T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SIVI KRİSTAL KOMPOZİTLERİN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ

Müge ERDOĞAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Fizik Anabilim Dalı
Fizik Programı

Danışman
Doç. Dr. Nimet YILMAZ CANLI

Ocak, 2021

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SIVI KRİSTAL KOMPOZİTLERİN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ

Müge ERDOĞAN tarafından hazırlanan tez çalışması 21.01.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Fizik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Nimet CANLI
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Nimet CANLI, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Bahire Filiz ŞENKAL, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Doç.Dr. Yeşim Lenger ÖZCANLI, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Nimet YILMAZ CANLI sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Sıvı Kristal Kompozitlerin 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.

Müge ERDOĞAN

İmza

Babaannem Ayla Hanım'a,

Biricik Eşim Ahmet Cem Bey'e

Sevgili Oğlum Uygar Noyan Bey'e

ve

Şu an Yanımızda Olamayan Babam Oğuz Bey'e

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarımı sunduğum bu tezde, ilk olarak değerli biricik hocam beni kızım diye seven Doç.Dr. Nimet YILMAZ CANLI'ya bana bu süreçte ışık tuttuğu ve hep destek olduğu için canı gönülden teşekkürlerimi sunarım.

Beni bugünlere getiren babaannem Ayla Hanım'a, sözümün arkasında durduğumu bilen göçüp giden babama, değerli eşim Ahmet Cem'e, tüm bu süreçte yanımda olan biricik oğlum Uygar Noyan'a, yardımını esirgemeyen Ezgi AZ'a ve Hatko Electronics ailesine minnettarlığımı belirtir, yaptıkları tüm fedakarlıklar için sonsuz teşekkür ederim.

Müge ERDOĞAN

İmza

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR iv

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

TABLO LİSTESİ xii

ÖZET xiii

ABSTRACT xv

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1

1.2 Tezin Amacı 7

1.3 Hipotez 8

2 SIVI KRİSTALLER 9

2.1 Kısa Tarihçe 9

2.2 Sıvı Kristallerin Genel Özellikleri 11

2.3 Sıvı Kristallerin Sınıflandırılması 12

2.3.1 Termotropik Sıvı Kristaller 13

2.3.2 Liyotropik Sıvı Kristaller 18

2.4 Sıvı Kristallerin Fiziksel Özellikleri 18

2.4.1 Optik Özellikler 18

2.4.2 Sıvı Kristallerin Manyetik ve Elektriksel Özellikleri 19

2.4.3 Dielektrik Özellikleri 19

2.5 Sıvı Kristallere Ait Tekstürler 20

3 DİELEKTRİK SPEKTROSKOPİSİ 22

3.1 Dielektrik Sabiti 22

3.2 Kutuplanma P 24

3.3 Moleküller Dipoller 24

3.4 Kutupsal Moleküller Yönlendirme Kutuplanması 24

4 MATERYALLER VE YÖNTEM 27

4.1 Karakterize Edilen Sıvı Kristaller 27

4.1.1 LC1 Sıvı Kristal Bileşiği 28

4.1.2 5CB ve 5CB+%1 LC2 Sıvı Kristal Kompoziti 31

4.2 Sıvı Kristal Hücrelerin Hazırlanması 33

4.3 Kullanılan Cihaz ve Yardımcı Gereçler 35

5 DENEYSEL SONUÇLAR 40

5.1 LC1 Sıvı Kristal Bileşiği 40

5.2 5CB+%1 LC2 Sıvı Kristal Kompozitin Dielektrik Özellikleri 44

6 SONUÇ VE ÖNERİLER 53

Kaynakça 54

Tezden Üretilmiş Yayınlar 63

SİMGE LİSTESİ

σ_{AC}	AC İletkenlik
ω	Açısal Frekans
E_a	Aktivasyon Enerjisi
p_b	Bağlı Yük Yoğunluğu
ε_r	Bağıl Geçirgenlik
k_B	Boltzman Sabiti
ε_0	Boşluğun Dielektrik Geçirgenliği
μ_0	Boşluğun Manyetik Geçirgenliği
C	Kapasitans
σ_{DC}	DC İletkenlik
μ	Dipol moment
ε_s	Düşük Frekanslarda Dielektrik Katsayısı
E	Elektrik Alan
χ_e	Elektrik Alınganlığı
V	Elektriksel Potansiyel
D	Elektrik Yer Değiştirme
s	İletkenlik Üssel Yasa Katsayısı
W	İş
Iso	İzotropik Faz
ε^*	Kompleks Dielektrik Katsayısı
ε'	Kompleks Dielektrik Katsayısının Reel Kısmı
ε''	Kompleks Dielektrik Katsayısının Sanal Kısmı

Cr	Kristal Faz
α	Kutuplanabilirlik
P	Kutuplanma
F	Kuvvet
p_f	Serbest Yük Yoğunluğu
SmA	Smektik A
SmB	Smektik B
SmC	Smektik C
τ	Tork Vektörü (Elektrik Alan Kaynaklı)
V	Volt
ε_∞	Yüksek Frekanslarda Dielektrik Katsayısı

KISALTMA LİSTESİ

3B	3-boyutlu
5CB	4-siyano-4'-pentilbifenil
AC	Alternatif akım
Col	Kolumnar fazı
DC	Doğru akım
DSC	Diferansiyel tarama kalorimetresi (Differential scanning calorimetry)
DST	Dielektrik spektroskopisi tekniği
I	İzotropik faz
ITO	İndiyum kalay oksit (indium-tin-oxide)
K	Kristal faz
LC1	5-(10-undekeniloksi)-2-[[(4-hekziloksifenil)-imino]metil] fenol
LC2	3'-{4-[4-((S)-3,7-Dimetiloktiloksi) benzoiloksi] benzoiloksi}-4- {4-[4-(Desiloksi) benzoiloksi] benzoiloksi} bifenil
NMR	Nükleer manyetik rezonans
PM	Polarizasyon mikroskobu
SmA	Smektik A fazı
SmB	Smektik B fazı
SmC	Smektik C fazı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Sıvı kristallerin tarihsel gelişimi ve uygulama alanları [47]. ……10

Şekil 2.2 Sıvı kristal fazı gösteren bir malzemenin hal değişimi [28]. ……11

Şekil 2.3 Sıvı kristallerin sınıflandırma şeması. ……13

Şekil 2.4 Diskotik sıvı kristallerin (a) molekül şekli (b) genel yapısı [56,57]. ……14

Şekil 2.5 Vorländer'ın sentezlediği muz şekilli sıvı kristalin genel yapısı [59]. ……14

Şekil 2.6 Smektik A (SmA) mezofazına ait moleküler dizilim. ……17

Şekil 2.7 Smektik C (SmC) mezofazına ait moleküler dizilim. ……17

Şekil 2.8 Sıvı kristal tekstür örnekleri [28]. ……21

Şekil 3.1 Dielektriğe sahip bir sığaç ve **E** çizgileri. ……23

Şekil 3.2 Levhaları arasında iletken bulunan dielektriğe sahip bir sığaç ve **E** çizgileri……23

Şekil 3.3 Bir **E** maruz bırakılmış bir dipol. ……25

Şekil 4.1 Sıvı kristal malzemelerin molekül yapıları (a) 5CB (b) LC1 (c) LC2. ……27

Şekil 4.2 LC1 bileşiğinin ısıtma (a) ve soğutma (b) sırasındaki DSC termogramları [42,43]. ……29

Şekil 4.3 LC1 bileşiği'nin SmA mesofaz tekstürü (büyütme x100). ……30

Şekil 4.4 LC1 bileşiği'nin soğutma sırasında polarizasyon mikroskobu altında farklı sıcaklık değerlerindeki (a) izotropik faz halinin (b), (c), (d), izotropik fazdan smektik A mezofazına geçişinin (e), (f), (g), (h) smektik A (SmA) mezofazının ve (ı) kristal fazın gösterdiği tekstürler [42,43]. …… 30

Şekil 4.5 LC2 bileşiğinin ısıtma (a) ve soğutma (b) sırasındaki DSC termogramları. …… 32

Şekil 4.6 LC2 bileşiği'nin B1 mesofaz tekstürü…… 33

Şekil 4.7 Instec, Inc şirketinden alınan özel sandviç hücre tabakaları [70]. …… 33

Şekil 4.8 Deneyde kullanılan sıcaklık gradyentine sahip Kohler bankası…… 34

Şekil 4.9 Deneyde kullanılan sıvı kristallerin Kohler bankası ile hücrelere doldurulması. …… 34

Şekil 4.10 (a)Polarizasyon mikroskobu[73] ve (b)çalışma prensibinin çizimi [74). …… 35

Şekil 4.11 DSC'nin çalışma prensibi çizimi [75]…… 36

Şekil 4.12 Dielektrik spektroskopisi ölçüm düzeneği. …… 37

Şekil 4.13 İdeal Cole-Cole eğrisi. …… 39

Şekil 5.1 LC1 sıvı kristal bileşiğine ait dielektrik sabitinin gerçek kısmının sıcaklığa bağlı ölçümleri [42,43]. 40

Şekil 5.2 LC1 sıvı kristal bileşiğine ait dielektrik sabitinin gerçek kısmının açısal frekansa bağlı ölçümleri [42,43]..... 41

Şekil 5.3 LC1 sıvı kristal bileşiğine ait dielektrik sabitinin sanal kısmının açısal frekansa bağlı ölçümleri [42,43]..... 41

Şekil 5.4 LC1 sıvı kristal bileşiğine ait seçili sıcaklık aralığında çizilen Cole-Cole eğrileri [42,43]..... 42

Şekil 5.5 LC1 sıvı kristal bileşiğine ait dielektrik sabitinin gerçek kısmının sıcaklığa ve açısal frekansa ait değişiminin 3 boyutta gösterimi [42,43]..... 43

Şekil 5.6 LC1 sıvı kristal bileşiğine ait dielektrik sabitinin sanal kısmının sıcaklığa ve açısal frekansa ait değişiminin 3 boyutta gösterimi [42,43]..... 43

Şekil 5.7 5CB sıvı kristal bileşiği (a) 5CB+%1 LC2 sıvı kristal bileşiğinin (b) dielektrik sabitinin gerçek kısmının açısal frekansa bağlı ölçümleri..... 45

Şekil 5.8 5CB sıvı kristal bileşiği (a) 5CB+%1 LC2 sıvı kristal bileşiğinin (b) dielektrik sabitinin sanal kısmının açısal frekansa bağlı ölçümleri..... 47

Şekil 5.9 5CB sıvı kristal bileşiği (a) 5CB+%1 LC2 sıvı kristal bileşiğine ait seçili sıcaklık aralığında çizdirilen Cole-Cole eğrileri. 48

Şekil 5.10 Farklı frekanslarda 5CB sıvı kristal bileşiği (a) 5CB+%1 LC2 sıvı kristal bileşiğine ait C-V grafikleri..... 50

TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1 LC1 bileşiğinin faz geçiş sıcaklıkları (^{o}C) ve entalpi (Jg^{-1}) değerleri [42,43]. 28

Tablo 4.2 LC2 bileşiği'nin faz geçiş sıcaklıkları (^{o}C) ve entalpi (Jg^{-1}) değerleri. 31

Tablo 4.3 (4.1) ve (4.2) denklemlerin içerisinde kullanılan ifadelerin anlamları. 38

Tablo 5.1 5CB için dispersiyon eğrilerinden hesaplanan dielektrik parametreleri. 51

Tablo 5.2 5CB+%1 LC2 için dispersiyon eğrilerinden hesaplanan dielektrik parametreleri. 52

ÖZET

Sıvı Kristal Kompozitlerin Dielektrik Özellikleri

Müge ERDOĞAN

Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Nimet YILMAZ CANLI

Bu çalışma iki ana bölümden oluşmaktadır. Birinci kısımda Smektik A mesofaz gösteren LC1 sıvı kristalinin, ikinci kısımda ise 5CB+%1 LC2 sıvı kristal kompozit malzemenin dielektrik parametreleri empedans spektroskobisi tekniğiyle incelenmiştir. Tezin ilk bölümünde LC1 sıvı kristalinin sahip olduğu bütün faz geçişlerini içeren uygun sıcaklık değerlerindeki dielektrik analizleri yapılmıştır. Dielektrik analizleri, frekansa ve sıcaklığa bağlı olarak ölçümler sayesinde belirlenen bu sıvı kristalin dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımlarının analizleri, dielektrik rahatlama, Cole-Cole eğrilerinin analizleri yapılmıştır. Tezin ikinci bölümünde ise 5CB+%1 LC2 sıvı kristal kompozit malzemenin dielektrik parametreleri uygulanan farklı gerilimlerde belirlenmiş, 5CB sıvı kristalinin dielektrik parametreleri ile kıyaslanmıştır. Tüm bu analiz sonuçları ve ölçüm sonuçları sayesinde ortaya çıkan yöntem sıvı kristale ve kompozite ait faz geçişlerinin tespitinin yapılmasında farklı bir seçenek aynı zamanda da diğer

yöntemlere ek bir dayanak olacaktır. Bunun yanı sıra, çalışma sırasında kullanılan sıvı kristal bileşikler uygulanan karakterizasyon sayesinde pek çok yönden analiz edilmiştir. Bu çalışma akademik bilgilerin literatüre katılmasına yardımcı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Sıvı kristal, smektik A, DSC, PM, dielektrik.

ABSTRACT

Dielectric Properties of Liquid Crystal Composites

Müge ERDOĞAN

Department of Physics

Master of Science Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI

This study consists of two main parts. In the first part, dielectric parameters of LC1 liquid crystal showing Smetic A mesophase and in the second part, dielectric parameters of 5CB+%1 LC2 liquid crystal composite material have been studied by the method of impedance spectroscopy. In the first part of the thesis, dielectric analyses of LC1 liquid crystal including its all-phase transition have been done. Dielectric analyses, the analyses of the real and imaginary part of dielectric constant of this liquid crystal determined by frequency and temperature dependent measurement, dielectric relaxation and the analyses of Cole-Cole curves have been done. In the second part of the thesis, dielectric parameters of 5CB+%1 LC2 liquid crystal composite material have been determined by different applied voltage and it has been compared with dielectric parameters of 5CB liquid crystal. The method arising with all the results of the analysis and of the measurements will be a different option for studying phase transition in liquid crystal composite as well as an additional basis for other methods. In addition to these, components of liquid crystal

that used in the study have been analyzed in many respects thanks to applied characterization. This study will help to add academic knowledge to the literature.

Keywords: Liquid crystal, smectic A, DSC, PM, dielectric.

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Sıvı kristal fazı gösterebilen moleküller, ilk kez 19. yüzyılın sonralarına doğru keşfedilmiştir [1] ve o günlerden günümüze kadar ki süreçte pek çok değerli bilim insanın araştırma konusu olarak halen daha merak uyandıran bir bilim dalı olmuştur [2, 3]. Sıvı kristal molekülleri, ekran uygulamalarında kullanılabilmeleri sebebiyle 1970'ten sonra, ileri teknolojik uygulamalar için önemli bir araştırma alanı olarak karşımıza çıkmaktadır [4, 5]. Gennes'in bu araştırma alanındaki yaptığı çalışmaların meyvesi ise, 20 yüzyılın sonlarına doğru ortaya çıkarak Nobel ödülü ile onurlandırılmıştır. Yakın zamanda yeni keşfedilmiş olan geleneksel, şekilli olmayan, V–şekilli ve muz–şekilli (bükülmüş–çekirdek) gibi farklı geometrilere sahip olan sıvı kristal mezogenlerle birlikte sıvı kristallerin sentezi ve karakterizasyon yöntemleri hakkındaki araştırmalara karşı merak uyandırılmasına sebep olmuştur ve bu alandaki çalışmaların önemini de arttırmıştır [6, 7].

Sıvı kristaller katı gibi düzenli, sıvı gibi akışkan oldukları için bu özellikleri sayesinde oldukça dikkat çeken farklı davranışlara sahip malzemelerdir. Bundan dolayı da pek çok bilim insanın merakını uyandırarak farklı alanlarda kullanılmışlardır ve pek çok farklı bilgiler edinilmiştir.

Örneğin 2007 yılında Köysal'ın yaptığı çalışmaya göre, fiziksel etkilere karşı yüksek hassasiyete sahip sıvı kristallerin farklı tipteki sensörlerin içinde kullanılabilmesi için çeşitli fiziksel özelliklerini incelemiştir [8].

Lazer ve sıvı kristaller ile yapılan çalışmalarda bulunmaktadır. 2017 yılında Fatma Yeşil'in yaptığı çalışmada Fréedericksz geçişini gözlemleyebilmek için bir düzenek oluşturulmuş ve bu düzenek için de birden fazla nematik sıvı kristaller kullanılmıştır [9].

2018 yılında Budagowsky ve çalışma grubu boya duyarlı nematik sıvı kristal polimerlerde optik Fréedericksz geçişi ve yönelim deformasyonunu araştırmışlardır ve polimer üzerine homojen olmayan ışığın etkisi çalışılarak faz geçişleri incelenmiştir [10].

Son yıllarda ise, solitron ve sıvı kristal fiber uygulamalarına da literatürde karşılaşılmaktadır. Yüksek yoğunluklu bir lazer ışını bir sıvı kristal malzemenin içerisine yerleştirildiği zaman, direktör molekülleri aynı sınırlı bir bölgede yeniden yönlendirerek ışığın kendi dalga kılavuzunu üretmesini sağlar. Dar bir kirişte kalan lazer ışığı kırılmaz. Solitron uygulaması, birkaç optik fiber arasında ışığı değiştirmek için adreslenebilir bir sıvı kristal dalga kılavuzuna neden olabilmektedir [11].

San Jose State Üniversitesindeki bir çalışma grubu tarafından 1994'te yayınlanan bir makalede, optik solitonlar, dönen manyetik alan altındaki nematikler, elektrokonvektif nematiklerde solitonlar, orantısız Smektik A'daki solitonlar, kiral Smektik C ve Smektik A sıvı kristallerinde ferroelektrikteki çevron yapısı için soliton modeli incelenmiştir [12].

2017 yılında Aleksandr Jonas'ın yürüttüğü sıvı kristallerin emülsiyon damlalarının anizotropik lazer kaviteleri olarak kullanılması adlı projede ise, optik tuzaklama ile tuzaklanan, bir konak sıvısında bulunan ve boya molekülü katkılı sıvı kristal emülsiyon mikro damlaları ile minyatür lazer kaynakları geliştirilmiş olup bu kaynakların özellikleri incelenmiştir [13].

Gaeta'nın yaptığı çalışmada ise, optik tuzaklama ile tuzaklanan, çözünmenin olmadığı bir konak sıvısında bulunan ve boya molekülü katkılı sıvı kristal emülsiyon mikro damlaları ile minyatür lazer kaynakları geliştirilmiş olup bu kaynakların özellikleri incelenmiştir [14].

Dielektrik spektroskopisi ile günümüz teknolojisi için gerekli olan hassas ölçümler alınabilmektedir. Sıvı kristallerin fiziksel özelliklerinin incelenmesi hakkında ülkemizdeki literatür tarandığında karşılaşılan çalışmalar şu şekilde özetlenebilir:

Özgan'ın ve Yazıcı'nın çalışmasında Modife Pople ve Karasz modeli kullanılarak düzen parametrelerin sıcaklıkla değişimi, katı-nematik, nematik-izotropik sıvı faz geçişleri ve teorik faz diyagramları incelenmiştir [15].

Okutan, Yakuphanoğlu, Durmuş, Köysal ve Ahsen katkılandırdıkları sıvı kristalin dielektrik anizotropilerini ve relaksasyon katsayılarını dielektrik metot kullanarak incelemişlerdir [16].

Aldanma, hazırlanan sıvı kristallerin dielektrik anizotropi özelliklerini dielektrik spektroskopisi yöntemiyle araştırmıştır. Lazer aydınlatması polimer, boya ve karbon nanotüp ile katkılandırılmış sıvı kristallerin dielektrik anizotropi değerlerinin nasıl değiştirdiği incelenmiştir. Sıvı kristallerin dielektrik mekanizması Cole ve Cole eğrileri ile analiz edilmiştir. Sıvı kristallerin elektriksel iletkenliğinin dik ve paralel bileşenleri frekansın bir fonksiyonu olarak ölçülmüştür. Sıvı kristallerin karanlık ve aydınlık şartlar altında akım-voltaj karakteristikleri araştırılmıştır [17].

Avcı (2013), çalışmasının birinci kısmında, termotropik nematik mezofazın monokristalik planar yönelmiş tekstürlerin nematik mezofazı ile izotropik sıvı arasındaki düz ve ters faz geçişlerinde optiksel geçirgenliğin ve soğurma katsayısının sıcaklığa bağımlılıkları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmanın ikinci ve üçüncü kısmında ise, 4- benzene halkalı L şeklindeki asimetrik bent core nematik sıvı kristallerin, çubuk-benzeri ve bent-core moleküllerin ikili karışımların dielektrik geçirgenliği, çift kırıcılığı, splay vizkositesi, akışkan vizkositeleri, splay ve bent elastik sabitlerinin sıcaklığa bağlılıkları incelenmiştir [18].

