T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KİRAL SMEKTİK SIVI KRİSTALLERİN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ

İlkay KARA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Fizik Programı

Danışman

Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI

Eş Danışman

Arş. Gör. Dr. Ayşe Evrim BULGURCUOĞLU

Haziran, 2024

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KİRAL SMETRİK SIVI KRİSTALLERİN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ

İlkay KARA tarafından hazırlanan tez çalışması 12.06.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Fizik Programı **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI Yıldız Teknik Üniversitesi Danışman	Dr. Ayşe Evrim BULGURCUOĞLU Yıldız Teknik Üniversitesi Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Serap GÜNEŞ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Yeşim GÜRSEL, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Kiral Smektik Sıvı Kristallerin Dielektrik Özellikleri" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim

İlkay KARA

İmza

Bu çalışma, “Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü’nün FYL-2023-5676”” numaralı projesi ile desteklenmiştir.



Aileme

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitimim sürecinde deneyim ve bilgisi ile yoluma ışık olan, her zaman sevgisini ve desteğini eksik etmeyen çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI' ya çok teşekkür ederim.

Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünde geçirdiğim lisans ve yüksek lisans hayatım boyunca tanımış olduğum, değerli bilgi birikimlerini paylaşmış olan hocalarıma, ayrıca tez çalışmalarım sürecinde yardımını eksik etmeyen sevgili tez eş danışmanım Arş. Gör. Dr. Ayşe Evrim BULGURCUOĞLU hocama teşekkürü borç bilirim.

Lisansüstü eğitim sürecimde, laboratuvar çalışmalarımızı beraber gerçekleştirdiğimiz değerli arkadaşlarım İrem ÇAKIR ve Dilek ÖZÜKANAR 'a teşekkür ederim.

Son olarak desteğini hiç eksik etmeyen, her daim bana inanan, bu süreçte en büyük destekçim sevgili Anneme ve Aileme teşekkür ederim.

İlkay KARA

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii
KISALTMA LİSTESİ x
ŞEKİL LİSTESİ xi
TABLO LİSTESİ xiv
ÖZET xv
ABSTRACT xvi
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 6
1.3 Hipotez 6
2 SIVI KRİSTALLER 8
2.1 Sıvı Kristallerin Tarihçesi 8
2.2 Genel Bilgiler 9
2.2.1 Sıvı Kristallerin Uygulama Alanları 11
2.3 Sıvı kristallerin sınıflandırılması 12
2.3.1 Termotropik Sıvı Kristaller 13
2.3.2 Liyotropik Sıvı Kristaller 13
2.3.3 Amfotropik Sıvı Kristaller 13
2.4 Sıvı Kristallerin Molekül Geometrileri ve Sınıflandırılması 14
2.4.1 Kalamatik Sıvı Kristaller 14
2.4.2 Nematik Mezofaz 14
2.4.3 Smektik Mezofaz 16
2.4.4 Diskotik Sıvı Kristaller 20
2.4.5 Muz Şekilli (Bent Core) Sıvı Kristaller 20
2.5 Sıvı Kristallerin Fiziksel Özellikleri 21
2.5.1 Optik Özellikleri 22
2.5.2 Manyetik ve Elektriksel Özellikleri 22
2.5.3 Dielektrik Özellikleri 23

2.6 Sıvı Kristallere Ait Tekstürler 23
3 DİELEKTRİK ÖZELLİKLER **24**
3.1 Dielektrik Sabiti 24
3.2 Kutuplanma (Polarizasyon) 26
3.2.1 Kutuplanma Çeşitleri 28
3.3 Kompleks Dielektrik Sabiti 30
3.4 Debye Modeli 34
3.5 Cole-Cole Modeli 34
4 MATERYALLER VE YÖNTEMLER **36**
4.1 Karakterize Edilen Sıvı Kristaller 36
4.2 Kullanılan Cihazlar 36
4.2.1 Polarizasyon Mikroskobu (PM) 37
4.2.2 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) 37
4.2.3 Dielektrik Spektroskopisi Tekniği (DST) 38
4.3 Sıvı Kristal Hücrenin Hazırlanması ve Deney Düzeneği 39
4.4 Deney Düzeneği 40
5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR **41**
5.1 LC1 ve LC2 Bileşiklerinin Mesomorfik Özellikleri 41
5.1.1 LC1 Sıvı Kristal Bileşiği 41
5.1.2 LC2 Sıvı Kristal Bileşiği 42
5.2 LC1 ve LC2 Sıvı Kristallerinin Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi 45
6 SONUÇ **54**
KAYNAKÇA **55**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **61**

SİMGE LİSTESİ

ω	Açısal frekans
I	Akım
E_a	Aktivasyon enerjisi
σ_{AC}	Alternatik akım iletkenliği
α	Atomik kutuplanabilirliktir
ε_r	Bağıl geçirgenlik
n	Birim vektör
k_b	Boltzman sabiti
ε_0	Boş uzayın elektriksel geçirgenliği
σ_{DC}	Doğru akım iletkenliği
ε_s	Düşük frekanslarda dielektrik sabiti
P	Dipol moment vektörü
R	Direnç
E	Elektrik alan vektörü
D	Elektriksel akı yoğunluğu
χ	Elektriksel duyarlılık
V	Elektriksel potansiyel
s	İletkenlik üssel yasa katsayısı
Iso	İzotropik faz
C	Kapasitans
δ	Kayıp açı
SmA*	Kiral Smektik A fazı
SmB*	Kiral Smektik B fazı
SmC*	Kiral Smektik C fazı
N*	Kiral Nematik faz
ε*	Kompleks dielektrik sabiti
ε'	Kompleks dielektrik sabitinin reel kısmı
ε''	Kompleks dielektrik sabitinin sanal kısmı
K	Kristal faz
P	Kutuplanma vektörü
F	Kuvvet vektörü
f	Lineer frekans

Q	Yük
ε	Ortamın dielektrik geçirgenliği
SmA	Smektik A fazı
SmB	Smektik B fazı
SmC	Smektik C fazı
T	Sıcaklık
$\boldsymbol{\tau}$	Tork vektörü
ε_∞	Yüksek frekanslarda dielektrik sabiti
σ	Yüzey yük yoğunluğu

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif akım
DC	Doğru akım
DSC	Diferansiyel tarama kalorimetresi
DS	Dielektrik spektrostopisi
EPA	Genişletilmiş çift yaklaşımı (Extended pair approximation)
CBH	İlişkili bariyer boşaltma mekanizması (Correlated barrier hoping mechanism)
ITO	İndiyum kalay oksit (İndiyum-tin-oxide)
Cr	Kristal
QMT	Kuantum tünelleme modeli (Quantum mechanical tunneling model)
PM	Polarizasyon mikroskobu
NCL	Sabit kayıp modeli (Nearly constant loss model)
LC	Sıvı kristal
LCD	Sıvı kristal ekran
SLPL	Süper lineer güç yasası (Super linear power law)
3B	3-boyutlu
LC1	((S)-4-(3,7-Dimetiloktiloksi) fenil 6-(4-dodesiloksifenil) piridin 3-karboksilat)
LC2	(S)-5-Oktiloksi-2-[[[4-(2-metilbütoksi)fenil]imino]metil]fenol

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2. 1 Kolesteril benzoat molekülü ve geçiş sıcaklıkları……..……**8**
Şekil 2.2 Sıvı kristal bir maddenin faz geçişleri ……..…….....**10**
Şekil 2.3 Bazı sıvı kristallere ait tekstür örnekleri.……....**10**
Şekil 2.4 Sıvı kristallerin sınıflandırılması ……...……...**12**
Şekil 2.5 Liyotropik sıvı kristal tekstürü …… **13**
Şekil 2.6 Kalamitik sıvı kristallerinin şematik gösterimi……...**14**
Şekil 2.7 Örnek bir kalamitik molekül ……..**14**
Şekil 2.8 Nematik mezofazda vektör boyunda moleküler yönelimsel düzen …..**15**
Şekil 2.9 Nematik mezofaz tekstürü……..**15**
Şekil 2.10 Kiral nematiz faz tekstür ...……...**16**
Şekil 2.11 Kiral nematik mezofaz ve adım uzunluğu……**16**
Şekil 2.12 a) Smektik A moleküler düzeni b) Smektik A polarizasyon mikraskobu altındaki görüntüsü ……**17**
Şekil 2.13 Smektik B mezofaz tekstür……...……**17**
Şekil 2.14 a) Smektik C moleküler düzen b) Smektik C mezofaz tekstür…….**18**
Şekil 2.15 Kiral smektik mezofazında moleküler düzen ……. **18**
Şekil 2.16 Kiral smektik C mezofazın tekstürü ……...**19**
Şekil 2.17 Kiral Smektik C için ferroeletrik ve antiferroelektrik faz düzeni…….**19**
Şekil 2.18 Diskotik sıvı kristalin molekül yapısı ……..**20**
Şekil 2.19 Kolumnar mesofaz tekstürü……..**20**
Şekil 2.20 Vorländer'ın sentezlediği muz şekilli sıvı kristalin genel yapısı ……**21**
Şekil 2.21 Sıvı kristal moleküllerin elektrik alan boyunca yönelmesi ……. **21**
Şekil 2.22 Sıvı kristal ortamdaki polarize olmayan ışığın davranışı…….**22**
Şekil 3.1 Dielektriğe sahip bir sığaç ve E çizgileri……...……**25**
Şekil 3.2 Kutuplanmanın şematik gösterimi……..**26**

Şekil 3.3 Elektrik dipolü ……...**26**

Şekil 3.4 Elektrik alan altında dipol için uygulanan kuvvetler ……..…….. **27**

Şekil 3.5 Dielektrik kutuplanmanın frekansa bağlı değişim ……**28**

Şekil 3.6 Dielektrik kutuplanmanın zamana bağlı değişim...……**29**

Şekil 3.7 Yüzey alanı A ,plakalar arasındaki mesafe d olan ve içerisinde yalıtkan bulunan parallel plakalı kondansatör ……..**32**

Şekil 3.8 Dielektrik parametreleri için debye eğrisi……..**34**

Şekil 3.9 Dielektrikler için cole-cole eğrisi ……..**35**

Şekil 4.1 Sıvı kristal malzemelerin molekül yapısı……...**36**

Şekil 4.2 Polarizasyon mikroskobu.……...**37**

Şekil 4.3 Diferansiyel termal analiz sisteminin şematik diyagram ……...**38**

Şekil 4.4 Instec, Inc şirketinden alınan özel sandviç hücre tabakaları ...……...**39**

Şekil 4.5 Kohler bankası ile sıvı kristallerin hücrelere doldurulması ……..**39**

Şekil 4.6 Deney düzeneği ……**40**

Şekil 5.1 LC1 için Isıtma ve Soğutma Sırasında Entalpi DSC termogramları ….**41**

Şekil 5.2 LC1 soğutma sırasında 90 ℃ de SmC* faz tekstürü ……**42**

Şekil 5.3 LC2 ‘nin ısıtma (A) ve soğutma (B) aşamasındaki DSC termogramları…….**43**

Şekil 5.4 LC2’nin soğutma esnasında sıcaklığa bağlı polarizasyon mikroskobu (PM) tekstürleri ……...…… **44**

Şekil 5.5 LC1 ‘in dielektrik sabitinin gerçek kısmının (ε′) açısal frekansa bağlı ölçümleri……**45**

Şekil 5.6 LC1’in dielektrik sabitinin sanal kısmının (ε″) açısal frekansa bağlı ölçümleri……**46**

Şekil 5.7 LC1 ‘in farklı sıcaklıklarda Cole-Cole eğrileri……...**47**

Şekil 5.8 LC2’nin dielektrik sabitinin gerçek kısmının (ε′) açısal frekansa göre değişimi……..**48**

Şekil 5.9 LC2'nin dielektrik sabitinin reel kısmının (ε′) sıcaklık ve açısal frekansa göre 3 boyutta değişimi …….**49**

Şekil 5.10 LC2'nin dielektrik sabitinin sanal kısmının (ε") açısal frekansa göre değişimi……..**50**

Şekil 5.11 LC2'nin Cole-Cole eğrileri……...**51**

Şekil 5.12 LC2'nin $\ln \sigma_{AC}$ - $\ln \omega$ grafiği ……**52**

Şekil 5.13 LC2'nin $\ln \sigma_{AC}$ - $1000/T$ grafiği ……..**53**

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.2 İletkenlik mekanizmaları……...**33**
Tablo 5.1 LC1 için faz geçiş sıcaklıkları ve entalpi değerleri...……....**41**
Tablo 5.2 LC2 için faz geçiş sıcaklıkları ve entalpi değerleri...……....**42**

ÖZET

Kiral Smektik Sıvı Kristallerin Dielektrik Özellikleri

İlkay KARA

Fizik Anabilim Dalı

Fizik Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI

Eş-Danışman: Arş. Gör. Dr. Ayşe Evrim BULGURCUOĞLU

Maddenin en önemli hallerinden biri olan sıvı kristaller katı ile sıvı arasında bir formdadır. Sıvılar gibi akışkan özelliklere sahiptirler ve katılar gibi molekülleri düzenli formdadır. Ayrıca çok çeşitli teknolojik uygulamalarda da kullanılmıştır. Kiral sıvı kristaller son araştırmalarda daha fazla ilgi görmektedir. Bu çalışmada LC1 ve LC2 kodlu iki kiral sıvı kristalin dielektrik özellikleri araştırıldı. Burada LC1 ve LC2 SmC* mezofazı sergilemektedir. LC1 ve LC2 'nin sıcaklığa bağlı dielektrik özellikleri Dielektrik Spektroskopi (DS) yöntemiyle incelenmiştir. Faz geçiş sıcaklıkları, LC1 ve LC2' nin dielektrik sabitinin gerçek ve sanal kısımları hesaplandı. Dielektrik Spektroskopi yöntemi, sıvı kristalin faz geçiş sıcaklıklarının karakterize edildiği Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) ile yapılan ölçümleri de doğrulamıştır.

Anahtar Kelimeler: Sıvı Kristaller, Dielektrik Spektroskopi, Faz geçişi.

ABSTRACT

Dielectric Properties of Chiral Smectic Liquid Crystals

İlkay KARA

Department of Physics

Master of Science

Supervisor: Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI

Co-supervisor: Res. Assist. Dr. Ayşe Evrim BULGURCUOĞLU

Liquid crystals, one of the most important states of matter, are in a form between solid and liquid. They have fluid properties like liquids and their molecules are in regular form like solids. They have also been used in a wide variety of technological applications. Chiral liquid crystals are attracting more attention in recent research. In this study, the dielectric properties of two chiral liquid crystals coded LC1 and LC2 were investigated. Here, LC1 and LC2 exhibit the SmC* mesophase. Temperature dependent dielectric properties of LC1 and LC2 were examined by Dielectric Spectroscopy (DS) method. The phase transition temperatures, the real and imaginary parts of the dielectric constant of LC1 and LC2 were calculated. The Dielectric Spectroscopy method has also confirmed measurements made by Differential Scanning Calorimetry (DSC), in which the phase transition temperatures of the liquid crystal are characterized.

Keywords: Liquid Crystals, Dielectric Spectroscopy, Phase Transition.

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Maddenin eşsiz formu olan sıvı kristaller 1888 yılında Friedrich Reinitzer tarafından ilk kez keşfedilmiştir. Uygulanma alanları oldukça geniş olan sıvı kristaller, ileri teknolojik malzemelerin gelişimi için oldukça önemlidir. Sıvı kristallerin ticaretleştirilmesi ve yaygın kullanılması ile günümüzde daha çok karşımıza elektro-optik cihazlarda, ekran teknolojisinde çıkmaktadır. 1991 yılında Pierre-Gilles de Gennes sıvı kristal moleküller üzerine yaptığı araştırmalar ve çalışmalar sonucunda Nobel ödülü almıştır [1].

Katı maddenin moleküler düzenin yanında sıvılar gibi akışkanlık özellik gösterebilen maddenin eşsiz sınıfı sıvı kristaller olarak isimlendirilir [2]. Sıvı kristaller, kristal katı ile amorf sıvı arasında bir formdur. Burada sıvı kristal molekülleri sıvının sahip olduğu fiziksel özelliklerin yanında bir katı kristal düzenine de aynı anda sahip olabilmektedir. Sıvı kristal molekülleri anizotropik özellik göstermektedir, yönelimini elektik alan,manyetik alan ve sıcaklık gibi dış uyarıcılar değiştirebilir. Sıvı kristaller (LC) sahip oldukları bu eşsiz özellik sayesinde dikkat çekmektedir bu yüzden günümüz de başta ekran teknolojisi olmak üzere opsiyonel ileri malzeme teknolojisi çalışmalarında yaygın kullanılmaktadır [3- 4-5].

Sıvı kristallerin moleküllerinin yönelimine göre mezofaz oluşmaktadır. Yönelimindeki bu değişim ile çeşitli mezofazlar sergilemektedir. Bu değişim tabi ki moleküler yapıyı etkilemektedir. Dış uyarıcılarda bu değişimi doğrudan etkiler örneğin bazı sıvı kristaller sıcaklık etkisi ile LC hale geçerken bazısı sahip olduğu moleküler yapıdan dolayı farklı çözücü ve çözeltilerde bu forma sahip olmaktadır [6].

Sıvı kristaller genellikle iki gruba termotropik ve liyotropik olarak ayrılmaktadır. Bunun dışında moleküler yapısında kiralite mezofaz gösteren sıvı kristallerde vardır. Bunlar; kiral smetrik , kiral nematik(Kolesterik) ve kiral diskotik olarak üç sınıfta incelenir [7].

Sıvı kristal moleküllerde kiralite gözlenmesi sıvı kristal araştırmaları için yep yeni bir ufuk açmıştır. Kiral sıvı kristallerin mezofazları heliks şeklindedir. 1966 yılında Niori ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmalarda akiral muz şekilli sıvı kristallerde polar "switching" özelliğe sahip olduğunu keşfetmişlerdir [8].

Sıvı kristallerde kiral moleküle sahip fazlar da * işareti bulunmaktadır. Örneğin kiral smektik C, SmC* şeklinde gösterilir. Sıvı kristallerin Kiral smektik fazlarıda molekül düzenine göre kendi içinde ayrılmaktadır, bu da sahip oldukları özelliklerde farklılık oluşturmaktadır. Örnek verilmek istenilirse, kiral mezofazda genellikle lineer elektro-optiksel özellik bulunmasına rağmen SmA fazında bu duruma karşılaşılmamıştır. Sıvı kristallerin kiral mezofazında moleküller eğimli faz göstermektedir buna en temel örnek kiral smektik C (SmC*) fazıdır. Mezofazın kiraliteye sahip olması smektik yapıda bozulmaya sebep olmakta eğim yönünde tabaka normali ya da tabakadan tabakaya doğru hareket eder. Sıvı kristallerin kiral smektik fazında (SmC*) ferroelektrik özellik karşımıza çıkmaktadır. Ferroelektriklik günümüz teknolojik sistemleri için bir temel oluşturmaktadır bu sayede SmC* bu teknolojik araştırmalarda yaygın kullanılmaktadır [9].

Kiral smektik sıvı kristallerin hem teknolojik çalışmalar hem de bilimsel faaliyetler için araştırılması oldukça önemlidir, yakın zamanda gerçekleşen bir çalışmada SmC* de farklı mesogenler keşfedilmiştir. Bu fazlarda ferroelektrik, antiferroelektik sıvı kristaller olarak isimlendirilmiştir. SmC* fazında ferroelektriklik özellik sahip olunduğundan bu mezofazda yönlendirilmede tabakalar kendiliğinden polarize olduğu gözlenmiştir ve eğim açısı sağ ve sol tabakalarda eşittir. Sıvı kristaller yoğun elektrik alana maruz kalındığında antiferroelektrik faz ferroelektrik faza dönüşmektedir [10].

Ferroelektik sıvı kristaller kendiliğinden polarize olma özelliği sayesinde optoelektronik çalışmalarının öncüsüdür [11].

1970 yılında bazı fizikçi ve kimyacılar ferroelektrikliğin molekül düzeninden dolayı bazı katılarda gözlenebileceğini sıvılarda molekül düzeninin dağınık olduğu için gözlenmeyeceğini düşünüyorlardı. Bu düşünceyi Fizikçi Robert Meyer LC ler için araştırmış ve kiral nematik LC fazında çalışmıştır. Burada kiral moleküllerde inversiyon simetrisi olmadığı için sentrosimetrik olmayan yapıda

moleküllerin eğimi sayesinde ferroelektriklik olabilir düşüncesi ile çalışmalar yapmıştır [12].

SmC fazı sıvı kristallerin keşfedilmesinden sonra araştırılması yapılırken kiral smektik sıvı kristaller için 1975 yılına kadar çalışmalar hiç yoktur. Bu tarihten sonra Meyer ve organik kimyacı arkadaşları kiral yapının gözlemlendiği SmC sıvı kristal fazısını sentezleyip ilk ferroelektrik özellik gösteren yapıyı sentezlemişlerdir. Sentezlenen bu yapı SmC fazına benzemenin yanında asimetrik karbon atomuda bulundurmaktadır. Bu çalışma sonucunda ferroelektrik bileşik sentezi yapılmıştır. Bu çalışmalardan itiberen günümüzde 50.000 üzerinde sentezlenen ferroelektrik sıvı kristaller vardır [12].

