

Nanofiber Tabakalı Hava Filtrelerinin Partikül Yakalama Performanslarının İncelenmesi

Kevser DİNCER¹, Gürol ÖNAL^{*1}, Mehmet SELBES¹, Ahmet AKDEMİR²

¹Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Selçuklu, Konya

²Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meram, Konya

(Alınış / Received: 28.03.2017, Kabul / Accepted: 09.03.2018, Online Yayınlanma / Published Online: 06.05.2018)

Anahtar Kelimeler

Nanofiltre,
Nanopartikül,
Hava filtre performans
testleri

Özet: Bu çalışmada, 25-85 g/m² gramaj arasındaki mikrofiber hava filtrelerinin üzerine nanofiber kaplanarak çok küçük partikülleri yakalama performansları incelenmiştir. Filtrelerin performans tayini için basınç kaybı ve partikül yakalama testleri yapılmıştır. Basınç kaybı deneylerinde filtrelere 0.3, 0.8, 1.3 m/s hızlarında hava, partikül yakalama testleri için ise 0.3 m/s hızında ortalama 100 nm çapında formda toksik olmayan CaCO₃ nanopartiküllü hava kullanılmıştır. Küçük fiber çapına sahip, kesit alanı büyük, rijit ve mukavim spunbond mikrofiber filtrelerin nanofiber tabaka kaplamaya elverişli olduğu ve optimum filtreleme sağladığı belirlenmiştir. Küçük çaplı nanofiberlerin ince tabaka, büyük çaplı nanofiberlerin kalın tabakalı kaplanması filtreleme performansını arttırmaktadır. Nanofiber tabaka kaplama ağırlığının artmasıyla performansın yükseldiği ve kritik bir değerden sonra filtrenin tıkanarak ömrünü tamamladığı tespit edilmiştir.

Particle Infiltration Performance Investigation of Air Filters with Nanofiber Layer

Keywords

Nanofilter,
Nanoparticle,
Performance tests of air filter

Abstract: In this study, catchingsmallparticlesperformance of nanofibercoating on microfiber air filters between 25-85 g/m² were examined. Pressure drop and particle capture tests were conducted for the determination of filter performance. For pressure loss air with the velocity of 0.3, 0.8, 1.3 m/s and for particle capture tests air with 100 nm average diameternon-toxic CaCO₃ nanoparticulate at 0.3 m/s of were used. Microfiber filters with a small fiber diameter, largecross-sectional area, rigid and resistant spunbond were found to be suitable for coating nanofiber layer and ensure sand optimum filtering. Thin coating of small scale nanofibres the filtering performance where asthick-layer coating is found sutable for big scale nanofibers. With the increase of the nanofiber layer coating weight the performance increases and after a critical value the filter comes the end of the lifetime beacuse of blokage.

1. Giriş

Günümüzde hızlı sanayileşme ve nüfus artışı ile havadaki kirleticiler farklılaşmakta ve konsantrasyonu artmaktadır. Ayrıca, insanlar eskiye göre daha çok kapalı ortamlarda kalmaktadır. Bu nedenle hava filtrasyonunun önemini giderek artmaktadır. Açık havada, işte, evde soluduğumuz havanın içindeki partiküllerin büyük bir kısmı 1 µm'dan küçüktür. Karbondioksit, nem, koku molekülleri ile, sigara dumanı, bakteri ve virüsler gibi istenmeyen veya insan sağlığına zararlı küçük partiküllerin soluduğumuz havadan uzaklaştırılması gerekir. Hava filtresi seçiminde önemli olan hangi boyuttaki partiküllerin tutulacağıdır. Örneğin, duvar

tipi bir klima cihazında büyük partiküllerin filtrelenmesi, çatı tipi bir klima cihazında nispeten küçük partiküllerin yakalanması, bir ameliyathanede ise çok küçük partiküllerin tutulması gerekir. Hava filtrelerinin sınıflandırılmasıyla ilgili, ABD tarafından hazırlanan, daha çok tavsiye niteliği taşıyan standart ile CEN (European Committee for Standardization - Avrupa Standartlar Komitesi) standartlar kullanılmaktadır.

Hava filtreleri yakaladıkları partikül büyüklüğüne göre kaba, ince ve hassas olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır. Kaba ve ince partiküllerin yakalanmasında kullanılan filtreler EN 779 standardında (Genel Havalandırma İçin Partikül Hava Filtreleri)

*İlgili yazar: gonal@selcuk.edu.tr

tanımlanmıştır. EN 779 standardında kaba ve ince filtreler yakalanan partikül ağırlığına ve partikül tutma verimine göre sınıflandırılmıştır. Kaba, orta, ince mikrofiber filtreler genellikle 2-40 µm aralığında mikrofiberden ergitme üfleme, spunbond ve ıslak yatırma yöntemleri ile üretilir ve büyük taneciklerin filtrelenmesinde kullanılır. Kaba ve ince filtreler genellikle klimalar, otomobil kabin ve motor filtreleri gibi hassas olmayan yerlerde kullanılmaktadır. Ayrıca çok küçük partikül, toz ve organizma varlığının önemli olduğu yerlerde kullanılan hassas filtrelerden hemen önce kullanılmaktadır. Hassas filtreler için EN 1822 (yüksek etkinlikli hava filtreleri) standardı kullanılmaktadır. Hassas filtreler, ıslak yatırma veya elektro-eğirme metodu ile üretilen genellikle 40-1000 nm arasındaki nanofiberlerden meydana gelir ve çok küçük partiküllerin yakalanmasında kullanılır. Hassas filtreler geçirdikleri partikül miktarına göre sınıflandırılmış olup ameliyathaneler, mikroçip üretim tesisleri, nükleer fabrikalar, elektrikli süpürgeler gibi hassas yerlerde ve proseslerde kullanılmaktadır. İnsanların konfor beklentilerinin yükselmesi ve hassas yerlerin, süreçlerin artması yüksek etkin hava filtrelerinin önemini arttırmaktadır.

Fiber, filtrenin temel yapı elemanı olduğu için filtreleme özelliklerini en çok etkileyen faktördür. Fiber çapı azaldıkça; birim alandaki fiber miktarı artar, dolayısıyla gözenek sayısı azalır, partikülün filtre içinde alacağı yol karmaşık hale gelir. Filtrenin yüzey alanının artmasıyla, gözenek boyutu küçülür ve partikülün yakalanma ihtimali artar [1, 2]. Fiber yüzey alanı filtrasyon performansı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Çünkü birim hacimdeki fiber yüzey alanı artışı, fiber sayısının artmasına ve partiküllerin fiber ile çarpışma ihtimallerinin artması anlamına gelir [2]. Gözeneklilik, birim hacim filtredeki boş hacim miktarı olarak tanımlanır ve birimsizdir [3].