Ekici (2014) tez çalışmasında sıvı kristallerin, sıvı kristallerin genel özellikleri ve sıvı kristallerin oluşma nedenleri olan sıcaklık ve konsantrasyona bağlı olarak çeşitlerini incelemiştir. Ayrıca sıvı kristallerin sentezini, kimyasal ve fiziksel yapısını, sıvı kristallerin günümüzdeki kullanım alanlarını ve sıvı kristallerin ekran endüstrisinde incelemiştir [19].

Emül (2014) tez çalışmasında termotropik sıvı kristallerin temel özellikleri, Monte Carlo simülasyon tekniği ve polarize ışığın Mueller-Stokes ile incelemiştir. Daha

sonrasında Lebwohl-Lasher modelinde faz geçişi, faz geçiş sıcaklığı ve moleküllerin sıcaklığa bağlı yönelim dinamikleri ayrıntılı bir şekilde incelemiştir [20].

Özden (2017) sunulan bu çalışmada liyotropik sıvı kristal sistemlerin, termo-morfolojik, termotropik, termo-optiksel ve manyeto-optik özelliklerini incelemiştir. Farklı alkali zincir uzunluğuna sahip malzemeler çalışmanın konusunu oluşturmaktadır. İncelemeler ışığında liyotropik sıvı kristallerin faz diyagramları belirlenmiş; sıcaklık, konsantrasyon ve manyetik alana bağlı olarak tekstür dönüşümlerinin dinamiği incelenmiş ve optiksel kırma indisi ile elektriksel iletkenliğin sıcaklık ve konsantrasyona bağımlılığı ölçülmüştür [21].

Üstünel (2017) bu çalışmada ikili karışımlarında çift kırıcılık ölçümlerinden nematik düzen parametresini S, türetmiştir ve parametreleri test etmiştir [22].

Yıldırım (2017) tez çalışmasında ötektik sıvı kristal termal, yapı ve moleküler dinamik özelliklerine olan etkisi incelemiştir. Karışımın karakterizasyonu diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), X ışını kırınınımı, dielektrik spektroskopisi (DS) ile incelenmiştir [23].

Kemiklioğlu, Atik ve Çivi (2018) bu çalışma kapsamında, ilk olarak, mavi faz kolesterik sıvı kristal örnekleri hazırlamıştır. Hazırlanan bu numuneler içerisine farklı konsantrasyonlarda ve farklı kimyasal yapılardaki çeşitli polimerler eklenerek ultraviyole ışık altında polimerizasyonlarını yapmıştır. Ultraviyole ışığının yoğunluğu, polimerizasyon süresi polimerizasyonun tamamlanması açısından oldukça önemli olduğu için polimerzasyon koşulları optimize etmiştir. Polimerizasyonları tamamlanan numunelerin termal kararlılıkları, mekanik davranışları incelenmiştir. Polimerizasyon sonucunda incelenen numunelerde termal kararlılığın ve mekanik dayanıklılığın, kullanılan polimerin bir fonksiyonu olarak değiştiğini gözlemlemiştir [24].

Kocakülah (2018) bu çalışmada, kuantum nokta katkılı nematik sıvı kristalin elektro-optik ve dielektrik özelliklerini incelemiştir [25].

Önsal (2019) çalışmada sıvı kristal kompozit yapılarının dielektrik, opto-elektronik, morfolojik ve termal özelliklerini incelemiştir. Tez çalışmasının sonucunda, kompozit yapıya yapılan katkının dielektrik ve opto-elektronik özellikleri önemli ölçüde iyileştirdiği ve incelenen kompozit yapının performansını artırdığı görülmektedir. Çalışma sonuçları katkılı sıvı kristal temelli cihaz uygulamaları için uygun ve umut verici fonksiyonel malzemeler olabileceğini ve bu kompozitlerin teknolojik amaçlar için düşük enerji gerektiren cihazlarda kullanılabileceğini göstermektedir [26].

Okyay (2019) çalışmasında teorik olarak tasarlanmış bir sıvı kristal hücre içerisinden geçen ışığın polarizasyonunu ve iletim şiddetindeki değişimlerini, ışığın dalga boyuna, hücre geometrisine ve kalınlığına bağlı olarak sayısal yöntemlerle analiz etmiştir. Optik modelleme yöntemi olan Mueller matrislerini kullanmıştır [27].

Yıldız (2019) çalışmasında farklı sıvı kristallerin fiziksel özelliklerinin incelenmesinde dielektrik spektroskopi yöntemini kullanmıştır [28].

Mamuk'un (2019) doktora çalışması 5 bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın birinci bölümünde ilk olarak sıvı kristalinin nematik mezofazında termotropik ve termo-optik özellikler hem ısıtma hemde soğutma esnalarında incelenmiştir. Sıvı kristallerin teknik ve teknolojik uygulamalarda ısıtma-soğutma şartlarında kullanılması için termotropik, termo-morfolojik ve termo-optik özelliklerde termal histerezisin varlığının tespit edilmesi oldukça önemlidir. Diğer bölümde ise, ele alınan sıvı kristallerinin kırılma indisleri, çift kırılma değerlerinin sıcaklıkla değişimleri hem ısıtma hem de soğutma esnalarında incelenmiştir. Üçüncü bölümdeyse termotropik sıvı kristallerinin kendileri ve farklı oranlarda kütlece karışımları hazırlanmış olup elde edilen karışımların optiksel geçirgenliklerinin ve soğurma katsayısının sıcaklıkla değişimleri irdelenmiştir. Araştırmanın dördüncü bölümünde sıvı kristalin içinde bulunduğu sandviç hücrelerin kalınlıklarının faz geçişi, termotropik, termo-morfolojik özelliklerinin, heterofaz alanının sıcaklık ve doğrusal genişliklerinin üzerindeki etkileri incelenmiştir [29].

Tapkıranlı (2019) Bu tez çalışmasında grafen oksit ile katkılandırılan nematik sıvı kristalinin elektrik, optik ve termal özelliklerini incelemiştir [30].

Görülebildiği gibi ülkemizde, farklı sıvı kristallerin fiziksel özelliklerini belirlemek için farklı deneysel metotlara başvurularak, sentezlenen bileşikler kullanım alanlarına sunulmuştur. Ülkemizde birçok fiziksel özelliklere sahip olan sıvı kristalleri farklı metotlarla karakterize edilmeye çalışılmalarına rağmen, teknolojinin gelişmesi ile yeni sentezlenen malzemelere olan ihtiyaç sürekli artmakta ve yeni sentezlenen bu malzemelerin fiziksel özelliklerinin araştırılması gerekmektedir. Konu ile ilgili yurt dışı çalışmaları incelendiğinde ise;

Chernik ve Sokolova, inorganik ve yüzeyi aktif bir madde içeren malzemelerin fazlarının var olduğunu diferansiyel tarama kalorimetrisi kullanılarak açıklamaya çalışmışlardır [31].

Pandey, Dabrowski ve Dhar'ın (2006) çalışmasında antiferroelektrik malzemeyi belirli frekans değerleri arasında dielektrik spektroskopisi ile incelenmiştir [32].

Hemine, Legrand, Isaert, Kaaouachi ve Nguyen (2006) iki saf ferroelektrik sıvı kristalin elektro-optik ve dielektrik karakterizasyonları yapmışlardır [33].

Perkowski (2009) çalışmasında dielektrik geçirgenliklerin hücre özelliklerinin etkisini incelemiştir [34].

Kopcansky, Kovalchuck, Gornitskac, Vovk, Kovalchuck Tomasovicová, Koneracká, Timko, Závisová, Jadzyn, Éber ve Studenyak (2010) nano partiküllerin, planar yönlendirilmiş bir sıvı kristalin dielektrik özelliklerini nasıl etkilediğini frekansa bağlı olarak incelemişlerdir [35].

Hemine, Daoudi, Legrand, Kaaouachi, Nafidi, Ismaili, Isaert ve Nguyen (2010) çalışmasında Kiral Smektik C fazını gösteren üç sıvı kristal malzemenin elektro-optik ve dinamik özellikleri incelemişlerdir [36].

Malik, Raina, Bubnov, Chaudhary ve Singh'nin (2010) çalışmasında iki tane ferroelektrik sıvı kristal için elektro-optik ve dielektrik çalışmalar yapımışlardır [37].

Kumaria, Das, Dhar ve Dabrowski (2012) ise çalışmalarında belirli bir sıcaklıkta antiferroelektrik özellik gösteren bir sıvı kristalin fiziksel özelliklerini incelemek için dielektrik spektroskopisi yöntemini kullanmışlardır [38].

Soltani, Chemingui, Bouaziz, Marcerou ve Othman'nın (2016) çalışmasında ise sıvı kristalin mikroskobik yöntemler kullanarak fiziksel özelliklerini incelenmişlerdir [39].

Melo, Graça, Prezas, Valente, Almeida, Freire ve Bih (2016) mevcut çalışma, ele alınan sıvı kristallerin elektriksel iletkenliklerini ve ısıl işlem değişen elektriksel, dielektrik ve yapısal analizleri içermektedir [40].

Optiksel, dielektriksel özellikler, anizotropi, sıvı kristallerin tekstürleri gibi [41] bu moleküllere ait özeliklerin anlaşılması sayesinde sıvı kristallerin, karakterizasyonlarının doğru yapılabilmesi sağlanmaktadır. Bu karakterizasyonlar büyük önem teşkil etmektedir. Bu önemli karakterizasyon yöntemlerinden birisi de bu tez kapsamında da yararlanılacak olan dielektrik spektroskopisi yöntemidir [41].

1.2 Tezin Amacı

Faz geçiş esnasında sıvı kristal mesofazların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin incelenmesi, faz geçiş sıcaklıklarının, mesofazların sıcaklık aralıklarının belirlenmesi sıvı kristallerin teknolojide, sanayide vb. alanlarda uygulanması açılarından önemli bir konudur. Bu yüzden; çalışmamızın ilk aşamasında, grubumuz tarafından sentezlenmiş LC1 nolu sıvı kristal bileşiğinde sıcaklığın değişimi ile meydana gelen faz geçiş özelliklerinin dielektrik spektroskobi tekniği (DST) ile incelenmesi, yeni sıvı kristal sistemlerin, yeni uygulama alanlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmamızdan elde edilen bilgiler ile uluslararası bir bildirinin yanı sıra uluslararası seçkin hakemli dergide de yayımlanarak literatüre kazandırılması sağlanmıştır [42,43,44]. Çalışmamızın ikinci aşamasında

ise, teknolojide çok kullanılan 5CB sıvı kristalini %1 oranında LC2 nolu sıvı kristal ile katkılandırılarak hazırlanacak yeni sıvı kristal kompozitin DS tekniği ile uygulamalar açısından çok önemli olan elektro-optik özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Burada kullanılan 5CB ve LC2 nolu sıvı kristallerinin sentezi de başka araştırmaların konusu olmuştur ve bu sıvı kristallere ait değerli bilgiler de literatüre kazandırılmıştır [45].

1.3 Hipotez

Bu çalışmada organik kimya grubu öğrencileri tarafında sentezlenmiş olan 2 farklı sıvı kristal (LC1 [44]ve LC2 [45]) ve 5CB ticari sıvı kristalleriyle çalışılmıştır. İlk olarak LC1 bileşiğinin farklı sıcaklık aralıklarında dielektrik özelliklerinin nasıl değiştireceğinin dielektrik spektroskopisi yöntemiyle araştırılması amaçlanmıştır. İkinci aşama olarak %1 oranında LC2 sıvı kristal bileşiğini 5CB sıvı kristaliyle katkılandırılarak hazırlanan sıvı kristal kompozitin, uygulanan farklı gerilimlerde dielektrik parametrelerde nasıl değişime neden olacağının, dielektrik spektroskopisi (DS) yöntemiyle araştırılması planlanmıştır.

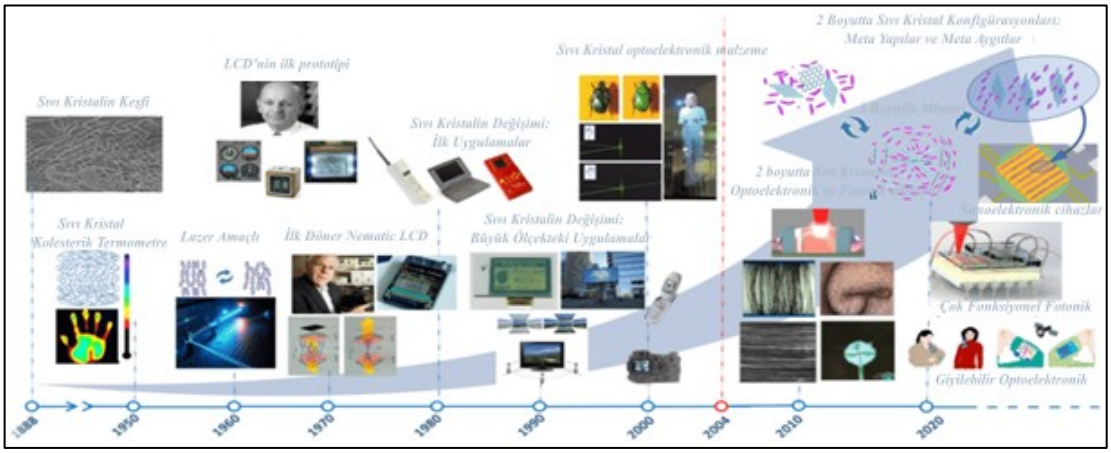
2
SIVI KRİSTALLER

2.1 Kısa Tarihçe

133 yıl önce keşfedilen sıvı kristallerin değerinin anlaşılması 50 yıla kadar sürmüş ve yaklaşık 80 yıl öncesinden günümüze kadar dayanan ciddi akademik çalışmalarda yerini almış ve günümüzde de halen bu çalışmalara devam edilmektedir. Friedrich Reinitzer, kolestrerik sıvı kristaller olarak adlandırılan kolestrolün farklı türevlerini fizik kanunlarını ve yöntemlerini kullanarak kimyasal özelliklerini tetkik etmiştir. Friedrich Reinitzer'in çalışmalarından önce ise, farklı araştırmacılar kolestrol türevleri malzemelerin üzerine polarize ışık düşürülüp sahip oldukları donma noktasına yakın daha düşük sıcaklıklara getirildiklerinde farklı renk desenleri ile karşılaşmışlardır. Ancak bu farklı renk desenlerinin oluşmasının sebebinin yeni bir ara faz olabileceğini düşünemediklerinden bu gözlemlerini açıklayamadılar ve çalışmalarına da yön verememişlerdir. Diğer araştırmacıların aksine Reinitzer tüm bunlardan farklı olarak, havuçtan elde edilen kolestrol benzoat türevlerindeki malzemelerin diğer bileşiklerdekine benzer bir erime süreci içermediğini dolayısıyla da bir erime noktasına sahip olmadığını fark etmiştir. Bu öngörüsünden yola çıkarak bu malzemelerin iki farklı erime noktası aralığının olduğunu düşünmüştür. Tüm bu gözlem ve tetkiklerini bir fizikçiden yardım alarak gözden geçirmek isteyen Reinitzer, Otto Lehman'a bir mektup yazarak yardım istemiştir ve bu yardım isteğini geri çevirmeyen Otto ile Reinitzer numuneleri kendi aralarında değişerek araştırmalarına devam etmişlerdir. Lehmann kendi yaptığı analiz sonuçlarından yola çıkarak bu malzemelerin içerisinde minik kristal yapıların varlığından bahsetmiştir. Lehmann ile Reinitzer arasındaki bu yardımlaşma ve numune analizi arkasında birçok açıklanamayan soruyla birlikte kısa süre sonra sona erdikten sonra Reinitzer sıvı kristallerin üç önemli özelliğini yaptığı araştırmaların ve tetkiklerin sonucu olarak, Lehmann'a ve Von Zepharich'in yardımlarından da bahsederek, Viyana Kimya Derneğinin mayıs ayındaki toplantısında sunmuştur ancak Reinitzer çalışmalarını daha ileriye

taşıyamamıştır. Lehmann Reinitzer'in çalışmalarını bu bileşiklerle devam etmiştir. Bu kapsamda, Lehmann doktora sonrası yaptığı çalışmalarında kristalografi ve mikroskopi alanında uzmanlaşmıştır ve bu alandaki uzmanlıklarını ilk olarak kolesterik benzoat ve benzer bileşikleri inceleyerek çift erime noktası hakkında araştırmalar yapmıştır. Tüm bu araştırmalarını ve yorumlarını da Zeitschrift für Physikalische Chemie'de yayımlamıştır. Lehmann'nın çalışmalarını sürdürebilmesi için gerekli olan sıvı akışkanların sentezini ise yıllar boyunca Alman kimyacı Daniel Vorlander yapmıştır ve sentez çalışmalarını sürekli olarak geliştirmiştir. Ancak, tüm bu çalışmalar uzun yıllar boyunca sadece literatür içerisinde kalmıştır. 2. Dünya savaşının bitişi ile akışkan katının sentezlerine tekrardan başlanması ile George William Gray ve çalışma grubu akışkan katının durumlarını gösterebilen pek çok yeni bileşikler sentezleyebilmişlerdir ve moleküllerin nasıl tasarlanıp geliştirilebileceklerini araştırmışlardır. Sıvı kristaller RCA Laboratuvarlarında 1962 senesinde düz panelli elektronik bir ekranların tasarımlarının yapılmasına konu olmuştur ve bundan sonra da artık akışkan kristaller sadece literatür konusu olmaktan çıkıp ticari olarak da dikkat çekmeye başlamışlardır [46].

Aşağıda sıvı kristallerinin tarihsel gelişimi ve sıvı kristallerin uygulama alanlarına ilişkin ait bir zaman çizelgesi verilmiştir.



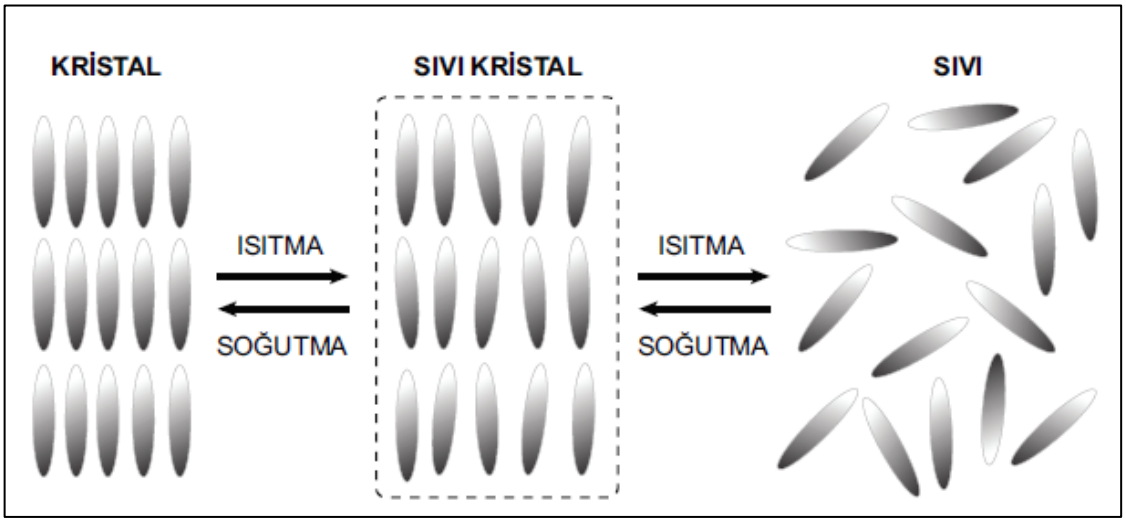
Şekil 2.1 Sıvı kristallerin tarihsel gelişimi ve uygulama alanları [47].

Sıvı kristaller geniş bir kullanım alanına sahip özel malzemelerdir ancak son yıllarda bu malzemelere karşı ilginin artmasının en önemli sebebi ekran teknolojilerinde ve fotovoltaik güneş pillerdeki kullanım alanlarına sahip olmasıdır. Bunların yanı sıra,

sıvı kristaller insan vücudunda çok sayıda doku ve hücrelerin içerisinde mevcuttur ve bu sebeple biyofizik alanında bu malzemelerin kullanımının başlaması ile de popülariteleri artmıştır.

2.2 Sıvı Kristallerin Genel Özellikleri

Sıvı kristal ara fazı, izotropik özellik sergileyen ve molekülleri arasında belli bir düzene sahip olmayan sıvı fazı ile anizotropik özellik gösteren ve molekülleri düzenli katı fazı arasında kalan bir ara faz halidir [48-50]. Bu ara faz, malzemenin ne ilk hali gibi katı ne de maddenin ikinci durumu gibi esnek değildir. Sıvı kristal fazı her iki durum arasında bulunmanın özel bir halidir. Şekil 2.2'de iki kısımdan oluşan malzemenin katı ile sıvı arasındaki faz geçişi gösterilmektedir [28].



