

**POLİİNDOL/POLİ(VİNİL ASETAT) KOMPOZİTLERİN
ELEKTROREOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Kübra ÖZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2007
ANKARA**

Kübra ÖZ tarafından hazırlanan farklı bileşimdeki POLİİNDOL/POLİ(VİNİL ASETAT) KOMPOZİTLERİNİN ELEKTROREOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Halil İbrahim ÜNAL
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oybirliği ile Kimya Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Mehmet SAÇAK

Üye : Doç. Dr. Tunçer ÇAYKARA

Üye : Prof. Dr. H. İbrahim ÜNAL

Tarih : 19/07/2007

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Kübra ÖZ

**POLİİNDOL / POLİ(VİNİL ASETAT) KOMPOZİTLERİN
ELEKTROREOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Kübra ÖZ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Temmuz 2007**

ÖZET

Bu çalışmada, Poliindol (PIN) ve farklı bileşimlere sahip poliindol/poli(vinilasetat) (PIN/PVAc) kompozitlerin elektoreolojik (ER) özellikleri incelendi. Bu polimerlerin iletkenlik değerleri ölçüldü ve dielektriklik özellikleri belirlendi. Dinamik ışık saçılımı (DLS) yöntemi ile kompozitlerin tanecik büyüklükleri tespit edildi. PIN ve PIN/PVAc kompozitlerinin yalıtkan silikon yağı içerisinde çeşitli derişimlerde ($c = \%5-25$ m/m) süspansiyonları hazırlandı, çökelme kararlılıkları tespit edildi. Süspansiyonların ER aktiviteleri üzerine tanecik derişimi, tanecik boyutu, kompozit bileşimi, kayma hızı, elektrik alan kuvveti, frekans ve sıcaklığın etkileri araştırıldı. Bu süspansiyonların dc. elektrik alan kuvveti altında akış süreleri tespit edildi. Ayrıca kompozit malzemelerin oluşturduğu süspansiyonlara sürünme testleri uygulandı ve tersinir viskoelastik deformasyon gösterdiği tespit edildi.

Bilim Kodu : 201.1.117
Anahtar Kelimeler : Poliindol/poli(vinil asetat), polimer kompozitler, elektoreolojik akışkanlar
Sayfa Adedi : 84
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Halil İbrahim ÜNAL

**INVESTIGATION OF ELECTORRHEOLOGICAL PROPERTIES OF
POLYINDOLE/POLY(VINYL ACETATE) COMPOSITES**

(M.Sc. Thesis)

Kübra ÖZ

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

July 2007

ABSTRACT

In this study, electrorheological (ER) properties of polyindole (PIN) and polyindole/poly(vinylacetate), (PIN/ PVAc) conducting composites having different compositions were investigated. Conductivities and dielectric properties of these composites were determined. The particle sizes of the composites were determined by dynamic light scattering method. Suspensions of PIN and PIN/PVAc composites were prepared in silicone oil, at various of concentrations ($c = 5\text{--}25\%$, m/m) and their sedimentation stabilities were determined. Then the effects of dispersed particle concentration, particle size, shear rate, electric field strength, frequency and temperature onto ER activities of suspensions were investigated. The flow times of these suspensions at various dc electric field strengths were measured. Creep tests were applied to the composite suspensions and a reversible viscoelastic deformation was observed.

Science Code : 201.1.117

**Key Words : Polyindole/poly(vinyl acetate), polymer composites,
electrorheological fluids.**

Page Number : 84

Supervisor : Prof. Dr. Halil İbrahim ÜNAL

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren değerli Hocam Prof. Dr. Halil İbrahim ÜNAL'a sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Ayrıca çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen Sayın Hocam Doç. Dr. Haşim YILMAZ'a ve Doç. Dr. Bekir SARI'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarımda, yardımcı olan, başta numunelerin öğütme işlemlerinde ve tanecik boyutu ölçümlerinde Doç. Dr. İbrahim USLAN, ve Araş. Gör. Levent URTEKİN'e, dielektrik ölçümleri için Doç. Dr. Şemsettin Altındal'a, gerekli analizler için yardımlarından dolayı kimya bölümü uzmanlarına ve kimya bölümüne teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmam süresince bana her türlü fedakârlığı gösteren çalışma arkadaşlarıma ve en önemlisi de hayatta en değerli varlığım olan sevgili aileme ve gönül dostlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. Kompozit Nedir?.....	3
2.1.1. Kompozit malzemelerin genel özellikleri	4
2.2.İletken Polimer Kompozitler.....	4
2.3. Poliindol	5
2.4. PIN’ün Polimerleşme Mekanizması	6
3. ELEKTROREOLOJİ	14
3.1. Elektoreoloji Olayı	14
3.2. Elektoreolojik Akışkanların Reolojisi	14
3.3. Elektoreolojik Akışkanlar	16
3.4.Elektoreolojik Akışkanlarda Yapı Oluşumu.....	17
3.5. ER Aktiflik Üzerine Etki Eden Faktörler.....	18
3.5.1. Elektrik alan kuvveti	18
3.5.2. Kayma hızı	19

Sayfa

3.5.3. Elektrik alan frekansı	19
3.5.4. Tanecik iletkenliği	20
3.5.5. Tanecik dielektrik özelliği	20
3.5.6. Tanecik hacim kesri	21
3.5.7. Sıcaklık	22
3.5.8. Promoter.....	22
3.5.9. Kolloidal kararlılık.....	23
3.5.10. Tanecik boyutu.....	23
3.5.11. Sürünme testi	24
3.6. ER Akışkanların Verimi	27
3.7. ER Akışkanlarının Kullanım Alanları	28
4. DENEYSEL KISIM.....	30
4.1. Kullanılan Kimyasal Maddeler	30
4.1.1. Homopolimer ve kompozitlerin sentezi.....	30
4.2.Kullanılan Cihazlar ve Çalışma Yöntemleri	32
4.2.1.Öğütme işlemi.....	32
4.2.2.Tanecik boyutu ölçümleri	32
4.2.3. Yoğunluk tayini	33
4.2.4. Dielektrik özellikleri tayini	33
4.2.5. Süspansiyonların hazırlanması.....	35
4.2.6. Çökelme kararlılığı	35
4.2.7. Akış ölçümleri.....	35
4.2.8. Elektroeometre ölçümleri	36

Sayfa

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	37
5.1. Çözünürlük Testi Sonuçları	37
5.2. İletkenlik ve Dielektrik Sabitleri	39
5.3. Tanecik Boyutu Ölçümleri	40
5.4. Süspansiyonların Koloidal Kararlılıklarının Belirlenmesi	43
5.5. Paralel Plaka Elektrotlar ile Yapılan Elektoreolojik Ölçümler	47
5.6. Elektoreometre ile Yapılan Elektoreolojik Ölçümler	50
5.6.1. ER verimi üzerine derişimin etkisi	50
5.6.2. ER veriminin kayma hızı ile değişimi	53
5.6.3. Derişimin kayma gerilimi üzerine etkisi	54
5.6.4. Elektrik alan kuvvetinin kayma gerilimi üzerine etkisi	55
5.6.5. Elektrik alan kuvvetinin viskozite üzerine etkisi	58
5.6.6. Kayma geriliminin kayma hızı ile değişimi	60
5.6.7. Kayma geriliminin sıcaklıkla değişimi	64
5.6.8. Elastik modülünün frekans ile değişimi	65
5.6.9. Polarizasyon kuvvetinin derişim ile değişimi	66
5.7.10. Promoter etkisinin incelenmesi	67
5.6.11. Sürünme deneyleri	68
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	73
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	84

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. PIN/PVAc kompozitleri sentezlemek için kullanılan kimyasal oranlar	32
Çizelge 5.1. İndol, PVAc, PIN ve PIN/PVAc kompozitlerin çözünürlük testi sonuçları	38
Çizelge 5.2. Polimerlerin iletkenlik ve dielektrik sabiti değerleri.	39
Çizelge 5.3. Numunelerin tanecik büyüklükleri..	41
Çizelge 5.4. PIN ve PIN/PVAc kompozitlerin yoğunlukları, tanecik boyutu ve çökelme kararlılık oranları.	44
Çizelge 5.5. Her bir numune için çalışılan elektrik alan kuvveti değerlerinde okunan kaçak akım yoğunluğu değerleri	53
Çizelge 5.6. Polimerlerin $E = 0$ ve $E \neq 0$ iken ölçülen maksimum ve minimum kayma hızındaki kayma gerilimi değerleri	61
Çizelge 5.7. Numunelerdeki deformasyonların başlangıç ve sonlanma değerleri	69

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. PIN'ün 2. ve 3. karbon atomları üzerinden radikal-nötral monomer yolu ile polimerleşme mekanizması.....	8
Şekil 2.2. PIN'ün 2. ve 3. karbonlar üzerinden radikal-radikal monomer yolu ile polimerleşme mekanizması.....	11
Şekil 3.1. Silikon yağı içerisinde dağılmış PIN ve PIN/PVAc taneciklerine elektrik alan uygulandığında oluşan değişikliklerin şematik gösterilişi....	18
Şekil 3.2. İki paralel plaka arasındaki ER akışkanına kayma hızı uygulandığında ERA' nında gözlenen yapı değişimi.....	19
Şekil 3.3. a) Voigt Kelvin modeli b) Maxwell ve Voigt—Klevin modelin seri bağlı şematik gösterimi	26
Şekil 3.4. Bir polimerin sürünme—yenilenme profil eğrileri	26
Şekil 5.1. a) K1 b) K2 c) K3 d) K4 e) PIN tanecik büyüklüğü dağılımı diagramı. ...	41
Şekil 5.2. Kolloidal kararlılığa kompozit bileşiminin etkisi	45
Şekil 5.3. a) K1 b) K2 c) K3 d) K4 e) PIN için kolloidal kararlılığa derişimin etkisi	45
Şekil 5.4. Paralel plaka elektrotlarda ERA' nın akış durumu	48
Şekil 5.5. K1/SO süspansiyon sistemi için akış süresinin derişim ile değişimi.....	49
Şekil 5.6. Numunelerin akış süresinin elektrik alan kuvveti ile değişimi.....	50
Şekil 5.7. K1 için ER verimi üzerine derişimin etkisi	52
Şekil 5.8. K1 için çeşitli elektrik alan kuvvetlerinde viskozitenin derişim ile değişimi	52
Şekil 5.9. ER verimin kayma hızı ile değişimi.....	54
Şekil 5.10. K1 kompoziti için derişimin kayma gerilimi üzerine etkisi.....	55
Şekil 5.11. Numunelerin elektrik alan kuvveti ile kayma gerilimlerinin değişimi	56

Şekil	Sayfa
Şekil 5.12. Kayma geriliminin elektrik alan kuvvetinin karesiyle değişimi	58
Şekil 5.13. Viskozite üzerine elektrik alan kuvvetinin karesinin ve kompozit bileşiminin etkisi	59
Şekil 5.14. a) K1 b) K2 c) K3 d) K4 e) PIN için kayma gerilimi ve viskozitenin kayma hızı ile değişimi.....	62
Şekil 5.15. Numunelerin kayma geriliminin sıcaklıkla değişimi	65
Şekil 5.16. Numunelerde elastik modülün frekans ile değişimi.....	66
Şekil 5.17. K1 için polarizasyon kuvvetinin derişim ile değişimi	67
Şekil 5.18. a) K1 b) K2 c) K3 d) K4 e) PIN için zaman ile elastik modülün değişimi.....	70

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
T	Sıcaklık
C	Kapasitans
C_{std}	Kalibrasyon sabiti
e	ER verimi
E	Elektrik alanı
X_g	Gram başına manyetik suseptibilite
$^{\circ}C$	Santigrat
τ	Kayma gerilimi
$\dot{\gamma}$	Kayma hızı
ε	Kayma gerinimi
ε^0	Boşluğun dielektrik sabiti
ε	Örneğin dielektrik sabiti
η	Viskozite
η_s	Süspansiyon viskozitesi
f	Frekans
Pas	Viskozite birimi
ν	Kinematik viskozite
ρ	Yoğunluk
μ_e	Etkin magnetik moment
σ	İletkenlik
φ	Tanecik hacim kesri
r	Tanecik yarıçapı
F	Polarizasyon kuvveti
ρ	Tanecikler arası mesafe
c	Derişim

Kısaltmalar	Açıklama
DMF	Dimetilformamit
DMSO	Dimetil sülfoksit
ER	Elektroreoloji
ERA	Elektroreolojik Akışkanlar
FTIR	Fourier Trasform Infrared Spektrometrisi
K1	%14 Poliindol %86 Poli(vinilasetat) kompoziti
K2	%18 Poliindol %82 Poli(vinilasetat) kompoziti
K3	%28 Poliindol %72 Poli(vinilasetat) kompoziti
K4	%35 Poliindol %65 Poli(vinilasetat) kompoziti
PIN	Poliindol
PIN/PVAc	Poliindol/poli(vinilasetat) kompoziti
PVAc	Poli(vinilasetat)
SO	Silikon yağı
THF	Tetrahidrofuran

1. GİRİŞ

Son yıllarda, polimerlerin kullanım alanlarının yaygınlaşması, polimerlerle ilgili çalışmaları hızlandırmıştır. Bu sebepten dolayı, bilim adamları yeni polimerlerin araştırılıp sentezlenmesinden ziyade özelliklerinin iyileştirilmesi için çalışmalar yapmaktadırlar. Bu amaçla kopolimerler ya da kompozitler sentezlenmektedir [1-3]. Sentezlenen bu polimer içerisinde iletken polimer kompozitler, kullanım alanlarının hızla yaygınlaşması açısından ayrı bir önem taşımaktadır.

Kompozit malzeme, temel olarak iki veya daha fazla malzemenin bir arada kullanılmasıyla oluşturulan ve meydana geldiği malzemelerden farklı özelliklere sahip yeni tür malzemelerdir.

Bu tür kompozit malzemeler kullanım alanlarını yaygınlaştırmak amacıyla ER çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır [4-6].

Elektroreoloji (ER), maddenin elektrik alan kuvveti altında gösterdiği akış davranışlarını inceleyen bilim dalıdır. ER olayı ilk defa Winslow tarafından 1949'da rapor edilmiştir [7]. Elektroreolojik akışkanlar (ERA) ile ilgili çalışmalar 1980'den sonra askeri amaçlı olarak kullanılmaları söz konusu olduğundan önem kazanmıştır [8]. ERA'lar düşük polariteli sıvılarda zayıf iletkenlik gösterirler. Dispersiyon ortamı olarak silikon yağı, madeni yağlar, yemeklik yağlar ve halojenlenmiş hidrokarbonlar kullanılabilirken; dağılma fazı olarak selüloz, un, iyon değiştirici reçineler gibi organik maddeler yanında inorganik kiler de kullanılabilir. Su gibi polar maddelerin varlığında ERA'ların iletkenlikleri artmakta fakat endüstriyel uygulamalarda pek çok güçlüklerle karşılaşmaktadır. Block ve Kelly 1985 yılında iletken polimerlerin su ilavesi olmadan da ER aktivite gösterebileceğini belirtmişler ve bunları (poliakrilonitril, politiyofen gibi) kuru ER aktif maddeler olarak adlandırmışlardır [9].

Bu çalışmada; kimyasal yöntemle sentezlenmiş olan poliindol (PIN) homopolimeri ve farklı yüzdelerde PIN içeren poliindol/poli(vinilasetat) (PIN/PVAc) hazır kompozit

numuneleri ile çalışıldı. Numunelerin dinamik ışık saçılımı (DLS) ile tanecik büyüklüğü tespit edildi, Impedance Analyzer ile dielektrik sabiti ve iletkenliği hesaplandı. PIN ve PIN/PVAc kompozitlerinin yalıtkan silikon yağı içersinde (SO) çeşitli derişimlerde süspansiyonları hazırlandı, bu süspansiyonların çökelmeye karşı kararlılıkları tespit edildi ve elektoreolojik aktiviteleri incelendi. ER aktiviteleri üzerine elektrik alan kuvveti, kayma hızı, kompozit bileşimi, sıcaklık, tanecik derişimi, tanecik boyutu, prometer ve frekans etkileri incelendi; kayma gerilimi ve ER verimi hesaplandı. Sürünme deneyleri ile numunelerin viskoelastik özellikleri araştırıldı.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Kompozit Nedir?

Kompozit, belirli bir amaca yönelik olarak, en az iki farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle meydana gelen malzeme gurubudur. Üç boyutlu nitelikteki bu biraraya getirmede amaç, bileşenlerin hiçbirinde tek başına mevcut olmayan bir özelliğin elde edilmesidir. Diğer bir deyişle, amaçlanan doğrultuda bileşenlerin daha üstün özelliklere sahip bir malzeme üretilmesi hedeflenmektedir.

Kompozit malzemede genelde aşağıdaki 4 koşulun bulunması tercih edilmektedir:

- İnsan yapısı olmaması, dolayısıyla doğal bir malzeme olması,
- Kimyasal bileşimleri birbirinden farklı belirli ara yüzeylerle ayrılmış en az iki malzemenin bir araya getirilmiş olması,
- Farklı malzemelerin üç boyutlu olarak bir araya getirilmiş olması,
- Bileşenlerin hiç birinin tek başına sahip olmadığı özellikleri taşıması.

Buna göre malzeme, mikroskobik açıdan heterojen, makroskobik açıdan ise homojen bir davranış sergilemektedir.

Günümüzde gemi yapımından bina yapımına, ev aletleri üretiminden uzay teknolojisine kadar hemen hemen her alanda çok yaygın bir kullanımı bulunan kompozit malzemenin üretimi son birkaç yüz yıla mal edilmiş gibi görülse de ilk örnekleri çok eskilere dayanmaktadır. İlk çağlardan beri insanlar kırılgan malzemelerin içine bitkisel veya hayvansal lifler koyarak bu kırılganlık özelliğinin giderilmesine çalışmışlardır. Bu konularda en iyi örneklerden biri kerpiç malzemedir. Kerpiç üretiminde killi çamur içine katılan saman, sarmaşık dalları gibi sap ve lifler, malzemenin gerek üretim, gerek kullanım sırasındaki dayanımını artırmaktadır.

2.1.1. Kompozit malzemelerin genel özellikleri

Uygulamada, kompozit malzeme üretiminde genellikle aşağıdaki özelliklerden birinin veya bir kaçının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu özelliklerin başlıcaları:

- Basınç, çekme, eğme, çarpma dayanımı,
- Yorulma dayanımı,
- Aşınma direnci,
- Korozyon direnci,
- Kırılma tokluğu,
- Yüksek sıcaklığa dayanıklılık,
- Isı iletkenliği veya ısı direnci,
- Elektrik iletkenliği veya elektriksel direnci,
- Akustik iletkenlik, ses tutuculuğu veya ses yutuculuğu,
- Sertlik,
- Ağırlık,
- Görünüm,

ve benzeri özellikler şeklinde sıralanabilir. Ayrıca özellikle dolaylı olarak malzemenin birim maliyeti de düşürülmektedir.

Bu amaca yönelik olarak kompozit malzeme üretiminde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Hepsinde değişmeyen temel ilke, bileşenlerin zayıf yönlerinin amaç doğrultusunda iyileştirilerek daha nitelikli bir yapının elde edilmesidir. Bir kompozit malzemenin yapısı genelde “matris” olarak kabul edilen sürekli bir faz ile onun içinde dağılmış değişik özelliklere sahip “donatı” fazından meydana gelmektedir.

2.2.İletken Polimer Kompozitler

İletken polimer kompozitler günümüzde birçok uygulamada metal malzemelerin yerini almaktadır. Polimerler genelde yalıtkan bir malzeme oldukları için tercih edilmelerinden dolayı bu değişim oldukça önemli sayılmaktadır. İletken polimer kompozitlerin metal malzemeye kıyasla avantajları;

- Düşük yoğunluk,
- Daha fazla korozyon, oksidasyon dayanımı ve kimyasal direnç,
- Daha kolay işlenebilirlik,
- Bununla birlikte polimerlerin düşük sürünme dayanımı, aşınma, termal olarak kararlı bir malzeme olmamaları ve sınırlı sayıda işleme tekniği bulunması gibi dezavantajları vardır.

2.3. Poliindol

Poliindol (PIN) çeşitli elektrolitler içerisinde doğrudan yükseltgenme ile elde edilebilen elektroaktif bir polimerdir. Poliindol'ü kimyasal ve elektrokimyasal yollarla sentezlemek mümkündür. Havada sabit ve uyarılmış halde yeşil renkte olan polimer nőtür halde sarı renkte olmaktadır. Anyon miktarına bağılı olarak elektriksel iletkenliği $10^{-3} - 10^{-1} \text{ Scm}^{-1}$ arasında değışmektedir [10-13].

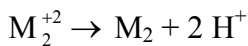
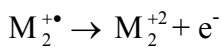
İndolün elektrokimyasal polimerizasyonu ilk defa Garnier ve çalışma arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir [14]. Daha sonra indol ve türevleri ile ilgili çalışmalar devam etmiştir [15]. Bu çalışmalarda monomerin kapling ucunun saptanması, polimerin yapısı ve indolün elektrokimyasal polimerizasyon mekanizması deneysel ve teorik olarak araştırılmıştır. Kararlı olamayan indol radikal katyonu ile indol polimerlerinin uzaması indolün sübstitüentinin durumuna (sterik etkiye) bağılıdır. Elektrot yüzeyinde oluşan poliindol filmi polimerizasyon sonunda büyük oranda çözünmektedir.

Literatür verilerine göre poliindol'ün yapısı polipirol ve polianilin'e benzemesine rağmen daha az çalışılmış olup [16-19], termal kararlılığı polianilin ve polipirol'e göre daha iyidir [20]. Poliindol'ün uygulama alanları her geçen gün artmaktadır. K.R. Baldwin ve arkadaşları yumuşak çeliğin korozyona karşı koruması çalışmalarında PIN'in etkili olduğunu rapor etmişlerdir [21]. PIN'in korozyon önleme ile ilgili çalışmaları artmıştır [22-25].

2.4. PIN'ün Polimerleşme Mekanizması

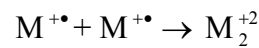
PIN'ün FTIR spektrumundan elde edilen sonuçlardan yararlanarak, merlerin 2,3 bağlanması sonucu polimer zincirlerinin oluştuğu araştırmacılar tarafından belirlenmiştir [26]. Burada unutulmaması gereken bir nokta polimerler oluşurken sadece 2,3 bağlanması değil 1,3; 2,4; 2,5; 2,6;ve 2,7 gibi bağlanmaların da olabileceği göz önüne alınırken [27], polimerleşmenin genellikle 2,3 bağlanması üzerinden oluştuğu kabul edilmektedir. Kuantum kimyasal hesaplamalar temel alındığında C₂-C₃ arasındaki bağların polimerde düzenli yapılara yol açtığı gösterilmiştir. Polimerleşme meydana gelirken C—N ve N—N bağlarını içeren yapılar oluşmakla birlikte bunların yüksek enerjiye sahip oldukları bulunmuştur. Yüksek enerji sebebiyle azot atomunu içeren bağlanmaların meydana gelme ihtimali düşük tutulmaktadır. FTIR çalışmalarının yanı sıra termodinamik ve kinetik çalışmalar polimerleşmede monomerler arası bağların azot atomunu içermediğini göstermiştir. Kinetik çalışmalara dayanarak C₂-C₃ arasındaki bağın da uygun olduğu önerilmiştir [28]. Araştırmacılar, PIN'ün polimerleşme mekanizması üzerine yaptıkları çalışmalarda iki ana mekanizmayı teorik olarak önermişlerdir. Bu mekanizmalardan ilki, polimerleşmenin radikal–nötral monomer büyümesi ile oluştuğu, diğeri ise radikal-radikal monomer büyümesi ile meydana geldiği şeklindedir. Her iki mekanizma da aşağıda verilmiştir:

1. yol



M: monomer, M⁺• : radikal katyon

2. yol

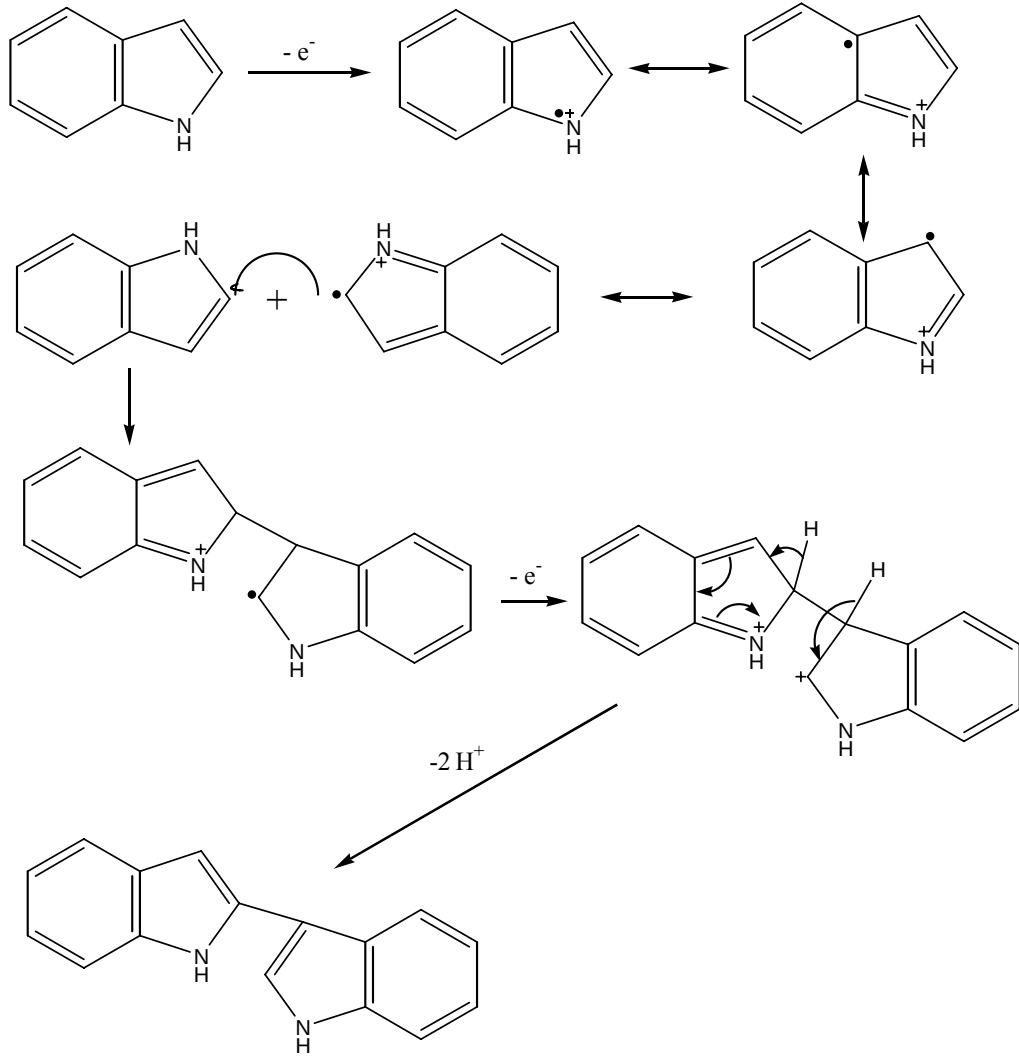


Yurtsever ve çalışma grubu PIN'ün 2,3 polimerleşme mekanizması ve radikal-radikal yolu ile polimerleştiğini önermiştir. Buna sebep olarak radikal monomere

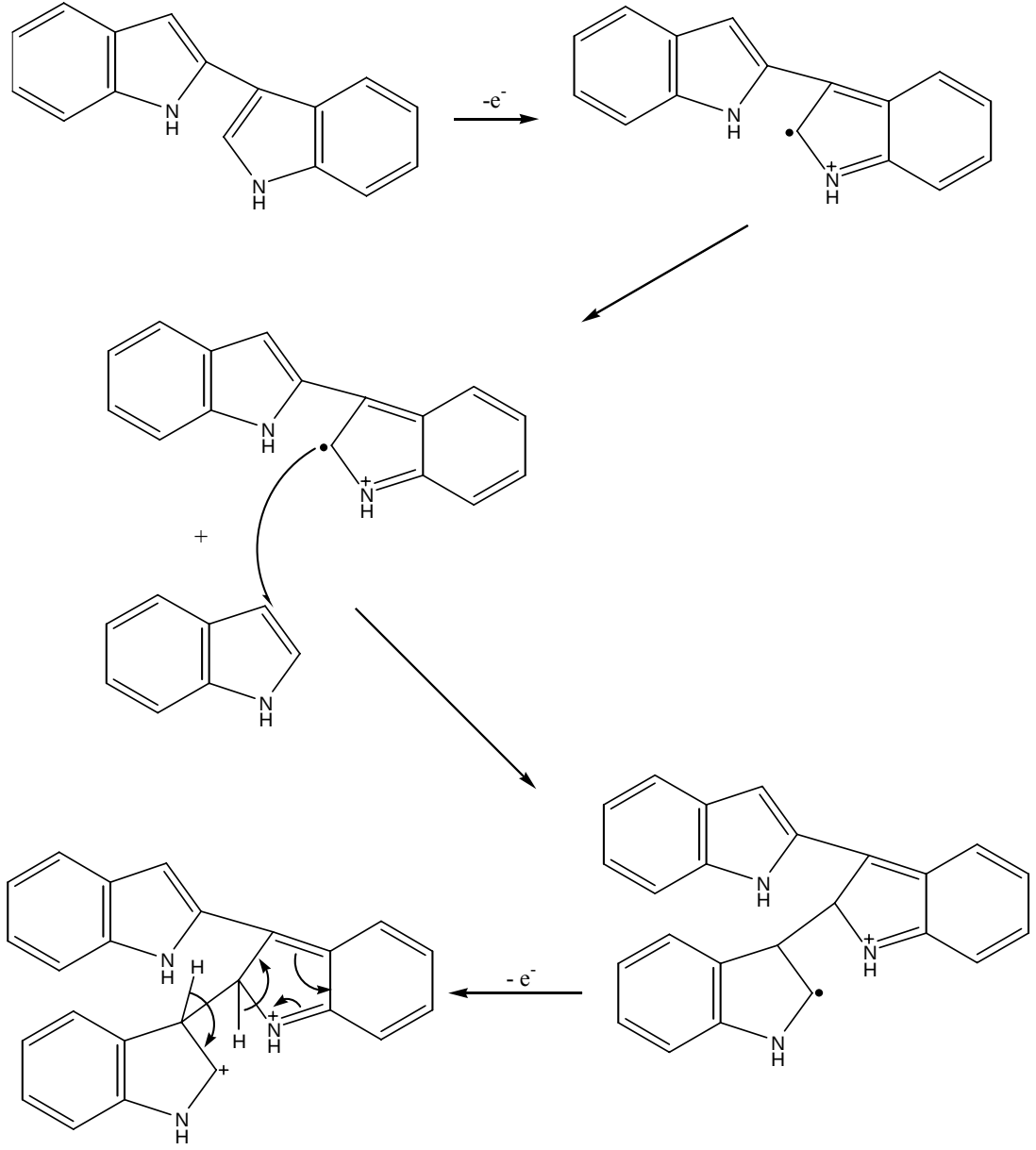
saldırıldığında ekzotermik reaksiyon verirken, radikal-radikale saldırıldığında endotermik reaksiyon verdiği gösterilmiştir [27].

