

Yüksek Gerilim Altında Organik izolasyon Malzemelerinde İzolasyon Bozulma Şekilleri

Yazan: Prof. Dr. Robert WILKINS
ODTÜ

Çeviren: Prof. Dr. Ahmet RUMELİ
ODTÜ

ÖZET

Bir polimerik izolasyon malzemesinin yüzeyine bitişik, iki elektrod arasında tutuşan bir deşarjın hemen altındaki bölgede sıcaklık ölçmelerinden, verilen bir izolasyon malzemesi için sabit kalan bir «izolasyon bozulma» sıcaklığı tarif edilebilmektedir. Bu sıcaklığın izolasyon malzemesinin termik ayrışma sıcaklığına bağlılığı gösterilmiştir. Belirli şekildeki bir izolasyon malzemesi için, izolasyon bozulma sıcaklığı ve malzeme içindeki ısı iletim alanının durumundan belirlenebilen bir «sınır» akımı vardır. Bu sonuçlar, izolasyon malzemesinin karbonlaşma ya da aşınma şeklinde bozulmasının anlaşılmasında ve sentetik reçine yapılı izolatörlerin tasarımında faydalı olmaktadır.

SUMMARY

Measurements of the temperature of the surface of polymeric insulating materials immediately under discharges between electrodes upon the surface show that a «breakdown» temperature can be defined, which is constant for each material. It is shown that this temperature is related to thermal decomposition of the insulating material. For any particular geometry, a «threshold» current exists for each material, which can be predicted from a knowledge of the heat conduction field in the material and the breakdown temperature. These results are useful in interpretation of tracking and erosion test results and for the design of insulators manufactured from synthetic resin.

1. GİRİŞ

Yüksek gerilimde kullanılan organik izolasyon malzemelerinin işletme şartlarında karbonlaşma

* Odamızın hazırladığı dizi teknik konferanslar serisinden 27 Aralık 1972 Çarşamba günü saat 14.00'te Mimarlar Odası Konferans Salonu'nda verilmiştir.

(tracking) şeklinde bozulmasına oldukça rastlanır. Karbonlaşma olayı izolasyonun yüzeyinde karbonize kanalların oluşmasına denilmektedir, iletken olan karbonize kanallar zamanla yüzey boyunca ve genellikle ağaç dallan şeklinde yayılarak kısa devrelere ve arızalara yol açarlar [1]. Karbonize kanalların başlamasından kısa devreye kadar geçen zaman, çevre şartla-

rına bağılı olarak bir kaç dakika ile bir kaç yıl olabilir.

Karbonlaşma olayına, izolasyonun yüzeyinde ıslak kirli şartlarda meydana gelen elektriksel deşarjlar sebep olur. ImA-IA arasında akım taşıyan bu tür deşarjların tutuşma süreleri bir kaç saniye olabilir. Deşarjlar kirli ıslak yüzeyin kısmi kuruması sonucu oluşan ve «kuru band» denen bölgeler boyunca tutuşur. Deşarjların tutuşmasından sonra yüzey kaçak akımı, deşarjlara seri ıslak kir bölgelerinin direnci ile sınırlanır.

Organik izolasyon malzemelerinin yüzeysel deşarjlara dayanım dereceleri değişiktir. Politetrafloretillen (ptfe) gibi bazı izolasyon malzemeleri yüzeysel deşarjlar altında hiç karbonlaşma göstermedikleri halde yüzeylerinde yalnızca «aşınma» (erozyon) görülür, izolasyon malzemelerini karbonlaşma ve aşınmaya karşı dayanım derecelerine göre sınıflamaya yanyan çeşitli milli ve uluslararası test metodları geliştirilmiştir.

Değişik test metodları yardımıyla bulunan sonuçlarla, test sonuçları ve işletme şartlarından edinilen tecrübe sonuçları arasında çok iyi uygunluk sağlanamamaktadır [2], izolasyon bozulma mekanizması dikkatlice incelenirse test sonuçları arasındaki farklılıkların nedenleri anlaşılabilir.