Şekil 2.2 Sıvı kristal fazı gösteren bir malzemenin hal değişimi [28].

Şekil 2.2' den de anlaşıldığı üzere sıvı kristal fazı, soğutulduğunda üç boyutlu örgü düzenine sahip katı faza, bulunduğu sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklara ısıtıldığında ise sıvı faza doğru yönelim göstermektedir [51].

Sıvı kristal ara fazı, mezofaz olarak da adlandırılmaktadırlar. Malzemenin katı fazdan sıvı kristal ara fazına geçiş sıcaklığına "erime noktası", sıvı kristal ara fazından sıvıya geçiş sıcaklığına ise "berraklaşma noktası" denir [52]. Genellikle viskoz, jelatinimsi olan sıvı kristaller, sıcaklıkları arttırıldıkça daha saydamlaşıp sıvılara benzemektedirler. Sıvı faza dönüşüm sıcaklıkları ise çoğunlukla 30°C ila 100

°C arasındadır. Bazı farklı yapıdaki sıvı kristaller üretim amaçlarına ve kullanım alanlarına bağlı olarak gerçekleştirilen özel sıvı kristal malzemeler farklılık gösterebilmektedirler [53].

Katı fazda atomlar belirli bir düzene sahiptirler ve küçük titreşimler ile dönme hareketi yapmadan hareket etmektedirler. Sıvı fazda ise atomlar kısa menzilli bir düzendedirler. Öteleme ve döneme hareketi yapabilmektedirler. Üçüncü faz olan gaz fazında ise atomlar sıkıştırıldıkları hacim içerisinde serbestçe hareket edebilmektedirler. Katılar erimeye başladıklarında sahip oldukları düzenli durumları bozulur ancak bunun sonucunda da atom veya moleküller dönebilme yeteneğinin kazanmaktadırlar [8].

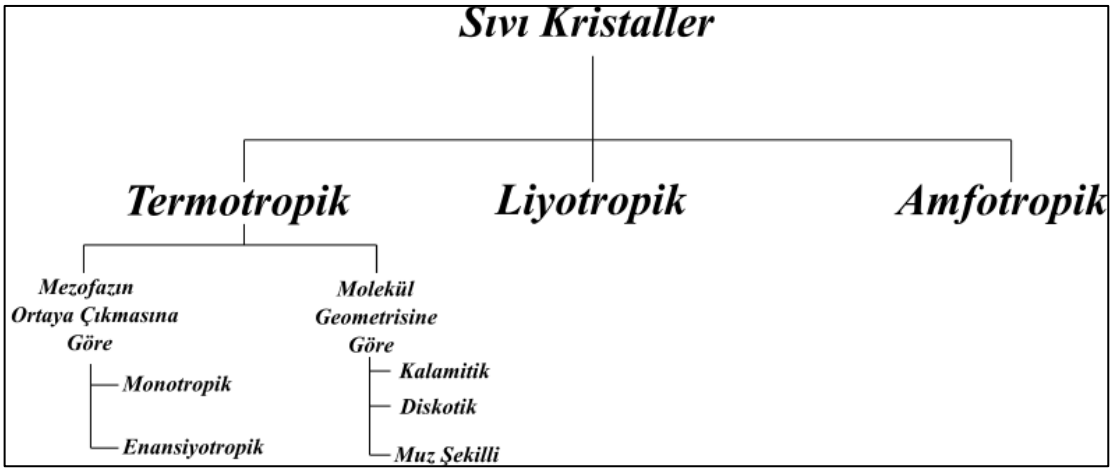
Sıvı kristallerin sıvı kristal moleküllerin yönelimsel düzenleri, moleküllerin miktarsal olarak yoğunlukları ve moleküller arası etkileşmeler dielektrik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Dielektrik özelliklere sahip olan bir malzemeye elektrik alan uygulanırsa, oluşan serbest yük sistemin vermiş olduğu tepkiyi ölçebilmektedir. Bu sayede moleküler kutuplanabilirlik ve dipol momentleri belirlenebilmektedir. Dipoller arasındaki etkileşimler uzun menzilli olup yoğunlaştırılmış sıvıların dielektrik özelliklerinin incelenmesinde dikkate alınması gerekmektedir. Sıvı kristallerin dielektriksel davranışları, mezojenlerin toplu tepkilerinin haricinde molekülerin sahip oldukları özellikleri de göstermektedir. Sonuç olarak, sıvı kristal fazların dielektrik özelliklerinin tanımlanması için anizotropik ortam içinde iç elektrik alan parametrelerinin belirlenmesi şart olmaktadır. Bu parametrelerin belirlenmesi de bir hayli zordur [54]. Bu güçlükler sebebi ile de sıvı kristallerin dielektrik özelliklerinin tetkik edilmesi büyük önem arz etmektedir.

2.3 Sıvı Kristallerin Sınıflandırılması

Sıvı kristal ara fazı her ne kadar anizotropik bir yapı gösterse de molekül yapılarına ve mezofazın ortaya çıkmasına göre üç ana grup olan termotropik, liyotropik ve amfotropik olmak üzere sınıflandırılmaktadırlar (Şekil 2.3).

2.3.1 Termotropik Sıvı Kristaller

Adından da anlaşıldığı üzere sıcaklığın etkisi ile oluşan sıvı kristal mezofazlarıdır. Termotropik sıvı kristal mezofazı, ısıtılan bir katı malzeme veya soğutulan bir sıvı malzemenin termodinamik olarak dengedeki bir fazıdır [3]. Termotropik sıvı kristallerde kendi içinde mezofazın ortaya çıkmasına ve molekül geometrisine göre iki alt gruba daha ayrılmaktadırlar.



Şekil 2.3 Sıvı kristallerin sınıflandırma şeması.

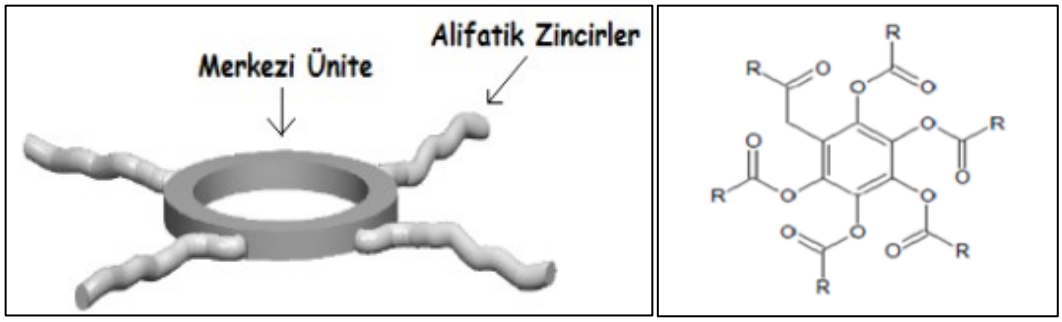
Mezofazın ortaya çıkmasına göre sınıflandırılan sıvı kristallerde enansiyatropik ve monotropik olmak üzere iki çeşittir. Hem ısıtma hem de soğutma esnasında oluşan ve termodinamik olarak kararlı halde olan mezofaza enansiyatropik, termodinamik olarak kararsız ve sadece soğutma sırasında gözlemlenebilen mezofaza ise monotropik faz olarak adlandırılmaktadırlar.

Molekül geometrisine göre sınıflandırılan sıvı kristallerde, kalamitik (çubuksu şekilli), diskotik (bozuk para, disk şekilli) ve bent core (muz şekilli) olmak üzere gösterdikleri kristal dizilimlerine göre üç farklı grupta toplanmaktadırlar.

Kalamitik (Çubuksu Şekilli) sıvı kristaller; ilk smektik fazda, Vorländer ve öğrencileri tarafından sentezlenmiştir [55].

Diskotik (bozuk para, disk şekilli) sıvı kristaller; disk şeklindeki moleküllere sahiptir. Diskotik sıvı kristallerde, moleküler eksenlerden biri, diğerine göre daha

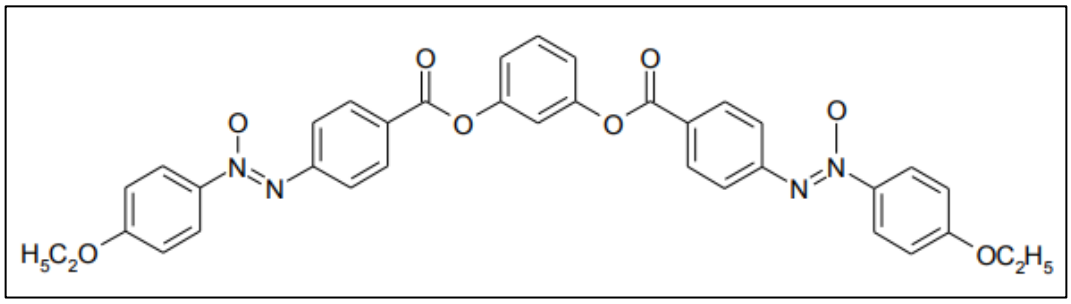
uzundur. Disk şeklindeki yapının korunabilmesi için, moleküllerin merkez bölgesi uygun bir sertlikte olmaktadır. Uygun sertlik değerleri için genellikle benzen, trifenilen veya ftalosiyanin halkaları kullanılmaktadır. Merkez bölgelerinde yer alan bu sertlik halkaları sıklıkla altı veya sekiz tane olmak üzere esnek yan zincirlere bağlanarak disk şekilli moleküller elde edilmektedir (bkz. Şekil 2.4) [56].



(a) **(b)**

Şekil 2.4 Diskotik sıvı kristallerin (a) molekül şekli (b) genel yapısı [56,57].

Bent core; (muz şekilli) sıvı kristaller; ilk defa 1930'larda Vorländer ve Apel tarafından keşfedilmiştir ancak bu şekildeki sıvı kristallerin kalamitik mezogenlerden farklı oldukları anlaşılamadığı için faz yapıları da karakterize edilememiştir [58].



Şekil 2.5 Vorländer'ın sentezlediği muz şekilli sıvı kristalin genel yapısı [59].

2.3.1.1 Banana Fazları

B1 Fazı kolumnar yapısına sahip olması nedeni ile kolumnar (Col) fazı olarak bilinmektedir ve polarizasyon mikroskobu altında kolumnar fazına benzeyen karakteristik tekstürleri gözlemlenebilmektedir [59].

B2 Fazı polar smektik C (SmC) fazı olarak değerlendirilir [60].

B3 Fazı Kristalimsi faz olarak değerlendirilmektedir [60].

B4 Fazı Muz şekilli sıvı kristallerde en düşük sıcaklıklarda görülen B4 fazı, B3 fazının soğutulduğunda elde edilmektedir [61].

B5 Fazı Ferroelektrik ve antiferroelektrik özellik gösteren çok sayıda alt fazı bulunmaktadır [60].

B6 Fazı B1 fazının ısıtılması ile elde edilebilen bir fazdır [60].

B7 Fazı polar SmC fazlarından birisidir [60].

B8 Fazı Antiferroelektrik davranış sergileyen bir fazdır [62].

2.3.1.2 Nematik Mezofaz

Yunanca iplik manasına gelen nematik mezofazı, mikroskop altında bakıldığında ipliksi ve spagetti gibi düzensiz yerleşimlere sahip olan sıvı kristallerdir [63].

Nematik mezofazı, molekülleri herhangi konumsal düzene sahip olmayan fakat aynı, yani yönlendirici yönünde yönelme olan materyallerdir [63].

Konumsal olarak düzene sahip olmayan nematik mezofazı, sadece yönelim düzenine sahiptirler. Tercih edilen yön bir birim vektör ile tanımlanmaktadır. Bu mezofaz, belli bir düzene sahip olsa dahi devamlı olarak akıcı ve hareketli bir haldedir ve dolayısıyla da bu mezofaz sıvı kristal mezofazları arasında en akışkan mezofaz özelliğindedir ve izotropik faza en yakın ara fazdır [63].

Pershan'ın yaptığı çalışmaya göre, yüksek sıcaklıkta mezofaz oluşturan termotropik sıvı kristallere nematik mezofazı denmektedir. Eğer malzeme daha yüksek sıcaklıklara gelecek şekilde ısıtılırsa malzeme sıvı hale geçmektedir. Dolayısıyla akla gelecek olan sıcaklığın düşürülmesi ise, bu fazdan smektik faza, smektik fazdan da hegzatik faza ve sıcaklığın daha da düşürülmesiyle sıvı kristallerin termodinamik olarak en karalı fazı olan kristal fazlara olan geçişler görülmektedir [64].

Bir malzemeye nematik mezofazı diyebilmek, moleküllerinin yapısında bir ana grup, iki de terminal grubuna sahip olması gerekmektedir [65].

Nematik mezofazların özel bir grubuysa kiral nematik sıvı kristallerdir. Kiralin anlamı, ayna görüntüsü demektir ve kiral nematik mezofazıda dairesel polarize ışığın bir bileşenini seçerek yansıtma özelliğine sahiptir. Kiral nematik ve kolesterik ifadeleri birbiriyle değiştirilerek kullanıldıkları görülmektedir.

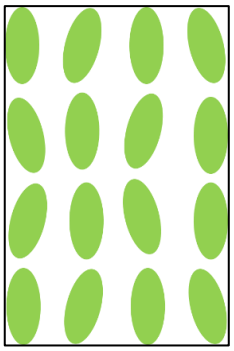
2.3.1.3 Smektik Mezofaz

Yunanca sabun kelimesinden gelen Smektik fazda moleküller nematik mezofazdakine benzer şekilde yönemlisel bir düzendedirler ve düşey tabakalara ayrılmaktadırlar. Bir yandan yönelimsel düzeni sürdüren smektik mezofaz, çoğunlukla bir yandan da konumsal düzende sergilemektedirler. Tüm bu özellikler farklı farklı tabaka fazları da oluşmasına sebep olduğu için nematik mezofaza göre daha büyük bir düzene sahip olmaktadırlar. Nematik mezofaza göre daha düzenli olması Smektik mezofazın nematik faza göre daha fazla katı kristal yapıya benzemektedir [63].

Smektik mezofazında, tabakalar içerisinde belli aralıklarla dizilmiş ama aynı düzlem doğrultusu boyunca yönelim düzeni gösteren çubuksu ve disk şekillerindeki yapıya sıcaklığın etkisi ile gelmektedirler. Smektik mezofazına sahip moleküller, molekül içersindeki tabakalar arasında hareketsizdirler ancak kendi tabaka seviyelerinde dolaşabilmektedirler [63].

En çok gözlenen Smektik mezofazları, SmA, SmB ve SmC olmak üzere üç gruba ayrılırlar.

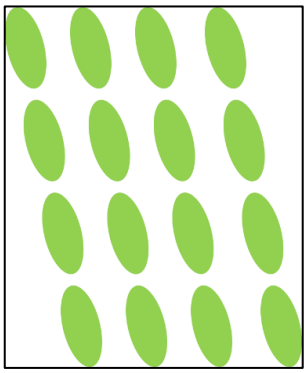
Smektik A mezofazında moleküllerin belli bir konumsal düzenleri mevcut değildir ve yönelim eksenleri ise tabaka normalinin hizasında olacak şekilde yönelmektedirler [63].



Şekil 2.6 Smektik A (SmA) mezofazına ait moleküler dizilim.

Smektik B mezofazında moleküllerin yönelimi düzlem içinde dikeydir ve moleküller tabakalar içinde hekzagonal ağlar şeklinde durmaktadırlar. Hegzagonal düzen sebebi ile smektik A mezofazından daha düzenli yapıdadırlar [63].

Smektik C mezofazı smektik A mezofazına benzer şekilde düzenlenmiş moleküllerden oluşmaktadır. Smektik A mezofazından farklı olarak tabakalar arasında bir eğimli yönelim söz konudur. Bu mezofaz aslında smektik A mezofazının eğimli olan bir başka versiyonudur [63].



Şekil 2.7 Smektik C (SmC) mezofazına ait moleküler dizilim.

2.3.1.4 Kolesterik Mezofaz

Kolesterik bir diğer deyişle de kiral nematik mezofazı çoğunlukla birbirleri arasında küçük bir açı oluşturarak moleküllerin dizilmesi sebebi ile molekülleri arasında kuvvete ve kiral merkeze sahip nematik mezofazına ait mezogenlerden ortaya çıkan bir mezofaz şeklidir.

Bu mezofaza ait doğada bilinen en iyi ve en tanıdık örnek DNA molekülüdür [66].

2.3.2 Liyotropik Sıvı Kristaller

Bu fazın oluşabilmesi, uygun bir çözücü yardımıyla hidrofilik, hidrofobik özelliklere sahip mezofazın uygun bir sıcaklık aralığında çözdürülmesi ile ortaya çıkmaktadır. Bu fazdaki yapısal ve fiziksel özellikler, sıvı kristallin içerdiği bileşen sayısına, bu bileşenlerin türüne ve konsantrasyonlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedirler [3].

2.4 Sıvı Kristallerin Fiziksel Özellikleri

Uzun menzilli, iki kutuplu, kolay polarize olabilme gibi özellikleri olan sıvı kristal pek çok ortak niteliklere sahiptirler. Sıvı kristallerin en önemli ayırt edici özelliği moleküller, yönelme eğilimini göstermesidir. Ortamın akışkanlığı, moleküllerin yönelimleriyle belirtilirken moleküllerin uzun menzilli yönelim düzenleri de **S** ile ifade edilen bir düzen parametresi ile gösterilmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar; optik kırılma indisi, Nükleer Magnetik Rezonans, Raman saçılması, Elektron Spin Rezonans, X- ışınları saçılması gibi deneylerden oluşmaktadır [19].

Sıcaklığın azalması ile sıvı kristallerin de kinetik enerjisi de azalmaktadır ve sıvı kristalin molekülleri sıcaklığa bağlı bir fonksiyonu olarak değişim gösterirler ve anizotropi ile ifade edilirler. Yönelme eğilimi gösteren sıvı kristaller anizotropi durumundadırlar. Bu anizotropik yapı sayesinde görüntü teknolojisinde sıkça kullanılan malzemeler haline gelmişlerdir. Sıvı kristaller dışarıdan uygulanan bir elektrik veya manyetik alan etkilenerek, elektrik ve manyetik alanların uygulandığı yöne bağlı olarak moleküller farklı davranış şekilleri gösterirler [19].

2.4.1 Optik Özellikler

Optiksel fiziksel özelliğine sahip sıvı kristaller çift kırıcıdırlar. Yansıma, kırılma, optik absorbsiyon, optik aktivite, doğrusal olmayan tepki, optik dalga kılavuzu ve ışık saçılımı gibi özelliklerinin yanında yüksek frekanslı elektromanyetik radyasyona olan karşı tepkileri belirlemektedirler. Aynı dalga normaline ve dikey polarizasyonlara sahip farklı hızdaki iki dalga, iki farklı yönde optik olarak

anizotropik bir ortam içinde yayılabilirler. Polarize olmamış ışın çift kırıcı ortama giren, iki ayrı dalgaya ayrılır. Ayrılan iki ışın ise farklı kırılma indislerine sahip olup, sıradan ışın optik eksene paralel olarak, Snell yasası gereği, dalga normali boyunca yayılırken, sıra dışı ışın ise dalga normaline paralel olmayacak şekilde ilerler [28,41].

Optik anizotropi, dielektrik anizotropideki gibi gösterilmeye çalışılırsa bu iki olay birbirinin yansıması şeklindedir. Optik anizotropi, $\Delta n = n_{ıı} - n_{\perp}$ olarak formül edilir [19].

2.4.2 Sıvı Kristallerin Manyetik ve Elektriksel Özellikleri

Bir elektrik alan sıvı kristale uygulanacak olursa, bu elektriksel alan sıvı kristali sürekli olarak elektriksel iki kutupluluğa sahip bir dipolü (iki kutuplu molekül) elektriksel alanla aynı yöne doğru yönlendirir. Şayet, sıvı kristal dipol yapıya sahip değilse, elektrik alanın uygulanmasıyla birlikte moleküllerin elektrik alanla aynı yönde davranması sağlanabilir. Bu davranış, sıvı kristallerin doğrultu vektörlerinin uygulanan elektrik alanı yönü ile aynı yöne getirme eğilimine sebep olmaktadır. Organik yapıya sahip dış etkilere karşı hassas olan sıvı kristaller çok küçük bir elektrik alan uygulamasında bile, molekül düzenleri doğrultu vektörünün yönüyle uygulanan elektrik alana bağlı olarak değişmektedir. Katı moleküllere elektrik alan uygulanırsa, sıvı kristaller kadar olmasa da çok az miktarda molekül yapılarını etkilemektedir. Sıvılara uygulanan elektrik alan ise, sıvı moleküllerin sahip olduğu yüksek kinetik enerjisi nedeniyle moleküllerin yönlendirilmesini imkansızlaştırır. Sıvı kristaller nükleer manyetik rezonans ölçümleriyle manyetik anizotropi işaretinin belirlenmesi ve polarizasyon mikroskobu ile de çift kırıcılık incelenmesine göre sınıflandırılabilmektedir [19].

