidasyon reaksiyonunun hidroksil radikallerinin üretimine bağlı olduğu belirtilmektedir [28, 30]. Su buharı olmadığında fotokatalitik bozunma yavaşlamaktadır

[31-34]. Fakat aynı zamanda fazla su buharı olduğunda ise su buharlar yüzey üzerindeki aktif merkezleri kapatmasından dolayı yine fotokatalizör yüzeyinde bozunma hızında yavaşlama gerçekleşmektedir [35]. Bu durum su molekülleri ile kirletici moleküllerinin katalizör yüzeyine yarışmalı adsorpsiyonundan kaynaklanmaktadır. Kısa dalgaboyuna sahip ışınların daha fazla enerjiye sahip olmaları demek daha fazla fotokatalitik etkiye ya da hıza sahip olmaları anlamına gelmemektedir. $TiO_2/O_3/UV$ kullanıldığında 365 nm'de toluenin bozunması 254 nm'den daha fazla olmaktadır [26]. Trikloro etilenin bozunma reaksiyonunda 315-400 nm'deki UV ışınları 200-300 nm'deki UV ışınlarından daha etkili olmaktadır. Teorik olarak, ışık şiddeti fazla olduğunda daha fazla foton üretilecektir ve reaksiyon hızı artacaktır. Fakat ışık şiddeti arttığında fotonların kullanım hızı azalmaktadır bunun yanında elektron boşluk çiftlerinin yeniden birleşme hızı artmaktadır. Farklı kirletici konsantrasyonları farklı reaksiyon hızlarına neden olmaktadır. Belli bir konsantrasyon aralığında reaksiyon hızı konsantrasyon arttıkça artmaktadır. Fakat reaksiyon hızı kirletici konsantrasyonu belli bir seviyeye kadar artınca azalmaya başlamaktadır [36-38].

Fotokatalizörlerin iç hava temizlenmesinde verimleri düşüktür ve artırılması için yeni çalışmaların yapılması gereklidir. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmektedir [3];

- Fotokatalitik oksidasyon reaksiyon oranı ve verimi düşüktür. Şu anda kullanılan fotokatalizörlerin geliştirilmesi ve yeni tip katalizlerin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Fotokataliz süreci sırasındaki ara ürünler insan sağlığına çok zararlıdır, yani bozunma oranları daha iyi geliştirilmelidir.
- Optimum reaksiyon koşullarını bulmak ve yüksek verimle fotokatalitik oksidasyon reaktörlerini geliştirmek için reaksiyon mekanizmasını daha iyi incelemek gerekmektedir.
- Kapalı ortamdaki kirleticilerin bileşimi oldukça komplekstir ve konsantrasyonları çok farklıdır. Fakat fotokatalitik oksidasyon ile yapılan yeni araştırmalarda, kapalı ortamdaki kirleticilerin bir

veya birkaçının uzaklaştırılması üzerinde durulmaktadır. Gelecek araştırmalarda, kapalı alan koşulları altında fotokatalitik oksidasyon ile tüm kirleticilerin bozunmaları incelenebilir.

6. NEGATİF HAVA İYONLARI (NHİ)

Negatif hava iyonları (NHİ) çok kuvvetli oksitleyicilerdir ve korona deşarj, damla kırılımı ve radyasyonla üretilirler. NHİ'nin yaklaşık ömrü 100 s'dir ve ömrü nem, sıcaklık ve diğer faktörlere bağlıdır [39, 40]. Süperoksit (O_2^-) NHİ'nin ana bileşenidir. Konrashova vd. [41] süperoksitin bakteri parçalanmasında etkili bir ajan olduğunu kanıtlamışlardır. Diğer bileşenler O^- , OH^- , NO_2^- , NO_3^- , O_3^- , CO_3^- ve HCO_3^- 'dir [42-46]. Bu iyonların havada bulunan bileşikler ile reaksiyonu sonucu yukarıda bahsedilen iyonların yanında $O_2^-(H_2O)_n$, $OH^-(H_2O)_n$, $HCO_3^-(HNO_3)_n$, $NO_3^-(HNO_3)_n$, ürünleri oluşabilir. Üretilen NHİ'nin konsantrasyonu ve türü hava kompozisyonuna (nem vs.) ve uygulanan deşarj derecesine bağlıdır. Örneğin, eğer havada ozon ve nitrik oksit bulunuyorsa korona deşarj uygulandığında NO_3^- iyonları oluşmaktadır. Nagato vd. [47] havada bulunan nem miktarının üretilen NHİ üzerine etkilerini incelemişler ve NO_2^- , CO_3^- , NO_3^- , $HCO_3^-(HNO_3)$ ve $NO_3^-(HNO_3)$ iyonlarının oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Bunun yanında nem oranı düşürüldüğünde oluşan ürünün sadece NO_3^- olduğunu belirtmektedirler. Nem bulunan havada, O_2^- , hidrojen peroksit üretebilir [48] ve bağıl nem miktarı arttıkça H_2O_2 konsantrasyonu artmaktadır [49]. Sekimoto ve Takayama [50] deşarj gücünün üretilen NHİ üzerine etkilerini inceledikleri çalışmada düşük deşarjda en fazla OH^- iyonlarının oluştuğunu, deşarj gücü arttırıldığında ise NO_2^- , CO_3^- , CO_4^- , HNO_3^- ve NO_3^- iyonlarını gözlemlendiği sonucuna varmışlardır.