Hava filtrelerinde genellikle tekstil esaslı filtreler kullanılır. Tekstil esaslı filtreler dokuma filtreler ve keçeler olmak üzere iki kategoride incelenebilir. Dokuma uzun ipliklerin dokunması ile elde edilir. Gramajları 20-500 g/m² arasında değişir, mukavemetleri yüksektir. Dokuma filtreler düzenli gözenek boyutuna sahiptir. Dokuma filtrelerin kalınlığının küçük, gözenek boyutunun büyük olmasından dolayı partiküller yüzey filtrasyonu mekanizmasıyla yakalanır. Yüzey filtrasyonunda gözenek boyutundan daha büyük partiküller yüzeyde tutulur, küçük partiküller filtrede tutulmadan geçer. Yüzey filtrasyonu nedeniyle dokuma filtre gözenekleri kısa sürede tıkanır. Dokuma filtrelerin gerek kısa sürede tıkanması gerekse keçelerden pahalı olması nedeniyle hava filtrasyonunda tek başına kullanılmaz. Dokuma filtreler, keçelerle birlikte kompozit filtre temininde veya ince filtreleri takviye etmek amacıyla kullanılır [4].

Hava filtrasyonunda kullanılan keçeler ergitme üfleme, spunbond, ıslak yatırma ve elektro-eğirme yöntemi ile üretilir [5]. Bu metotlardan en büyük fiber spunbond yöntemi ile en küçük fiber ise elektro-eğirme yöntemiyle elde edilir. Ayrıca elektro-eğirme haricindeki tüm üretim yöntemlerinde 1 µm fiber çapının altına inilmesi pek mümkün değildir [5]. Hava filtrasyon mekanizmaları, genel olarak yüzey filtrasyonu, derinlik filtrasyonu ve kek filtrasyonu olmak üzere üç temel kategoride incelenir [6].

Yüzey filtrasyonunda partiküller ince bir tabaka halinde filtrenin yüzeyinde yakalanır. Yüzey filtrasyonu, partiküller ile filtre gözenekleri aynı boyutta veya partiküllerin daha büyük olması durumunda gerçekleşir. Filtreleme çok küçük bir hacimde olduğundan filtre çok kısa bir süre sonra tıkanır ve ömrünü tamamlar. Bu tip filtrasyon dokuma filtreler gibi homojen gözenek boyutuna sahip filtrelerde oluşur [6]. Keçeler, derinlik filtrelerine örnektir. Yüzey filtrelerine göre daha düşük verimliliğe sahip olmalarına rağmen, ucuz olmaları, ön ve esas filtre olarak kullanılabilmeleri, yüksek akışkan hızına izin vermeleri ve filtre aparatına kolay yerleştirilmeleri bakımından avantajlıdır [1].

Hem yüzey hem de derinlik filtrelerinde, partiküllerin filtre gözeneklerini tıkamasına rağmen filtrasyon devam ettiğinde; partiküller tabakalar halinde filtre kekini oluşturur. Filtre keki oluşumunun iki önemli etkisi vardır. Birincisi; kek akışa karşı direnci artırır ve kek kalınlıkla akış hızı düşer. Filtrenin temizlenme zorunluluğu ortaya çıkar. İkincisi, asılı partiküllerin, filtreden önce filtre kekini oluşturan partiküllerin arasındaki küçük boşluklardan geçmek zorunda olmasıdır. Bu boşluklar genellikle filtrenin kendisinden daha küçük boyutta olduğu için, filtrenin kendisinden daha etkili bir filtreleme oluştururlar. Bu tip filtrasyon da kek filtrasyonu olarak bilinir [1]. Elektrostatik filtrelerde, fiberlerin statik elektrikle yüklendiğinde küçük ve orta büyüklükteki partiküller yakalanır [2].

Hassas filtreler yirminci yüzyılın ortalarından yüzyılın sonuna kadar cam mikrofiberlerden elde edilmekteydi. Yirmi birinci yüzyılın başında nano teknolojinin hızla gelişmeye başlamasıyla mikro fiberlerin yerini daha küçük fiberler almıştır. Nanofiberlerin boyutlarının küçük olması, daha etkin bir filtreleme yapmasını beraberinde getirmektedir. Nanofiber üretiminde hızlı, tekrarlanabilir ve kütleli üretime uygun olduğundan genellikle elektro-eğirme yöntemi kullanılmaktadır. Elektro-eğirme yöntemi, nispeten daha az enerjiyle, daha az maddeyle ve çok farklı polimerle nanofiber üretimine izin vermektedir. Çok çeşitli polimerlerden üretilmesi fiberlere dolayısıyla filtreye istenilen özelliklerin verilmesine imkân sağlar. Örneğin iletken nanofiber elde edilen polimerlerin kullanılmasıyla filtreye düşük bir akım verilerek havadaki pozitif partiküller kolayca yakalanabilmektedir [8].

2. Deneysel Çalışma

2.1. Hava filtrelerinin performans testlerinde kullanılan malzemeler

Nanofiber tabaka esnek ve ince olduğundan, rijit, yarı geçirgen ve ucuz olan mikrofiber filtreler üzerine kaplanmıştır. Bu mikrofiber filtreler altlık olarak adlandırılmış olup, özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur. Burada filtre sınıfı, filtrenin partikül yakalama hassasiyeti, \emptyset_{ort} , ortalama fiber çapıdır.

Tablo 1: Altlık olarak kullanılan filtrelerin özellikleri

Numune No	Filtre ismi	Ağırlık (g/m ²)	Filtre sınıfı	\emptyset_{ort} (μm)
1, 2, 3, 4	PET Spunbond	85	G4	20
5	PP Monofilament	25	G2	60

PET spunbond altlık üzerine kaplanan nanofiber tabakaların özellikleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Buradaki ilk dört numune PET spunbond mikrofiber üzerine, beşinci numune ise monofilament dokuma mikrofiber üzerine kaplanmıştır. Tablo 2'de, Q_{min} en küçük nanofiber çapını, Q_{ort} ortalama nanofiber çapını, Q_{max} en büyük nanofiber çapını, standart sapma nanofiberlerin merkezi yayılma ölçüsünü ifade etmektedir. Tablo 2'deki standart sapma, söz konusu nanofiber tabakasındaki ortalama nanofiber çapının merkezi yayılma ölçüsünü ifade etmektedir. Yani, standart sapma ne kadar küçük ise nanofiber çapları

ortalama nanofiber çapına o kadar yakındır. Örneğin birinci numunedeki elli adet nanofiber boyutu (çapı) ile ortalama fiber çapı arasındaki fark büyüktür. Standart sapma SEM görüntüleri kullanılarak, her bir numunede elli farklı fiber çapından yola çıkarak,

$$\sqrt{\frac{(P_1 - O)^2 + (P_2 - O)^2 + (P_3 - O)^2 + \dots + (P_n - O)^2}{n-1}}$$

ifadesinden hesaplanmıştır. Burada P_1 birinci nanofiber boyutu, P_2 ikinci nanofiber şeklindedir. O , elli adet nanofiber çapının aritmetik ortalamasıdır. n , numune sayısıdır.

Nanofiber tabakalı filtrelerin haricinde numune olarak ve ön filtreleme amacıyla Tablo 3'de sunulan filtreler kullanılmıştır.