Talbi ve arkadaşları yaptığı çalışmalarda büyüme reaksiyonunun radikal katyonlarla nötral monomerler arasında olduğunda polimer zincirindeki monomer bağlantılarının kontrol edilebildiğini ve daha düzenli yapıların oluşabileceğini belirtmişlerdir. Buna dayanarak polimerleşmenin radikal-nötral monomer üzerinden yürüdüğünü önermişlerdir. Polimerleşmenin sonlanmasının ise aktif merkezlerin deaktive olması ile gerçekleştiğini belirtmişlerdir [28,29].

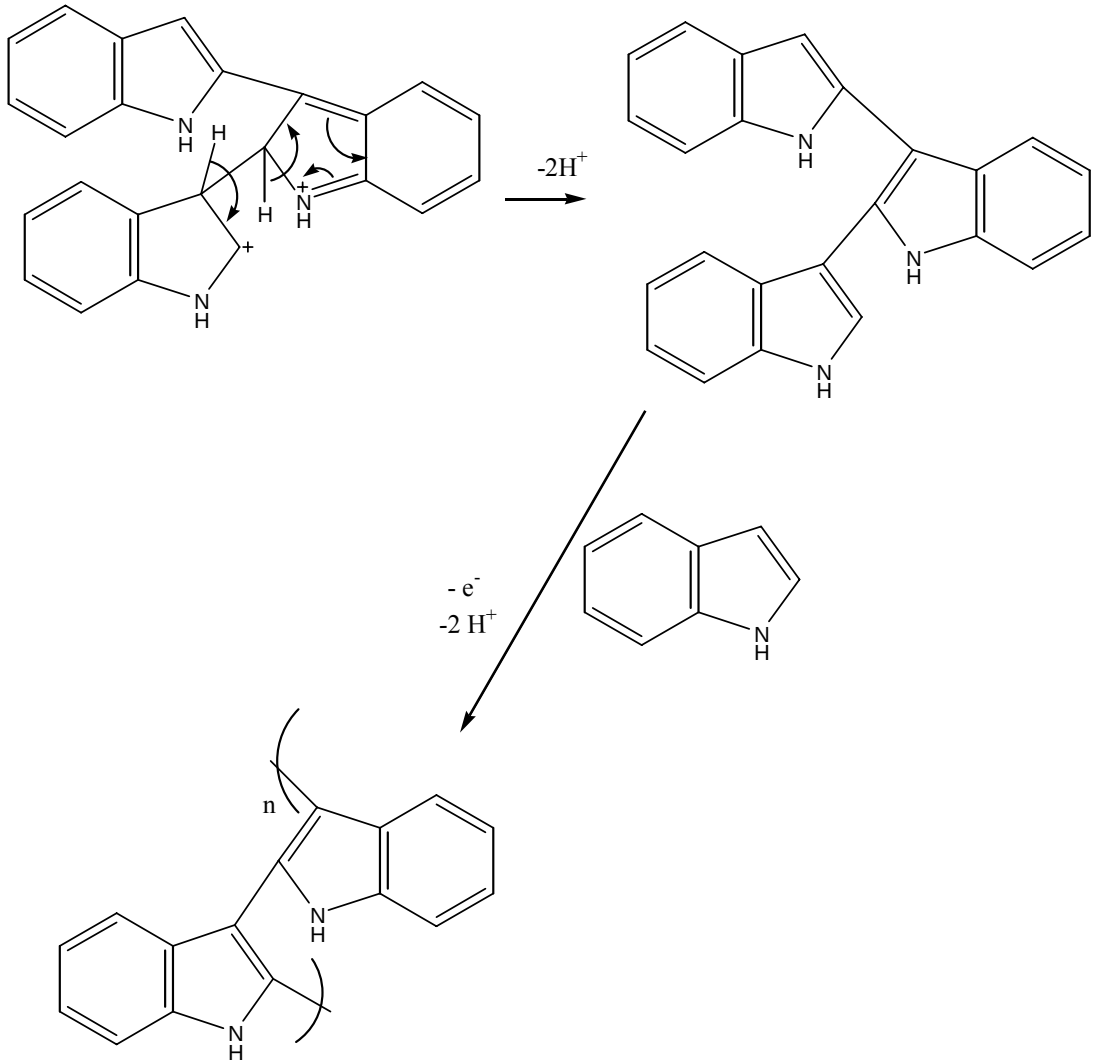
Yapılan literatür araştırmaları ve karakterizasyon çalışmaları (FTIR) ışığında, bu çalışmada kullanılan PIN'ün polimerleşme mekanizmasının 2,3 mekanizması üzerinden radikal-nötral monomer yolu ile yürüdüğü sonucuna ulaşıldı [72]. Buna göre önerilen polimerleşme mekanizması Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de görülmektedir.



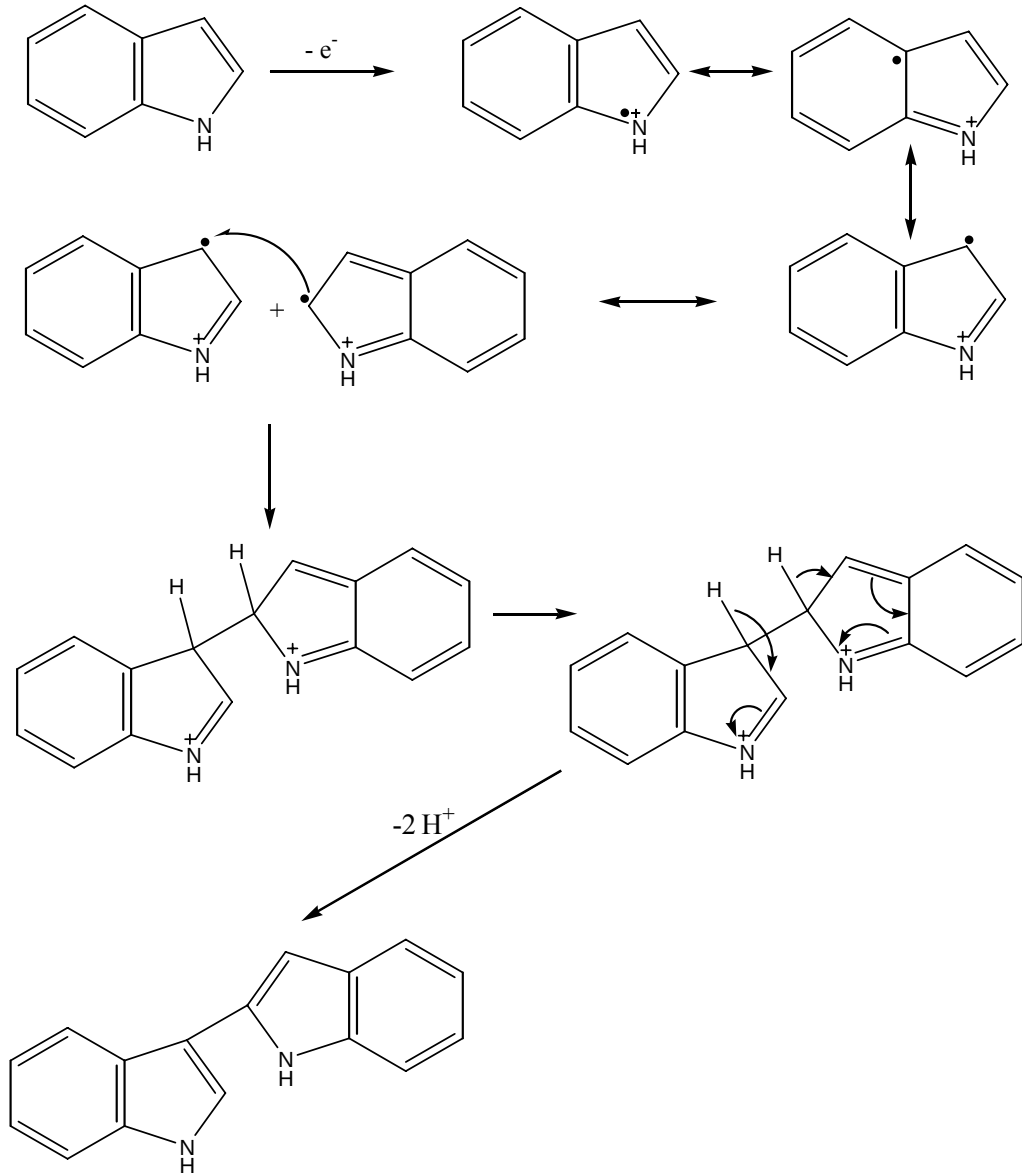
Şekil 2.1. PIN'ün 2. ve 3. karbon atomları üzerinden radikal-nötral monomer yolu ile polimerleşme mekanizması



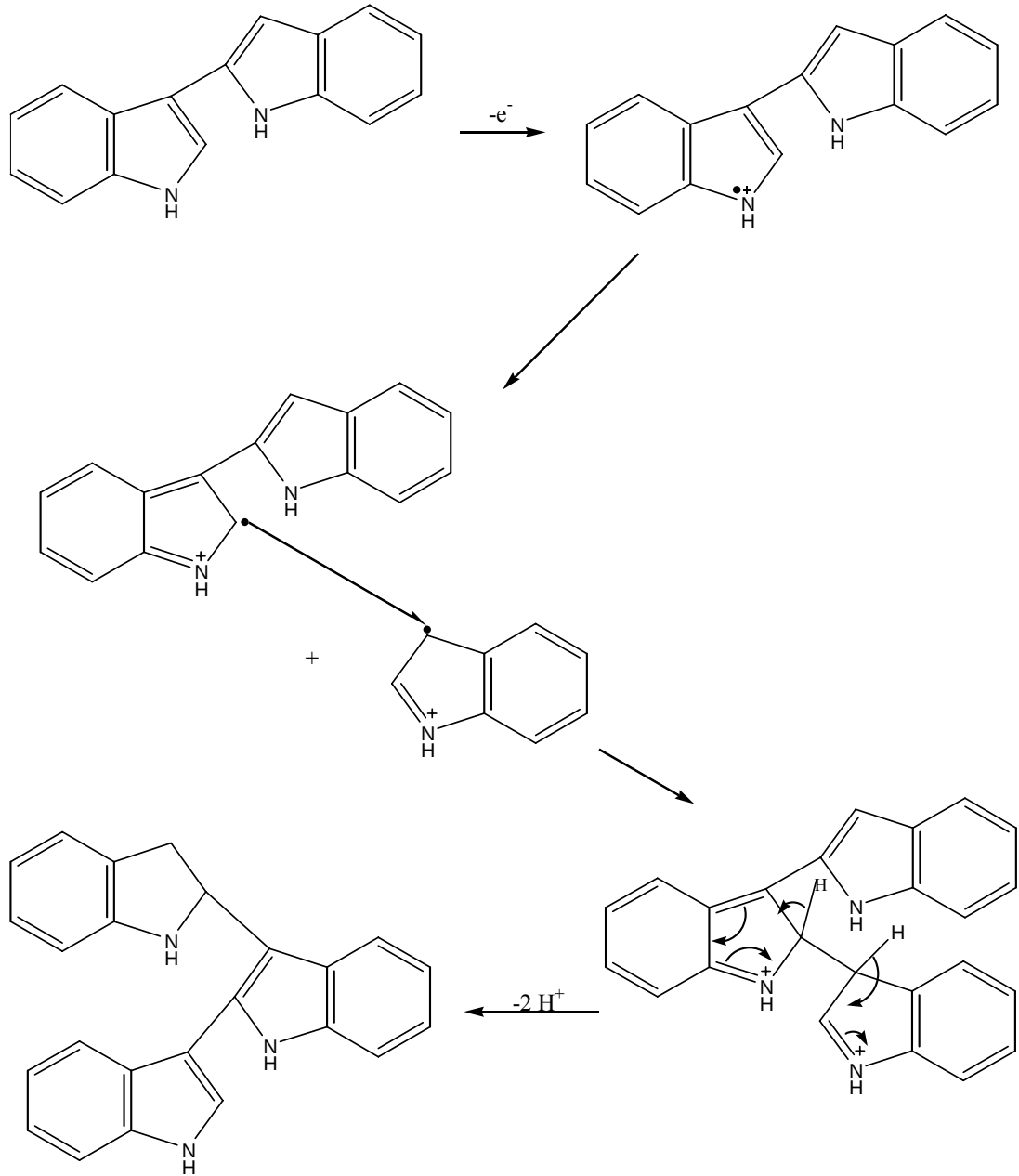
Şekil 2.1. (Devam) PIN'ün 2. ve 3. karbon atomları üzerinden radikal-nötral monomer yolu ile polimerleşme mekanizması



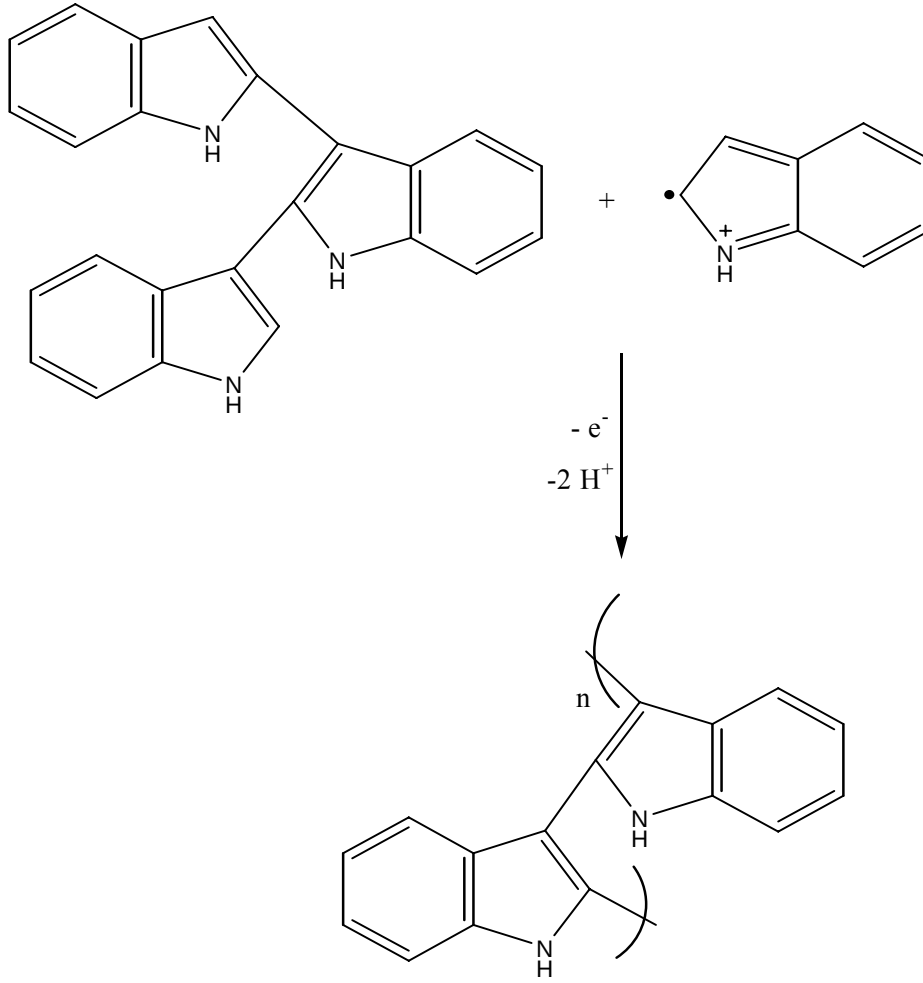
Şekil 2.1. (Devam) PIN'ün 2. ve 3. karbon atomları üzerinden radikal-nötral monomer yolu ile polimerleşme mekanizması



Şekil 2.2. PIN' ün 2. ve 3. karbonlar üzerinden radikal-radikal momomer yolu ile polimerleşme mekanizması



Şekil 2.2. (Devam) PIN' ün 2. ve 3. karbonlar üzerinden radikal-radikal momomer yolu ile polimerleşme mekanizması



Şekil 2.2. (Devam) PIN' ün 2. ve 3. karbonlar üzerinden radikal-radikal momomer yolu ile polimerleşme mekanizması

3. ELEKTROREOLOJİ

3.1. Elektoreoloji Olayı

Elektoreoloji, elektrik alana maruz kalan bir akışkanın, akış özelliklerinde meydana gelen değişimlerin incelendiği bilim dalıdır.

Tarihte elektoreoloji olayının ilk adımı 1896 da Alexander Wilmer Duff tarafından atılmıştır. Duff, gliserin, kunduz yağı ve ağır parafin üzerinden elektrik alan geçirerek viskozitelerindeki küçük değişimleri gözlemlemiştir [30]. Yine 19. yüzyılda Priestley ve Winceler, nötral parçacıkların dielektrik duyarlılıktaki süspansiyon ortamından elektrik geçirilmesiyle birbirine bitişik inci tanecikleri gibi sıralandığını keşfetmişlerdir [30]. Ancak elektoreolojik ve magnetoreolojik parçacıklarla aktif olarak çalışılmaya başlanması, 1940’larda Willis M. Winslow tarafından gerçekleştirildi. Winslow’ un 1940’larda aldığı üç patentten [31-33] ilki 1947’de ER akışkanın tork şanzımanında uygulanmasıyla ilgili olarak verildi. Daha sonra araştırma sonuçlarını yayınlamasıyla elektoreoloji bilimi doğmuş oldu ve onu keşfeden bilim adamının ismine atfen “Winslow Etkisi” olarak anıldı [7].

ER, elektrik alanın sıvı dispersiyonlar üzerine olan etkisiyle ilgilenir. Bu etki ya sıvının akmaya karşı gösterdiği direnç ya da sıvının katıya dönüşümü şeklinde kendini gösterir. Bu olayı etkileyen en önemli faktörler elektrik alan kuvvetinin büyüklüğü, alan frekansı, kayma hızı, kayma gerilimi, sıcaklık, tanecik boyutu, süspansiyon derişimi (veya tanecik hacim kesri), süspansiyon ortamı, dağılan taneciklerin dielektrik özellikleri ve promoter olarak rapor edilmiştir [7].

3.2. Elektoreolojik Akışkanların Reolojisi

Bir akışkanın elektoreolojik yanıt vermesinin sebebi, sürekli faza uygulanan sabit elektrik alanla birlikte dağılmış parçacıkların polarize olmasıdır. Elektrik alan uygulanmasıyla komşu parçacıklar birbirini çekmekte, elektrotlara dik, lif yapıları

oluşmaktadır. Oluşan bu yapılar, süspansiyonun reolojisinde ilginç değişiklikler meydana getirir. Süspansiyonun viskozitesinde büyük artışlar ortaya koyar. Yani süspansiyonların reolojik özellikleri; parçacıklardan lif yapıları oluşturan elektrik kuvvetleri ile bu yapıları deforme edip bozma eğilimindeki akış kuvvetleri arasındaki dengeye bağlıdır.

Bir ER akışkanın reolojik özellikleri, elektrik alan uygulandığında, Newtonian' dan Bingham türü akışa kadar bir geçiş sergiler. Bir ER akışkanın herhangi bir elektrik alan değerinde kayma hızı ile kayma gerilimi arasındaki bağıntı, Eş. 3.1 ile verilmektedir [34].

$$\tau = \tau_E + \eta_s \dot{\gamma} \quad (3.1)$$

Burada, τ_E Bingham akma gücü olarak adlandırılan polarizasyon katkısı, η_s sıfır elektrik alanda süspansiyonun dinamik viskozitesi ve $\dot{\gamma}$ kayma hızıdır. Bingham malzemeleri belli bir akış indeksine sahip plastik kütlelerdir. Bingham plastik akışkanları için, Newtonian modeli:

$$\tau = \tau_y + \eta \frac{du}{dy} \quad \tau > \tau_y \text{ ise} \quad (3.2)$$

Burada, τ_y limit akma gerilimi ve du/dy akma oranının hız gradientidir. Bu oran üzerindeki reolojik davranışlar Newtonian, altındaki davranışlar ise Non-Newtonian'dır.

ER akışkanların reolojisiyle ilgili verilmesi gereken bir başka kavram da Mason sayısıdır (Mn). Bu karakteristik sayı, viskoz kuvvetlerin elektriksel kuvvetlere oranı olarak tanımlanır [35].

$$Mn = \frac{\text{Viskoz kuvvetler}}{\text{Polarizasyon kuvveti}} \quad (3.3)$$

3.3. Elektoreolojik Akışkanlar

Elektoreolojik akışkanların oluşturulması basit bir işlemdir. Yalıtkan bir sıvı içinde dağıtılmış mikrometre boyutunda parçacıklardan meydana gelirler. Taşıyıcı sıvı ve tanecik haricinde surfaktantlar veya aktive edici maddeler de kullanılabilir. Bir ER akışkanda hem taşıyıcı sıvı hem de tanecikler kutuplanabilir özellikte olabilir. ER akışkan oluşturulurken kullanım amacına uygun doğrultuda bileşenler seçilmelidir.

ER akışkanda kullanılan taşıyıcı sıvı ile tanecikler arasındaki dielektriksel uyum, ER etkiye artış sağlar. Polimerler elektriksel özelliklerinin modifiye edilebilirliklerine bağlı olarak ER malzemelerin önemli bir sınıfını oluştururlar. ER malzemelerin elektrik alan kuvvetinin etkisiyle viskozitelerinde birkaç milisaniyede gösterdikleri artış, titreşimin kontrol edilebilmesi ve enerjinin aktarılabilmesi için eşsiz bir mekanizma sergiler.

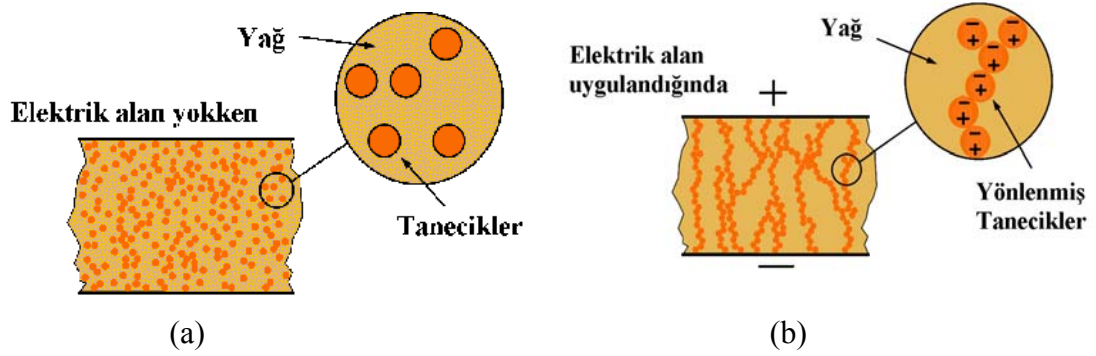
Yarı iletkenlerden daha düşük iletkenlik değerlerine sahip tanecik içeren süspansiyonların ER aktivitesi, genellikle hidrofilik katkılara bağlıdır. Bu hidrofilik etki, tanecik yüzeyini aktive ederek taneciklerin kutuplanmasına sebep olur. Hem organik hem de inorganik tanecikler için aktive edici olarak en çok su kullanılır. Katkı maddesi olarak surfaktantlar ve gliserin, etil alkol ve su gibi diğer polar sıvılar da önerilir [36].

Elektoreolojik akışkanların elektrik alan kuvvetinin etkisiyle katılaşması şöyle açıklanır: Süspansiyonlara uygulanan elektrik alan kuvvetinin etkisiyle hemen hemen tüm tanecikler, zıt yüklü kutuplarının yan yana dizildiği bir yapı oluşturur. Bu zıt kutuplar arasındaki çekim kuvveti parçacıkları birbirine yapıştırır. Birbirini izleyen parçacıklar tıpkı ipe dizilen zincirler gibi uç uca eklenerek sıralanır. ER bir akışkan içerisinde parçacıklar tarafından oluşturulan zincirler akışkan kabının bir ucundan diğer ucuna doğru hızla büyür. ER etki bu zincirlerden meydana gelen kayma geriliminden kaynaklanır.

Süspansiyonun kayma gerilimi büyük ölçüde tanecik derişimlerine bağıdır. Akışkan içerisindeki dağılmış tanecik derişimi ne kadar fazla ise, akışkanın kayma gerilimi o kadar fazladır.

3.4.Elektroreolojik Akışkanlarda Yapı Oluşumu

Winslow ve ardından diğer araştırmacılar yaptıkları deneylerde ER akışların içerisindeki taneciklerin elektrik alan (E), uygulandığında lif yapısı oluşturdıklarını gözlemişlerdir [37]. Bu liflerin statik akma verimini (τ_0), elektrik alana ilişkilendiren mekanik bağlantılar sağladığı varsayıldığından ER olayında bunlar çok önemli kabul edilmiştir [38]. Bununla birlikte elektrotlar kutuplaşıp ER akışkan akmaz iken elektrotlar arasında sağlanan uzaysal bağlantı, aşırı kayma gerilimini, $\Delta\tau$ ($\tau_{E \neq 0} - \tau_{E=0}$), kendi başına açıklamaya yetmez. Bu akış esnasında hiçbir etkileşim veya assosiasyon olmadığı anlamına gelmez, aksine bu tür yapıların akış esnasında elektrotlar arası boşluğu nasıl doldurabildiklerini anlamak zordur. Lif oluşumunun mikroskopik gözlemleri, elektrot takılmış olan çok dar mesafeli mikroskop yarıklarında ve seyreltik akışkanlarda yapılmıştır. En gerçekçi durumlarda akışın olduğu hücredeki elektrotlar arası mesafe 1 mm dir ve bu tür assosiasyon olaylarının doğrudan gözlenebilmeleri, ER akışkanlar optik ölçümler için oldukça bulanık olduklarından zordur. ER akışkanların durgun olduğu durumlarda, diğer elektrik sistemlerinde ve onların magnetik analoglarında olduğu gibi, akışkan içerisindeki taneciklerin elektrik alan etkisiyle Şekil 3.1' de görüldüğü gibi polarlanıp zincir oluşturarak assosiasyona uğramaları beklenilmektedir [39]. Bu durumun ER olayında ne derece önemli olduğu ise hala çözüm bekleyen bir konudur. Kullanışlı ER etkiler gösterebilen sistemlerin karakterizasyonunda birtakım güçlükler gözlenir. Öncelikle ER etki çözücü ve tanecikler arasındaki büyük dielektrik farkı ile yakından ilgilidir. Dış elektrik alan etkisi altında bu fark süspansiyon içerisinde homojen olmayan elektrik alanlar meydana getirir. Bu da ER akışkanı zincir şeklinde assosiye olmuş veya lif şeklini almış yapılara götürür. ER aktivitesi gösteren süspansiyonların viskoziteleri elektrik alanın artışına bağlı olarak artar. Bunun nedeni süspansiyon içerisindeki elektriksel olarak uyarılmış tanecikler arasındaki etkileşimler ve hidrodinamik kuvvetlerdir.



Şekil 3.1. Silikon yağı içerisinde dağılmış PIN ve PIN/PVAc taneciklerine elektrik alan uygulandığında oluşan değişikliklerin şematik gösterilişi. (a) Elektrik alan uygulanmadan önce (b) Elektrik alan uygulandığında ER taneciklerin durumu

3.5. ER Aktivite Üzerine Etki Eden Faktörler

ER aktivite üzerine etki eden önemli parametreler, uygulanan elektrik alan kuvveti, elektrik alan frekansı, tanecik iletkenliği, tanecik dielektrik özellikleri, tanecik derişimi, tanecik boyutu, sıcaklık, promoter içermesi, dağıtıcı yalıtkan sıvı ortam, v.b. gibidir. Bu kısımda bu parametrelerin ER aktivite üzerine etkileri kısaca özetlenecektir.

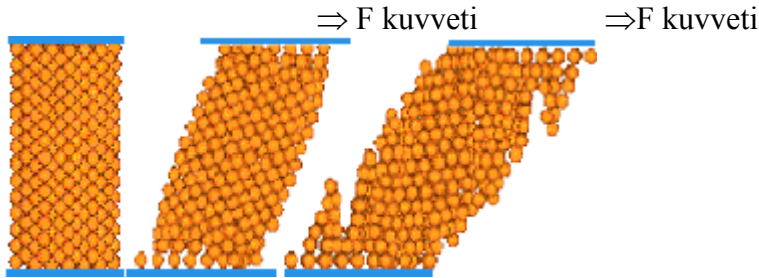
3.5.1. Elektrik alan kuvveti

Elektroreolojik akışkana elektrik alan uygulandığında parçacıklar iletkenliği sağlar ve zincir oluşumu veya lif yapısı gözlenir. Parçacıkların polarlanması sonucu gerçekleşen bu olay elektroreolojik aktivite olarak nitelendirilir. Bunun için genellikle doğru akım güç kaynağı kullanılır. Elektrik alan kuvveti genellikle 0 – 10 kV/mm arasında olabilir. ER akışkanlar bu davranışlarını elektrotlar arasına elektrik alan uygulandığında sergileyebilirler. Bu olay tersinir olup, elektrik alan uygulanınca akışkan katılaşır, elektrik alana kaldırılınca akışkan tekrar sıvı hala dönüşür. Bu dönüşüm iyi bir ERA da milisaniye mertebesinde gerçekleşir. ER aktivitenin ilk gözlemlendiği elektrik alan kuvvetinin değerine ise eşik enerjisi denir.

