T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BOYA DUYARLI GÜNEŞ PİLLERİNDE SIVI KRİSTAL KATKILI ELEKTROLİTLERİN İNCELENMESİ

İrem ÇAKIR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Fizik Programı

Danışman

Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI

Haziran, 2024

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BOYA DUYARLI GÜNEŞ PİLLERİNDE SIVI KRİSTAL KATKILI ELEKTROLİTLERİN İNCELENMESİ

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

Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

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

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

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

Danışmanım Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Boya Duyarlı Güneş Pillerinde Sıvı Kristal Katkılı Elektrolitlerin İncelenmesi" 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.

İrem ÇAKIR

İmza

Bu çalışma, “Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü’nün **FYL-2023-5583** numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Anneme

ve

kardeşime

TEŞEKKÜR

Lisans döneminden beri birlikte çalıştığımız, bana bu tez konusunu önerip değerli fikir ve bilgi birikimlerini her zaman paylaşan, tecrübesi sayesinde her konuda yardımcı olup yol gösteren, akademik hayatımda yanımda olduğu için kendimi şanslı hissettiğim, sevgisini ve inancını hiç eksik etmeyen canım danışman hocam Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda bulundukları katkılardan dolayı kimya bölümünden sayın Prof. Dr. Belkız BİLGİN ERAN hocama ve tezimde kullandığım malzemelerin üretimini sağlayan bütün sıvı kristal grubuna teşekkür ederim.

Tez boyunca ölçümlerim için laboratuvarını kullanmama izin veren sayın Prof. Dr. Serap GÜNEŞ hocama ve ölçümlerin alınmasında yardımcı olan Hamed MOEINI ALISHAH'a çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca verdiği maddi destekten dolayı TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) 2210-A genel yurt içi yüksek lisans burs programına teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım süresince beraber çalıştığım arkadaşlarım Dilek ÖZÜKANAR ve İlkay KARA'ya teşekkür ederim.

9 yıllık YTÜ hayatımda her zaman yanımda olan, desteğini ve inancını eksik etmeyen, bu yolda birlikte ilerlediğimiz başta biricik dostlarım Arş. Gör. Hasan Şafak ERDAĞ ve Tuğçe Sinem ÖKTEMER olmak üzere bütün arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Beni bugünlere getirip ne olursa olsun arkamda duran, maddi ve manevi olarak desteğini her zaman hissettiğim, motivasyonum düştüğünde ayağa kaldıran annem Fatma ÜNER ve canımdan çok sevdiğim kardeşim Ecem ÇAKIR'a yaptıkları fedakarlıklar için sonsuz minnettarım.

İrem ÇAKIR

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR v
SİMGE LİSTESİ viii
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 4
1.3 Hipotez 5
2 SIVI KRİSTALLER 6
2.1 Kısa Tarihçe 6
2.2 Genel Bilgi 6
2.3 Sıvı Kristallerin Sınıflandırılması 7
2.3.1 Termotropik Sıvı Kristaller 8
2.3.2 Liyotropik Sıvı Kristaller 14
2.4 Sıvı Kristallerin Karakterizasyon Yöntemleri 15
2.4.1 Polarizasyon Mikroskobu (PM) 15
2.4.2 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) 17
2.4.3 Diferansiyel Termal Analiz (DTA) 17
2.5 Sıvı Kristallerin Uygulamaları 18
3 BOYA DUYARLI GÜNEŞ PİLLERİ 20
3.1 Kısa Tarihçe 20
3.2 Güneş Pillerinin Sınıflandırılması 21
3.3 Temel BDGP Yapısı 21
3.4 BDGP Çalışma Prensibi 25
3.5 BDGP Parametreleri 26
4 MATERYAL VE YÖNTEM 29
4.1 Malzemeler 29
4.2 Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Hazırlanması 32

4.2.1 Camların Temizlenmesi 32

4.2.2 Elektrotların Hazırlanması 33

4.2.3 Sıvı Kristal Katkılı Elektrolitlerin Hazırlanması 34

4.2.4 BDGP'lerin Birleştirilmesi ve Ölçüm Alınması 34

4.3 Kullanılan Cihaz ve Yardımcı Düzenekler 35

4.3.1 XRD 35

4.3.2 FESEM 36

4.3.3 SEM 37

4.3.4 I-V Ölçümü 38

5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR 39

5.1 TiO_2'nin Kristal Yapısının Farklı Yöntemlerle İncelenmesi 39

5.1.1 XRD 39

5.1.2 FESEM 40

5.1.3 SEM 41

5.1.4 TiO_2'nin Optik Özelliklerinin İncelenmesi 42

5.2 Sıvı Kristal ile Katkılı Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Fotovoltaik Performanslarının Karakterizasyonu 45

6 SONUÇ 52

KAYNAKÇA 54

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 60

SİMGE LİSTESİ

V_{OC}	Açık Devre Gerilimi
CIGS	Bakır İndiyum Galyum Selenit
ZnO	Çinko Oksit
ZnS	Çinko Sülfür
Fe_2O_3	Demir Oksit
AM	Hava kütlesi
CdS	Kadmiyum Sülfür
CdTe	Kadmiyum Tellürid
I_{SC}	Kısa Devre Akımı
J_{SC}	Kısa Devre Akım Yoğunluğu
µm	Mikrometre
nm	Nanometre
ppm	Parts per million (milyonda bir)
Ru	Rutenyum
TiO_2	Titanyum Dioksit
η	Verim

KISALTMA LİSTESİ

BDGP	Boya Duyarlı Güneş Pilleri
Col	Kolumnar Mezofaz
CRT	Katot Işını Tüpü
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
DTA	Diferansiyel Termal Analiz
EIS	Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi
FESEM	Yüksek Çözünürlüklü Elektron Mikroskobu
FF	Doldurma Faktörü
FTO	Flor Katkılı Kalay Oksit
ITO	İndiyum Kalay Oksit
LC	Sıvı Kristal
LCD	Sıvı Kristal Ekran
LCE	Sıvı Kristal Elastomer
LCP	Sıvı Kristal Polimer
N	Nematik Mezofaz
N_D	Nematik Diskotik Mezofaz
PCE	Güç Enerji Dönüşümü
PM	Polarizasyon Mikroskobu
Pt	Platin
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SmA	Smektik A
SmB	Smektik B
SmC	Smektik C
TCO	Şeffaf İletken Oksit Cam
XRD	X-Işını Difraksiyonu