Bu filtrelerin haricinde filtre ağırlıkları ölçümünde, 1/10000 g hassasiyetinde terazi kullanılmıştır. Filtrelerin partikül yakalama testlerinde, zehirli olmaması, kolay tedarik edilmesi, ucuz olması nedeniyle 80-120 nm çapında, küresel formda CaCO₃ nanopartikül tercih edilmiştir (Şekil 1).

Tablo 3'deki filtreler (mikro fiber filtreler ile geleneksel yöntemlerle imal edilen nanofiber filtre)'in kullanılmasındaki maksat, söz konusu filtrelerin performanslarını nanofiber tabakalı numunelerin performansı ile karşılaştırmaktır.

Tablo 2: PET Spunbond altlık üzerine kaplanan nanofiberlerin boyutları

Num. No	Filtre ismi	Ağırlığı (g/m ²)	\emptyset_{min} (nm)	\emptyset_{ort} (nm)	\emptyset_{max} (nm)	Stand. Sapma
1	Nanofiber tabaka	2	67	200	470	92
2	Nanofiber tabaka	2.5	83	193	321	56
3	Nanofiber tabaka	3	40	98	178	36
4	Nanofiber tabaka	3.2	42	77	169	25
5	Nanofiber tabaka *	4	73	137	279	38

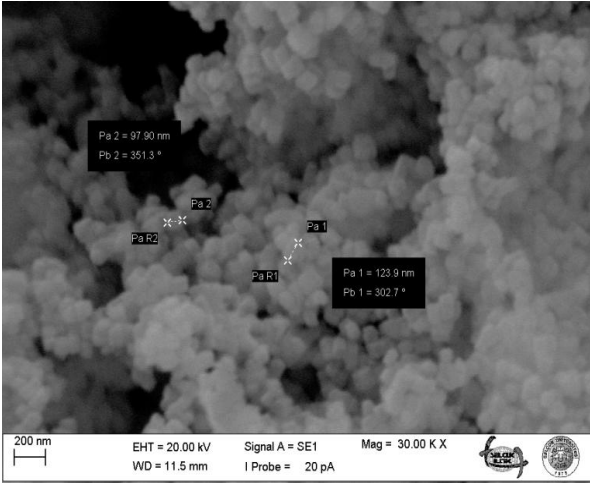
* PP Monofilament altlık üzerine kaplanmıştır

Tablo 3: Numune ve ön filtreleme amacıyla kullanılan mikrofiber/nanofiber filtrelerin özellikleri

Num. no	Filtre ismi	Kullanma amacı	Ağırlık (g/m ²)	Filtre sınıfı	\emptyset_{ort} (μm)
6	H 13 HEPA Nanofiltre	Numune	85	H13	0.9
7	PP Ergitme-üfleme	Numune	110	F7	8
8	PET Spunbond	Numune	85	G4	20
9	PP Monofilament	Numune	25	G2	60
	PET Kaba (Elyaf)	Ön filtreleme	125	G2	50

Tablo 3'deki 8. ve 9. mikrofiber filtreler ile bu filtreleri altlık olarak kullanan nanofiber tabakalı filtreler karşılaştırıldığında nanofiber tabaka ağırlığının artması ile basınç kaybı çok hızlı bir şekilde yükselmektedir.

Fitre testlerinde, kompresörden gelen basınçlı havanın içinde bulunan su, yağ ve partikülleri tutan, sabit basınç sağlayan, 0-10 bar ve 0-500 L/dak. aralığında çalışan hava regülatörü ve filtre kullanılmıştır. Ayrıca, kanal içindeki havanın hızı hava sıcaklığı ve bağıl nemi ölçmek için anemometre kullanılmıştır. Anemometre özellikleri Tablo 4'de sunulmuştur.



Şekil 1: CaCO₃ nanopartiküllerin SEM görüntüsü

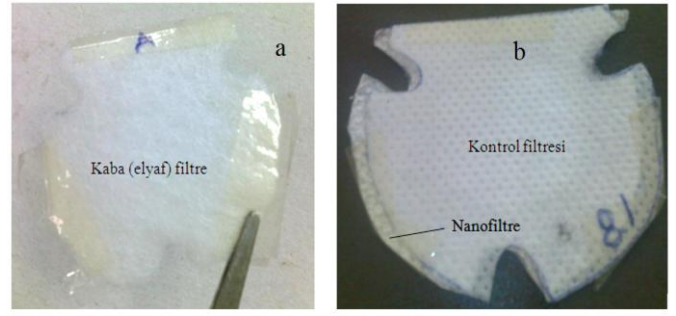
Tablo 4: Anemometre özellikleri

Özellik	Sıcaklık	Nem	Hız
Sensör tipi	NTC Termistör	Elektronik direnç	Pervane
Ölçme aralığı	-5 °C ile +65 °C	% 10 Rh ile %95 Rh	0.1 ile 15 m/s
Doğruluk	± 1 °C	± 3 %	± 3 %

2.2. Nanofiber ve mikrofiber hava filtrelerinin performans testleri

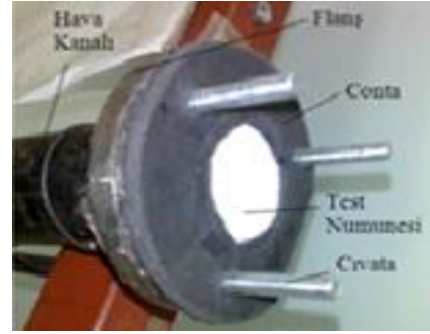
Hava filtrelerinin performanslarını karşılaştırmak amacıyla iki farklı test yapılmıştır. Bunlar, basınç kaybı ve partikül tutma etkinliği testleridir. Basınç kaybı testlerinde filtreye temiz hava gönderilerek oluşan basınç kayıpları ölçülmüştür. Partikül tutma etkinliği testlerinde ise, nanopartiküllü hava filtreye gönderilmiş ve oluşan basınç kaybı ile yakalanan partikül miktarı tespit edilmiştir.

Literatürdeki çalışmalara benzer olarak basınç farkı deneyleri 0.3, 0.8 ve 1.3 m/s hava hızlarında yapılmış ve filtrelerde meydana gelen basınç kayıpları tespit edilmiştir. Partikül yakalama deneyleri ise 0.3 m/s hava hızında yapılmış, her beş dakikada bir yakalanan partikül miktarı ve basınç kayıpları ölçülmüştür. Nanofiber filtre performans deney parametreleri Tablo 5'de sunulmuştur.