Fizikçi Meyer'in gerçekleştirdiği çalışmalar sonucunda LC ler sıvı kristal displaylerin (LCD)lerin temel çalışmaları için uygun olduğu gözlemlenmiştir.

Sıvı kristaller, ferroelektriklik özelliğinin keşfedilmesi ardından gerek ekran teknolojisi başta olmak üzere birçok endüstriyel uygulamalar için alternatif bir araştırma alanı olmuştur. Ferroelektriklik sıvı kristallerin kiral moleküllerinden (SmC*) fazında keşfedilmiştir. Bu keşif ardından sıvı kristallerin ferroelektrik özellik göstermesinin ana sebebinin kiraliteden dolayı olduğu kanısına varılmasına rağmen ferroelektriklik özellik göstermesinin temelinin (SmC*) nin polar düzenin sonucunda olduğu anlaşılmıştır [13].

Sıvı kristaller birçok çeşite ayrılmaktadır gerek molekül yapısı gerek uygulanan dış etkenlere vermiş olduğu davranışa göre bu çeşitliği doğru karakterize etmek bu alanda yapılan çalışmalar için oldukça önemlidir. Sıvı kristallerin fiziksel özelliklerini karakterize etmek için dielektriklik spektrokopi yöntemi kullanılmaktadır, bu sayede hassas ölçümler rahatlıkla yapılmaktadır. Sıvı kristaller için üllkemizde dielektrik spektroskopi ile yapılan çalışmalar şu şekildedir:

Okutan, Yakuphanoğlu, Durmuş, Köysal ve Ahsen (2006) çalışmasında katkılamış oldukları sıvı kristallerin anizotropilerini dielektrik yöntem kullanarak araştırmışlardır [14].

Pandey, Dabrowski ve Dhar'ın (2006) çalışmasında, belirli frekans değerleri içerisinde dielektrik spektroskopisi ile antiferroelektrik malzemeyi incelemiştir [15].

Aldanma (2007) katkılanarak hazırlanmış sıvı kristallerin dielektriklik özelliklerini dielektrik spektroskopi yöntemi ile incelemiştir [16].

Çoşkun(2007) yapmış olduğu tez çalışmasında katkılandırmış polimerler sıvı kristallerin faz geçişleri ve elektro-optik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmada dielektrik spektroskopi metodu kullanılarak dielektriklik özellikleri araştırılmıştır [17].

Ate (2010) tez çalışmasında birkaç nematik sıvı kristallerin dielektriklik, kapasitans ve iletkenlik durumları incelemiş. Bu incemeler sonucunda kapasitans değerinin ve iletkenlik değerinin frekans ile ilişkisi belirlenmiş. Çalışmalar sonucunda kapasitans değerinin , frekansın artması ile azaldığını iletkenlik değerinin ise frekansın artması arttığı gözlemlenmiş. Ayrıca belirli voltaj uygulamalında moleküllerin yönelimleri hakkında bilgi edinilmiştir [18].

Kumaria, Das, Dhar ve Dabrowski (2012) çalışmalarında dielektrik spektroskopisi yöntemi kullanarak belirli bir sıcaklıkta antiferroelektrik özellik gösteren bir sıvı kristalin fiziksel özelliklerini üzerine çalışmıştır [19].

Önsal (2019) tez çalışmasında farklı konsantrasyonlarda sıvı kristallerin kompozit yapılarının dielektriklik , opto-elektronik , termal ve morfolojik özelliklerini araştırmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki katkılı sıvı kristal temelli cihaz uygulamarı için etkin bir durum oluşturduğu ve teknolojik amaçlar için kullanılabilirliği görülmüştür [20].

Ekinci (2014) bu tez çalışmasında sıvı kristallerin genel özellikleri, smektik, nematik ve liyotropik kristallerin sıvı kristal gösterimlerini, molekül yapılarını, kimyasal ve fiziksel yapıları araştırılmıştır. Uygulama alanlarından biri olan LCD teknolojisi incelenmiştir [21].

Yıldız (2019) doktora tez çalışmasında sıvı kristallerin faz geçişlerini dielektrik spektroskobi yöntemi ile incelenmiş, faz geçişleri sırasında sıcaklığa bağlı dielektrik ölçümleri gerçekleştirilmiş. Bu çalışmada Smektik A ve Smektik C fazına sahip sıvı kristaller ile muz şekilli geometriye sahip sıvı kristallerin faz

geçiş sıcaklıkları tayin edilmiş ve dielektrik spektroskopi yöntemi ile dielektrik ölçümleri alınmıştır [22].

Sıvı kristaller ile ilgili son yıllarda dikkat çeken çalışmalar şu şekidedir:

Beken (2018) yapmış olduğu çalışmasında sıvı kristallerin faz geçişleri (DTA) yöntemi ile incelenmiş ve faz geçişlerinin belirlenmesi için yapay sinir ağlarını kullanarak faz geçişleri için yapılan çalışmalar için fayda sağladığı görülmüştür [23].

Kemiklioğlu, Ülker (2020) yapılan çalışmasında polen tespiti kolesterik sıvı kristal; nematik sıvı kristal ve kiral maddelerin farklı bileşimleri kullanılarak sıvı kristal numuneler hazırlanmıştır. Kolesterik sıvı kristallerin optik özelliği kullanılarak , polen yoğunluğuna bağlı olarak renk değişimini saptayan sensör geliştirilmiştir [24].

Sıvı kristaller için kiralite kuşkusuz en önemli özelliktir. Sağlamış olduğu bu eşsiz özellik ile kiral mezofaz oldukça dikkat çekmiş ve güncel çalışmalarda, kiral sıvı kristaller literatüre bakıldığında birçok çalışmaya konu olduğu görülmektedir. Özellikle Smektik fazın burada ön plana çıktığı gözlemlenmiştir. Kiral sıvı kristaller için yapılan literatür çalışmasını şu şekide özetleyebiliriz:

1994 yılında San Jose State Üniversitesindeki araştırmacılar tarafından yayınlanan makalede, optik , elektrokonvektif nematik ve orantısız smektik A solitonları , bazı nematikler dönen manyetik alanda , Smektik A ve Smektik C* sıvı kristallerindeki ferroelektrik çevrin yapısındaki soliton modelleri araştırılmıştır [25].

Hemine, Daoudi , Legrand , Kaaouachi , Nafidi, Ismaili, Isaert ve Nguyen (2010) çalışmasında Kiral Smektik C fazını gösteren üç sıvı kristal malzemenin elektro-optik ve dinamik özelliklerini incelemişlerdir [26].

Karaağaç (2012) tez çalışmasında yeni kiral kalamitik moleküller sentezlemiştir.Yeni bileşiklerin mezomorfik özelliklerini diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC), polarizasyon mikroskobu kullanarak elektro-optik incelemeler yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda sentezlenen moleküllerden ortaya çıkan smektik mesogeni çeşitli sıcaklıklarda incelendiğinde erime ve berraklaşma noktalarının azaldığı görülmüştür [27].

Avcı (2014) ferroelektik sıvı kristal karışımlarının (smektik A- smektik C*) faz geçişi sırasında düzen parametrelesi eğim açısı ve kutuplanma sıcaklığa bağlı olarak incelenmiş . Eğim açısı ve kutuplanmanın sıcaklığa bağlılıkları incelenmiş ve literatüre kazandırılmıştır [28].

Erdoğan (2021) kiral bir grubun kalamatik molekül yapısına girişinin ve uç zincir uzunluğundaki değişiminin mesomorfizm üzerindeki etkilerini incelemiştir. Belirlenen bileşikleri spektroskopik yöntemlerle araştırılmıştır burada bileşiklerin dielektriklik özellikleri çeşitli karakterizasyon yöntemi ile incelenmiş bunun sonucunda, kiralitenin sentezlenen sıvı kristaller için oldukça önemli olduğunu , enantiyotropik kiral smektik C fazın SmC* oluşturduğu gözlemlenmiştir [29].

Kılıç, Can, Avcı, Mamuk (2023) yayınlamış oldukları çalışmasında ilk defa kullanılan bir yöntem olan tek – iğneli elektroeğirme yöntemi kullanılarak kiral katkılı kolesterik sıvı kristaller ve polimer kompozit lifler üretilmiştir [30].

1.2 Tezin Amacı

Sıvı kristaller ara fazda olan kimyasal maddelerdir. Faz geçişi sırasında sıvı kristal mezofazın kimyasal ve fiziksel özellikleri incelenirse faz geçiş sıcaklıkları ve bu değerlerde göstermiş olduğu mezofaza ait dielektrik parametrelerinin belirlenmesi sıvı kristallerin teknolojide kullanılması açısından çok önemlidir. Bu tez çalışmasında sentezlenen LC1 ve LC2 sıvı kristallerin faz geçiş sıcaklıkları polarizasyon mikroskopu PM ve DSC karakterizasyon yöntemine alternatif olarak, sıvı kristallerin sahip olduğu dielektrik parametreleri ve bu parametrelerin sıcaklıkla ani değiştiği noktalardan faz geçiş sıcaklıkları Dielektrik Spektroskopi yöntemi ile de incelenebileceği amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Bu çalışmada organik kimya grubumuz tarafından sentezlenmiş olan 2 farklı sıvı kristalin (LC1 ve LC2) dielektrik özellikleri karşılaştırılarak detaylı çalışılması planlanmıştır. LC1 ve LC2 için farklı sıcaklık aralıklarında dielektrik özelliklerindeki ani değişimlerin olduğu sıcaklıkların, faz geçiş sıcaklıkları analizlerinde sıklıkla kullanılan PM ve DSC' den elde edilen faz geçişleriyle

benzer olacağı ve DS yönteminin de PM ve DSC'ye alternatif bir metod olarak literatüre katkı sağlayacağı düşünülmüştür.

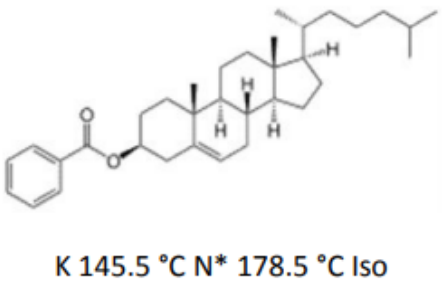
2
SIVI KRİSTALLER

2.1 Sıvı Kristallerin Tarihçesi

Maddenin halleri katı, sıvı ve gaz olarak üçe ayrılmaktadır, bu kanının aksi olan durum yaklaşık 150 yıl öncesinde sıvı kristallerin keşfi ile değişmiştir. 19. Yüzyıl ortalarında Vichow, Mettenheimer ve Valentin çalışmalarında, sinir lifinin suyun içine bırakıldığı zaman akışkan bir madde olduğunu ve bu suyun polarize ışık ile aydınlatıldığını ve ilginç bir davranış sergilediğini görmüşlerdir. Bu çalışma ile madde için yeni bir faz keşfedildiğini kavrayamadılar fakat sıvı kristal fazı ilk gözlemleyen kişiler oldular [31-32].

1877 yılında Otto Lehman tarafından faz geçilerini saptamak amacı ile bir çok malzemeyi polarizasyon mikroskobu kullanarak yürüttüğü çalışmasında malzemenin soğutulma aşamasında seffaf sıvı halden bulanık sıvı hale geçtiğini ardından malzemenin kristalleştiğini gözlemledi, yapmış olduğu bu gözlemi yorumlarken faz geçişi sırasında bir kusur olduğunu düşündü [21].

F.R Reinitzer 1888 yılında ise çalışmasında kolesteril benzoat isimli organik madde (Şekil 2.1) de 145 ^{o}C'de fazın katı halden bulanık bir sıvıya 178 ^{o}C'de ise berrak sıvı hale geçtiğini gözlemledi, ardından incelemiş olduğu bu bulanık sıvının yeni bir faz olduğunu keşfeden ilk kişi oldu [21].



Şekil 2. 1 Kolesteril benzoat molekülü ve geçiş sıcaklıkları [33]

1890 yılında Gatterman ve Ritschke p-azoxyanisole ve pazoxyphenetole isimli maddelerdede aynı davranış sergilediğini ve ikili erime noktasına sahip olduklarını keşfettiler [21].

İlerleyen zamanlarda bulanık görünümlü ara fazın, kristale benzer molekülsel yapıya sahip olduğu Alman fizikçi O. Lehmann tarafından açıklanmıştır. Bu bulanık sıvılarda oldukça önemli karakterislik durumlar olduğu görülmüştür. Burada diğer sıvılar gibi akışkanlıkların sahip olduğu tüm özelliklerin haricinde katı kristaller gibi polarize ışıkta çift kırılma özelliğine sahip olduğu görülmüştür [34].

1922 yılında sıvı kristallerin, elektrik alan içerisinde yönelimini yürüttüğü çalışmalar sonucunda ilk kez gözlemleyen George Friedel tarafından sıvı kristaller moleküler yönelim düzenine göre sınıflandırma fikri ilk kez ortaya atılmıştır. Bu atılım ardından sıvı kristaller alanındaki çalışmaları arttırmıştır [34].

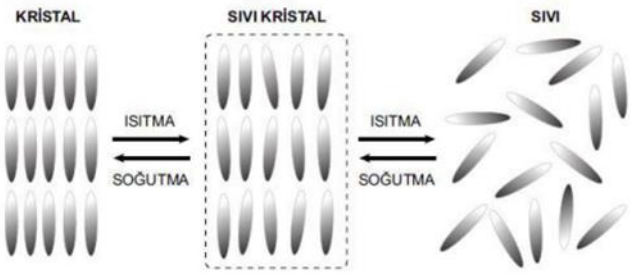
İkinci dünya savaşı ardından sıvı kristaller için ilgi daha çok artmış ve birçok bilim insanı tarafından sahip olukları eşsiz özellikleri dikkat çekiçi bulunmuştur.

1950 yıllarında çalışmalar yürüten isimler ABD'de Brown, Sovyetler Birliği'nde Chistiakoff ve İngiltere'de Gray ve Frank olmuştur, yapmış oldukları çalışmalar ile sıvı kristaller bu dönemde adından oldukça bahsettirmiştir. 1960 yılında W. Maier ve A. Saupe tarafından ilk kez sıvı kristallerin mikroskobik teorisini formülleştirilmiştir [35].

1958 yılında kimyacı Glenn Brown, "Chemical Reviews" dergisinde sıvı kristaller üzerine makale yayınlamış ve Kent State Üniversitesi'nde sıvı kristal enstitüsü kurmuştur [36].

2.2 Genel Bilgiler

Keşfedilmesi 150 yıl öncesine dayanan maddenin eşsiz formu sıvı kristaller, günümüz bilimsel çalışmalarda önemli bir rol oynamaktadır. Sıvı kristaller, sıvı ve katı arasında olan bir formdur (Şekil 2.2). Maddenin katı fazında moleküller düzenli ve yönelimlidir, sıvı fazda ise moleküller rasgele dağılmış düzensiz, yönelimsiz ve akışkandır.

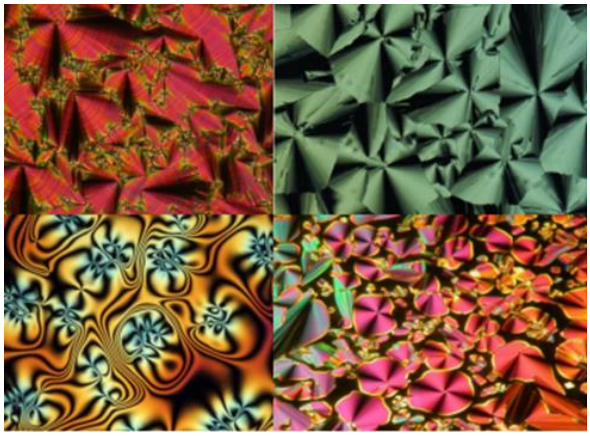


Şekil 2.2 Sıvı kristal bir maddenin faz geçişleri [22]

Sıvı kristaller dış uyarıcılardan etkilenmektedir buna sıcaklık, elektrik alan ve manyetik alan örnek verilebilinir. Sıvı kristaller anizotropik özelliğe sahiptir böylece uygulanan dış etkenler tarafından moleküller yönlendirilebilinir.

Sıvı kristallerin başka bir faz gösterebilme durumlarına mesogen göstermiş olduğu bu faza ise mezofaz denir. Sıvı kristaller polimorfizm özellik göstermektedir, bu özellik sayesinde bir mezogende çeşitli mezofaz oluşmaktadır [37, 38].

Sıvı kristallerin bu mezofazlarının tanımlanması için polarizasyon mikroskobu altındaki sıcaklığa bağlı çıkan incelemelerde ortaya çıkan bulgular tekstür olarak isimlendirilir oluşan tekstürler (Şekil 2.3) sıvı kristallere ait karakterislik özeliklerini gösterir [39].



Şekil 2.3 Bazı sıvı kristallere ait tekstür örnekleri [40]

2.2.1 Sıvı Kristallerin Uygulama Alanları

Sıvı Kristallerin sahip olduğu benzersiz özellikler sayesinde, başta bilimsel çalışmalar olmak üzere, bir çok teknolojik gelişmelerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Elektrik alanın altında yönlendirme özelliğine sahip olan sıvı kristaller, dielektrik özellik gösterir ve elektrik akımını iletir. Sıvı kristal elektrik alan altında saydamlaşır ve ışığı geçirmez net bir görüntü oluşturur.

Elektrik alan içerisinde sıvı kristaller renk değiştirme özelliğini kazanır, bu özelliklerinden dolayı birçok alanda yaygın kullanılır. Sıvı kristallerin kazanmış olduğu bu durum akıllı pencerelerde saydam ve mat görünüm sağlamaktadır. Ayrıca pil gösterge sistemlerinde renk değişim özelliği ile kullanımı da mevcuttur [41].

Sıvı kristal çeşitlerinden termotropik sıvı kristaller ısıya dayanıklılık ve renk değiştirme özelliğine sahiptir, bu durum termometrelerde yaygın kullanılmasını sağlar [41].

Elektrik alan ve manyetik alanda çift kırınım özelliği gösteren sıvı kristaller başta ekran teknolojisi olmak üzere (akıllı telefon ve bilgisayar ekranı) LCD ler, dijital göstergeler, fotoğraf makinesin de yaygınca kullanılır [41].

Sıvı kristaller kendi içerisinde molekül yapıları farklılıkları ile çeşitlere ayrılmaktadır. LC çeşitlerinden biri olan polimer yapılı sıvı kristaller güçlü moleküllerarası etkileşimler ile moleküllerin paralel bir şekilde konumlandırılması sağlanılarak elde eldilir. Kazanmış olduğu sertlik ile çelik yelek ve kask yapımında kullanılır [41].

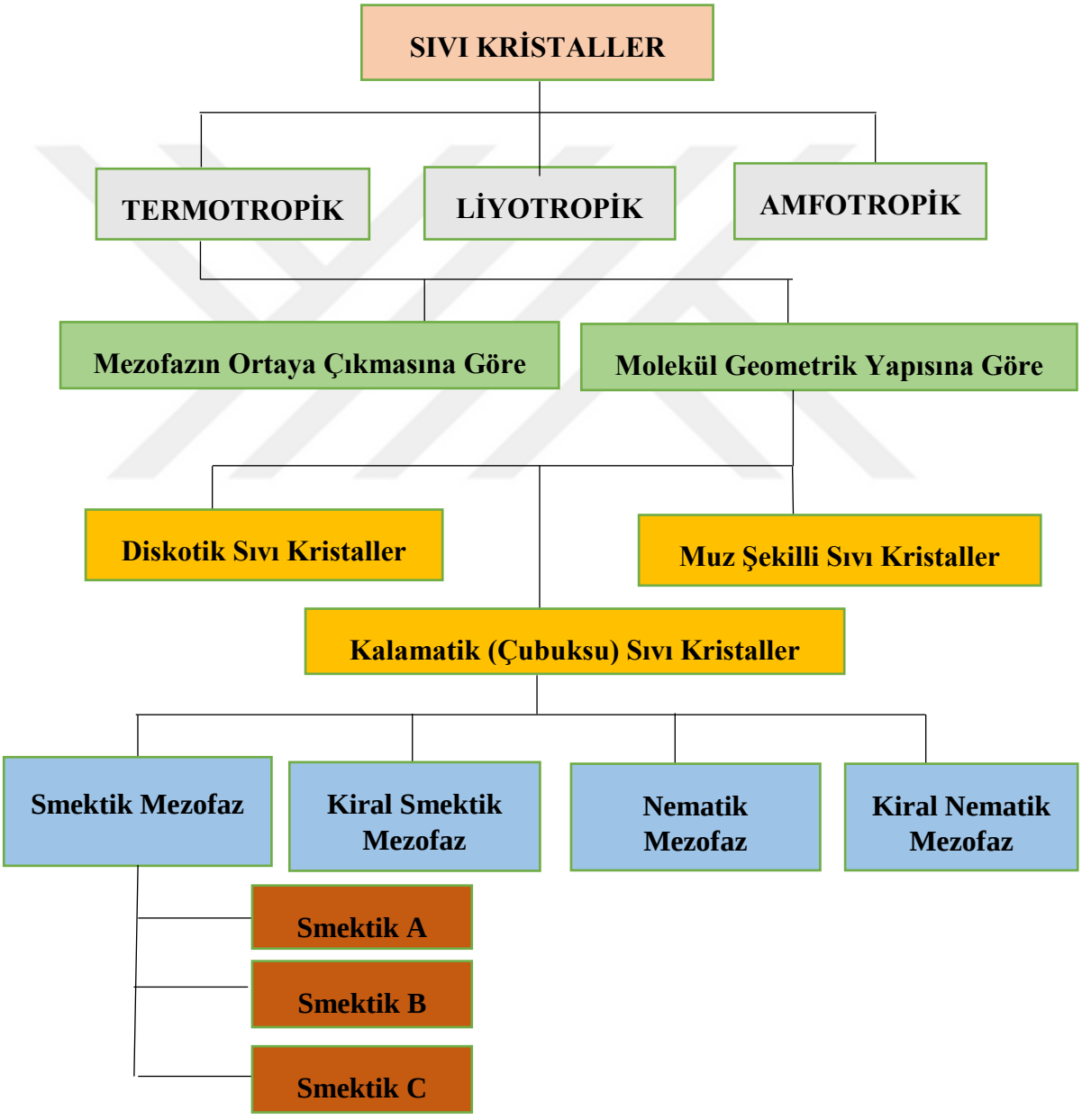
Sıvı kristaller multidisipliner çalışmaları sağlaması haricinde birçok farklı alanda önemli kullanım alanı doğurur. Sıvı kristaller tıpta yaygın şekilde kullanılmaktadır bu kullanımdan biri şu şekidedir:

Liyotropik sıvı kristaller kullanılarak ilaç kaplaması gerçekleştirilip, hasta tarafından ilaç kullanımı ardından LC zar vücut içerisinde kayıp olur ve ilaç ortama nüfuz eder [41].