Bu yazıda sunulan çalışmada, izolasyon bozulmalarının aşağıdaki iki basit fiziksel olay yardımı ile açıklanabileceği gösterilmiştir:

a. izolasyon yüzeyinde tutuşan deşarj yüzeyin ısınmasına yol açar. Belirli yüzeysel sıcaklığın aşılması halinde izolasyon yüzeyinde termik ayrışma olur.

b. Termik ayrışmadan sonra, karbonlaşma ve ya aşınmadan hangisinin görüleceği izolasyon malzemesinin kimyasal yapısından anlaşılabilir. Daha önceki araştırmalarda; oksitleşme, ultraviyole (u. v) radyasyon ve deşarjın sebep olduğu aktif maddelerin izolasyon malzemelerinin bozulmasında önemli etkileri olduğu öne sürülmüştür [3]. Ancak, sunulan araştırma izolasyon bozulmasında yukarıda (a) ve (b) maddelerinde belirtilen termik mekanizma yanında diğer et-

kilerin ihmal edilebilir olduğunu göstermektedir.

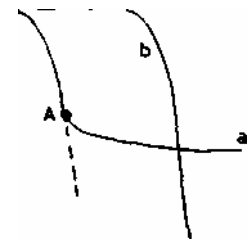
2. TERMO - GRAVİMETRİK ANALİZ

izolasyon malzemesinin bozulması termik mekanizma ile açıklanabilirse, termik mekanizma ile malzemenin klasik usullerle ölçülen termik stabilitesi arasında bir bağıntı kurmak mümkündür. Bu maksatla, termo-gravimetrik analiz (tga) metodu en uygun bulunmuştur [4]. Bu metodda, sıcaklığı sabit bir hızla (genellikle 6°C/dak) artırılan numune parçasının ağırlığı sürekli olarak kaydedilir.

Şekil 1, tipik tga eğrilerini göstermektedir, «a» malzemesi bir ön ayrışmadan sonra kalıntı bırakırken, «b» malzemesi tamamen yok olup uçmaktadır. Şekilden görüldüğü gibi ağırlık sıcaklıkla bir ayrışma noktasına kadar değişmemektedir. Ayrışma, ısıtma hızı ve numunenin ağırlığına bağılı olarak, 100°C civarı veya daha yüksek sıcaklıklarda başlamaktadır. Şekil 1'deki eğriler yardımıyla bir izolasyon malzemesinin termik stabilite endeksinin hesaplanması için çeşitli metodlar vardır. Bunlar için en basit ve en uygunu numunenin ağırlığının % 10'unu kaybettiği sıcaklığın dikkate alınmasıdır. Bu sıcaklık T₁₀ olarak gösterilecektir. Bütün hallerde bu sıcaklıkta numune ağırlığında ani değişim görüldüğünden, T_K iyice belirlenebilmektedir.

Ağırlık (%)

100



Sıcaklık

ŞEKİL 1. Havada tipik tga eğrileri:
a. Karbonlaşan malzemeler
b. Karbonlaşmayan malzemeler

Tablo 1, çeşitli izolasyon malzemeleri için ölçülen T_{50} değerlerini vermektedir:

TABLO 1:

izolasyon Malzemesi	
Polyvinülorit Polimetilmetakrilat	248
Polivinilasetat Penolik/lamine kağıt	285
Epoksi reçine 1 Epoksi reçine 2 Epoksi reçine 3 Epoksi reçine 4 Ebonit	307
Polipropilen Epoksi reçine 5 Poli karbonat Politetrafloretillen (ptfe) Cam	320
dolgulu ptfе	325
	342
	360
	362
3. DEŞARJLARIN İZOLASYON MALZEMESİNİ ISITMASI	364
	366

Termik ayrışmaya kadar geçen zaman basit deneysel maddeler üzerinde yapılan testlerle incelenmiştir [5]. Birinci modelde numune, içi boş silindirik şekilde hazırlanmış olup deşarj silindir eksenini boyunca iki pirinç elektrod arasında meydana getirilmiştir. Bu model, silindirin orta bölgesinde iyice tarif edilebilen bir termik durum sağlar. Diğer bir modelde numune (düzlemsel) levha şeklinde olup deşarj, ASTM-D495 [6]'de belirtildiği şekilde yüzeyde açıklığı 6,35 mm olan iki tungsten elektrod arasında meydana getirilmiştir. Bu halde yüzeyin termik durumunun belirlenmesi daha zor olmaktadır, ikinci durumda deşarjın dairesel bir ısı kaynağı şeklinde düşünülebileceği gösterilmiştir [5].