NHİ iç havada bulunan kirleticilerin uzaklaştırılmasında kullanılan yaygın bir yöntemdir. Daniels [39] NHİ havada bulunan kokuların, partiküllerin; bakterilerin ve UOB'lerin uzaklaştırılmasında kullanıldığını belirtmektedir. NHİ havada bulunan pozitif yüklü tozlara ve alerjenlere yapışarak onların ağırlığını ve yüklerini değiştirirler. Sonuç olarak yeterince ağırlığı artan partikül yerçekimiyle yere düşerek biri-

Makale

kir. Havada kalan ama yüklü partiküller ise oda içerisinde bulunan yüzeylerde birikirler. Çünkü odada bulunan yüzeylerin ve duvarların yükleri genelde pozitifdir [51, 53]. Partiküllerin göç (birikme) hızı partikül boyutuna, partikül yük miktarına ve elektriksel alan yoğunluğuna bağlıdır. Lee ve diğerleri [51, 52] elektro-göç hızı ve partiküllerinin uzaklaştırma verimi NHİ'nin yayılma hızının artması ile arttığını göstermiştir. Eğer NHİ'nin konsantrasyonu çok yüksek olursa, özellikle duvar malzemesi düşük iletkenliğe sahip olan duvarlarda yüklü partiküllerin birikmesini engelleyen elektrostatik perdeleme oluşmaktadır. Khan vd. [54] negatif iyon jeneratörü ile sigara dumanının 0,5 m³ kapalı alan içerisinde uzaklaştırılmasını çalıştıkları çalışmada, sigara dumanının uzaklaştırılma hızında 6 kat artma gözlemlemişlerdir. Başka bir çalışmada NHİ jeneratörü ile partikül uzaklaştırma verimliliği ile yükseklik arasında ilişki çalışılmış ve verimin jeneratöre yakın olan yerlerde yüksek olduğu, ayrıca en yüksek verimin tabandan yüksekliğin 60 cm olan yerlerde en yüksek, yükseklik arttıkça verimin azaldığı bulunmuştur [55].

Arnold vd. [56] negatif iyonlaştırıcının *Campylobacter jejuni*, *Esterichia coli*, *Salmonella enteritidis*, *Listeria monocytogenes* *Staphylococcus* bakterilerinin %99,9'unu öldürdüğünü rapor etmişlerdir. Aynı zamanda negatif hava iyonlaştırıcının 13 m²'lik bir oda içerisinde bulunan *Bacillus stearothermophilus*'u 3 saat içerisinde %99,8'ini elimine ettiği de belirtilmektedir. Tyagi ve Malik'in 2010 yılında yayınladıkları çalışmada 93,75 L kap içerisinde bulunan *Pseudomonas fluoresen*'leri negatif hava iyonlaştırıcının ilk 4 saat içerisinde %45,5, 12 saat sonunda da %58,6 elimine ettiğini belirtmektedirler [57].

NHİ havada kirletici olarak bulunan UOB'lerin uzaklaştırılmasında da kullanılan etkin bir araçtır [39, 58, 59]. UOB ile NHİ arasındaki reaksiyonlar yavaş ve karmaşıktır ve H₂O ve H₂O₂ içeren radikal zincir reaksiyonlarını içermektedir [3]. Reaksiyon hızı bağıl nem oranı arttıkça azalmaktadır. Bunun nedeni bağıl nem ortamda arttıkça göreceli olarak O₂ miktarı azalacaktır. Çünkü O₂ ve H₂O arasında O₂(H₂O) kümeleri oluşmaktadır bu da O₂ konsant-

rasyonu azaltmakta ve dolayısıyla NHİ konsantrasyonu da azalmaktadır.

Yukarıda bahsedilen NHİ'nin yanında NHİ üretilirken toksik bir gaz olan ozon da üretilmektedir. 100 ppb ozon kısa süreli maruziyette bile akciğer sorunlarına yol açabilmektedir [60-61] uzun süreli maruziyette ise geri dönüşümsüz akciğer yıkımına ve kanserine yol açabilmektedir [62, 63]. Amerikan Gıda ve İlaç Kurulu (FDA) Yönetmeliği'ne göre hava temizleyici cihazlarla üretilen ozon seviyesi 50 ppb'nin altında olmak zorundadır.

NHİ'nin iç hava temizlenmesinde kullanıldığında bazı dezavantajlara sahip olduğu görülmektedir. Bunlardan bir tanesi duvar ve malzeme yüzeyine biriken partiküllerin tekrar yayılmasıdır. Bunun yanında kirleticilerin uzaklaştırılmasındaki düşük verimi, zararlı yeni ürünleri oluşturması diğer dezavantajlarıdır. NHİ'nin geliştirilmesi için yeni çalışmalar ve kombine sistemlere ihtiyaç vardır.

7. TERMAL OLMAYAN PLAZMA (TOP)

Termal olmayan plazma (TOP) korona deşarjı, puls korona deşarjı (PKD), mikrodalga, radyo frekansı (RF) dielektrik bariyer deşarjı ve glow deşarjı vb. gibi farklı metotlarla üretilebilir [3, 64]. TOP reaktörlerinde genellikle PKD ve dielektrik bariyer deşarjı kullanılır [65, 66]. PKD O₃ oluşumunu azaltmasından dolayı daha çok tercih edilmektedir [67]. Atmosferik plazma deşarjlarında kullanılan gaz sıcaklığı oda sıcaklığına yakın kalır ve aynı zamanda yüksek enerji elektronlar ve UV fotonları oluştururlar [68, 69]. Yüksek enerjili elektronlar gaz (O₂ ve H₂O buharı) moleküllerini uyararak, dissosiyeye ve iyonize ederek; atomik oksijen, hidrosil radikalleri ve ozon gibi aktif kimyasal türler üretirler. Bu aktif türler UOB, aerosol partikülleri ve mikroplar gibi kirleticileri uzaklaştırabilmektedirler [3]. UOB'lerin termal olmayan plazma ile bozunmasının etkinliği reaktörün türü, kullanılan gazların türü ve çalışma şartlarına bağlıdır [70]. Termal olmayan plazma ile trikloroetilenin bozunması ve yan ürünlerin ne olduğu değişik parametreler kullanılarak Yamamoto ve Futamuro [70] tarafından çalışılmıştır. Trikloroetile-