Sıvı kristaller ayrıca nanoteknoloji ile ilgili gerçekleşen çalışmalarda yaygınca kullanılır. Hologram teknolojisinden radyo frekansı yakalamaya kadar kullanım alanları oldukça geniştir [41].

2.3 Sıvı kristallerin sınıflandırılması

Sıvı kristaller sahip oldukları molekül yapıları ve mezofazın oluşma durumuna göre üç ana grup termotropik, liyotropik ve amfotropik olmak üzere Şekil 2.4 görüldüğü gibi sınıflandırılır.



Şekil 2.4 Sıvı kristallerin sınıflandırılması

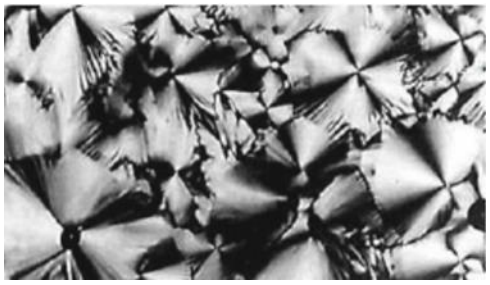
2.3.1 Termotropik Sıvı Kristaller

Sıcaklık faktörü etkisi ile mezofazı gözlemlenen sıvı kristallerdir. Termotropik sıvı kristallerin mezofazlarının ısıtılması ya da soğutulması sırasında göstermiş oldukları duruma göre kendi içerisinde ikiye ayrılır. Bu ayrım şu şekildedir, hem ısıtma sırasında hemde soğutmada iki yönlü olarak sıvı kristal fazın oluşabildiği mezofaz enansiyotropik, sadece tek yönlü soğutma aşamasında sıvıdan katı faza geçişte sıvı kristal fazın ortaya çıktığı mezofaz monotropik faz olarak isimlenir [42].

Termotropik sıvı kristaller göstermiş oldukları kristal dizilimine göre kalamitik, diskotik ve bent core olarak gruplara ayrılmaktadır [43].

2.3.2 Liyotropik Sıvı Kristaller

Liyotropik sıvı kristaller (Şekil 2.5) uygun çözücü ile hidrofilik, hidrofobik özelliklere sahip mezofazın uygun sıcaklık aralığında çözülmesi ile oluşmaktadır. Liyotropik sıvı kristalin moleküler yapısı ve fiziksel özelliği çözücünün konsantrasyonuna bağlıdır [44]. Liyotropik sıvı kristaller canlı sistemlerinde yaygınca bulunur, bilim insanları tarafından bu durum dikkat çekmiş ve araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Tıp, gıda sanayisi ve deterjan üretiminde kullanılmaktadır.



Şekil 2.5 Liyotropik sıvı kristal tekstürü [45]

2.3.3 Amfotropik Sıvı Kristaller

Sıvı kristalin bu mezofazı sıcaklık etkisi ile termotropik sıvı kristal çözücü etkisi ile liyotropik sıvı kristal özellik göstermektedir. İki sıvı kristalin özellikleri ile karşılaşılmaktadır [41].

2.4 Sıvı Kristallerin Molekül Geometrileri ve Sınıflandırılması

Maddenin ara formu olan sıvı kristaller sıvı faz gibi akışkan kristal faz gibi düzenli haldedir, anizotropi özellik göstermektedir. Molekül yapısına göre farklılıklarından ötürü termotropik sıvı kristaller; smektik, nematikler ve kolesterik olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır.

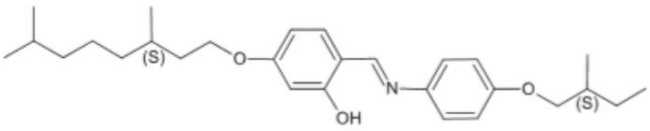
2.4.1 Kalamatik Sıvı Kristaller

Sentezlenmesi ilk kez Vorländer tarafından gerçekleştirilen kalamatik sıvı kristaller (Şekil 2.6) en yaygın kullanılan sıvı kristal mezofazdır. Molekül tipi çubuk şeklinde olan kalamatik sıvı kristallerin nematik, smetrik ve kolesterik fazları mevcuttur [46].



Şekil 2.6 Kalamitik sıvı kristallerinin şematik gösterimi [47]

Mezofazın kararlılığı merkezi çekirdek tarafından sağlanılır. Molekülün uzunluğu (Şekil 2.7) doğrusallık ve esneklik oluşturur böylece erime noktası düşer, bu durum kalamatik sıvı kristallerin kullanım açışından ön plana çıkmasını sağlar. Moleküler hareket termal zincirler tarafından gerçekleşir. Bazı durumlarda kiral merkez veya polar grup içerir [48].

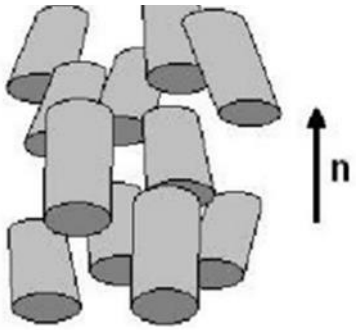


Şekil 2.7 Örnek bir kalamitik molekül [49]

2.4.2 Nematik Mezofaz

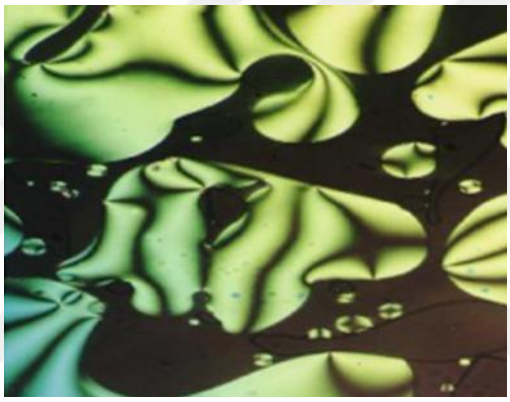
1992 yılında Friedel tarafından gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda ilk kez gözlemlenmiştir. Gözlemlenen bu tekstür için ipliksi bir görünüm ile karşılaşılmış ve isimlendirilirken yunanca ipliksi anlamına gelen nematik ismi verilmiştir [48].

Bu mezofazda konumsal düzen yokken yönelimsel düzen vardır. Yön ifade edilirken birim vektör (n) kullanılır (Şekil 2.8) [48].



Şekil 2.8 Nematik mezofazda vektör boyunda moleküler yönelimsel düzen [50]

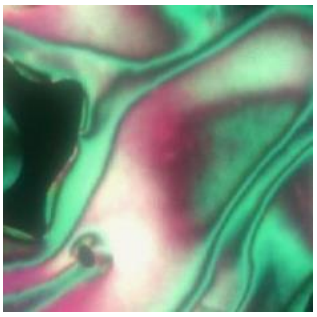
Nematik mezofaz için kısmen bir molekül düzeni olsada akıcılığı en fazla olan mezofaz nematik fazdır. Sıvı kristal mezofazlardan sıvı forma en yakın olan fazdır (Şekil 2.9) [48].



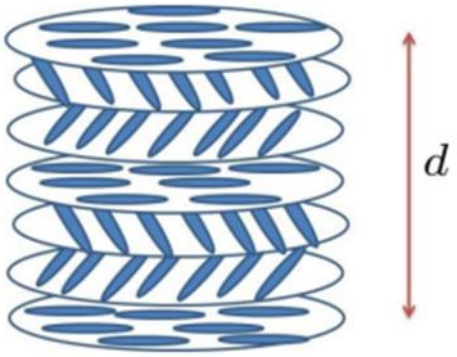
Şekil 2.9 Nematik mezofaz tekstürü [50]

2.4.2.1 Kiral Nematik Mezofaz

1888 yılında Reinitzer tarafından kolesterol türevlerinden keşfedilen kiral nematik mezofaz (Şekil 2.10) yaygın olarak kolesterik faz olarak bilinmektedir, N* ile sembol edilir. Nematik mezofaza göre farkı konumsal düzen olmamasına rağmen yönelimsel düzen vardır, (Şekil 2.11) vektör boyunca bozulmadan değişir. Burada vektörün heliks boyunca bir tur dönüşü için gereken uzunluğa heliksel adım uzunluğu (pitch) denir .Bu mezofaz için adım uzunluğu nanometre cinsinden ifade edilir [51].



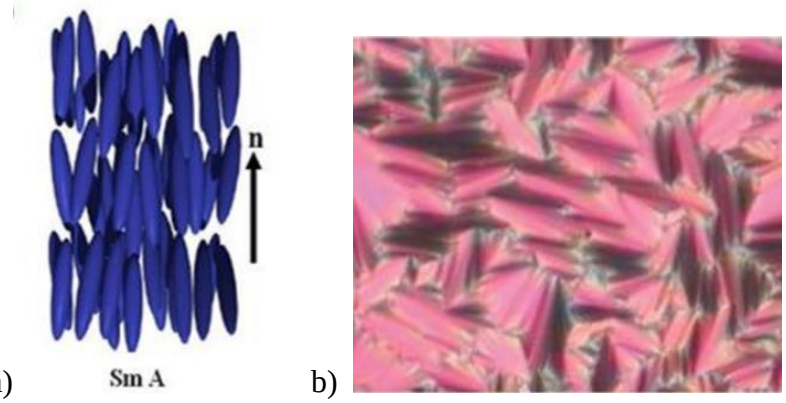
Şekil 2.10 Kiral nematiz faz tekstür [27]



Şekil 2.11 Kiral nematik mezofaz ve adım uzunluğu [52]

2.4.3 Smektik Mezofaz

Sıvı kristallerde katı forma en yakın mezofaz smektik mezofazdır. Nematik mezofaza göre daha düzenlidir. Oluşumuda nematik mezofaza göre daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşir. Bu mezofaz içinde moleküler yönelimsel düzenlidir. Smetik mezofaz tabaka ve düzleme göre n direktörü ile eğim açısına göre çeşitleri mevcuttur. En yaygın olarak Smektik A, Smektik B ve Smektik C fazları ile karşılaşılır [53]. Smektik A mezofazının meydana gelmesi, nematik faz ya da isotropik fazın soğutulması sırasında gerçekleşir. Bu fazda (Şekil 2.12) tabakalar arası mesafe (d) eşittir tabakalar içerisinde geçiş bulunmamaktadır sadece bulunduğu katmada hareket eder. Bu faz için iki boyutta sıvı üç boyutta katı olarak isimlenmiştir [27].



a) b)

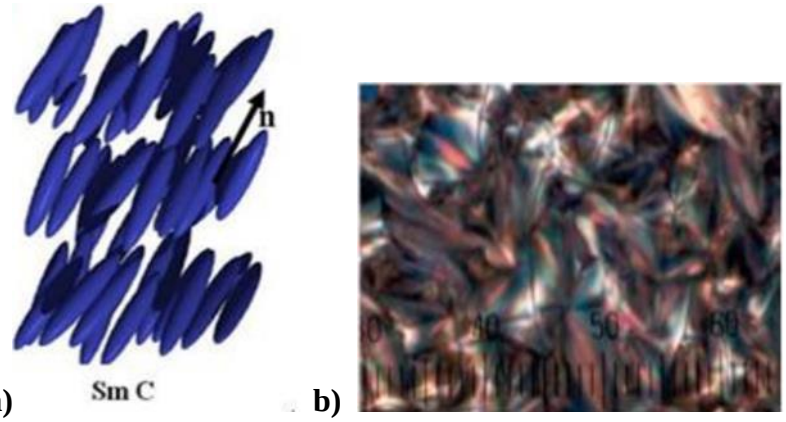
Şekil 2.12 a) Smektik A moleküler düzeni b) Smektik A polarizasyon mikroskobu altındaki görüntüsü [54]

Smektik B mezofazında (Şekil 2.13) tabakalar molekül içerisinde hekzagonal bir düzen vardır, bu düzenden ötürü Smektik A mezofazına göre daha düzenli ve kristal yapıya daha yakındır [55].



Şekil 2.13 Smektik B mezofaz tekstür [55]

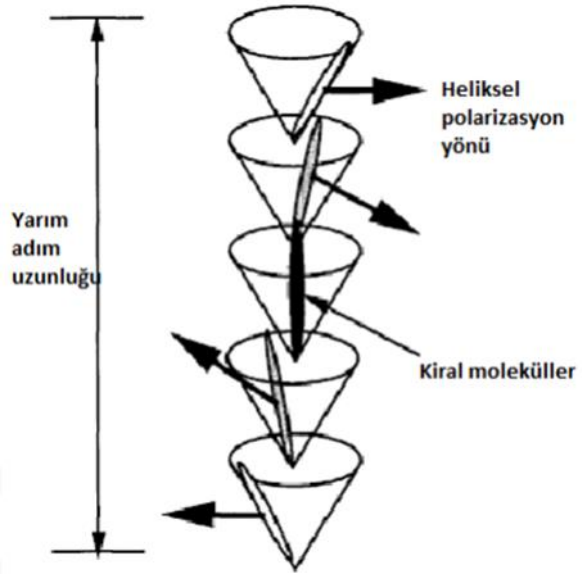
Smektik C mezofazı (Şekil 2.14) Smektik A ya göre daha düzensiz ve Smektik A gibi moleküller yerleşmistir, belirli konumsal düzen yoktur. Benzerlik göstermektedirler aralarındaki temel farkı yaratan molekül ekseni tabaka normali ile belirli olan açıdır, buradaki açı eğim açısı olarak isimlenir. Kısaca Smektik C fazı Smektik A mezofazın eğimli analoğudur [55].



Şekil 2.14 a) Smektik C moleküler düzen b) Smektik C mezofaz tekstür [54]

2.4.3.1 Kiral Smektik Mezofaz

Smektik mezofaz kiral forma sahiptir (SmA*, SmB*, SmC*) bulunmaktadır. Bu mezofazın yapısında kiral nematikler gibi heliksel yapı olmasına rağmen farklılıklar mevcuttur. Kiral smektik mezofazda smektik tabakaların direktör doğrultusuna göre belirli bir açıyla yönlendirilmesi ile döner heliksel bir yapı oluşur (Şekil 2.15). Kiral smektik mezofazlardan en önemlisi ve yaygınca karşılaşan fazı göstermiş olduğu düzenli yapı ve en az düzenlenme ihtiyacı olduğu sebebinden ötürü SmC* fazıdır (Şekil 2.16). Bu mezofaz da moleküler yapı tabakalı bir düzene sahiptir ayrıca oluşmasında moleküllerin sıcaklığa bağlı olarak tabakalarının belli bir eğim açısıyla dönmesi sarmal yapısı oluşmaktadır [56].

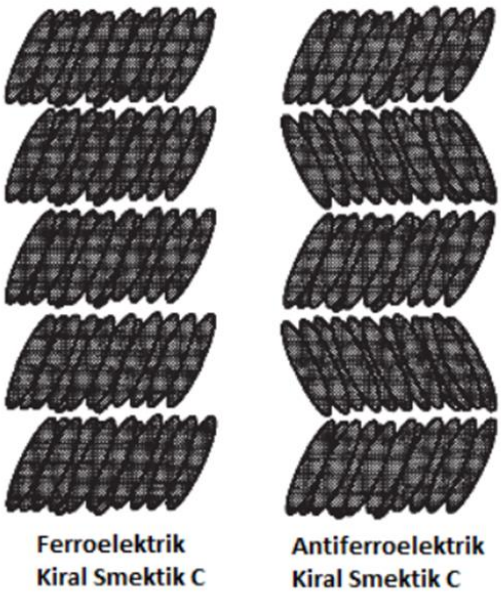


Şekil 2.15 Kiral smektik mezofazında moleküler düzen [56]



Şekil 2.16 Kiral smektik C mezofazın tekstürü [57]

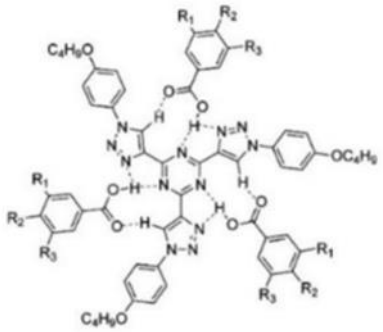
Ferroelektrik özellik bir kristal için dış elektrik alan olmadan dipol momente sahip olma kazandırmaktadır. Böylelikle kutuplanma yeteneği gösterir. Tabi bu durum her koşulda gerçekleşmez sıcaklık burada önemli faktördür, örneğin yüksek sıcaklıklarda durum ortadan kalkar. Kutuplanma ve kutuplanma olmayan şartlar için kritik sıcaklık niceliği vardır. Sıcaklık yüksek olduğu durumda kutuplanma ortadan kalkar ve kiral smektik C fazı için en özel durum olan optikçe aktiflik göstermesine yanında ferroelektrik ve anti-ferroelektrik özellik gösterilir (Şekil 2.17). Sıvı kristal fazın yönelimsel düzeninin olması ferroelektrik özelliğin dipol moment kazandırması ile açıklanabilir, böylece kendiliğinden kutuplanma özelliği ortaya çıkar. Kiral smetrik fazlardan SmC* fazı bu özelliğe sahiptir [53].



Şekil 2.17 Kiral Smektik C için ferroeletrik ve antiferroelektrik faz düzeni [56]

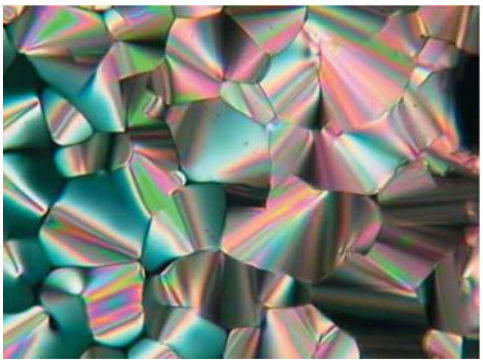
2.4.4 Diskotik Sıvı Kristaller

Diskotik (disk benzeri) sıvı kristaller aramotik sert çekirdek etrafında uzun yan zincirlerin olduğu yassı disk şeklinde moleküllerden oluşur (Şekil 2.18). Sıvı kristalin bu mezofazı 1977 yılında Chandrasekhar tarafından ilk kez adlandırılmıştır [27].



Şekil 2.18 Diskotik sıvı kristalin molekül yapısı [58]

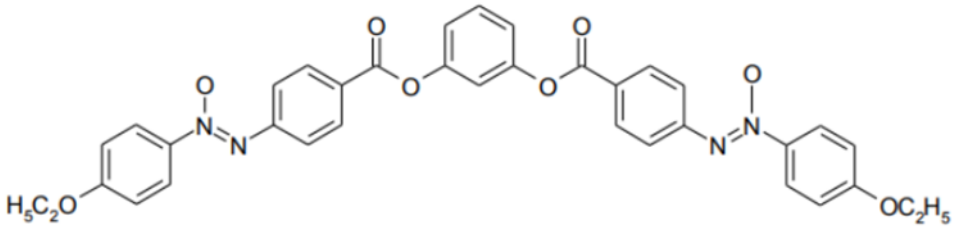
İki ana mezofaza sahiptir bunlar nematik ve kolumnar fazlardır. Kolumnar faz düzenli bir yapıdadır. Bu fazın oluşumu düzenli olmayan bir şekilde üst üste gelen disklerin kolon oluşturması ile gerçekleşir (Şekil 2.19). Nematik diskotik fazda ise moleküller sadece yönelimsel düzene sahiptir [27].



Şekil 2.19 Kolumnar mesofaz tekstürü [54]

2.4.5 Muz Şekilli (Bent Core) Sıvı Kristaller

Keşfi 1930 yılında Vorländer tarafından gerçekleşen muz şekilli (bent core) yapısında bükülmüş halde sert çekirdekten oluşmaktadır (Şekil 2.20). Polarlık ve elektro-optik çevrilme özelliklerine sahip olması bu mezofaz için oldukça önemlidir [27].