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Kristal, sıvı kristal ve izotropik sıvının sıcaklığa bağlı olarak faz geçişleri 7

Şekil 2.2 Sıvı kristallerin sınıflandırılması 8

Şekil 2.3 Termotropik sıvı kristaller 9

Şekil 2.4 Kalamitik sıvı kristallerin fazları 10

Şekil 2.5 Nematik fazda moleküllerin yönelimi 10

Şekil 2.6 SmA, SmC ve SmB faz moleküllerin yönelimi 11

Şekil 2.7 Kolesterik mezofazın yapısı 12

Şekil 2.8 Diskotik sıvı kristallerin şematik gösterimi 13

Şekil 2.9 Muz şekilli sıvı kristalin moleküler yapısı 14

Şekil 2.10 Liyotropik sıvı kristal olan sabun ve fosfolipitin yapısı 15

Şekil 2.11 Polarizasyon mikroskobu 16

Şekil 2.12 Diferansiyel termal analiz sisteminin şematik diyagramı 17

Şekil 3.1 Boya duyarlı güneş pili şematik gösterimi 17

Şekil 3.2 BDGP'nin sandviç hücre yapısı 26

Şekil 3.3 Güneş pilinin karanlıkta ve belli bir ışık altında I-V ve J-V grafikleri 28

Şekil 4.1 Sıvı kristal molekül formülleri (a) LC1 (b) LC2 (c) Ruthenizer 535 bisTBA (N719)'nın moleküler yapısı 30

Şekil 4.2 LC1 bileşiği için DTA grafiği 30

Şekil 4.3 LC2 bileşiğinin (a) ısıtma ve (b) soğutma sırasındaki DSC termogramları 31

Şekil 4.4 LC1 bileşiğinin soğutma sürecindeki (180^{o}C) PM tekstür görüntüsü 32

Şekil 4.5 LC2 bileşiğinin soğutma sürecindeki (75^{o}C) PM tekstür görüntüsü .. 32

Şekil 4.6 Deneyin ilk kısmı için TiO2'nin camlara uygulanması ve boyaya daldırılması 33

Şekil 4.7 Deneyde kullanılan spin coater ve fırın 34

Şekil 4.8 Farklı konsantrasyonlarda hazırlanan sıvı kristal katkılı elektrolitler. 34

Şekil 4.9 BDGP hücrelerine elektrolit eklenmesi ve akım-gerilim ölçümlerinin alınması 35

Şekil 4.10 Deneyde kullanılan XRD cihazı 36

Şekil 4.11 Deneyde kullanılan FESEM cihazı 37

Şekil 4.12 Deneyde kullanılan SEM cihazı 38

Şekil 4.13 Deneyde kullanılan güneş simülatörü cihazı 38

Şekil 5.1 TiO2 ve tavlanmış TiO2'nin XRD spektrumları 40

Şekil 5.2 TiO2 (a), tavlanmış TiO2 (b), Boya+TiO2 (c)'nin 100 000 x 1µm, 500 000 x 200nm ve 250 000 x 500nm boyutlarındaki FESEM görüntüleri 41

Şekil 5.3 Boya+TiO2'nin 25 000 x 4µm boyutlarındaki SEM görüntüleri 42

Şekil 5.4 Boya+TiO2'nin 100 000 x 1µm boyutlarındaki SEM görüntüleri 42

Şekil 5.5 Boya+TiO2'nin 250 000 x 400nm boyutlarındaki SEM görüntüleri.. 42

Şekil 5.6 Profilometre ile ölçülen (a) tavlanmamış TiO2 (b) tavlanmış TiO2 (c) boyaya daldırılmış TiO2'nin kalınlıkları 43

Şekil 5.7 Tauc plot yöntemi ile hesaplanan (a) tavlanmamış TiO2 (b) tavlanmış TiO2 (c) boyaya daldırılmış TiO2'nin yasak bant aralıkları 45

Şekil 5.8 Referans, 0.5mg LC1 ve 1mg LC1 BDGP'lerinin J-V grafikleri 46

Şekil 5.9 Referans, 0.5mg LC1 BDGP'lerinin J-V grafikleri 47

Şekil 5.10 Referans, 0.3mg LC2 ve 0.5mg LC2 BDGP'lerinin J-V grafikleri 48

Şekil 5.11 LC1 sıvı kristalinin konsantrasyona göre farklı katkılarla hazırlanan BDGP'lerinin J-V grafikleri 49

Şekil 5.12 Farklı konsantrasyonlardaki LC1 katkısına bağlı ISC-FF değişim grafiği 49

Şekil 5.13 Referans, 0.3mg LC2 ve 0.5mg LC1 BDGP'lerinin J-V grafikleri 51

TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1 LC1 ve LC2'nin faz geçiş sıcaklıkları (ºC) ve entalpi (Jg-1) değerleri 31

Tablo 5.1 Referans, 0.5mg LC1 ve 1mg LC1 BDGP'lerinin fotovoltaik parametreleri 45

Tablo 5.2 Referans, 0.5mg LC1 BDGP'lerinin fotovoltaik parametreleri 46

Tablo 5.3 Referans, 0.3mg LC2 ve 0.5mg LC2 BDGP'lerinin fotovoltaik parametreleri 47

Tablo 5.4 LC1 sıvı kristalinin konsantrasyona göre farklı katkılarla hazırlanan BDGP'lerinin fotovoltaik parametreleri 48

Tablo 5.5 Referans, 0.5mg LC1 ve 1mg LC1 BDGP'lerinin fotovoltaik parametreleri 50

Tablo 5.6 Referans, 0.3mg LC2 ve 0.5mg LC1 BDGP'lerinin fotovoltaik parametreleri 50