3.5.2. Kayma hızı

Viskoz akmada deformasyon kayma hızı ile kayma gerilimine bağlıdır. Kayma gerilimi, kayma hızıyla doğru orantılıdır. Bu orantının sabiti ise viskozite değerini verir. Eğer viskozite kayma hızından bağımsız ise sıvı Newtonian (Newton yasasına uyan) veya ideal akışkan özelliğini gösterir. Bazı durumlarda ise viskozite kayma hızındaki değişime bağlıdır. Pek çok durumda kayma hızındaki artış ile viskozitenin azaldığı görülmüştür. Bu duruma “kayma incilmesi” veya geçici viskozite kaybı denir. Kayma hızındaki artış ile viskozitenin artış gösterdiği duruma ise “kayma kalınlaşması” bu tür özellik gösteren akışkanlara da “dilatant” akışkanlar denir.

Bu tür akışkanlara elektrik alan kuvveti uygulandıktan sonra polarize olan tanecik yapılarında, belirli bir kayma hızında kayma gerilimi uygulandığında devrilme gözlenir. Yani Şekil 3.2’ de görüldüğü gibi kaydırma kuvvetinin etkisi ile tanecikler yer değiştirir fakat yüklü tanecikler birbirini çekmeye devam eder.



Şekil 3.2. İki paralel plaka arasındaki ER akışkanına kayma hızı uygulandığında ERA’ nında gözlenen yapı değişimi

3.5.3. Elektrik alan frekansı

ER çalışmaların pek çoğu dc elektrik alan kuvveti altında (sabit frekansta), bazıları da ac elektrik alan kuvveti altında (değişken frekansta) yapılmıştır. Alan frekansının ER aktivite üzerine etkisi değişkenlik göstermektedir. Gao ve Zhao β -siklodekstrin polimeri ile aktivite değişimini incelemişlerdir. 100 Hz’ten sonra frekans artışı ile ER aktivitenin azaldığı kaydedilmiştir [40]. Yılmaz ve arkadaşları PMMA-b-PSt/SO

sistemi ile yaptıkları çalışmada frekans artışı ile ER aktivitenin azaldığını rapor etmişlerdir [41].

3.5.4. Tanecik iletkenliği

Bir dış elektrik alan kuvveti altında ER etkinin artmasında polarizasyonun önemli bir rol oynadığı bilinir. Burada tanecik dielektrik özellikleri ve iletkenliği ER etkinin oluşumuna neden olur. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada taneciklerin 10^{-5} – 10^{-8} Sm^{-1} iletkenliğe sahip olduklarında iyi bir ER etki göstereceğini belirtmişlerdir [8]. Yüksek iletkenliğe sahip taneciklerin yüksek elektrik alan kuvvetlerinde elektriksel olarak bozulmaya uğradığı belirtilmektedir.

3.5.5. Tanecik dielektrik özelliği

ER mekanizmasının çoğu incelemelerinde ER etkide ara yüzey parçacık polarizasyonunun önemli bir rol oynadığına inanılır. Araştırmacılar parçacık polarizasyonunun kompleks dielektrik sabitiyle ilgili olduğunu belirtmişlerdir.

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (3.4)$$

Bu eşitlikte; ϵ' dielektrik sabiti ve ϵ'' ise dielektrik kaybı faktörüdür.

Polarizasyondaki iki parametrenin, yüksek ER davranışı için anahtar olabileceği düşünülmektedir. Bu mekanizma ile yüksek ER aktif materyallerin ara yüzey polarizasyon yöntemi ve tüm ER aktif davranışları açıklanabilmektedir. ER akışkanlarda parçacıkların polarizasyon özelliği ve iletkenlik önemli rol oynamaktadır. Hao ER etkinin ara yüzey polarizasyonu ile ilgili olduğunu ve ara yüzey polarizasyonunun ER akışkanın iletkenliği ve dielektrik sabiti tarafından belirlendiğini belirtmiştir [42]. Araştırmacıların TiO_2 süspansiyonları ile yaptıkları çalışmada yüksek dielektrik sabitinden dolayı iyi bir ER etki gözlenememiştir. Çünkü yüksek dielektrik sabitine sahip taneciklerde elektrik alan kuvveti altında

yüksek dielektrik kaybı meydana gelmektedir. Yang ve arkadaşları bakır ftalosiyanın ile dop ettikleri TiO_2 'in silikon yağı içerisindeki süspansiyonlarında, daha düşük dielektrik sabitine sahip olması nedeniyle yüksek ER etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir [43]. Otsubo, silika süspansiyonlarının yüksek dielektrik sabitinden dolayı yüzeylerine su absorplamalarının ER performans için önemli bir faktör olduğunu bulmuştur [44]. Gehin ve arkadaşları 10^{-9} Sm^{-1} iletkenliğe sahip olan silika süspansiyonlarının 1000 Hz frekansta dielektrik sabitinin 2,68 olduğunu ve yüksek bir ER performans gösterdiğini rapor etmişlerdir [45].

3.5.6. Tanecik hacim kesri

ER akışkanlar yalıtkan yağ içerisinde dağılmış taneciklerden oluşmuşlardır. Yalıtkan yağ içerisinde dağılmış ER aktif taneciklerin miktarının ölçüsü de tanecik hacim kesridir. Yağ içerisinde dağılmış taneciklerin miktarı arttıkça ER aktivitesi de artar fakat bununda bir sınırı vardır. Süspansiyon çok derişik olduğunda pasta kıvamını alır. Kolloidal kararsızlık göstermeye başlar. Elektrik alan kuvveti sıfır iken dahi süspansiyon katı halde bulunabilir. Elektrik alan yokluğunda ER akış süresi kısa, elektrik alan varlığında ise akış süresinin uzun olması istenir.

Elektrik alan uygulandığında süspansiyonda büyük bir ER karşılığı alabilmek için, derişimin çok yüksek olmadığı kararlı bir süspansiyona ihtiyaç vardır. ER akışkanı hazırlamaktaki güçlüklerden birisi de uzun süre ve çeşitli çevre şartlarında çökmeye karşı direncinin korunamamasıdır.

Bir ER süspansiyonda okunan gerilim ve viskozitenin büyüklüğünün değişimi tanecik hacim kesrine bağlıdır. Şahin ve arkadaşlarının polipirol süspansiyonları ile yaptıkları çalışmada derişim arttıkça ER aktivitenin arttığı rapor edilmiştir [46]. Bu artış derişimin artmasıyla polarizasyon kuvvetlerinin artış göstermesi ve buna bağlı olarak ER aktivitenin artışı ifade eder.

3.5.7. Sıcaklık

Elektroreolojik akışkan kuru haldeyken aktivite gösteriyor ise akışkanlığı sadece yağın viskozitesi ile sınırlıdır. Su veya başka bir aktivite sağlayıcı madde ile teşvik ediliyorsa bazı problemler söz konusudur. ER akışkan çok kullanılan bir promoter olan su ile teşvik ediliyorsa, yüksek çalışma sıcaklıklarında, örneğin 70 °C'nin üstünde suyun buhar basıncı artar ve kuruma olur. 0 °C altında ise aşırı viskozlaşma ve buzlanma problemi tanecik polarizasyonunun önüne geçer, aktivite kaybına neden olur.

3.5.8. Promoter

Elektroreolojik tanecikler bir taraftan elektriksel bozunmayı önlemek için dispersiyon ortamı olarak iletken olmayan sıvılara ihtiyaç gösterirken [47], diğer taraftan çoğu zaman ER etkiyi arttırmak veya bazı durumlarda ER etkisini gözleyebilmek için eser miktarda su veya polar sıvılara ihtiyaç gösterirler [48]. Bu tür sıvılara “promoter” (teşvik edici) adı verilir. Bu sıvılar polarizasyonu sağlar ve akışkanı aktif hale getirir. ER akışkanlarda süspansiyon ortamının düşük iletkenliğe sahip olması gerekir. Süspansiyon ortamı olarak silikon yağı, yemek yağı ve madeni yağlar, trioktiltrimellitrat, dioktilftalat vb gibi pek çok sıvılar kullanılmıştır. ER davranış sergileyen organik tanecikler ise genelde un, mikro kristal yapıdaki selüloz, iyon değiştirici reçineler, çeşitli killer, sabunlar, çeşitli polimerler ve polimer/kil kompozit ve nanokompozitleridir [49-52]. Uygulanan elektrik alanına tepki gösterebilmek için ve büyük miktarlarda elektoreolojik etki oluşturabilmek için organik taneciklerin oluşturduğu süspansiyon ortamında küçük miktarlarda (ppm mertebesinde) su gibi polar bir maddenin varlığına ihtiyaç gösterirler. Bununla birlikte suyun varlığı süspansiyon ortamının iletkenliği artırır ve ER sıvıların uygulanma alanlarında güçlükler doğurur [53].

Bu durum ER akışkanların potansiyel uygulanma alanları için ciddi bir sınırlayıcı etkidir. Bu aşamada son zamanlarda sentezlenmiş olan bazı kuru, (ER aktivite için eser miktarda suya veya herhangi bir polar sıvaya ihtiyaç göstermeyen) ER

akışkanların istenen bütün özellikleri göstererek yaş ER akışkanların yerini alacağı yönünde pek çok çalışma rapor edilmiştir [54].

3.5.9. Kolloidal kararlılık

ER akışkanların uygulamaları açısından karşılaşılan en büyük sorunlar kolloidal kararsızlık ve tortu bırakmadır. Kararlı bir kolloidal dispersiyonun uzun bir zaman aralığında dispers olmuş fazı dağılma ortamında asılı kalabilmelidir. Kolloidal kararlılığa etki eden faktörler olarak dağılma ortamı, sıcaklık, ortama ilave edilen polielektrolitler ve dağılan fazdaki tanecik boyutu sayılabilir. Endüstriyel açıdan kolloidal olarak dağılmış taneciklerin asılı olarak altı aydan daha uzun süre bulundukları ortamda çökmeden kalmaları istenir. Literatürde sentezlenmiş olan ER aktif taneciklerden yüksek kolloidal kararlılık gösterenler bazı polimer; %5'lik silikon yağı içerisindeki poliizopren-blok-poli(tersiyerbütülmetakrilat) süspansiyonu 54 gün, %5'lik PAMPSLi/silikon yağı süspansiyonu için 41 gündür [55,56].

Polimerlerin kolloidal kararlılıklarını tayin etmek amacıyla dağılma ortamı içerisinde hazırlanan ER aktif süspansiyonlarda ilk çökelmenin görüldüğü an süspansiyonun kolloidal kararsızlık süresi süresi olarak tanımlanır. Çökelme oranını hesaplamak amacıyla ise Eş. 3.5 kullanılır.

$$\text{Çökelme Kararlılığı Oranı} = \frac{b}{(a + b)} \times 100 \quad (3.5)$$

Burada, a silikon yağı yüksekliği, b ER akışkan yüksekliği olarak tanımlanır.

3.5.10. Tanecik boyutu

ER aktivitenin bir süspansiyondaki tanecikler arası etkileşimlerden kaynaklandığı bilinmektedir. Süspansiyona bir elektrik alan uygulandığında, bu etkileşimler sonucunda tanecikler zincir yapısı oluşturur. Süspansiyon yapısının yerçekimine karşı dayanıklı ve kolloidal olarak kararlı olması için tanecik boyutunun küçük ve

tanecikler arası etkileşimlerin büyük olması tercih edilmektedir. Literatürde ER aktivite gösteren tanecik büyüklükleri 0,1–100 µm arasında olduğu belirtilmiştir [57].

3.5.11. Sürünme testleri

Sürünme uzun süre gerilim altında kalmaktan dolayı malzemenin içinde tersinmez deformasyonların birikmesi sonucu malzemedeki yapı taşlarının birbiri üzerine akmasına denir. Polimerlerde ilginç olan durum, bir polimerin aynı anda hem viskoz hemde elastik deformasyon gösterebilmesidir. Bu nedenle polimerdeki sürünme (creep) olayı visko—elastik karakterdir [58]. Polimerlerin, özellikle amorf polimerlerin, zaman bağımlı mekanik davranışları, moleküllerin birbiriyle olan karmaşık ilişkisinden kaynaklanmaktadır. Viskoelastik davranışı açıklamak için elastik ve viskoz deformasyonları birleştiren basit bir model kullanılır. Bu elastik deformasyon bir yay örneği ile (zamana bağımsız) ve viskoz deformasyon yağ kutusu örneği ile (zamana bağımlı) gösterilir. Bu iki deformasyonun mekanik benzetmelerinin seri ve paralel bağlanması sonucu Maxwell ve Voigt—Kelvin modelleri elde edilir. Viskoelastik deformasyon için bu iki mekanik benzetme kullanılmaktadır. Bu modelleri tanımlayan eşitlikler aşağıda verilmiştir [59].

a) Elastik deformasyon;

$$\tau = E\varepsilon \quad (3.6)$$

b) Viskoz deformasyon;

$$\tau = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3.7)$$

c) Maxwell modeli

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \left(\frac{1}{E} \right) \left(\frac{d\tau}{dt} \right) + \frac{\tau}{\eta} \quad (3.8)$$

d) Voigt Kelvin modeli

$$\tau = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3.9)$$

Bu eşitliklerde;

ε : Gerinim

t: zaman

η : Viskozite

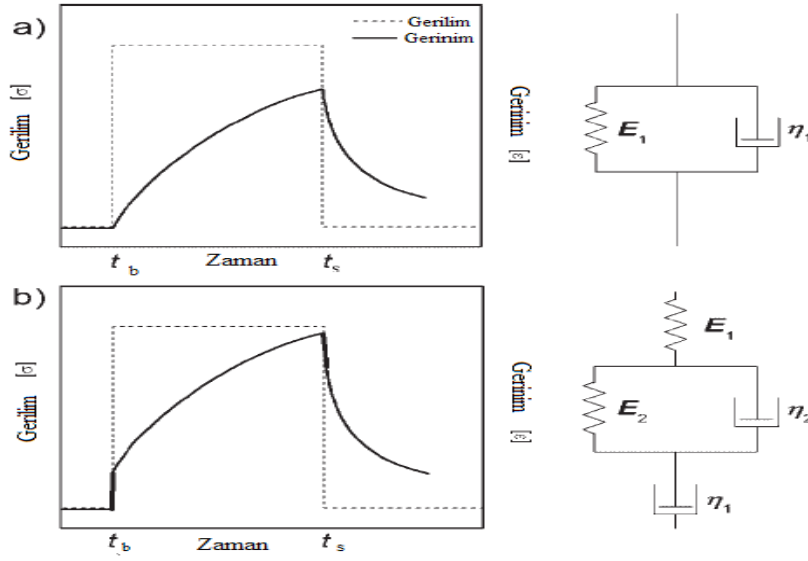
τ : Gerilim

E: Elastik modül olarak tanımlanır.

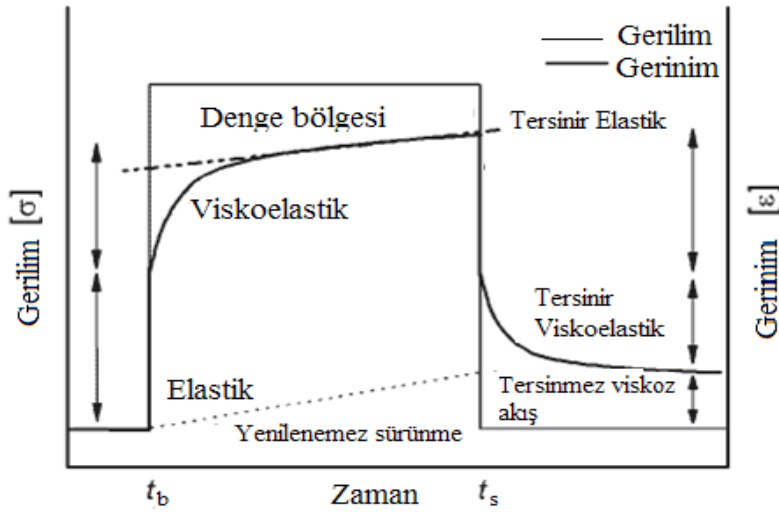
Maxwell modelinde gerilim altında elastik ve viskoz deformasyonlar beraber oluşacaktır. Elastik deformasyon hızlı olurken viskoz deformasyon yavaş olur. Gerilim kaldırıldığında, yay (elastik) eski konumuna gelecek fakat yağ kutusundaki gerilim aynen kalacaktır.

Voigt–Kelvin modelinde ise durum biraz değişiktir. Maxwell modelinde yayın gerilimine karşı tepkisi anında olurken Voigt–Kelvin’ de yay yağ kutusuna bağlı olarak geçmiş bir tepki gösterir. Bu model, polimerin karmaşık yapısını gerilim altında daha iyi tanımlamaktadır. Gerilim uygulandığında yay dengeye gelirken, yağ kutusunun buna karşı göstereceği sönümlenme direnci elastik deformasyonu geciktirecektir. Bu davranışa kısaca viskoelastik deformasyon denir. Bu model belirli bir zaman aralığında deformasyon başlangıcı (t_b) ve deformasyon sonlanması (t_s) zamanı olarak Şekil 3.3a’da şematik gösterilmiştir.

Sürünme olayını daha iyi tanımlayabilecek mekanik model Maxwell ve Voigt–Kelvin modellerinin karışımıdır. Bu iki modeli birbiriyle arka arkaya seri ve paralel bağlayarak ideal viskoelastik model açıklanabilir. Şekil 3.3b’ de seri bağlı modeli gösterilmiştir [60].



Şekil 3.3. a) Voigt Kelvin modeli b) Maxwell ve Voigt—Klevin modelin seri bağlı şematik gösterimi



Şekil 3.4. Bir polimerin sürünme—yenilenme profil eğrileri

Şekil 3.4' de gösterilen bir polimer için tipik bir sürünme-yenilenme profili eğrisidir. Eğrinin ana bölgeleri polimerik malzemenin uygulanan gerilime karşı gösterdiği tepkinin başlangıç (t_b) ve bitiş (t_s) noktaları ile tanımlanır. Polimer üzerine t_b noktasına gerilimin uygulanmaya başlamasıyla malzeme anında uzama veya deformasyon gösterir, bu deformasyon elastiktir. Ardından, sürünmenin gözlemlendiği viskoelastik ve viskoz akışların gerçekleştiği bölgeye ulaşılır. Bu olay hızlı

gerçekleşir ancak hemen ardından lineer denge bölgesine malzeme ulaşır. Bu eğri üzerine ekstrapole edilmiş noktalarla gösterilmiştir. Uygulanan gerilimin t_s noktasında sona erdirilmesinin ardından hemen tersinir elastik yenilenme gerçekleşir ve gerinimde çok hızlı bir düşüşe yol açar. Testin ilerleyen zamanlarında zaman-bağımlı tersinir viskoelastik yenilenme meydana gelir. Ancak bu yenilenme daha yavaş bir hızda cereyan eder. Malzeme üzerindeki nihai gerinim başlangıçta uygulanan gerinimden daha büyük görünüyorsa, malzeme üzerinde tersinmez, kalıcı ve yenilenemez bir viskoz akışın gerçekleştiği sonucuna varılır [61].

3.6. ER Akışkanların Verimi

ER verimi, elektrik alan uygulanması ile viskozitede meydana gelen bağıl artış olarak ifade edilir. ER etkinin pratik uygulamaları için aranan özellik, akışkanın en düşük elektrik alanda mümkün olabilen en yüksek elektroviskoziteye sahip olabilmesidir [62]. ER viskozite, Eş. 3.10 ile tanımlanırsa;

$$\Delta\eta_{ER} = \eta_{E \neq 0} - \eta_{E=0} \quad (3.10)$$

ER etkinin verimi;

$$ER_{verimi} = \frac{\Delta\eta_{ER}}{\eta_{E=0}} \quad (3.11)$$

şeklinde ifade edilir. Burada;

$\eta_{E \neq 0}$: Süspansiyonun elektrik alan varlığında viskozitesi

$\eta_{E=0}$: Süspansiyonun elektrik alan sıfırken viskozitesi

E= ER verimi

olarak tanımlanır.

$\eta_{E \neq 0}$ değeri, belli bir tanecik derişiminde uygulanan elektrik alanla birlikte, taneciklerden oluşan zincir benzeri yapıların kayma değerindeki dirence bağlıdır.

Tanecikler yokken taşıyıcı sıvının $\eta_{E=0}$ ve $\eta_{E \neq 0}$ viskoziteleri ihmal edilebilir ve elektrik alan kuvveti sıfır olduğunda ortamın ER verimi; $ER_{verimi} = \frac{\Delta \eta_{ER}}{\eta_{E=0}} = 0$ dır.

Ortama tanecikler gönderildiğinde, ER etki pozitifse $\eta_{E \neq 0}$ değeri $\eta_{E=0}$ değerinden daha büyük olacaktır. ($\eta_{E \neq 0} > \eta_{E=0}$). Çünkü elektrik alan varlığında tanecikler arasında zincir yapısı oluştuğundan viskozite artacak dolayısıyla ER verimi > 0 olacaktır. Viskozite değerindeki ve dolayısıyla ER verimindeki artış, süspansiyonun derişimiyle de doğru orantılıdır. Ancak bu artış belli bir derişim değerinden sonra ER veriminde azalmaya sebep olur [63]. Ünal ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada Poliinden/ $CaCO_3$ kompozitlerin silikon yağı içerisinde hazırlanan süspansiyonlarının ER aktif olduğu gözlenmiştir. ER veriminin %25 (m/m) derişime kadar artan derişim ile arttığı %25'den daha büyük derişimlerde ise azaldığı gözlenmiştir. ER aktivitenin artan kayma hızı ile azaldığı, artan elektrik alan kuvveti ile arttığı bulunmuştur [64].

3.7. ER Akışkanlarının Kullanım Alanları

ER akışkanların ilk gelişimi oldukça yavaştı. Çünkü bu akışkanların içerisinde su bulunuyordu ve yüksek sıcaklıkta iyi bir ER performans göstermiyordu. ER akışkanın gelişimi için fizik, kimya, mühendislik ve matematik alanlarında ortak bir gelişmeye ihtiyaç vardı ve o zaman için bu sağlanamadı. ER akışkan Winslow tarafından icat edildiği zaman çok ilginç olmasına rağmen, çok az ticari üretimleri ve aletleri oluştu. Bunun nedenleri;

- Hazırlanan ER aktif malzemelerdeki kayma geriliminin yeterince yüksek olmaması
- Yeterli çalışma sıcaklığı aralığında ER performans gösterecek ER akışkanların hazırlanamaması,
- ER süspansiyonların koloidal kararlılığının düşük olması ve tortu bırakması
- ER etkinin kontrolü için ileri teknoloji eksikliğinin bulunması

Bunların birçoğunun çözümü ise son zamanlarda bulundu. Şimdiye kadar ER akışkanların birçok patentleri alınmıştır. Şok absorplayıcılar, debriyaj ve fren sistemleri, titreşim sönümleyiciler, hidrolik valfler, aktivatör, binaların temelinde, robotlar ve yapay organlar gibi kullanım alanları önerilmiştir[5, 65-70]. Bunlara ilave olarak, fotonik kristal algılayıcı, lamba anahtarı, mekanik cilalayıcı, monitörler, mürekkepli yazıcılar, mekanik algılayıcılar ya da sismograflar gibi ER akışkanların kullanılacağı birçok alan gelecekte geliştirilecektir [71].

ER akışkanlar potansiyel uygulama alanları çok geniş olan akıllı materyallerdir. Heterojen ER akışkanlar üzerine yapılan çalışmalar literatürde önemli bir yere sahiptir. Fakat heterojen ER akışkanlarda taneciklerin artık bırakması uygulama alanları için sınırlayıcı bir faktördür. Son zamanlarda geliştirilen homojen ER akışkanlar geniş çalışma sıcaklık aralığının heterojen ER akışkanlardan daha üstün olduğu gözlenmiştir.

ER akışkan kolay ve hızlı bir şekilde sıvı halden bir katı hale dönüşmekte ve tersinir olarak bir elektrik alanda bu davranışı sergileyebilmektedirler. Böylece mekanik ve elektronik ara birimlerde taşıyıcı ve kontrol sıvısı olarak kullanılabilirler.

Gelecekteki çalışmalar yüksek performanslı ER akışkanların güçlü bir ER etki vermesi ve çökelme problemlerinin giderilmesi üzerine olacaktır. ER etkinin mekanizması için fiziksel modeller önerilecek ve ER aygıtlar için düzenlenecektir. ER akışkan hazırlanmasındaki güçlükler kesin olarak giderilerek, ER aletler hızla ticarileştirilecektir. ER sensörler, ER sönümleyici sistemler, ER mürekkepli yazıcı ve ER cilalayıcılar gibi yarı iletken endüstriyel kısımlar öncülük edeceklerdir. Çünkü bu aletlerle aşırı miktarda ER akışkan gerektirmeden, endüstriyel olarak uzun bir süre kullanım imkânı olabilecektir.

4. DENEYSEL KISIM

4.1. Kullanılan Kimyasal Maddeler

Silikon yağı(Aldrich); $\eta = 1000$ mPas ; $d = 0,97$ g/cm³ (T=25 °C de); $\varepsilon = 2,61$;

Çözünürlük testlerinde kullanılan (Kloroform, Etanol, Etilasetat, Aseton, Metanol, Asetonitril, CCl₄, THF, DMF, DMSO, 1,4-dioksan, Benzen, HCl) tüm kimyasallar Merck firmasına ait olup, analitik saflıkta olduklarından ileri bir saflaştırmaya tabi tutulmadan kullanıldı.

4.1.1. Homopolimer ve kompozitlerin sentezi

Homopolimerin sentezi

Kimyasal yöntemle poliindol hazırlanmasında, $n_{\text{monomer}} / n_{\text{tuz}} = 1/2$ olarak alındı. Polimerleşme için 0,015 mol indol (monomer) 0,030 mol susuz FeCl₃ kullanıldı. Çözücü olarak kloroform alındı. Önce FeCl₃ üç boyunlu balona konulup, üzerine 36 mL kloroform eklendi. Bu karışım geri soğutucu altında karıştırırken içerisinde N₂(g) geçirilmeye başlandı. Birkaç dakika N₂(g) geçtikten sonra, 10 mL kloroform ile hazırlanan indol çözeltisi damlatma hunisinden 5 dakikada damla damla eklendi. İndol çözeltisi eklendiği andan itibaren 5 saat ortam sıcaklığı 15 °C’de tutularak polimerleşme çözeltisi karıştırıldı. Polimerleşme sırasında ortamın rengi siyah olup polimerleşmenin sonuna doğru süspansiyon ortamının akışkanlığındaki azalmadan polimerleşmenin gerçekleşmekte olduğu sonucuna varıldı. Oluşan poliindol Gouch krozesi kullanılarak su trompunda 90 °C’ daki sıcak su ile süzüntü berrak ve renksiz oluncaya kadar yıkandı. Ardından vakum etüvünde 70 °C’ de 24 saat kurutuldu. Haki yeşil renkte 1,52 g ürün elde edildi. Kütlece %87 verimle PIN sentezlendi [72].

PIN/PVAc kompozitlerin sentezi

Aşağıda ayrıntılı olarak sadece kütlece %14 PIN içeren PIN/PVAc kompozitlerinin sentezi verilmiş olup, diğer kompozitler de aynı yöntemle PVAc miktarları değiştirilerek sentezlenmiş ve sentezlen sırasında kullanılan oranlar Çizelge 4.1’ de belirtilmiştir.

PIN-PVAc iletken kompozitinin hazırlanması sırasında $n_{\text{indol}} : n_{\text{FeCl}_3}$ oranı oranları 1:2 alınarak kompozitler sentezlendi. Sentezlenen polindol için indol FeCl_3 miktarı sırasıyla 0,015 mol ve 0,030 mol olarak alındı. Çözücü olarak etanol—kloroform karışımı (30/35 mL; V/V) kullanıldı. $6,5 \times 10^{-5}$ mol PVAc deneyden bir gün önce 35 mL kloroform içinde çözüldü. 0,03 mol FeCl_3 üç boyunlu balona konulup üzerine 15 mL etanol eklendi. Bu çözelti geri soğutucu altında karıştırılmaya ve $\text{N}_2(\text{g})$ geçirilmeye başlandı. Bunun üzerine 15 mL etanol içerisinde çözülen 0,015 mol indol içeren çözelti 5 dakika süre içinde damla damla eklendi. İndol eklendikten sonra, bir gün önceden hazırlanan PVAc çözeltisi balona aktarıldı. Elde edilen karışım 5 saat süreyle 15°C ’ de $\text{N}_2(\text{g})$ atmosferinde karıştırıldı. Tepkime sonunda elde edilen karışım petri kaplarına ince bir film oluşturacak şekilde döküldü. Petri kaplarında kuruyan kompozit 90°C ’de su ile muamele edilerek alınıp, kaba süzgeç kâğıdından 90°C ’ de su kullanılarak süzüldü. Süzüntü tamamen berraklaşmaya kadar süzme işlemine devam edildi. Saflaştırılan kompozit vakum etüvde 36 saat süreyle kurutuldu. Kurutulduktan sonra elde edilen siyah renkli kompozit tartıldı ve kütlesi 6,09 g bulundu. Kompozit içindeki PIN’in polimerleşme verimi % 47 olarak hesaplandı. Kompozit içerisindeki PIN oranı ise % 14 olarak tespit edildi [72].

Çizelge 4.1. PIN/PVAc kompozitleri sentezlemek için kullanılan kimyasal oranlar

Kompozitler	PVAc (mol)	İndol (mol)	FeCl ₃ (mol)
%14 PIN içeren PIN/PVAc	$6,5 \times 10^{-5}$	0,015	0,030
%18 PIN içeren PIN/PVAc	$5,6 \times 10^{-5}$	0,015	0,030
%28 PIN içeren PIN/PVAc	$4,2 \times 10^{-5}$	0,015	0,030
%35 PIN içeren PIN/PVAc	$3,5 \times 10^{-5}$	0,015	0,030

4.3.Kullanılan Cihazlar ve Çalışma Yöntemleri

4.3.1.Öğütme işlemi

PIN homopolimeri ve %14 , %18 , %28 , %35 PIN içeren PIN/PVAc kompozit örnekleri, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında üç boyutlu (X, Y, Z eksenlerinde dönebilen) bir değirmende 48 saat süreyle öğütülerek tanecik boyutları küçültüldü.

