

İNCE YALITKAN TABAKALARIN ELEKTRİKSEL DAYANIMININ BELİRLENMESİNDE DENEY KOŞULLARININ ETKİSİ

Özcan KALENDERLİ
Elektrik Mühendisliği Bölümü
Elektrik - Elektronik Fakültesi
İstanbul Teknik Üniversitesi
80626 Maslak/İstanbul
ozcan@elk.itu.edu.tr

Güneş YILMAZ
Ar-Ge Bölümü
Türk Pirelli Kablo
16941 Mudanya/Bursa
gunes.yilmaz@simko.com.tr

ABSTRACT

The short-time electric strength (E_d) of thin insulating films as thin polyester films is dependent on the various factors as in the other polymers. In this paper, the ac electric breakdown strength of thin polyester films as a function of sample thickness in air and oils with the plane-plane and the sphere-plane electrode configurations was investigated. The electric strength of the polyester film is reduced with increasing thickness of the film. E_d is more dependent on the thickness d than on the area of the samples. E_d is affected by the electrode configuration and the permittivity and electric strength of the surrounding medium or the immersion medium. E_d is usually higher when samples are tested in oil than in air. E_d is higher when samples are tested with the sphere-plane configuration than with plane-plane.

1. GİRİŞ

Elektriksel delinme, elektrik aygıtlarının ve elemanlarının ömrünü sınırlayan en önemli olaylardan biridir. Bu nedenle yalıtkanların elektriksel delinmesi ve delinme dayanımları, yıllar boyunca pekçok araştırmaya konu olmuştur. Katı yalıtkanlarda elektriksel delinme olayı, çok ayrıntılı olarak incelenmiş ve makalelerde özetlenmiştir [1-3]. Buna karşılık, ince yalıtkan tabakaların, özellikle polyester filmlerin, delinme dayanımı üzerine kalınlığın etkisi ile ilgili çok az çalışma görülmektedir [4, 5].

Delinme dayanımı, yalıtımın ısı, elektriksel ve mekanik yaşlanmasını tanıtan ve yalıtkan malzemeyi veya sistemi karakterize eden temel bir özelliktir. Yalıtkan maddelerin kalitesinin bir ölçütüdür. Bu nedenle, elektriksel yalıtkan maddelerin kısa süreli başarımını değerlendirmek amacıyla, delinme gerilimi veya delinme dayanımı ölçmeleri yapılır. Delinme dayanımını ölçmek için birçok ulusal ve uluslararası standardda ölçme yöntemi verilmiştir [9-13].

Bu çalışmada, ince yalıtkan tabaka malzemesi olarak polyester filmler göz önüne alınmıştır. Polyester, iyi dielektrik özelliklerine ve yüksek yüzeyel dayanımına sahip olup kimyasal etkilere karşı dayanıklı bir malzemedir. Dikarboksilik asitlerin ve dihidrik alkollerin yoğunlu-

ruması ile elde edilen tüm termoset plastiklerin özelliklerini taşır. Polyester, doymuş ve doymamış tür olarak iki sınıfa ayrılır. Doymamış polyester cam tabakalarında veya cam liflerinde takviye malzemesi olarak kullanılır. Bunun dışında, elektriksel ve mekanik dayanımı yeterli küçük elektriksel elemanlar yapmak için yaygın olarak kullanılır. Doymuş polyesterler, fiber ve film yapımında kullanılır. Polyester fiber, elektriksel amaçlı kağıt, halı ve giysi yapmada kullanılır. Film polyester ise motor, kondansatör ve transformatörlerdeki kablo ve yalıtılmış tellerde kullanılır. Polyester film, çoğunlukla kağıt yapımında kullanılır. Endüstriyel frekanslarda, polyesterin dielektrik kaybı çok düşüktür. Polyesterin dielektrik kayıpları sıcaklık arttıkça azalır. Yüksek yumuşama sıcaklığı nedeniyle, kağıt yalıtımının çalışma sınırının üstündeki sıcaklıklarda kullanılması mümkün kılar. Polyesterin hava koşullarına karşı direnci yüksektir. Bu yüzden, değişik hava koşullarına maruz uygulamalarda kullanılmaktadır [4].