ÖZET

Boya Duyarlı Güneş Pillerinde Sıvı Kristal Katkılı Elektrolitlerin İncelenmesi

İrem ÇAKIR

Fizik Anabilim Dalı

Fizik Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI

Artan insan nüfusuyla doğru orantılı olarak enerji ihtiyacı da artmaktadır. Yenilenebilir enerjinin en büyük kaynağı olan güneş, kuşkusuz ki bu ihtiyacı karşılamak için akla gelen en iyi çözümdür. Boya duyarlı güneş pilleri (BDGP'ler), yeni nesil fotovoltaikler için son derece umut vericidir. Boya duyarlı güneş pilleri üzerine yapılan çalışmalar, verimlilikleri henüz çok yüksek olmasa da üretiminin kolay ve ucuz olması nedeniyle gün geçtikçe artmaktadır. Güneş pillerine eklenecek malzemeye bağlı olarak verimlilik artırılabilir. Genel olarak küçük organik moleküller, polimer malzemelere göre daha iyi taşıma özelliklerine sahiptir. Polimerlerin bu dezavantajları sıvı kristallerin kullanılmasıyla aşılabilir. Literatürde sıvı kristallerin boya duyarlı güneş pillerinde kullanımı oldukça yeni bir konu olup çok fazla çalışma bulunmamaktadır ancak ticari sıvı kristal kullanımının güneş pillerinin verimliliğini arttırdığı gözlemlenmiştir. Bu tez çalışmasında elektrolite katkı maddesi olarak kalamitik sıvı kristaller eklenerek boya duyarlı güneş pillerinin performansının artırılması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sıvı kristaller, boya duyarlı güneş pilleri, elektrolit katkısı, güç enerji dönüşümü

ABSTRACT

Investigation of Liquid Crystal Doped Electrolytes In Dye Sensitized Solar Cells

İrem ÇAKIR

Department of Physics

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI

In direct proportion to the increasing human population, the need for energy is also increasing. Sun, the largest source of renewable energy, is the best solution that comes to mind to meet this need. Dye sensitized solar cells (DSSCs) are extremely promising for the next generation of photovoltaics. Although the efficiency of dye-sensitized solar cells is not very high yet due to their easy production and cheapness, studies on such solar cells are increasing. Efficiency can be improved depending on the material to be added into the solar cells. In general, small organic molecules have better transport properties than polymer materials. These disadvantages of polymers can be overcome by using liquid crystals instead. In the literature, the use of liquid crystals in dye sensitized solar cells is quite new and there are not many studies, but it has been observed that the use of commercial liquid crystals increases the efficiency of solar cells. In this thesis, calamitic liquid crystals were added as an additive to the electrolyte and it was aimed to increase the performance of dye sensitive solar cells.

Keywords: Liquid crystals, dye sensitized solar cells, electrolyte additive, power conversion

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Dünyanın her geçen gün artan insan nüfusuna oranla artan enerji ihtiyacı fosil yakıt kaynaklarının aşırı kullanımına ve araştırmacıların yeni bir alternatif enerji kaynağı aramasına yol açmaktadır. Bu enerji sorununa çözüm olarak yenilenebilir bir enerji olan ve güneşten aldığı enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren güneş pilleri verilebilir [1, 2]. Üçüncü nesil bir güneş pili olan boya duyarlı güneş pilleri üzerine yapılan araştırmalar, yenilenebilir temiz bir enerji kaynağı olmasının yanı sıra, düşük üretim maliyeti, üretim kolaylığı, renk ve şeffaflık gibi değişken estetik özellikler gibi avantajları sayesinde her geçen gün artmaktadır [3]. Boya duyarlı güneş pilleri ilk olarak 1991 yılında Gratzel ve arkadaşları tarafından bulunmuş olup aynı zamanda 'Gratzel hücresi' olarak da adlandırılmaktadır [4, 5]. Boya duyarlı güneş pilleri birçok avantaja sahip olmasına karşın silikon bazlı birinci nesil güneş pillerine kıyasla verimleri düşüktür ve bu sorunun en büyük kaynaklarından biri kullanılan elektrolitteki sızıntı, buharlaşma ve termal kararsızlık gibi problemlerdir. Bu problemleri çözmek için araştırmacılar elektrolite sıvı kristal katkısı yapmayı hedeflemişlerdir [6]. Sıvı ve kristal katı arasında optik, elektronik ve fiziksel özelliklere sahip mezofazlar sergileyen sıvı kristaller, bir kristalinkine benzer uzun menzilli bir oryantasyonel ve/veya konumsal düzenlemeye sahiptir, fakat aynı zamanda sıvı benzeri akış da gösterir. Sıvı kristaller geometrik olarak anizotropiktir ve solvent ortamına eklendiklerinde yönlendirilirler, böylece moleküller arası karmaşıklık azaldığından ve elektron hareketi hızlandığından viskozite düşmüş gibi davranırlar. Düşük viskozite sayesinde iletkenlik artar ve buna bağlı olarak verim de artar [7]. Ayrıca oda sıcaklığında yüksek iletkenliğe sahip bir mezofaz oluşturdukları için, sıvı elektrolitlerin en büyük sorunu olan sızıntıya karşı sıvı kristallerin kullanımı çok iyi bir seçimdir [8]. Sıvı kristallerin güneş pillerinde kullanımı oldukça yeni bir konudur ve dolayısıyla yapılan çalışmalar da çok değildir.

Boya duyarlı güneş pillerinde sıvı kristal kullanımına örnek olarak, Yamanaka ve arkadaşları 2007 yılında boya duyarlı güneş piline imidazolyum katyonları ile

smektik A fazına sahip yeni bir iyonik sıvı kristal katkıladılar. Yüksek viskoziteye rağmen yüksek iletkenlikte gösteren bu katkı, boya duyarlı güneş pilinin Jsc'sinde artışa neden olarak verimliliğini de arttırdı [9].

Kawano ve arkadaşları 2007 yılında farklı boyalar kullanarak bunları iyonik sıvı ve iyonik sıvı kristal elektrolitlerinde katkılamışlardır. Boya duyarlı güneş pilinin verimliliğinin, iyonik sıvı kristal katkılı elektrolit kullanıldığında geleneksel iyonik sıvı elektrolitine nazaran daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir [10].