4.3.2.Tanecik boyutu ölçümleri

Toz halindeki polimer örneklerinin tanecik büyüklükleri, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Malvern Mastersizer E version 1.2b, 18 mm çapında He—Ne lazer kaynağına sahip Dinamik Işık Saçılımı Spektrometresi ile Fraunhofer saçılma teorisine göre ölçüldü. Bu teknikte monokromatik (Lazer) ışık kaynağı numunenin bulunduğu hücre içerisine gönderilir ve saçılan ışığın şiddetinden tanecik boyutu hesaplanır. Ölçümler sırasında bir miktar numune cihazın haznesine konuldu, etanol içerisinde dağıtıldı, çökelmenin önüne geçmek için ultrasonik olarak sürekli karıştırılırken ölçümler alındı. Numunelerin %10, %50 ve %90 ının sahip olduğu tanecik büyüklükleri ve ortalama tanecik büyüklükleri ile

bunların dağılımları belirlendi. Tezde verilen sonuçlar en az iki ölçümün ortalama değerleridir.

4.3.3. Yoğunluk tayini

7 atm basınç altında sıkıştırılarak, 16 mm çapında disk haline getirilen kompozitlerin hassas terazide tartım alınarak kalınlıkları dijital kumpas ile ölçüldü. Kütle/silindirin hacminden kompozitlerin yoğunlukları hesaplandı. Elde edilen veriler, sonuçlar ve tartışma kısmında sunuldu. Buradan elde edilen değerler çökelme kararlılıklarının yorumlanmasında kullanıldı.

4.3.4. Dielektrik özellikleri tayini

Dielektrik analizörü ile yapılan ölçümler

Örneklerin iletkenlikleri Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nde, HP 4192 A LF Impedance Analyzer cihazında Ohm yasasına uygun olarak potansiyel taraması yapılarak ölçüldü. Ölçümlerde 1,29 cm çapında ve kalınlıkları dijital kumpas ile belirlenen boyutlarda pelletler kullanıldı. 20°C sıcaklıkta ara yüzey katkısını azaltmak için 1 MHz sabit frekans değerinde çalışıldı. Yapılan ölçümlerden elde edilen verilerden yararlanılarak hazırlanan homopolimer ve kompozitlerin dielektrik sabitleri Eş. 4.1 kullanılarak hesaplandı:

$$C = \epsilon_o \epsilon \frac{d}{A} \quad (4.1)$$

Bu eşitlikte;

C: kapasitans

ϵ_o : boşluğun dielektrik sabiti

ϵ : örneğin dielektrik sabiti

d: numune kalınlığı

A: numune yüzey alanını göstermektedir.

Bu deneylerden elde edilen veriler, ER aktivite değerlerinin yorumlanmasında kullanıldı.

Dört nokta tekniği ile yapılan iletkenlik ölçümleri (Four-Probe)

Deneylerde iletkenlik ölçümü için dört nokta iletkenlik ölçüm aleti kullanıldı. 0,1 g standart kütlelerde tartılan polimer örnekleri, 7 atm basınç altında sıkıştırılarak pellet haline getirildi. Kalınlıkları binoküler mikroskop ile ölçülen pelletler üzerine, dört nokta iletkenlik ölçüm aletinin elektrotları yerleştirildi. Elektrot aralığı 0,2 cm olan alet ile örneklerin dc iletkenlikleri oda sıcaklığında ölçüldü. Dört nokta tekniğinde 4 adet elektrottan ikisine belirli potansiyeller uygulanırken diğer ikisinden de akım ölçülür. Polimerin iletkenliği Eş. 4.2 ile hesaplanır.

$$\sigma = \frac{\ln 2}{\pi d} \frac{i}{V} \quad (4.2)$$

Bu eşitlikte;

σ : İletkenlik (Scm^{-1})

d: Pellet kalınlığı

i: Örnek üzerinden geçen akım

V: Uygulanan potansiyel olarak tanımlanır.

Four-probe tekniği ile iletkenlik ölçümlerinin yapılmasının nedeni Dielektrik Analizörü ile yapılan ölçümlerden elde edilen iletkenlik değerleriyle buradan elde edilen değerlerin kıyaslanması amacıyla.

4.3.5. Süspansiyonların hazırlanması

Elde edilen homopolimer ve kompozitlerden ER çalışmalara hazırlık olması amacıyla aşağıda açıklandığı şekilde süspansiyonlar hazırlandı.

Öğütülerek belirli tanecik büyüklüğüne getirilen homopolimer ve kompozitler kullanılarak silikon yağı içerisinde kütlece %5, %10, %15, %20, %25 arasında değişen beş farklı derişimde süspansiyonlar hazırlandı ve kolloidal kararlılık çalışmaları için hazır hale getirildi.

4.3.6. Çökelme kararlılığı

Hazırlanan PIN ve farklı bileşimlerdeki PIN/PVAc kompozitlerinin kolloidal kararlılıklarının tayini amacıyla silikon yağı içerisindeki kütlece % 5–25 arasında değişen derişimlerde hazırlanan süspansiyonlar 25 °C'daki sabit sıcaklık banyosunda tüpler içerisinde 50 gün süre ile bekletildi. İlk çökelmenin görüldüğü an süspansiyonların kolloidal kararsızlık süresi olarak tespit edildi, Eş. 3.5' den yararlanarak çökelme oranları hesaplandı, numuneler ER çalışmaları için hazır hale getirildi.

4.3.7. Akış ölçümleri

Süspansiyonların akış ölçümleri iki paralel pirinç plaka elektrot arasında 0,0 – 7,0 kV/mm aralığında 0,5 kV/mm artışlarla değişen değerlerdeki elektrik alanda, akış süreleri bir dijital kronometre ile ölçülerek belirlendi. Akış ölçümlerinde elektrot genişliği 1,0 cm elektrotlar arası mesafe 0,5 cm, elektrotlar arasındaki madde yüksekliği 5,0 cm ve ölçümün yapıldığı sıcaklık 25 °C olarak kayıt edildi. Elektrik alan uygulandığında 0-10 kV aralığında güç üretebilen yüksek gerilim kaynağı kullanıldı (Fug Electronics, Almanya).

4.3.8. Elektoreometre ölçümleri

Paralel plaka elektrotlar ile elektoreolojik açıdan aktif oldukları belirlenen ve eşik enerjileri tespit edilen süspansiyonların, ER aktiviteleri üzerinde kayma hızı, derişim, sıcaklık, zaman, elektrik alan kuvveti, promoter, tanecik büyüklüğü ve frekansın etkileri araştırıldı. Bu amaçla Thermo-Haake RS600 model, 0,001—1500 s⁻¹ aralığında kayma hızı sağlayabilen, 35 mm çapında paralel plaka plakalı tork elektoreometre kullanıldı. Kütlece beş farklı yüzde de hazırlanan süspansiyonların elektoreolojik davranışları; çeşitli elektrik alan kuvvetleri, kayma hızları, sıcaklık, zaman ve frekans aralıklarında ölçülerek değerlendirildi.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. Çözünürlük Testi Sonuçları

Homopolimer ve kompozitlerin çözünürlük testleri, oda sıcaklığında ve çözücünün kaynama sıcaklığında farklı çözücüler kullanılarak yapıldı. Örneklerden 0,005g alınıp, 2 mL çözücü içerisinde karıştırıldı. Çözünürlük testlerinin sonuçları Çizelge 5.1' de verilmiştir. Çizelgede çözünenler için (+), çözünmeyenler için (-) ve kısmen çözünenler için (δ) işareti kullanıldı. Elde edilen sonuçlar tanecik boyutu ölçümlerinde numunelerin çözünmesi işlemlerinde kullanıldı.

Çizelge 5.1. İndol, PVAc, PIN ve PIN/PVAc kompozitlerin çözünürlük testi sonuçları

Çözücü		İndol	Poliindol	PVAc	Kompozit
Kloroform	Oda Sıc.	+	-	+	-
	K.N.	+	δ	+	-
Etanol	Oda Sıc.	+	-	+	+
	K.N.	+	-	+	+
Etilasetat	Oda Sıc.	+	-	+	-
	K.N.	+	-	+	-
Aseton	Oda Sıc.	+	-	+	-
	K.N.	+	-	+	δ
Metanol	Oda Sıc.	+	-	+	+
	K.N.	+	δ	+	+
Asetonitril	Oda Sıc.	+	-	+	-
	K.N.	+	-	+	-
Su	Oda Sıc.	-	-	-	-
	K.N.	-	-	-	-
CCl ₄	Oda Sıc.	+	-	+	-
	K.N.	+	-	+	-
THF	Oda Sıc.	+	δ	+	+
	K.N.	+	δ	+	+
DMF	Oda Sıc.	+	δ	+	+
	K.N.	+	δ	+	+
DMSO	Oda Sıc.	+	δ	+	+
	K.N.	+	δ	+	+
1,4-dioksan	Oda Sıc.	+	-	+	-
	K.N.	+	-	+	-
Benzen	Oda Sıc.	+	-	+	-
	K.N.	+	-	+	-
HCl	Oda Sıc.	-	-	+	-
	K.N.	-	-	+	-

(+): Çözünenler, (-): Çözünmeyenler, (δ): Kısmen Çözünenler

5.2. İletkenlik ve Dielektrik Sabitleri

PIN ve PIN/PVAc kompozitlerin hem 4 nokta tekniği hem de dielektrik analizörü kullanılarak iletkenlikleri ölçülmüş, ayrıca dielektrik analizöründen alınan sonuçlardan yararlanarak numunelerin dielektrik sabiti değerleri hesaplanmıştır. Dielektrik analizörü ile yapılan ölçümler 25 °C sabit sıcaklık ve 1 MHz sabit frekansta, 4 nokta tekniği ile yapılan ölçümler ise oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. 4 nokta tekniği ile yapılan ölçümlerden elde edilen değerlerde beklenildiği gibi PIN en yüksek iletkenlik değerini göstermiş, kompozit malzemelerde de PIN yüzdesi arttıkça kompozitlerin iletkenlikleri artmıştır. Dielektrik analizöründen elde edilen iletkenlik değerleri ile 4 nokta tekniğinden elde edilenlerin arasındaki fark dielektrik analizörü ile ölçüm yapılırken numunelerden sağlıklı kontakt alınamaması olabilir. Ancak numunelerin dielektrik sabiti değerleri teorik beklentilere uygun olarak 5,63—7,88 değerleri arasında çıkmıştır. Literatürde sentezlenen diğer polimer kompozit malzemelerde de iletkenlik değerleri kompozit malzemelerin içerisindeki iletkenlik gösteren birimin yüzdesinin artmasıyla kompozitin de iletkenliğinin arttığı ve dielektrik sabiti değerlerinin $2,0 - 1 \times 10^4$ aralığında değiştiği rapor edilmiştir[73].

Çizelge 5.2. Polimerlerin iletkenlik ve dielektrik sabiti değerleri

Yöntem	İletkenlik S/cm (4 nokta tekniği)	İletkenlik S/cm (Impedance Analyzer)	Dielektrik Sabiti (Impedance Analyzer)
Kompozitler			
K1	$1,98 \times 10^{-5}$	$1,713 \times 10^{-6}$	6,49
K2	$2,45 \times 10^{-5}$	$1,4656 \times 10^{-6}$	7,15
K3	$3,89 \times 10^{-5}$	$1,0687 \times 10^{-6}$	7,88
K4	$4,83 \times 10^{-5}$	$2,4732 \times 10^{-6}$	5,63
PIN (homopol.)	$9,64 \times 10^{-3}$	$3,4783 \times 10^{-6}$	6,90

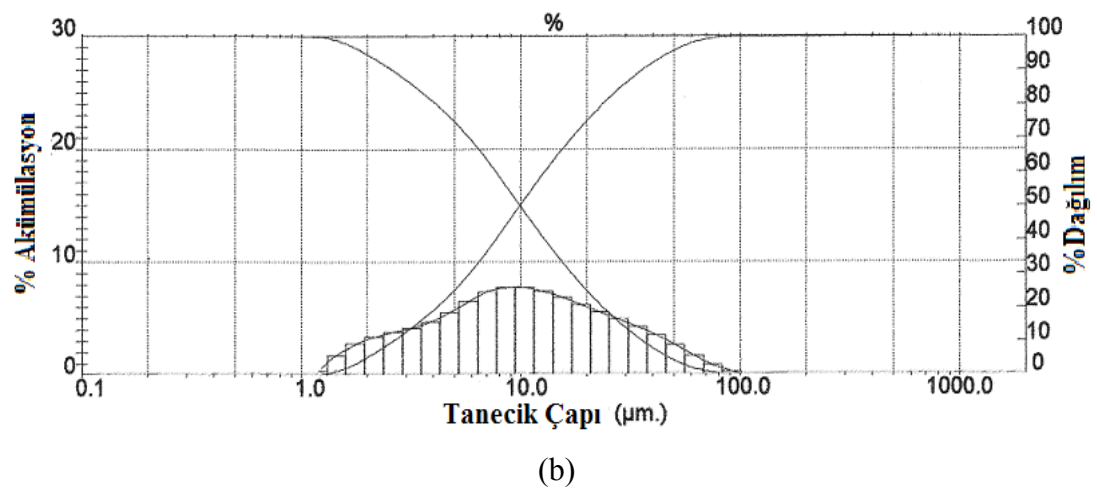
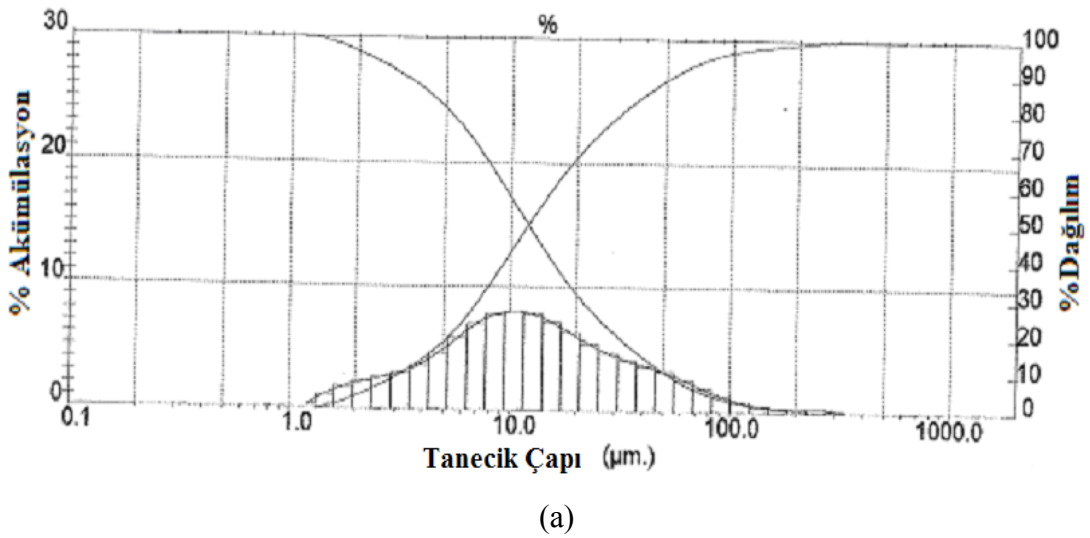
5.3. Tanecik Boyutu Ölçümleri

Elektroreolojik çalışmalarda tanecik büyüklüğü oldukça önemli bir faktördür. Elektroreolojik etkinin tanecikler arası etkileşimlerinden kaynaklandığı, bu etkileşimler sonucunda taneciklerin zincir yapısı oluşturduğu bilinmektedir. ER süspansiyonun oluşturduğu yapının yerçekimine karşı dayanıklı olabilmesi için tanecik boyutunun küçük olması tercih edilmektedir. Hatta son yıllarda yapılan çalışmalarda nano boyutta çalışmak hedef haline gelmiştir [74]. Ancak tanecik boyutu nano boyuta düşürüldüğünde ER aktivitenin azaldığını gösteren çalışmalarda mevcuttur.

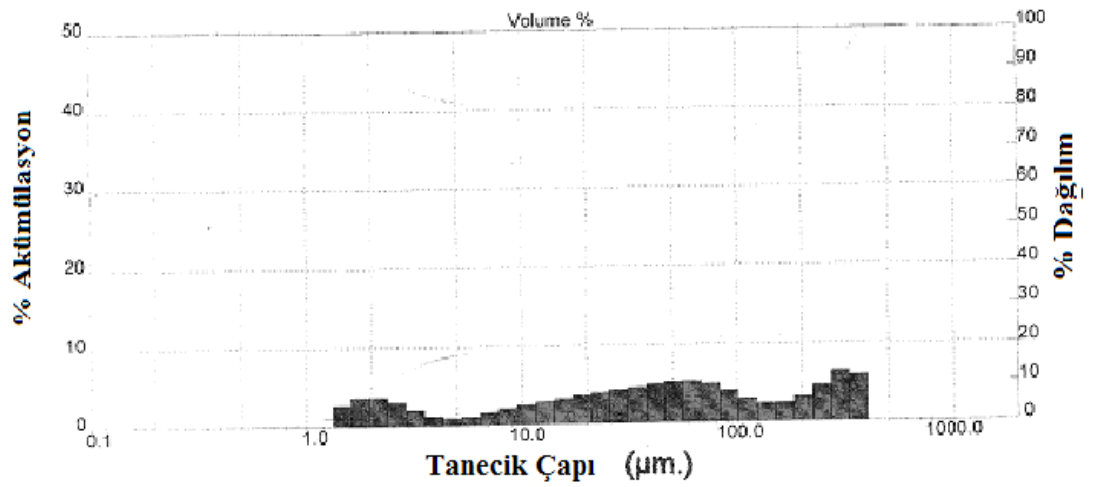
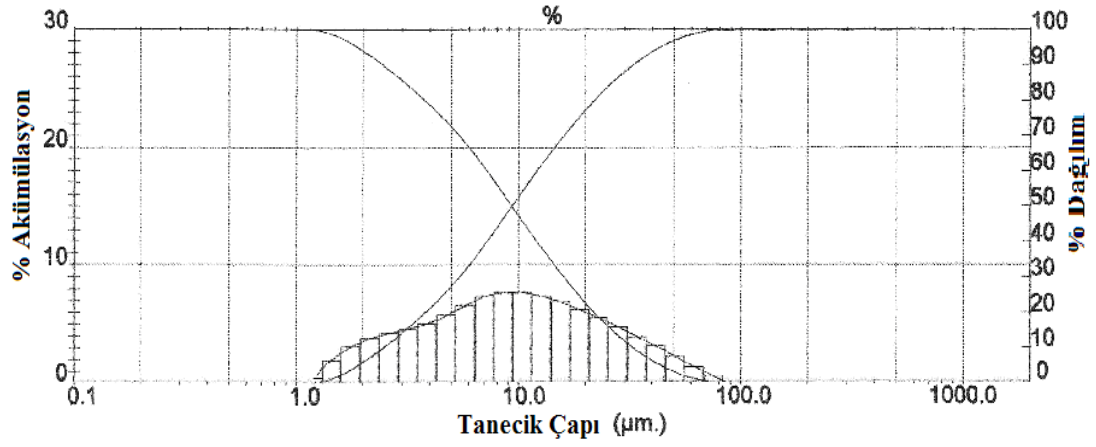
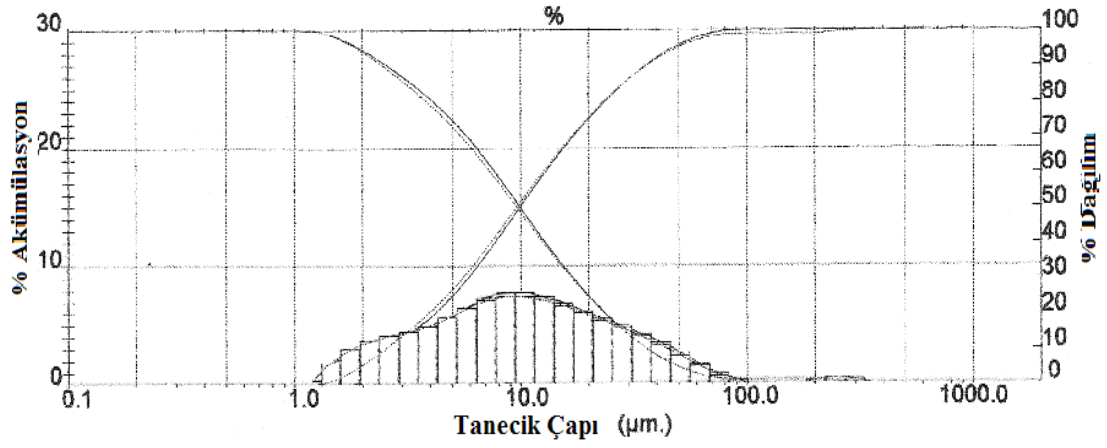
Tanecik boyutunun küçültülmesi için üç boyutlu bir değirmende öğütülen polimerlerin tanecik büyüklükleri, dinamik ışık saçılımı cihazı ile ölçülerek, elde edilen veriler bilgisayara aktarıldı ve Fraunhofer saçılma teorisine göre değerlendirildi [75]. Ölçümler sırasında topaklanmaların önüne geçmek için numuneler bir taraftan mekanik olarak karıştırılırken bir taraftan da çok düşük dozlarda ultrasonik dalgaya maruz bırakıldı. Elde edilen tanecik boyutu ve dağılım grafikler, Şekil 5.1a —Şekil 5.1e’de verilmiştir. Bu verilere göre kompozitlerin ortalama ($d_{0,5}$) tanecik büyüklüklerinin $9,36\ \mu\text{m}$ — $12,03\ \mu\text{m}$ arasında değiştiği, PIN’in ($d_{0,5}$) tanecik büyüklüğünün ise $41,03\ \mu\text{m}$ olduğu tespit edildi. Polimerlerin bütün karakterizasyon işlemleri ile elektroreolojik ölçümleri bu tanecik boyutlarında gerçekleştirildi. Ayrıca öğütme işlemleri esnasında PIN de uzun süreli öğütmelerde topaklanmalar gözlenirken ve $41,03\ \mu\text{m}$ altına inilemezken, kompozitlerde daha düşük tanecik boyutlarına ilebilecek kadar topaklanma gözlenmeden öğütme gerçekleştirilebildi. Bunun nedeni kompozit yapının içerisinde bulunan PVAc’ den kaynaklanıyor olabilir. Diğer taraftan PIN miktarı arttıkça kompozitlerin ortalama tanecik boyutunun azaldığı tespit edildi.

Çizelge 5.3. Numunelerin tanecik büyüklükleri

Tanecik büyüklükleri	$d_{(0,5)}$	$d_{(0,1)}$	$d_{(0,9)}$
Polimerler	(μm)	(μm)	(μm)
K1	12,00	3,23	52,48
K2	9,94	2,61	35,79
K3	9,62	2,49	36,05
K4	9,36	2,46	32,71
PIN	41,03	2,25	294,63



Şekil 5.1. Numunelerin tanecik büyüklüğü dağılımı diagramı a) K1 b) K2 c) K3 d) K4 e) PIN



Şekil 5.1. (Devam) Numunlerin tanecik büyüklüğü dağılımı diagramı a) K1 b) K2
c) K3 d) K4 e) PIN

5.4. Süspansiyonların Kolloidal Kararlılıklarının Belirlenmesi

Elektroreolojik akışkanlarda aranan en önemli özelliklerden birisi, çökelme kararlılığıdır. ER akışkanların uzun süre ve çeşitli çevre şartlarında çökelme göstermemeleri ve tortu bırakmamaları istenir. ER aktivitenin bir süspansiyondaki tanecikler arası etkileşimlerden kaynaklandığı bilinmektedir. Süspansiyona bir elektrik alanı uygulandığında, bu etkileşimler sonucu tanecikler zincir yapısı oluşturur. Süspansiyon yapısının çökelmeye karşı kolloidal olarak kararlı olması için tanecik boyutunun küçük olması tercih edilir. Literatürde ER aktivite gösteren maddelerin tanecik büyüklüklerinin 0,1 µm ile 100 µm arasında olması gerektiği belirtilmiştir [57].

Polimerlerin kolloidal kararlılıklarının tayini amacıyla silikon yağı içerisinde hazırlanan süspansiyonlar, 25°C'daki sabit su banyosunda bekletildi. Kolloidal kararlılığa; PIN homopolimeri ve K1, K2, K3, K4 kompozitleriyle c = %5, %10, %15, %20 ve %25'lik derişimlerde hazırlanan süspansiyonlarda kompozit içerisindeki polimer miktarının etkisi, homopolimerlerde ise derişimin etkisi, incelendi. İlk çökelmenin görüldüğü an süspansiyonun kolloidal kararsızlık göstermeye başladığı an olarak tespit edildi. Kolloidal kararlılığa kompozit bileşiminin etkisi Şekil 5.2' de, her bir kompozit malzeme için derişimin etkisi Şekil 5.3a–5.3d' de, PIN'in kolloidal kararlılığına derişimin etkisi ise Şekil 5.3e'de verildi. Şekillerde görülen çökelme oranları hesaplanırken Eş. 3.5 kullanıldı.

$$\text{Çökelme Kararlılığı Oranı} = \frac{b}{(a + b)} \times 100 \quad (3.5)$$

Şekil 5.2' den görüldüğü gibi PIN homopolimerinde 30 gün hiçbir çökelme gözlenmemiştir. Çalışılan kompozit malzemelerden K1, K2, K3 ve K4 de ilk günlerde gözlenen küçük kolloidal kararsızlıkların ardından %80 ler oranında bir kararlılığa %5 derişimde ulaşılmıştır (Şekil 5.3a-Şekil 5.3d). Kompozit malzeme/SO sisteminin %80 lerden sonra denge durumuna ulaşması ve daha fazla çökelme göstermemesi potansiyel endüstriyel uygulamalar açısından oldukça önemlidir.

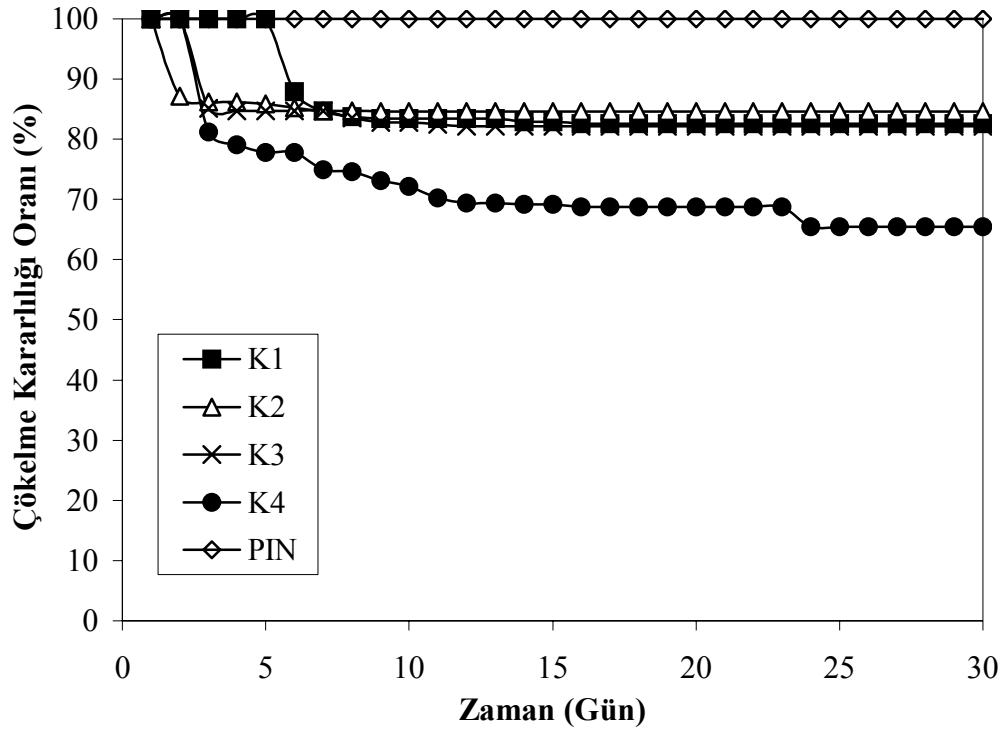
Sonuçlara kompozit malzemelerin tanecik boyutlarındaki değişimler açısından bakıldığında, tanecik boyutları birbirlerine yakın olduğundan belirleyici bir etki gözlenemedi. Kolloidal kararlılık üzerinde etkin olan faktörlerden bir tanesi de dağılan faz ile dağıtıcı faz arasındaki yoğunluk farkıdır. Yoğunluklar açısından kolloidal kararlılığa bakıldığında PIN homopolimerinin yoğunluğu ($0,80 \text{ g/cm}^3$) silikon yağının yoğunluğundan ($0,97 \text{ g/cm}^3$) düşük olduğundan Stoke yasasına [76] uygun olarak PIN' in kolloidal kararlılığının yüksek çıkması normaldir. Kompozit malzemelerin yoğunlukları arttıkça yer çekimine karşı kararsızlıkları da artmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 5.4' de verilmiştir. Sadece PIN/SO süspansiyon sistemi için kolloidal kararlılığa derişimin etkisine bakıldığında da %25 derişime kadar 30 gün süresince yapılan gözlemlerde bir çökelme kaydedilememiştir (Şekil 5.3e). Bu da endüstriyel uygulamalar açısından istenilen bir durumdur.

Benzer sonuçlar literatürde de çeşitli araştırmacılar tarafından çeşitli süspansiyon sistemleri için rapor edilmiştir [64,77].