Cygan ve Laghari, polipropilen (PP, polypropylene) filmin numune kalınlığının, etkin elektrot alanının büyümesi ile orantılı olarak, artması durumunda delinme dayanımının daha hızlı azaldığını görmüştür [6]. Buna karşılık, Morton ve Stannett ise, polietilen tereftalat (PET, polyethylene terephthalate), polistiren (PS, polystyrene) ve polietilen (PE, polyethylene) filmlerin darbe delinme dayanımlarının numune kalınlığına değil, numune hacmine bağlı olduğunu belirtmektedir [7].

Helgee ve Bjellheim ise, 50 Hz frekanslı alternatif gerilimdeki kısa süreli delinme dayanımı ile yalıtkan (film) kalınlığı arasında üstel bir bağıntı geliştirmiştir. Bu bağıntıyı, kalınlıkları 0,013 ile 0,270 mm arasında değişen beş aromatik polimer film numunesi ile, temiz mineral yağ içine konmuş 5 mm çapında silindirik elektrotlar arasında yaptıkları deneyler sonunda elde etmişlerdir [8].

Yalıtkan malzemelerin delinme dayanımı ölçmelerinde, ölçme sonuçları pekçok etkenden etkilenebilir. Sunulan bu deneysel çalışmada üç amaç seçilmiştir:

- 1) Numune kalınlığının ince polyester filmlerin delinme dayanımına etkisini araştırmak;

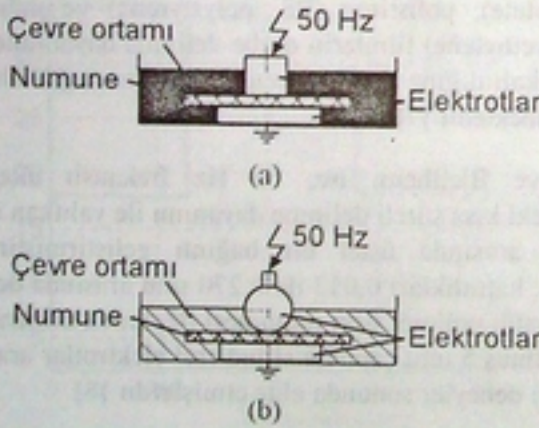
- 2) Deneylerde kullanılan elektrot sisteminin geometrisinin etkisini incelemek ve
- 3) Delinme deneylerinde deney ortamının veya elektrotları çevreleyen ortamın yani daldırma ortamının rolünü belirlemektir.

Aşağıda bu amaçlar doğrultusunda yapılan deneylerle ilgili bilgiler ve deney sonuçları sunulmuştur.

2. DENEY BİLGİLERİ

Deneylerde, yalıtkan malzeme olarak polyester kullanılmıştır. Polyester malzemeden, kalınlıkları 0,012, 0,023, 0,036, 0,050, 0,100 ve 0,200 mm ve kenar uzunlukları 100 mm olan kare şeklinde numuneler hazırlanmıştır. Numune kalınlıkları, 0,001 mm duyarlılıkla kalınlık ölçen bir düzlemle ölçülmüştür. Numuneler deneylerden önce, ön koşullandırma amacıyla, sıcaklığı $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ve bağıl nemi $50 \pm 5\%$ olan bir fırın içinde yaklaşık 24 saat süreyle tutulmuştur [9-13].

Yalıtkan filmlerin delinme dayanımı ölçmelerinde elektrot sistemi geometrisinin sonuçlara etkisini incelemek amacıyla iki tür elektrot sistemi kullanılmıştır. Kullanılan elektrot sistemlerinden biri, küre-düzlem elektrot sistemi diğeri düzlem-düzlem elektrot sistemidir (Şekil 1). Küre-düzlem elektrot sisteminde, 20 mm çapında bir küre elektrot ile 75 mm çapında, 15 mm yüksekliğinde ve kenarları 3 mm eğrilik yarıçapında yuvarlatılmış, disk şeklinde bir düzlem elektrot kullanılmıştır. Eşit olmayan büyüklükteki düzlem elektrotlardan meydana gelen düzlem-düzlem elektrot sisteminde ise, 25 mm çapında ve 25 mm yüksekliğinde silindirik (disk) şeklinde bir düzlem elektrot ile küre-düzlem elektrot sistemindeki düzlem elektrot kullanılmıştır. Sözü edilen tüm elektrotlar pirinç malzemeden yapılmış ve deneylerde çeksenli olarak düzenlenmişlerdir.



Şekil 1. Elektrot sistemleri:

(a) Düzlem-düzlem; (b) Küre-düzlem.