Kim ve arkadaşları 2009 yılında boya duyarlı güneş piline farklı konsantrasyonlarda sıvı kristal E7 ekleyerek verime katkısını ölçmüşlerdir. Ölçtükleri 0, 5, 10, 15 ve 20 (wt%) konsantrasyonlarından % 4.52 ile en yüksek verime kütlece % 10'luk konsantrasyonda ulaşmışlar ve elektrolite sıvı kristal ekleyerek boya duyarlı güneş pilinin verimliliğini arttırdığını kanıtlamışlardır [11].

Vijayakumar ve arkadaşları 2009 yılında geleneksel PVdF-co-HFP bazlı polimer elektrolitlerin içine LC katkılayarak boya duyarlı güneş pilinin verimliliğini % 6,07'den % 6,42'ye ve iyonik iletkenliğini 1,9 × 10^{-2}'den 2,33 × 10^{-2} S/cm'ye arttırmışlardır [12].

Ahn ve arkadaşları 2012 yılında e-PVdF-co-HFP polimer jel elektrolitine gömülü sıvı kristal E7 kullanarak boya duyarlı güneş pilininin verimliliğini incelemişlerdir. e-PVdF-co-HFP polimer jel elektroliti 100 mW/cm^2 ışık altında % 6.35 PCE gösterirken, sıvı kristal eklenmiş E7+ e-PVdF-co-HFP elektroliti % 6.82 PCE göstererek neredeyse sıvı elektrolit kullanılarak yapılan BDGP'ninkine eşdeğer (% 7.17) olmuştur [8].

Guldi ve arkadaşları 2013 yılında sıvı kristalin boya duyarlı güneş pilinin performansı üzerine katkısını incelemek amacıyla imidazolyum bazlı iyonik sıvı kristaller sentezlediler ve % 1,5 verim elde ettiler [13].

Högberg ve arkadaşları 2016 yılında 70 derecede izotropizasyon gösterene kadar smektik A fazında olan 1 maddesine 1:1 molar oranında IL EMII ekleyerek smektik A fazının sıcaklık aralığını 78 dereceye arttırmışlardır. (1/EMII) Aynı şekilde 22 dereceye kadar smektik B fazı, 96 dereceye kadar smektik A fazı gösteren 2 maddesine de EMII ekleyerek 2/EMII elde etmişlerdir. 3 maddesi 185 derecede izotropizasyon gösterene kadar smektik A iken 4 maddesi 77 dereceye kadar kristal faz gösterip, 240 dereceye kadar smektik A fazı göstermektedir. Bu 4 maddenin

BDGP'ye katkılanmasıyla en yüksek performansı ve en iyi verimi 1/EMII maddesi % 6.1 ile (ortalama % 5.8) 30 derecede kaydedilmiştir. 2/ EMII-DSSCs % 1.6 verim gösterirken 3 maddesi % 0.2 verime sahiptir [14].

Kamarudin ve arkadaşları 2016 yılında, nematik(N) E7 ve SmA (8/2 organosiloksan) ikili sıvı kristal karışımı yaparak yeni bir elektrolit türü üretmişler ve boya duyarlı güneş pilinin performansına etkisini ölçmüşlerdir. Bu nanoyapılar kullanılarak üretilen BDGP'lerde V_{OC}, J_{SC} ve η üzerinde artış gözlemlenmiştir. Fotovoltaik parametrelerdeki bu artışın, EIS (Electrochemical Impedance spectroscopy) ölçümü ile desteklenen elektron ömrünün artması ve iyon iletimine yardımcı olan kanalların oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir [6].

Kamarudin ve arkadaşları 2017 yılında, farklı alkil zincir uzunluklarına sahip sıvı kristaller kullanılarak LC-PE kompozitlerinin üretimini ve alkil zincir uzunluğunun LC-PE'lerin morfolojisi, iletkenliği ve elektrokimyasal özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sıvı kristal olarak 5CB, 6CB, 7CB, 9CB ve 10CB kullandılar. Alkil zincir uzunluğunun 5CB'den 10CB'ye çıkarılmasıyla iyonik iletkenlikte bir azalma gözlendi. Bu, alkil zinciri ne kadar uzunsa, malzemenin yalıtkanlığının o kadar yüksek olması nedeniyle bekleniyordu. Ayrıca, daha kısa alkil zincirlerine sahip LC'ler, daha uzun zincirlere sahip türevlere kıyasla daha düşük viskozite sergiler. Daha yüksek viskoziteli malzemeler daha düşük iyonik iletkenlik gösterdiğinden, LC'nin alkil zincir uzunluğunu artırmanın LC-PE'nin iyonik iletkenliğini azalttığı bulundu. Sonuç olarak alkil zincir uzunluğu en kısa olan 5CB η = % 3,36 ile en yüksek verimi gösterirken alkil zinciri en uzun olan 10CB η = % 2,06 ile en düşük verimi göstermiştir [7].

Tan ve arkadaşları 2018 yılında ilk defa BDGP uygulaması için T^-/T_2 redoks çiftini içeren sıvı kristal elektrolit kullanmışlardır. Etkili iyon taşınması için geniş ve oldukça hareketli 2B yollar bu fazda oluşabileceğinden, smektik sıvı kristal fazı kullanmışlardır. Sonuç olarak BDGP'nin veriminin sıcaklıktaki artışla birlikte arttığını ve simüle edilmiş AM1.5G güneş ışığı altında 70°C'de % 4.1'e ulaştığını gözlemlemişlerdir. Tiolat/disülfit (T^-/T_2) sıvı kristal elektrolit, yüksek sıcaklıklarda BDGP performansını iyileştirmek için büyük bir potansiyele sahip olduğunu bildirmişlerdir [15].