2.4.3 Dielektrik Özellikleri

Dielektrik özellik, sıvı kristal faz sergileyen maddelerin en önemli özelliklerinden biridir. Dielektrik özelliklerinin karakterize edilmesi ile sıvı kristallere ait birçok fiziksel özellik hakkında bilgi edinilmiş olur [64]. Bu tezde, dielektrik spektroskopisi

ve analizi genel hatlarıyla bir bölüm olarak konu edilecek ve ilgili ayrıntılar bu bölümde anlatılacaktır (Bkz. Bölüm 3).

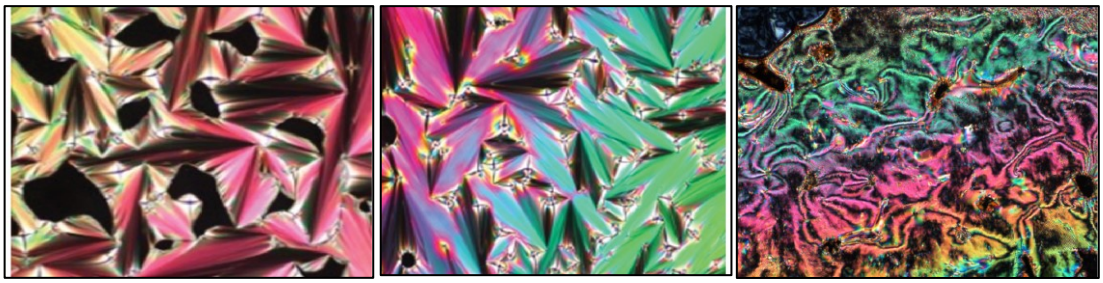
Moleküler dinamikler ve rahatlama gibi sıvı kristallere ait mekanizmalar dielektriksel analizlerde ortaya çıkmaktadır. Özellikle mezofaz sıcaklık aralığında moleküller ne bir katı kadar durgun ne de bir sıvı kadar hareketli olmadıkları için, dış alan altında özgün davranışlar sergilerler. Frekansa bağlı veya frekanstan bağımsız olan dielektrik sabitleri, rahatlama frekansları, kayıp sabitleri gibi parametreler sıvı kristallerin elektro–optiksel karakterlerinin belirlenmesini sağlamaktadır [64]. Bu tezde de özel olarak sentezlenmiş bir sıvı kristal ve bir de sıvı kristal kompozitin dielektrik özellikleri ayrıntılı olarak karakterize edilecektir.

2.5 Sıvı Kristallere Ait Tekstürler

Sıvı kristallerin optik, manyetik, elektriksel ve dielektrik özellikleri sayesinde gündelik yaşamda kullanılan pek çok uygulamalarda kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Bu fiziksel özelliklere sahip olan sıvı kristallerin en önemli karakteristik davranışları ise, polarizasyon mikroskobu altındaki davranışlarıdır. Sıvı kristal mezofazının sahip olduğu moleküler dizilişler sebebi ile polarizasyon mikroskobu altında alınan görüntülerde malzemenin kendi özelliklerini yansıtan karakteristik tekstürler elde edilmektedir. Aslında elde edilen bu tekstürler sayesinde sıvı kristalin sınıflandırılması ve karakterizasyonu sırasında önemli bilgiler içermektedir [28, 67].

Sıvı kristal tekstürleri, özgül ve özgül olmayanlar olarak iki sınıfa ayrılır. Mezofaza net bir şekilde ait olan tekstürlere özgün tekstürler denir. Mezofaza net bir şekilde karşılık gelmeyen, birden fazla farklı sıvı kristal mezofazı içeren tekstürlere ise özgül olmayan tekstürler olarak ifade edilir [28, 68].

Aşağıda Şekil 2.6'da bazı sıvı kristal tekstür örnekleri verilmiştir [28].



Şekil 2.8 Sıvı kristal tekstür örnekleri [28].

3
DİELEKTRİK SPEKTROSKOPİSİ

3.1 Dielektrik Sabiti

Faraday parallel levhalı bir sığa ve basit bir elektroskop kullanarak, elektriği iletmeyen malzemeler olduğunu keşfetmiştir. Faraday'ın yaptığı deneylerin sonuçları, bir sığacın sığası, levhalar arasına bir yalıtkan yani elektriği iletmeyen bir malzeme konulduğunda, artış göstermektedir. Yalıtkan maddeler dielektrikler olarak da ifade edilebilmektedir. κ faktörü dielektriğin bir özelliği olup dielektrik sabitidir. Boşluğun dielektrik sabitiyse, temel bir birim olarak kabul edilmektedir [69].

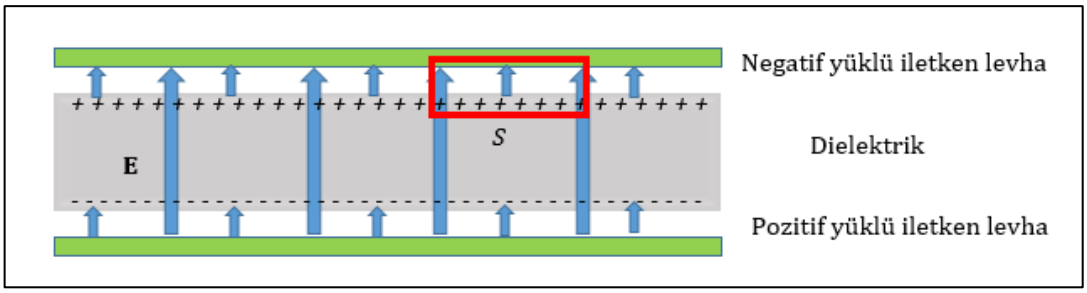
Yalıtkan malzemelerin gördüğü elektriksel iletkenliğin etkisini açıklayabilmek için, iletkenlerin yüzeylerinde bir miktar yük olan paralel levhalı bir sığaç düşünülerek (üst levhada artı, alt levhada eksi yüklerin olduğu) ve levhalar arası uzaklığın d, levhaların alanlarının da A olarak kabul edilirse sığa,

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

olarak ifade edilir. Sığaçtaki yük ve voltaj ise birbirleri ile doğru orantılıdır [69].

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

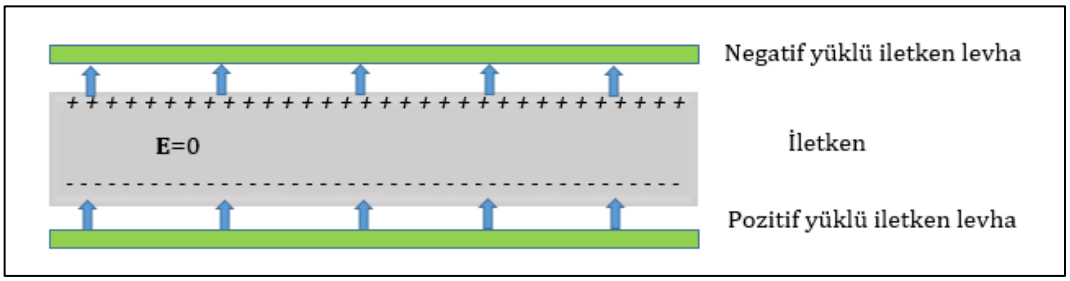
Gauss yasasına göre elektrik alanın akısı, çevrelenmiş yük ile doğrudan ilişkilidir. Şekil 3.1'de dielektriğe sahip bir sığaç ve **E** çizgileri gösterilmektedir [69].



Şekil 3.1 Dielektriğe sahip bir sığaç ve **E** çizgileri.

Küçük bir Gauss yüzeyi (S) alınırsa; elektrik alan dielektriğin olması sebebi ile azalır. Şayet levhanın arası boş olsaydı buradaki elektrik alan daha fazla olacaktı. Yani iki levha arasına bir dielektrik malzeme konulduğunda bir yüzeyin pozitif diğer yüzeyin ise negatif yüklerle indüklenmiş olduğunu göstermektedir [69].

Aşağıdaki şekil de paralel iki levha arasına bir iletken malzeme konulmuştur ve elektrik alan sıfırdır [69].



Şekil 3.2 Levhaları arasında iletken bulunan dielektriğe sahip bir sığaç ve **E** çizgileri.

Levhalar arası uzaklığı d olan ve levhaları arasına kalınlığı b olan nötr bir iletken konulan yukarıdaki gibi bir kondansatör için voltaj aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

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

Sığanın hesaplanması için çıkarılan sonuç;

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

Dolayısı ile sığa, iletken ile kaplanan hacmin orantısına bağlı olarak artış göstermektedir [69].

3.2 Kutuplanma P

Çevresinde eksi yükler bulunan atomun çekirdeğinin içi artı yük ile dolmuş durumdadır. Dolayısıyla bu atom bir elektrik alanın içine konulursa çekirdek bir yöne çekilirken negatif yüklerde diğer yöne doğru çekilirler. Her bir atomda q yükleri δ uzaklığı ile birbirinden ayrıldığı varsayarak, qδ atom başına düşen dipol momenti denir. Birim hacimdeki dipol momenti ***P*** vektörü ile gösterilir [69].

$$\boldsymbol{P} = \mathrm{Nq}\delta \tag{3.5}$$

Genelde P Dielektrik içinde her yerde farklılık göstermektedir. Malzeme içinde herhangi bir noktada, **E** elektrik alan **P** ile orantılıdır ve orantı sabiti de malzemenin içindeki atomların çeşidine bağlı olarak değişmektedir [69].

3.3 Moleküller Dipoller

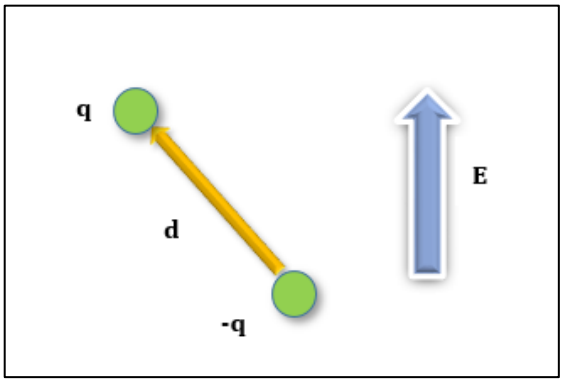
Bazı maddeler dielektriktir. Dielektrikli elektriksel sistemlerin anlayabilmenin yolu, bir dielektriğe elektrik alan uygulandığı zaman o alanın atomlara dipol momenti indüklendiğini anlamaktan geçmektedir. Bir **E** birim hacime ortalama bir **P** dipol momenti indüklüyorsa, o zaman κ, dielektrik sabiti aşağıdaki gibidir [69]:

$$\kappa - 1 = \frac{\boldsymbol{P}}{\varepsilon_0 \boldsymbol{E}} \tag{3.6}$$

3.4 Kutupsal Moleküller Yönlendirme Kutuplanması

Elektrik alan olmadığı zaman, bağımsız dipoller farklı yönleri işaret ettikleri için birim hacim başına düşen net momentte sıfırdır. Elektrik alan uygulanırsa, önce elektronlar üzerindeki kuvvetler sebebi ile indüklenen fazladan bir dipol momenti oluşur. Elektrik alan, birim hacim başına net bir moment ortaya çıkartacak şekilde bağımsız dipollere hizalama eğilimi gösterir [69].

Bir gaz içinde bütün dipoller hizalanabilselerdi, çok büyük bir kutuplanma ile karşı karşıya gelinirdi. Bir elektrik alandaki dipolün enerjisi için aşağıdaki şekildeki gibi düşünülerek hesaplanabilir [69].



Şekil 3.3 Bir **E** maruz bırakılmış bir dipol.

Şekil 3.3'teki gibi bir elektrik artı yükün enerjisini qΦ (1) ve eksi yükün enerjisi -qΦ (2) ise, dipolün enerjisi,

$$U = -\boldsymbol{P}_0 \,.E = \, -\boldsymbol{P_0 E} cos\Theta \tag{3.7}$$

Θ açısı, **Po** ile E arasındaki açıdır. Isıl denge halinde, U potansiyel enerjisine sahip moleküllerin göreli sayısı,

$$U = e^{-U/kT} \tag{3.8}$$

θ açısında birim katı açı başına düşen molekül sayısına n(Θ),

$$n(\Theta) = n_0 e^{\boldsymbol{P_o E} cos\Theta/\mathrm{kT}} \tag{3.9}$$

denklem seriye açılırsa,

$$n(\Theta) = n_0(1 + \frac{\boldsymbol{P_0 E} cos\Theta}{kT}) \tag{3.10}$$

integrali alınırsa,

$$n_0 = \frac{N}{4\pi} \tag{3.11}$$

P'nin hesaplanabilmesi için tüm momentlerin toplanması gereklidir.

$$\boldsymbol{P} = \sum \boldsymbol{P}_o cos\Theta_{\mathrm{i}} \tag{3.12}$$

integrali alınırsa çıkan sonuç,

$$\boldsymbol{P} = \frac{N\boldsymbol{p_0}^2\boldsymbol{E}}{3kT} \tag{3.13}$$

elde edilir [69].

Kutuplanma elektrik alanla orantılı olup normal bir dielektrik davranışı gösterirken, kutuplanma sıcaklık ile ters orantılı olduğu açıkça görülmektedir [69]. Böylece,

$$\kappa - 1 = \frac{\boldsymbol{P}}{\varepsilon_0 \boldsymbol{E}} = \frac{N{p_0}^2}{3\varepsilon_0 kT} \tag{3.14}$$

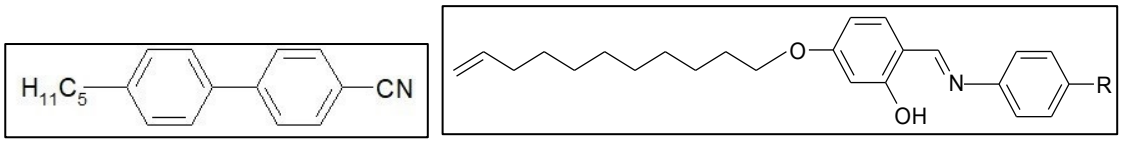
Denkleminden de anlaşıldığı üzere sıcaklık ile ters orantılı olan kutuplanma 1/T Curie yasasına deney sonuçları da örtüşmektedir [69].

Kutupsal moleküllerin dielektrik sabitinin diğer özelliği, uygulanan elektriksel alanın frekansına bağlı olarak değişim göstermesidir. Moleküllerin sahip oldukları eylemsizlik momentlerinden dolayı daha ağır moleküller aynı tarafa doğru yönelmesi diğer moleküllere göre daha fazla sürede gerçekleşir [69].

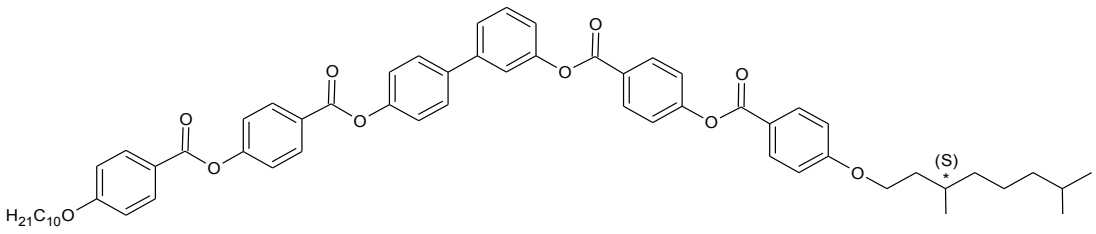
4
MATERYALLER VE YÖNTEM

4.1 Karakterize Edilen Sıvı Kristaller

Çalışmada kullanılan organik bileşikler, 4-siyano-4′-pentilbifenil (5CB), 5-(10-undekeniloksi)-2-[[(4-hekziloksifenil)-imino]metil] fenol (LC1), 3'-{4-[4-((S)-3,7-Dimetiloktiloksi)benzoiloksi]benzoiloksi}-4-{4-[4-(Desiloksi)benzoiloksi] benzoiloksi} bifenil (LC2) malzemeleridir. Tüm sıvı kristal bileşiklerin kimyasal yapısı Şekil 4.1'de verilmiştir. Parantez içindeki ifadeler, ilgili sıvı kristal için tez boyunca kullanılacak kısaltmalardır. LC1 sıvı kristali ve 5CB+%1 LC2 sıvı kristal kompozitinin dielektrik özellikleri hakkında ayrıntılı çalışmalar yapılmıştır.



(a) 5CB **(b) LC1**, R= OC_6H_{13}



(c) LC2

Şekil 4.1 Sıvı kristal malzemelerin molekül yapıları (a) 5CB (b) LC1 (c) LC2.

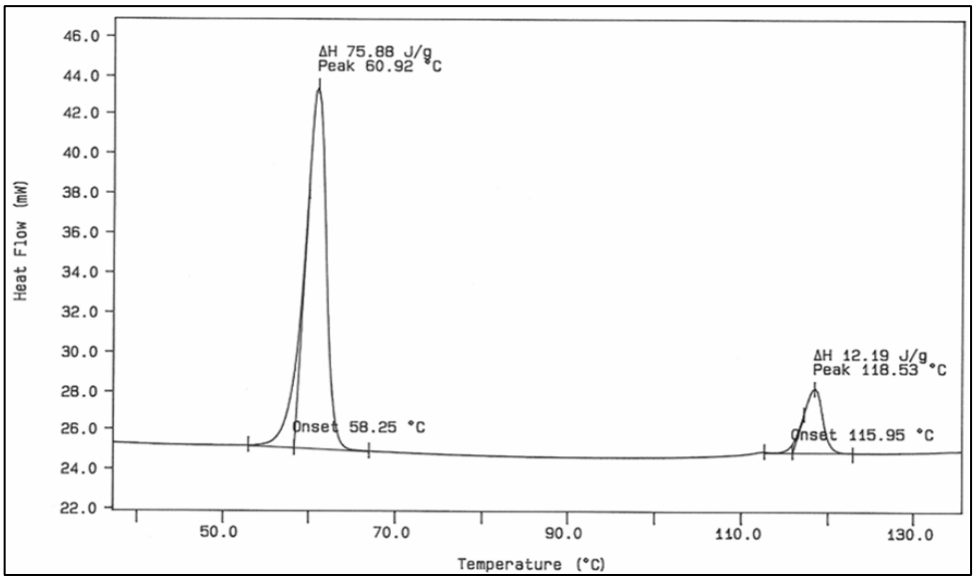
4.1.1 LC1 Sıvı Kristal Bileşiği

LC1 sıvı kristaline ait mezomorfik özellikler, Leica DM2700P polarizasyon mikroskobu ile Mettler FP–82 HT sıcaklık kontrol ünitesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. DSC ölçümleri ise, azot atmosferi altında, ısıtma ve soğutma hızı 10°C dk^{-1} olmak üzere, Perkin-Elmer DSC–6 cihazı ile kayıt altına alınmıştır. LC1 sıvı kristalinin DSC ile saptanan, geçiş sıcaklıkları ve karşılık gelen entalpi değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir [42,43].

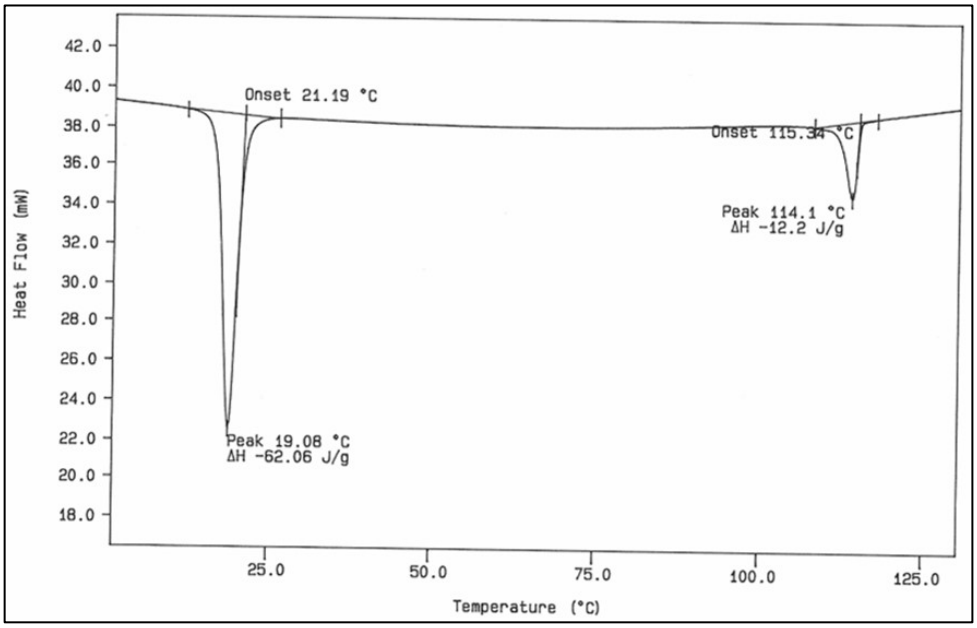
Tablo 4.1 LC1 bileşiğinin faz geçiş sıcaklıkları (^oC) ve entalpi (Jg^{-1}) değerleri [42,43].