Delinme sonuçlarına elektrotları ve numuneyi çevreleyen ortamın yani daldırma ortamının etkisini incelemek için üç farklı ortamda deneyler yapılmıştır. Bu ortamlardan birincisi hava, ikincisi mineral transformatör yağı ve üçüncüsü de silikon transformatör yağıdır. Deneylerde, yeni, temiz ve ticari kalitede yağlar kullanılmıştır. Çizelge 1'de, deneyler-

de kullanılan yağların 50 Hz'deki bağıl dielektrik sabitleri ve dielektrik kayıp katsayıları verilmiştir.

Çizelge 1. Kullanılan yağların dielektrik özellikleri.

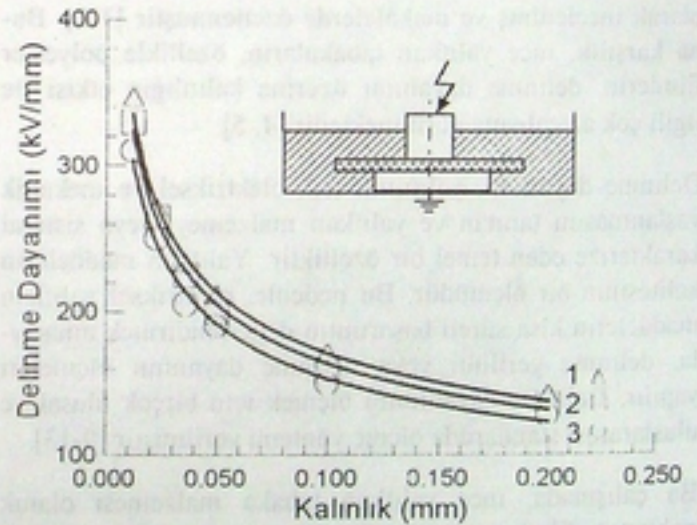
Yağ türü	Bağıl dielektrik sabiti	Dielektrik kayıp faktörü
Mineral yağ	2,24	5×10^{-4}
Silikon yağ	2,65	3×10^{-4}

Yalıtkan filmlerin endüstriyel (50 Hz) frekanslı kısa süreli delinme dayanımı ölçmelerinde 50 kV'luk bir deney transformatöründen yararlanılmıştır. Yüksek gerilim, üst elektroda uygulanmış, alttaki elektrot topraklanmıştır. Tüm deneyler, hava basıncı ~ 100 kPa, sıcaklığı $\sim 22^\circ\text{C}$, bağıl nemi %50-65 arasında değişen laboratuvar koşullarında yapılmıştır.

Endüstriyel frekanslı delinme gerilimi ölçmelerinde gerilim sıfırdan başlayarak delinme olana kadar 500 V/s hızla sürekli yükseltilerek uygulanmıştır. Gerilim değerleri, etkin değer cinsinden ölçülmüştür. Deney, her film kalınlığı için 10 kez tekrarlanmış ve delinme gerilimi 10 okumanın ortalamasından belirlenmiştir. Okuma değerlerindeki dağılım, ortalama değerin yaklaşık $\pm 5\%$ 'i içinde kalmıştır. Ölçülen delinme gerilimi, tabaka (film) kalınlığına bölünerek yalıtkan filmin delinme dayanımını belirlenmiştir.

3. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Polyester filmlerin endüstriyel frekanslı delinme dayanımı ölçmelerinin sonuçları Şekil 2 ve 3'te gösterilmiştir. Bu şekillerdeki her nokta 10 okumanın ortalamasını göstermektedir. Şekil 2 ve 3'ten film kalınlığı arttıkça delinme dayanımının azaldığı görülmektedir.



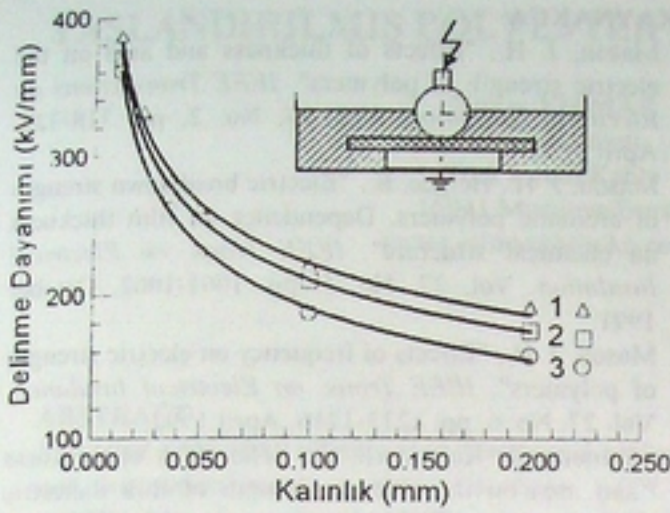
Şekil 2. Film kalınlığı ile endüstriyel frekanslı delinme dayanımının değişimi.