3.1 İzolasyon bozulma sıcaklığının ölçülmesi:

Yukarıda açıklanan modeller kullanarak, yüzey boyunca tutuşturulan belirli bir deşarj akımında, deşarj civarındaki yüzey sıcaklığı izolasyonun içine yerleştirilmiş 0,05 mm çaplı termokupl yardımıyla ölçülmüştür. (Termokuplun

yüzeye yerleştirilmesi halinde ölçülen sıcaklık yüzeysel sıcaklıktan çok deşarj sıcaklığı olmuş olacaktır).

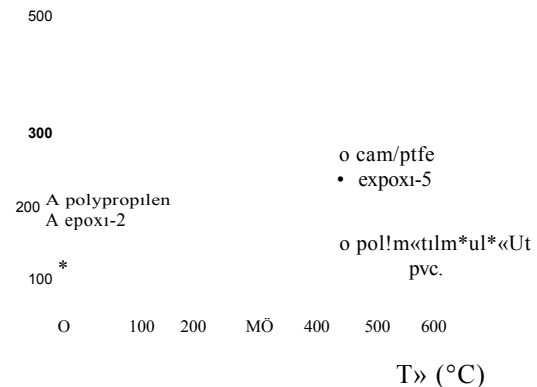
Isı akış denkleminin analitik çözümünden, termokupl yardımıyla okunan değerlerle gerçek yüzeysel sıcaklıklar arasında bağıntı kurulabilmiştir [5].

Ölçmelerden sıcaklığın başlangıçta beklendiği şekilde bir T_b sıcaklığına kadar arttığı ve sıcaklığın aniden ve çabukça artmasıyla termik ayrışmanın başladığı görülmüştür. T_b 'ye izolasyonun bozulma sıcaklığı denilmiştir. Altı farklı izolasyon malzemesi üzerinde yapılan testlerden verilen bir malzeme için T_b 'nin sabit kaldığı ve T_b ile T_a 'den bulunan T^* sıcaklığı arasında

$$T_b = T_a - 50 \quad (D)$$

şeklinde lineer bir bağıntının bulunduğu tesbit edilmiştir. Şekil 2, (1) nolu denklem ile belirlenen doğruyu göstermektedir.

Böylece deşarj altında izolasyonun bozulması ile termik ayrışma arasında bir bağıntı ortaya çıkmaktadır. (1) denkleminin ve T_b 'nin önemli fiziksel anlamları olmayıp, ampirik nitelikli oldukları bilinmelidir. Yukarıda açıklanan şekilde T_b 'nin ölçülmesi numunelerin hazırlanmasında ve testlerde zorluklara yol açmaktadır. Bu nedenle (1) denklemin sağlanması dolaylı bir metodla yapılmıştır. Bu metodda, T_b çok çeşitli izolasyon malzemeleri için aşağıda açıklanan akım-izolasyon süresi karakteristiklerinden bulunmuştur.



ŞEKİL 2. İzolasyon bozulma sıcaklığı ile T_M sıcaklığı arasında bağıntı:

3.2 Akım - izolasyon bozulma süresi karakteris- tikleri:

Akım-izolasyon bozulma süresi (Bozulmaya ka-
dar geçen zaman-izolasyon ömrü) karakteris-
tiklerinin ölçülmesinde levha model ve ASTM
D495 tungsten elektrod düzeni kullanılmıştır.
Elektrodlar arasında belirli akımdaki deşarjın
başlatılmasından sonra bozulmaya kadar geçen
zaman (izolasyon ömrü) bir kronometre ile öl-
çülmüştür. Bu tarzda her malzeme için akım-
izolasyon ömür karakteristiği çıkarılmıştır.
Karbonlaşan maddelerde vazıh bir izolasyon ömrü
tesbiti mümkün olmaktadır. Yüzey boyunca
akım karbonize izlerden akmaktadır. Karbon-
laşmayan maddeler genellikle tedrici olarak
bozulma gösterir. Bununla beraber termik sta-
bilité yönünden uygun özellik gösteren ve kar-
bonlaşmayan ptfé (Tablo 1) için vazıh bir *izo-
lasyon* ömrü balıs konusudur. Ptfé testinde
yüzeye bitişik deşarj renginin bir müddet son-
ra parlaklaştığı görülmüştür. Bu, izolasyon
malzemesinin ayrışmasından açığa çıkan gaz-
lara atfedilmiştir.