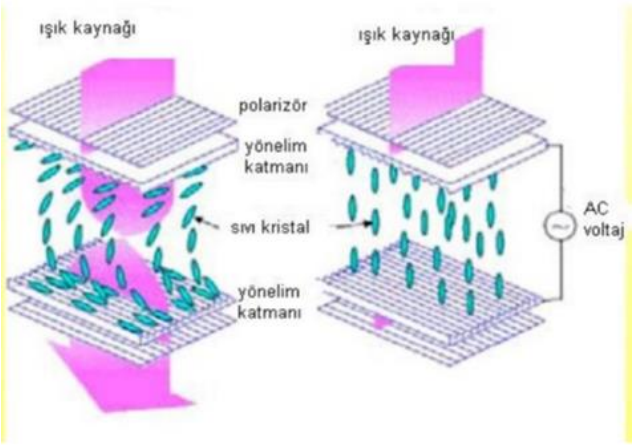


Şekil 2.20 Vorländer'ın sentezlediği muz şekilli sıvı kristalin genel yapısı [59]

2.5 Sıvı Kristallerin Fiziksel Özellikleri

Sıvı kristal malzemeler sahip oldukları eşsiz fiziksel özellikler anizotropi başta olmak üzere manyetik, dielektrik ve optiksel durumlar bilimsel çalışmalar için oldukça önemlidir [60].

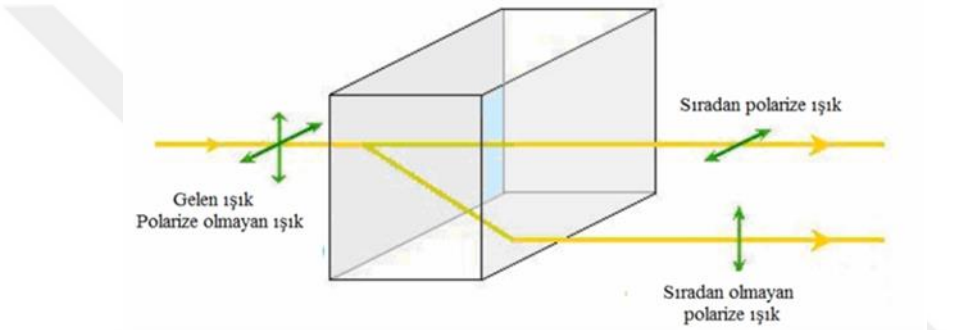
Moleküler anlamında yönlendirebilirliği dikkat çeken ilk durumdur. Moleküler anlamda bu yönelimi düzen parametresi ile ifade edilir. Sıcaklık faktörü sıvı kristal mezofazların fiziksel özelliklerini doğrudan etkilemektedir örneğin sıcaklığın azalması mezofazın kinetik enerjisini azaltır bu da sıvı kristaller moleküllerinin sıcaklığa bağlı bir durum gösterdiğini ifade eder. Sıvı kristaller dış uyarıcılardan etkilenmektedir (Şekil 2.21). Elektrik alan ve manyetik alan içerisinde yöne bağlı olarak moleküller farklı efekler gösterir [21].



Şekil 2.21 Sıvı kristal moleküllerin elektrik alan boyunca yönelmesi [61]

2.5.1 Optik Özellikleri

Sıvı kristallerin sahip oldukları birçok özellikler vardır, bu özelliklerin en başında optiksel özellikleri gelmektedir. Yansıma, kırılma, yüksek frekanslı elektromanyetik radyasyona tepkileri belirleme örnek verilebilinir bunlar içerisinde en önemlisi çift kırınım özelliğidir. Bu özelliğe göre dikey polarizasyon ve dalga normaline sahip olan faklı hızdaki iki dalga anizotropik ortam içerisinde polarize olmamış ışın çift kırıcı ortam içerisinde iki farklı yönde yayılabilir (Şekil 2.22). Burada dalgaların yayılması ardından farklı değerlerde kırılma indisleri ile Snell yasasına uygun olarak dalga normali boyunca ilerlerken sıra dışı ışın ise dalga normaline paralel şekilde ilerler [22, 60].



Şekil 2.22 Sıvı kristal ortamdaki polarize olmayan ışığın davranışı [62]

Buradaki optik anizotropi ile dielektrik anizotropi ile ilişkilendirilirse:

$\Delta \boldsymbol{n} = \boldsymbol{n_u} - \boldsymbol{n_\perp}$ olarak formülüze edilir [21].

2.5.2 Manyetik ve Elektriksel Özellikleri

Sıvı kristaller dış etkenlerden etkilenmektedir, bunlar içerisinde en önemli olanı manyetik ve elektrik alan altındaki davranışıdır. Elektrik alan içerisinde bir sıvı kristal elektriksel iki kutupluluğa sahip dipolleri uygulanan alanla aynı yöne doğru yönlendirir. Bu durumun oluşma sebebi sıvı kristallerin moleküllerinin organik yapıda olması ve hassas olmasından kaynalanır. Uygulanan en hafif elektrik alan ile molekül düzeni değişmektedir. Nükleer manyetik rezonans ile manyetik anizotropi sıvı kristallerde belirlenmesi polarizasyon mikroskobuyla çift kırıcılık incelenmesine göre bu özellik için sıvı kristaller sınıflandırılabilinir [21].

2.5.3 Dielektrik Özellikleri

Sıvı kristal mezofaza sahip olan maddeler bir çok fiziksel özelliklere sahiptir bunlardan biri olan dielektriklik dikkat çeken en önemli özelliktir. Sıvı kristallerin dielektriklik özelliklerini incelemek mezofazın moleküler yapısı ve relaksasyon gibi fiziksel özellikleri hakkında bilgi vermektedir, bu yüzden sıvı kristalleri doğru karakterize etmek gerekmektedir. Sıvı kristalin dielektrik özelliği yapılan araştırma çalışmalarında mezofaz için frekansa bağlı veya bağımsız şekilde dielektrik sabitleri, relaksasyon frekansı, kayıp sabitleri gibi unsurlar elde elde edilerek sıvı kristal yapısının analizi sağlanmaktadır [63].

Bu tez çalışmasında özel olarak sentezlenmiş olan LC1 ve LC2 sıvı kristal bileşiklerinin dielektirik spektroskopi yöntemi ile analizi gerçekleşmiş ve dielektrik özellikleri karakterize edilmiştir.

2.6 Sıvı Kristallere Ait Tekstürler

Sıvı kristallerin optiksel, dielektrik, manyetik ve elektriksel özellikleri sayesinde günümüz teknolojisinde ve bilimsel çalışmalarda yaygınca kullanılmaktdır. Oldukça çeşiti olan sıvı kristallerin fiziksel özellikleri ve molekül yapısının incelenmesi için polarizasyon mikroskobu altında görüntüsü alınmaktadır, elde edilen görüntüler tekstür olarak adlanmaktadır. Bu tekstürler sıvı kristalin karakteristik davranışlarını göstermektedir [22, 64].

Sıvı kristaller faz geçişleri sırasında birden fazla mezofaz sergilemektedir, belirli sıcaklıklarda gözlemlenen bu durum ile farklı mezofazlara ait tekstürlerde oluşmaktadır. Sıvı kristal tekstürleri kendi içerisinde ikiye özgül ve özgül olmayanlar olarak ayrılmaktadır. Mezofaz için net ve bir şekilde olan tesktür özgün tekstür, mezofaz için net olmayan ve birden fazla mezofaza ait olan tekstür özgül olmayan olarak isimlenir [22, 65].

3
DİELEKTRİK ÖZELLİKLER

3.1 Dielektrik Sabiti

Elektrik iletmeyen malzemeler yalıtkan olarak isimlendirilir. Elektriksel özellikler bakımından yalıtkanlar dielektrik maddedir.

Faraday tarafından gerçekleştirilen deney çalışmasında paralel levhalı kondansatör çin levhalar arasına yalıtkan malzeme yerleştirildiğinde kondansatörün kapasitansının arttığını gözlemlemiştir. Burada eklenen yalıtkan malzeme dielektrik olarak isimlenir ve κ faktörü dielektrik sabiti olarak birim alınır [66].

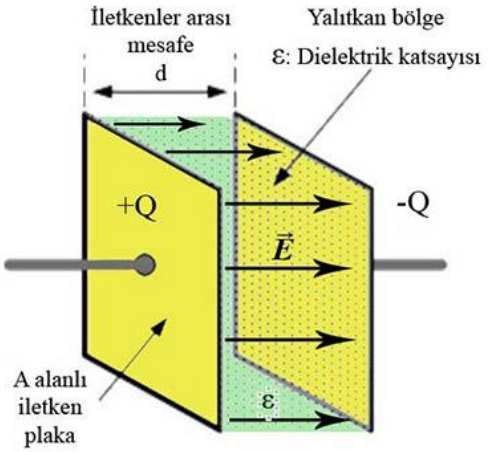
Dielektriklik faktörünün anlaşılması için parallel plakalı kondansatör incelendiğinde, sığanın yapısında iki parallel plakalardan birinde artı diğerinde eksi yükler mevcuttur levhalar arası mesafe d, ve levhaların yüzey alanları A olarak (Şekil 3.1) alındığında kapasitans değeri

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d} \tag{3.1}$$

olarak hesaplanır. Kondansatörün sığası, yük ve potansiyel fark arasında (3.2) ilişkisi vardır.

$$Q = cv \tag{3.2}$$

Paralel plakalı kondansatör için elektrik alan dielektriklik yüzünden azdır.



Şekil 3.1 Dielektriğe sahip bir sığaç ve E çizgileri [67]

Kondansatör için levhalar arası uzaklık d ve levhalar arası kalınlığı b olacak şekilde iletken yerleştirilirse kondansatörün voltajını (3.3) bağıntısı ile hesaplanır.

$$V = (d - b)\frac{\sigma}{\varepsilon_0} \tag{3.3}$$

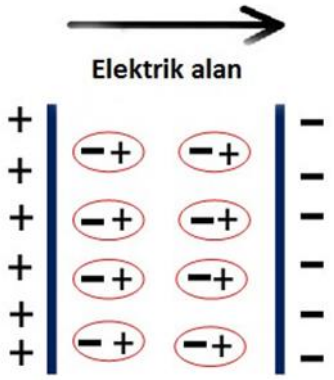
Sonuç olarak paralel plakalı kondansatör için dielektriklik katsayısı ve sığa arasında (3.4) bağıntısı vardır.

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d(1 - \frac{b}{d})} \tag{3.4}$$

Dielektrik malzemelerin iletken gibi davranabilip elektrik iletimini gerçekleşecek kadar serbest elektronu yoktur. Dielektriklikler dışardan uygulanan elektrik alan etkisi ile sahip olduğu elektrik yükleri kuvvet etkisi ile zıt yöne gider ve elektriksel kutuplanma oluşur. Kutuplanma sonucunda elektriksel dipol momentleri gözlemlenir. Dipol momentler sayesinde dielektrik malzemede yük ve enerji depolanır. Bu durum tüm dielektriklerde karşılaşılmaktadır, kutuplanma sonucunda polarizasyon özelliğine sahip olurlar [68].

3.2 Kutuplanma (Polarizasyon)

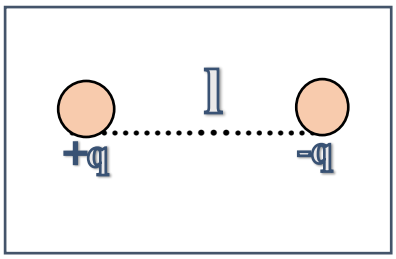
Kutuplanma sonucunda dielektrik malzemeler uygulanan elektrik alan içerisinde sahip olduğu moleküler yüklerde yer değiştirme ve dipol alan yönünde yönlendirme oluşturmaktadır. Burada polarize olan molekül sahip olduğu pozitif ve negatif yükleri birbirinden ayrıştırmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Kutuplanmanın şematik gösterimi [69]

Polarize olan atomlar için q yük ve l uzaklık olarak farz edilirse (Şekil 3.3) atom için dipol moment P vektörü ile gösterilir. Malzeme içerisinde elektrik alan ve dipol momentin arasında bir oran olduğu ve bu oran sabitininin malzeme atom çeşitine göre değiştiği görülmektedir [66].

$$P = Nql \tag{3.5}$$



Şekil 3.3 Elektrik dipolü

Elektrik dipole vektörel bir büyüklüktür yönü –q yükünden +q yüküne doğru gerçekleşir.

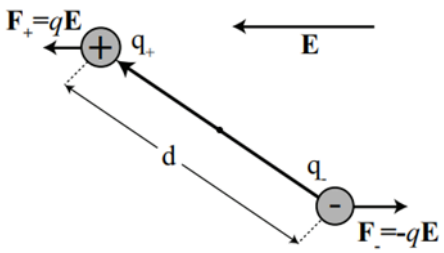
Dipol moment P dış elektrik alan E olmak üzere aralarında belli bir oran vardır, bu oran α atomik kutuplanabilirliktir ve her atoma ait özel bir değerdir. İlişki (3.6) bağıntısında gösterilmiştir.

$$P = \alpha . E \tag{3.6}$$

Dipol elektrik alan içerisine yerleştirilirse elektriksel kuvvet (Şekil 3.4) sebebinden dipol moment vektörü elektrik alanın yönünde bir tork oluşturmaktadır.

$$\tau = P \times E \tag{3.7}$$

Sonuç olarak elektrik alana konulan dielektrik malzemeleredeki dipoler alan doğrultusunda döner ve kutuplanma gerçekleşir. Gerçekleşen bu durum günümüz ekran teknolojisi olan LCD lerin çalışma prensibini oluşturmaktadır.



Şekil 3.4 Elektrik alan altında dipol için uygulanan kuvvetler [22]

Kondansatör içinde bu olay aynı şekilde gerçekleşir plakalar arasında oluşan elektrik alan dielektrik malzemeyi polarize eder. Kondansatör için depolanan yük için (3.8) bağıntısı vardır.

$$Q = \varepsilon_0 \varepsilon A E \tag{3.8}$$

Buradaki ε_0 boşluğun dielektrik geçirdenliği ε ortamın dielektrik geçirgenliğidir. Kondansatör dielektrik malzeme ile dolduğunda yüzey alanında yükler birikir. Plakanın yüzeyinde indüklenmiş elektrik alan oluşması ardından potansiyel fark ve elektrik alanında azalma meydana gelir yeni oluşucak kapasitans ile arasında (3.9) bağıntısı vardır.

$$C = \varepsilon C_0 \tag{3.9}$$

Polarizasyon sonucunda oluşan dipol momentlerin hacim başına düşen yoğunluğu P ve dielektriklik elektrikse duygunlukla arasındaki ilişki sonucunda dielektrik duygunluk (3.10) ile gösterilir.

$$\chi = \varepsilon - 1 \tag{3.10}$$

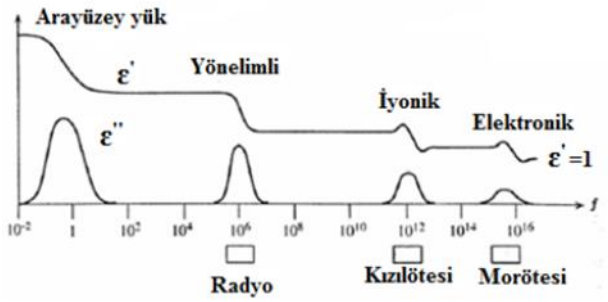
Burada polarize olmuş dielektrik ve dipol momentler arasında elektrik akı yoğunluğu (3.11) bağıntısı ile ifade edilir.

$$D = \varepsilon_0 E + P = \varepsilon_0 (1 + \chi) E = \varepsilon_0 \varepsilon E \tag{3.11}$$

3.2.1 Kutuplanma Çeşitleri

Kutuplanma çeşitleri dielektrik malzemeler için dört çeşittir. Bunlar, elektronik, atomik (iyonik), yönelimli ve arayüzey yük (uzay yük) kutuplanmalarıdır. Bu kutuplanmalar arasındaki fark zaman içerisinde uygulalan elektrik alana bağlı olarak değişir.

Kutuplanma mekanizmalarının uygulanan alternatif elektrik alan frekansına bağlı değişimi Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



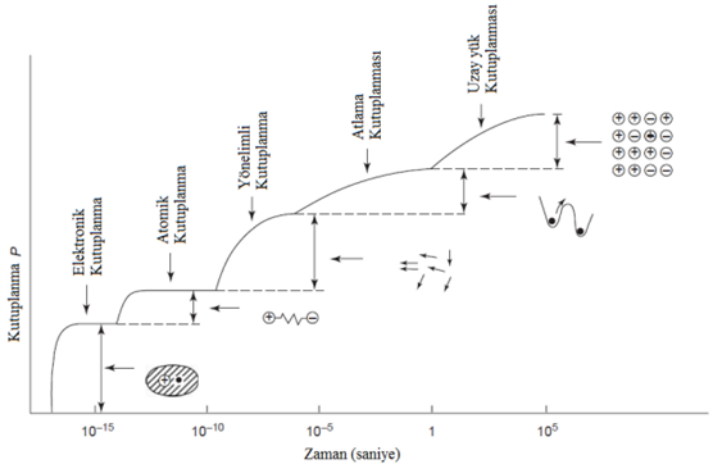
Şekil 3.5 Dielektrik kutuplanmanın frekansa bağlı değişim [68]

İyonların pozitif ve negatif olarak bir elektrik alanda ayrılması ile meydana gelen kutuplanma atomik kutuplanmadır. Bu kutuplanmada sahip olunanan molekül ve atomlara göre ayrı momentler oluşmaktadır.Bu kutuplanma atomik kutuplanma olarak adlandırılır [70].

Elektronlar dış etkenler olmadığında daimi olarak dipol moment oluşturmaktadır, etkensiz bir şekilde bu dipol momentler düzensiz bir yönelim içerisindedir. Elektrik alan içerisinde bu dipol momentler kutuplanma gerçekleştirir. Bu şekilde kutuplanma yönelimli kutuplanma olarak adlandırılır [70].

Elektronik kutuplanma oluşabilmesi için pozitif atom çekirdeği etrafında bulunan negatif elektron bulutlarının yer değiştirmesi sonucunda oluşur. Bu yer değişiminin olabilmesi için mor ötesi ve görünür ışık frekansında olması gerekir çok küçük bir zaman aralığında gerçekleşir [70].

Uzay yük veya arayüzey kutuplanması, heterojen yapıda bulunan farklı malzemeler içerisindeki yüklerden oluşan elektrik alan altında yüklerin pozitif ve negatif yükler olarak ayrışması ile gerçekleşir. Burada yük hareketleri elektrik alan frekansına bağlı olarak değişir örneğin düşük frekansta yükler belli bir yere kadar yer değiştirme gerçekleştirir ve hareket engellenir. Bu durumda yük kutuplanması meydana gelir ve uzay yükü oluşur (Şekil 3.6). Ortamın alan dağılımında gerçekleşen bu sonuç dielektrik sabitini etkiler [68].



Şekil 3.6 Dielektrik kutuplanmanın zamana bağlı değişim [68].

3.3 Kompleks Dielektrik Sabiti

Paralel plakalı kondansatör için uygulanan gerilim (3.12) bağıntısı ile verilmektedir [68].

$$V = V_m cos\omega t \tag{3.12}$$

Bağıntı içerisinde V ani gerilim, ise V_m maksimum değeri ve $\omega=2\pi f$ açısal frekansı göstermektedir. Bu kondansatör için geçen akım (3.13) bağıntısı ile ifade edilir.

$$I_1 = I_m(cos\omega t + \frac{\pi}{2}) \tag{3.13}$$

Bağıntı içerisindeki I_m maksimum akım değeri olmaktadır bu değer (3.14) ile ifade edilir.

$$I_m = \frac{V_m}{z} = \omega C_0 V_m \tag{3.14}$$

Bağıntı içerisindeki C_0 kondansatör için dielektriksiz kapasitans değerini ifade eder. Bir ideal dielektrik akımı ile gerilim arasında faz farkı bulunmaz. Kondansatör içerisine dielektrik sabiti ε' olan malzeme yerleştirildiğinde kapasitans değeri etkilenir ve bu değer C_0 ε' kadar artmakta ve akımı da (3.15) bağıntısında gösterildiği gibi etkiler.

$$I_2 = I_m cos[\omega t + \left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)] \tag{3.15}$$

Bağıntı içerisinde ifade edilen δ dielektrik kayıp olarak isimlenir, özetlenirse ise durum maksimum akım için (3.16) bağıntısı vardır.

$$I_m = \omega C_0 \varepsilon' V_m \tag{3.16}$$

Tüm bu durumlar göze alındığında kompleks dielektrik sabiti ε* ın reel (gerçek) ε' ve imajiner (sanal) ε'' kısımları arasında (3.17) bağıntısı vardır.

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'' \tag{3.17}$$

Bağıntı içerisinde reel kısım enerji depolanmasını, sanal kısımda kayıp faktörünü ifade etmektedir.

Kompeks dielektrik sabitinin bir diğer eşitliği (3.18) de gösterilebilir [22].

$$\varepsilon * (\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) = \varepsilon_r - \frac{i\sigma}{\omega\varepsilon_0} \; ise \; \varepsilon' = \varepsilon_r \; ve \; \varepsilon'' = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \; (*) \tag{3.18}$$

Bu bağıntıdan görüldüğü gibi kompleks dielektrik sabitinin reel kısmı bağıl geçirginliğe eşit sanal kısmı ise iletkenin açısal frekansının oranına eşitdir [22].