Kullanılan elektrot sistemi: düzlem-düzlem

(1) Silikon yağında,

(2) Transformatör yağında,

(3) Havada.



Şekil 3. Film kalınlığı ile endüstriyel frekanslı delinme dayanımlarının değişimi.
Kullanılan elektrot sistemi: küre-düzlem
(1) Silikon yağında,
(2) Transformator yağında,
(3) Havada.

3.1 Yalıtkan Tabaka Kalınlığının Etkisi

Şekil 2 ve 3'ten, film kalınlığının ince yalıtkan (polyester) filmlerin delinme dayanımına belirgin bir etkisi olduğu açıkça görülmektedir. Numune filmlerin kalınlıkları 0,012 mm ile 0,200 mm arasında değişmektedir. Filmlerin delinme dayanımı, film kalınlığı arttıkça azalmaktadır. Film kalınlığı 0,012 mm'den 0,200 mm'ye kadar değişirken delinme dayanımındaki azalmanın yüzdesi, küre-düzlem elektrot sistemi ile yapılan deneylerde %52, düzlem-düzlem elektrot sistemi ile yapılan deneylerde %58 civarında olmuştur.

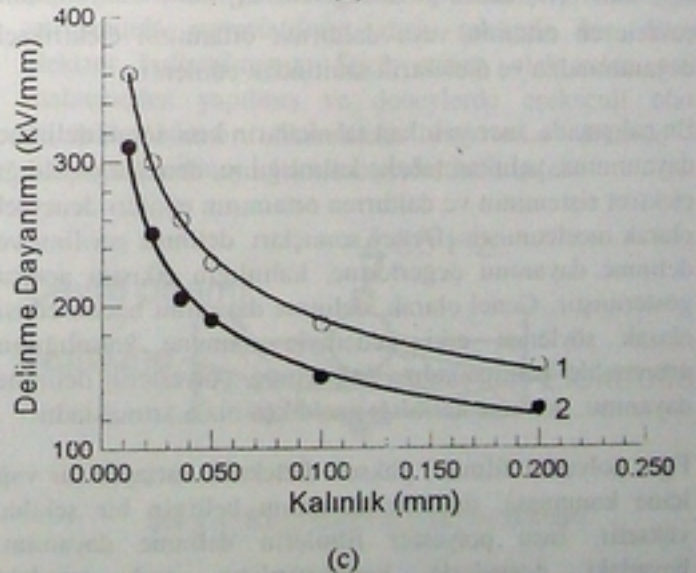
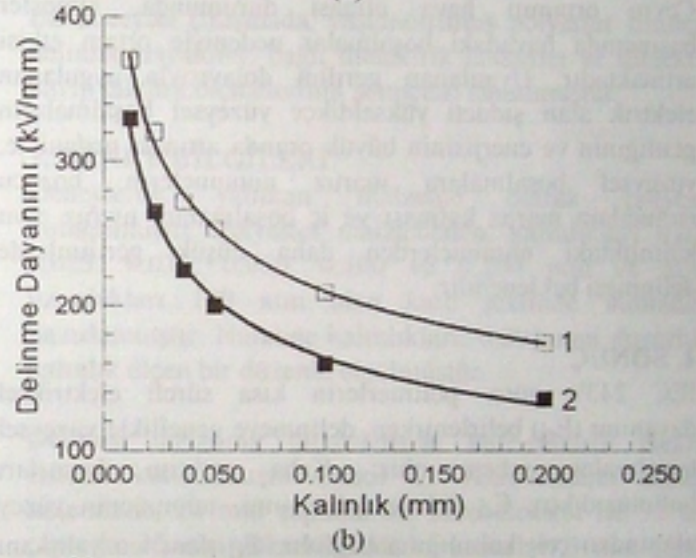
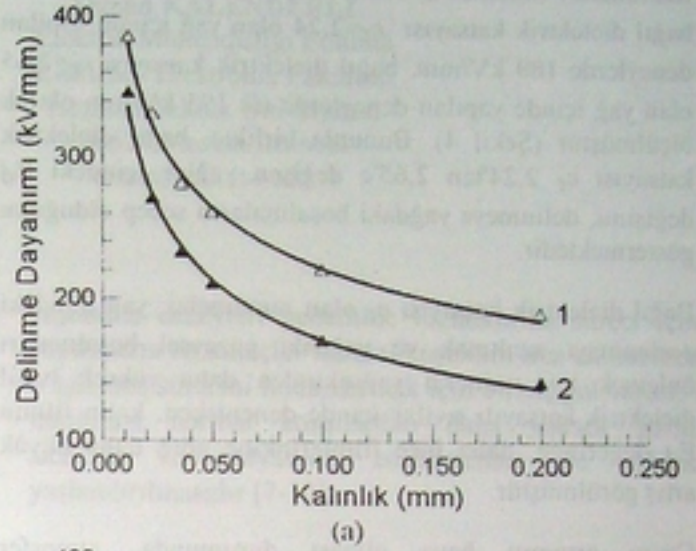
3.2 Elektrot Geometrisinin Etkisi