Şekil 3, ölçülen akım-izolasyon ömür eğrisini
göstermektedir. Görüldüğü gibi belirli bir akı-
mın altındaki deşarjlarda izolasyonda bozul-
ma meydana getirilememektedir. Bu akıma «sı-
nır akımı» denilmiş ve I_0 ile gösterilmiştir. Sı-
nır akımının üstündeki akımlarda izolasyon öm-
rü süratle düzelmektedir.

İzolasyonun Ömrü

I_0 deşarj akımı

ŞEKİL 3. Tipik izolasyon akım - ömür karakteris- tiği.

3.3 Sınır akımları teorisi:

Her izolasyon malzemesi için belirli bir bozul-
ma akımı kabul edilebilirse sınır akımları, sü-
rekli rejim şartlarında ısınan bölgenin ortasın-
daki sıcaklığın bozulma sıcaklığının tam altın-
da olması şartlarına tekabül eder. Deşarj dai-
resel bir ısı kaynağı şeklinde düşünülürse, sü-
rekli rejim şartlarında ısıtılan bölgenin orta-
sında sıcaklık artışı

$$\frac{aF}{(1-ah)} \quad (2)$$

bağıntısı ile belirlenebilir

[6].

a • ısıtılan bölgenin yan çapı (s 2mm),

F : ısıtılan bölgede ısı akısı (W/cm²),

h = H/k ve H : Atmosfere ısı kayıplarını dikka-
te alan yüzeysel ısı transfer katsayısı

Ortam sıcaklığı T_{amb} ise izolasyonun
bozulması T_b ise $T_b > T_{amb}$
dikkate alınır: olmalıdır. (2) bağıntısı

$$\frac{K(T_b - T_{amb})}{a(1-ah)} > T_{amb}$$

izolasyon yüzeyindeki ısı akısı deşarj akımının
bir fonksiyonu $F = f(I)$ olmalıdır.

Akım-ısı akısı bağıntısı $T = f(I)$ ise, izolasyonun bozulması için

$$I > 0 \frac{K(T_b - T_{amb})}{a(1-ah)}$$

ve sınır
kıymı j

$$\frac{K(T_b - T_{amb})}{a(1-ah)} \quad (3a)$$

olur. Çok sayıda izolasyon malzemesi için (1)
nolu denklemin tahkikini yapacak bir metod
mevcuttur, izolasyon bozulma sıcaklıkları ile
termik ayrışma sıcaklıkları arasında yukarıda-
ki bağlantılar dikkate alınır,

$$I_{0, j} = 0 \frac{K(T_{90-50} - T_{amb})}{a(1-ah)} \quad (3b)$$

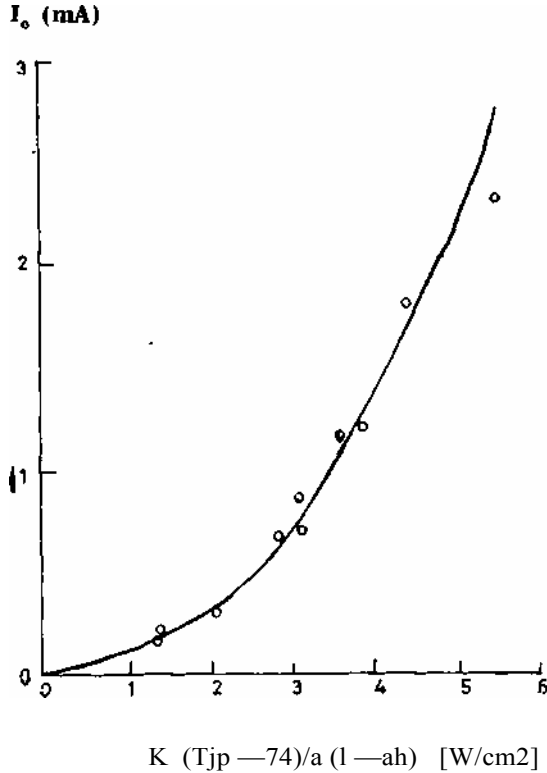
elde edilir. Görüldüğü gibi sınır atamı; K, T[^]
ve h gibi fiziksel sabitelere bağılı parantez için-
deki ifadenin bir fonksiyonudur. Tablo 2, ba-
his konusu terim ile tekabül eden ölçülmüş
sınır akımlarını 10 farklı polimerik malzeme

için vermektedir. (Termo-fiziksel özellikler ayrı testlerle bulunmuştur.)