nin bozunmasının en fazla kuru azot kullanıldığında olduğunu belirtmektedirler. Ayrıca kuru hava ve nemli hava kullanıldığında da etkinliğin kuru azot kadar olmasa da oldukça iyi olduğunu açıklamaktadırlar. Trikloroetilenin uzaklaştırılmasında sıcaklığın etkisi Hsiao vd. [71] tarafından çalışılmış ve uzaklaştırılma veriminin sıcaklığa bağlı olduğu ve sıcaklık arttıkça verimin de arttığı sonucuna varmışlardır. Okubo vd. [72] iki farklı reaktör kullanarak sigara dumanında bulunan NH_3 ve CH_3CHO 'in bozunmasını incelemişlerdir. Yatak plazma reaktörü kullanıldığında CH_3CHO 'in uzaklaştırılma verimi %95 iken NH_3 uzaklaştırılma verimi %100 olarak bulunmuştur. Film plazma reaktörü çalışmalarında verim ise verim CH_3CHO için %90 ve NH_3 için %100 olarak bulunmuştur.

TOP iç hava temizlenmesi prosesinde yan ürünler (CO , O_3 , NO_x ve aerosol partikülleri gibi) oluşumuna sebep olmaktadır. O_3 ve NO_x üretim oranları, uygulanan enerji (elektrik alan) yoğunluğuna bağlı olarak doğrusal artmaktadır [73]. Korona polaritesi ve nem O_3 ve NO_x üretim miktarına etki etmektedir [73, 74]. Pozitif koronada O_3 üretimi negatif koronaya göre daha fazladır. Nem oranı arttıkça O_3 ve NO_x üretim miktarı azalmaktadır. Bunun nedeni daha önceki bölümlerde bahsedildiği üzere ortamda bulunan O_2 miktarının göreceli olarak azalmasıdır. TOP reaktörleri UOB'lerin yanında mikroorganizmaların yok edilmesinde de etkili olduğuna dair çalışmalar bulunmaktadır. Mikroorganizmaların TOP ile deaktivasyonlarının mekanizması halen bulunamamıştır [75]. Literatür çalışmaları su miktarının bakteriyel deaktivasyon üzerinde önemli bir rol üstlendiğini göstermektedir [76, 78]. Genelde yapılan spekülasyon, plazmadan oluşan kimyasal türlerin hücre duvarında yıkım gerçekleştirerek, deaktivasyon sağladıkları şeklindedir. Havada bulunan E. Coli bakteri miktarının 10 s ve 2 dak plazma uygulanmasıyla 1,5 ve 5,5 log seviyesinde azalma gerçekleştiği Gallagher vd. [79] tarafından kanıtlanmıştır. Başka bir çalışmada ise 38 J/L enerjili plazma uygulamasıyla biyoaerosol gideriminde verimin %89 olduğu belirtilmektedir [80]. TOP reaktörleri kararsız bir şekilde çalışır ve verimliliği düşüktür. Ayrıca plazma sonucunda

oluşan anorganik ve organik kimyasal türler çevreye yayılarak sağlık riski oluştururlar [81]. Genelde üç yaklaşımla bu problemlerin üstesinden gelinmeye çalışılmaktadır; i) reaktör deşarj modunun reaktör yapısını, güç kaynağının frekansını ve voltajını da içerecek şekilde geliştirilmesi [82], ii) katalizörlerle reaktörü birleştirmek [83], iii) reaktörle birlikte adsorban kullanılması. Yaklaşımlardan birisi örneğin UOB'lerin reaktör içerisinde kalış süresini uzatarak verim artışı gerçekleştirmek için makroporlu g- Al_2O_3 veya moleküler elek kullanılmasıdır [84]. Çalışmalarında makroporlu g- Al_2O_3 veya moleküler elek kullanılarak elde edilen hibrit reaktörün CO ve N_2O yayılımını azalttığı ve aynı zamanda enerji verimliliğinin arttığını rapor etmektedirler. TOP ile katalizörlerin kombinasyonu iki kategoriye ayrılır; in-plazma kataliz ve post-plazma kataliz. Post plazma kataliz iki aşamalı proses, in-plazma kataliz ise tek aşamalı prosesi içermektedir ve plazma-katalizör kombinasyonu ile plazmanın katalizör ile etkisini artırmaktadır [80]. UOB'lerin uzaklaştırılmasında plazma-katalizör sistemlerinde birçok plazma ve katalizör kombinasyonları test edilmiştir. En çok kullanılan adsorbanlar Al_2O_3 , zeolitler veya moleküler eleklerdir [68, 82, 90]. Bu adsorbanlar gümüş, palladyum, platin, rodyum, nikel, molibden, bakır, kobalt veya mangenez gibi metallerle kaplanarak ya da bu metaller adsorbanlar içerisine gömülerek katalizör olarak kullanılırlar [68, 69, 74, 82, 89, 97]. Adsorbanlar metal oksitler için destek olarak kullanılmaktadır. Bu tür katalizörlerin yanında fotokatalizörlerle (özellikle TiO_2) plazma kombinasyonlarında ilgi çekmektedir. Moren vd. [98] silindirik TiO_2 tanecekleri kullanarak hibrit plazma-katalizör sistemi ile trikloroetilenin bozunması ile çalışmalarında fotokatalitik bozunmasında eklenmesiyle trikloroetilenin daha fazla uzaklaştırıldığını kanıtlamışlardır. Farklı katalizör formülasyonlarının TOP ile beraber benzen giderimi üzerindeki etkileri Kim vd. [99] tarafından çalışılmıştır. BaTiO_3 yatak reaktörü TiO_2 , Pt/TiO_2 veya Ag/TiO_2 tanecekleri ile modifiye edilerek 373 K'de verim çalışmaları yapıldığında katalitik aktivitenin $\text{Ag/TiO}_2 > \text{TiO}_2 > \text{Pt/TiO}_2$ sırasını izlediği sonucuna varılmıştır. TOP plazma ile üretilen kimyasal türlerin ve bu kimyasal türlerle reaksiyona giren hava