Bileşik	**T/°C [ΔH, kJ/mol][a]**
LC1	**Isıtma:** ***K*** 60.9 [75.88] ***SmA*** 118.5 [12.19] ***I*** **Soğutma:** ***I*** 114.1 [-12.2] ***SmA*** 19.08 [-62.06] ***K***
[a]Faz Geçiş Sıcaklıkları, mezofaza ait kısaltmalar sonrasında, entalpi değerleriyse kare parantezler içerisinde verilmiştir. Kısaltmalar: K: Kristal Fazı, SmA: Smektik A fazı, I: İzotropik Fazdır.	

LC1 Sıvı kristal'i optik polarizasyon mikroskobu ve diferansiyel tarama kalorimetresi ile mezomorfik özelliklerinin incelenmesi sonucunda, sıvı kristalin termotropik enansiyotropik mezofaz gösterdiği belirlenmiştir. Salisilaldimin moleküllerin tabakalı olarak düzenlendiği ve smektik mesofazın ortaya çıktığı saptanmıştır [42,43].



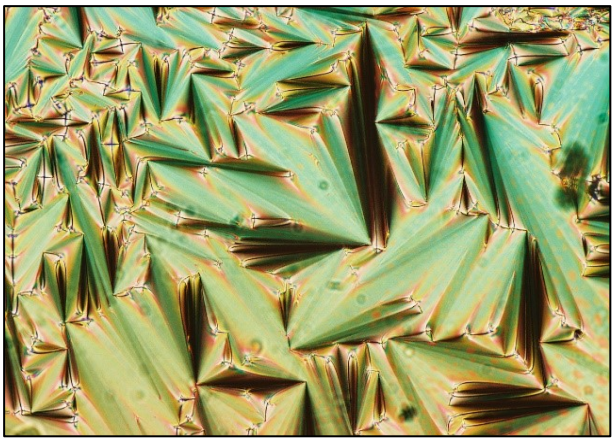
(a)



(b)

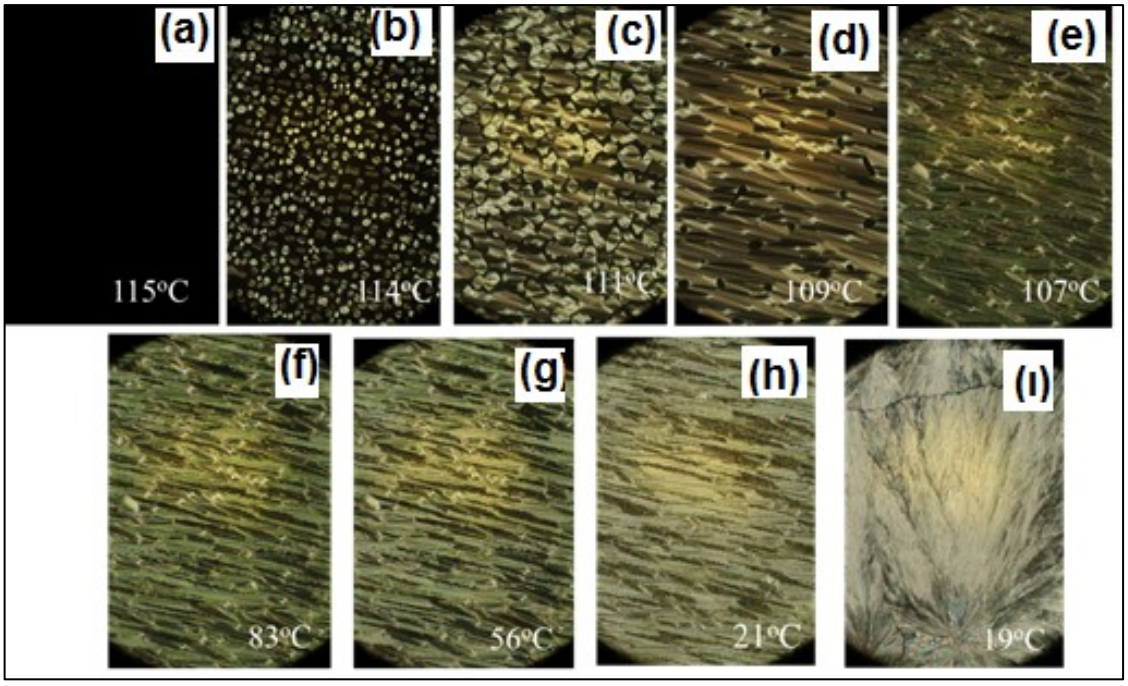
Şekil 4.2 LC1 bileşiğinin ısıtma (a) ve soğutma (b) sırasındaki DSC termogramları [42,43].

Şekil 4.2' de faz geçişlerine ait sıcaklıkların ve entalpi değerlerinin tespit edildiği, ikinci ısıtma ve soğutmaya ait olan DSC eğrileri görülmektedir [42,43].



Şekil 4.3 LC1 bileşiği'nin SmA mesofaz tekstürü (büyütme x100).

Polarizasyon mikroskobu altında, Smektik A mezofazındaki bileşiğin molekülleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te gösterildiği üzere, smektik A fazı için karakteristik olan tekstür gözlemlenebilmektedir [42,43].



Şekil 4.4 LC1 bileşiği'nin soğutma sırasında polarizasyon mikroskobu altında farklı sıcaklık değerlerindeki (a) izotropik faz halinin (b), (c), (d), izotropik fazdan smektik A mezofazına geçişinin (e), (f), (g), (h) smektik A (SmA) mezofazının ve (ı) kristal fazın gösterdiği tekstürler [42,43].

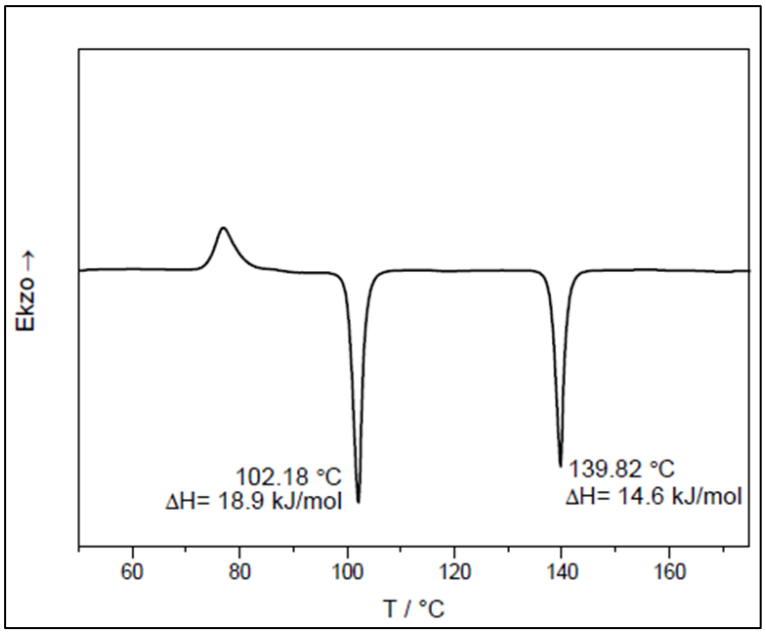
4.1.2 5CB ve 5CB+%1 LC2 Sıvı Kristal Kompoziti

LC2 Sıvı kristal bileşiğinin DSC ile saptanan geçiş sıcaklıkları ve entalpileri Tablo 4.2 'de verilmiştir.

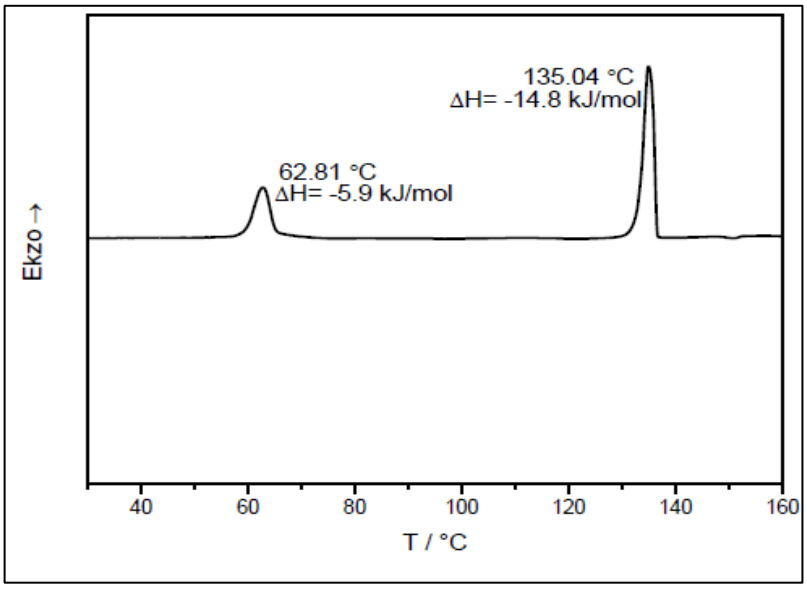
Tablo 4.2 LC2 Bileşiği'nin faz geçiş sıcaklıkları (^{o}C) ve entalpi (Jg^{-1}) değerleri [45].

Bileşik	**T/°C [ΔH, kJ/mol][a]**
LC2	**Isıtma: *K*** 102.18 [18.96] ***B₁*** 139.82 [14.65] ***I*** **Soğutma: *I*** 135.04 [14.87] ***B₁*** 62.81 [5.95] ***K***
[a]Faz Geçiş Sıcaklıkları, mezofaza ait kısaltmalar sonrasında, entalpi değerleriyse kare parantezler içerisinde verilmiştir. Kısaltmalar: K: Kristal Fazı, B_1: Muz şekilli faz, I: İzotropik fazdır.	

LC2 bileşiğine ait mezomorfik özellikler, Leica DM2700P polarizasyon mikroskobuyla birlikte Mettler FP–82 HT sıcaklık kontrol ünitesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. DSC ölçümleri ise, azot atmosferi altında, ısıtma ve soğutma hızı 10°C dk^{-1} olmak üzere, Perkin-Elmer DSC–6 cihazı ile kayıt altına alınmıştır. LC2 bileşiğinin kimyasal yapısı, geçiş sıcaklıkları ve karşılık gelen entalpi değerleri Tablo 4.2' de görülmektedir. Şekil 4.5' de faz geçişlerine ait sıcaklıkların ve entalpi değerlerinin tespit edildiği, ikinci ısıtma ve soğutmaya ait olan DSC eğrileri görülmektedir. Şekil 4.6'da ise, LC2 bileşiğinin B1 mesofaz tekstürü gösterilmiştir.

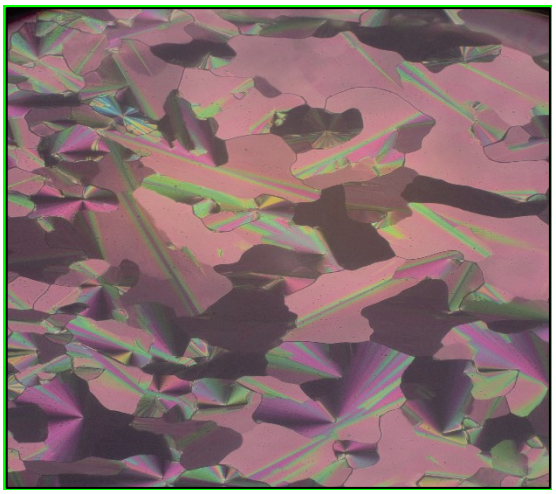


(a)



(b)

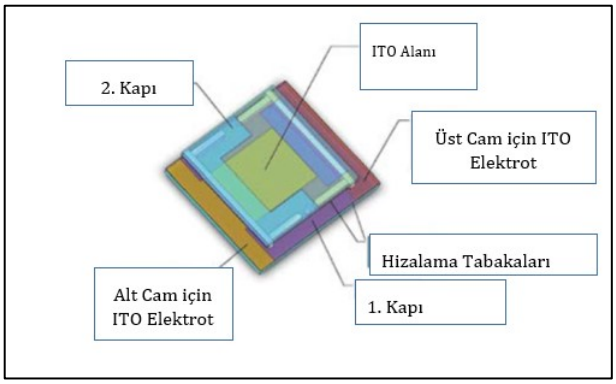
Şekil 4.5 LC2 bileşiğinin ısıtma (a) ve soğutma (b) sırasındaki DSC termogramları.



Şekil 4.6 LC2 bileşiği'nin B1 mesofaz tekstürü.

4.2 Sıvı Kristal Hücrelerin Hazırlanması

Dielektrik ölçümlerin yapılabilmesi için, tez boyunca kullanılan örnekler sandviç hücrelere konularak ölçümler alınmıştır. Instec, Inc şirketi tarafından sağlanan bu özel numune hücrelerde numunelerin yerleştirildiği bölge düşeyde ve yatayda 10 mm boyutunda yani 100 mm^2 'lik bir alandır. Aşağıda bu özel sandviç hücreye ait tabakalara ilişkin bir görsel verilmiştir (Şekil 4.7) [70].

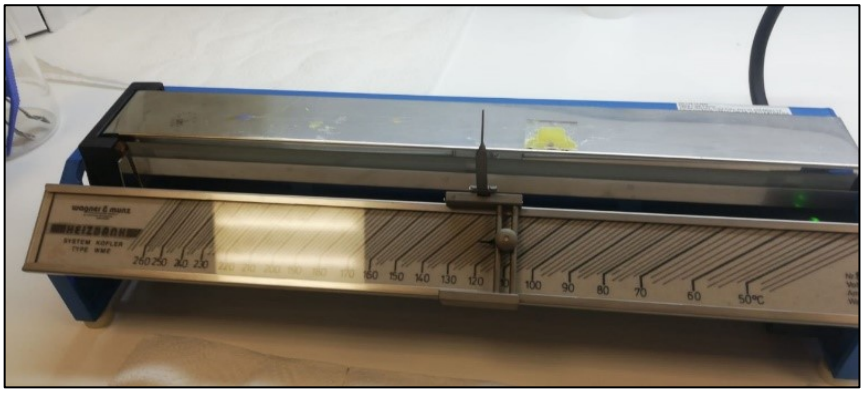


Şekil 4.7 Instec, Inc şirketinden alınan özel sandviç hücre tabakaları [70].

Bu özel sandviç tasarımlı numune hücreleri, indiyum kalay oksit (ITO) ile kaplanmış cam plakalardır. Cam plakaların iç kısımları, polyimid tabakalarla kaplanmıştır [71].

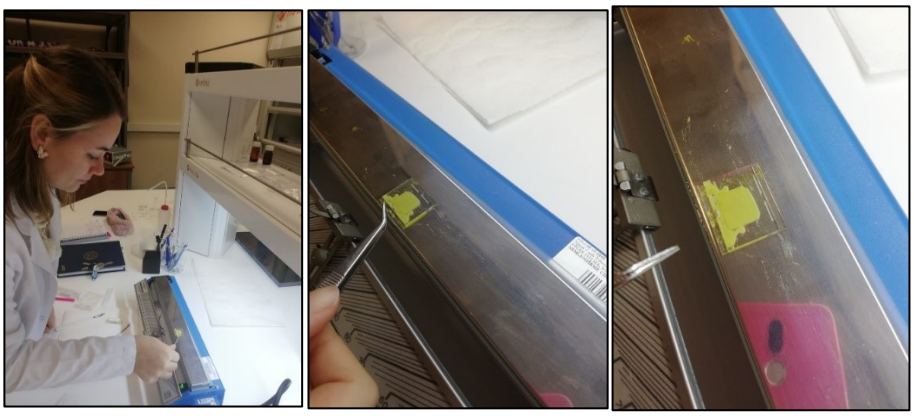
Tez kapsamında sıvı kristaller sandviç hücrelere doldurulurken kılcal etkiden yararlanılmıştır. Sıcaklık gradyentine sahip olan Kohler bankasının (Şekil 4.8)

üzerine sandviç hücrelerin kapılarına bir miktar sıvı kristal damlatılmıştır ve Kohler bankası üzerinde yavaş yavaş ısıtılan sıvı kristal molekülleri birbirlerini çekerken oluşan kuvvetin, ITO kaplı cam plakaların moleküllerinin birbirini çekmesi sırasında oluşan kuvvet daha zayıf olması sebebiyle sandviç hücreler kılcal bir tüp görevi görürek damlatılan sıvı kristal malzemeler sandviç hücrelerde bulunan minik kanallar yardımı ile ilerleyip, hücrenini düzgün bir biçimde kaplanmasını sağlamıştır.



Şekil 4.8 Deneyde kullanılan sıcaklık gradyentine sahip Kohler bankası.

Deneyde kullanılan hücre ağızlarına yerleştirilen sıvı kristal numuneleri, yavaşça Kohler bankası üzerinde kaydırarak faz geçişi yaptırılmış ve kapillar etki ile sandviç hücrelerin içerisini doldurmaları sağlanmıştır (Şekil 4.9).



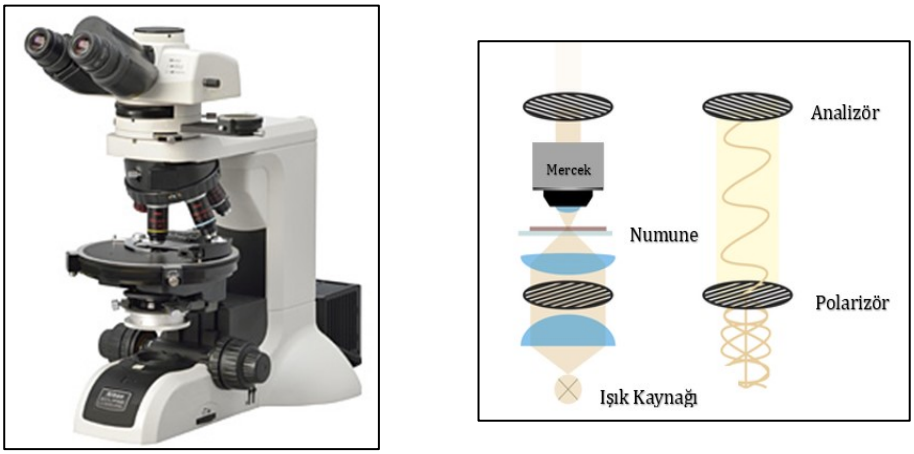
Şekil 4.9 Deneyde kullanılan sıvı kristallerin Kohler bankası ile hücrelere doldurulması.

4.3 Kullanılan Cihaz ve Yardımcı Gereçler

Araştırdığımız sıvı kristallerin morfolojik özelliklerinin incelenmesinde, faz geçiş sıcaklıklarının tespitinde, polarizasyon mikroskobu, DSC ve Dielektrik Spektroskopi Tekniği (DST) yönteminden faydalanılmıştır.

4.3.1. Polarizasyon Mikroskobu (PM)

Sıvı kristallere ait tekstürlerin elde edilebilmesi için polarizasyon mikroskobuna ihtiyaç duyulur. (Bakınız 2.5) Saf ve çift kırılma özelliğine sahip numunelerin optik anizotropi özelliğinden yararlanarak görüntülenmesini sağlayan polarizasyon mikroskobu, genellikle diferansiyel taramalı kalorimetri cihazı ile kullanılmaktadır [72]. Polarizasyon mikroskobu Şekil 4.10'da sergilenmektedir.



(a) (b)

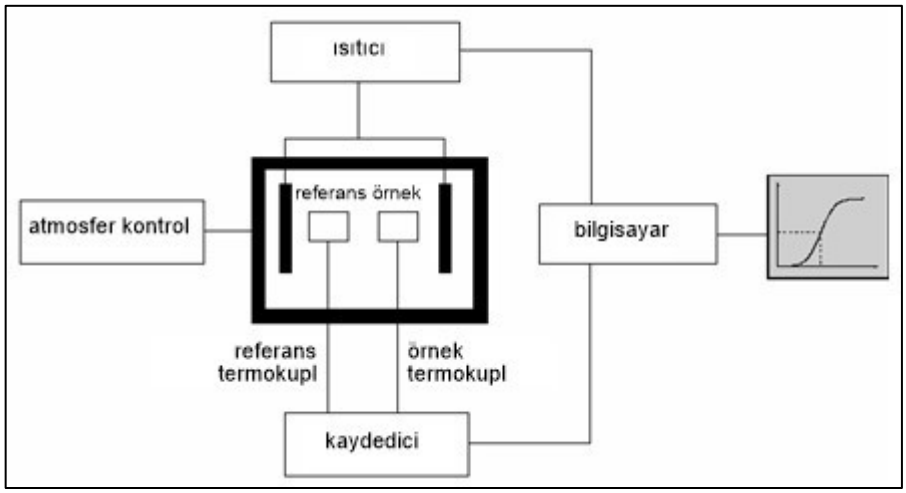
Şekil 4.10 (a)Polarizasyon mikroskobu [73] ve (b) çalışma prensibinin çizimi [74].