TABLO 2:

izolasyon malzemesi	I_n (mA)	$\frac{K(T_M-74)}{a(1-ah)}$
Polivinilklorid	1,15-0,20	1,40
Polivinilasetat	0,3	2,08
Epoksi 1	0,65	2,90
Epoksi 5	0,70	3,14
Epoksi 6	0,85	3,10
Ebonit	1,1	3,63
Penolik/Kağıt	1,15	3,68
Polikarbonat	1,20	3,85
Epoksi 3 (dolgulu)	1,80	4,41
Ptfe	2,3	5,54

Not : Ortam sıcaklığı $T_{amb} = 24^\circ\text{C}$.



ŞEKİL 4. Sınır Akımı teorisinin tahkiki.

Yukarıdaki değerler Şekil 4'de çizilmiştir. Deneysel noktalar muntazam bir dağılım göstermektedir. Bu, yukarıda yapılan kabulleri doğrulamaktadır. K ve T_{po} değerleri büyük olan malzemeler için sınır akımının da büyük olduğu görülebilir. Şekil 2 ve Şekil 4 beraberince incelendiğinde bunların, dolgulu ve dolgusuz termosetting ve termoplastik 14 cins izolasyon malzemesinin deşarjlar altındaki izolasyon ömürlerinin termik ayrışma sıcaklıklarına bağlılığını ortaya koymaktadır.

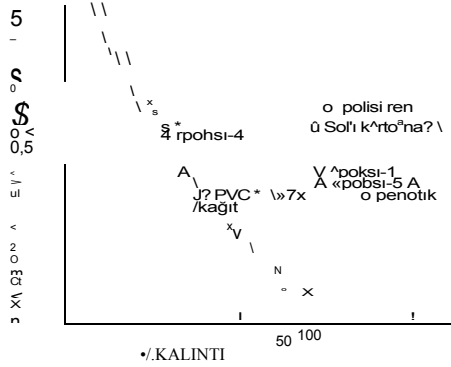
4. TERMİK AYRIŞMA SONRASI İZOLASYON MALZEMESİNDE BOZULMA ŞEKLİ

Şimdiye kadar açıklamalar, termik ayrışmaya kadar olan olayları kapsamına almaktadır. Termik ayrışma başladıktan sonra, ayrışma ile açığa çıkan maddelerin cinsi, izolasyonun tamamen bozulmasının gelişme şekli ve hızını tesbit eder. Önce açıklandığı gibi, komple izolasyon bozulması ya karbonlaşma ya da aşınma şeklinde olur, tga metodu izolasyon malzemesinin ne cins bir bozulma göstereceğini tesbit edebilmektedir. Şekil 1, aşınma şekli bozulmaya uğrayan bir izolasyon malzemesinin tga eğrisinin muntazam bir şekilde sifıra düştüğünü göstermektedir. Karbonlaşma şeklinde bozulmaya uğrayan izolasyon malzemesinin tga eğrisi ise bir ara değere düşerek sabit kalmaktadır. Bu ara değer karbonize kalıntıya tekabül eder. Bu yazıda zikredilen bütün izolasyon malzemelerinin nasıl bir bozulma gösterdikleri tga metodu ile kesinlikle tesbit edilebilir. (Dolgulu reçinede dolgu ağırlığı dikkate alınmamalıdır.)

Karbonlaşma izolasyon malzemeleri için, termik ayrışmadan geriye kalan % kalıntının (Şekil 1'de A noktasına tekabül eden ağırlık) karbonlaşma hızı için bir ölçü olarak alınabileceği düşünülebilir. Ancak toz-sis testi niteliğindeki bir test altında [7], çok zayıf deşarjlar hızlı sıcaklık artışına yol açarlar [5]. Bu durumda deşarj enerjisinin büyük çoğunluğu karbonize teşekkülüne harcanır, tga metodu ile bulunan % kalıntıları gösteren Şekil 5, toz-sis testinde karbonlaşmaya kadar geçen süre ile % kalıntı arasında kuvvetli bir bağlılığın bulunduğunu göstermektedir. Toz-sis testi ile karbonlaşmaya kadar geçen sürenin hassas olarak tesbiti zor olmakla beraber, bu test yardımıyla fenolik reçinenin çok çabuk ve polistrenin diğer karbonlaşan polimerlerden daha geç karbonlaştıkları ölçülebilir. Fenolik reçine en büyük % kalıntı ve polistren en küçük % kalıntı veren izolasyon malzemeleridir (Şekil 5).