Makale

bileşenlerinin yayılımını önlemek için adsorban ile TOP beraber kullanılır (Almarcha vd., 2014). Koizumi vd. [100] TOP plazma ile aktif karbon filtrenin beraber kullanılmasıyla ekzoz gazı içerisinde NO_x uzaklaştırılmasında gerçekleşen etkileri incelemişlerdir. Egzoz gazı içerisinde bulunan NO_x'ler (NO ve NO₂) 95-105 ppm iken sadece TOP kullanıldığında NO_x konsantrasyonu 150-180 ppm'e çıkmaktadır. Ayrıca plazma sonucunda 15-20 ppm HNO₃ ve 100-500 ppm O₃ oluşmaktadır. NO_x giderilmesinde sadece aktif karbon kullanıldığında ise NO_x konsantrasyonu 40-60 ppm'e düşmekte iken TOP ile aktif karbonun kombine kullanılması halinde NO_x konsantrasyonu 1-5 ppm'e kadar azalmaktadır. Ayrıca TOP ile oluşan HNO₃ ve O₃'ün konsantrasyonları 0-1 ppm kadar düşmektedir. Başka bir ilginç bulgu ise kombine sistemde NO_x uzaklaştırma hızı %90 artmaktadır.

8. SONUÇ

İklimlendirme sistemlerinde kullanılan ve yukarıda verilen yöntemlerin hepsinin iç hava temizlenmesinde mutlaka bir eksikliği bulunmaktadır. Yöntemlerin avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır ve aşağıda bunlar verilmektedir.

PARTİKÜL FİLTRELERİ

Avantajları:

1. Tozları, polenleri, sporları, toz akarları ve diğer alerjenleri
2. Birçok bakteriyi
3. Katı partikülleri temizleyebilirler.

Dezavantajları:

1. Kimyasal dumanlar, sigara dumanını ve kokuları temizleyemezler.
2. Virüsleri temizlemekte etkili değildirler.
3. Üzerlerinde biriken mikroorganizmalar orada büyüyerek farklı problemlere yol açabilirler.

AKTİF KARBON FİLTRELER

Avantajları:

1. Birçok farklı tür filtre mevcuttur.
2. Kimyasal dumanları, gazları, sigara dumanını ve kokuları tutabilirler.
3. Tuttukları kimyasalları bir daha havaya geri vermezler.

Dezantajları:

1. Tozları ve diğer alerjenleri temizleyemezler.
2. Mikroorganizmaları tutamazlar (her ne kadar bazı literatür çalışmaları bunu belirtse de, bunun zıttı olan çalışmalarda mevcuttur. Bazı çalışmalar aktif karbonların bakterileri tuttuğunu açıklamaktadır).

İYONİK FİLTRELER (TOP, NHİ, FKO vb.)

Avantajları:

1. 0,01 mikrona kadar çok küçük partikülleri tutabilirler.
2. Toksik dumanları, virüsleri ve bakterileri sterilize edebilirler.
3. Çok sessizdirler, fan ve motor kullanmazlar.

Dezavantajları:

1. Partikülleri havadan temizlerler fakat odadan temizleyemezler. Odada yerde veya duvarda bulunan partiküller tekrar havaya karışabilir.
2. Yan ürün olarak ozon üretirler.
3. Kokuyu gideremezler.

Avantajları birleştirip dezavantajları elimine etmek için filtre tasarımlarında kombine yöntemler kullanılması tercih edilmektedir ve bu konuda yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Kombine saflaştırma yöntemlerinin geliştirilmesi ve operasyon parametrelerinin optimize edilmesi ve iklimlendirme sistemlerinde kullanılması üzerine daha ileri çalışmalar gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Jones, P. L. M. C., Mech, M. I. E., Hilton, C. L., Air-Conditioning, Journal of the Textile Institute Proceedings, 46, 8, 470-490, 1955.
- [2] Wang, S. K., "Handbook of Air-Conditioning and Refrigeration", The McGraw-Hill Companies, 2000
- [3] Yu, B. F., Hu, Z. B., Liu, M., Yang, H. L., Kong, Q. X., Liu, Y. H., Review of Research on Air-Conditioning Systems and Indoor Air Quality Control for Human Health, International Journal of Refrigeration, 32, 3-20, 2009.
- [4] Ahearn, D. G., Crow, S. A., Simmons, R. B., Price, D. L., Mishra, S. K., Pierson, D. L., Fungal Colonization of Air Filters and Insulation in a Multi-Story Office Building Production of Organic Volatiles. Curr, Microbioş, 35, 305-308, 1997.