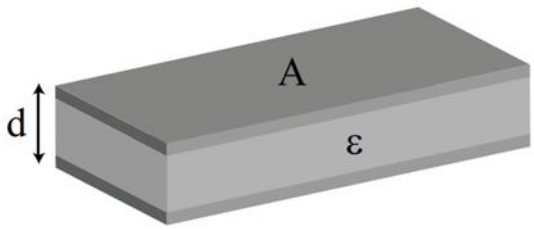
Bu bağıntılar arasında kompleks dielektrik sabitinin deneysel olarak nasıl ölçülebileceği ile ilgili bir örnek verirsek kompleks dielektrik sabiti tespit edilmek istenen yalıtkan malzeme parallel plakalı kondansatörün (Şekil3.7) sığası için (3.19) yazılır.

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} = \frac{\varepsilon_{0\ \varepsilon_{rA}}}{d} \tag{3.19}$$

Biliyoruz ki $\varepsilon' = \varepsilon_r$ dır, buna göre dielektrik sistemin reel kısmı (3.20) bağıntısı ile ifade edilir.

$$\varepsilon_r = \frac{C}{\varepsilon_0}\frac{d}{A} \tag{3.20}$$

Özetlersek sistemin kapasitans ölçümü sırasında malzemeye ait dielektrik sabitinin reel kısmı bulunabilir.



Şekil 3.7 Yüzey alanı A, plakalar arasındaki mesafe d olan ve içerisinde yalıtkan bulunan parallel plakalı kondansatör [22]

Bildiğimiz üzere parallel plaka Şekil 3.7 gibi bir sistemin direnci (3.21) ile ölçülmekte ve (3.22) bağıntısı düzenlenilirse (3.23) bağıntısı elde edilir.

$$R = \rho \frac{d}{A} \tag{3.21}$$

$$\rho = \frac{RA}{d} \tag{3.22}$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{d}{AR} \tag{3.23}$$

Burada ρ özdirenç iletkenliğin tersine eşittir. Buna göre (*) denklemi dikkate alınırsa (3.24) bağıntısı vardır.

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{W\varepsilon_0} = \frac{d}{A}\frac{1}{W\varepsilon_{0R}} \tag{3.24}$$

Bağıntılardan görüldüğü üzere direnç ve iletkenlik ölçümü ilgili malzeme için dielektrik sabitinin sanal kısmını vermektedir.

Alternatif akım (AC) iletkenliği açısal frekansa bağlı kompleks dielektrik sabitinin, sanal kısmı iletkenlik ile orantılıdır.

$$\sigma_{AC} = \omega\varepsilon_0 \ \varepsilon'' \tag{3.25}$$

$$\sigma_{AC} = \sigma_{DC} + A\omega^s \tag{3.26}$$

(3.26) eşitliği iletkenliğin üstel yazısıdır.

$$\sigma_{AC} - \sigma_{DC} = A\omega^s \Rightarrow \ln(\sigma_{AC} - \sigma_{DC}) = \ln(A\omega^s) \quad (3.27)$$

(3.27) olup, çok küçük ω degerleri dısında (3.28) bağıntısı sağlanılır.

$$ln\sigma_{AC} \approx lnA + slnω \quad (3.28)$$

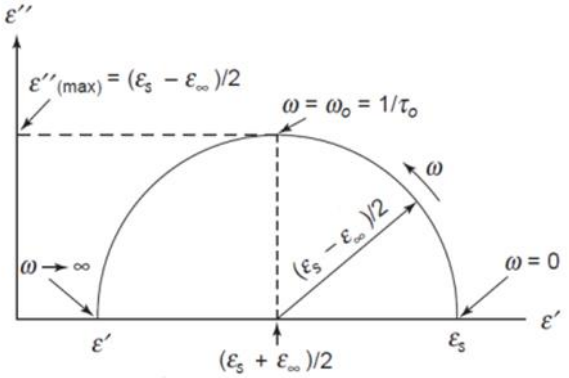
Deklemde bulunan sistemin aldığı değer sistemin iletkenlik karakterini temsil etmektedir. İletkenlik mekanizmaları literatürde ingilizce isimlerinin kısaltılması olarak adlandırılır. Tablo 3.1 de frekans değerlerine göre iletkenlik mekanizmaları verilmiştir. "DC conductivity,", "Correlated barrier hoping mechanism, (CBH)", "Quantum mechanical tunneling model (QMT)", "Nearly constant loss model (NCL)", "Super linear power law (SLPL)", "Extended pair approximation (EPA) ulaşılabilir [22].

Tablo 3.1 İletkenlik mekanizmaları

Frekans üssü	**Mekanizma**	**Kısaltma**
s=0	DC conductivity	DC
s=0.5	Correlated barrier hoping mechanism	CBH
0.7<s<1	Quantum mechanical tunneling model	QMT
s=1	Nearly constant loss model	NCL
s>1	Super linear power law	SLPL
s=2	Extended pair approximation	EPA

3.4 Debye Modeli

Bu modele göre tek relaksasyon zamanlı bir sistemin frekansa bağlı olarak değişen dielektrik parametreleri değişimi açıklanır. Model içerisinde kompleks dielektrik sabiti reel ve imajiner kısımları arasındaki bağıntı denklemle ifade edilmektedir, bu denklemi yarım daire denklemi ile gösterilir. Grafikte oluşan bu yarım daire Debye yarı dairesi (Şekil 3.8) olarak adlandırılır [68].



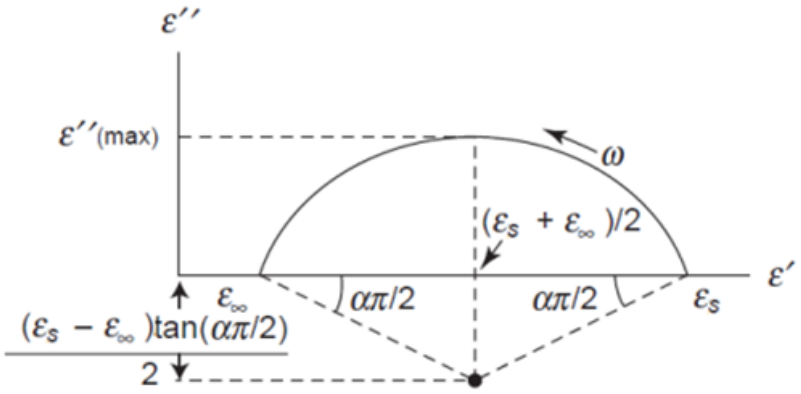
Şekil 3.8 Dielektrik parametreleri için debye eğrisi [68]

Debye denklemi (3.29) ile verilir.

$$(\varepsilon' - \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty}{2})^2 + \varepsilon''^2 = (\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2})^2 \qquad (3.29)$$

3.5 Cole-Cole Modeli

Debye modelinde sadece bir relaksasyon zamanlı kontrol iken birden fazla durulma zamanına sahip yapıların dielektrik parametrelerini açıklar yani Cole-Cole modeli Debye'ye göre daha gelişmiştir. Dielektrikler için Debye modelindeki gibi yarım daire oluşur. Çoklu relaksasyon zamana sahip dielektriklerin parametrelerinin grafiklerinde modelde ε''=0 ekseni altında kalan bir yarım daire veya yay meydana gelir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Dielektrikler için cole-cole eğrisi [68]

Cole-Cole denklemi,

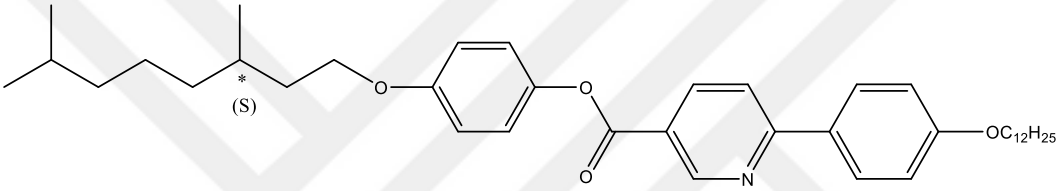
$$[\varepsilon' - \frac{(\varepsilon_s + \varepsilon_\infty)}{2}]^2 + [\varepsilon'' - \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{2} tan\frac{\alpha\pi}{2}]^2 = [\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2} sec\frac{\alpha\pi}{2}]^2 \quad (3.30)$$

4
MATERYALLER VE YÖNTEMLER

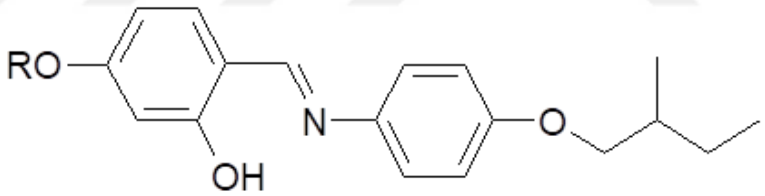
4.1 Karakterize Edilen Sıvı Kristaller

Bu çalışmada kullanılan organik bileşikler, ((S)-4-(3,7-Dimetiloktiloksi) fenil 6-(4-dodesiloksifenil) piridin3-karboksilat) (LC1) ve (S)-5-Oktiloksi-2-[[[4-(2-metilbütoksi)fenil]imino]metil]fenol (LC2) malzemeleridir.

Bu organik bileşiklerin molekül yapısı Şekil 4.1 de verilmektedir. Bu tez boyunca kullanılan sıvı kristaller için, parantez içinde ifade edilen LC1 ve LC2 kısaltmaları kullanılacaktır.



a) LC1



b) LC2, R = C_8H_{17}

Şekil 4.1 Sıvı kristal malzemelerin molekül yapısı

4.2 Kullanılan Cihazlar

Bu tez çalışmasında sentezlenen sıvı kristallerin moleküler yapısı, morfolojik özellikleri ve faz geçişlerinde polarizasyon mikroskobu (PM), faz geçişlerinde diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC) ve dielektrik ölçümlerinde Dielektrik Spektroskopi (DS) yönteminden faydalanılmıştır.

4.2.1 Polarizasyon Mikroskobu (PM)

Sıvı kristallerin sahip olduğu fazların karakteristik yapıları ve morfolojisinin optiksel özelliklerini tanımlamak için polarizasyon mikroskobu kullanılmalıdır [71].

Polarizasyon mikroskobu sayesinde sıvı kristallere ait tekstürler gözlemlenir, saf ve çift kırılma özelliğine sahip numunenin optik anizotropi özelliğinden yararlanılarak bu durum gerçekleşir.

Polarizasyon mikroskobunda kaynaktan yayılan ışık aynalar sayesinde lensten polarize edilerek geçilmektedir. Ayrıca polarizasyon mikroskobunda dalga boyu seçiciliği için filtre bulunmaktadır. Uygun dalga boyundaki ışık kondansatör üzerinden geçerek numuneye gelir. Numuneyi burada istediğimiz sıcaklıkta ayarlayabiliriz. Numuneden geçen ışık objektiften geçerek analizöre gelir (Şekil 4.2). Bu aşamada merceğe gelen görüntü büyütülür ve net olması sağlanılır. Bazı polarizasyon mikroskoblarda iki ışık kaynağı bulunur, böylelikle kiral moleküllere sahip sıvı kristallerin karakterizasyonu gerçekleştirilir [72].



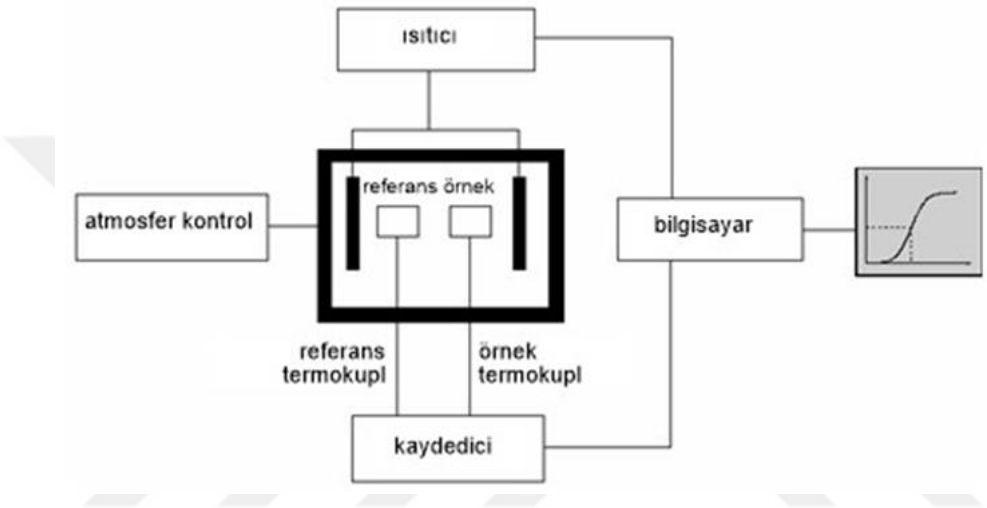
Şekil 4.2-Polarizasyon mikroskobu [73]

4.2.2 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)

Difreansiyel taramalı kalorimetre (DSC) (Şekil 4.3) numune için ısıtma ve soğutma sırasında sabit bir sıcaklık değeri için absorbe edilen ya da yayılan enerji miktarını ölçmektedir. Bu yöntem ile referans ve numune arasında gelen veya ayrılan ısı farkı sıcaklığa ya da zamana bağlı olarak görülür. DSC' de güç telafisi prensibi ile çalışanlar vardır, burada numune ile referans sıcaklığı aynı tutulur.

Numune ve referans arasında sıcaklık farkı bulunursa sıcaklığın aynı kalabilmesi için enerji yani güç miktarı değiştirilir. Böylelikle faz değişimi sırasında ısı transferi miktarı ölçülür [74].

DSC'nin çalışma prensibi, numune ve referansın içinden geçen ısı akışının ölçülmesine dayanmaktadır. Egzotermik bir reaksiyonun oluşturulduğu numune ve referansın aynı sıcaklıkta kalması için ısıtılırken gücü azaltılır ve numunede soğutma eğer endotermik bir reaksiyon gerçekleşiyorsa referans ve numunenin aynı sıcaklıkta olması için ısıtma gücü arttırılır.



Şekil 4.3 Diferansiyel taramalı kalorimetre sisteminin şematik diyagramı [75]

Bu tez çalışmasında DSC, numunelerin faz geçiş sıcaklıklarını belirlemesinde kullanılmıştır. LC1 ve LC2 sıvı kristal bileşikleri için ısıtma ve soğutma aşamalarında sıcaklığa bağlı olarak gerçekleşen faz geçişlerinin belirlenebilmesi için Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ile alınan ölçümleri alınmıştır. Elde edilen bu ölçümler ile sıvı kristallerin entalpileri de belirlenmiştir.

4.2.3 Dielektrik Spektroskopisi Tekniği (DST)

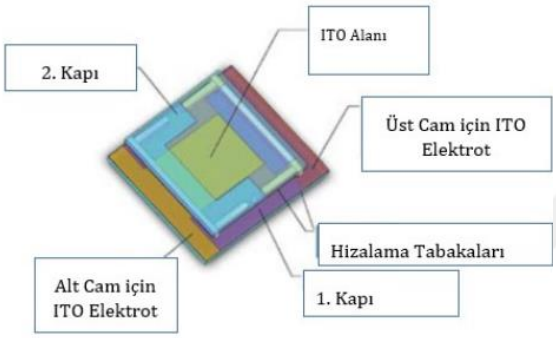
Dielektrik spektroskopi tekniği farklı veya aynı değerdeki frekansta uygulanan elektrik alana maruz kalan bir numunenin tepkisini incelemek için kullanılır. Çalışma prensibinde dielektrik spektroskopi malzemenin sahip olduğu dielektrik özelliğini frekansın fonksiyonu olarak tanımlaması temeline dayanmaktadır. AC gerilim ile çalışmaktadır.

Uygulanan elektirik alan malzemede yönlendirme hareketine sahip olan dipollerle etkileşir. Bu etkileşme ile malzemeye ait polarizasyon, elektriksel iletkenlik,

dielektrik relaksasyon, dielektrik sabit ve dielektrik kayıp faktörü ölçülmektedir [76].

4.3 Sıvı Kristal Hücrenin Hazırlanması ve Deney Düzeneği

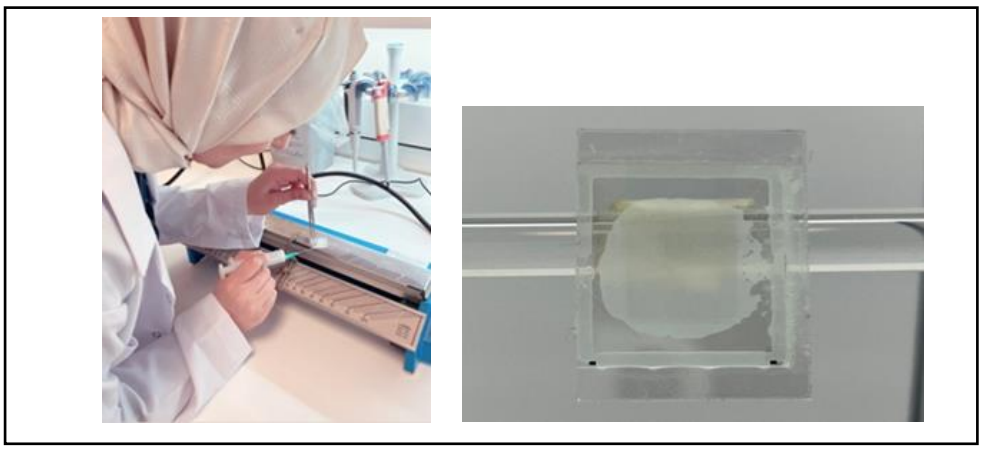
Bu tez çalışmasında dielektrik ölçümlerin gerçekleşmesi için sentezlenen sıvı kristaller Instec, Inc şirketi tarafından sağlanan sandviç hücrelere (Şekil 4.4) doldurulmıştır.



Şekil 4.4 Instec, Inc şirketinden alınan özel sandviç hücre tabakaları [77]

İndiyum kalay oksit (ITO) ile kaplanmış olan sandviç tasarım ile tasarlanan numüne hücrelerin cam plakalarının içleri polyimid tabakalarla kaplanmıştır [78].

Tez çalışması kapsamında kullanılan sandviç hücrelerin doldurumunda Kohler bankası kullanılmışır. Bu dolum şu şekilde gerçekleştirilir : Sıcaklık grandyentine sahip Kohler bankası üzerinde sandviç hücrelerin kapılarına bir miktar sentezlenen sıvı kristal şırınga ile yerleştirilir bu aşama yavaş ve titizlikle gerçekleştirilir, hücre kılcallık etkisi ile düzgün bir şekilde kaplanır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Kohler bankası ile sıvı kristallerin hücrelere doldurulması

4.4 Deney Düzeneği

Tez kapsamında amaçlanan sıvı kristal mezofazların dielektrik ölçümlerinin gerçekleştirmek üzere deney düzeneği kurulmuştur (Şekil 4.6). Numunelerin dış etkenlerden muhafaza edilmesi için tasarlanan bölmeye yerleştirilmiştir. Ölçümlerde hücrelerin ısıtılması için direnç düzeneğinde sıcaklık kontrolü için k tipi termoçift kullanılarak, sıvı kristal malzemelere ait dielektrik özellikler 100Hz -10 MHz aralığında Empedans analizi cihaz ile hesaplandı. Hesaplama kontrolü cihaz için ara yüz bağıntısı ile bilgisayardan gerçekleşmektedir. Dielektrik ölçümlerin gerçekleştirilmesi amacı ile yazılan yazılım program kullanılarak, ölçüm sonuçları Origin programı ile grafikleri çizilmiş ve analizi gerçekleşmiştir.



Şekil 4.6 Deney düzeneği

5
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 LC1 ve LC2 Bileşiklerinin Mesomorfik Özellikleri

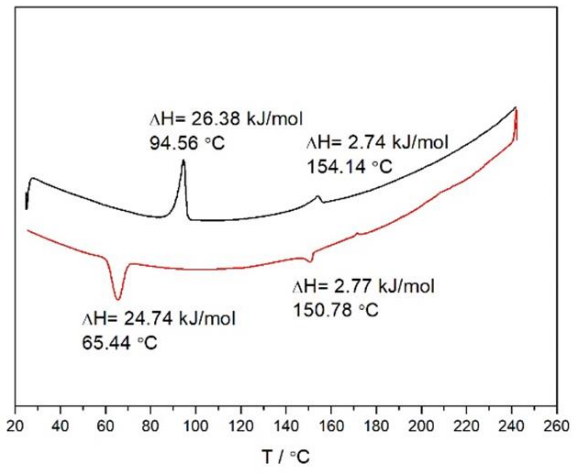
5.1.1 LC1 Sıvı Kristal Bileşiği

LC1'in sahip olduğu mezomorfik özelliklerin incelenmesi için, (PM) ve (DSC) kullanılmıştır. Buna göre mezogenlerin faz geçiş sıcaklıkları ve karşılık gelen entalpi değerleri aşağıda Tablo 5.1' de sunulmuştur.