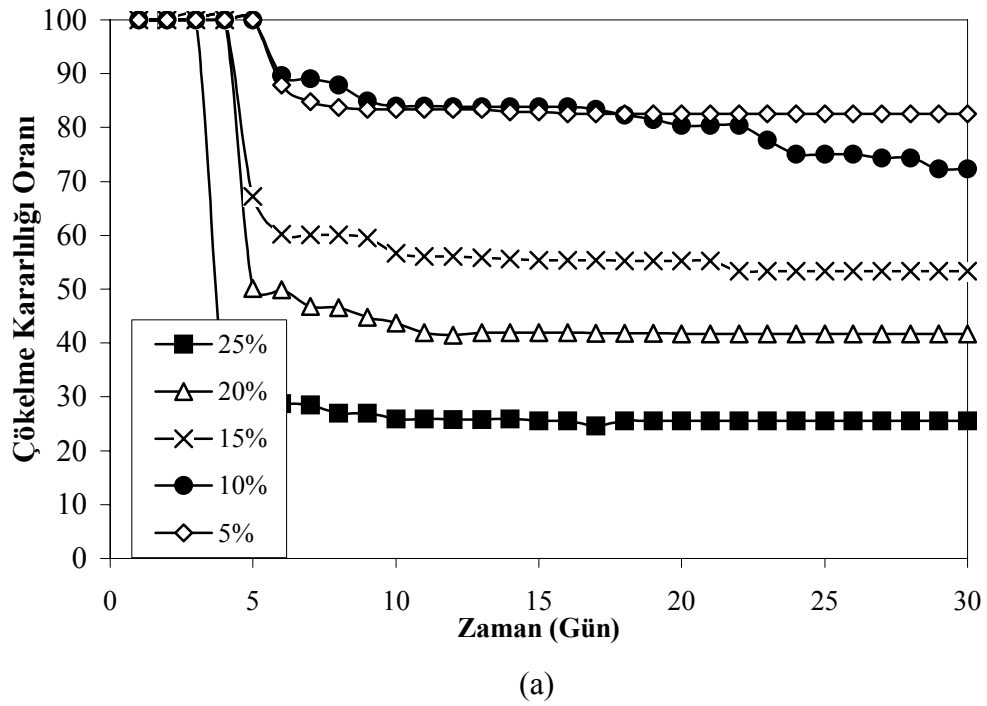
Çizelge 5.4 PIN ve PIN/PVAc kompozitlerin yoğunlukları, tanecik boyutu ve çökelme kararlılık oranları

Numuneler	Yoğunluk (g/cm^3)	Tanecik boyutu $d_{(0,5)}$ (μm)	Çökelme Kararlılığı Oranı (%)
K1	1,11	12,00	87
K2	1,08	9,94	87
K3	1,04	9,62	85
K4	1,03	9,36	81
PIN	0,80	41,03	100

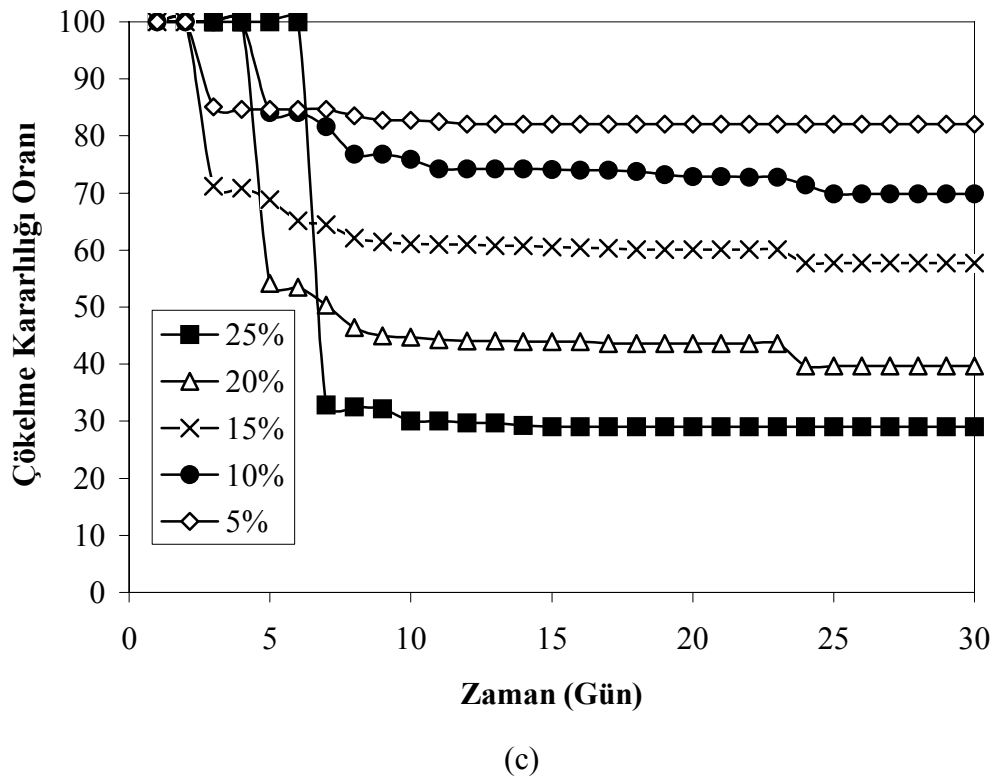
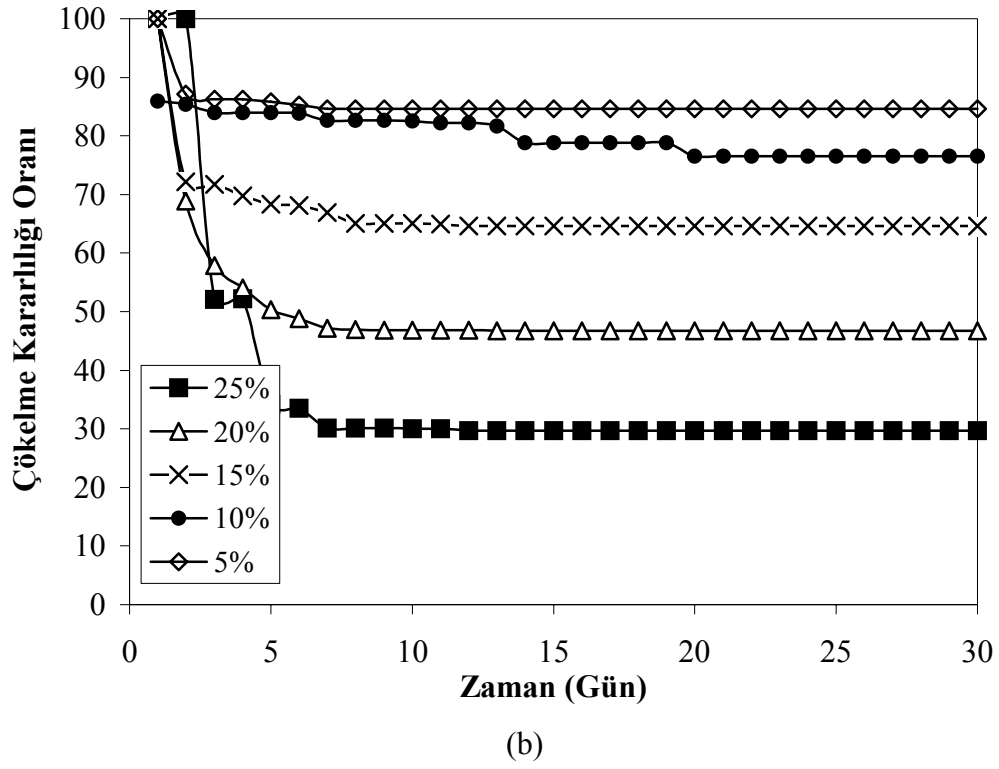
$d_{(\text{PVAc})} = 1,19 \text{ g/cm}^3$



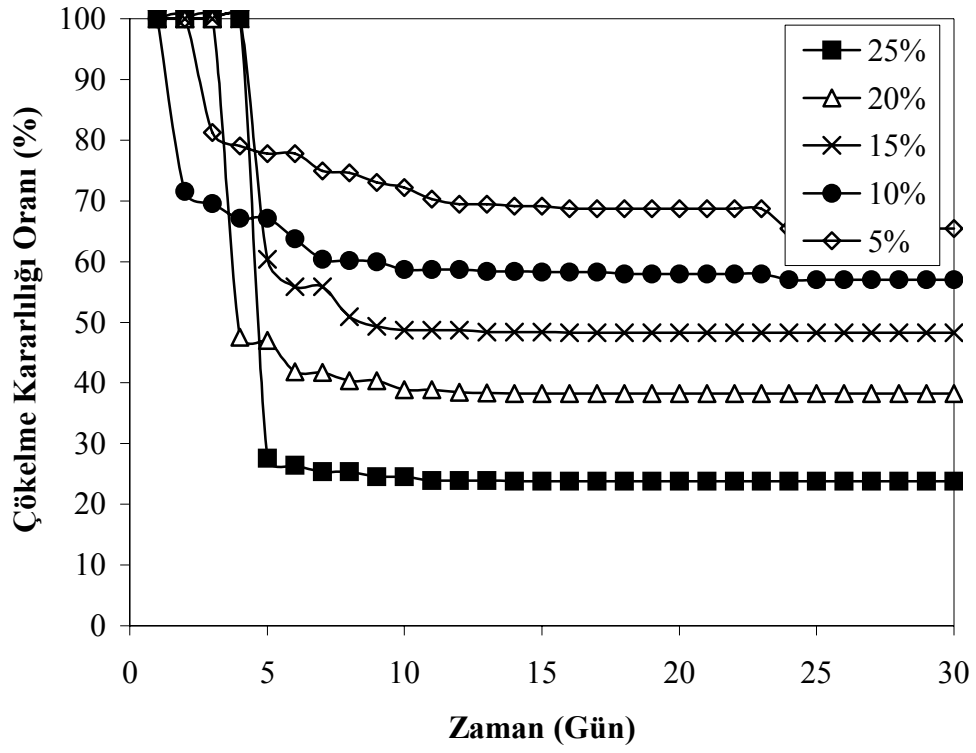
Şekil 5.2. Kolloidal kararlılığa kompozit bileşiminin etkisi $T=25^{\circ}\text{C}$, $c=\%5$



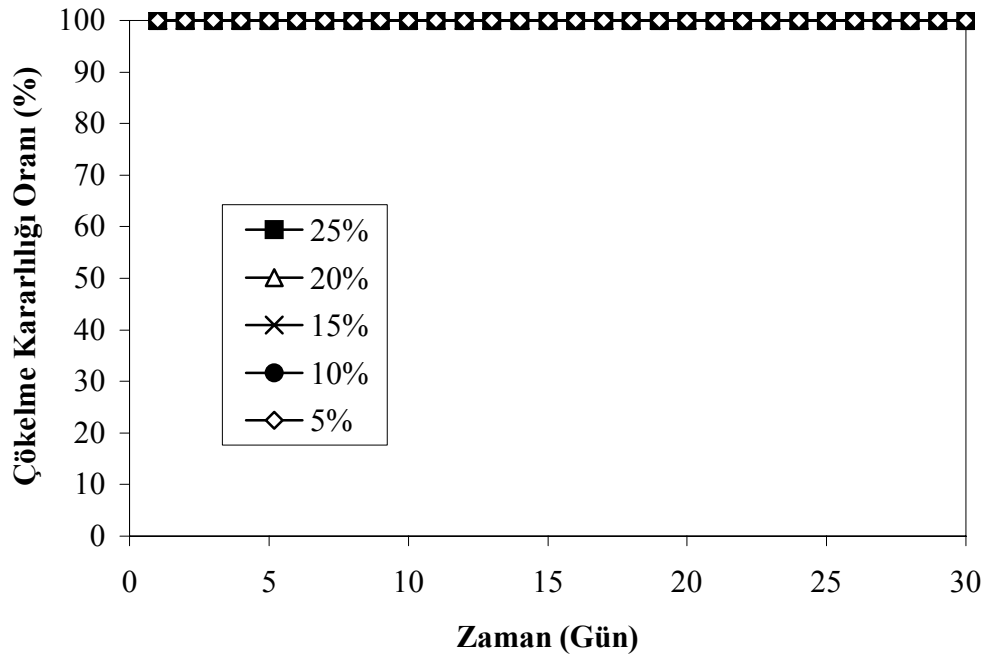
Şekil 5.3. Numunelerin kolloidal kararlılığına derişimin etkisi $T=25^{\circ}\text{C}$ a) K1 b) K2 c) K3 d) K4 e) PIN



Şekil 5.3. (Devam) Numunelerin koloidal kararlılığına derişimin etkisi $T=25^{\circ}\text{C}$
a) K1 b) K2 c) K3 d) K4 e) PIN



(d)

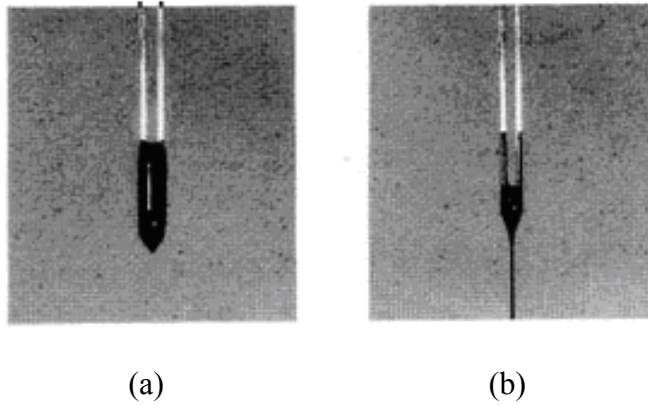


(e)

Şekil 5.3. (Devam) Numunelerin koloidal kararlılığına derişimin etkisi $T=25^{\circ}\text{C}$
a) K1 b) K2 c) K3 d) K4 e) PIN

5.5.Paralel Plaka Elektrotlar ile Yapılan Elektoreolojik Ölçümler

Silikon yağ içerisinde çeşitli derişimlerde hazırlanan polimer kompozitlerin pirinçten yapılmış paralel plaka elektrotlar arasında akış ölçümleri oda sıcaklığında yapıldı. Paralel plaka elektrotlar arasındaki bir ER akif akışkanın elektrik alan varlığındaki ($E \neq 0$) ve yokluğundaki ($E=0$) akış durumu Şekil 5.4' de görülmektedir.



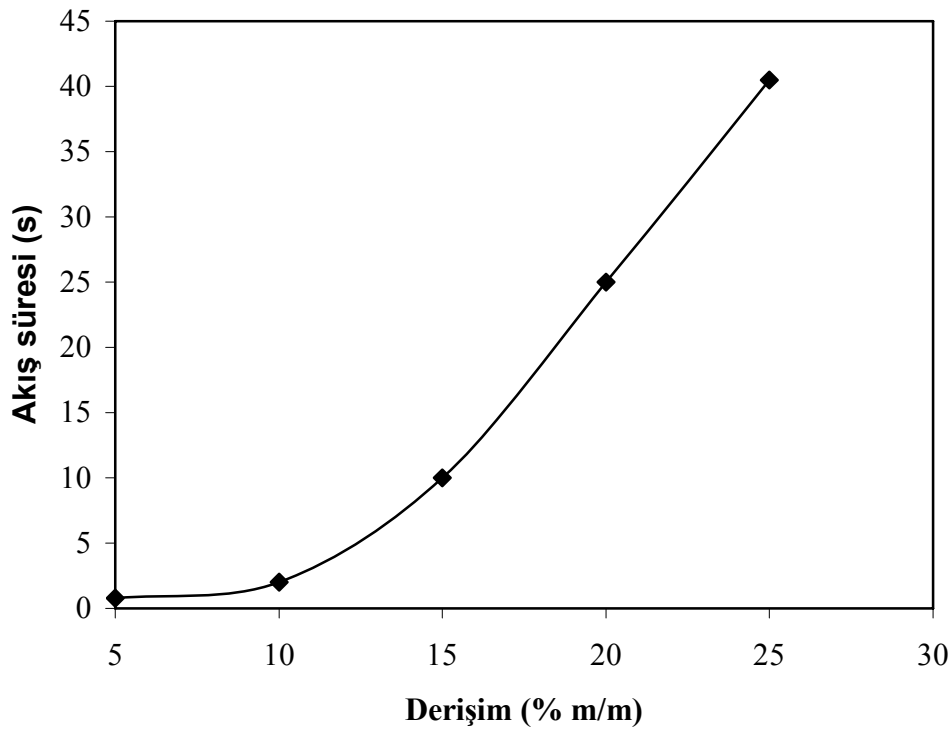
Şekil 5.4. Paralel plaka elektrotlarda ERA' nın akış durumu (a) $E \neq 0$ kV/mm (b) $E = 0$ kV/mm

Şekil 5.4' te görüldüğü gibi elektrotlar arasına elektrik alan uygulandığında (a durumu), akışkan katımsı bir hal almakta ve non-newtonian bir reolojik davranış sergilemektedir. Elektrik alan uzaklaştırıldığında ise (b durumu) akışkan Newton yasasına uygun olarak elektrotlar arasında akmaktadır.

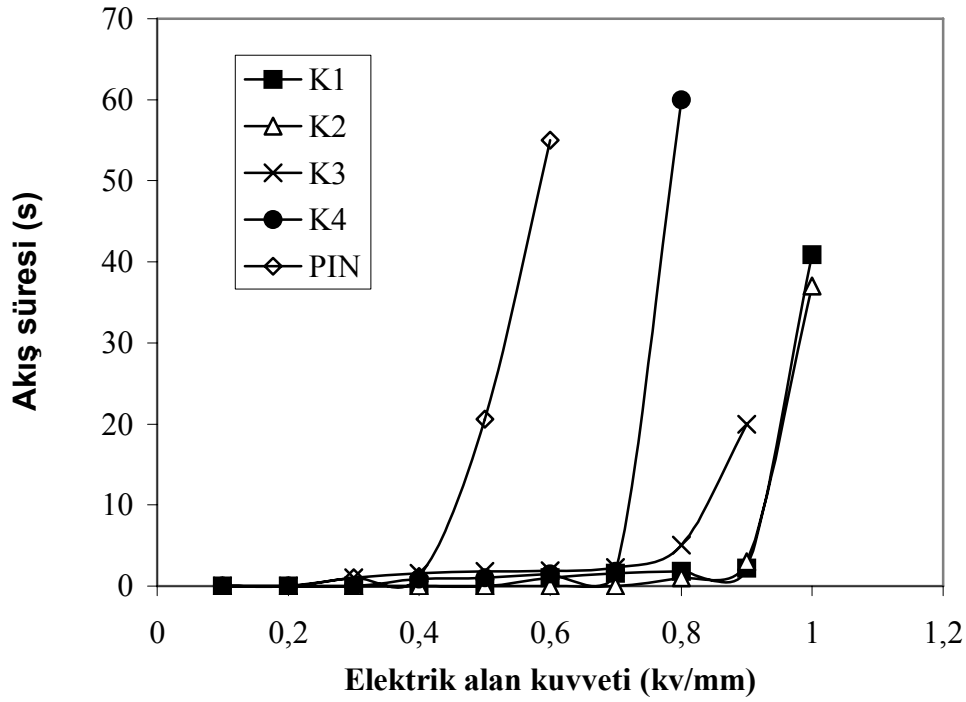
Bu çalışmada kolloidal kararlılığı en fazla olan K1/SO sistemi için farklı derişimlerdeki (%5, %10, %15, %20, %25) süspansiyonlar üzerine elektrik alanın etkisi incelendi. Şekil 5.5'te şematik olarak gösterilen paralel pirinç plaka elektrotlar arasında $E = 0,0-3,5$ kV/mm aralığında 0,5 kV/mm artışıyla değişen değerlerdeki elektrik alan uygulanarak deneyler yapıldı. Yapılan çalışmalarda artan süspansiyon derişimi ile elektrot arasındaki süspansiyonun akış süresinin de arttığı gözlemlendi. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.5' de görülmektedir. K1/SO süspansiyon sistemi için en düşük akış süresi %5' lik derişimde 1 saniye olarak belirlendi. En yüksek akış süresine ise %25'lik derişimde 40,5 saniye ile ulaşıldı. 40,5 saniye sonra süspansiyonun elektrot arasında oluşturduğu köprüden dolayı akış tamamen kesildi ve daha uzun süre beklemlerde akış gerçekleşmedi. Bu da süspansiyonların derişimi

arttıkça asılı taneciklerin elektrik alan etkisi ile daha güçlü polarize olabilmeleri ve elektrik alan indüklenmiş polarizasyon göstermelerinden kaynaklanmaktadır.

En yüksek akış süresi (ER aktivite) K1 için %25' lik derişimdeki süspansiyonda gözleendiğinden PIN ve diğer kompozitler için de sabit derişimde elektrik alan kuvveti taraması %25'lik derişimde çalışıldı. $c = \%25$ derişimdeki süspansiyonlara düşük elektrik alan uygulandığında plakalar arasından çok küçük zaman aralığında aktığı, elektrik alan kuvveti artırıldığında bu sürenin 1—60 saniye gibi bir değere ulaştığı, ancak daha da fazla elektrik alan uygulandığında elektrotlar arasındaki akışın tamamen durduğu gözlenmiştir. Paralel plakalar arasında bir kez köprü oluşumu gerçekleştikten sonra saatlerce beklenmesine rağmen hiçbir akış gerçekleşmemiştir. Şekil 5.6' ya bakıldığında; polimerlerin eşik enerjileri, PIN (0,4 kV/mm)<K4 (0,7 kV/mm)<K3 (0,8 kV/mm)<K2 (0,9 kV/mm) = K1 (0,9kV/mm).olduğu görülmüştür. Sonuçlardan görüldüğü gibi kompozit malzemeler içerisinde PIN miktarı artıkça eşik enerjisi değerleri de azalmıştır. Benzer çalışmalar literatürde de rapor edilmiştir [78].



Şekil 5.5. K1/SO süspansiyon sistemi için akış süresinin derişim ile değişimi $T = 25^{\circ}\text{C}$, $E = 1.0 \text{ kV/mm}$



Şekil 5.6. Numunelerin akış süresinin elektrik alan kuvveti ile değişimi $T = 25^{\circ}\text{C}$, $c = \%25$ (m/m)

5.6. Elektoreometre ile Yapılan Elektoreolojik Ölçümler

5.6.1. ER verimi üzerine derişimin etkisi

ER verimi büyük ölçüde süspansiyon içindeki taneciklerin akış özelliklerinden ve kutuplanabilirliklerinden etkilenir. Viskozite değerindeki ve dolayısıyla ER verimindeki artış, süspansiyonun derişimiyle de doğru orantılıdır. Ancak bu artış belli bir derişim değerinden sonra ER veriminde azalmaya sebep olur [62].

$$\Delta\eta_{ER} = \eta_{E \neq 0} - \eta_{E=0} \quad (3.10)$$

$$ER\text{verimi} = \frac{\Delta\eta_{ER}}{\eta_{E=0}} \quad (3.11)$$

ER verimi üzerine, beş farklı derişimde (%5, %10, %15, %20, %25) hazırlanan %14'lük PIN/PVAc (K1) kompozitinin silikon yağındaki süspansiyonunun etkisi

incelendi ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.7’de verildi. Süspansiyonun derişimi arttıkça ER verimin arttığı gözlemlendi. Maksimum ER verimi %25’lik derişimde 10,6 olarak gözlemlendiğinden, elektoreometre ile yapılan diğer çalışmalarda da diğer kompozitler için %25’lik derişimle hazırlanan süspansiyonlar kullanıldı.

Viskozitenin derişimle yükselme eğilimi parçacıklar arası polarizasyon kuvvetlerinden ileri gelmektedir. Elektrik alan ile polarizasyon kuvvetleri arasında aşağıdaki bağıntı geçerlidir [79].

$$F = \frac{\varepsilon_2 r^6 E^2}{\rho^4} \quad (5.2)$$

Bu eşitlikte:

F = Polarizasyon kuvveti

ε_2 = Taneciklerin dielektrik sabiti

r = Tanecik yarıçapı

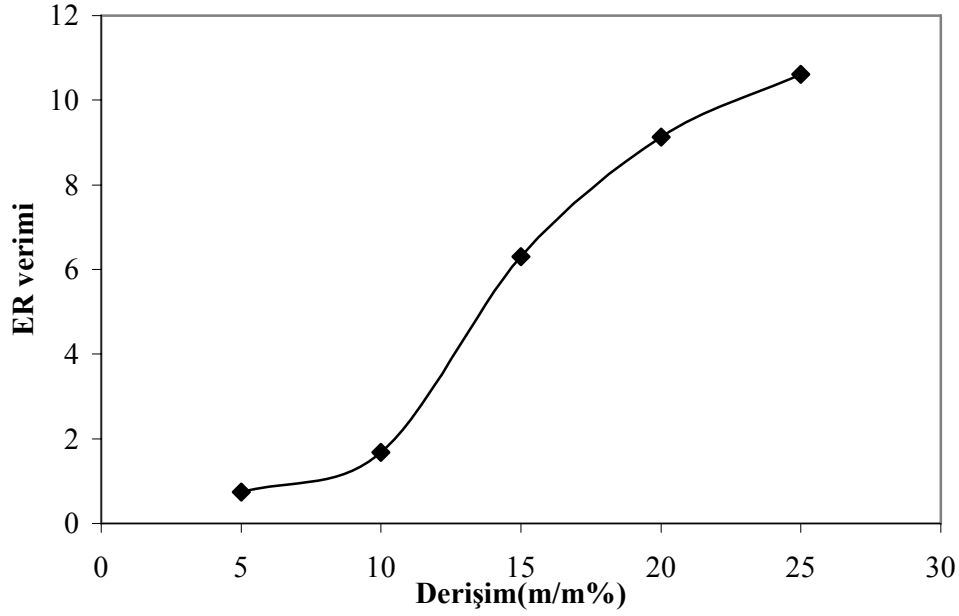
E = Elektrik alan kuvveti

ρ = Tanecikler arası mesafe olarak tanımlanır.

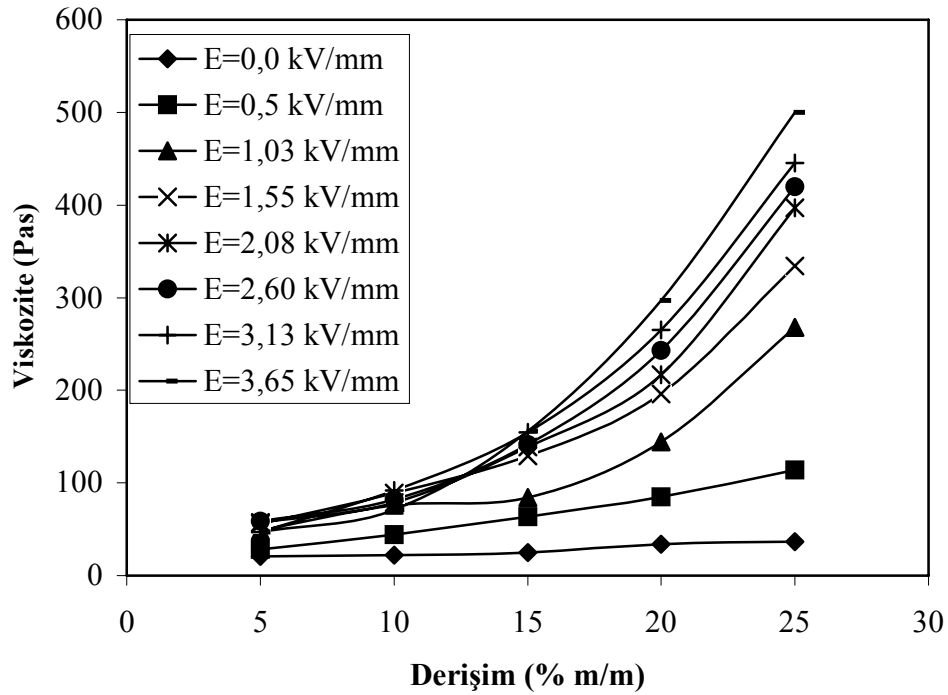
Bu eşitliğe göre parçacıklar arası mesafenin azalması ile parçacıklar arası polarizasyon kuvvetleri artmakta buna bağlı olarak da viskozitede artış görülmektedir.

Yapılan çalışmalarda elektrik alan kuvveti altında tanecikler arası etkileşimin artması sonucu, tanecik hacim kesri ile lineer [80] veya parabolik [81] olarak sürekli artan bir kayma gerilimi yada viskozite eğrisi elde edildiği rapor edilmiştir. Bizim yaptığımız deneyler sonucunda da Şekil 5.8’ de görüldüğü gibi K1/SO süspansiyon sistemi için hem derişim artışı hem de uygulanan dış elektrik alan kuvveti artışı ile elektrik alan viskozitede lineer artışlar gözlenmiştir. Bu durum tanecikler arası polarizasyon

kuvvetlerinin artan derişim ile artmasına atfedilebilir. Benzer alışmalar literatürde de rapor edilmiştir [64].