- [5] Mølhave, L., Schneider, T., Kjærgaard, S. K., Larsen, L., NORN, S., Jørgensen, O., House Dust in Seven Danish offices, *Atmos. Environ.*, 34, 4767-4779, 2000.
- [6] Mølhave, L., Kjærgaard, S. K., Attermann, J., Respiratory Effects of Experimental Exposure to Office Dust, *Indoor Air*, 14, 376-382, 2004
- [7] Fisk, W. J., Health Benefits of Particle Filtration, 23, 357-368, 2013.
- [8] Hyttinen, M., Pasanen, P., Kalliokoski, P., Reactions of Ozone On Clean, Dusty and Sooty Supply Air Filters, *Atmos. Environ.*, 40, 315-325, 2006.
- [9] Hyttinen, M., Pasanen, P., Sajo, J., Bjorkroth, M., Vartianen, M., Kalliokoski, P., Reactions of Ozone On Ventilation Filters, *Indoor Built Environ.*, 12, 151-158, 2003.
- [10] Bekö, G., Halas, O., Clausen, G., Weschler, C. J., Initial Studies of Oxidation Processes On Filter Surfaces and Their Impact On Perceived Air Quality, *Indoor Air* 16, 56-64. 2006.
- [11] Bekö, G., Tamas, G., Halas, O., Clausen, G., Weschler, C., Ultra-Fine Particles as Indicators of the Generation of Oxidized Products On the Surface of Used Air Filters, In: *Proceedings of the 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate II*, Pekin, Çin, 2006.
- [12] Brasquet, C., Le Cloirec, P., Adsorption Onto Activated Carbon Fibers; Applications to Water and Air Treatments. *Carbon* 35, 1307-1313, 1997.
- [13] Balanay, J. G., Crawford, S. A., Lungu, C. T., Comparison of Toluene Adsorption Among Granular Activated Carbon and Different Types of Activated Carbon Fibers (ACFs), *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 8, 573-579, 2011.
- [14] Cal, M. P., Rood, M. J., Larson, S. M., Gas Phase Adsorption of Volatile Organic Compounds and Water Vapor on Activated Carbon Cloth. *Energy and Fuels* 11, 311-315, 1997.
- [15] Jo, K. W., Chun, H. H., Application of Fibrous Activated Carbon Filter in Continuous-Flow Unit for Removal of Volatile Organic Compounds Under Simulated Indoor Conditions Aerosol and Air Quality Research, 14, 347-354, 2014.
- [16] Alberici, R. M., Jardim, W. F., Photocatalytic Destruction of VOCs in the Gas-Phase Using Titanium Dioxide, *Appl. Cat. B: Environ.*, 14, 58-68, 1997.
- [17] Obee, T., Brown, R. T., TiO₂ Photocatalysis for Indoor Air Applications: Effects of Humidity and Trace Contaminant Levels On the Oxidation Rates of Formaldehyde, Toluene, and 1,3-Butadiene, *Environ. Sci. Technol.*, 29, 1223-1231, 1995
- [18] Kim, S. B., Sung, C. H., Kinetic study for Photocatalytic Degradation of Volatile Organic Compounds in Air Using Thin Film TiO₂ Photocatalyst, *Appl. Cat. B: Environ.*, 35, 305-315, 2002.
- [19] Sattler, L. M., Lijiestrand, H. M., Method for Predicting Photocatalytic Oxidation Rates of Organic Compounds, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 53, 3-12, 2003.
- [20] Wang, K., Tsai, H., Hsieh, Y., The Kinetics of Photocatalytic Degradation of Trichloroethylene in Gas Phase Over TiO₂ Supported on Glass Bead, *Appl. Cat. B: Environ.*, 17, 313-320, 1998.
- [21] Matsunaga, T., Tomoda, R., Nakajima, T., Nakamura, N., Komine, T., Continuous-Sterilization System That Uses Photoconductor Powders, *Appl. Environ. Microbiol.*, 54, 1330-1333, 1988
- [22] Sunada, K., Kikuchi, Y., Hashimoto, K., Fujishima, A., Bactericidal and Detoxification Effects of TiO₂ Thin Film Photocatalysts, *Environ. Sci. Technol.*, 32, 726-728, 1998.
- [23] Hall, R. J., Sangiovanni, J. J., Hollick, H. H., Obee, T. N., Hay, S. O., "Design of Air Purifiers for Aircraft Passenger Cabins Based on Photocatalytic Oxidation Technology. In *Air Quality and Comfort in Airliner Cabins*", Nagda, N. L., Ed.; ASTM STP 1393; ASTM: West Conshohocken, PA, ABD 2000.
- [24] Hoffmann, M. R., Martin, S. T., Choi, W. Y., Bahnemann, D. W., Environmental Applications of Semiconductor Photocatalysis, *Chemical Reviews*, 95, 69-96, 1995.
- [25] Ollis, D. F., Photocatalytic Purification and Remediation of Contaminated Air and Water, *Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie Ii Fascicule C-Chimie* 3, 405-411, 2000.
- [26] Zhang, P. Y., Liang, F. Y., Yu, G., Chen, Q., Zhu, W. P., A Comparative Study on Decomposition of Gaseous Toluene by O₃/UV, TiO₂/UV and O₃/TiO₂/UV, *J. Photochem. Photobiol. A.*, 156, 1-3, 189-194, 2003.
- [27] Bosc, F., Edwards, D., Keller, N., Keller, V., Ayral, A., Mesoporous TiO₂-Based Photocatalysts for UV and Visible Light Gas-Phase Toluene Degradation, *Thin Solid Films*, 495, 272-279, 2006.
- [28] Tompkins, D. T., Evaluation of Photocatalytic Air Cleaning Capability: a Literature Review and Engineering Analysis, *ASHARE Research Project RP-1134*, 2001.
- [29] Ohtani, B., Preparing Articles on Photocatalysis-Beyond the Illusions, Misconceptions, and Speculation, *Chemistry Letters* 37, 217-229, 2008.
- [30] Park, D. R., Zhang, J. L., Ikeue, K., Yamashita, H.,