Wang ve arkadaşları 2019 yılında BDGP'lerde T^-/T_2 sıvı kristal elektrolitlerin performansını daha da geliştirmek için smektik elektrolit ve bir karbon/PEDOT kompozit nanoparçacık elektrot kullanmışlardır. Sonuç olarak, optimize edilmiş smektik tiyolat/disülfid elektrolit ve kompozit elektrot kullanan BDGP'nin FF, Jsc ve Voc değerleri büyük ölçüde geliştirmişler ve simüle edilmiş AM1.5G solar ışık altında 40°C'de % 6,5'lik bir verim elde etmişlerdir. BDGP, 35 ila 55°C sıcaklık aralığında % 6,0'dan daha yüksek verim ile fotovoltaik performansı sabit kalmıştır ve bu, pratik uygulamaya yönelik organik sıvı kristal elektrolit bazlı BDGP'lerin verimini arttırmak için potansiyelinin yüksek olduğunun göstergesidir [16].

Son zamanlarda yapılan çalışmalardan biri olan Zhu ve arkadaşları 2024 yılında farklı oksoalkil zincir uzunluklarına sahip üç bifenil sıvı kristal (LC) sentezlendi ve en geniş sıvı kristal faz aralığına sahip olanı, boya duyarlı güneş pillerinin sıvı elektrolitine (I^-/I_3^-) bir elektrolit katkı maddesi olarak ekledi. Sonuç olarak LC'lerin eklenmesinin elektrolitteki redoks çiftlerinin iletim yollarını arttırdığını ve bunun da kısa devre akım yoğunluğunu (Jsc) daha da artırabildiğini göstermektedir. Aynı zamanda LC elektrolit sistemi, özellikle redoks çiftlerinin iletiminde, sıvı elektrolite (PCE=% 3,76) göre daha iyi fotovoltaik performans (PCE=% 4,05) sağladığını ve sıvı elektrolitte organik çözücünün buharlaşmasını ve sızmasını da önleyebildiğini göstermişlerdir [17].

1.2 Tezin Amacı

Dünyadaki enerji kaynaklarının hızla tükeniyor olması sebebiyle temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları ile çalışan teknolojilerin kullanımının artması çok önemlidir. Bu sebeple güneş enerjisinden elektrik enerjisi üreten güneş pilleri uygulamaları gelecek vadeden inovatif çalışmalardır ve üç nesile ayrılmıştır. Bu kapsamda tezin ilk aşamasında üçüncü nesil olan boya duyarlı güneş pillerinde kendi hazırladığımız TiO_2 ile, ikinci aşamasında ise hazır alınan TiO_2 ile BDGP hazırlanarak üniversitemiz kimya bölümü tarafından sentezlenmiş LC1 ve LC2 nolu sıvı kristal bileşiklerinin elektrolite katkı yapılmasıyla BDGP'lerin performanslarına bakılmış ve sıvı kristal katkısı ile verimin arttırılması amaçlanmıştır. Aynı zamanda TiO_2'nin XRD, SEM, FESEM ve yasak enerji bant seviyelerine bakarak, morfolojik özelliklerinin ve kristal yapı analizinin tayininin yapılması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Bu tez çalışmasında aromatik halka sayısı farklı iki sıvı kristal bileşiğin (LC1 ve LC2 kodlu) farklı konsantrasyonlarda, boya duyarlı güneş pilinin sıvı elektrolitine katkılanması ve verime etkisinin incelenmesi planlanmıştır.

Boya duyarlı güneş pillerinde elektrolite sıvı kristal katkısının verime etkisi deneysel çalışmalarla gösterilmesi ve pillerin fotovoltaik performanslarının kıyaslanması planlanmıştır.

2
SIVI KRİSTALLER

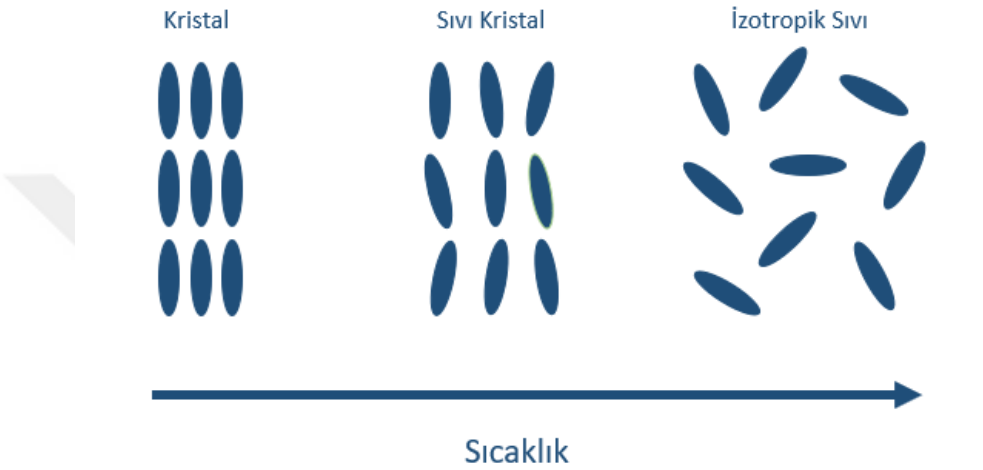
2.1 Kısa Tarihçe

Sıvı kristaller ilk olarak 1888 yılında Karl-Ferdinands-Universität'ta Avusturyalı botanikçi ve kimyager Friedrich Reinitzer (1857–1927) tarafından bitkilerle ilgili çalışmalar için kolesterol esterleri yaparken tesadüfen keşfedilmiştir. Havuçlardan elde edilen kolesterollerin özelliklerini incelerken, kolesteril benzoatın (C34H50O2) iki farklı erime noktası olduğunu ve hem kristallerin optik özelliklerine sahip hem de sıvılar gibi akışkan olduğunu fark etmiştir. Bu keşfiyle ne yapacağından emin olamayan Reinitzer, 14 Mart 1888'de bulgularını, maddelerin kristal özellikleri üzerinde çalışan, Aachen Üniversitesi'ndeki Alman fizikçi Otto Lehmann (1855–1922) ile paylaşmıştır. Reinitzer, kolesterol benzoatın 145.5°C'de bulanık, tamamen sıvı gibi eriyik göründüğünü, 78.5°C'de ise aniden tamamen berraklaştığını ve ayrıca bu geçişlerin geri döndürülebilir olduğunu belirterek Lehmann'dan bu olağandışı olguyu doğrulamasını istemiştir. Benzer davranışa sahip malzemeler üzerinde de çalışan Lehmann, bu yeni maddeyi önce 'akan kristaller' daha sonra da şu an da bildiğimiz adıyla 'sıvı kristaller' olarak isimlendirmiştir. Daha sonra sıcak sahne ve polarize optik mikroskop kombinasyonunu kullanarak yüksek sıcaklıkta gözlemler yapan Lehmann, çalışmalarına yalnız devam etmiştir. Çalışmalarından edindiği bilgilerle bu malzemelerin faz değiştirdiği koşulları kontrol etmeyi öğrenerek çeşitli fazlarında sergilediği özellikleri inceleyebilmiştir. 25 Ekim 1889'da Lehmann'ın 'Über Fliessende Krystalle' ('Akan Kristaller Üzerine') makalesi ile birlikte sıvı kristal biliminin temeli atılmıştır [18].