(a)

(b)



(c)

Şekil 2: Filtre performans deneylerinde kullanılan filtreler (a) kaba (elyaf) filtre, (b) kontrol filtresi ve nanofiltre (nanofiber tabaka ve altlık), (c) basınç deney cihazına yerleştirilen test numunesi

Tablo 5: Performans testleri özellikleri

Parametreler	Basınç kaybı deneyi	Partikül tutma deneyi
Alın hızı (m/s)	0.3, 0.8, 1.3	0.3
Ortalama partikül boyutu	-	100
Partikül şekli	-	Küresel
Test filtresi boyutu (mm)	Ø 42	Ø 42
Test süresi (dak.)	5	25

Deney düzeneğinde sızdırmazlık çok önemlidir. Çünkü deneylerde basınç ölçümünün çok hassas bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bu nedenle, her iki deney düzeneği kurulduktan sonra, tüm boru ve parçaların birleşme yerlerinin sızdırmazlığının kontrol edilmesini sağlayan köpük testi uygulanmıştır. Köpük testi için su ve sıvı sabun alınarak bir pet bardak içinde iyice karıştırılmış ve köpük oluşturulmuştur. Deney düzeneğine hava verilerek, hava kanalları üzerine köpük uygulanmıştır. Şayet köpükte bir şişme varsa vana kapatılarak sızdıran yer yapııştırılmıştır. Birkaç dakika sonra aynı işlem tekrarlanarak tüm düzeneğin sızdırmazlığı sağlanmıştır. Diğer yandan flanşların sızdırmazlığı için havalandırma kanallarında kullanılan NFAF ismi verilen poliüretan köpük contadan yararlanılmıştır. Flanşlar arası sızdırmazlığı sağlamak için flanşlara uygun contalar kesilerek yapııştırılmıştır.

Filtre numuneleri ve elyaf filtreler flanşa bağlanacak şekilde bir şablon hazırlanarak kesilmiştir. Numuneler kesilirken homojenliğin sağlanması

amacıyla, filtre kenarlarından en az 5 cm uzakta olmasına dikkat edilmiştir. Filtrelerin kolayca merkezlenmesi ve yırtılmaması için cıvatalara denk gelen köşeleri boşaltılmıştır (Şekil 2b). Ayrıca, filtre numunelerinin flanş dışına taşmaması sağlanmıştır (Şekil 2c). Elyaf filtrelerin kenarları izole bantla yapıştırılarak rijit hale getirilerek elyaf kaybı azaltılmıştır (Şekil 2a).

2.3. Basınç kaybı deneyleri

Filtrelerin yakaladığı partikül miktarı kadar, filtrasyon esnasındaki basınç kaybı da önemlidir. Çünkü filtre ömrü tayininde, filtrasyon sonunda kabul edilebilir basınç kaybı kullanılır. Örneğin G sınıfı filtrelerde basınç farkı 250 Pa, M ve F sınıfı filtrelerde 450 Pa, HEPA filtrelerde 600 Pa basınç kaybına ulaşıldığında filtrenin ömrünü doldurduğu kabul edilir. Bununla beraber basınç kaybı deneyi, test numunelerinin geçirgenliğini ve farklı hava hızlarında test numunelerindeki basınç kaybını tespit etmek amacıyla yapılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan basınç kaybı deney seti iki kısımdan oluşmaktadır (Bkz. Şekil 3). Bunlar ön filtreleme ve regülatör sistemi, orifis ve test filtresi bölümüdür. Ön filtreleme ve regülatör sistemi, kaba filtre, regülatör ve H13 sınıfı HEPA filtre bölümlerinden oluşmaktadır. Bu bölümdeki kaba filtre büyük partiküllerin, regülatör sıvı partiküllerin (yağ ve su gibi), H13 sınıfı HEPA filtre ise küçük partiküllerin filtrenmesi amacı ile kullanılmıştır. Ayrıca, sabit hava debisi elde etmek için regülatörden yararlanılmıştır. Orifis bölümü hava kanalındaki hızı ölçmek için tasarlanmıştır.

Anemometreden ölçülen hava hızı 0.3, 0.8 ve 1.3 m/s olduğunda orifis manometresindeki basınç farkı sırayla 15, 96 ve 247 mmSS olduğu daha önce hesaplanmıştır.

Tüm filtre numuneleri orifisten sonra monte edilmiştir. Test filtresi manometresinde yüksek basınç kaybı olduğundan, cıvalı manometre kullanılmıştır. Test numunelerini ve diğer filtreleri deney cihazına bağlamak için flanşlardan yararlanılmıştır. Flanşlar borulara vidalanmış olup her iki flanş birbirine cıvatalarla monte edilmiştir. Deneye başlamadan önce test numunesi tartılmış ve kaba filtre, HEPA filtre, deney numunesi cihaza monte edilmiştir. Nanofiber tabakalı filtre deney setine bağlanırken havanın nanofiber tarafından girecek olmasına dikkat edilmiştir. Filtrelerin bağlandığı flanşlardan hava sızıntısı olmaması için filtre çevresinde çift tarafı yapışkan hava kanalı contası kullanılmıştır. Deney düzeneginden 0.5 bar hava geçirilerek sızıntı kontrolü yapılmıştır. Daha sonra tüm vanalar kapatılmıştır. Hava girişindeki küresel ve şiber vana açılarak sisteme 2 bar hava verilmiştir. Kaba partiküllerden ayrılan hava, regülatörün yavaşça açılmasıyla HEPA filtreye girerek, çok küçük

partiküllerden ve yağdan arındırılmıştır. Orifise giren temiz havanın fark basıncı 15 mmSS (alın hızı, 0.3m/s) olacak şekilde manuel olarak basınç regülatöründen ayarlanmıştır. Beş dakika sonunda sistem rejime girdiğinde filtre numunesinde oluşan basınç farkı basınç ölçülerek not edilmiştir. Daha sonra deney seti girişindeki şiber vana kapatılarak ilk deney tamamlanmıştır. Aynı filtreyle ikinci alın hızında ölçüm için şiber vana yavaşça açılmış ve ardından regülatör orifis manometresinde 96 mmSS (0.8 m/s) olacak şekilde ayarlanarak beş dakika sonunda filtre numunesinde oluşan fark basınç not edilmiştir. Benzer işlemler, 247 mmSS (1.3 m/s) orifis fark basıncı olacak şekilde regülatör ayarlanarak 5 dakika sonunda filtre numunesi manometresindeki basınç farkı not edilerek test tamamlanmıştır. Basınç kaybı deneyinden sonra tıkanma kontrolü amacıyla test numuneleri tartılmış ve herhangi bir kütle artışı olmadığı belirlenmiştir.

2.4. Partikül yakalama deneyleri

Bir hava filtresinden beklenen, çok sayıda küçük partikülü düşük basınç kaybı oluşturarak yakalamaktır. Zaten filtrelemenin amacı temiz, yani partikülsüz bir hava elde etmektir. Hava filtresinden beklenen bu özelliğin ölçülmesi amacıyla partikül yakalama deneyleri yapılmış ve yakalanan partikül miktarı ile oluşan basınç kaybı ölçülmüştür.