Makale

- Anpo, M., Photocatalytic Oxidation of Ethylene to CO₂ and H₂O on Ultrafine Powdered TiO₂ Photocatalysts in the Presence of O₂ and H₂O, *Journal of Catalysis*, 185, 114-119, 1999.
- [31] Ao, C. H., Lee, S. C., Combination Effect of Activated Carbon With TiO₂ for the Photodegradation of Binary Pollutants at Typical Indoor Air Level, *Journal of Photochemistry and Photobiology A-Chemistry*, 161, 131-140, 2004.
- [32] Chang, C. P., Chen, J. N., Lu, M. C., Heterogeneous Photocatalytic Oxidation of Acetone for Air Purification by Near UV-Irradiated Titanium Dioxide. *Journal of Environmental Science and Health Part A – Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 38, 1131–1143, 2003.
- [33] Luo, Y., Ollis, D. F., Heterogeneous Photocatalytic Oxidation of Trichloroethylene and Toluene Mixtures in Air: Kinetic Promotion and Inhibition, Time-Dependent Catalyst Activity, *Journal of Catalysis*, 163, 1-11, 1996.
- [34] Kim, S. B., Hong, S. C., Kinetic Study for Photocatalytic Degradation of Volatile Organic Compounds in Air Using Thin Film TiO₂ Photocatalyst. *Applied Catalysis B-Environmental*, 35, 305–315, 2002.
- [35] Obee, T. N., Hay, S. O., Effects of Moisture and Temperature on the Photooxidation of Ethylene on Titania, *Environmental Science & Technology*, 31, 2034–2038, 1997.
- [36] Zhao, J., Yang, X. D., Photocatalytic oxidation for Indoor Air Purification: a Literature Review, *Build. Environ.*, 38, 645-654, 2003.
- [37] Cao, L. Gas-phase Oxidation of 1-Butene Using Nanoscale TiO₂ Photocatalysts. *Journal of Catalysis*, 188, 48-57, 1999.
- [38] Noguchi, T., Fujishima, A., Sawunytama, P., Hashimoto, K., Photocatalytic Degradation of Gaseous Formaldehyde Using TiO₂, *Environmental Science and Technology*, 32, 3831-3, 1998.
- [39] Daniels, S. L., On the Ionization of Air for Removal of Noxious Effluvia, *IEEE Transactions on Plasma Science* 30,1471–1481, 2002.
- [40] Parts, T. E., Luts, A., Observed and Simulated Effects of Certain Pollutants on Small Air Ion Spectra: I. Positive ions. *Atmos. Environ.* 38, 1283–1289, 2004.
- [41] Kondrashova, M. N., Grigorenko, E. V., Tikhonov, A. N., Sirota, T. V., Temnov, A. V., Stavrovskaja, I. G., Kosyakova, N. I., Lange, N. V., Tikhonov, V. P., The Primary Physico-Chemical Mechanism for the Beneficial Biological/Medicaleffects of Negative Air Ions, *IEEE Transactions on Plasma Science* 28, 230–237, 2000.
- [42] Shahin, M. M., Nature of Charge Carriers in Negative Coronas, *Applied Optics*, 8, 106-110, 1969.
- [43] Gravendeel, B., Hoog, F. J., Clustered Negative Ions in Atmospheric Negative Corona Discharges in the Trichel Regime, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 20, p. 6337, 1987.
- [44] Gardiner, P. S., Craggs, J. D., Negative Ions in Trichel Corona in Air, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 10, 1003, 1977.
- [45] Skalny, J. D., Mikoviny, T., Matejcik, S., Mason, N. J., An Analysis of Mass Spectrometric Study of Negative Ions Extracted From Negative Corona Discharge in Air, *International Journal of Mass Spectrometry*, 233, 317, 2004.
- [46] Skalny, J. D., Orszagh, J., Mason, N. J., Rees, J. A., Gonzalo, Y. A., Whitmore, T. D., Mass Spectrometric Study of Negative Ions Extracted From Point to Plane Negative Corona Discharge in Ambient Air at Atmospheric Pressure, *International Journal of Mass Spectrometry*, 272, 1, 12, 2008.
- [47] Nagato, K., Matsui, Y., Miyata, T., Yamauchi, T., An Analysis of the Evolution of Negative Ions Produced By a Corona Ionizer in Air, *International Journal of Mass Spectrometry*, 248, 142, 2006.
- [48] Goldstein, N. I., Goldstein, R. N., Merzlyak, M. N., Negative Air Ions as a Source of Superoxide. *International Journal of Biometeorology*, 36, 118-122, 1992.
- [49] Richardson, G., Eick, S. A., Harwood, D. J., Rose'n, K. G., Dobbs, F., Negative Air Ionisation and the Production of Hydrogen Peroxide, *Atmospheric Environment*, 37, 3701–3706, 2003.
- [50] Sekimoto, K., Takayama, M., Influence of Needle Voltage on the Formation of Negative Core Ions Using Atmospheric Pressure Corona Discharge in Air, *International Journal of Mass Spectrometry*, 261, 38, 2007.
- [51] Lee, B. U., Yermakov, M., Grinshpun, S. A., Removal of Fine and Ultrafine Particles From Indoor Air Environments By the Unipolar Ion Emission. *Atmos. Environ.* 38, 4815-4823, 2004.
- [52] Lee, B. U., Yermakov, M., Grinshpun, S. A., Unipolar Ion Emission Enhances Respiratory Protection Against Fine and Ultrafine Particles. *J. Aerosol Sci.* 35, 1359-1368, 2004.
- [53] Mayya, Y. S., Sapra, B. K., Khan, A., Sunny, F., Aerosol Removal By Unipolar Ionization in Indoor Environments, *J. Aerosol Sci.* 35, 923–941, 2004.
- [54] Khan, A., Sapra, B. K., Sawant, V. D., Shaikh, A. N., Mayya, Y. S., Behaviour of Cigarette Smoke in a Test Enclosure, In *Bulletin of Indian Aerosol Science and Technology Association*, 13, 160–163, 2000.