Polarizasyon mikroskobunun çalışma prensibi kısa olarak şu şekilde açıklanabilir: Mikroskobun içerisinde bulunan ve beyaz ışık yayan halojen bir lamba ışık kaynağı görevini görür. Bu beyaz ışık kaynağı, mikroskopta bulunan aynalar aracılığı ile

lensten geçerek polarizöre gelir, 360º döner ve dalga boyu seçiciliğini sağlayan filtre sonrası kondansatöre geçmektedir. Uygun genişlikteki ışık kondansatörden sonra dönen yüzeye gelir ve numunelerin bulunduğu bölüme geçer. Numunelerin bulunduğu bölüm uygun sıcaklık değerine ayarlanır ve numuneden yayılan ışık objektiften geçer. Objektiften gelen ışınsa analizöre geldikten sonra analizörde polarizöre göre yönlenir. Merceğe düşen görüntüler büyütülerek görüntünün net ve anlaşılır olması sağlanır [72].

4.3.2. Diferansiyel Tarama Kalorimetri (DSC)

Zamanın veya sıcaklığın bir fonksiyonu olarak numuneden gelen ya da giden ısı farkını göstermek için kullanılan Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Cihazı (DSC); numune ısıtılırken, soğutulurken veya sabit bir sıcaklıkta tutulurken soğurulan veya salınan enerji miktarını ölçmeye yarayan termal analiz yöntemlerinden birisidir [72]. Sıvı kristallerin saflık derecelerini ve faz değişimlerini inceleyebilmek için DSC cihazına ait görsel şekil 4.1'de sergilenmektedir.



Şekil 4.11 DSC'nin çalışma prensibi çizimi [75].

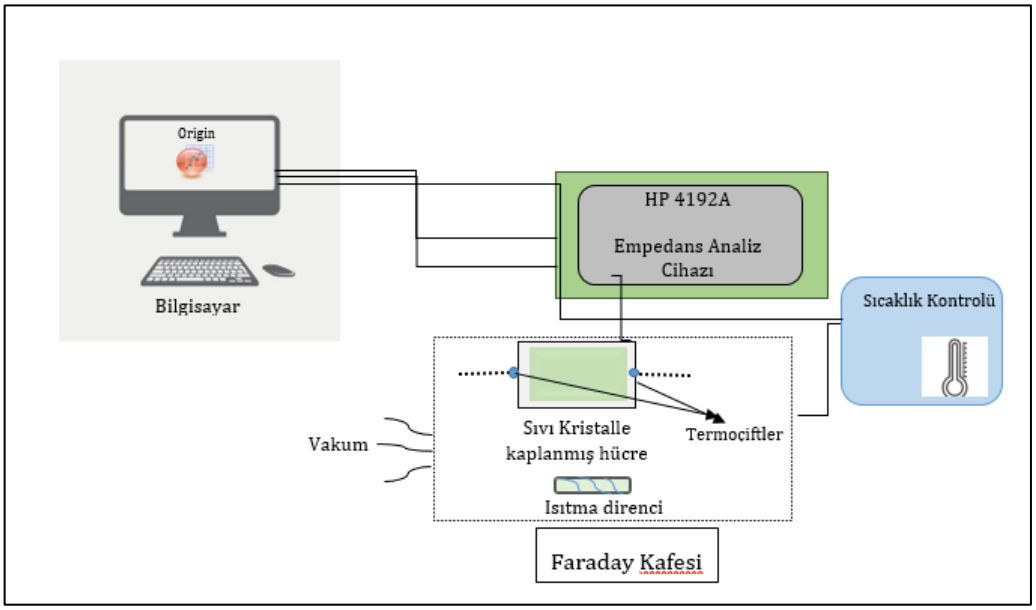
DSC cihazının çalışma prensibi kısaca anlatılırsa; DSC' de analiz yapılırken test edilen numune ile referans maddenin sıcaklıkları aynı tutulur ve bu esnada numune ile referans madde arasında bir sıcaklık farkı meydana gelirse, sıcaklık değerini

değiştirmemek için test edilen numuneye verilen enerji miktarı değiştirilerek, numunedeki faz değişimi anındaki ısı değişim değerleri gözlemlenir [72].

Bu deneyde de DSC, numunelerin faz geçiş sıcaklıklarını belirlemesinde kullanılmıştır. LC1 ve LC2 sıvı kristal bileşikleri ısıtılırken ve soğutulurken ki, sıcaklığa bağlı faz geçişlerinin belirlenebilmesi için Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ile alınan ölçümleri alınmıştır ve elde edilen bu ölçüm sonuçları yardımıyla da sıvı kristallerin entalpileri de belirlenmiştir.

4.3.3. Dielektrik Spektroskopisi Tekniği (DST)

Aynı zamanda DSC'ye alternatif bir metot olarak dielektrik spektroskopisi tekniği (DST) kullanılarak, faz geçiş sıcaklıklarının doğrulandığı gösterilmiştir. Sıcaklık kontrolünü sağlayabilmek için bir termoçift kullanılmıştır. Tez kapsamında çalışılan sıvı kristal numunelere ait dielektrik özellikler, HP 4192A empedans analiz cihazı ile, 100 Hz–10 MHz aralığında, karakterize edilmiştir. Bu cihaz, bir ara yüz bağlantısı ile bilgisayar yardımıyla kontrol edilmektedir. Alınan tüm ölçümler Origin programı kullanılarak grafikleri çizilmiştir. Çalışmamızın bu kısmında, LC1, 5CB, 5CB+%1LC2 sıvı kristal bileşiklerin tüm dielektrik ölçümleri, Şekil 4.11'de gösterilen düzenek yardımıyla yapılmıştır.



Şekil 4.12 Dielektrik spektroskopisi ölçüm düzeneği.

Bu cihaz ile Cs (seri kapasite), Cp (paralel kapasite), D (dielektrik kayıp), G (iletkenlik) değerleri doğrudan ölçülebilmektedir. Tüm sıvı kristallerin dielektrik sabitleri aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır [76].

$$\varepsilon^{l} = \frac{C_p^l d}{\varepsilon_o A} \tag{4.1}$$

elde edilen dielektrik grafiklerinin analizleri de aşağıdaki denklemler sayesinde hesaplanmıştır.

$$\varepsilon^{l} = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty).\frac{1}{1 + \omega^2\tau^2} \tag{4.2}$$

$$\varepsilon^{ll} = (\varepsilon_o - \varepsilon_\infty).\frac{1}{1 + \omega^2\tau^2} \tag{4.3}$$

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon^l(\omega) + i\varepsilon^{ll}(\omega) \tag{4.4}$$

$$\varepsilon^{ll} = \varepsilon^l tan\delta \tag{4.5}$$

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_o - \varepsilon_\infty}{1+(i\omega\tau)^{1-\alpha}} \tag{4.6}$$

Buradaki denklemlerin içerdiği terimlerin ifade ettikleri anlamlar ise Tablo 4.3'te açıklanmıştır.

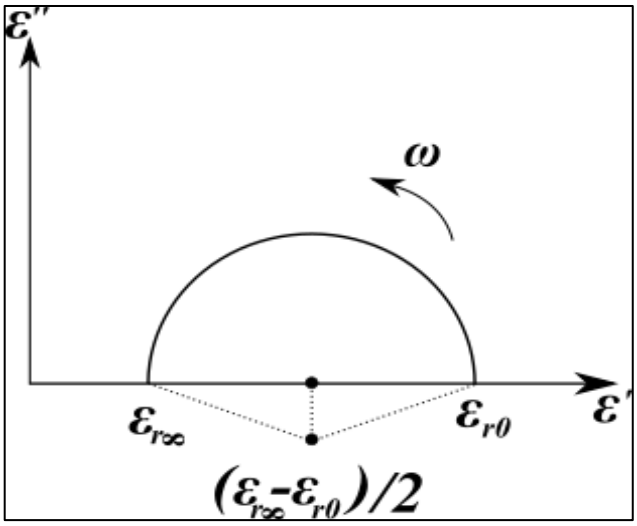
Tablo 4.3 (4.2-6) Denklemlerin içerisinde kullanılan ifadelerin anlamları.

ε_o	Boşluğun dielektrik sabiti ve değeri, 8.85×10^{-12} F/m
ε^{1}	Kompleks dielektrik sabitinin gerçek kısmı
ε^{11}	Kompleks dielektrik sabitinin sanal kısmı
ε_o	Frekans sıfır iken dielektrik sabiti

Tablo 4.3 (4.2-6) Denklemlerin içerisinde kullanılan ifadelerin anlamları (devamı)

ε*	Kompleks dielektrik sabiti
ε_∞	Frekansın sonsuz olduğu durumdaki dielektrik sabiti
A	Numunenin alanı (m^2 cinsinden)
d	Numunenin kalınlığı (m cinsinden)
tanδ	Dielektrik kayıp faktörü

Yukarıdaki denklemler ve içerisindeki ifadelerden de anlaşıldığı üzere frekansın fonksiyonu ε^{1} ve ε^{11} ifadeleridir ve frekansa bağlı olan etkiye de "Dielektrik dispersiyon" denilmektedir. Kompleks dielektrik sabitinin sanal kısmının kompleks dielektrik sabitinin gerçek kısmına bağlı grafiği ise Cole-Cole eğrisi olarak adlandırılır (Şekil 4.12). Şekil 4.13' de ideal bir Cole-Cole eğrisi gösterilmiştir.



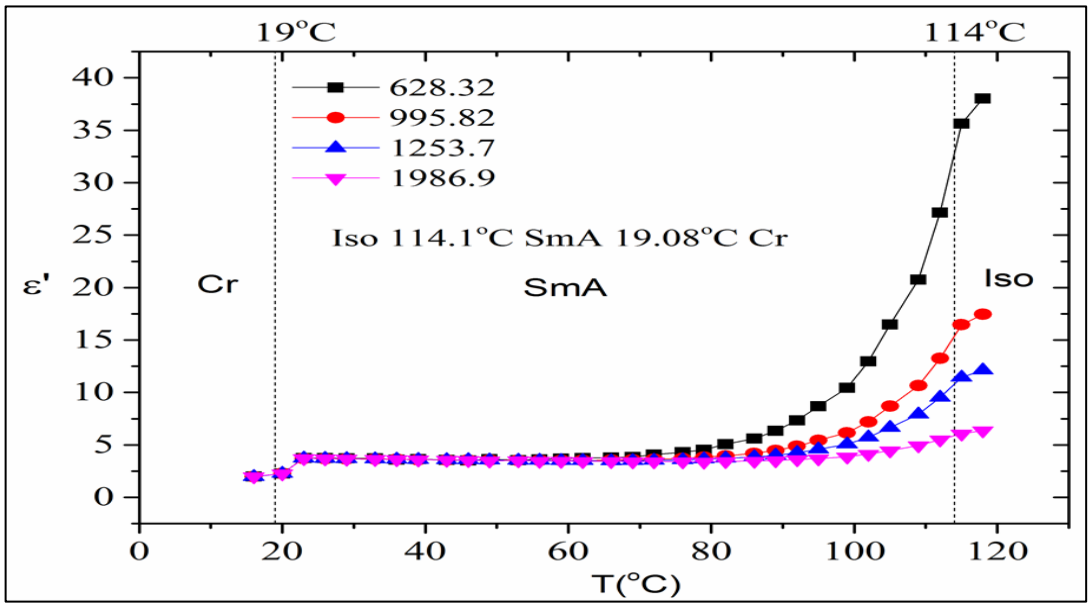
Şekil 4.13 İdeal Cole-Cole eğrisi.

5
DENEYSEL SONUÇLAR

5.1 LC1 Sıvı Kristal Bileşiği

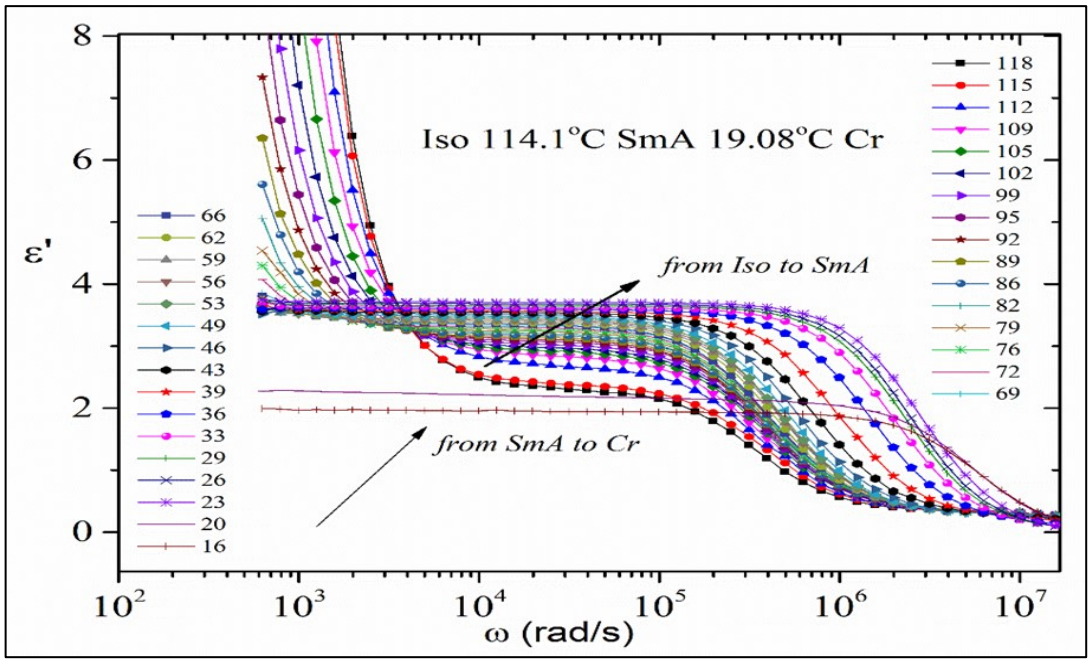
Tez kapsamında, LC1 sıvı kristal bileşiğinin dielektrik parametreleri kapasitans metoduyla 100Hz-10MHz frekans aralığı ve 16 -118 °C sıcaklık aralığı içerisinde empedans analiz cihazı kullanılarak hesaplanmıştır [42,43].

LC1 sıvı kristal bileşiği için seçtiğimiz sıcaklık aralığında, farklı açısal frekanslarda, sıcaklık ile dielektrik sabitinin gerçek kısmının eğrileri Şekil 5.1'de gösterilmektedir [42,43].

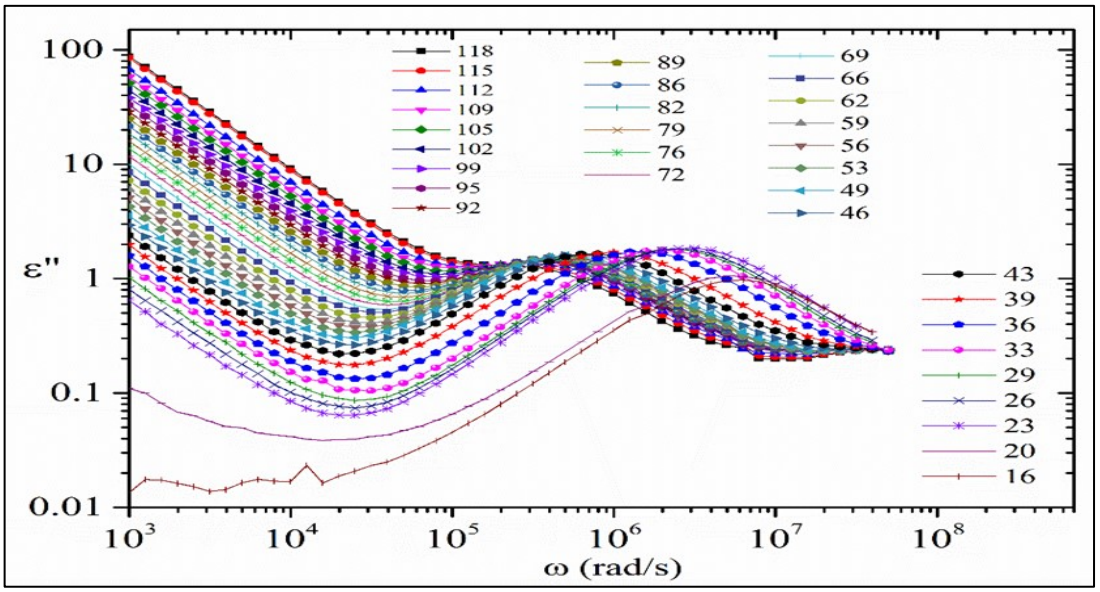


Şekil 5.1 LC1 sıvı kristal bileşiğine ait dielektrik sabitinin gerçek kısmının sıcaklığa bağlı ölçümleri [42,43].

Şekil 5.2 ve 5.3'te LC1 sıvı kristal bileşiğinin farklı sıcaklıklara ait dielektrik sabitinin gerçek ve sanal kısımlarının açısal frekansa bağımlılıkları gösterilmektedir [42,43].



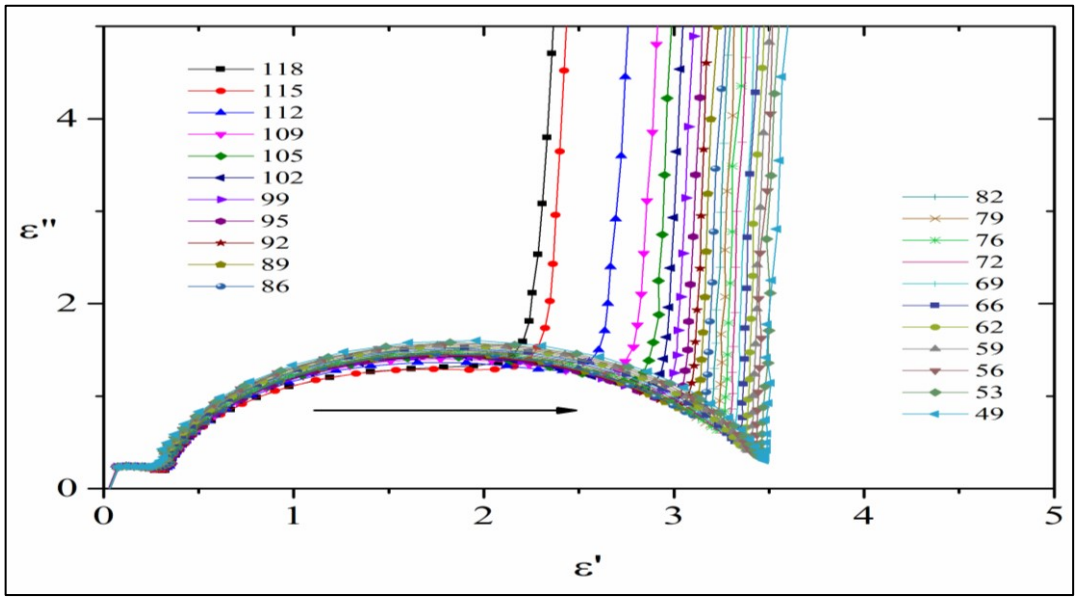
Şekil 5.2 LC1 sıvı kristal bileşiğine ait dielektrik sabitinin gerçek kısmının açısal frekansa bağlı ölçümleri [42,43].



Şekil 5.3 LC1 sıvı kristal bileşiğine ait dielektrik sabitinin sanal kısmının açısal frekansa bağlı ölçümleri [42,43].