Partikül yakalama miktarının ölçülmesi amacıyla geliştirilen partikül yakalama deney cihazı dört bölümden oluşmaktadır (Şekil 4). Bunlardan ilki, ön filtreleme ve regülatör sistemi olup, basınç kaybı deney setindeki gibi partikül filtreleme ve hava debisini ayarlamak için kullanılmıştır. İkinci bölüm olan akışkan yatak vasıtasıyla, CaCO₃ nanopartikülleri uçurulup karışım odasına gönderilmiştir. Karışım odasında homojen bir karışım elde edilmiştir. Üçüncü bölümdeki boşta çalıştırma hattı, deney sisteminin rejime girmesi, deney setinin filtre numunesi söküp takarken sistemin aralıksız çalışması amacıyla tasarlanmıştır. Son bölüm olan filtre numunesi test bölümünde ise, filtreden geçen hava hızının ölçümü yapılarak filtrede oluşan basınç kaybı tespit edilmiştir. Filtrenin tutamadığı partiküller suya gönderilmiştir. Filtreden geçen partiküllerin miktarını ölçmek amacıyla siklon ve sıkıştırılmış elyaf filtre de kullanılmıştır.

Partikül yakalama deneyi süresince akışkan yatak sürekli açık kalmıştır. Akışkan yatak, filtre test numuneleri tartılırken dahi boşta çalıştırma hattına partiküllü hava verilerek çalıştırılmıştır. Bu nedenle düzgün dağılımlı partikül konsantrasyonu elde edilmiştir.

Akışkan yatak, belli boyutlardaki katı taneciklerin sıvı gibi davrandıkları duruma verilen isimdir. Yani basınçlı bir gazın, ortamı oluşturan katı tanecikler arasından geçmesiyle oluşur. Bu durumda katılar sıvı

karakteristiği göstermeye başlar. Ayrıca taneciklerin element yapısı değişmeden, yoğunlukları azalır. Bu olaya yataklama adı verilir.

Akışkan yataktan çıkan partiküllerin iyi karışması için şeffaf hortum içine bir orifis monte edilerek havanın, akışkan yatakla bağlantısı öncesinde hızlandırılması sağlanmıştır. Akışkan yatak olarak iki yarı küre bir plastik kap temin edilerek kaplardan birinin hava giriş kısmında küçük delikler açılmıştır. Bu deliklerin altına H13 sınıfı HEPA filtre konularak partiküllerin deliklerden aşağıya dökülmesi önlenmiştir. Hava giriş borusu, şeffaf hortumla sızdırmaz bir şekilde bağlanmıştır. Partiküllerin çıktığı üst kısım ise üstteki küresel kap delinerek bir pipet yerleştirilmiştir. Bu pipet havanın hızla aktığı orifisin hemen ucuna gelecek şekilde monte edilmiştir. Akışkan yatakla, çok küçük katı parçacıklar hava ile uçurularak nanopartikülü hava elde edilmiştir. Karışım odası için, iki şeffaf huni alınarak alın altına yapıştırılmıştır. Hunilerin her iki ucu da şeffaf bir hortum vasıtasıyla monte edilerek sızdırmazlığın sağlanması için yapıştırılmıştır. Partikül yakalama deneylerinde filtre numuneleri belli bir sırayla konmuştur. Nanofiber tabakalı filtrelerin partikül tutma testlerinde, ilk sıraya elyaf filtre, sonra kontrol filtresi, son olarak da nanofiber tabaka kaplı altlık konmuştur (Şekil 5).

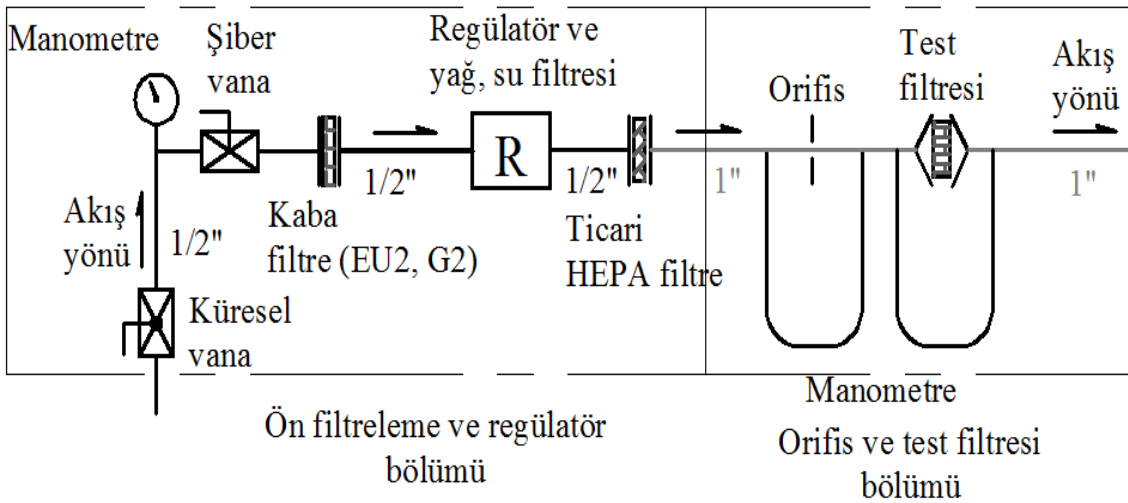
Buradaki elyaf filtrenin amacı, kümelenmiş halde gelmesi muhtemel CaCO_3 nanopartiküllerden nanofiber tabakayı korumaktır. Nanofiber tabaka ile altlığın oluşturduğu nanofiltre, kontrol filtresiyle yapıştırılmış nanofiber tabaka ortada kalmıştır. Diğer yandan nanofiber tabakanın tıkanmaması için nanopartiküller nano filtreye altlıktan girip nanofiber tabakadan çıkmalıdır. Fakat bu durumda nanofiber tabaka yüksek basınç nedeniyle çok kısa sürede çatlamış ve çatlak büyüyerek filtre delinmiştir. Bu yüzden altlığın nanofiber tabakaya destek olması için

nanofiber tabakadan sonra kullanılması gerekmiştir. İşte bu sebepten dolayı nanopartiküller, nanofiber tabakadan önce kontrol filtresine girmesi gerekir ki filtre amacına ulaşsın. H13 sınıfı HEPA filtre numunesi ve mikrofiber filtre numuneleri önüne sadece elyaf filtre konulmuş, kontrol filtresi kullanılmamıştır. Partiküllü hava, ilk önce elyaf filtre, sonra kontrol filtresi, en son nanofiber tabakaya girecek şekilde yerleştirilmiştir (Tablo 6).