- [55] Shiue, A., Hu, S. C., Tu, M. L., Particles Removal by Negative Ionic Air Purifier in Cleanroom. *Aerosol And Air Quality Research*, 11, 179-186, 2011.
- [56] Arnold, J. W., Boothe, D. H., Mitchell, B. W., Use of Negative Air Ionization for Reducing Bacterial Pathogens and Spores on Stainless Steel Surfaces, *J. Appl. Poult. Res.* 13, 200–206, 2004.
- [57] Tyagi, A. K., Malik, A., Antimicrobial Action of Essential Oil Vapours and Negative Air Ions Against *Pseudomonas Fluorescens*, *Int J Food Microbiol.* 143(3), 205-210, 2010.
- [58] Shaughnessy, R. J., Sextro, R. G., What is an Effective Portable Air Cleaning Device? A Review, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 3,169–181, 2006.
- [59] Sano, N., Nagamoto, T., Tamon, H., Suzuki, T., Okazaki, M., Removal of Acetaldehyde and Skatole in Gas By a Corona-Discharge Reactor *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 36, 3783–3791, 1997.
- [60] Lippmann, M., Effect of ozone on respiratory Function and Structure, *Ann. Rev. Public Health*, 10, 1185–1194, 1989.
- [61] Lippmann, M., Health Effects of Ozone: a Critical Review, *JAPCA*, 39, 5, 672–694, 1989.
- [62] Reiser, K. M., Tyler, W. S., Hennessy, S. M., Dominquez, J. J., Last, J. A., Long-Term Consequences of Exposure to Ozone: II. Structural Alterations in Lung collagen of Monkeys, *Toxicol Appl. Pharmacol.* 89, 314, 1987.
- [63] Witschi, H., Ozone, Nitrogen Dioxide and Lung Cancer; a Review of Some Recent Issues and Problems, *Toxicology*, 8, 1-20, 1988.
- [64] Penetrante, B. M., Schultheis, S. E., “Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control”, Springer Verlag, New York, 1993.
- [65] Chang, J. S., Lawless, P. A., Yamamoto, T., Corona Discharge Processes, *Plasma Sci. IEEE Trans.*, 19, 6, 1152–1166,1991.
- [66] Kogelschatz, U., Dielectric-Barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications, *Plasma Chem. Plasma Process.*, 23, 1,1–46, 2003.
- [67] Wang, C. Q., He, X. N., Effect of Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge Air Plasma on Electrode Surface, *Appl. Surf. Sci.* 253, 926–929, 2006.
- [68] Magureanu, M., Mandache, N. B., Eloy, P., Gaigneaux, E. M., Parvulescu, V. I., Plasma-Assisted Catalysis for Volatile Organic Compounds Abatement, *Applied Catalysis B: Environmental*, 61, 12–20, 2005.
- [69] Vandebroucke, A., Morent, R., De Geyter, N., Dinh, M. T. N., Giraudon, J. M., Lamonier, J. F., Leys, C., Plasma-Catalytic Decomposition of TCE, *International Journal of Plasma Environmental Science and Technology*, 4, 135-138, 2010.
- [70] Yamamoto, T., Futamura, S., Nonthermal Plasma Processing for Controlling Volatile Organic Compounds, *Combustion Science and Technology*, 133,1-3, 117-133, 1998.
- [71] Hsiao, M. C., Merritt, B. T, Penetrante, B. M., Yogtlin, G. E., Wallman, P. H., Plasma-Assisted Decomposition of Methanol and Trichloroethylene in Atmospheric Pressure Air Streams by Electrical Discharge Processing, *J. Appl. Phys.*, 78, 5, 3451-3456, 1995.
- [72] Okubo, M., Kuroki, T., Kametaka, H., Yamamoto, T., Odor Control Using the AC Barrier-Type Plasma Reactors, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 37, 1447-1455, 2001.
- [73] Cooray, V., Rahman, M., Efficiencies for Production of NO_x and O₃ by Streamer Discharges in Air at Atmospheric Pressure. *J. Electrostat.* 63, 977–983, 2005.
- [74] Van Durme, J., Dewulf, J., Demeestere, K., Leys, C., Van Langenhove, H., Postplasma Catalytic Technology for the Removal of Toluene From Indoor Air: Effect of humidity, *Applied Catalysis B: Environmental*, 87, 78–83, 2009.
- [75] Guo, J., Huang, K., Wang, J., Bactericidal Effect of Various Non-Thermal Plasma Agents and the Influence of Experimental Conditions in Microbial Inactivation: A Review, *Food Control*, 50, 482-490, 2015.
- [76] Dobrynin, D., Fridman, G., Friedman, G., Fridman, A., Physical and Biological Mechanisms of Direct Plasma Interaction With Living Tissue, *New Journal of Physics*, 11, 26, 2009.
- [77] Dobrynin, D., Fridman, G., Friedman, G., Fridman, A., Starikovskiy, A., Inactivation of Bacteria Using dc Corona Discharge: Role of Ions and Humidity, *New Journal of Physics*, 13, 2011.
- [78] Haehnel, M., Von Woedtke, T., Weltmann, K. D., Influence of the Air Humidity on the Reduction of Bacillus Spores in a Defined Environment at Atmospheric Pressure Using a Dielectric Barrier Surface Discharge, *Plasma Processes and Polymers*, 7, 244-249, 2010.
- [79] Gallagher, M. J., Gallagher, J., Vaze, N., Gangoli, S., Vasilets, V. N., Gutsol, A. F., Milovanova, T. N., Anandan, S., Murasko, D. M., Fridman, A. A. Rapid Inactivation of Airborne Bacteria Using Atmospheric pressure Dielectric Barrier Grating Discharge, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 35,