Tablo 5.1 LC1 için faz geçiş sıcaklıkları ve entalpi değerleri

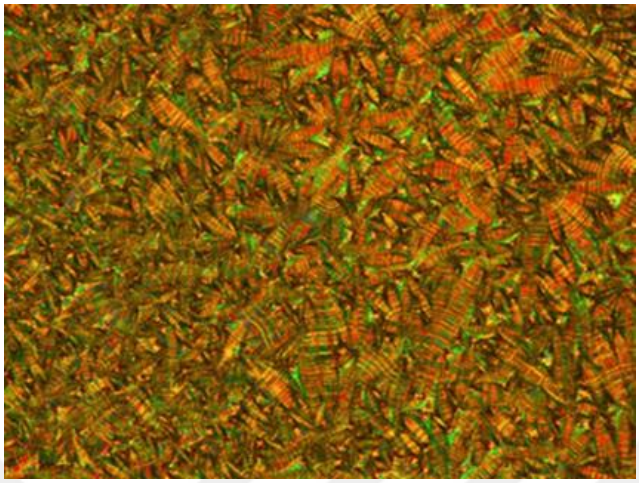
Bileşik	**Faz geçiş sıcaklıkları T / oC [(ΔH kj /mol]a**
LC1	**Isıtma :** K 94.56 [26.38] **SmC*** 154.14 [2.76] **Iso** **Soğutma :** Iso 150.78 [2.77] **SmC*** 65.44 [24.74**] K**
Kısaltmalar:	**K:**Kristal Faz **, Iso:**İzotropik Faz **, SmC*:** Kiral Smektik C Fazı

LC1 sıvı kristali için ısıtma ve soğutma sırasında faz geçiş sıcaklıklarında karşılık gelen entalpi değerleri DCS ile saptanmıştır ve bu değerler Şekil 5.1 ve Tablo 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1 LC1 için Isıtma ve Soğutma Sırasında Entalpi DSC termogramları

LC1 ‘in PM ve DSC ile incelenmesi sonucunda, soğutma sırasında 90 ^{o}C’de polarizasyon mikroskobu altında ki tekstüründe SmC* fazı gösterdiği görülmektedir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 LC1 soğutma sırasında 90 ℃ de SmC* faz tekstürü [79]

5.1.2 LC2 Sıvı Kristal Bileşiği

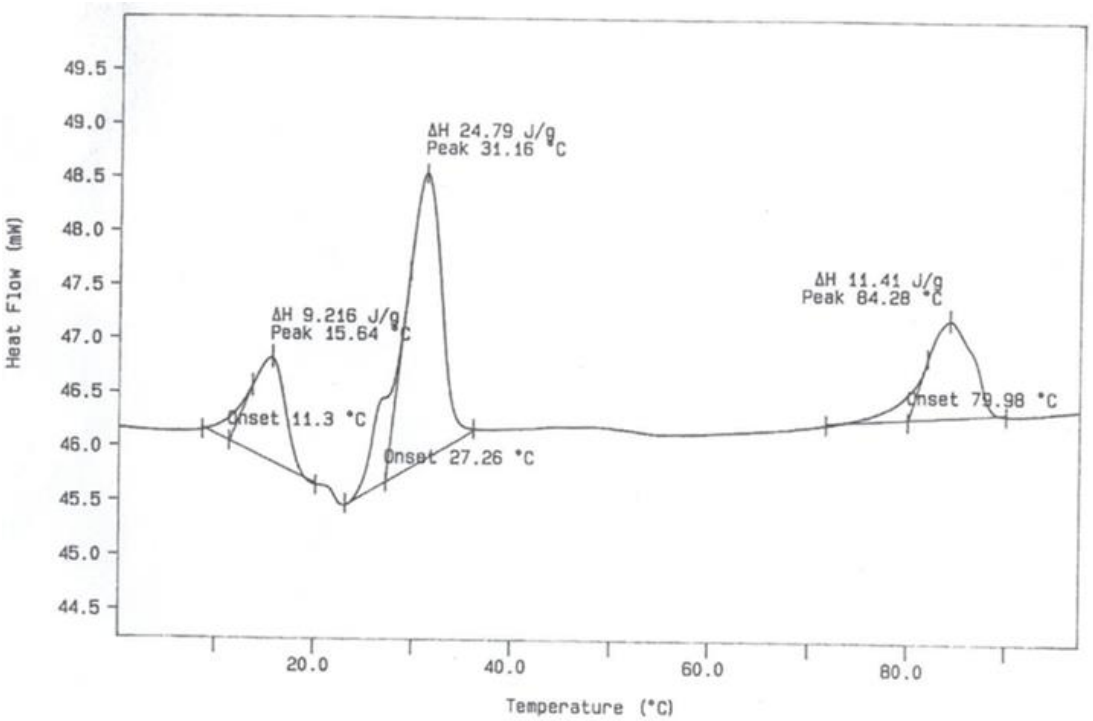
LC2 sıvı kristali için sıcaklığa bağlı DSC ölçümlerinde, polarizasyon mikroskobunda incelendiğinde termotropik enansiyotropik kiral smektik C* (SmC*) mesofazının ortaya çıktığı saptanmıştır. Sıvı kristal bileşiğinin DSC ile saptanan faz geçiş sıcaklıkları ve entalpi değerleri Tablo 5.2 ‘de sunulmuştur.

Tablo 5.2 LC2 için faz geçiş sıcaklıkları ve entalpi değerleri

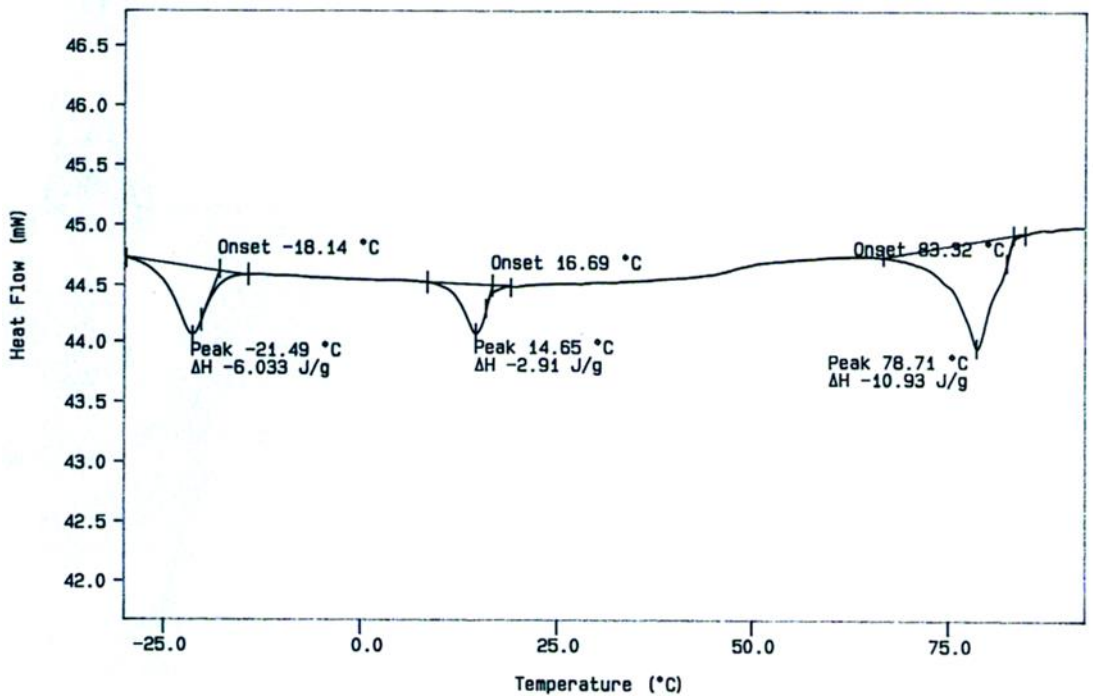
Bileşik	**T ^{o}C (ΔH, Jg^{-1})**
LC2	**Isıtma: K_1** 15.6 (9.22) **K_2** 31.2 (24.8) **SmC*** 84.3 (11.4) **I** **Soğutma: I** 78.7 (-10.93) **SmC*** 14.7 (-2.91) **K_2** -21.5 (-6.03) **K_1**
Kısaltmalar: K: Kristal Faz**, Iso:** İzotropik Faz**, SmC*:** Kiral Smektik C Fazı	

LC2 için dielektrik spektroskopisi ile alınan ölçümlerde ısıtma ve soğutma aşamasında DSC termogramları ve entalpi değerleri Şekil 5.3 ve Tablo 5.2’de sunulmuştur.

A)

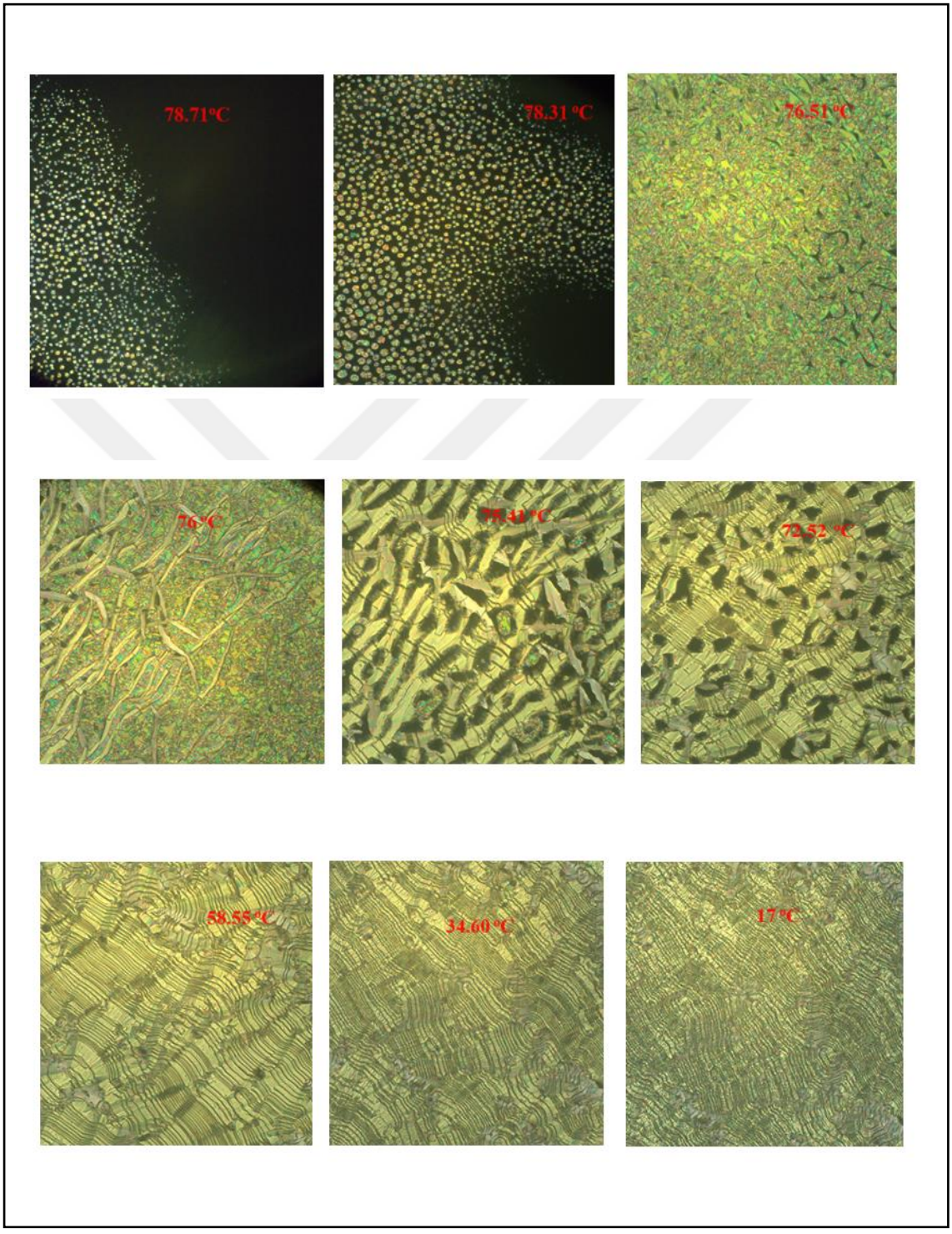


B)



Şekil 5.3 LC2 'nin ısıtma (A) ve soğutma (B) aşamasındaki DSC termogramları

LC2 sıvı kristalinin soğutma sırasında sıcaklığa bağlı olarak göstermiş olduğu mezofazlara ait tekstürler polarizasyon mikroskobuyla görüntülenmiş ve Şekil 5.4'te gösterilmiştir.

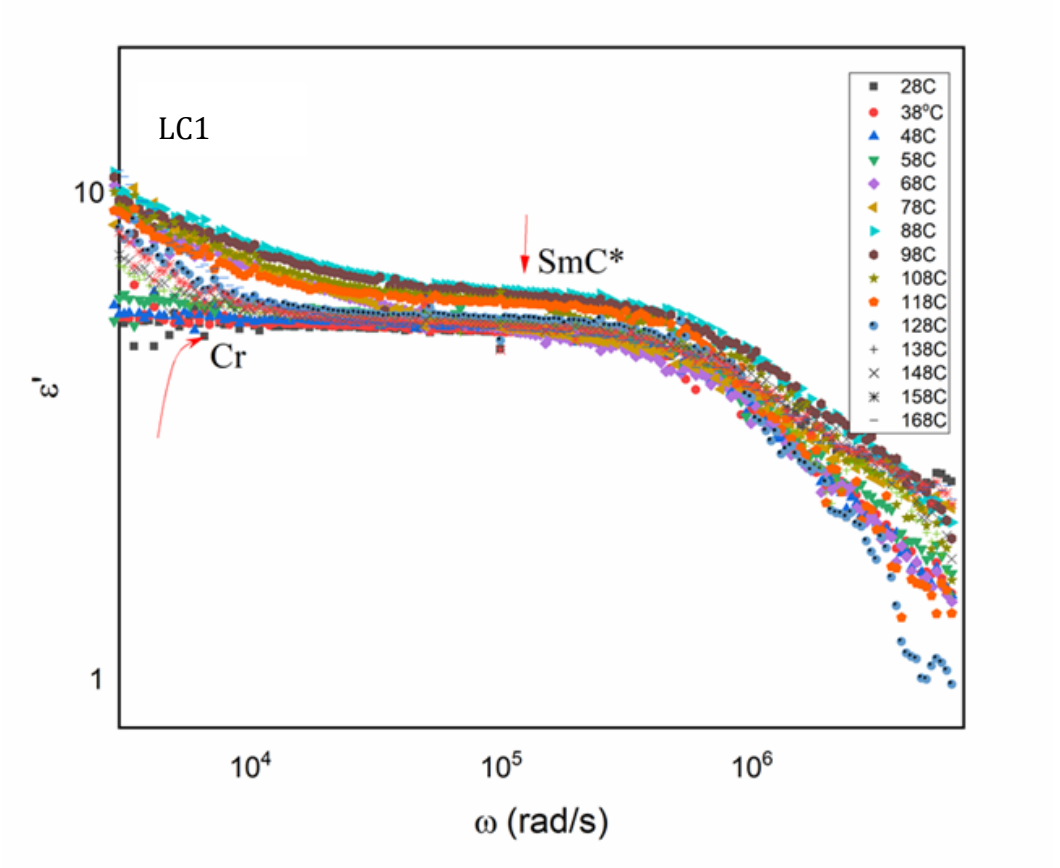


Şekil 5.4 LC2'nin soğutma esnasında sıcaklığa bağlı polarizasyon mikroskobu (PM) tekstürleri

5.2 LC1 ve LC2 Sıvı Kristallerinin Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi

Bu bölümde LC1 ve LC2 sıvı kristalleri kapasitans metoduyla 100Hz-10MHz frekans aralığında ve sıcaklıklar LC1 için 28°C - 168 °C değerleri LC2 için 29°C -93°C değerleri arasında empedans analiz cihazı kullanılarak dielektrik parametreleri ölçülmüştür.

LC1 sıvı kristal bileşiğinin farklı sıcaklıklarda dielektrik sabitinin gerçek kısmının açısal frekansa bağlı grafiği Şekil 5.5 de gösterilmiştir.

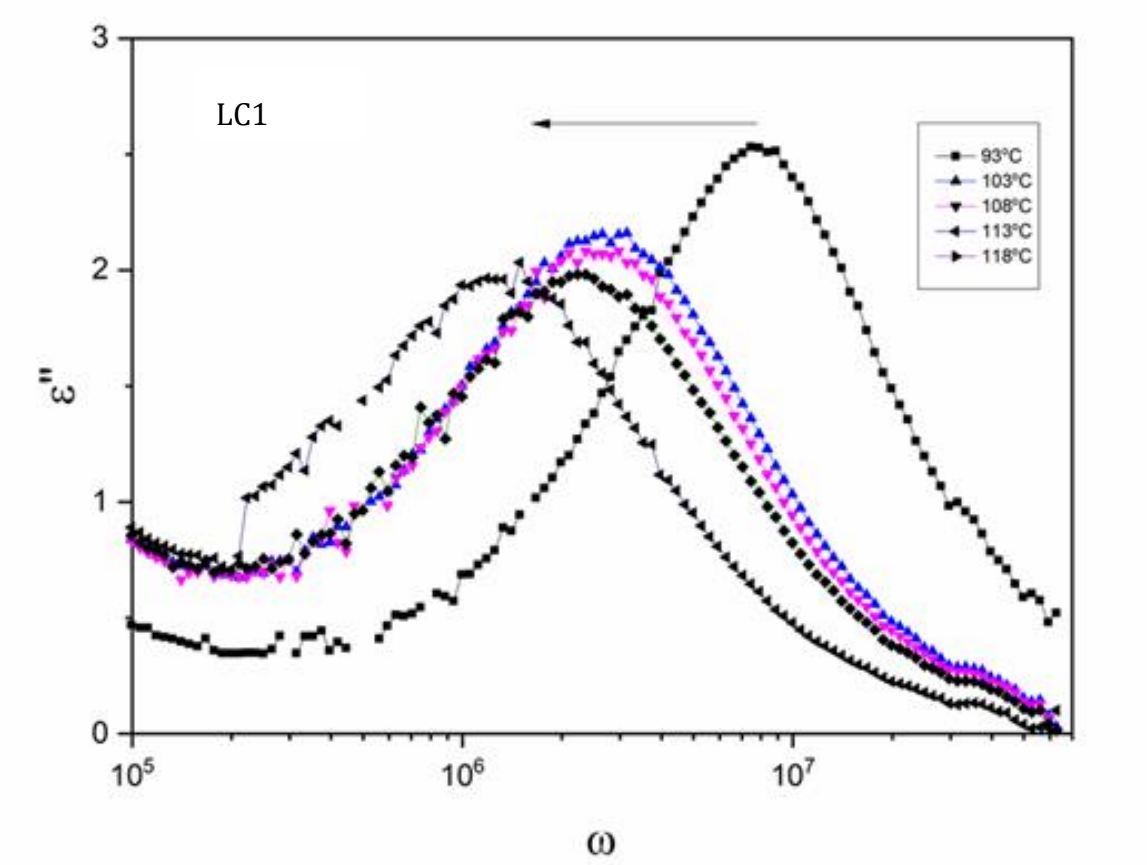


Şekil 5.5 LC1 'in dielektrik sabitinin gerçek kısmının (ε′) açısal frekansa bağlı ölçümleri

Şekil 5.5'den anlaşıldığı gibi kompleks dielektrik sabitinin reel değerleri sıcaklığa ve frekansa bağlı değişmektedir.

Şekil 5.5' de LC1 için ısıtma aşamasında 94.56 °C sıcaklığına ulaştığı anda SmC* fazının gözlemlendiğini, bu faz geçiş sırasında kompleks dielektrik sabitinin reel kısmınında aniden yükseldiği frekansa bağlı olarak gözlemlenmiştir.

Şekil 5.6 LC1 sıvı kristal bileşiğinin farklı sıcaklıklarda dielektrik sabitinin sanal kısımlarının açısal frekansa bağımlılığı gösterilmektedir.