2.2 Genel Bilgi

Madde bilindiği üzere katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç halden oluşur. Katı kristalin molekülleri arasında çok az bir boşluk olup düzenli bir yapıya sahiptir. Bu düzenli yapı hem pozisyonel hem de yönelimseldir. Bu sayede moleküller kristalin spesifik noktalarında konumlanırlar ve molekül eksenlerinin de yönleri belirlidir. Sıvılar ise izotropik yapıda olup belirli bir düzene değil hareketliliğe sahiptirler. Bu sebeple

de bulundukları kabın şeklini alırlar [21, 22]. Katı kristal ve izotropik sıvı arasındaki bu ara faz sıvı kristal fazı olarak isimlendirilir. Sıvı kristal fazı arasında bulunduğu katı fazın elektriksel anizotropi ve optik, sıvı fazın ise moleküler hareketlilik ve akışkanlık özelliklerini taşır. Sıvı kristaller katılardaki gibi yönelimsel düzene sahipken pozisyonel düzene sahip değillerdir. Sıvı kristal ara fazı aynı zamanda mezofaz, mezofazı meydana getiren moleküller de mezogen olarak isimlendirilirler [22, 23].



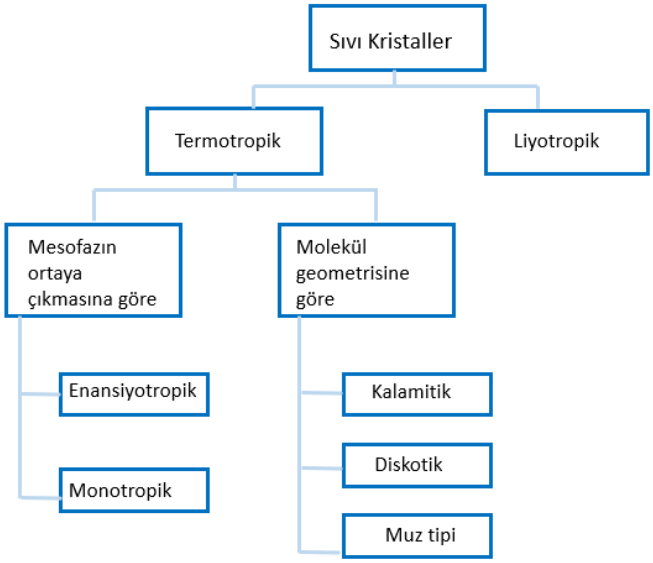
Şekil 2.1 Kristal, sıvı kristal ve izotropik sıvının sıcaklığa bağlı olarak faz geçişleri

Madde ısıtıldığında moleküller arası etkileşim azalır ve katı kristal yapının üç boyutlu örgü düzeni iki boyutluya indirgenir. Katı kristal ısıtıldığında Şekil 2.1'de görüldüğü gibi önce sıvı kristal fazına dönüşür. Eğer madde daha da ısıtılmaya devam ederse termal hareketlilik daha da artarak hem pozisyonel hem de yönelimsel düzenin bulunmadığı, moleküllerin düzeninin rastgele bir durum aldığı sıvı fazına geçiş yapılmış olur [24].

2.3 Sıvı Kristallerin Sınıflandırılması

Sıvı kristaller farklı şekilde sınıflandırılırlar ancak hepsinin ortak özelliği anizotropik olmasıdır. Ya şekilleri bir moleküler eksen diğer ikisinden çok farklı olacak şekildedir ya da bazı durumlarda moleküller farklı çözünürlük özelliklerine sahiptir. Her iki durumda da bu anizotropik moleküller arasındaki etkileşimler, akışkan bir fazda yönelimsel ve bazen de konumsal düzeni destekler [20]. Sıvı

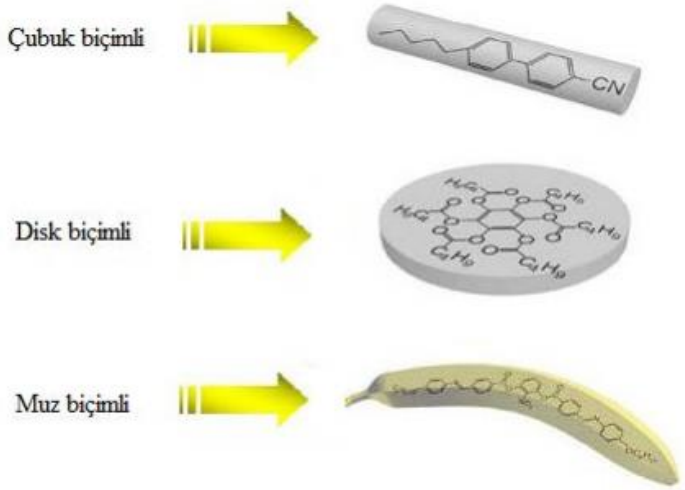
kristaller molekül yapılarına ve mezofazın ortaya çıkmasına göre termotropik ve liyotropik olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılırlar.