Şekil 5.7. K1 için ER verimi üzerine derişimin etkisi $d_{(0,5)} = 12,00 \mu\text{m}$, $E = 0$ ve $E = 3,65 \text{ kV/mm}$, $\dot{\gamma} = 0,2 \text{ s}^{-1}$, $T = 25^\circ\text{C}$



Şekil 5.8. K1 için çeşitli elektrik alan kuvvetlerinde viskozitenin derişim ile değişimi $\dot{\gamma} = 0,2 \text{ s}^{-1}$, $T = 25^\circ\text{C}$

5.6.2. ER veriminin kayma hızı ile değişimi

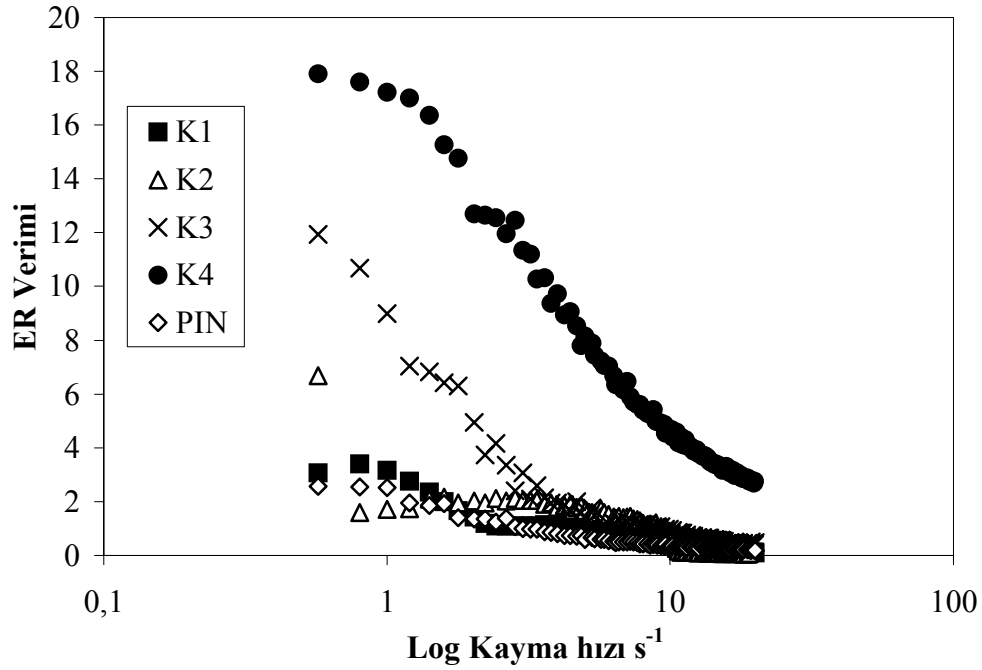
Şekil 5.9’ da sırasıyla K1, K2, K3, K4 ve PIN’in optimum parçacık derişimlerinde, ER verimi—kayma hızı grafiğı görölmektedir. $0,5 \text{ s}^{-1}$ kayma hızından 20 s^{-1} kayma hızına çıkıldığında ER veriminin de 18 başlayarak azaldığı ve non-Newtonian kayma incilmesi türünden viskoelastik bir davranış gösterdiği gözlemlendi. Ölçümler alınırken $E = 3,65 \text{ kV/mm}$ (uygulanabilen en yüksek elektrik alan kuvveti) sabit elektrik alan kuvveti set edilmiş olmasına rağmen deneylerin ilerleyen safhalarında kaçak akım yoğunlukları arttığından bu elektrik alan kuvveti değerleri sabit kalmamış ve $E = 2.60 \text{ kV/mm}$ değerine kadar düşmüştür. Bunun nedeni kompozit malzeme içerisinde PIN miktarının artışına atfedilebilir. Çizelge 5.5’ de her bir numune için uygulanabilen elektrik alan kuvvetleri ve bu değerlerde ölçülen maksimum ER verimi değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.5. Her bir numune için çalışılan elektrik alan kuvveti değerlerinde okunan kaçak akım yoğunluğu değerleri

Numuneler	ER verimi	Elektrik alan kuvveti (kV/mm)	Kaçak akım yoğunluğu (mA/mm ²)
K1	3,07	3,13	5×10^{-3}
K2	6,70	3,13	5×10^{-3}
K3	11,90	2,60	0,1264
K4	17,90	3,65	6×10^{-2}
PIN	2,60	1,25	0,999

Sonuç olarak; kayma hızı arttığı zaman viskoz kuvvetler de artar ve bu artışa paralel olarak süspansiyonun yapısal iskeletinde meydana gelebilecek bozunma da artabilir. Buna göre yüksek kayma hızında viskoz kuvvetler baskındır ve süspansiyonun yapısı elektrik alan kuvvetinin büyüklüğünden bağımsız hale gelir. Bu yüzden elektrik alan neticesinde oluşmuş olan süspansiyonun yapısı daha kolay bozulur ve viskozite artışı

da daha az olur. Chiang ve Jamieson sıvı kristal polimerlerle yaptıkları çalışmalarda ER aktivitesinin kayma hızının artmasıyla azaldığı sonucuna ulaşmışlardır [82].



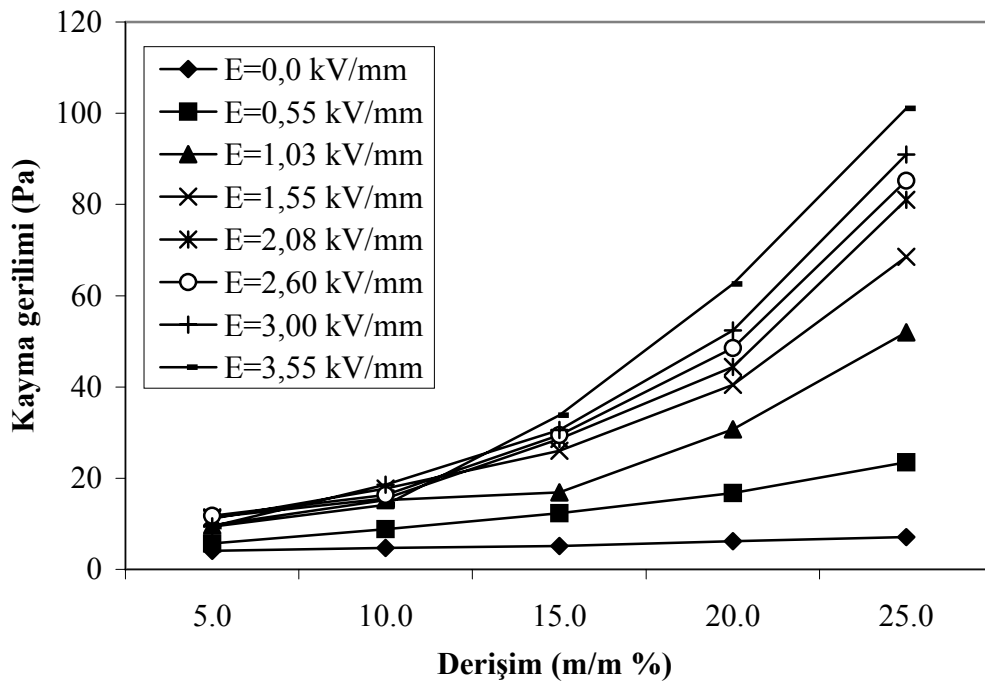
Şekil 5.9. ER verimin kayma hızı ile değişimi $c = \%25$ m/m, $T = 25^{\circ}C$
 $E = 0$ kV/mm ve $E = 1,25-3,65$ kV/mm

5.6.3. Derişimin kayma gerilimi üzerine etkisi

ER, elektrik alanının sıvı dispersiyonlar üzerine olan etkisiyle ilgilendir. Bu etki ya sıvının akmaya karşı gösterdiği direnç ya da sıvının katıya dönüşümü şeklinde kendini gösterir. Süspansiyonun derişimi, kayma gerilimi üzerine etki eden en önemli etkenlerden biridir. Akışkan içerisindeki tanecik derişimi ne kadar fazla ise, kayma gerilimi o kadar büyüktür. Bir ER akışkanda istenen en ideal kayma gerilimi değeri, onun uygulama amacına bağlı olarak değişir. Mesela dinamik titreşim sönümleyicilerde, akışkanın yanıt verme süresi ve aşındırıcılığının az olması, akışkanın yüksek kayma gerilimine sahip olmasından çok daha fazla önemlidir [83].

Şekil 5.10' da K1'in 5 farklı derişimdeki süspansiyonlarının $\dot{\gamma} = 0,2$ s^{-1} kayma hızında elde edilen kayma gerilimi–derişim grafiği verilmektedir. Grafikte derişim ve

elektrik alan kuvveti artışına paralel olarak kayma geriliminde artış gözlenmektedir. $E = 3,65 \text{ kV/mm}$ iken kütlece %5'lik PIN/PVAc süspansiyonu $\tau = 9,37 \text{ Pa}$ kayma gerilimi gösterirken, bu değer %25 lik derişimde $\tau = 101,04 \text{ Pa}$ değerine çıkmaktadır. Ünal ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda da benzer sonuçlar rapor edilmiştir. Bu grubun yaptığı bazı çalışmalarda [84,85] derişim ile kayma gerilimi doğru orantılı artarken, bazılarında ise [86-89] önce lineer bir artış ve daha sonra derişim artışı ile bir azalma gözlenmiştir. Choi ve arkadaşları da, selüloz fosfat esterleri ile yapmış oldukları çalışmada [90] kayma gerilimi farkının derişim ile lineer bir artış gösterdiğini, ayrıca kitosan fosfat ile yapmış oldukları çalışmada ise, kayma gerilimi farkının artan derişim ile önce bir artış ardından yavaş bir azalma gösterdiğini rapor etmişlerdir [91].



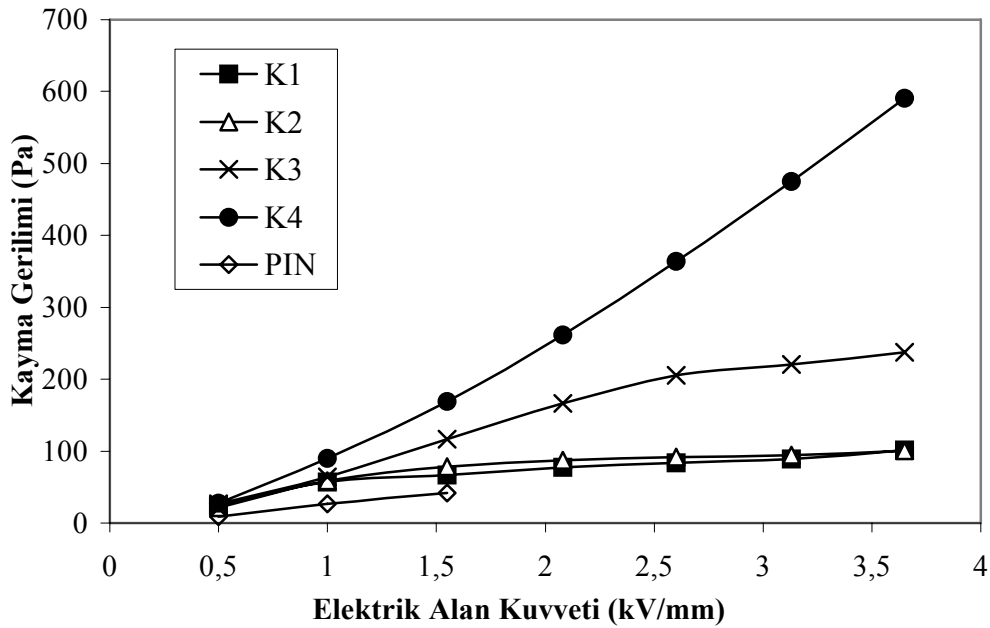
Şekil 5.10. K1 kompoziti için derişimin kayma gerilimi üzerine etkisi $\dot{\gamma} = 0,2 \text{ s}^{-1}$, $T=25^\circ\text{C}$, $d_{(0,5)} = 12,00 \text{ }\mu\text{m}$.

5.6.4. Elektrik alan kuvvetinin kayma gerilimi üzerine etkisi

Elektroreoloji olayı, akışkanların viskozitelerindeki artışa dayanır. Yalıtkan bir sıvı ortamında ER malzemenin dağılmasıyla oluşturulan süspansiyonların, bir elektrik

alan uygulandığı müddetçe viskozitesi artar. Elektrik alan kaldırıldığında ER akışkanlar çoğunlukla Newtonian, nadiren de pseudoplastik davranış sergilerler. Süspansiyonların viskozitesindeki değişimin genel olarak; taneciklerin kutuplaşması sonucunda süspansiyonun mikro yapısında meydana gelen tanecik zincirlerinden kaynaklandığı varsayılır. Elektrik alan varlığında ve yokluğunda meydana gelen bu viskozite değişimi tersinirdir. Elektrik alan uygulamasından sonra taneciklerin oluşturduğu zincir yapıları ya da kolonları, elektrotlar arasındaki boşlukta milisaniyeden daha hızlı bir sürede oluşur ve böylece viskozite ve kayma gerilimi (ER aktivite) yükselir. Bir kayma kuvveti uygulandığında zincirler kayma kuvvetleri tarafından yok edilir ve viskozite düşer. Çok yüksek kayma hızı değerlerinde ise elektrik alan kuvvetinin yokluğundaki viskozite değerleri gözlenir [63].

PIN ve beş farklı yüzdede PIN içeren PIN/PVAc kompozitleri için alınan ölçümler Şekil 5.11’ de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde uygulanan elektrik alan kuvveti arttıkça kayma gerilimi değerlerinin de arttığı görülmektedir. En yüksek kayma gerilimi değeri PIN yüzdesi en yüksek olan K4 (%35 PIN) kompozitinde görülmektedir. PIN homopolimeri için ise kayma gerilimi değeri beklenildiği gibi en düşük çıkmıştır.

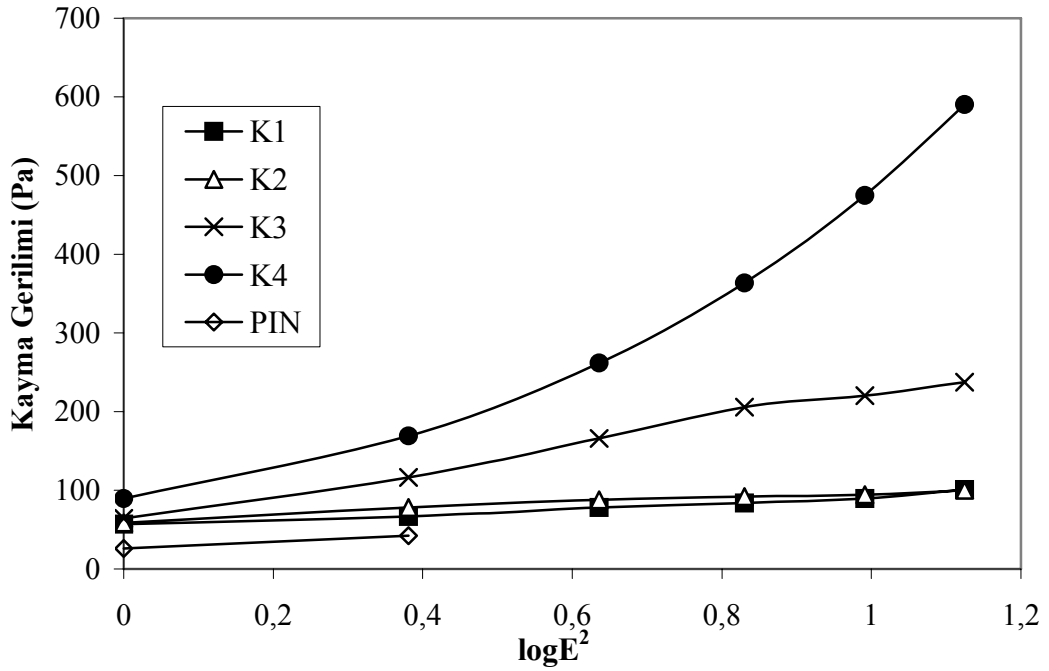


Şekil 5.11. Numunelerin elektrik alan kuvveti ile kayma gerilimlerinin değişimi
 $c=25\%$ $\dot{\gamma} = 0,2 \text{ s}^{-1}$, $T=25^\circ\text{C}$

Araştırmacılar, Silika-TiO₂/SO kompozit süspansiyonları ile yaptıkları çalışmada kayma gerilimi değerinin elektrik alan kuvvetinin karesi ile doğru orantılı olarak artış gösterdiğini rapor etmişlerdir [92]. Foul ve Atten su ile aktive edilmiş mikro kristal yapıdaki selülozun madeni yağ içerisinde oluşturduğu süspansiyonlarla yaptıkları çalışmalarda benzer sonuçlar elde ettiklerini rapor etmişlerdir [93]. Aynı şekilde Ünal ve arkadaşları da Poliinden/kaolin kompozitin silikon yağındaki süspansiyonlarında benzer sonuçlar elde etmişlerdir [94]. Bu nedenle PIN/PVAc/SO süspansiyon sisteminde kayma geriliminin elektrik alan kuvvetinin karesi ile değişimi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.12’ de gösterilmiştir. Şekilden anlaşıldığı gibi elektrik alan kuvvetinin karesi ile kayma gerilimi çalışılan süspansiyonlarda lineer olarak artış göstermiş ve teorik beklentilere uygun çıkmıştır [80].

$$\tau \propto E^n \quad (5.3)$$

Grafikte gözlenen bir diğer husus ise elektrik alan altında elde edilen kayma gerilimi değerlerinin azalan kompozit tanecik boyutu ile de doğru orantılı olarak artış gösterdiğidir. Bunun da nedeni tanecik boyutu azaldıkça taneciklerin yüzey alanlarının artması ve tanecikler arasındaki etkileşim kuvvetlerinin elektrik alanının da etkisi ile artış gösteriyor olmasıdır. Literatürde de ER etkinin azalan tanecik boyutu ile arttığına ilişkin çalışmalar rapor edilmiştir [95].



Şekil 5.12. Kayma geriliminin elektrik alan kuvvetinin karesiyle değişimi
 Numune: PIN $d_{(0,5)} = 41,03\mu\text{m}$, K1 $d_{(0,5)} = 12,00\mu\text{m}$, K2 $d_{(0,5)} = 9,94\mu\text{m}$,
 K3 $d_{(0,5)} = 9,62\mu\text{m}$, K4 $d_{(0,5)} = 9,36\mu\text{m}$, $c = \%25$ (m/m), $\dot{\gamma} = 0,2 \text{ s}^{-1}$,
 $T = 25^\circ\text{C}$

5.6.5. Elektrik alan kuvvetinin viskozite üzerine etkisi

Bir ER akışkanda yüksek bir elektrik alan kuvveti altında tanecikler arasında meydana gelen etkileşimler taneciklerin agregasyonuna ve lif oluşumuna yol açar. Bir kayma alanı varlığında viskoz kuvvetlere maruz kalan tanecikler süspansiyonda mevcut olan diğer taneciklerle etkileşir. Bu viskoz kuvvetler (F);

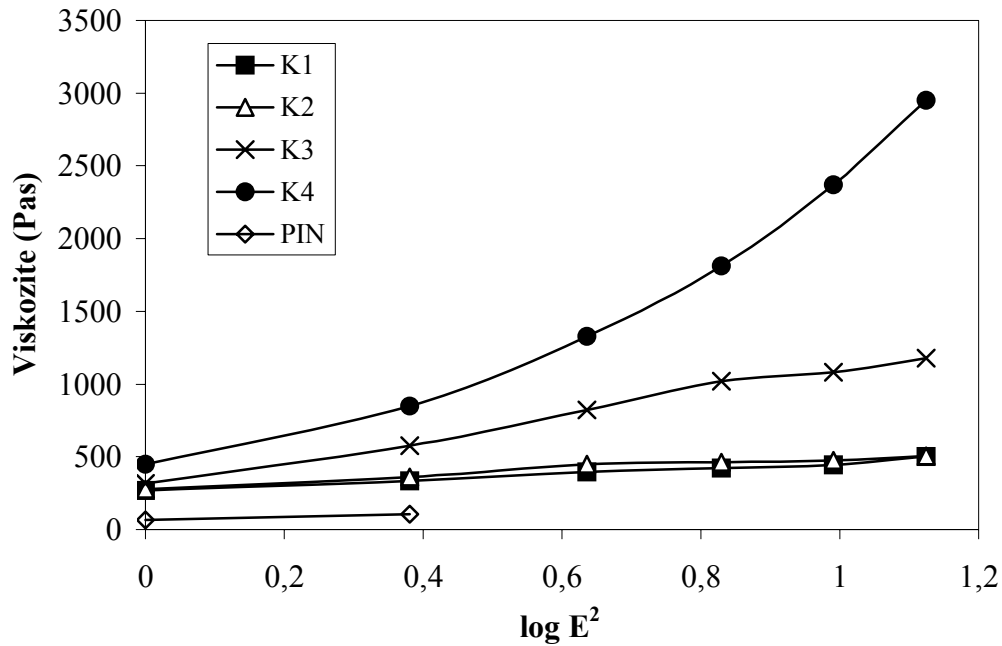
$$F = 6\pi\eta_s r^6 \dot{\gamma} \quad (5.6)$$

bağıntısı ile verilir [96]. Burada; η_s süspansiyonun viskozitesini, r tanecik yarıçapısını, $\dot{\gamma}$ kayma hızını göstermektedir.

Şekil 5.13' de PIN ve PIN/PVAc kompozitlerinden hazırlanan süspansiyonların $0,2 \text{ s}^{-1}$ kayma hızında, optimum derişimde (%25) ve 25°C 'da elde edilen elektrik alan kuvveti karesi—viskozite grafikleri verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi elektrik alan

kuvveti karesinin artması ile viskozite de aynı oranda artmaktadır. En yüksek viskozite değerine $E = 3,65 \text{ kV/mm}$ ' da 2950 Pas ile %35'lik PIN içeren K4 kompozite sahipken, en düşük elektrik alan viskozite PIN homopolimerinde gözlenmiştir. Sonuç olarak, kompozit yapısındaki PVAc miktarı azaldıkça kompozitlerde elektrik alan viskozite değerleri de artmıştır. Kompozitlerde elektrik alan kuvvetinin karase ile elektrik alan viskozitedeki değişimler aşağıdaki şekilde gerçekleşmiştir: K4 (2950Pas)>K3 (1180Pas)>K2 (505Pas)>K1 (500Pas)>PIN (105Pas).

Choi ve arkadaşları polianilinin silikon yağı içerisindeki süspansiyonunun viskozitesinin, artan elektrik alan kuvvetinin karesiyle lineer olarak arttığını rapor etmişlerdir [57]. Ayrıca Ünal ve arkadaşları tarafından CaCO_3 /silikon yağı sistemi ile yapılan çalışmada, $E = 2 \text{ kV/mm}$, $c = \%20$ ve $\dot{\gamma} = 1,0 \text{ s}^{-1}$ şartlarında yine artan elektrik alan kuvvetinin karesiyle viskozitede lineer bir artış gözlemlendiği belirtilmiş ve en yüksek viskozite değeri 275 Pas olarak rapor edilmiştir [85].



Şekil 5.13. Viskozite üzerine elektrik alan kuvvetinin karesinin ve kompozit bileşiminin etkisi $\dot{\gamma} = 0,2 \text{ s}^{-1}$, $T = 25^\circ\text{C}$, $c = \%25$

5.6.6. Kayma geriliminin kayma hızı ile değişimi

Şekil 5.14a—Şekil 5.14e’de PIN ve beş farklı yüzdede PIN içeren PIN/PVAc kompozitleri ile silikon yağı içerisinde hazırlanan süspansiyonların, elektrik alan varlığında ve yokluğundaki optimum derişimde ($c = \%25$, m/m) kayma hızı—viskozite—kayma gerilimi grafikleri verilmiştir. Her bir polimer grafiğinde kayma hızının arttırılmasıyla süspansiyonların viskozitelerinde üstel olarak bir azalma gözlenmektedir. Bu azalma elektrik alan kuvveti uygulandığında daha belirgin bir şekilde kendini göstermektedir. Ayrıca viskozitede meydana gelen azalma ile kayma geriliminde de önemli ölçüde artışlar meydana gelmektedir. Buradan süspansiyonların kayma incelmesi türünden Newtonian olmayan visko-elastik bir davranış gösterdiği sonucuna varılabilir. Kayma hızı ile kayma gerilimlerinin değişimine bakıldığında ise, tüm kompozit malzemelerin elektrik alan altında uygulanan kayma hızı neticesinde Bingham türü bir davranış sergilediği ve minimum kayma hızında belirli bir kayma gerilimi değerinden itibaren artışa geçtiği gözlenmiştir. Bu ancak yukarıda da bahsedildiği gibi bu ölçümler sırasında da cihaz akım çektiğinden set edilen elektrik alan kuvveti değerleri sabit kalmamış ve daha düşük değerlere kaymıştır. Aşağıdaki Çizelge 5.6’ da her bir numunenin ölçüm alınabilen elektrik alan kuvveti değerleri ve bunlara karşılık gelen kayma gerilimi değerlerinin yanında numunelerin akma verimi değerleri de verilmiştir.

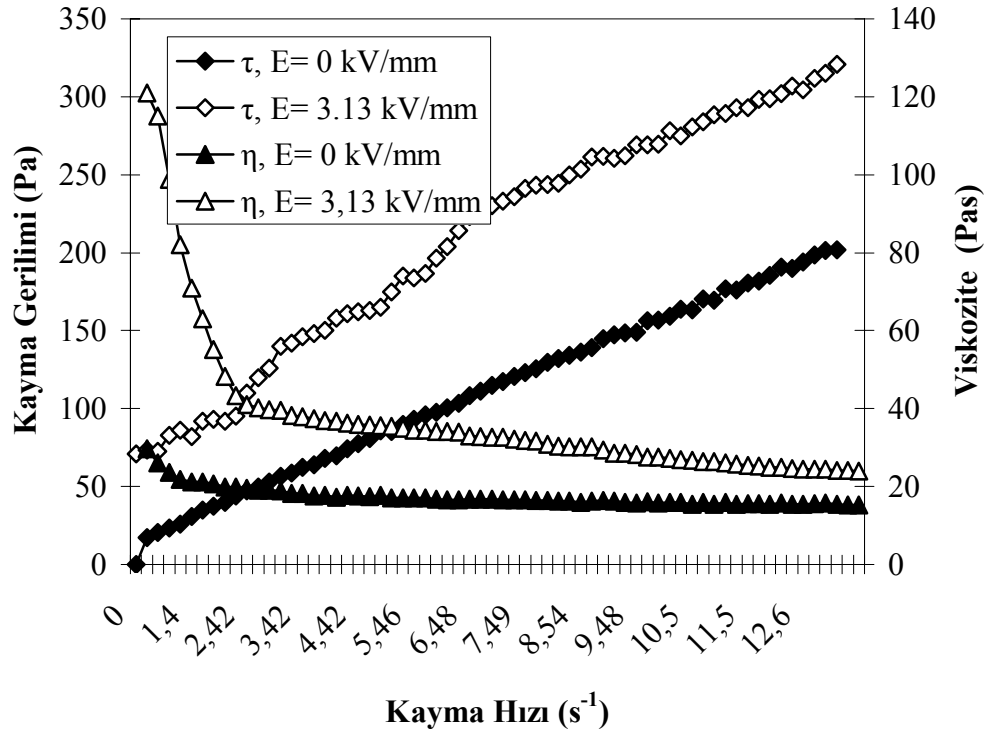
Diğer taraftan Çizelge 5.6’ de görüldüğü gibi tüm numunelerde elektrik alan kuvvetinin etkisi ile kayma gerilimi artmakta, bu artış düşük kayma hızlarında büyük, yüksek kayma hızlarında küçük olarak gerçekleşmektedir.

Çizelge 5.6. Numunelerin $E = 0$ ve $E \neq 0$ iken ölçülen maksimum ve minimum kayma hızındaki kayma gerilimi değerleri

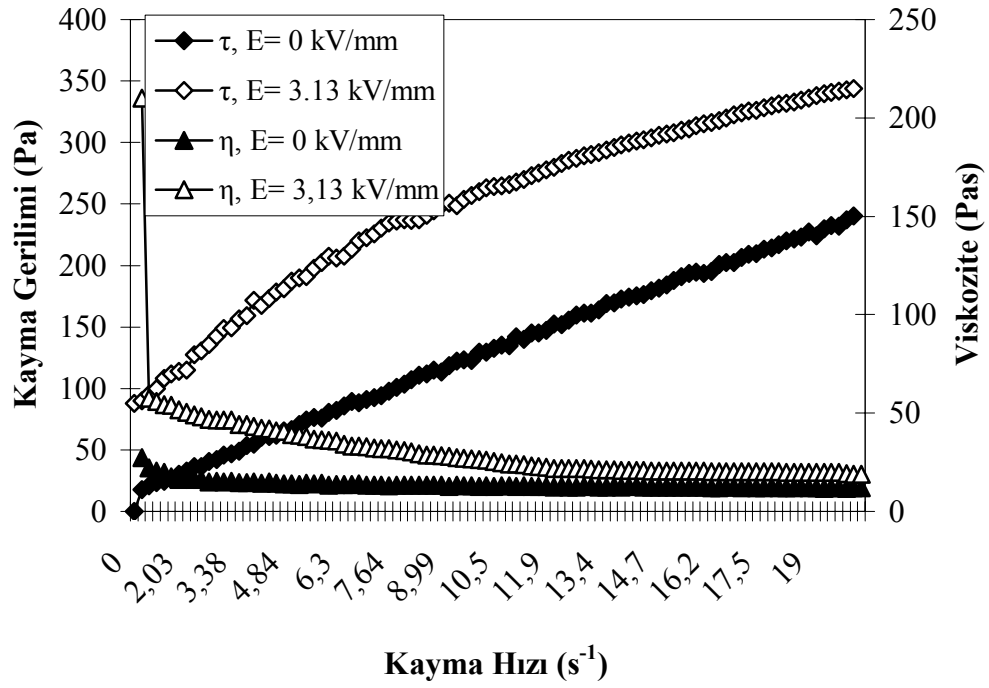
Numune	Kayma gerilimi ¹ (Pa)	Kayma gerilimi ² (Pa)	Akma verimi (Pa)	E (kV/mm)
K1	73	321	71	3,13
K1	17	202	0,0871	0
K2	90	344	88	3,13
K2	18	240	0,138	0
K3	94	205	90	2,60
K3	7,5	140	0,134	0
K4	605	929	600	3,65
K4	33	252	0,18	0
PIN	63	334	60	1,25
PIN	17	313	0,236	0

¹Kayma hızı = $0,5 \text{ s}^{-1}$, ²kayma hızı = 20 s^{-1}

Block ve Kelly SO içerisinde hazırladıkları süspansiyonlarda silika ve kalsiyum titanat ile yaptıkları deneylerde, silika süspansiyonların elektrik alan yokluğunda Newtonian davranış sergilediğini, kalsiyum titanat süspansiyonların ise dilatant davranış sergilediğini belirtmişlerdir [8]. Tanaka ise polianilinin ve magnezyum hidroksitin SO ortamında hazırlanan süspansiyonları ile yaptıkları çalışmalarda, hem elektrik alan yokluğunda hem de elektrik alan varlığında süspansiyonların kayma incelmesi gösterdiğini belirtmiştir [97]. Aynı şekilde sıvı kristal polisiloksan/SO sisteminin $E = 0 \text{ kV/mm}$ ve $E \neq 0 \text{ kV/mm}$ şartlarında da kayma incelmesi türünden reolojik bir davranış gösterdiği Otsubo tarafından rapor edilmiştir [98]. Ayrıca Ünal ve arkadaşları tarafından poli(2-akrilamido-2-metilpropanesülfonik asit)/SO sistemi ile yapılan çalışmada viskozitenin elektrik alan kuvvetinin artmasıyla arttığı, kayma hızı artışı ile de azaldığı rapor edilmiştir [56].