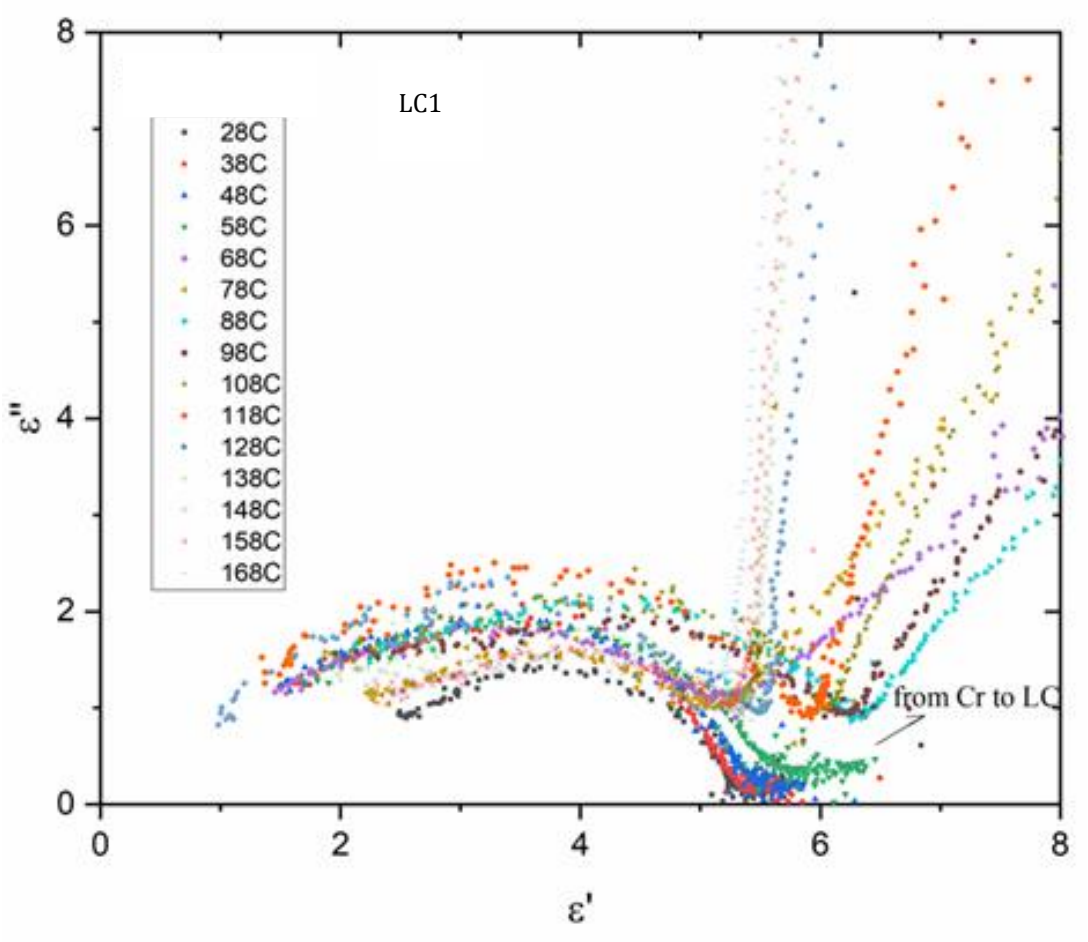
Şekil 5.6 LC1'in dielektrik sabitinin sanal kısmının (ε′′) açısal frekansa bağlı ölçümleri

Kompleks dielektrik kısmının sanal kısmı sıcaklığa ve frekansa bağlı değişmektedir.

Dielektrik sabitlerinin sanal kısımlarının frekansa bağlı eğrileri, dielektrik relaksasyon piki olarak isimlendirilir.

Bu pikler LC1 için sıcaklığa bağlı olarak göstermiş olduğu moleküllerin yönelimini gösterir. Şekil 5.6 de LC1 için faz geçişinden sonra dielektrik sabitin sanal kısmı aniden düşmüş ve relaksasyon düşük frekans bölgesine kaymıştır.

Şekil 5.7 te LC1 için elde edilen Cole-Cole eğrileri verilmiştir.

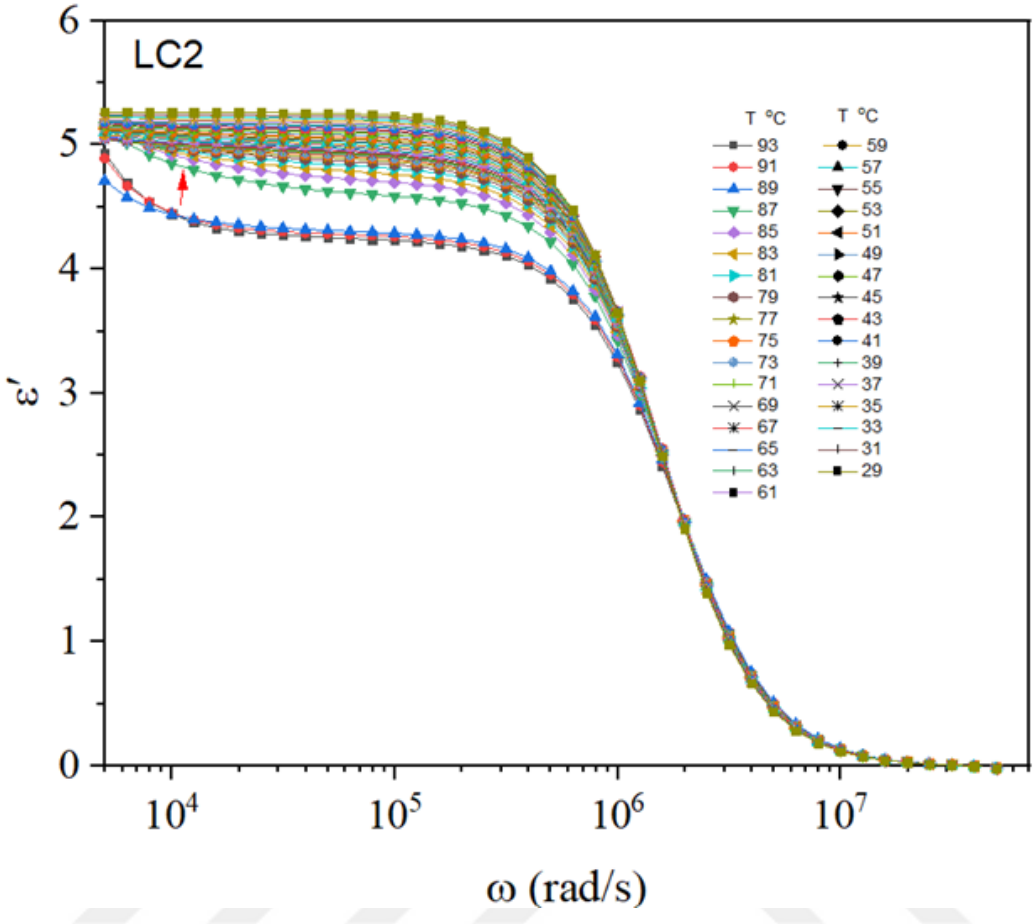


Şekil 5.7 LC1 'in farklı sıcaklıklarda Cole-Cole eğrileri

LC1 sıvı kristalinin dielektrik gevşeme mekanizması Cole-Cole eğrileri sayesinde incelenmiştir. Cole-Cole eğrileri sabit sıcaklıktaki dielektrik depolama ile dielektrik kayıpların değişimi göstermektedir.

LC1 sıvı kristal için faz geçiş sıcaklığında Cole-Cole eğrisinden çapının arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum dielektrik gücünün arttığını ortaya koymaktadır.

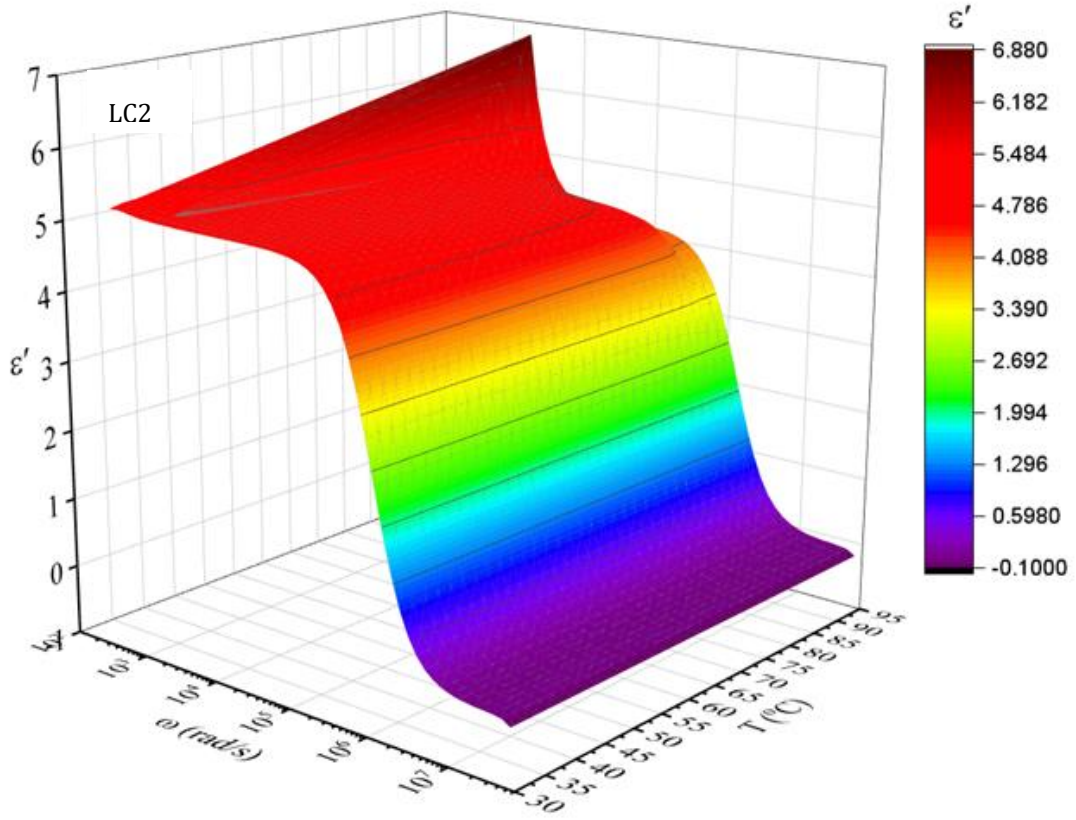
LC2 sıvı kristal bileşiğinin farklı sıcaklıklarda dielektrik sabitinin gerçek kısmının frekansa bağımlı grafiği Şekil 5.8' te gösterilmişitir.



Şekil 5.8 LC2'nin dielektrik sabitinin gerçek kısmının (ε′) açısal frekansa göre değişimi

Şekil 5.8 ten anlaşılacağı üzere LC2 için soğutma aşamasında SmC* faz geçişinin olduğu sıcaklıkta dielektrik sabitinin gerçek kısmının (ε′) ani artması burada faz geçişinin olduğunu göstermektedir.

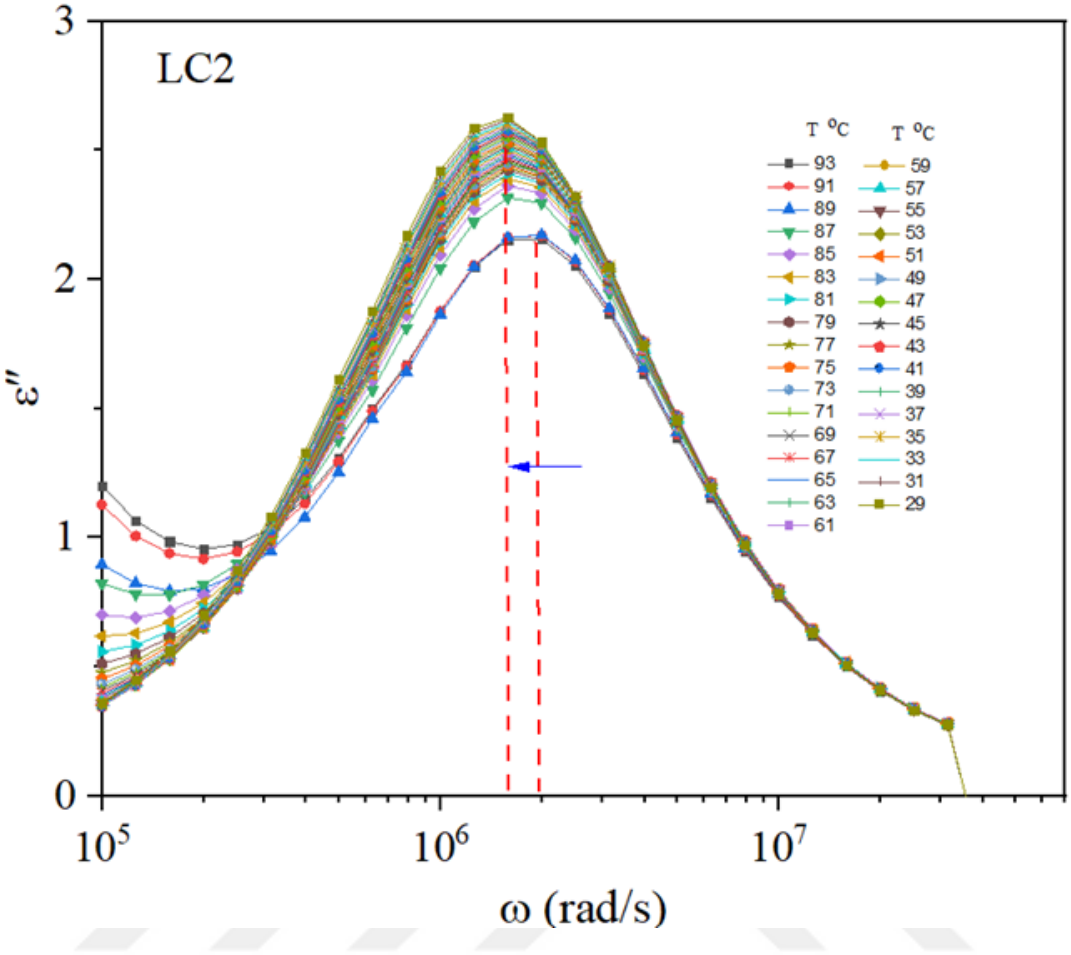
LC2 için sıcaklık ve açısal frekansa bağlı olarak ε′ nün üç boyutlu (3B) grafiği Şekil 5.9' da çizilmiştir. Bu grafiklerde ölçümde alınan değerlerin tümü kullanılarak, sıvı kristalin farklı fazları arasında anlık geçişleri görülmüş ve faz geçiş sıcaklıklarının PM ve DSC yöntemlerinin yanında dielektrik ölçümlerden de bulunabileceği kanıtlanmıştır.



Şekil 5.9 LC2'nin dielektrik sabitinin reel kısmının (ε′) sıcaklık ve açısal frekansa göre 3 boyutlu grafiği

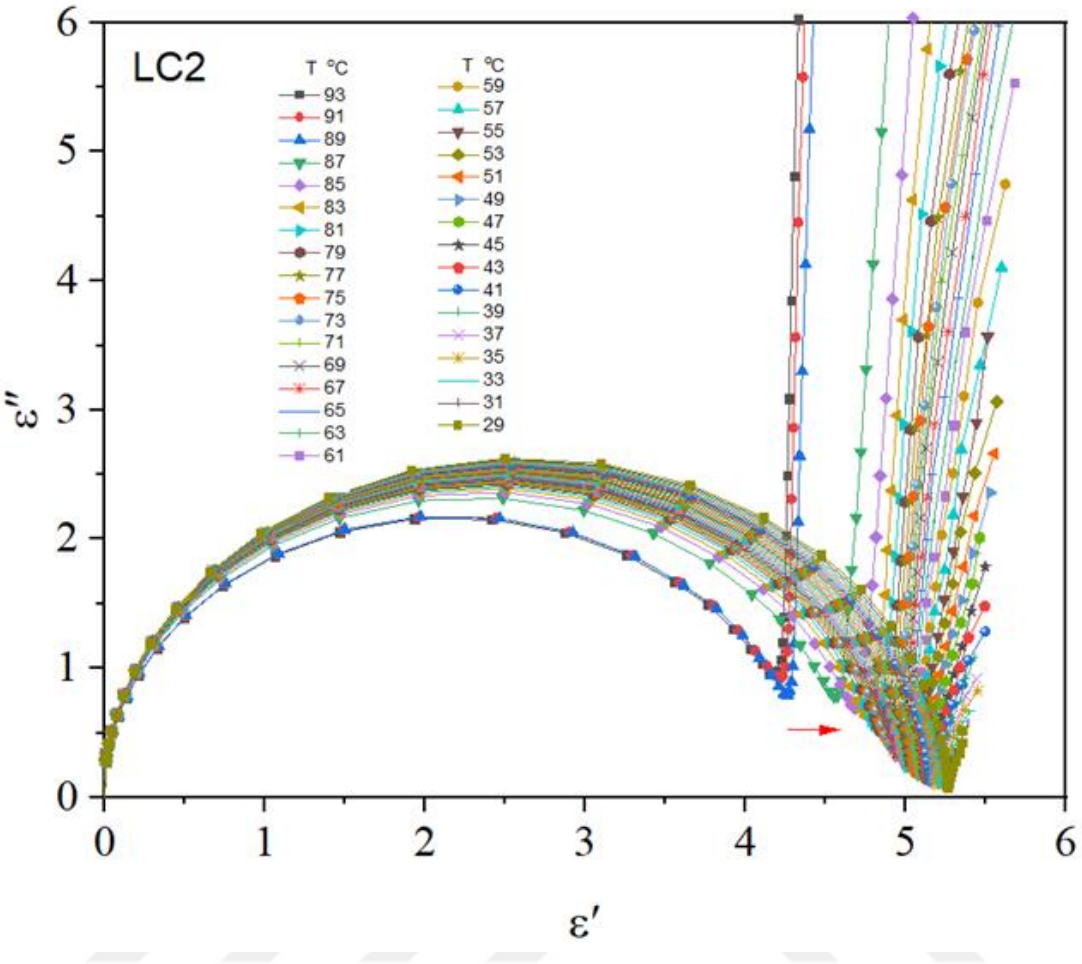
Şekil 5.10 LC2 bileşiğinin farklı sıcaklıklara ait dielektrik sabitinin sanal kısımlarının açısal frekansa bağımlılığı gösterilmektedir. Kompleks dielektrik sabitinin sanal kısmı sıcaklığa ve frekansa bağlı değişmektedir.

Şekil 5.10 de LC2 için soğutma aşamasında dielektrik sabitinin sanal kısmı faz geçişinden sonra ani yükselmiş ve relaksasyon frekansının düşüşe geçtiği gözlenmiştir.



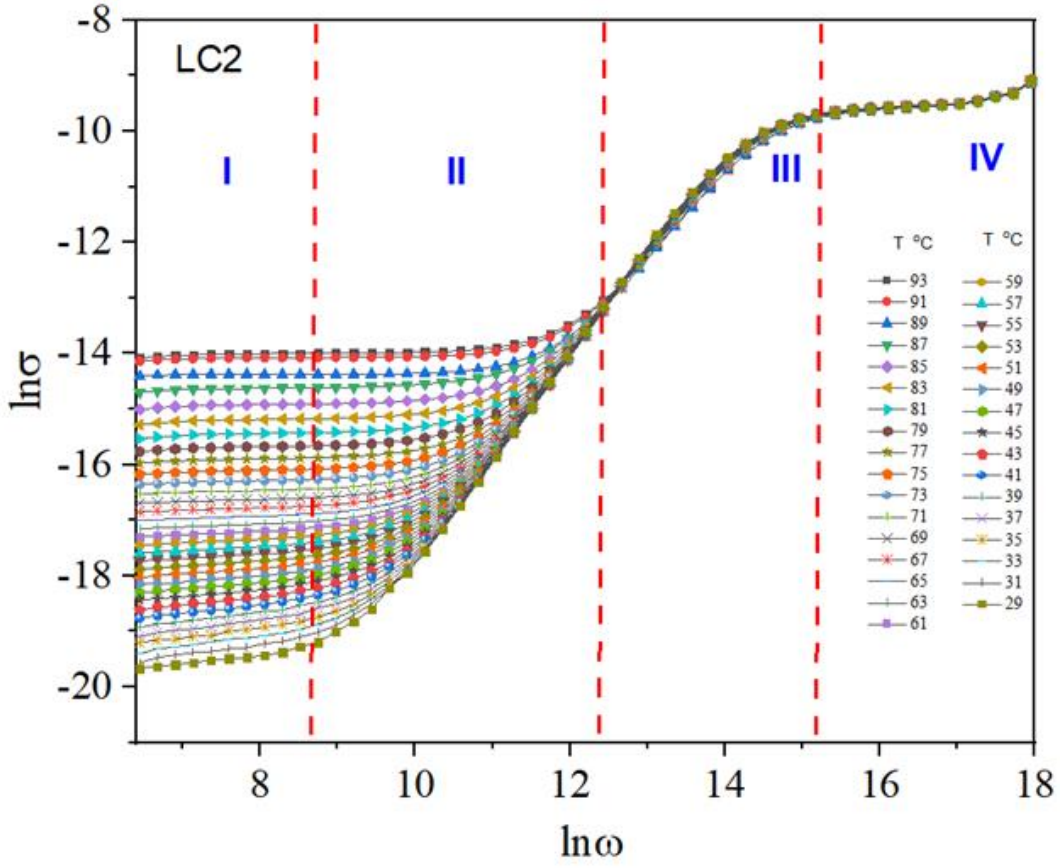
Şekil 5.10 LC2'nin dielektrik sabitinin sanal kısmının (ε") açısal frekansa göre değişimi

LC2 sıvı kristalinin dielektrik gevşeme mekanizması Cole-Cole eğrileri sayesinde incelenmiştir. Cole-Cole eğrileri dielektrik depolama ile dielektrik kayıpların değişimini göstermektedir. LC2 sıvı kristal için soğutma sırasında faz geçişi sıcaklığına ulaştığı anda cole-cole eğrisininde çapının arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.11). Çapın artması sıvı kristal durumunda yönelmenin arttığını kanıtlamaktadır.