Şekil 2.2 Sıvı kristallerin sınıflandırılması

2.3.1 Termotropik Sıvı Kristaller

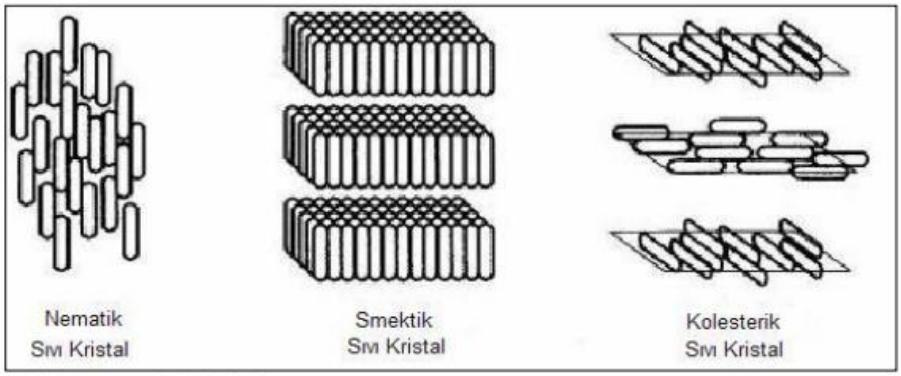
Molekül yapısına göre hem lineer hem de non-lineer optik özelliklerine sahip olduklarından dolayı termotropik sıvı kristaller en geniş uygulama alanına sahip sıvı kristal çeşididir [24]. İsminden de belli olacağı üzere sıcaklık etkisiyle oluşurlar. Termotropik sıvı kristaller mezofazın ortaya çıkmasına ve molekül geometrisine göre iki ayrı grupta incelenir. Madde hem ısıtılırken hem de soğutulurken oluşan termodinamik olarak kararlı mezofazlara enansiyotropik, ısıtılırken görülmeyip yalnızca soğutulurken görülen termodinamik olarak kararsız mezofazlara monotropik mezofaz denir. Molekül geometrisine göre ise molekül ağırlığı düşük mezogenler olup kalamitik (çubuk biçimli), diskotik (disk biçimli) ve muz tipi (bent core) biçimli şeklinde sınıflandırılırlar [27].



Şekil 2.3 Termotropik sıvı kristaller [27]

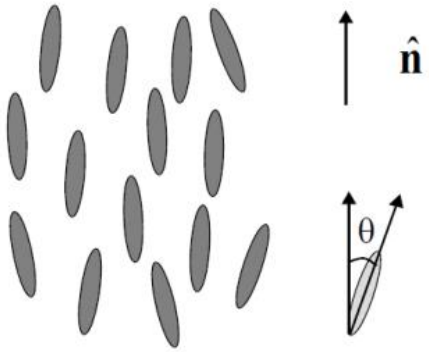
2.3.1.1 Kalamitik Sıvı Kristaller

Sıvı kristal fazları oluşturan en yaygın molekül türü çubuk şeklindeki moleküldür (yani bir moleküler eksen diğer ikisinden çok daha uzundur). Bu tür bileşikler kalamitik sıvı kristaller olarak adlandırılır ve birçok farklı fazı mevcuttur. Molekülün uzunluğunun en azından bir kısmı boyunca oldukça sert olması önemlidir. Çünkü hizalamayı destekleyen etkileşimler üretmek için uzun bir şekli koruması gerekir. Aslında böyle bir molekülün tarifi, doğrudan veya katı bağlantı grupları aracılığıyla birbirine bağlanan iki veya daha fazla halka yapısının yanı sıra her uçta hidrokarbon zincirlerinden oluşur [20]. Günümüzde 20000'den fazla kalamitik bileşik olduğu bilinmektedir [26]. Kalamitik sıvı kristaller yapısal ve fiziksel özelliklerine göre üç farklı faz sergiler. Bunlar nematik, kolesterik ve smektik fazlar olarak adlandırılır [27].



Şekil 2.4 Kalamitik sıvı kristallerin fazları [24]

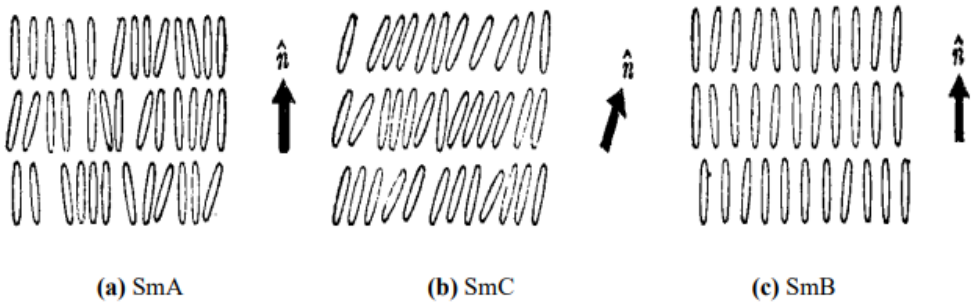
Nematik Mezofaz (N): Polarizasyon mikroskobu altında incelendiğinde nematik fazdaki moleküllerin tekstürlerinin ipliksi bir yapı gösterip düzenli olmadıklarından dolayı, ilk defa G. Friedel tarafından keşfedilip ismi Yunanca iplik anlamına gelen 'nematos' sözcüğünden türetilmiştir [22]. Nematik mezofaz, en yaygın sıvı kristal fazı olmakla beraber yalnızca yönelimsel düzene sahip olup konumsal düzenden yoksundurlar. Sıvı kristal moleküllerin eksenlerinin hizalandığı yön, nematik direktör (n) olarak bilinir [19]. Nematik mezofaz tüm sıvı kristal fazları içinde en düzensiz yapıya sahiptir ve viskozitesi en düşük olandır. İzotropik sıvıya en yakın ve akışkan olan faz olması nedeniyle de faz geçişleri sırasında her zaman izotropik sıvıya geçişten bir önce gelirler [27].



Şekil 2.5 Nematik fazda moleküllerin yönelimi [27]

Nematik sıvı kristal fazı günümüzde sıvı kristal göstergeler (LCD)'lerde kullanılması nedeniyle teknik ve ticari açıdan en uygun ve tercih edilen sıvı kristal fazıdır [21]. Elektriği milisaniye mertebelerinde iletmelerinden dolayı elektro-optik cihazlarda kullanımı yaygındır [27].