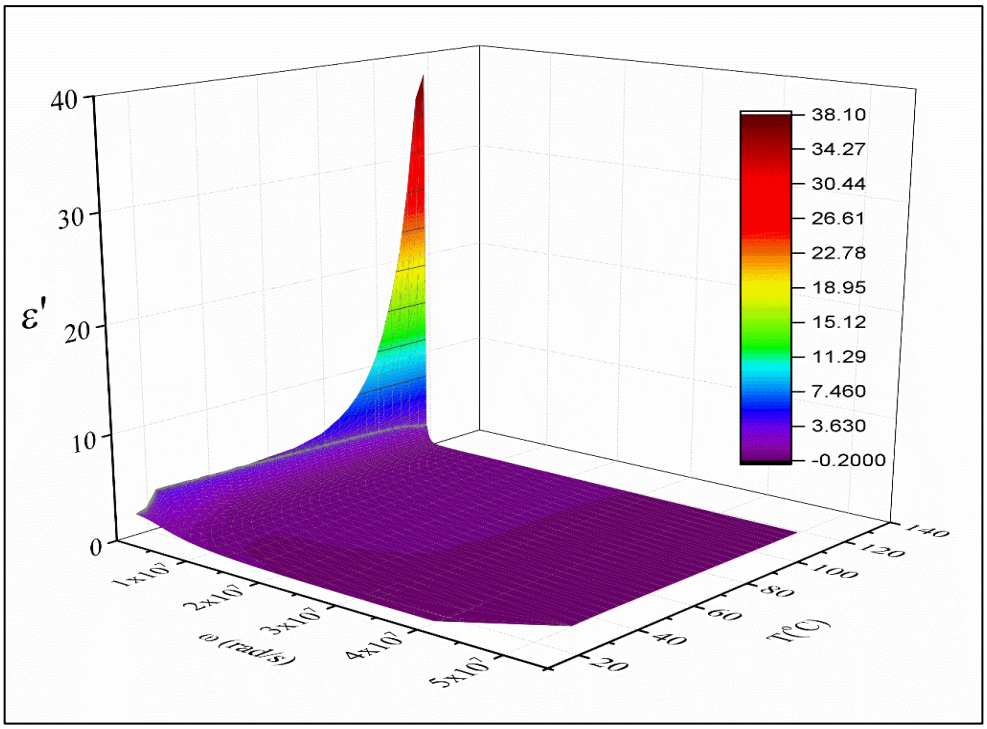
Şekil 5.2 ve 5.3'te açıkça kompleks dielektrik sabitinin değerlerinin sıcaklığa ve frekansa bağlı olarak değişmektedir ve Şekil 5.2' de ise LC1 bileşiğinin dielektrik sabitinin, izotropik faz geçiş sıcaklığı olan 114 °C'den sonra hızla artış gösterdiği gösterilmektedir [42,43].

Sıvı kristalin dielektrik rahatlama mekanizmasını analiz etmek için Cole-Cole grafiği çizilmiştir. (Şekil 5.4) [42,43].

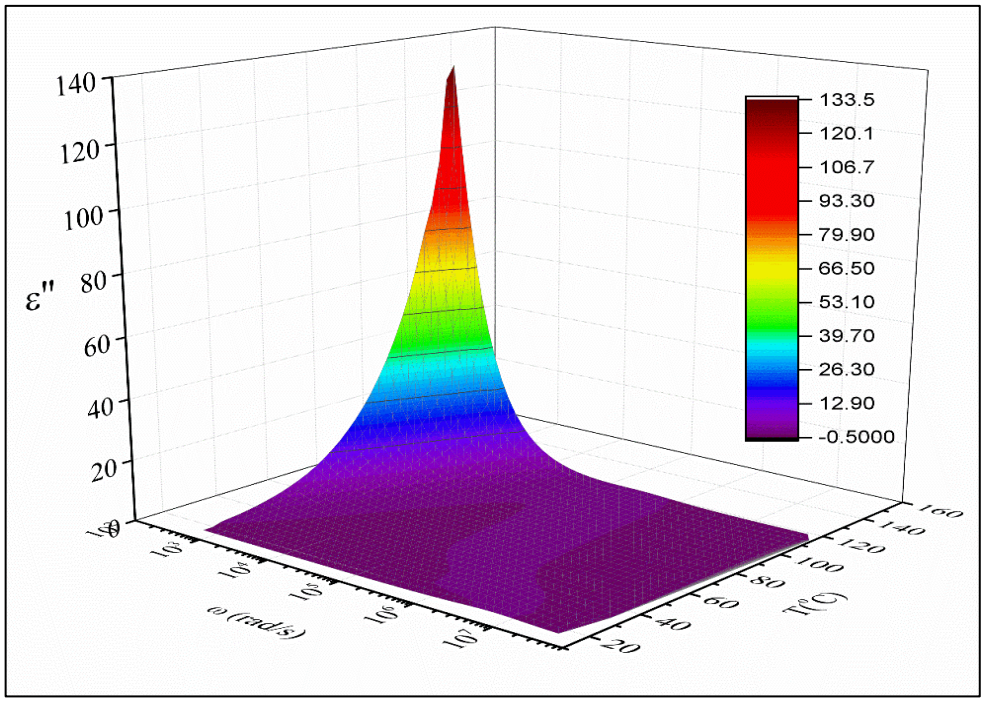


Şekil 5.4 LC1 sıvı kristal bileşiğine ait seçili sıcaklık aralığında çizilen Cole-Cole eğrileri [42,43].

Cole-Cole grafiği, Cole-Cole mekanizmasına bağlı kalan bir veya daha fazla birbirinden farklı rahatlama mekanizmalarının kıyaslanabilir büyüklükle muhafaza eden malzemeler için çok güçlü bir araçtır [42,43].



Şekil 5.5 LC1 sıvı kristal bileşiğine ait dielektrik sabitinin gerçek kısmının sıcaklığa ve açısal frekansa ait değişiminin 3 boyutta gösterimi [42,43].



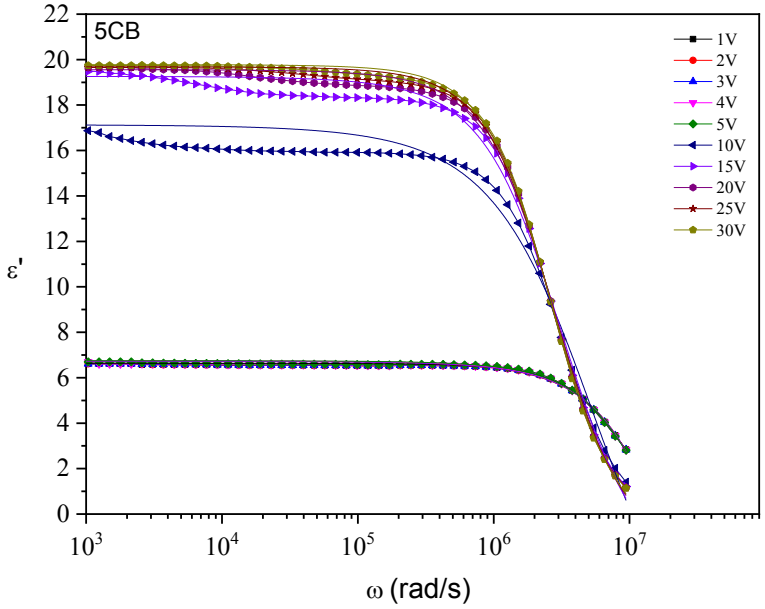
Şekil 5.6 LC1 sıvı kristal bileşiğine ait dielektrik sabitinin sanal kısmının sıcaklığa ve açısal frekansa ait değişiminin 3 boyutta gösterimi [42,43].

Şekil 5.5 ve 5.6'da dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımlarının sıcaklığa ve açısal frekansa bağlı davranışlarını gösteren 3B grafikler gösterilmiştir. Bu grafiklerde, ölçüm esnasında alınan tüm değerler kullanılmıştır ve bu sayede de mezogenin farklı fazlarına ait ani geçişler net görülmüştür. Buna ek olarak, bu sıvı kristal için faz geçiş sıcaklığı bu grafiklerden de belirlenebilmektedir [42,43].

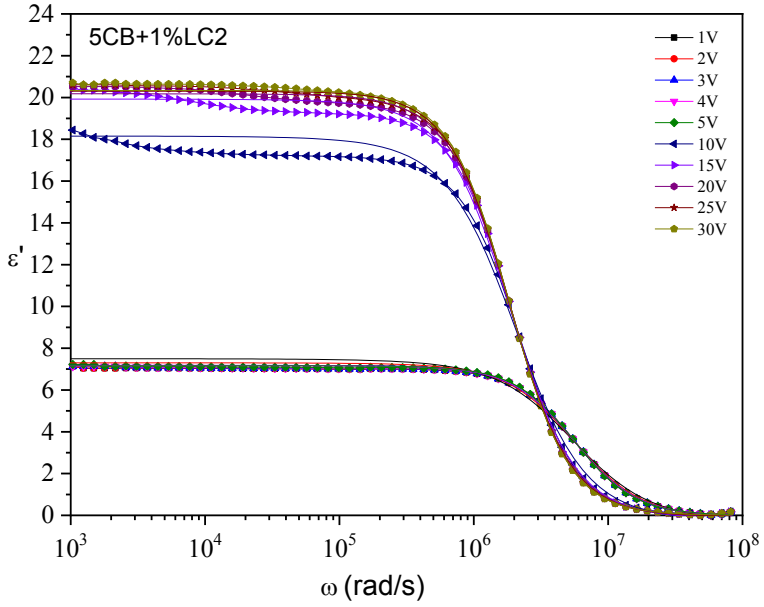
5.2 5CB+%1 LC2 Sıvı Kristal Kompozitin Dielektrik Özellikleri

Son yıllarda sıvı kristal kompozitlerin fiziksel ve elektro-optik özelliklerinin değişiminin incelenmesi önemli ve güncel bir konudur. Farklı sıvı kristallerin katkısıyla hazırlanan sıvı kristal kompozitlerin elektronik ve optik özellikleri geliştirilebilir. Tezin bu kısmının amacı; yeni sıvı kristal malzeme hazırlamak ve dielektrik parametrelerinin değişimini incelemektir. Ticari uygulamalarda çok kullanılan 5CB, 6CB, 7CB gibi oda sıcaklığındaki nematik sıvı kristallerdir. Bu ticari sıvı kristaller güçlü yönelimsel özelliklere sahiptir ve oda sıcaklığında sıvı kristaller olmasından dolayı uygulamalar açısından çok önemlidirler. Bu yüzden, tezin bu bölümünde, 5CB ticari sıvı kristali ile %1 (w/w) oranında LC2 katkısıyla hazırlanan 5CB+%1 LC2 sıvı kristal kompozitin dielektrik özelliklerinin araştırılması hedeflenmiştir. Ayrıca bu 5CB+%1 LC2 kompoziti ve saf 5CB için kapasitans-voltaj ölçümleri yapılarak, katkıyla moleküler yönelimlerin değişimleri incelenmiştir.

Şekil 5.7 'de 5CB ve 5CB+%1 LC2'nin dielektrik dispersiyon eğrileri gösterilmiştir. Bu eğrilerde; moleküler yönelimin düşük voltajda minimum olmasından dolayı, ε' parametresi, düşük voltajda minimumdur. Uygulanan gerilim yükseltildiğinde, ε' parametresinin arttığı ve belli bir voltaj değerinden sonra ise sabitlendiği görülmektedir. Bunun nedeni ise, gerilim arttırıldığında moleküler yönelim başlar ve ε' parametresi artar ve bu değer belli bir değerden sonra ise sabitlenmektedir. Şekil 5.7' de gösterilen dispersiyon eğrilerinin Origin programıyla fit edilmesiyle hesaplanan tüm dielektrik parametreleri Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de verilmiştir.



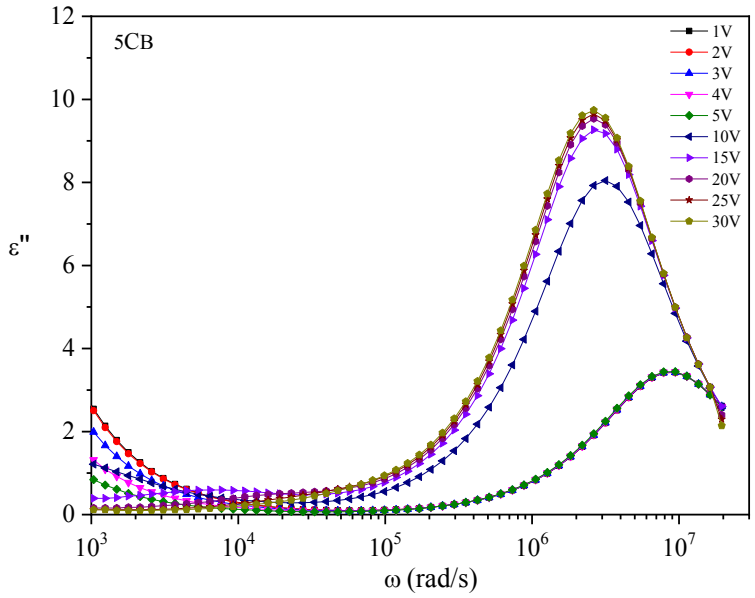
(a)



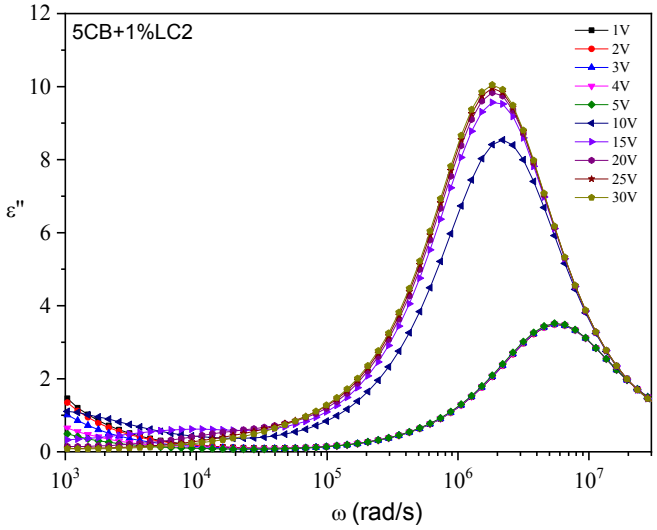
(b)

Şekil 5.7 5CB sıvı kristal bileşiği (a) 5CB+%1 LC2 sıvı kristal bileşiğinin (b) dielektrik sabitinin gerçek kısmının açısal frekansa bağlı ölçümleri.

Sıvı kristal malzemelerin dielektrik absorpsiyon değişimi ve kapasite-voltaj (C-V) değerleri kullanılarak ölçülmüştür ve dielektrik absorpsiyon eğrileri ise Şekil 5.8'de verilmiştir. Bu eğriler, relaksasyon pikleri göstermektedirler. Bu pikler uygulanan gerilimle düşük frekanslara kaymaktadır. Bu durum şöyle açıklanabilir, uygulanan gerilim moleküllerinin hareketini kolaylaştırmakta ve yönelim alternatif akımın düşük frekans değerlerinde meydana gelmektedir. Bu oluşan relaksasyon olayı da uygulanan gerilim nedeniyledir.



(a)



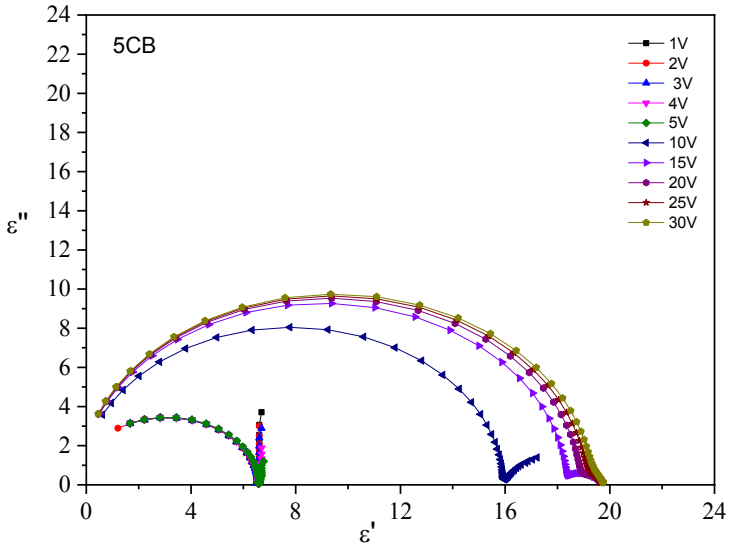
(b)

Şekil 5.8 5CB sıvı kristal bileşiği (a) 5CB+%1 LC2 sıvı kristal bileşiğinin (b) dielektrik sabitinin sanal kısmının açısal frekansa bağlı ölçümleri.

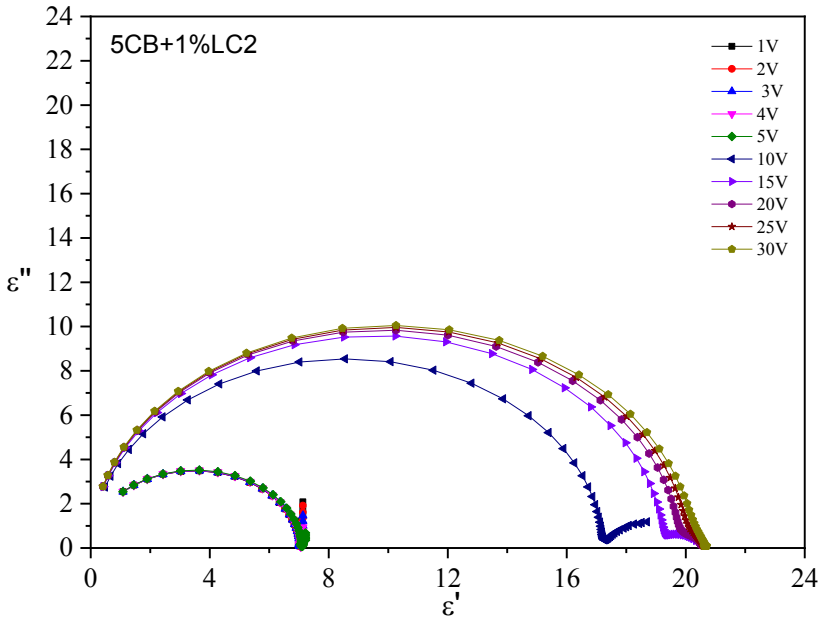
Cole-Cole eğrileri numunelerin relaksasyon mekanizması hakkında faydalı bilgiler verir. Kompleks dielektrik dispersiyon eğrileri Cole-Cole ilişkisiyle açıklanmıştır. Bu yüzden, sıvı kristallerin dielektrik relaksasyon mekanizmasını analiz etmek için, Şekil 5.9'da gösterilen Cole-Cole eğrileri çizilmiştir. Şekil 5.9 farklı voltajlarda Cole-Cole eğrilerini gösterir. Şekil 5.9'da ε'' parametresinin ε' parametresine bağlı değişim grafiği verilmektedir. Dairenin yarıçapının uygulanan voltajla artması, moleküllerin elektrik alana karşı yöneliminin değişiminden kaynaklandığını göstermektedir. Sıvı kristaller için dielektrik relaksasyon olayı Denk 4.6 ifadesiyle analiz edilir [77].

Cole-Cole eğrileri yardımıyla 5CB ve 5CB+%1 LC2 sıvı kristallerinde meydana gelen relaksasyon olayı analiz edilmiştir. Bu eğriler, relaksasyon olayının tipini ve relaksasyon için geçen süreyi vermektedir. Moleküllerin Cole-Cole eğrileri ε' nün bulunduğu x ekseninde yarım daire olmazsa, bu durum dielektrik relaksasyonun Debye tipi olmadığını gösterir. Cole-Cole eğrilerinden ve Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de dielektrik dispersiyon eğrilerinin fit edilmesiyle de hesaplanan α değerlerinden

görüldüğü gibi 5CB ve 5CB+%1 LC2 sıvı kristalleri Debye tipi relaksasyon mekanizması göstermiştir.

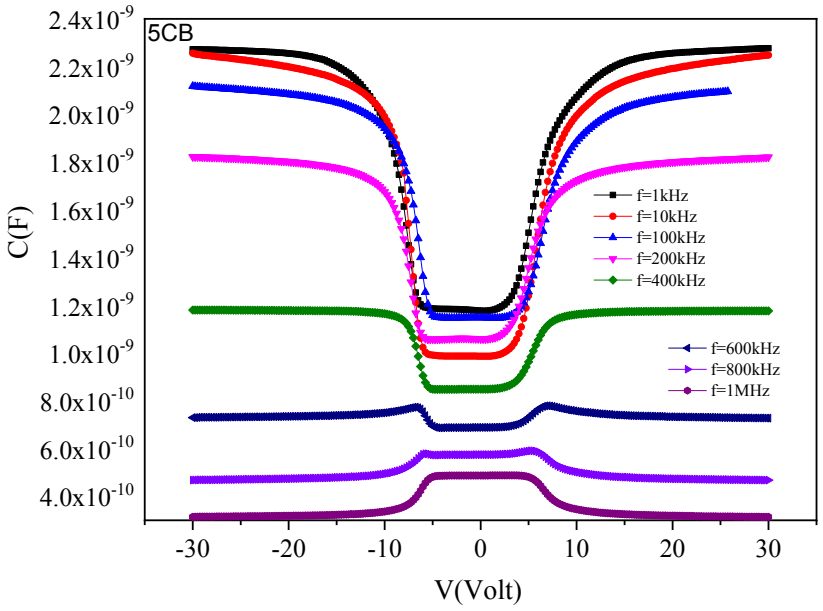


(a)

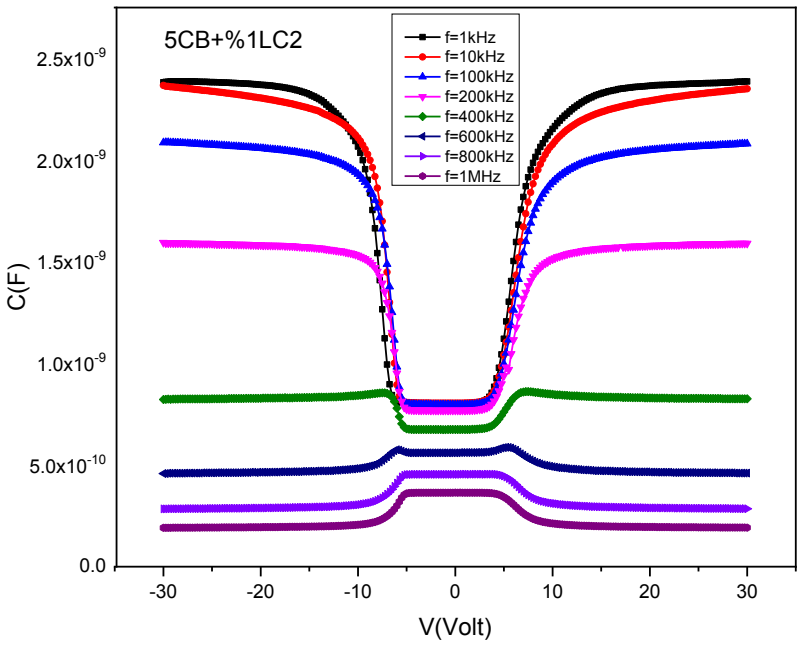


Şekil 5.9 5CB sıvı kristal bileşiği (a) 5CB+%1 LC2 sıvı kristal bileşiğine ait seçili sıcaklık aralığında çizdirilen Cole-Cole eğrileri.