Elektriksel dayanım (E_d) ölçmeleri genellikle düzlem-düzlem elektrot sistemi kullanılarak yapılır. Bu uygulama, bir standard yöntem olarak benimsenmiştir [9, 12, 13]. Bilindiği gibi elektrik alanı, elektrot geometrisine (sistemine) ve numune kalınlığına veya elektrot açıklığına bağlıdır. Sınırlı boyutlu elektrotların kenarlarında yüksek elektrik alanları ortaya çıkar. Bu alanların etkisini değerlendirmek için, elektriksel dayanım ölçmeleri, iki farklı elektrot sistemi kullanılarak yapılmıştır. Şekil 2 ve 3'ten görüleceği gibi, küre-düzlem elektrot sistemi ile yapılan deneylerde düzlem-düzlem elektrot sistemi ile yapılan deneylerdekine göre daha yüksek E_d delinme dayanımı değerleri elde edilmiştir.

3.3 Deney Ortamının Etkisi

Delinme dayanımı, elektrotları ve numuneyi çevreleyen ortamdan yani deney ortamından etkilenmektedir. Ortamın türüne ve özelliğine göre delinme dayanımındaki azalma %30'a kadar değişmektedir. Numune, yağ içinde denetlenirken, E_d aynı numune havada denetlenirkenki durumdan çok daha yüksektir. Polyester üzerindeki deneyler, küre-düzlem

elektrot sistemi ile, ve sıvı içindeki elektriksel zorlanmayı küçük tutmak için polyester filmden



Şekil 4. Film kalınlığı ile endüstriyel frekanslı delinme dayanımlarının değişimi.

(a) Silikon yağında,

(b) Transformator yağında,

(c) Havada.

1: Küre-düzlem elektrot sistemi ile.

2: Düzlem-düzlem elektrot sistemi ile.

daha yüksek dielektrik katsayılı sıvı içinde yapılmıştır. 50 Hz alternatif gerilimde, 0,2 mm kalınlığında polyester numuneleri üzerindeki deneylerde E_d delinme dayanımı, bağıl dielektrik katsayısı $\epsilon_r=2,24$ olan yağ içinde yapılan deneylerde 180 kV/mm, bağıl dielektrik katsayısı $\epsilon_r=2,65$ olan yağ içinde yapılan deneylerde ise 195 kV/mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4). Bununla birlikte, bağıl dielektrik katsayısı ϵ_r 2,24'ten 2,65'e değişen yağlar içindeki E_d değişimi, delinmeye yağdaki boşalmaların sebep olduğunu göstermektedir.

Bağıl dielektrik katsayısı ϵ_r olan numuneler, yağ içindeki zorlanmayı azaltmak ve yağdaki yüzeysel boşalmaları önlemek için mineral yağından daha yüksek bağıl dielektrik katsayılı sıvılar içinde denenirken, kalın filmin E_d değerinde, daha ince filmlerinkine göre daha büyük artış görülmüştür.