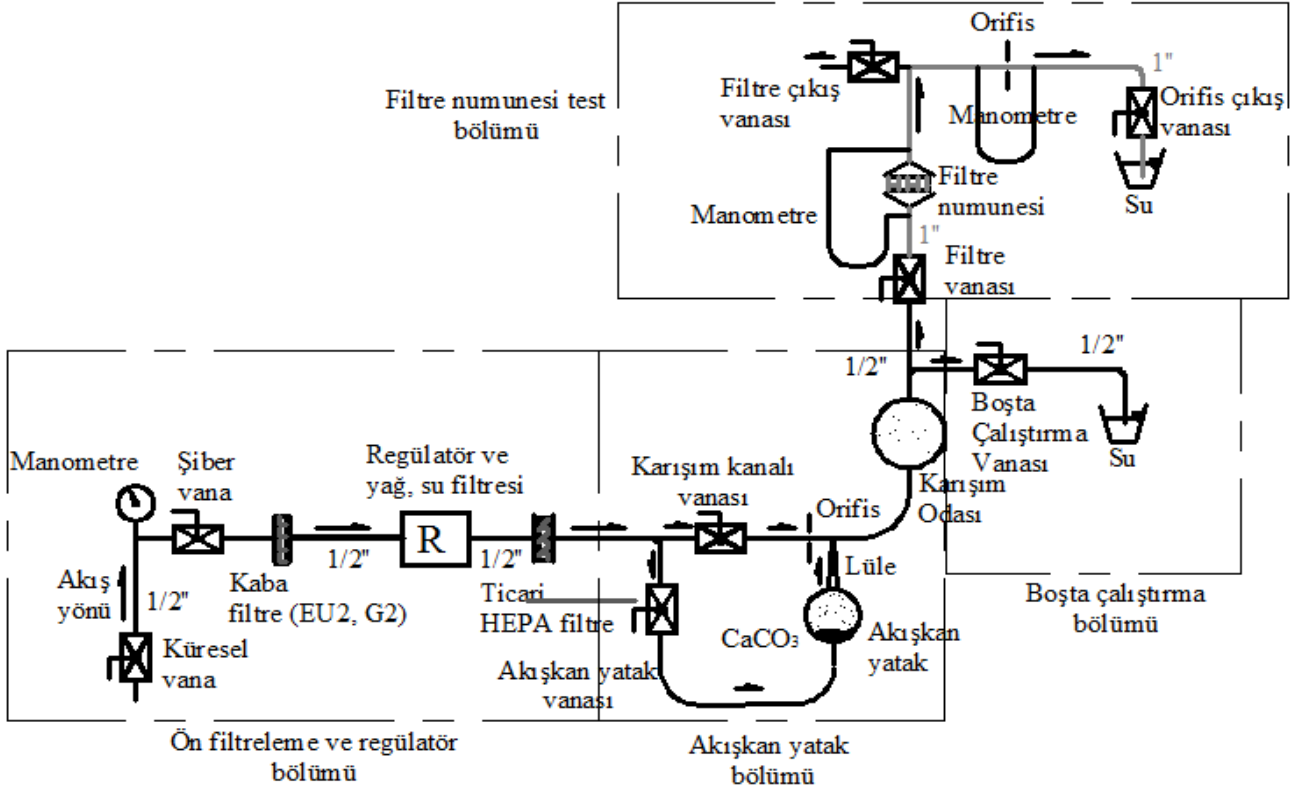
Birinci test numunesinin (partikül yakalama deneyinde)sisteme yerleşmiş durumu Şekil 6'de sunulmuştur. Hava girişi tarafına elyaf filtre ardından kontrol filtresi ve son olarak da birinci nanofiltre konmuştur. Bu üç filtre flanşın üzerindeki conta içine yerleştirilerek üzerine ikinci bir conta ve flanş monte edilmiştir.

Partikül yakalama testlerinde nanofiber tabakadan önce hep aynı özellikte kontrol filtresi kullanıldığından nanopartikül filtrelemede altlığın önemi yoktur. Nitekim Leung ve arkadaşları [7] tarafından yapılan çalışmalarda altlığın filtrasyon etkinliğinin %2'den daha az olduğunu bildirmiştir. Bu nedenle, filtre numunelerinin partikül tutma verimi incelenirken, altlığın filtrasyon etkinliği ihmal edilmiştir. Dolayısıyla mikrofiber filtrelerin kontrol filtresi olarak kullanılması filtrelemeye katkı sağlamıştır. Bu katkı miktarının tespit edilmesi için mikrofiber filtreler de basınç kaybı ve partikül yakalama testine tabi tutulmuştur.

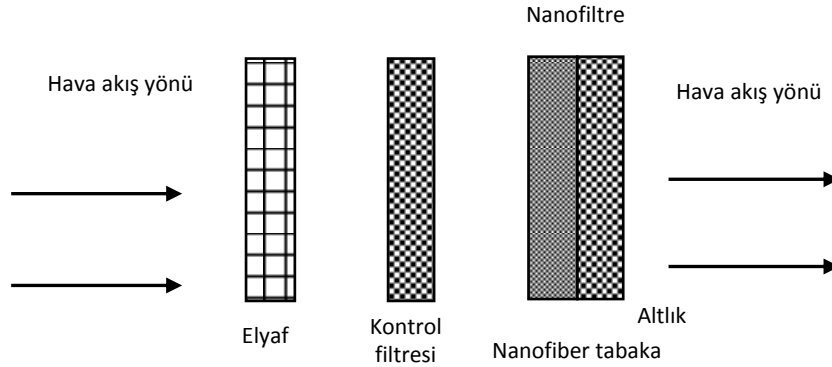
Deneye başlamadan önce, akışkan yatak, karışım kanalı vanası, boşta çalıştırma hattı ve orifis çıkış vanası açılmış, diğeri kapatılmıştır. Partikül yakalama deney düzeneği girişindeki küresel ve şiber vana hava basıncı 2-2.5 bar olacak şekilde yavaşça açılmıştır. Regülatör yavaşça açılarak, havanın akışkan yatak ve karışım kanalına girmesi sağlanmıştır.



Şekil 3: Basınç kaybı deney setinin şematik görünüşü



Şekil 4: Partikül yakalama deneysel sisteminin şematik görünüşü



Şekil 5: Partikül testinde filtrelerin yerleşim sırası şematik gösterim

Tablo 6: Partikül yakalama testinde filtre numunesi bölümüne konulan filtrelerin yerleşim sırası

Numune no	Ön Filtreleme	Kontrol filtresi	Test filtresi	Nanofiber tabaka ağırlığı (g/m ²)
1	Elyaf filtre	Spunbond	Nanofiber tabaka	2
2	Elyaf filtre	Spunbond	Nanofiber tabaka	2.5
3	Elyaf filtre	Spunbond	Nanofiber tabaka	3
4	Elyaf filtre	Spunbond	Nanofiber tabaka	3.2
5	Elyaf filtre	Monofilament	Nanofiber tabaka	4
6	Elyaf filtre	-	H13 HEPA filtre	
7	Elyaf filtre	-	Ergitme-Üfleme	
8	Elyaf filtre	-	Spunbond	
9	Elyaf filtre	-	Monofilament	



Şekil 6: Birinci nanofiltrenin (2 g/m²) partikül yakalama deneyine başlamadan önce test cihazına yerleştirilmiş durumu