Şekil 5.11 LC2'nin Cole-Cole eğrileri

LC2 için frekans üssünün sıcaklık bağımlılığı ve farklı sıcaklıklar için s değeri, Şekil 5.12 grafiği eğimlerinden hesaplanabilir, elde edilecek eğim sonuçlarından sıcaklığa bağlı olarak göstermiş olduğu mezofaz için iletkenlik mekanizması bölgelere göre belirlenebilmektedir.

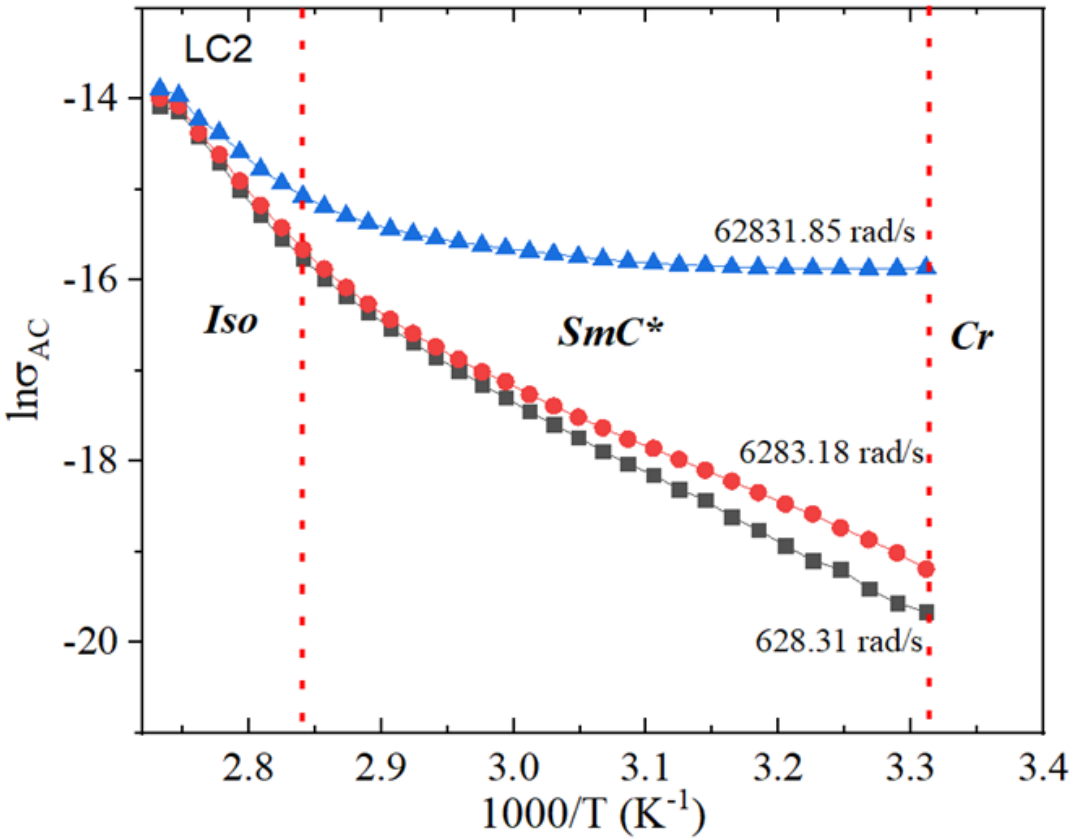


Şekil 5.12 LC2'nin $\ln \sigma_{AC}$ - $\ln \omega$ grafiği

Arrhenius denklemi

$$\sigma = \sigma_0 exp(\frac{E_a}{k_b T}) \quad (5.1)$$

(5.1) bağıntısı sayesinde iletkenlik ve sıcaklık arasındaki ilişki açıklanır. Denklem içerisinde σ_0, üstel fonksiyon, E_a aktivasyon enerjisi, k_b Boltzman sabiti ve T ise sıcaklığı temsil eder. Arrhenius AC iletkenlik grafiği LC2 için Şekil 5.13 çizilmiştir.



Şekil 5.13 LC2'nin $\ln \sigma_{AC}$ - $1000/T$ grafiği

Sıcaklığa bağlı olarak iletkenlik mekanızması eğimleri mezofazlar için belirlenebilmektedir. Buna göre LC2 için SmC*, Cr ve Iso fazları için faz bölgeleri Şekil 5.13 da gösterilmektedir.

6
SONUÇ

Bu çalışmada organik kimya grubumuz tarafından sentezlenmiş olan 2 farklı kiral sıvı kristalin (LC1 ve LC2) dielektrik özellikleri karşılaştırılarak detaylı çalışılması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ile LC1 ve LC2 sıvı kristalleri için farklı sıcaklıklarda dielektrik sabitinin gerçek kısmının açısal frekansa bağlı durumu incelendiğinde faz geçiş sırasında kompleks dielektrik sabitinin reel kısmının aniden yükseldiği frekansa bağlı olarak gözlemlenmiştir. Bu ani geçişlerin faz geçiş aşamasında olduğu saptanılmıştır. LC1 ve LC2 için dielektrik sabitlerinin sanal kısımlarının (ε″) açısal frekansa bağlı eğrilerinden relaksasyon pikleri elde edilmiş burada sıcaklığa bağlı ölçümlerde piklerin davranışları molekülün yönelimi hakkında bilgi verdiği sonucuna ulaşılmıştır. LC1 ve LC2 sıvı kristallerinin Cole-Cole eğrileri incelendiğinde eğrinin çapının arttığını, dielektrik depolama ve dielektrik kayıp değişimleri görülmektedir.

LC1 ve LC2 için farklı sıcaklık aralıklarında dielektrik özelliklerindeki ani değişimlerin olduğu sıcaklıkların, faz geçiş sıcaklıkları analizlerinde sıklıkla kullanılan PM ve DSC den elde edilen faz geçişleriyle benzer sonuçlar elde edilmiş ve DS yönteminin de PM ve DSC'ye alternatif bir metod olarak literatüre katkı sağlayacağı belirlenmiştir. Dielektrik Spektroskopi yöntemi ile hesaplanan ölçümler için origin programı ile elde edilen grafikler LC1 ve LC2 için göstermektedir ki sıvı kristaller için dielektrik ölçümler teknolojik uygulamalarda kullanımı ve göstermiş olduğu mezofaz tanımlanması için kıymetli bilgiler vermektedir.

KAYNAKÇA

[1] B. Bahadur, Liquid Crystals Applications and Uses, First Edition, World Scientific, Singapore, 1990.

[2] G. Karanlık G, H. Ocak , B.B. Eran, "Imine based chiral liquid crystals: Effect of varying the terminal substituent and orientation of ester linking unit," J. Mol. Liq., 275: 567-577, 2019.

[3] J.J. Hwang, S.N. Iyer, L.S. Li, R. Claussen, D.A. Harrington, S.I. Stupp, "Self -assembling biomaterials: Liquid crystal phases of cholesteryl oligo(l-lactic acid) and their interactions with cells", PNAS, 99(15): 9662– 9667, 2002.

[4] J. Ignés-mullol, A.K. Schwartz, "Shear-induced molecular precession in a hexatic Langmuir monolayer", Nature, 410: 348–351, 2001.

[5] M. Matsusaki, T.H. Thi, T.Kaneko, M. Akashi, "Enhanced effects of lithocholic acid incorporation into liquid-crystalline biopolymer poly(coumaric acid) on structural ordering and cell adhesion", Biomaterials, 26: 6263–6270, 2005.

[6] H. Liu, H. Nohira, "Synthesis of semi-perfluorinated FLCs and the effect of fluorination extent on mesomorphic properties Liquid Crystals", Molecular Crystals and Liquid Crystals Science and Technology, 302: 1235- 1240, 1997.

[7] I.Sage, Ullmann's Encyclopedia, A 15. 24 , 1990.

[8] R. Reddy, B.K. Sadashiva, U. Baumeister, "Liquid Crystalline Properties of Unsymetrical Bent -Core Compounds Containing Chiral Moieties", J. Mater. Chem., 15: 3303-3316, 2005.

[9] Ç. Yörür Göreci "Muz şekilli sıvı kristallerin sentezi, karakterizasyonu ve mesomorfik özelliklerinin incelenmesi ", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.

[10] S.Kumar, Liquid Crystals, Cambridge University Press, Cambridge, USA, 2001.

[11] S.S Kwon, T.S Kim, C.K. Lee, S.T. Shin, L.T. Oh, E.J. Choi, S.Y. Kim, L.C. Chien, "Ferroelectric Liquid Crystals from Bent-Core Molecules with Vinyl End Groups", Bull. Korean Chem. Soc., 24(3):274-278, 2003.

[12] P.J. Collings, "Ferroelectric Liquid Crystals: The 2004 Benjamin Franklin Medal in Physics Presented to Robert B. Meyer of Brandeis University", Journal of the Franklin Institute, 342:599-608, 2005.

[13] D. Shen, A. Pegenau, S. Diele, I.Wirth, C. Tschierske, "Molecular Design of Nonchiral Bent-Core Liquid Crystals with Antiferroelectric Properties", J. Am. Chem. Soc., 122:1593-1601, 2000.

[14] M. Okutan, F. Yakuphanoglu, O. Köysal, M. Durmus ve V. Ahsen, "Dielectric spectroscopy analysis in employing liquid crystal phthalonitrile

derivative in nematic liquid crystals,",Spektro Chemica Art A Part A, vol. 67, pp. 531-535, 2006.

[15] M. B. Pandey, R. Dabrowski ve R. Dhar, "Investigation of Relaxation Processes in Anticlinic Smectic C Phase of Liquid Crystals by Dielectric Spectroscopy,",Physica B, vol. 387, no. 1–2, pp. 25-31, 2007.

[16] T. Aldanma, "Lazerin Polimer, Boyar Maddesi ve Karbon Tanecikleri Katkılandırılmış Sıvı Kristallerin Dielektrik Anizotropi Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2007.

[17] B. Coşkun, "Sıvı Kristallerin Elektro-optik ve Faz Geçişi Özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, pp.40, 2007.

[18] K. Ate, "6CB, 8CB, 8OCB Sıvı Kristallerin ve Karışımlarının Dielektrik ve İletkenlik Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, 2010.

[19] S. Kumaria, I. M. L. Das, R. Dhar ve R. Dabrowski, "Thermodynamic and Dielectric Spectroscopy of A Racemic Antiferroelectric Liquid Crystal,",Journal of Molecular Liquids, vol. 168, pp. 54-60, 2012.

[20] G. Önsal, "Polimer - Sıvı Kristal Kompozit Yapılarda Azo Boyanının Dielektrik ve Opto-Elektronik Özelliklere Etkisi", Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, 2019.

[21] Z. Ekici, "Sıvı Kristaller, Genel Özellikleri, Sıvı Kristallerin Sentezi ve Uygulama Alanları", Yüksek Lisans Tezi, Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adıyaman, 2014.

[22] A. Yıldız, "Sıvı Kristallerde Faz Geçiş Sıcaklıklarının Dielektrik Spektrosobi Yöntemi ile İncelenmesi", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2019.

[23] M. Beken, "A new tool for prediction of phase transitions in liquid crystals," Sakarya University Journal of Science, 22(4), 1086-1094, 2018.

[24] E. Kemikoğlu, T. Ülker, "Development of a Novel Liquid Crystal Sensor for Pollen Detection, " Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 22(64), 309-313, 2020.

[25] L. Lam, "Solitons in Liquid Crystals : Recent Developments,",Chaos, Solitons & Fractals, vol. 5, no. 12, pp. 2463-2473, 1995.

[26] J. Hemine, A. Daoudi, C. Legrand, A. El Kaaouachi, A. Nafidi, M. Ismaili, N. Isaert ve H. T. Nguyen, "Electro-Optic And Dynamic Studies of Biphenyl Benzoate Ferroelectricliquid Crystals", Physica B, vol. 405, no. 9, pp. 2151-2156, 2010.

[27] B. Karaağaç, "Kiral Sıvı Kristallerin Sentezi, Karakterizasyonu ve Faz Davranışlarının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.

[28] S. Avcı, "Ferroelektrik Sıvı Kristal Karışımlarındaki Smektik Faz Geçişi Sırasında Eğim Açısı ve Kendiliğinden Kutuplanmanın Sıcaklık

Bağımlılığının Belirlenmesi",Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.

[29] D. Ceylan Erdoğan, "Yeni Kiral Kalamitik Sıvı Kristallerin Sentezi, Karakterizasyonu ve Biyomalzeme Özelliklerinin İncelenmesi", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2021.

[30] M. Kılıç, M. Can, N. Avcı, A. E. Mamuk. Kolesterik Sıvı Kristal-Polimer Liflerinin Elektro-eğirme Yöntemi ile Üretilmesi ve İncelenmesi. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 13(4), 1661-1680, 2023.

[31] J. Hoogboom, J. A. A. W. Elemans, E. A. Rowan, T. H. M. Rasing ve R. J. M. Nolte "The Development of Self-assembled Liquid Crystal Display Alignment Layers", Philosophical Transactions of the Royal Society, 365(1855): 1553-1576, 2007.

[32] Kent State University, Liquid Crysral Institute, History of Liquid Crystals, http://www.lci.kent.edu/lc_history.html#anchor8818, 20 Eylül 2011

[33] Q. Y. Zhang-Can, L. Ji-Xing, ve X. Yu-Zahang, (1999). Geometric Methods in the Elastic Theory of Membranes in Liquid Crystal Phases, First Edition World Scientific, Singapore, 1999.

[34] R. Achten, A. Koudijs, M. Giesbers, A. T. M. Marcelis, E. J. R. Sudhölter, Liquid Crystals, 32: 277-285, 2005.

[35] Y. Aoki, K. Matsushima, T. Taroura, T. Hirose, H. Nohira, Mol. Cryst. Liq. Cryst., vol. 398,pp. 189-193, 2003

[36] G. H. Brown, W. G. Shaw, "Mesomorphic State – Liquid Crystals", Chemical Reviews, vol. 57,pp. 1049-1157, 1957.

[37] B. Donino, D. Guillion, R. Deschenaux, D. W. Bruce ,Comprehensive Coordinaton Chemistry II, Oxford, Chapter 7.9, 357-627, 2003

[38] P. Espiret, Coord. Chem. Rev., 117: 215. 18, 1992.

[39] H. Kekler, R. Hatz, Handbook of Liquid Crystals, Verlag Chemie, Weinheim, 1980.

[40] M. Erdoğan, "Sıvı Kristal Kompozitlerin Dielektrik Özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021.

[41] S. Nuray, "Siyano Rezorsinol Merkezi Üniteli Asimetrik Muz Şekilli Mesogenlerin Sentezi,Karakterizasyonu ve Mesomorfik Özelliklerin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.

[42] F. Guittard, E. T. Givenchy, S. Geribaldi, A. Cambon, "Highly Fluorinated Thermotropic Liquid Crystals: An Update", J. Fluorine Chem., vol.100, pp 85-96,1999.

[43] H. Kara, "Muz tipi sıvı kristallerin faz geçişi parametrelerinin dielektrik spektroskopi yöntemi ile karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2022.

[44] G. W. Gray, Moleculer Structure and Properties of Liquit Crystals. New York: Clarendon Press, 1962.

[45] H. Altındiş Abdulkadir, “Dispers turuncu boya katkılı nematik sıvı kristallerin yolcu-hancı tipi sistemlerde uygulanabilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.

[46] D. Demus, “PlenaryLecture. One hundred years of liquid-crystal chemistry: Termotropic liquid crystals with conventional and unconventional molecularstructure”, Liquid Crystals, vol. 5(1), pp 75-110, 1989.

[47] D. Vardar, “Piridin esaslı kiral kalamitik sıvı kristaller”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü 2019.

[48] P. J. Collings ve M. Hird, “Introduction to Liquid Crystals,” 2001.

[49] P. Caglar, H. Ocak, N. Yılmaz Canli, A. Yildiz, M. Okutan ve B. Bilgin Eran, “The synthesis and dielectric characterization of alow temperature smectic a liquid crystal,” Mater. Res. Express, vol. 6, pp. 1-9, 2019.

[50] P.Gebhardt, Synthesis and Characterisation of New Polymerisable Mesogens Containing Fluorene Moieties, license thesis, Department of Chemistry and Biology, Germany, 2006.

[51] D. Andrienko, “Introduction to liquid crystals”, Journal of Molecular Liquids, vol. 267, pp. 520–541, 2018.

[52] J. M. Ball, E. Feireisl, F. Otto, Mathematical Thermodynamics of Complex Fluids, Springer, Italy, 2015.

[53] S. Avcı ,“Ferroelektrik sıvı kristal karışımlarındaki smektik faz geçişi sırasında eğim açısı ve kendiliğinden kutuplanmanın sıcaklık bağımlılığının belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014

[54] I. Dierking, Textures of Liquid Crystals, Wiley-VCH, Weinheim, 2003.

[55] G. Erol , “Bifenil türevi muz şekilli kiral sıvı kristallerin sentezi, karakterizasyonu ve elektro-optik özelliklerinin incelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü”, Yüksek Lisans Tezi, 2016.

[56] P. J. Collings ve M. Hird, Introduction of Liquid Crystals, Taylor and Francis Ltd., London, 1997.

[57] M. Nakata, Liquid Crystal Textures and Phases: A Short Tutorial, http://bly.colorado.edu/lcphysics/textures/, 12 Ekim 2011

[58] H. Fröhlich, Theory of Dielectrics: Dielectric Constant and Dielectric Loss, ser. Monographs on the physics and chemistry of materials. London: Clarendon Press, 1949.

[59] H. Takezoe ve Y. Takanishi, “Bent-Core Liquid Crystals: Their Mysterious and Attractive World,”,Japanese Journal of Applied Physics, vol. 45, no. 2A, pp. 597- 625, 2006.

[60] G. Gray, V. Vill, H. Spiess, D. Demus, ve J. Goodby, Physical Properties of Liquid Crystals. Manchester: Wiley, 2009.

[61] H. Melik “Sıvı kristallerde moleküler yönlendirme ve elektrooptik etkiler ” ,Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü , 2010.

[62] F. Akkurt, "Dipers turuncu boya ve karbon nanopartikül katkılı nematik sıvı kristallerin karakterizasyonu ve uygulanabilirliğinin araştırılması", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü , 2009.

[63] H. Pellat, "Des diélectriques et de leur polarisation réelle," Physique, vol. 9, p. 313, 1900.

[64] I. Dierking, Textures of Liquid Crystals. New York: Wiley, 2006.

[65] A. Nesrullazade, H. Yurtseven ve H. Kazancı, Sıvı Kristaller : Yapıları, Özellikleri, Uygulamaları, İzmir: Ege Üniversitesi Basımevi, 2000.

[66] Feymann, Leighton, Sands, "Feymann Fizik Dersleri", Alfa Bilim, vol. 2, İstanbul, 2014.

[67] Aydınlatma portalı,

https://aydinlatma.org/kondansator-nedir-nasil-calisir.html#google_vignette ,

03.01.2019.

[68] Aysel Büyükbaş, "AuGe/SiO2/p-Si/AuGe (MOS) Kapasitörün Elektrik ve Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015.

[69] Elektrikinfo, https://elektrikinfo.com/dielektrik/ , 2019

[70] H. Zengin ,"Dimetilamonyum - montmorillonit kompleksinin dielektrik özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.

[71] H. Ocak, "Yeni sıvı kristal sistemlerin sentezi, karakterizasyonu ve mesomorfik özelliklerinin incelenmesi", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.

[72] S. Mutlu Yaniç, "Kalamitik sıvı kristallerin termodinamik özellikleri ve polimerde dağılmış sıvı kristal kompozitlerinin sentezi ve karakterizasyonu", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.

[73] Ata teknik ,

https://atateknik.com.tr/urun/insize-ism-pol1000-polarizasyon-mikroskobu/

[74] ODTÜ merkez lap,

https://merlab.metu.edu.tr/tr/diferansiyel-taramali-kalorimetre-dsc

[75] Prof. Dr. Bilsen Beşergil,

https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_118.html

[76] E. Lökçü, " Spinel mikrodalga dielektrik seramiklerinin polimerik jel yöntemi ile üretimi ve karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.

[77] İnstec, http://www.instec.com/portal/article/index/id/93/cid/66.html

[78] B. Bilgin Eran, A. Nesrullajev ve N. Yılmaz Canlı, "Characterization and investigation of the mesogenic, thermo–morphologic and thermotropic properties of new chiral(s)–5–octyloxy–2–[4–(2–methylbuthoxy)–phenylimino(methyl]phenol liquid crystalline compound,",Materials Chemistry and Physics, vol. 111, no. 2– 3, pp. 555–558, 2008.

[79] M. Uyunmaz, “Kalamitik sıvı kristallerin mesomorfik ve elektro-optik özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi ,Fen Bilimleri Enstitüsü, 2023.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

[1] İ. Kara, D. Vardar, A. E. Bulgurcuoğlu, N. Yılmaz Canlı, B. Bilgin Eran"The temperature effect on dielectric properties of ((S)-4-(3,7-Dimethyloctyloxy)phenyl 6-(4-dodecyloxyphenyl) pyridine3-carboxylate) liquid crystal", Turkish Physical Society 39 th International Physics Congress , Bodrum, Turkey, 31 August - 4 September, 2023, ss.348.

Projeler

[1] Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü FYL-2023-5676 **" Kiral Smektik Sıvı Kristallerin Dielektrik Özellikleri''** Proje Yürütücüsü: Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI, Proje Öğrencisi: İlkay KARA