Bununla beraber, % kalıntı değerleri ile sınır akımı ve diğer testler yardımı ile ölçülen diğer

parametreler arasında önemli bir bağıllığın bulunduğu beklunilmemelidir. % kalıntı değerleri daha çok malzemenin termik iletkenliği ve ayrışma sıcaklığına bağlı değerler olup sınır değerler aşıldığında izolasyon malzemesinin bozulma hızı bir ölçü teşkil etmezler.



ŞEKİL 5. To-sis testinde % kalıntı, karbonlaşmaya kadar geçen zaman değişimi.

Hızlandırılmış testlerde deşarjların enerjisinin bir kısmı yüzeyin ayrışma sıcaklığına kadar ısıtılmasına harcanırken diğer kısmı ayrışmanın meydana gelmesine harcanır. İki test serisinde bu enerjilerin oranı fazlaca farklı ise testlerden farklı sonuçların bulunması normaldir.

Bir izolasyon malzemesinde, karbonize kalıntının meydana gelebilmesi ile kimyasal yapı arasındaki bağıntı yazar ve arkadaşları [8] tarafından detaylı şekilde araştırılmıştır. Bu çalışmalardan karbonlaşma için şu basit kriter ortaya çıkmıştır:

Bir izolasyon malzemesinin molekül yapısı (a) aromatik yapılı ise -veya (b) zayıf bağlı yan grup veya atomları ihtiva ediyorsa, bu izolasyon malzemesi karbonlaşmaya meyyalıdır. Termik ayrışma sırasında (a) grubundaki malzemeler, grafikte benziyen üç boyutlu çapraz bağlantılı aromatik yapılı kalıntı meydana getirir, (b) grubundaki alifatik malzemeler termik ayrışma sırasında yan grup ve atomları kaybederler. Bunun sonucu olarak arta kalan konjuge moleküler iskelet (peşpeşe tek ve çift

bağlı karbon zinciri) grafikte benzer yapıda çapraz bağlantılı bir yapıya dönüşür. Yukarıdaki kriterlerin ışığında karbonlaşmayan izolasyon malzemelerinin sentezi mümkün olmuştur.

5. SONUÇLAR

izolasyon malzemelerinin deşarjlar altında dayanım durumlarının termik olaylar yardımıyla tatminkâr olarak incelenebileceği gösterilmiştir. Belirli şekilde bir izolasyon malzemesi için bir deşarj akımı tarif etmek mümkündür. Bu sınır akımının altındaki deşarj akımlarında izolasyon deşarjlara bozulmadan dayanabilmektedir. Sınır akımı aşıldığında termik ayrışma ile meydana gelen maddeler izolasyonun komple bozulma şeklini tayin etmektedir. Termo-gravimetrik analiz (tga) izolasyon bozulma şekli incelenmek için uygun bir metod olarak belirmiştir.

6. KAYNAKLAR

1. *Wilkins, R.*: "Epoksi reçinelerin yüksek gerilim izolasyonunda kullanılması", *Elektrik Mühendisliği Dergisi*, C. 15, S. 171, s. 45-50.
2. *Bilings, M. J., Warren, L. ve Wilkins., R.* : "Acomparison of the IEC, Dust-Fag and Inclined-Plane Tests", *Trans EI-3*, p. 33, 1968.
3. *Mandelcorn, L.*: "The Effect of Electric Discharges Betvveen Electrodes Across Surfaces" *Trans AIEE*, Vol. 80, p. 481, 1961.
4. *Coats, A. W. ve Redfern, L. P.*: "Thennogramvmetric Analysis", *Analyst*, London, 88, pp. 906-924, 1963.
5. *Billings, M. J., ve Wükins, R.*: "Effect of Discharger BeUveen Electrodes on the Surface of Organic Insulation" *Proc. IEE*, Vol. 116, p. 1777, 1969.
6. ASTM standart method of test D 495-1961: "High Voltage, Low-Current Arc Resistance of Solid Electrical Insulating Materials", *ASTM Book of Standards*.
7. ASTM tcntative method of test D 2132-62 T • "Dust-and Fag Tracking and Erosion Resistance of Electrical Insulating Materials", *ASTM Book of Standards*.
8. *Billings, M. J., Smilh, A. ve V/ilkins, R.*: "Tracking in Polymeric Insulation", *IEEE Trans, EI-2*, p 131, 1967.