Karışım kanalında havayla karışan CaCO₃, karışım odasına girmiş ve burada homojen CaCO₃nanopartiküllü hava elde edilmiştir. Homojen dağılımlı CaCO₃nanopartiküller, boşta çalıştırma hattından suyun içine doğru ilerlemiştir. Bu şekilde deney sistemi, kararlı rejime geçmesi için 2-3 dak. çalıştırılmıştır. Sistem kararlı hale geçtikten sonra, regülatör yavaşça kısılarak, partikül boşatma vanası kapatılmıştır. Filtre vanası yavaşça açılarak filtre numunesine CaCO₃nanopartikülleri gönderilmiştir. Hava debisi, orifis manometresindeki fark basıncı 15 mmSS olacak şekilde regülatör ayarlanmıştır. Kronometre çalıştırılmış, filtre numunesine bağlı manometreden basınç kaybı okunarak not edilmiştir. Ardından orifis çıkış vanası kapatılmış, filtre çıkış vanası açılmıştır. Beş dakika boyunca nanofiber filtre numuneleri üzerine CaCO₃ nanopartiküller gönderilmiş, sonrasında filtre çıkış vanası kapatılarak orifis hattı vanası açılmış test numunesi basınç kaybı not edilmiştir. Partikül boşta çalıştırma vanası açılarak, filtre vanası kapatılmıştır. Sistem çalışmaya devam ederken kontrol filtresi ve filtre numunesi ile filtre çıkışında bulunan sıkıştırılmış elyaf filtreden veya siklondan geçen partikül miktarı hassas terazide birkaç defa tartılmış, ortalama ağırlıklar not edilmiştir. Böylece toplamda yirmibeş dakikalık filtre performans deneyinin ilk beş dakikalık kısmı bitirilmiştir. Bu şekilde ortalama beş defa filtre numuneleri, partikül tutma testine tabi tutularak, oluşan ilave basınç kaybı ve partikül kazanımları not edilerek performans deneyleri tamamlanmıştır.

3. Tartışma ve Sonuç

Nanofiltreler, H13 HEPA filtre, G2 ve G4 sınıfı mikrofiltrelerin aralarındaki farkı görebilmek amacıyla performans testleri yapılmıştır. Performans testleri basınç kaybı ve partikül testlerinden oluşmaktadır. Basınç kaybı testinde, filtreye temiz hava gönderilerek filtrelerde oluşan basınç kaybı ölçülmüştür. Partikül tutma testinde ise, partiküllü hava kullanılarak zamana ve basınca bağlı tutulan partikül miktarı belirlenmiştir. Basınç kaybı testi, 0.3 m/s, 0.8 m/s ve 1.3 m/s; partikül tutma testi 0.3 m/s

alın hızlarında yapılmıştır. Partikül olarak suyu uçurulmuş 80 nm ile 120 nm boyut aralığında küresel formda CaCO₃ nanopartiküller kullanılmıştır. CaCO₃ nanopartikülleri uçurmak amacıyla akışkan yataktan faydalanılmıştır. Akışkan yatakla CaCO₃ nano partikülleri kolayca uçurularak havayla karıştırılmış ve filtre numunelerine gönderilmiştir. Partikül tutma testi, filtrenin tutulan partikül karşısında basınç kaybı değişimini, dolayısıyla filtrenin nasıl davrandığını göstermiştir. Performans deneyleri sonucunda üretilen nanofiltrelerden en yüksek basınç kaybının 1034 mmHgS ile birinci numunede 1.3 m/s alın hızında, en düşük basınç kaybının ise 8 mmHgS ile ikinci numunenin 0.3 m/s alın hızında meydana geldiği belirlenmiştir. Partikül tutma testinde ise dördüncü numune tıkanmış, üçüncü numune tıkanmaya meyilli olduğu tespit edilmiş, beşinci, altıncı ve ikinci numuneler iyi bir performans sergilemiştir. Nanofiltrelerin yakaladığı partikül miktarı ile basınç kaybı değişimi Şekil 7 de verilmiştir.

Literatürde olduğu gibi, nanofiltrelerde yakalanan partikül miktarı ve basınç kaybı, mikrofiltrelere göre daha yüksektir. Fiberlerin dolayısıyla gözeneklerin küçülmesi nedeniyle hava akışı zorlaştırmıştır. Ayrıca filtrelerde alın hızının artmasıyla, hava fiberlere hızla çarptığından hızı azalmış bu nedenle basınç kaybı yükselmiştir (Tablo 7).

Filtre performans testleri için montajı, işletmesi basit ve ucuz bir deney seti kurulmuştur. Partikül tutma deneylerinde nanopartikül olarak toksin olmayan CaCO₃ kullanılmış, bunu uçurmada ise akışkan yataktan faydalanılmıştır. Kurulan bu deney seti farklı filtrelerin basınç kaybını ve partikül yakalama performanslarını karşılaştırmada oldukça başarılı olmuştur.

Filtre performans deneylerinde, nanofiber kesit alanı (nanofiber tabaka kalınlığı) arttıkça, nanopartiküllerin filtreden geçeceği yol uzamış ve kısa bir süre sonra tıkanma gerçekleşmiştir. Tıkanma sonucu basınç çok hızlı bir şekilde artmış, yakalanan partikül miktarı pek değişmemiştir. Bununla birlikte, az miktarda nanofiber kaplanan üçüncü nanofiltre performansının çok fazla arttırmadığı görülmüştür. Bu yüzden, nanofiber kaplama ağırlığının gereğinden az veya fazla olmaması gerekir. Az kaplanan nanofiber tabakanın filtre performansına katkı sağlamadığı, çok kaplanan nanofiber tabakanın ise, tıkanarak ömrünü kısa sürede doldurduğu, optimum filtrelemenin, orta dereceli nanofiber çapında (200 nm) ve kaplama ağırlığında (2.5 g) olduğu tespit edilmiştir.

Genel olarak küçük çaptaki nanofiberlerden oluşan nanofiltreler ince tabaka halinde, büyük çapa sahip nanofiberlerin oluşturduğu nanofiltreler kalın tabaka halinde kaplanarak kullanılması filtreleme performansını yükseltmiştir. Nitekim büyük çapa

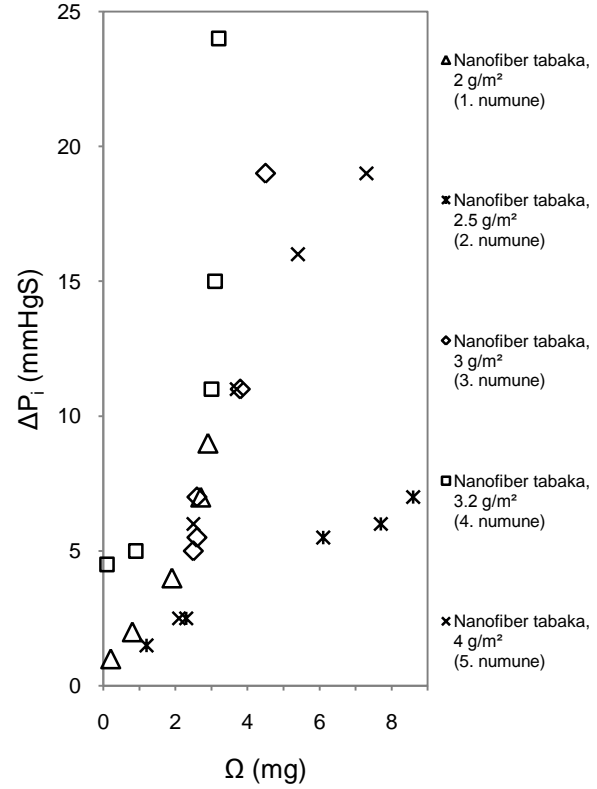
sahip H13 sınıfı HEPA filtrenin kalın olması ve 200 nm çapa sahip ikinci numunenin orta kalın olması durumlarında filtreleme performanslarının yükselttiği görülmüştür.