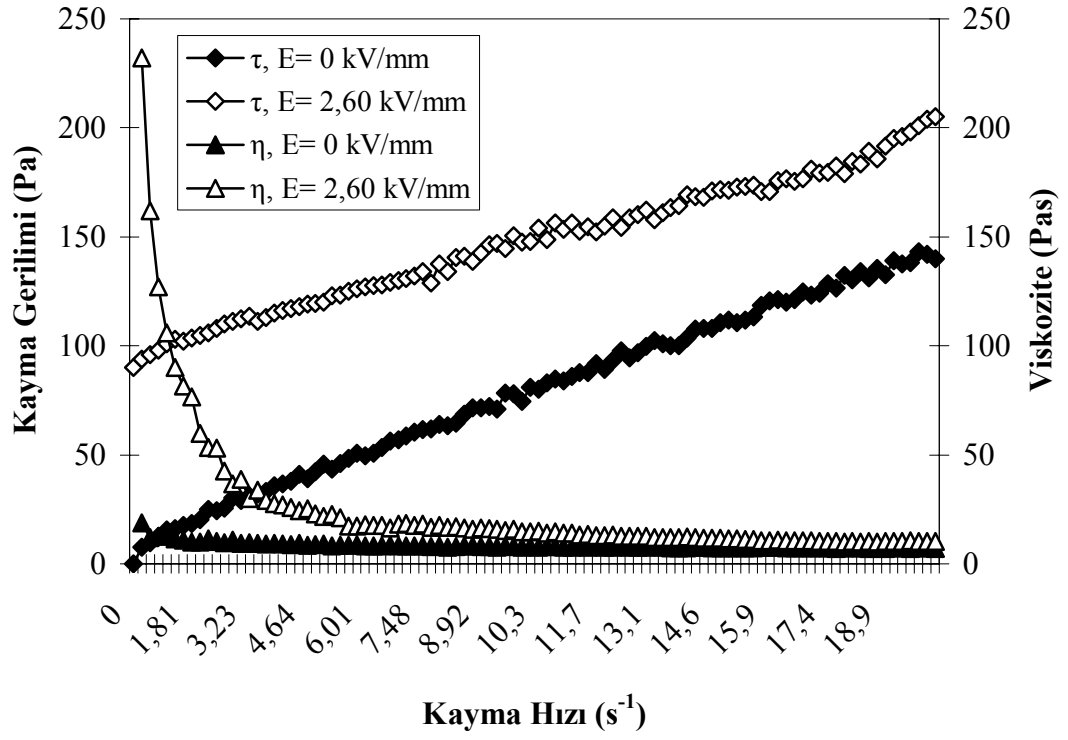


(a)

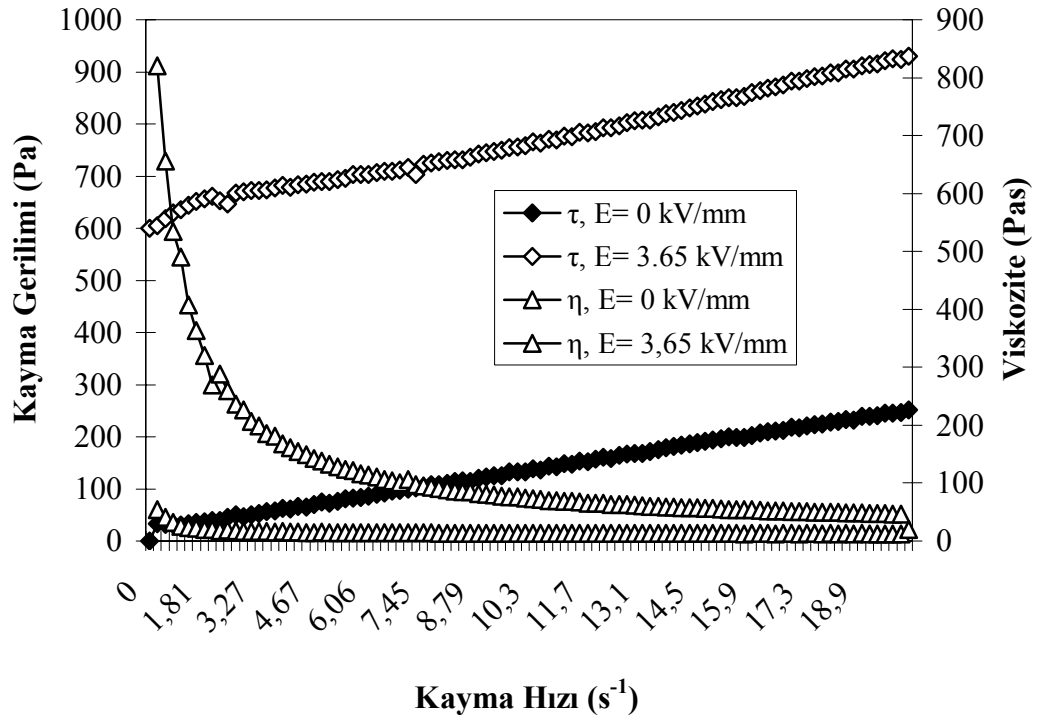


(b)

Şekil 5.14. Numunelerin kayma gerilimi ve viskozitelerinin kayma hızı ile değişimi
 $c = \%25$, $T = 25^\circ\text{C}$, a) K1 b) K2 c) K3 d) K4 e) PIN

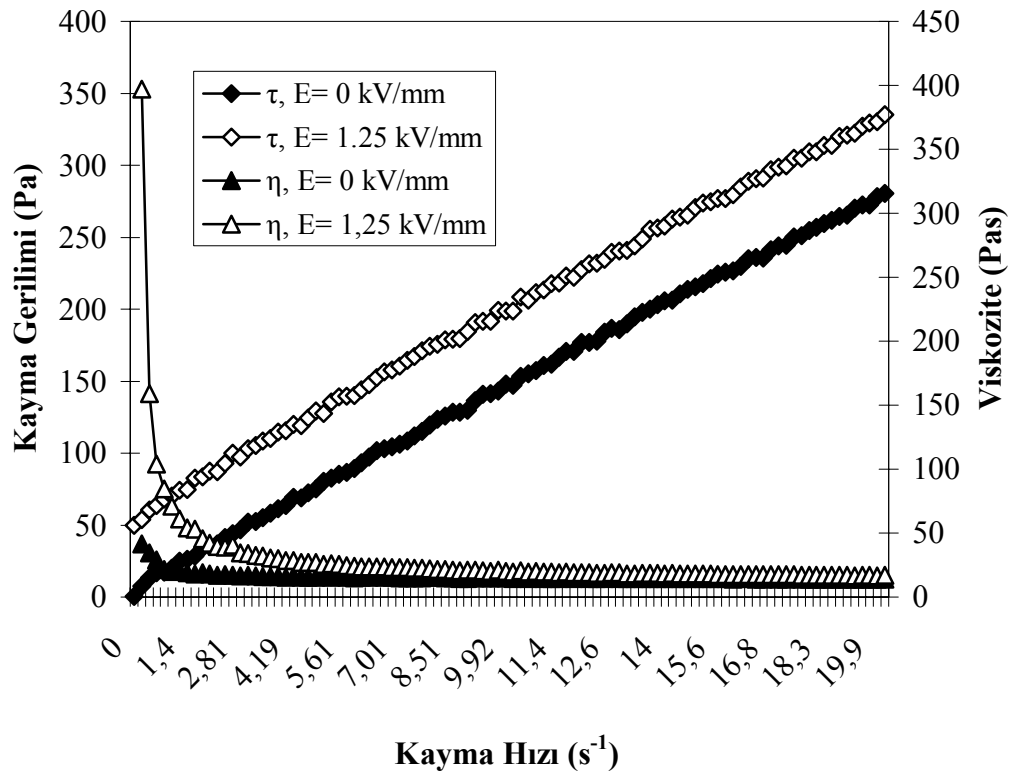


(c)



(d)

Şekil 5.14. (Devam) Numunelerin kayma gerilimi ve viskozitelerinin kayma hızı ile değişimi $c= \%25$, $T=25^{\circ}C$, a) K1 b) K2 c) K3 d) K4 e) PIN



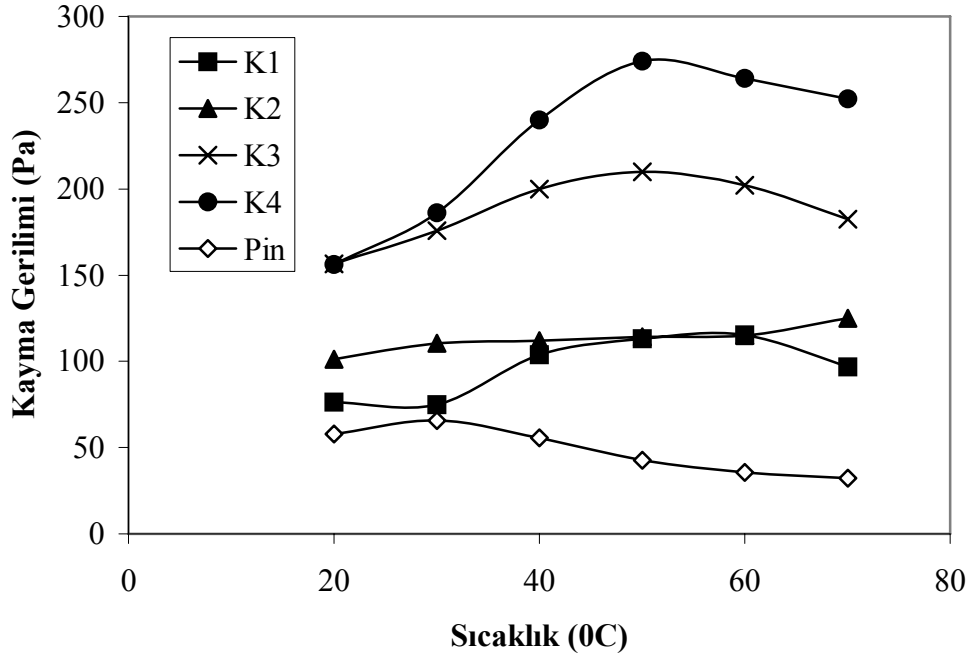
(e)

Şekil 5.14. (Devam) Numunelerin kayma gerilimi ve viskozitelerinin kayma hızı ile değişimi $c = \%25$, $T = 25^\circ\text{C}$, a) K1 b) K2 c) K3 d) K4 e) PIN

5.6.7. Kayma geriliminin sıcaklıkla değişimi

Numunelerin yüksek sıcaklıklarda güç kaybına uğrayıp uğramadıklarını test etmek amacıyla $20-70^\circ\text{C}$ aralığında 5 farklı sıcaklıkta sıcaklık taraması yapıldı. Şekil 5.15’de görüldüğü gibi tüm kompozitlerde 50°C ye kadar artan sıcaklık ile kayma gerilimlerinde hafif bir artış bu sıcaklığın üzerine çıkıldığında ise hafif bir azalma gözlenmiştir. Bu durum düşük sıcaklıklarda moleküller arası etkileşim kuvvetlerinin fazla olmasına ve yüksek sıcaklıklarda kompozit malzemenin daha viskoelastik karakter kazanmasına, akıcılığının artmasına atfedilebilir. PIN de artan sıcaklık ile 30°C ye kadar kayma geriliminde bir değişiklik gözlenmemiş, bu sıcaklığın üzerinde ise homopolimer güç kaybına uğramıştır. Diğer taraftan PIN tek başına iken 30°C den sonra güç kaybına uğramaya başlarken PVAc ile kompozit oluşumundan sonra 50°C den itibaren

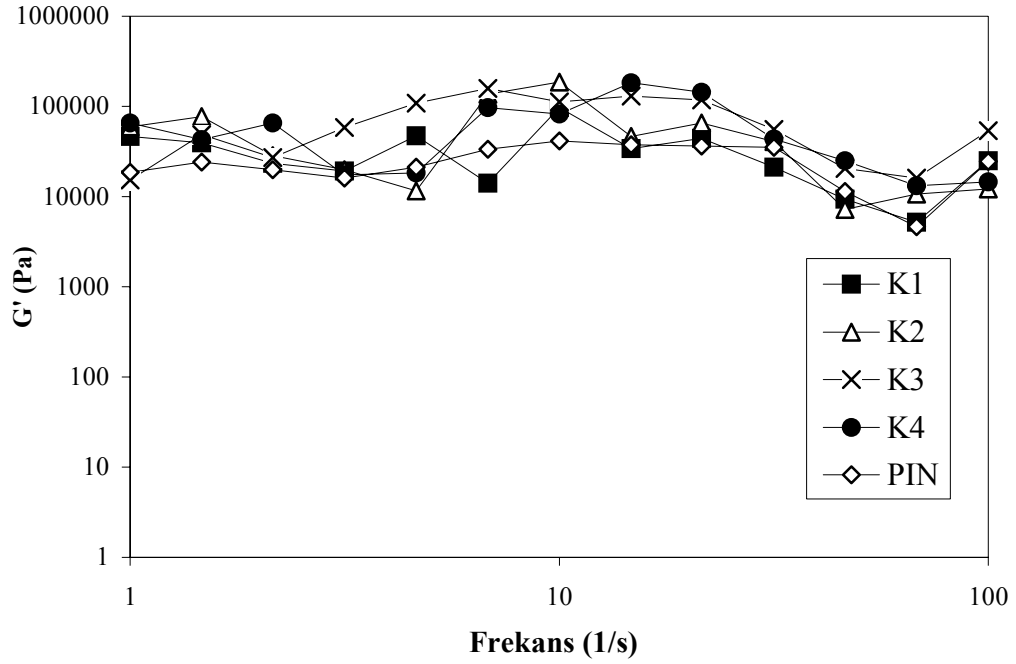
güç kaybına uğramaya başlaması termal olarak daha kararlı bir yapının oluştuğunu gösterir. Bu durum numunelerden alınan DSC termogramları ile de desteklenmektedir [72]. Kompozit malzemelerin yüksek sıcaklıklarda aşırı güç kaybına uğramaması endüstriyel uygulamalar açısından oldukça önemlidir.



Şekil 5.15. Numunelerin kayma geriliminin sıcaklıkla değişimi
 $c = \%25 \text{ (m/m)}$, $\dot{\gamma} = 1,0 \text{ s}^{-1}$, $E_{\text{Kompozit}} = 2,08 \text{ kV/mm}$, $E_{(\text{PIN})} = 0,5 \text{ kV/mm}$

5.6.8. Elastik modülün frekans ile değişimi

Numunelerin viskoelastik özelliklerini belirlemek üzere sabit kayma gerilimi, sıcaklık ve derişimde numuneler üzerine 0-100 Hz arasında frekans uygulandı, elde edilen sonuçlar Şekil 5.16'da gösterildi. Ölçümler sırasında daha önce de bahsedildiği gibi kaçak akım yoğunluklarından dolayı set edilen sabit elektrik alan kuvvetlerinde çalışamamış, ancak çalışılabilen E değerleri grafiğin altında verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yaklaşık 20 Hz değerine kadar artan frekans ile numunelerin viskoelastiklikleri az da olsa artmış ve titreşim sönümleme görevlerini yapmışlardır. Ancak 20 Hz değerinden sonra deneysel hata sınırları numunelerin viskoelastik özelliklerinde az da olsa azalmalar gözlenmiştir. Benzer davranışlar literatürde de rapor edilmiştir [99].



Şekil 5.16. Numunelerde elastik modülün frekans ile değişimi

$E_{PIN} = 0,52$ kV/mm, $E_{K1} = 3,13$ kV/mm, $E_{K2} = 3,13$ kV/mm, $E_{K3} = 3,13$ kV/mm, $E_{K4} = 2,08$ kV/mm, $c = \%25(m/m)$, $\tau = 10$ Pa, $T = 25^{\circ}C$

5.6.9. Polarizasyon kuvvetinin derişim ile değişimi

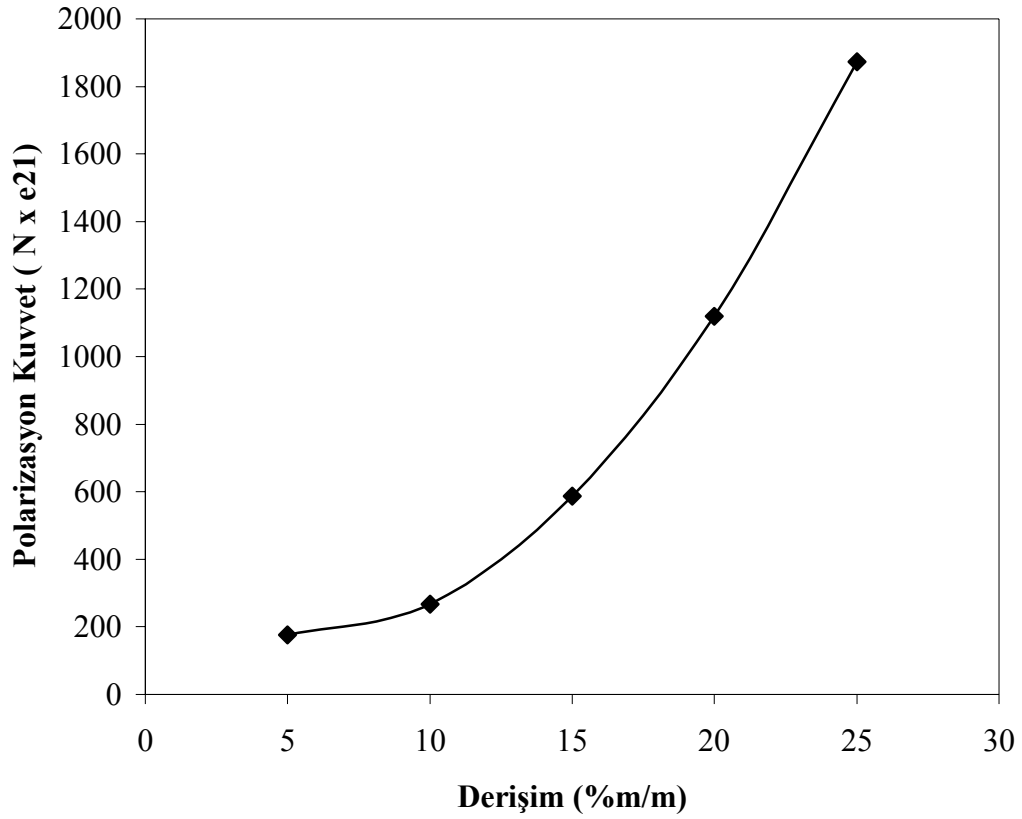
Bir süspansiyon içerisinde derişim artıka tanecikler arası etkileşim arttığından polarizasyon kuvvetleri de artar. Numunelerde derişim taraması sadece K1 kompoziti için yapıldığından polarizasyon kuvvetlerinin büyüklüğü de sadece K1 kompoziti için hesaplandı. Şekil 5.17'de görüldüğü gibi K1/SO süspansiyon sisteminde artan derişim ile elektrik alan altında indüklenmiş polarizasyon kuvvetleri de 176×10^{-21} N dan 1872×10^{-21} N değerine yükselmiştir. İndüklenmiş polarizasyon kuvvetleri Eş. 5.6 kullanılarak hesaplanmıştır. Benzer sonuçlar $CaCO_3/SO$ süspansiyon sistemi için de rapor edilmiştir [85].

$$F = 6\pi\eta_s r^6 \dot{\gamma} \quad (5.6)$$

η_s : Süspansiyonun viskozitesini

r : Tanecik yarıçapısını

$\dot{\gamma}$: Kayma hızını göstermektedir.



Şekil 5.17. K1 için polarizasyon kuvvetinin derişim ile değişimi
 $\dot{\gamma} = 0,2 \text{ s}^{-1}$, $E = 3,65 \text{ kV/mm}$ $T = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$

5.7.10. Promoter etkisinin incelenmesi

PIN homopolimeri ve farklı oranlarda PIN içeren PIN/PVAc kompozitlerinin ER aktiviteleri üzerine ppm mertebesinde polar sıvıların etkisini incelemek amacıyla promoter olarak H_2O kullanılarak optimum derişimde (%25) silikon yağı içerisinde hazırlanan süspansiyonlar ile deneyler gerçekleştirildi. Deneylerde ER aktif süspansiyonlara ppm mertebesinde ilave edilen H_2O nun kompozitlerin oluşturduğu süspansiyonların ER aktivitesi üzerinde herhangi bir olumlu veya olumsuz etkisinin olmadığı, dolayısıyla viskozitesinde bir değişikliğin meydana gelmediği gözlemlendi. Bu nedenle PIN/PVAc kompozitleri kuru ER aktif malzemeler olarak sınıflandırıldı. Bu durum endüstriyel uygulamalar açısından bir avantaj teşkil etmektedir.

5.6.11. Sürünme deneyleri

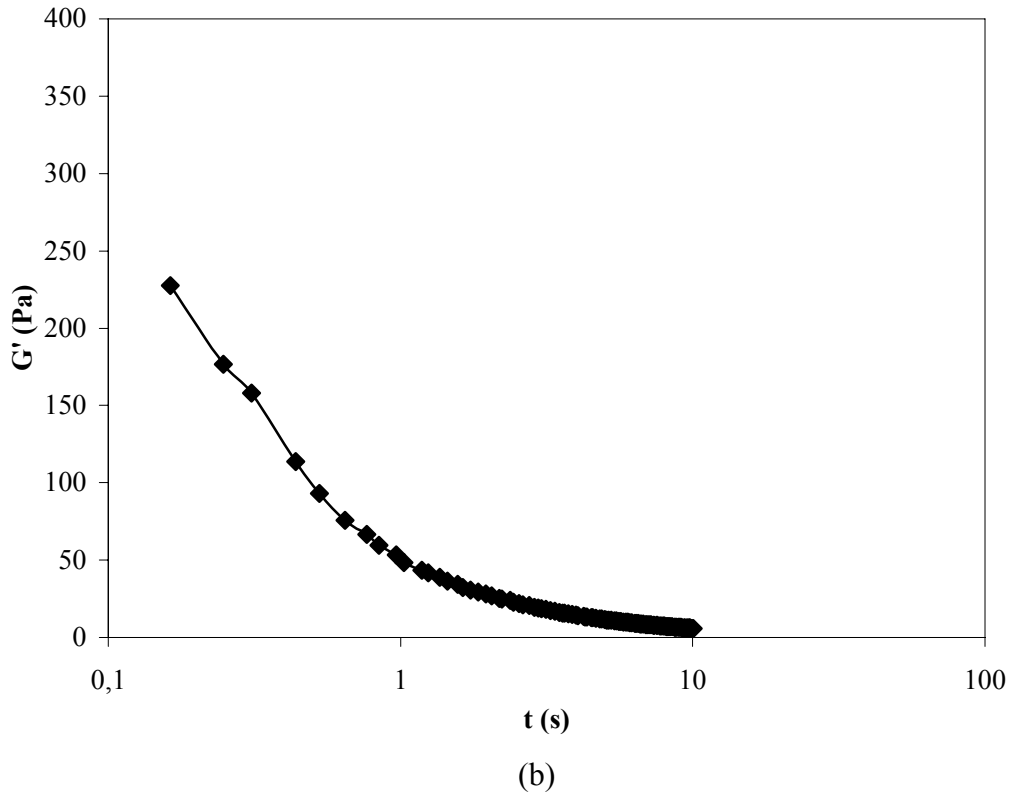
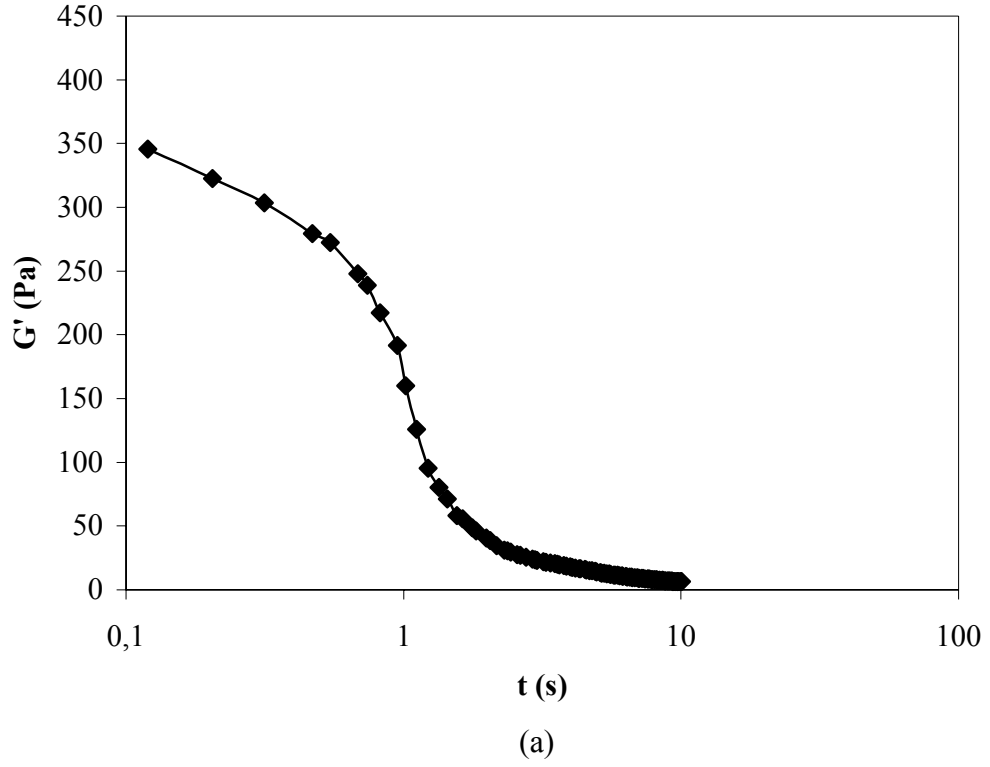
Özellikle yarıkristalin polimerler uygulanan bir gerilim altında direnç gösteremezler ve sürünme akışına uğrarlar. Polimerik malzemenin sürünme testlerine göstereceği tepki (zincirlerin yeniden düzenlenme hareketleri) malzemenin moleküler yapısına, deneyin yapıldığı sıcaklığa, testin uygulama süresine ve hepsinden önemlisi de amorf veya kristalin yapıya bağlıdır. Bazı polimerik malzemelerde sürünmenin kalıcı ve tersinmez olmasının nedeni amorf bölgelerdeki moleküler kaymalar (molekül yapı taşlarının yerlerinden oynaması) ve kristalin bölgelerde gerçekleşen yeniden düzenlenmelerdir [100].

PIN ve PIN/PVAc kompozit malzemelerinde de sürünme deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.18a—Şekil 5.18e’ de gösterilmiştir. Sürünme deneylerinden elde edilen grafikler incelendiğinde, PIN de hem elastik, hem de viskoelastik sürünmelerin gözlendiği, kompozit malzemelerde ise %PIN miktarı arttıkça elastik yenilenme ve viskoelastik yenilenmelerin azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca kompozit malzemelerde %PIN miktarı arttıkça grafiklerin altında kalan yenilenemeyen tersinmez viskoz akışa karşılık gelen alanların azaldığı ve kompozit malzemenin sürünmeye karşı daha dirençli hale geldiği görüldü. Kompozit malzemelerdeki deformasyonların başlangıç, sonlanma ve tersinmez alanlarına karşılık gelen değerleri Çizelge 5.7’de verilmiştir.

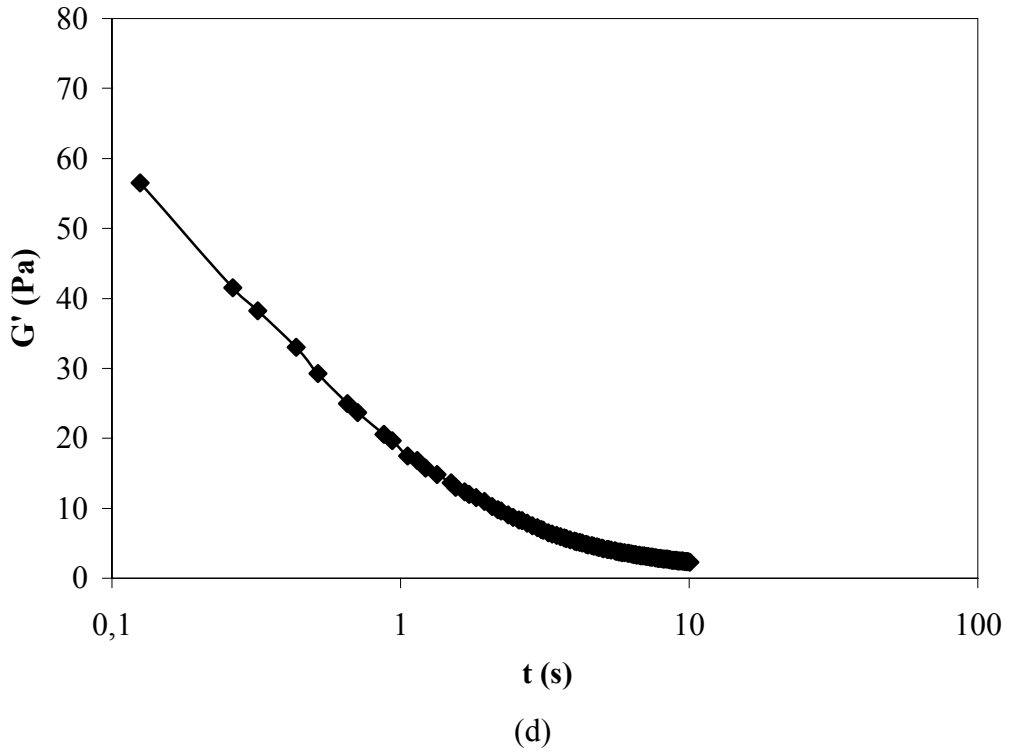
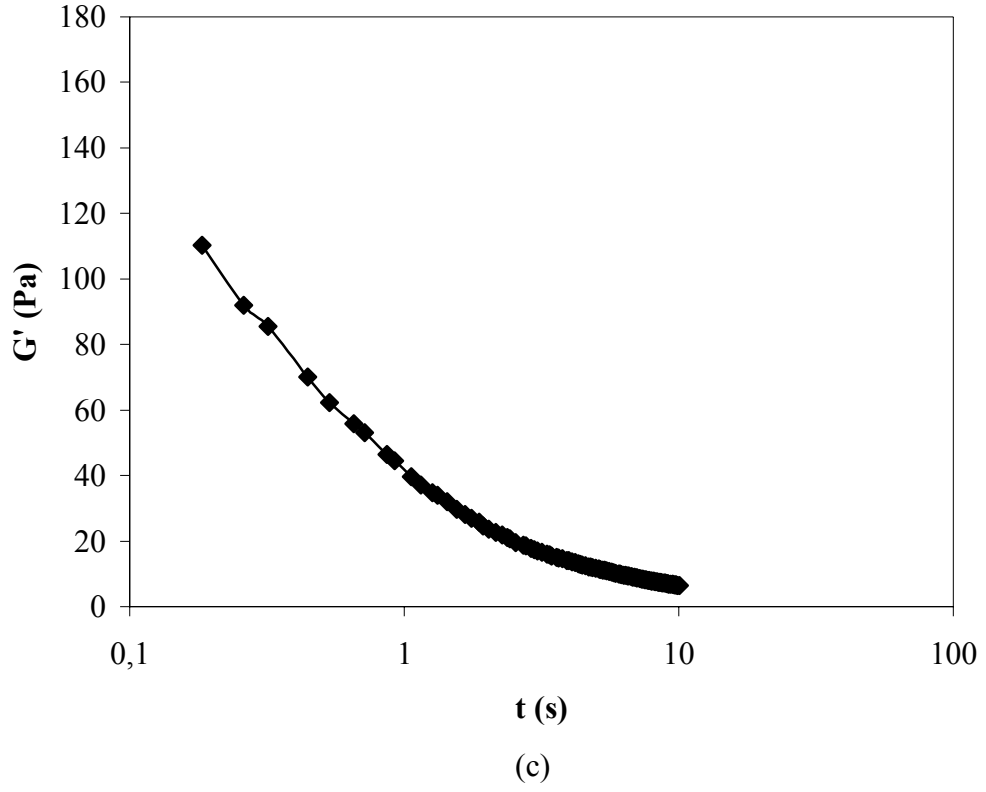
Benzer şekilde Genovese ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmalarda polipirol ve poli[etilen-ko-(metil akrilat)] blendlerinin viskoelastik bir deformasyon gösterdiğini belirtmiştir [101]. Ayrıca Acha ve arkadaşlarının polipirol/hint kenevir kompozitleri ile yapmış oldukları çalışmalarda ise kompozitlerdeki hint keneviri miktarı arttıkça viskoelastik deformasyonun azaldığını tespit etmişlerdir [102].