5CB ve 5CB+%1 LC2 sıvı kristallerinde farklı frekanslar altında C-V eğrileri, Şekil 5.10'da verilmiştir. Şekil 5.10'da görüldüğü gibi, düşük voltajlarda sıvı kristallerin kapasitansı hemen hemen sabit kalmıştır ve kesin bir voltaj değerinden sonra şiddetli bir şekilde artmış ve sıvı kristal moleküllerinin yeniden yönlenmesiyle doyuma ulaşmıştır. Kapasitansın minimum değeri moleküllerin orjinal yönlenmesine uymaktadır. Uygulanan voltajın artmasıyla, moleküler yönlenme başlamıştır ve kapasitans artmıştır.



(a)



(b)

Şekil 5.10 Farklı frekanslarda 5CB sıvı kristal bileşiği (a) 5CB+%1 LC2 sıvı kristal bileşiğine ait C-V grafikleri.

Tablo 5.1 5CB için dispersiyon eğrilerinden hesaplanan dielektrik parametreleri.

Volt	α		τ (s)		Δε		Ayar. R^2
	Değer	**Std Hata**	**Değer**	**Std Hata**	**Değer**	**Std Hata**	
1	0.06967	0.02282	2.07E-08	2.07E-08	10.05514	0.01128	0.97904
2	0.12453	0.02404	4.70E-08	4.70E-08	23.21327	0.04534	0.92533
3	0.11971	0.02359	4.11E-08	4.11E-08	19.55398	0.03669	0.93863
4	0.11655	0.02429	3.70E-08	3.70E-08	17.46938	0.0309	0.94839
5	0.10647	0.02494	3.01E-08	3.01E-08	14.26048	0.02204	0.96318
10	0.23046	0.05427	6.99E-08	6.99E-08	25.22173	0.92134	0.94618
15	0.1227	0.02434	2.70E-08	2.70E-08	22.33717	0.27938	0.98809
20	0.08324	0.01462	1.49E-08	1.49E-08	21.52066	0.1097	0.99552
25	0.06638	0.01157	1.14E-08	1.14E-08	21.22996	0.07149	0.99714

Tablo 5.1 5CB için dispersiyon eğrilerinden hesaplanan dielektrik parametreleri (devamı).

30	0.05441	0.00831	8.01E-09	8.01E-09	21.05084	0.03795	0.99851

Tablo 5.2 5CB+%1 LC2 için dispersiyon eğrilerinden hesaplanan dielektrik parametreleri.

Volt	**α**		**τ (s)**		**Δε**		**Ayar.R^2**
	Değer	**Std Hata**	**Değer**	**Std Hata**	**Değer**	**Std Hata**	
1	0.11724	0.10543	1.82E-07	4.04E-08	7.83169	1.56374	0.80903
2	0.06601	0.03879	1.80E-07	1.31E-08	7.46307	0.20698	0.96837
3	0.03607	0.02696	1.79E-07	8.53E-09	7.25129	0.09888	0.98413
4	0.0278	0.02791	1.79E-07	8.69E-09	7.21134	0.10628	0.9829
5	0.02006	0.02621	1.79E-07	8.06E-09	7.18514	0.09431	0.9848
10	0.0783	0.02461	4.89E-07	2.20E-08	18.47446	0.61398	0.98809
15	0.04607	0.01876	5.34E-07	1.74E-08	20.10275	0.44404	0.993
20	0.02784	0.01523	5.40E-07	1.39E-08	20.26781	0.30447	0.99534
25	0.01989	0.01493	5.44E-07	1.35E-08	20.35307	0.29801	0.99551
30	0.01086	0.01534	5.44E-07	1.37E-08	20.34358	0.31812	0.99524

6
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, sırayla SmA ve B1 sıvı kristal mesofazlarına sahip LC1 ve LC2 nolu bileşiklerin, dielektrik spektroskopisi (DS) yöntemi ile, ayrıntılı karakterizasyonları yapılmıştır. Öncelikle tezin ilk aşamasında saf LC1 bileşiğinin dielektrik analizleri yapılmıştır. Tezin ikinci aşamasında ise ticari 5CB bileşiği %1 LC2 sıvı kristali ile katkılandırılarak 5CB +%1 LC2 sıvı kristal kompozitinin dielektrik analizi uygulanan farklı gerilimlerde, ayrıntılı yapılmıştır. LC1 sıvı kristaline ait farklı sıcaklık aralıklarında, ölçümler yapılmış ve alınan veriler sıcaklığa bağlı olarak titizlikle ele alınmıştır. Sonuçlar açıkça göstermektedir ki uygulanan dielektrik spektroskopi yöntemi ile sıvı kristal bileşikler hakkında ek bilgiler hesaplanmıştır. LC1 bileşiğinde yapılan sıcaklığa bağlı dielektrik ölçümler sayesinde, diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) yöntemine ek olarak sıvı kristal faz sergileyen moleküllerin önemli bir parametresi olan faz geçiş sıcaklıklarının net bir şekilde tayin edilebilmesi için DS yönteminin alternatif olarak da kullanılabileği ispatlanmıştır. DSC faz geçiş tayinleri için yeterli bir cihaz olsa da bu sıvı kristallerin uygulamalar açısından, elektro-optiksel cihazlarda kullanılması nedeniyle, moleküllere ait, polarizasyon ve iletkenlik gibi diğer elektro-optik özelliklerinin de bilinmesi çok önemlidir. 5CB+%1 LC2 sıvı kristal kompozitinde uygulanan farklı gerilimlere bağlı olarak yapılan dielektrik ölçümler sayesinde sıvı kristallerin uygulanan gerilime bağlı olarak yöneliminin düşük frekans bölgesine kaydığı gözlenmiştir. %1 katkı bile yönelimin kolaylaşmasını sağlamıştır, katkı daha da arttırılarak yönelim daha da kolaylaştırılabilir. Bu çalışmada kullanılan ölçüm metotları sayesinde, uygulamalar açısından önemli olan elektro-optik parametrelerde kapsamlı bilgiler elde edilebilmektedir.

Kaynakça

[1] F. Reinitzer, “Beiträge zur kenntniss des cholesterins,”, Monatshefte für Chemie und verwandte Teile anderer Wissenschaften, vol. 9, no. 1, pp. 421–441, 1888.

[2] O. Lehmann, “Über fliessende krystalle,”, Zeitschrift für Physikalische Chemie, vol. 4, pp. 462–472, 1889.

[3] G. W. Gray, Molecular Structure and Properties of Liquid Crystals. New York: Clarendon Press, 1962.

[4] H. Kelker ve B. Scheurle, “A liquid–crystalline (nematic) phase with a particularly low solidification point,”, Angewandte Chemie International Edition in English, vol. 8, no. 11, pp. 884–885, 1969.

[5] G. W. Gray, K. Harrison ve J. Nash, “New family of nematic liquid crystals for displays,”, Electronics Letters, vol. 9, pp. 130–131, 1973.

[6] T. Niori, T. Sekine, J. Watanabe, T. Furukawa ve H. Takezoe, “Distinct ferroelectric smectic liquid crystals consisting of banana shaped achiral molecules,”, Journal of Materials Chemistry, vol. 6, pp. 1231–1233, 1996.

[7] R. A. Reddy ve C. Tschierske, “Bent–core liquid crystals: polar order, superstructural chirality and spontaneous desymmetrisation in soft matter systems,”, Journal of Materials Chemistry, vol. 16, pp. 907–961, 2006.

[8] O. Köysal, “Azo boya ve fulleren katkılı nematik sıvı kristallerin elektro optik özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2007.

[9] F. Yeşil, “Anchoring Energy Measurements at the Aqueous Phase/Liquid Crystal Interface with Cationic Surfactants Using Magnetic Fréedericksz Transition,”,Langmuir, vol. 34, no. 1, pp. 81-87, 2017.

[10] I. Budagovsky, A. Kuznetsov, S. Shvetsov, M. Smayev, A. Zolot'ko, P. Statsenko, S. Trashkeev, A. Bobrovsky, N. Boiko ve V. Shibaev, "Optical Fréedericksz transition and director field structure recording in dye-doped nematic liquid-crystalline polymer,", Journal of Molecular Liquids, vol. 276, pp. 275-281, 2019.

[11]https://docplayer.biz.tr/46818316-Sivi-kristaller-ve-elektro-optik-uygulamalari.html (31 Aralık 2020)

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

[13] A. Jonas, "Sıvı kristallerin emülsiyon damlalarının anizotropik lazer kaviteleri olarak kullanılması", TÜBİTAK Projesi, Ocak 2017.

[14] A. L. Gaeta, M. Lipson ve T. J. Kippenberg, "Photonic-chip-based frequency combs,",Nature Photon, vol. 13, pp. 158-169, 2019.

[15] Ş. Özgan, M. Yazıcı, "Sıvı Kristaller ve Faz Geçişleri", KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi, vol. 6, no. 2, pp. 20-27, 2003.

[16] 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.

[17] 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.

[18] N. Avcı, "Çoklu Faz Geçişli Kalamitik ve Bent-Core Moleküllü Sıvı Kristallerin Termotropik, Termo-Morfolojik, Termo-Optiksel, Dielektrik ve Viskoelastik Özelliklerinni İncelenmesi", Doktora Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla, 2013.

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

[20] Y. Emül, “Monte Carlo Yöntemleri ile Termotropik Sıvı Kristal Özelliklerinin Belirlenmesi”, Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2014.

[21] P. Özden, “Sonlu Boyutlu Miselli Liyotropik Sıvı Kristalik Mezofazların Termo-Morfolojik, Termotropik, Termo-Optiksel ve Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla, 2017.

[22] Ş. Üstünel, “Sıvı Kristal İkili Karışımlarında Halperin-Lubensky-Ma Ölçeklenme Fonksiyonunun Çift Kırıcılık Ölçümleri ile Test Edilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2017.

[23] T. Yıldırım, “Ötektik Sıvı Kristal Nanotel Karışımlarının Faz Geçişlerini Termo-Optik Yöntemlerle İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2017.

[24] E. Kemiklioğlu, E. Atik, C. Çivi, “Mavi Faz Kolesterik Sıvı Kristalinin Termal Kararlılığı ve Mekanik Davranışları Üzerine Polimer Çeşitliliğinin Etkisi,”,Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, vol. 18,pp. 403-411, 2018.

[25] G. Kocakülah, “CdSeS/ZnS Kuantum Nokta Katkılı 5CB Nematik Sıvı Kristalinin Elektro-Optik ve Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, 2018.

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

[27] B. Okyay, “Sıvı Kristal Hücre Geometrilerine Bağlı Optik İletim Özelliklerinin Sayısal Yöntemlerle Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 2019.

[28] A. Yıldız, “Sıvı Kristallerde Faz Geçiş Sıcaklıklarının Dielektrik Spektroskopi Yöntemi ile İncelenmesi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2019.

[29] A. E. Mamuk, “Smektojen ve Nematojen Termotropik Sıvı Kristallerin Optiksel ve Termo-Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla, 2019.

[30] Y. Tapkıranlı, “Grafen Oksit Katkılı, 6CB Sıvı Kristalinin Elektro-Optik ve Termal Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 2019.

[31] G. G. Chernik ve E. P. Sokolova, ”A Differential Scanning Calorimetry Study of a Binary System,”,Journal of Colloid and Interface Science, vol. 141, no. 2, pp. 400-408, 1991.

[32] 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.

[33] J. Hemine, C. Legrand, N. Isaert, El Kaaouachi ve H.T. Nguyen, “Structural, Electro-Optical and Dielectric Characterizations of Ferroelectric Liquid Crystals Showing The Smc*–Sma*–N* Phase Sequence,”,Physica B, vol. 390, no. 1–2, pp. 34-39, 2007.

[34] P. Perkowski, “Dielectric Spectroscopy of Liquid Crystals. Theoretical Model Of Ito Electrodes Influence On Dielectric Measurements,”,Opto–Electronics Review, vol. 17, no. 2, pp. 180–186, 2009.

[35] P. Kopcansky, A. Kovalchuck, O. Gornitskac, V. Vovk, T. Kovalchuck, N. Tomasovicová, M. Koneracká, M. Timko, V. Závisová, J. Jadzyn, N. Éber ve I.

Studenyak, “Dielectric Spectroscopy of Liquid Crystal Doped with Fe3O4 Nanoparticles,”,Physics Procedia, vol. 9, pp. 36-40, 2010.

[36] 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.

[37] P. Malik, K. K. Raina, A. Bubnov, A. Chaudhary ve R. Singh, “Electro-Optic Switching and Dielectric Spectroscopy Studies of Ferroelectric Liquid crystals with Low and High Spontaneous Polarization,”,Thin Solid Films, vol. 519, pp. 1052–1055, 2010.

[38] 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.

[39] T. Soltani, M. Chemingui, N. Bouaziz, J.P. Marcerou ve T.Othman, “Electric Field Induced Transformations and Dielectric Properties of Ferrielectric Smectic Phase,”,Journal of Molecular Liquids, vol. 199, pp 162-166, 2014.

[40] B. M. G. Melo, M. P. F. Graça, P. R. Prezas, M. A. Valente, A. F. Almeida, F. N. A. Freire ve L. Bih, “Study Of Structural, Electrical, And Dielectric Properties Of Phosphate–Borate Glasses And Glass–Ceramics,”,Journal of Applied Physics, vol. 120, no. 5, pp. 051701, 2016.

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

[42] M. Erdoğan, N. Y. Canlı, The analysis of phase transition temperatures of SmA liquid crystal by dielectric characterization, Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications, vol. 14, no. 7-8, p. 344 – 350, 2020.

[43] M. Erdogan, N. Y. Canli, ‘’Dielectric Characterization of SmA Liquid Crystal Depend on Temperature’’, Turkish Physical Society 35th International Physics Congress (TFD35), Muğla, Türkiye 2019.

[44] N. Coşkun, “Yeni mesomorfik bileşiklerin sentezi ve sıvı kristal özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.

[45] G. Erol, “Bifenil Türevi Muz Şekilli Kiral Sıvı Kristallerin Sentezi, Karakterizasyonu ve Elektro-Optik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016.

[46] K. N. Rao, “A novel class imbalance learning method using subset filtering,” 2012.

[47] H. Guo ve H. L. Viktor, “Learning from imbalanced data sets with boosting and data generation: The databoost-im approach,”,ACM SIGKDD Explorations Newsletter, vol. 6, no. 1, pp. 30–39, 2004.

[48] M. Schadt, “Liquid crystal materials and liquid crystal displays,”, Annual Review of Materials Research, vol. 27, pp. 305–379, 1997.

[49] D. Çağıl, N. Kaya ve Ahmet Alıcılar, “Y-H tipi sıvı kristal sistemlere karbon nanotüp ilavesinin moleküler yönlenme ve faz geçişi üzerine etkileri, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, vol. 26, no. 1, pp. 213–221, 2011.

[50] M. Okutan, “Fulleren ve azo boya katkılı nematik sıvı kristal sistemlerde dielektrik ve optik spektroskopi yöntemleri ile moleküler durulma zamanlarının ve kırılma indisi değişimlerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, İstanbul, 2010.

[51] P. de Gennes, The Physics of Liquid Crystals, The International series of monographs on physics. New York: Clarendon Press, 1974.

[52] Eds. J. A. McCleverty, T. J. Meyer, Comprehensive Coordination Chemistry II, Oxford, 2003.

[53] K. Bilen, “Isıtılan Düzlem Bir Plakaya Dik ve Eğik Hava Jeti Çarpmasında Isı Transfer Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi”, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Trabzon, 1994.

[54] D. Demus ve L. Richter, Textures Of Liquid Crystals, Verlag-Chemie,Weinheim, 1983.

[55] D. Demus, “Plenary Lecture. One hundred years of liquid-crystal chemistry: Termotropic liquid crystals with conventional and unconventional molecular structure,”,Liquid Crystals, vol. 5, no. 1, pp. 75-110, 1989.

[56] G. Y. Shing, “Synthesis and Characterization Smectic and Nematic Phases in 4-(Dimetyhlamino) benzylidene-4’-alkanoyloxyanilines, Bachelor of 164 Scince (Hons) Chemistry”, Universiti Tunku Abdul Rahman, Kampar, Perak, Malaysia, 2011.

[57] S. Höger, J. Weber, A. Leppert ve V. Enkelmann, “Shape-persistent macrocycle with intraanular alkyl groups: some structural limits of discotic liquid crystals with an inverted structure,”,Beilstein Journal of Organic Chemistry, vol. 4, no. 1, pp. 1-8, 2008.

[58] N. V. Madhusudana, “On Some Liquid Crystals Made of Banana-Shaped Molecules and Their Mixtures with Rod-like Molecules,”,Liquid Crystals, vol. 36, no. 10-11, pp. 1173-1184, 2009.

[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] M. Nakata, “Chirality and Polarity in Bent-core Liquid Crystals”, Doktora Tezi, Tokyo Institute of Technology Department of Organic and Polymeric Materials, Tokyo, 2006.

[61] D. M. Walba, “Ferroelectric Liquid Crystal Conglomerates,”,Topics in Stereochemistry, Materials-Chirality, vol. 24, pp. 457-518, 2003.

[62] http://dspace.rri.res.in/bitstream/2289/3872/7/chapter%201.pdf (31 Aralık 2020)

[63] P. Colling P. ve M. Hird, Introduction to Liquid Crystals, Chemistry and Physics, Taylor & Francis Ltd, 2001.

[64] P.S. Pershan, Structure of liquit crystal phases, World Scientific, New Jersey, 1988.

[65] M. Değirmenci, "Sıvı Kristal Polimerler", Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Bölümü, Yüksek Lisans Semineri, Elâzığ, 1996.

[66] M. Emek, "Faz Dönüşümlerinin Nematik Sıvı Kristallerin Elektrooptik Özelliklerine Etkisi", Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2007.

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

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

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

[70] http://www.instec.com/portal/article/index/id/93/cid/66.html (31 Aralık 2020)

[71] B. B. Eran, A. Nesrullajev ve N. Y. Canli, "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.

[72] S. M. Yaniç, "Kalamitik Sıvı Kristallerin Termodinamik Özellikleri ve Polimerde Dağılmış Sıvı Kristal Kompozitlerinin Sentezi ve Karakterizasyonu", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2018.

[73] https://www.nikon.com/products/microscope-solutions/lineup/polarizing/ (31 Aralık 2020)

[74]https://fakultaeten.huberlin.de/en/mnf/forschung_internationales/grs/salsa/p-a-labs/application-lab/instrumentation/a-labs-lm/polarized-light-microscopy (31 Aralık 2020)

[75] http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_118.html (31 Aralık 2020)

[76] H. Fröhlich, Theory of Dielectrics, Clarendon Pres, Oxford, 1958.

[77] I. Bunged ve M. Popescu, Physics of Solid Dielectrics, Elsevier Science, Amsterdam, 1984.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgisi: muge.dimen@gmail.com

Konferans Bildirileri

1. M.Erdogan, N.Y. Canli, ''Dielectric Characterization of SmA Liquid Crystal Depend on Temperature'', Turkish Physical Society 35th International Physics Congress (TFD35), Türkiye, 2019

Makale

1. M.Erdogan, N.Y. Canl, ''The analysis of phase transition temperatures of SmA liquid crystal by dielectric characterization,'' Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications, Vol. 14, No. 7-8, p. 344 – 350, July-August 2020