Makale

- 1501–1510, 2007.
- [80] Park, C. W., Byeon, J. H., Yoon, K. Y., Park, J. H., Hwang, J., Simultaneous Removal of Odors, Airborne Particles, and Bioaerosols in a Municipal Composting Facility By Dielectric Barrier Discharge. *Sep. Purif. Technol.*, 77, 87–93, 2011.
- [81] Vandembroucke, A. M., Morent, R., De Geyter, N., Leys, C., Non-thermal plasmas for non-catalytic and catalytic VOC abatement, *Journal of Hazardous Materials*, 195, 30–54, 2011.
- [82] Oda, T., Takahashi, T., Kohzuma, S., Decomposition of Dilute Trichloroethylene By Using Nonthermal Plasma Processing-Frequency and Catalyst effects, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37, 965–970, 2001.
- [83] Oda, T., Takahashi, T., Yamaji, K., Nonthermal Plasma Processing for Dilute VOCs Decomposition, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 38, 873–878, 2002.
- [84] Ogata, A., Ito, D., Mizuno, K., Kushiyama, S., Yamamoto, T., Removal of Dilute Benzene Using Zeolitehybrid Plasma Process, *Proceedings of the IEEE-IAS Conference*, Phoenix, AZ, 1483–1488, 1999.
- [85] Song, Y. H., Kim, S. J., Choi, K. I., Yamamoto, T., Effects of Adsorption and Temperature on a Nonthermal Plasma Process for Removing VOCs, *Journal of Electrostatics*, 55, 189–201, 2002.
- [86] Roland, U., Holzer, F., Kopinke, E. D., Combination of Non-Thermal Plasma and Heterogeneous Catalysis for Oxidation of Volatile Organic Compounds Part 2. Ozone Decomposition and Deactivation of Gamma-Al₂O₃, *Applied Catalysis B: Environmental*, 58, 217–226, 2005.
- [87] Ogata, A., Ito, D., Mizuno, K., Kushiyama, S., Yamamoto, T., Removal of Dilute Benzene Using a Zeolite-Hybrid Plasma Reactor, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37, 959–964, 2001
- [88] Ogata, A., Yamanouchi, K., Mizuno, K., Kushiyama, S., Yamamoto, T., Oxidation of Dilute Benzene in an Alumina Hybrid Plasma Reactor at Atmospheric Pressure, *Plasma Chem. Plasma Processing*, 19, 3, 383–394, 1999.
- [89] Oh, S. M., Kim, H. H., Einaga, H., Ogata, A., Futamura, S., Park, D. W., Zeolite Combined Plasma Reactor for Decomposition of Toluene, *Thin Solid Films*, 506, 418–422, 2006.
- [90] Oh, S. M., Kim, H. H., Ogata, A., Einaga, H., Futamura, S., Park, D. W., Effect of Zeolite in Surface Discharge Plasma on the Decomposition of Toluene, *Catalysis Letters*, 99, 101–104, 2005.
- [91] Kim, H. H., Ogata, A., Futamura, S., Oxygen Partial Pressure-Dependent Behavior of Various Catalysts for the Total Oxidation of VOCs Using Cycled System of Adsorption and Oxygen Plasma, *Applied Catalysis B: Environmental* 79, 356–367, 2008.
- [92] Wallis, A. E., J. C. Whitehead, K. Zhang, The Removal of Dichloromethane From Atmospheric Pressure nitrogen Gas Streams Using Plasma-Assisted Catalysis, *Applied Catalysis B: Environmental*, 74, 111–116, 2007.
- [93] Kim, H. H., Ogata, A., Futamura, S., Effect of Different Catalysts on the Decomposition of VOCs Using Flow-Type Plasma-Driven Catalysis, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 34, 984–995, 2006.
- [94] Ogata, A., Einaga, H., Kabashima, H., Futamura, S., Kushiyama, S., Kim, H. H., Effective Combination of Nonthermal Plasma and Catalysts for Decomposition of Benzene in Air, *Applied Catalysis B: Environmental*, 46, 87–95, 2003.
- [95] Grossmannova, H., Neiryneck, D., Leys, C., Atmospheric Discharge Combined With Cu-Mn/Al₂O₃ Catalyst Unit for the Removal of Toluene, *Czechoslovak Journal of Physics*, 56, B1156–B1161, 2006
- [96] Da Costa, P., Marques, R., Da Costa, S., Plasma Catalytic Oxidation of Methane on Alumina-Supported Noble Metal Catalysts, *Applied Catalysis B: Environmental*, 84, 214–222, 2008.
- [97] Blackbeard, T., Demidyuk, V., Hill, S. L., Whitehead, J. C., The Effect of Temperature on the Plasma-Catalytic Destruction of Propane and Propene: a Comparison With Thermal Catalysis, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 29, 411–419, 2009.
- [98] Morent, R., Dewulf, J., Steenhaut, N., Leys, C., Van Langenhove, H., Hybrid Plasma-Catalyst System for the Removal of Trichloroethylene in Air, *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 9, 53–58, 2006.
- [99] Kim, H. H., Lee, Y. H., Ogata, A., Futamura, S., Plasma-Driven Catalyst Processing Packed With Photocatalyst for Gas-Phase Benzene Decomposition, *Catalysis Communications*, 4, 347–351, 2003.
- [100] Koizumi, T., Ohyama, R., Okabe, S., An Experimental NO_x Treatment in Diesel Engine Combustion Exhaust Gases by Non-Thermal Plasma and Activated Carbon filter Combinations, *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, P. 130-133, 17 Ekim 2004.