Çizelge 5.7. Numunelerdeki deformasyonların başlangıç ve sonlanma değerleri

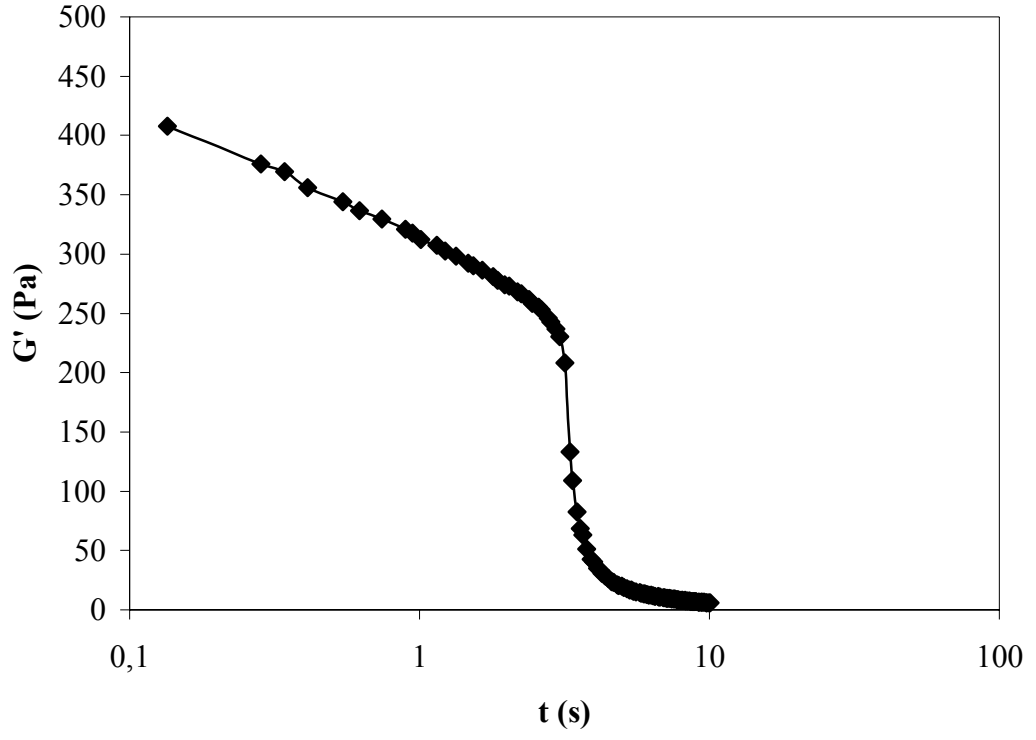
Numune	K1	K2	K3	K4	PIN
Viskoelastik deformasyon başlangıç zamanı (s)	0,12	0,16	0,18	0,13	0,13
Viskoelastik deformasyon başlangıç modülü (Pa)	346	228	110	56,5	407
Tersinir elastiklik zamanı (s)	0,74	yok	yok	yok	3,0
Tersinir elastiklik modülü (Pa)	238,6	yok	yok	yok	230
Viskoelastik deformasyon sonlanma zamanı (s)	1,35	0,96	1,26	1,33	3,6
Viskoelastik deformasyon sonlanma modülü (Pa)	80,4	53,3	34,8	14,8	63,3
Tersinmez viskoz akış modülü (Pa)	35	15,8	8	2,80	13



Şekil 5.18. Numunelerin zaman ile elastik modülün değişimi $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $E = 0\text{ kV/mm}$, $c = \%25(\text{m/m})$, $\tau = 10\text{ Pa}$ a) K1 b) K2 c) K3 d) K4 e) PIN



Şekil 5.18. (Devam) Numunelerin zaman ile elastik modülün değişimi $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$,
 $E = 0\text{ kV/mm}$, $c = \%25(\text{m/m})$, $\tau = 10\text{ Pa}$ a) K1 b) K2 c) K3 d) K4 e) PIN



(e)

Şekil 5.18. (Devam) Numunelerin zaman ile elastik modülün değişimi $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$,
 $E = 0\text{ kV/mm}$, $c = \%25(\text{m/m})$, $\tau = 10\text{ Pa}$ a) K1 b) K2 c) K3 d) K4 e) PIN

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

1. Dört nokta tekniği ile yapılan iletkenlik ölçümleri sonucunda PIN için iletkenlik değeri $9,64 \times 10^{-3} \text{ Sm}^{-1}$ iken, kompozitler için iletkenlik değerleri $1,98 \times 10^{-5}$ – $4,83 \times 10^{-5} \text{ Sm}^{-1}$ aralığında bulundu. Kompozit malzemelerde PVAc miktarı arttıkça iletkenliğin azaldığı tespit edildi.
2. Impedans Analyser cihazı ile yapılan ölçümlerde numunelerin dielektrik sabiti değerlerinin ER uygulamalar için aranan aralıkta olduğu tespit edildi.
3. Kolloidal kararlılığa, PIN/PVAc kompozitlerinde bileşimin ve derişimin etkisi; PIN için ise derişimin etkisi incelendi. Artan süspansiyon derişimi ve tanecik boyutu ile kolloidal kararlılığın azaldığı tespit edildi. Süspansiyonların gösterdiği kolloidal kararlılık değerlerinin endüstriyel uygulamalar için uygun olduğu gözlemlendi.
4. Elektöreometre ile yapılan çalışmalarda, süspansiyonun derişimi arttıkça ER verimin arttığı görüldü. ER aktivite için optimum süspansiyon derişimi %25 (m/m) olarak bulundu.
5. Elektrik alan varlığında süspansiyonların viskozite değerinin, elektrik alanın olmadığı duruma göre daha yüksek çıktığı gözlemlendi.
6. PIN ve kompozitlerin viskozitesinin kayma hızının artmasıyla azaldığı ve kayma incilmesi türünden viskoelastik bir davranış gösterdiği, kompozitlerde PIN miktarı arttıkça elektrik alan viskozitenin arttığı tespit edildi.
7. Süspansiyonlarda derişim ve elektrik alan kuvveti artışına paralel olarak kayma geriliminde artış gözlemlendiği tespit edildi.
8. Kompozit malzemelerden hazırlanan süspansiyonların yüksek sıcaklıkta çok fazla güç kaybına uğramadığı ve endüstriyel uygulamalar için uygun olabileceği gözlemlendi.

9. Frekans artışı ile kompozit malzemelerin elastiklik modülünde önce bir artışın daha yüksek frekans değerlerinde ise bir azalmanın gözlemlendiği ve numunelerin endüstriyel uygulamalarda titreşim sönümlerinde kullanılabileceği tespit edildi.
10. Kompozit malzemelerden hazırlanan süspansiyonların içerisinde elektrik alan indüklenmiş polarizasyon kuvvetlerinin aktif olduğu, bunların ER aktiviteye sebep olduğu ve bu polarizasyon kuvvetlerinin de artan derişim ile beklenildiği şekilde arttığı gözlemlendi.
11. Kompozit malzemenin promoter olmaksızın ER aktivite gösterdiği ve kuru ER materyaller olarak sınıflandırılabilceği tespit edildi.
12. Yapılan yorulma deneylerinden elde edilen verilere bakıldığında ise kompozit malzemelerin tersinir bir viskoelastik deformasyon gösterdiği gözlemlendi.
13. Elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak incelenen poliinol ve PIN/PVAc kompozitlerin, endüstriyel uygulamalarda kullanılabileceği önerilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Balcı, N., Bayramlı, E., Toppare, L., “Conducting Polymer Composites: Polypyrrole and Poly(vinyl chloride-vinyl acetate) Copolymer” , *Journal of Applied Polymer Science*, 64: 667-671 (1997).
2. Wang, F., Li, L., Wan, X., Xue, G., “Modification of Polyindole by the Incorporation of Pyrrole Unit” , *Journal of Applied Polymer Science*, 85: 814-820 (2002).
3. Sarı, B., Talu, M., Gök, A., “Sythesis and Characterization of Nylon 6/polyalkylaniline Conducting Composites”, *Journal of Applied Polymer Science*, 87: 1693-1701 (2003).
4. Yılmaz, H.,Ünal, H.İ. , Sarı, B., “Sythesis, Characterization Electrorheological Properties of poly(o-toluidine)/Zn Conducting Composites” *Journal of Applied Polymer Science*, 87: 3484-3492 (2007).
5. Yeh, J.Y., Chen, L.W. and Wang, C.C., “Dynamic stability of a sandwich beam with a constrained layer and electrorheological fluid core”, *Composite Structures*, 64: 47-54 (2004).
6. Zhang, H. and Li, C., “Chemical synthesis of transparent and conducting polyaniline –poly(ethylene terephthalate) composite films”, *Synth. Met.*, 44: 143-146 (1991).
7. Winslow, W. M., “Induced Vibration Suspension”, *Journal of Applied Physics*, 20: 1137-1140 (1947).
8. Block, H. and Kelly, J.P., “Electro-rheology” *J. Phys. D:Appl. Phys*, 21(12): 1661–1677 (1988).
9. Block, H., Kelley J.P., *UK Patent no:* 2170510 (1985).
10. Billaud, D., Maarouf, E.B., Hanecart, E., “Electrochemical polymerization of indole”, *Polymer Communication*, 35: 2010-2011 (1994).
11. Talbi, H., Humbert, B., Billaud, D., “Polyindole and poly(5- cyanoindole): electrochemical and FT-IR spectroscopic comparative studies”, *Synthetic Metals* 84: 875-876 (1997).
12. Inzelt, G., Pineri, M., Schultze, J.W., Vorotynetsev, M.A., “Electron and proton conducting polymers: recent developments and prospects”, *Electrochimica Acta* 45: 2403-2421 (2000).
13. Chandresekhar, P., “Conducting Polymers Fundamentals and Aplications”, *Kluwer Academic Publisher*, 22-25 (1999).

14. Garnier, F., Tourillon, G., Gazard, M. Ve Dubois, J.C., "Electrochemical doping of polythiophene in aqueous-medium- electrical-properties and stability", *Journal of Electroanalytic Chemistry*, 148: 299 (1983).
15. Waltman, R. J., diaz A. F. ve Bargon, "Substituent effect in the electropolymerization of aromatic heterocyclic compounds", *Journal of Physical Chemistry*, 88: 4343 (1984).
16. Ryu, K.S., Park, N.G., Kim, K.M., Lee, Y.G., Park, Y.J., Lee, S.J., Jeong, C.K. Joo, J., Chang, S.H., "The physicochemical properties of polyindole/thiol composites", *Synthetic Metals*, 135: 397-398 (2003).
17. D. Billaud, B. Humbert, L. Thevenot, P. Thomas, H. Talbi, "Electrochemical properties and Fourier transform-infrared spectroscopic investigations of the redox behaviour of poly(indole-5-carboxylic acid) in LiClO₄-acetonitrile solutions" *Spectrochimica Acta, Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 59: 163-168 (2003).
18. Talbi, H., Billaud, D., Monard, G., Loos, M., "Theoretical investigation of the monomer reactivity in polyindole derivatives", *Synthetic Metals*, 101: 115-116 (1999).
19. Saraji, M., Bagheri, A., "Electropolymerization of indole and study of electrochemical behavior of the polymer in aqueous solutions", *Synthetic Metals*, 98: 57 (1998).
20. Abthagir, P.S., Dhanalakshmi, K., Saraswathi, R., "Thermal studies on polyindole and polycarbazole", *Synthetic Metals*, 93: 1-7 (1998).
21. Sazou, D., Poullos, I., "Photoelectrochemical behaviour of electrogenerated poly(2,3-diaminophenazine) on platinum in aqueous media", *Synthetic Metals*, 26: 339-347 (2002).
22. Ashassi-Sorkhabi, H., Rafizadeh, S.H., "Effect of coating time and heat treatment on structures and corrosion characteristics of electroless Ni-P alloy deposits", *Surface and Coating Technologies*, 176: 318-326 (2004).
23. Baldwin, K.R., Robinson, M.J., Smith, J.E., "The corrosion resistance of electrodeposited zinc-nickel alloy coatings", *Corrosion Science*, 35: 1267-1272 (1993).
24. El-Sharif, M.R., Su, Y.J., Chisholm, C.U., Watson, A., "Corrosion resistance of electrodeposited zinc-chromium alloy coatings", *Corrosion Science*, 35: 1259-1265 (1993).

25. Rossi, S., Chini, F., Straffelini, G., Bonora, P.L., Moschini, R., Stampali, A., "Corrosion protection properties of electroless Nickel/PTFE, Phosphate/MoS₂ and Bronze/PTFE coatings applied to improve the wear resistance of carbon steel", *Surface and Coating Technologies*, 173: 235-242 (2003).
26. Talbi, H., Ghanbaja, J. and Billaud, D., "Vibrational properties and structural studies of doped and dedoped polyindole by FTi.r., Raman and EEL spectroscopies", *Polymer*, 38 (9): 2099-2106 (1997).
27. Yurtsever, M. and Yurtsever, E., "A DFT study of polymerization mechanisms indole", *Polymer*, 43: 6019-6025 (2002).
28. Talbi, H., Monard, G., Loos, M. and Billaud, D., "Theoretical Investigation of The Monomer Reactivity in Polyindole Derivatives", *Synthetic Metals*, 101: 115-116 (1999).
29. Talbi, H., Monard, G., Loos, M. and Billaud, D., "Theoretical study of indole polymerization", *Journal of Molecular Structure (Theochem)*, 434: 129-134 (1998).
30. Makela, K. K., "Characterisation And Performance of Electrorheological Fluids Based On Pine Oils", *VTT Publications*, Finland, 15 (1999).
31. Winslow, W., M., "Methods And Means For Transmitting Electrical Impulses Into Mechanical Force" *U.S. Pat. No: 2417850* (1947).
32. Winslow, W., M., "Field Controlled Hydraulic Device" *U.S. Pat. No: 2661596* (1953).
33. Winslow, W., M., "Field response Force Transmitting Compositions", *U.S., Pat. No: 3047507* (1962).
34. Plockharski, J., Drabik, H., Wycislik, H., Ciach, T., "Electrorheological Properties of Polyphenylene Suspensions", *Synthetic Metals*, 88: 139-145 (1997).
35. Rejon, L., Castaneda-Aranda, I., Manero, O., "Rheological Behaviour of Electrorheological Fluids: Effect of The Dielectric Properties of Liquid Phase", *Colloids And Surfaces*, 182: 93-107 (2001).
36. Lee, H. J., Chin, B. D., Yang, S. M., Park, o. O., "Surfactant Effect on the Stability and Electrorheological Properties of Polyaniline Particle Suspensions", *Journal of Colloid And Inteface Science*, 206: 424-438 (1998).
37. Uejima, H., "Field Controlled Hydraulic Device", *Japanase Journal of Applied Physics*, 11: 319 (1972).

38. Whittle, M., Physic World, "Methods And Means For Transmitting Electrical Impulses Into Mechanical Force", *Journal Of Applied Polymer Science*, 2: 39 (1989).
39. Hollmann, H.E., "Characterisation And Performance of Electrorheological Fluids Based On Pine Oils", *J.Appl. Phys.*, 21: 402 (1950).
40. Gao, Z.W., Zhao, X.P., "Guest-controlling effects on ER behaviors of β -cyclodextrin polymer", *Journal of Colloid and Interface Science*, 289: 56-62 (2005).
41. Yılmaz, H., Değirmenci, M. and Ünal, H.İ., "Electrorheological properties of PMMA-b-PSt copolymer suspensions", *Journal of Colloid and Interface Science*, 293: 489-495 (2006).
42. Hao, Tion, Kawai, Akiko and Ikazaki, Fumikazu, "Mechanism of the Electrorheological Effect: Evidence from the conductive, Dielectric and Surface Choacteristics of Water-free Electrorheological fluids", *Langmuir*, 14: 1256-1262 (1998).
43. Di, K., Yang, X. and Li, C., "Electrorheological behavior of copper phthalocyanine-doped mesoporous TiO₂ suspensions", *Journal of Colloid and Interface Science*, 294: 499-503 (2006).
44. Otsubo, Yasufumi, Sekine, Masahiro and Katayamd Shingo "Effect of Adsorbed Water on the Electrorheology of siled suspensions", *Journal of Colloid and Interface Science*, 50: 324-330 (1992).
45. Gehin, C., Persello, J., Charraut, D. And Cabace, B., "Electrorheological properties and microstructure of silica suspensions", *Journal of Colloid and Interface Science*, 273: 658-667 (2004).
46. Şahin, D., Sarı, B. And Ünal, H.İ., "An Investigation of Some Parameters on Electrorheological Properties of Polypyrrole Suspensions", *Turk J. Chem.*, 26: 113-124 (2002).
47. Chaff, C.E. and Mason, S.G., "Intercalation and Deintercalation of Organic Compound", *J.Colloid Sci.*, 20: 330 (1965).
48. Deinega, Yu.F. Vinogradov, G.V., "Electric-Fields in The Rheology of Disperse Systems", *Rheologica Acta*, 23(6): 636-651 (1984).
49. Breguet, J., Luthy, W., Weber, H.P., "Q-Switching Of Yag-ER Laser With A Soap Film", *Optics Communications*, 82 (5-6): 488-490 (1991).

50. Kim, J.W., Choi, H.J., Lee, H.G., "Damping characteristics of polyaniline-based electrorheological fluid", *Journal Of Industrial And Engineering Chemistry*, 7 (4): 218-222 (2001).
51. Kim, J. W., Liu, F., Choi, H. J., Hong, S. H., and Joo, J., "Intercalated polypyrrole/ Na^+ -montmorillonite nanocomposite via an inverted emulsion pathway method", *Polymer Science*, 44(1):289-293 (2003).
52. Choi, H.J., Kim, J.W., Joo, J., "Synthesis and electrorheology of emulsion intercalated PANI-clay nanocomposite", *Synthetic Metals*, 121: 1325-1326 (2001).
53. Okagawa, A., Cox R.G., "Particle behavior in shear and electric fields. VII. Orientation distributions of cylinders", *Journal of Colloid and Interface Science*, 47: 568-587 (1974).
54. Hong, T., Xiaopeng, Z., Shu, L., "Design and performance research of an adaptive damper composed of electrorheological fluids and piezoelectric ceramics", *Smart Mater. Struct.*, 12: 347- 354 (2003).
55. Ünal, H. İ., Yavuz, M., Yıldırım, Y., Sarıtaş, M., "Kollaidal sistemlerin elektroeolojik özelliklerinin incelenmesi", *Tübitak TBAG*, Ankara, 51-55 (1999).
56. Ünal, H. İ., Yılmaz, H., "Electrorheological properties of poly(lithium-2-acrylamido-2-methyl propane sulfonic acid) suspensions", *Journal of Applied Polymer Science*, 86: 1106-1112 (2002).
57. Choi, H.J., Kim, T.W., Cho, M.S., Kim, S.G. and Jhon M.S., "Electrorheological Characterization of Polyaniline Dispersions", *Eur. Polym.J.*, 33: 699-703 (1997).
58. Moore, D. R, Turner, S., Eds., CRC Press, "Mechanical Evaluation Strategies for Plastics", *Cambridge*, 106 (2001).
59. Ward, I. M., Hadley, D. W., "An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers", *John Wiley & Sons*, Chichester, 51-57 (1993).
60. Osanaiye, G. J., Adewale, K. P., "Creep and recovery of EPDM elastomer using a modified sandwich rheometer", *Polym. Test.*, 20: 363 (2001).
61. Menard, K. P., "Dynamic Mechanical Analysis; A Practical Introduction", *Boca Raton*, 3: 39 (1999).
62. Lengalova, A., Pavlinek, V., Saha, P., Quadrat, O., Stejskal, J., "The Effect Of Dispersed Particle Size And Shape On The Electrorheological Behaviour of Suspensions", *Colloids And Surfaces*, 227: 1-8 (2003).

63. Lengalova, A., Pavlinek, V., Saha, P., Quadrat, O., Kitano, T., Stejskal, J., "Influence Of Particle Concentration On The Electrorheological Efficiency Of Polyaniline Suspensions", *European Polymer Journal*, 39: 641-645 (2003).
64. Sarıkaya, Ş., "Poliinden/Kalsiyum Karbonat Kompozitlerinin Sentezi, Karakterizasyonu ve Elektoreolojik Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara 45-80 (2007).
65. Noresson, V., Ohlson, N.G. and Nilsson M., "Design of electrorheological dampers by means of finite element analysis: theory and applications", *Materials and Design*, 23: 361-369 (2002).
66. Yeh, Z.F., Shih, Y.S., "Critical load, dynamic characteristics and parametric instability of electrorheological material-based adaptive beams", *Computers and Structures*, 83: 2162-2174 (2005).
67. Choi, S.B., Cheong, C.C., Jung, J.M. and Choi, Y.T., "Position control of an Valve-cylinder system via Neural Network controller", *Mechatronics*, 7: 37-52 (1997).
68. Dlodlo, Z.B., Brookfield, D.J., "Compensator-based positioncontrol of an Electrorheological actuator", *Mechatronics*, 9: 895-917 (1999).
69. Xu, Y., Qu, W.L. and Ko, J.M., "Seismic response control of frame structures Using magnetorheological/electrorheological dampers", *Earthquake Engng Structt. Dyn.*, 29:557-575 (2000).
70. Bar-Cohen, Y., "Biologically Inspired Robots as Artificial Inspectors", *Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials Symposium, NDE Conference*, San Diego, CA, 4702-4705 (2002).
71. Hao, Tian, "Electrorheological suspensions" *Advances in Colloid and Interface Science*, 97: 1-35 (2002).
72. Eraldemir, Ö., "Poliindol/polivinil asetat iletken kompozitlerinin sentezi ve karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara 33-107 (2005).
73. Hao, T., "Electrorheological Suspensions", *Advances In Colloid And Interface Science*, 97 (1-3): 1-35 29 (2002).
74. Rajasudha, G., Rajeswari, D., Lavanya, B., Saraswathi, R., Annapoorni, S., Mehra, N.C., "Colloidal dispersions of polyindole", *Colloid And Polymer Science*, 283 (5): 575-582 (2005).

75. Tsunogae Y., Majorous I., and Kennedy J.P., "Living Carbocationic Polymerization L1. Living Carbocationic Copolymerization Indene Random Copolymerization of Indene p- Methylstyrene 1. Demonstration of The Living and Random Copolymerization of Indene and p-Methylenestyrene", *Appl. Chem.*, 30: 253-267 (1993).
76. Uemure, T., Minagawa, K., Koyama, K., "Negative Er Effect in Polymeric Liquids" *Polym Prepr Jpn*, 208: 1286 (1994).
77. Liqin, X., Xiaopeng, Z., "Preparation of montmorillonite/titania nanocomposite and enhanced electrorheological activity", *Journal of Colloid and Interface Science*, 296: 131–140 (2006).
78. Arslan, Y., Unal, H.İ., Yilmaz, H., Sari B., "Electrorheological Properties Of Kaolinite, Polyindole, and Polyindole/Kaolinite Composite Suspensions", *Journal of Applied Polymer Science*, 104: 3484–3493 (2007).
79. Yin, J. B., Zhao, X. P., "Electrorheological Fluids Based on Glycerol-Activated Titania Gel Particles And Silicone Oil With High Yield Strength", *Journal of Colloid And Interface Science*, 257: 228-236 (2003).
80. Klingenberg, D. J., Zukoski C. F., "Studies on the steady-shear behavior of electrorheological suspensions", *Langmuir*, 6:15–24(1990).
81. Xu Y, Liang R., "Electrorheological Characterization of Zeolite Suspensions" *Journal of Rheolog* , 35:135 (1991).
82. Chiang, Y. C. and Jamieson A. M., "Electrorheological determination of the Leslie viscosity coefficient (f_2) of a main-chain liquid crystal polymer in a nematic solvent" *Rheol. Acta*, 38: 268–273 (1999).
83. Ying, Z. G., Zhu, Z. Q., "A Stochastic Optimal semiactive Control Strategy for ER/MR Dampers" *Journal of Sound Vib.*, 259 (1): 45-62 (2003).
84. Yavuz, M., Unal, H. İ., Yıldırım, Y., "Electrorheological Properties of Suspensions Prepared From Polystyrene-block-Polyisoprene Copolymer", *Turk Journal of Chemistry*, 25: 1-14 (2001).
85. Yılmaz, H., Ünal, H. İ., Yavuz, M., "An Investigation of Electrorheological Properties of Calcium Carbonate Suspensions in Silicone Oil", *Colloid Journal*, 67 (2): 268-273 (2005).
86. Yavuz, M., Ünal, H. İ., "Synthesis, Characterization, and Partial Hydrolysis of Polyisoprene-co-Poly(tert-butyl methacrylate) and Electrorheological Properties of Its Suspensions", *Journal of Applied Polymer Science*, 91: 1822-1833 (2004).

87. Yanju, L., Hejun, D., Dianfu, W., “ER Fluid Based on İnorganic Polymer Blend Particles And İts Adaptive Viscoelastic Properties”, *Colloid And Surfaces*, 189: 203-210 (2001).
88. Ünal, H. İ., Yavuz, M., Yılmaz, H., “Sepiyolit Süspansiyonların Elektoreolojik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14 (3): 999-1007 (2001).
89. Yavuz, M., Ünal, H. İ., “Electrorheological Properties of Suspensions Prepared from Poly(Li-tert-butyl methacrylate) Ionomer”, *Turk Journal of Chemistry*, 28: 587-601 (2004).
90. Choi, U. S., Ahn, B. G., “Electrorheology of Cellulose Phosphate Ester Suspension As A New Anhydrous ER Fluid”, *Colloids And Surfaces*, 168: 71-77 (2000).
91. Choi, U. S., Ko, Y. G., Kim J. Y., “Electrorheological Performance of Chitosan Phosphate Suspension”, *Polymer Journal*, 32: 501-507 (2000).
92. Yang, J., Ferreira, J.M.F., Weng, W. And Tang, Y., “Sol- Gel Preparation and Electrorheological Activity of SiO₂-TiO₂ Composite Powders”, *Journal of Colloid and Interface Science*, 195: 59-65 (1997).
93. Foul J.N. and Atten D., “Electrorheological Fluids Mechanism, properties, technology and applications” *Ed.R Roy World Scientific*, Singapore, 358-371 (1994).
94. Erişti, Ç., “Polianilin/kaolin iletken kompozitlerinin karakterizasyonu ER özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 30-55(2004).
95. Yin, J., Zhao, X., “Titanate Nano-Whisker Electrorheological Fluid With High Suspended Stability And ER Activity”*Nanotechnology* 17: 192–196 (2006).
96. Bezruk, V.I., Lazarev, A.N., Malow, M.A. and Usyarov, O.G., *Coll.J.*, 34: 142 (1972).
97. Tanaka, K., Oiwa, Y., Akiyama, R., Kubono A., “Shear Thinning and Electro-Rheological Effect for Neat Liquid Crystalline Polysiloxane in the Vicinity of Isotropic-Liquid Crystalline Phase Transition”, *Polymer Journal*, 30 (3): 171-176 (1998).
98. Otsubo, Y. and Edamure K., “Electric effects on the rheology of insulating oils in electrodes with flocked fabric”, *Rheol. Acta*, 38: 137-144 (1999).

99. Gerçek, B., Yavuz, M., Yilmaz, H., Sari B., Unal, H. I., “Comparison of electrorheological properties of some polyaniline derivatives”, *Colloids and Surfaces*, 299: 124–132(2007).
100. Akovalı, G., “Temel ve Uygulamalı Polimer”, *Tumka*, Ankara 300-315 (1984).
101. Genovese, A., Shanks R. A., “Time-Temperature Creep Behaviour of Poly(propylene) and Polar Ethylene Copolymer Blends”, *Macromol. Mater. Eng.*, 292: 184–196 (2007).
102. Acha, B. A., Reboredo, M. M., Marcovich N. E., “Creep and dynamic mechanical behavior of PP-Jute composites:Effect the interfacial adhesion”, *Composites*, 38: 1507-1516 (2007).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÖZ, Kübra
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 08.07.1983 Ankara
Medeni hali : Bekar
e-mail : kubra_x@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Kimya Bölümü	2005
Lise	50. Yıl lisesi	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005–2006	Gazi Üniversitesi/Kimya Bölümü	Öğrenci Asistanlığı
2006-[3 ay]	Almanya/Nurnberg	Lenordo Da Vinci Projesi ile iş deneyimi

Yabancı Dil

İngilizce