Nanofiber içindeki boncuklu yapı, filtreleme kalitesini genellikle olumlu yönde etkilemiştir. Etkin filtrasyon için, nanofiber tabakasının büyük (5-8 μm) ve düzgün dağılımlı boncuklu yapıya sahip olması gerekir. Nitekim bu durum ikincinin partikül tutma testinde görülmüştür. Fakat nanofiltrenin büyük boncuklu olması yüksek performans için yeterli değildir. Bunun yanında nanofiberlerin optimum kalınlıkta kaplanmış olması gerekir.

Spunbond altlıklar, nanofiltre olarak en iyi performansı sağlamıştır. Bu, spunbond altlığın rijit, mukavim ve yüzeyinin pürüzlü olmasından kaynaklanmıştır. Bu nedenle herhangi bir katlama yapılmaksızın düz bir konstrüksiyonda iken 1 atm'den daha yüksek basınçlara dayanmış ve nanofiltre tabakayı bırakmamıştır. Spunbond mikro filtre nanofiltre ile iyi uyum sağlamış ve kolay kolay birbirinden ayrılmamıştır.

Birinci nanofiber tabakanın az miktarda kaplanmasıyla ince bir tabaka elde edilmiş bu nedenle fazla nanopartikül yakalanamamıştır. Nanofiber kaplama ağırlığının artmasıyla kritik bir değere kadar yakalanan nanopartikül miktarı artmış, daha sonra hızlı bir şekilde azalmıştır. Bunun nedeni nanofiber tabaka ağırlığının artmasıyla nanofiber

tabaka kalınlaşmış ve filtre geçirgenliği azaldığı için yakalanan nanopartikül miktarı azalmıştır.



Şekil 7: Nanofiltrelerin yakaladığı partikül miktarı ile basınç kaybı değişimi

Tablo 7: Partikül yakalama testinde filtre numunesi basınç kaybı değişimi

Num.no	Ağırlık (g/m^2)	$\text{Ø}_{\text{ort.}}$ (nm)	$\Delta P_{\text{ort.}}$ (mmHgS)	ΔP_i (mmHgS)	Ω (mg)	t_p (dak.)
1	2	200	1.5	1	0.2	5
				2	0.8	10
				4	1.9	15
				7	2.7	20
				9	2.9	25
2	2.5	193	7.5	1.5	1.2	5
				2.5	2.3	10
				5.5	6.1	15
				6	7.7	20
				7	8.6	25
3	3	98	200	5	2.5	5
				5.5	2.6	10
				7	2.6	15
				11	3.8	20
				19	4.5	25
4	3.2	77	77.5	4.5	0.1	5
				5	0.9	10
				11	3	15
				15	3.1	20
				24	3.2	25
5	4	137	20	2.5	2.1	5
				6	2.5	10
				11	3.7	15
				16	5.4	20
				19	7.3	25

Filtrenin şişmesi, performans artırıcı bir rol oynamıştır. Filtrelerin şişmesiyle, gözenekler açılmış, basınç kaybı biraz düşerken, yakalanan partikül miktarı artmıştır. Filtrenin şişmesi ile oluşabilecek mikro çatlaklardan korunmak için nanofiberlerin yeterince mukavim ve sünek olmalıdır. Bunun için nanofiber kaplama kalınlığının orta seviyede olması gerekir. Aksi halde nanofiberler yırtılarak ömrünü kısa bir sürede tamamlar.

Nanofiber tabaka tarafından tutulamayan, nanofiltreden geçen CaCO_3 nanopartiküllerinin miktarı su, sıvı yağ, siklon ve sıkıştırılmış keçe kullanılarak belirlenememiştir. Filtreden geçen partikül boyutunun tespit edilememesi, filtreden geçen partikül boyutunun dolayısıyla miktarının çok az olmasıdır.

Nanofiber tabaka altlıklara kaplandıktan sonra altlık arkada kalacak şekilde konulmalıdır. Nanofiltre önüne kalın kesitli ve küçük çaplı (mikro seviyede) kontrol filtresi konması, filtrenin filtreleme performansını artırıcı bir rol oynamıştır. Bunun nedeni, kalın ve küçük çaplı bir mikro filtreden çıkan nanopartikül yavaşlayarak ve bir kısmı tutularak nanofiltreye girmesidir.

Partikül tutma testinden sonra filtre numunelerini düzleştirecek, partikülleri dökülecek şekilde konulmamasına özen gösterilmelidir. Bunun için her bir numune yeterli büyüklükte bir kaba ayrı ayrı konmalıdır.

Deney cihazında kullanılan vanalar yavaşça açılıp kapatılmalıdır. Aksi halde, manometrelerin içindeki akışkanlar havayla dışarı kaçabilir, filtreler patlayabilir, ani basınç artışından sızdırmazlık azalabilir.

Filtrelerin takıldığı flanşlarda cıvata-somun bağlantısı kullanılmıştır. Deney esnasında cıvataları söküp

takmak zahmetli ve zaman alıcı bir yöntem olduğundan, flanşların yeterince büyük olması, cıvataların flanşlara kaynak edilmesi ve kelebek somun kullanılması tavsiye edilebilir.

Teşekkür

Bu çalışma Selçuk Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü Proje No: 11401130 tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Duran K, Öneş AM. "Nonwovenların Filtrasyonda Kullanımı". *TekstilveKonfeksiyonDergisi*, V.5, 337-342, 1993.
- [2] Vaughn E, Ramachandran G. "Fiberglass Synthetic Air Filtration Media". *International Nonwovens Journal*, 11: 3, 41-51, 2002.
- [3] Frank KK. "From Textile to Geotextiles". *Seminar in Honour of Prof. Robert Koerner*, Drexel University, Philadelphia, USA, 2004.
- [4] Hardman E. *Handbook of Technical Textiles*. Edited by Horrocks AR, Anand SC, Woodhead Publishing, Textiles in Filtration, 317-357, 2000.
- [5] Hutte, IM. *Handbook of Nonwoven Filter Media*. Elsevier Science & Technology Books, USA, 2007
- [6] Sutherland, K., Purchas, D.B., *Handbook of Filter Media*. 2nd. Edition, Elsevier, 2002.
- [7] Leun, WWF, Hung CH, Yuen PT. "Effect of face velocity, nanofiber packing density and thickness on filtration performance of filters with nanofibers coated on a substrate". *Separation and Purification Technology*, (71) 30-37, 2010.
- [8] Dincer, K, Önal, G, Akdemir, A, Selbes, M. "Elektro-eğirme yöntemiyle nanofiber tabakalı hava filtresi üretimi ve karakterizasyonu". *SUJEST*, 4: 4, 2147-9364, 2016.