Çevre ortamın hava olması durumunda, atmosfer basıncında havadaki boşalmalar nedeniyle ortam etkisi artmaktadır. Uygulanan gerilim dolayısıyla uygulanan elektrik alan şiddeti yükseldikçe yüzeysel boşalmaların genliğinin ve enerjisinin büyük oranda artması nedeniyle, yüzeysel boşalmalara maruz numunelerin, bozucu ısınmalara maruz kalması ve iç boşalmalara maruz aynı kalınlıktaki numunelerden daha düşük gerilimlerde delinmesi beklenebilir.

4. SONUÇ

IEC 243'e göre, polimerlerin kısa süreli elektriksel dayanımı (E_d) belirlenirken, delinmeye genellikle yüzeysel boşalmalar sebep olur. Kaba yalıtım kusurları bulunmadıkça, E_d delinme dayanımı, numunenin yüzey alanından çok kalınlığına bağlıdır. E_d denenen yalıtkanı çevreleyen ortamın veya daldırma ortamının elektriksel dayanımından ve dielektrik sabitinden etkilenir.

Bu çalışmada, ince yalıtkan tabakaların kısa süreli delinme dayanımına, yalıtkan tabaka kalınlığının, deneyin yapıldığı elektrot sisteminin ve daldırma ortamının etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deney sonuçları, delinme gerilimi ve delinme dayanımı değerlerine, kalınlığın etkisini açıkça göstermiştir. Genel olarak, delinme dayanımı hacim etkisi olarak söylenen etki nedeniyle numune kalınlığının artması ile azalmaktadır. Yağ içinde, polyesterin delinme dayanımı, numune kalınlığı azaldıkça hızla artmaktadır.

Eğer polyester filmler, yüksek dielektrik katsayılı bir yağ içine konmuşsa, delinme dayanımı belirgin bir şekilde yükselir. İnce polyester filmlerin delinme dayanımı, havadaki deneylerle karşılaştırılırsa, yağ içindeki deneylerde daha yüksektir.

Deneyler yüzeysel boşalmaları önleyici koşullarda yapılsa bile, polimerlerin endüstriyel frekanslı delinme dayanımı, elektrot alanından çok, numune kalınlığına büyük bağlılık gösterebilir.

5. KAYNAKÇA

- [1] Mason, J. H., "Effects of thickness and area on the electric strength of polymers", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 26, No. 2, pp. 318-322, April 1991.
- [2] Mason, J. H., Helgee, B., "Electric breakdown strength of aromatic polymers, Dependence on film thickness and chemical structure", *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. 27, No. 5, pp. 1061-1062, October 1991.
- [3] Mason, J. H., "Effects of frequency on electric strength of polymers", *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. 27, No. 6, pp. 1213-1216, April 1992.
- [4] Yılmaz, G., Kalenderli, Ö., "The effect of thickness and area on the electric strength of thin dielectric films", *1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Vol. 2, pp. 478 - 481, Montréal, Québec, Canada, 16 - 19 June 1996.
- [5] Mazzanti, G., Montanari, G. C., Peruzzotti, F., Zaopo, A., "Some remarks regarding the test cells used for electric strength measurements", *1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Vol. 2, pp. 474 - 477, Montréal, Québec, Canada, 16 - 19 June 1996. [4] IEC 674, "Specification for plastic films for electrical purpose", 1974.
- [6] Cygan, S., Laghari, J. R., "Dependence of the electric strength on the thickness, area and volume of polypropylene", *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. 22, No. 4, pp. 835-837, 1987.
- [7] Morton, V. M., Stannett, A. W., "Volume dependence of electric strength of polymers", *Proceedings IEE*, Vol. 115, pp. 185-187, 1968.
- [8] Helgee, B., Bjellheim, P., "Electric breakdown strength of aromatic polymers, Dependence on film thickness and chemical structure", *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. 26, No. 6, pp. 1147-1152, December 1991.
- [9] TS 5119, Katı elektrik yalıtım malzemelerinin şebeke frekansındaki elektrik dayanımının belirlenmesi için deney metotları, Mart 1987.
- [10] TS 5120, Katı elektrik yalıtım malzemelerinin deneylerinden önce ve deneyleri sırasında uyulması gerekli standard şartlar, Mart 1987.
- [11] IEC 212, "Standard conditions for use prior to and during the testing of solid electrical insulating materials", 1971.
- [12] IEC 243-1, "Methods of test for electric strength of solid insulating Materials, Part 1: Tests at power frequency", 1988.
- [13] ANSI/ASTM D 149-75, "Standard test methods for dielectric strength of electrical insulating materials at commercial power frequencies", July 1975.