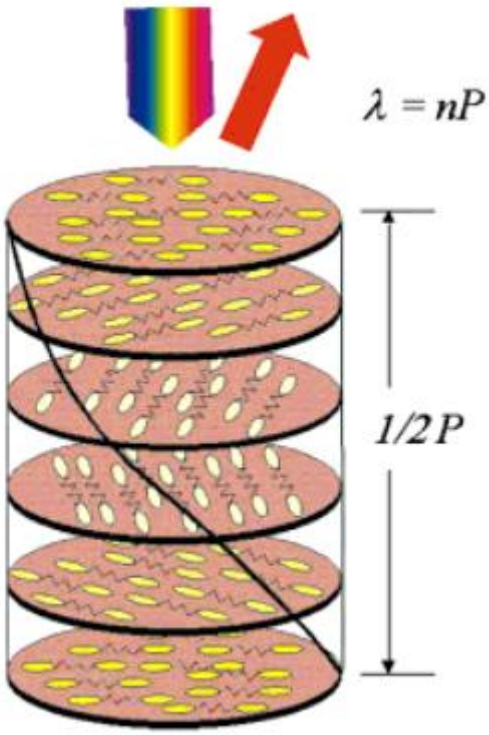
Smektik Mezofaz: Yunanca ‘sabun’ anlamına gelen smektik kelimesi, mekanik özellikleri sabunları andıran bazı mezofazlar için G. Friedel tarafından türetilen isimdir. Tüm smektik sıvı kristaller yapıları bakımından x-ışını kırınımı ile ölçülebilen, iyi tanımlanmış bir katmanlar arası mesafeye sahip katmanlı yapılardır. Bu sebepten dolayı smektik moleküller, nematiklerden daha düzenlidir. Belirli bir malzeme için smektik fazlar genellikle nematik alanın altındaki sıcaklıklarda meydana gelir [28]. Geçici olarak yaklaşık sekiz tane smektik faz tanımlanmıştır ancak bu fazlardaki moleküler sıralamanın kesin doğası hakkında hala önemli belirsizlikler mevcuttur. En iyi karakterize edilen ve en çok gözlenen smektik fazları SmA, SmC ve SmB mezofazlarıdır. Bu üç fazın da ortak özelliği katmanlar içinde belirli aralıklarla fakat aynı doğrultu boyunca yönelim düzeni göstermeleridir. Bu yönelim düzeninin bir sonucu olarak smektik fazlar, nematik veya kolesterik fazlardan çok daha viskozdur [29].



Şekil 2.6 SmA, SmC ve SmB faz moleküllerin yönelimi [27]

Smektik A fazında yönelimsel düzen vektörü n tabakalara dik iken, smektik C fazında smektik A’dakine benzerdir fakat belirli bir açıyla yönlenmişlerdir. Smektik B fazında ise moleküller tabakaların içinde hegzagonal bir biçimde yerleşmişlerdir ve bu sayede smektik A fazına göre daha düzenlidirler [24].

Kolesterik Mezofaz: Kolesterik mezofaz 1888 yılında Reinitzer’ın kolesteril benzoatın iki farklı erime noktasını bulmasıyla keşfedilen ilk sıvı kristaldir [30]. Kolesterik faz, kiral moleküllerden oluşan nematik bir fazdır. Sonuç olarak sistem, moleküllerin uzun eksenine dik sarmal bir düzen elde eder [31]. Kolesterik mezofazda ince nematik katmanlar, direktörleri döndürülerek istiflenir. Böylelikle moleküller, Şekil 2.7'de gösterildiği gibi sarmal bir sıralamaya sahip olmuş olur.



Şekil 2.7 Kolesterik mezofazın yapısı

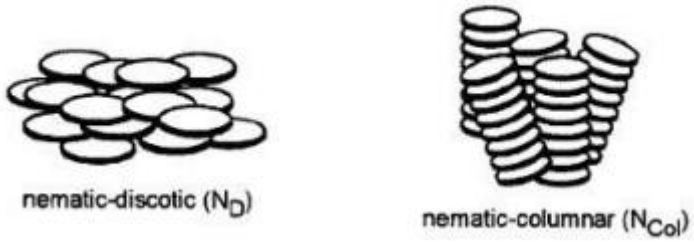
Kolesterik fazdaki sıvı kristaller, gelen ışığın Bragg koşulunu (k=nP) karşılayan bir dalga boyuna sahip olması koşuluyla, gelen beyaz ışığı seçici olarak yansıtır [32].

Kolesterik sıvı kristaller, moleküllerin ayna simetrisine sahip olmaması ve sistemin serbest enerjisini en aza indirmek için üst üste yerleştirildiğinde hafifçe dönmesi gerektiğinden, içsel bir sarmallık içerir [19].

2.3.1.2 Diskotik Sıvı Kristaller

Çubuk benzeri yapıdaki moleküllerin yanı sıra ilk kez 1977 yılında Chandrasekhar tarafından disk şeklinde molekül yapılarına sahip bileşiklerin sıvı kristal davranışı sergilediği keşfedildi [30]. Diskotik sıvı kristaller genellikle 4, 6 ya da 8 karbonlu hareketli yan zincirlerden oluşur ve bu zincirler kalamitik sıvı kristallere benzer [33]. Diskotik sıvı kristaller termotropik sıvı kristallerin içinde olduğundan dolayı belirli bir sıcaklık aralığında dayanıklıdırlar. Bu gruba saf maddeler ve karışımlardan oluşan maddeler dahildir [21]. Diskotik sıvı kristaller altıgen simetriye sahip fazlar oluşturabilirler [26]. Diskotik mezogenlerin oluşmasında ortadaki sert çekirdeğin çapı, hareketli yan zincirlerin türü ve uzunluğu sıvı kristalin özelliklerinin oluşması bakımından büyük önem sağlar. Bu tür moleküllerin uzunluk, disk yüksekliği ve genişliği, çaplarının farklılık göstermesi anizotropik

geometrinin oluşmasına neden olur. Diskotik sıvı kristaller nematik diskotik mezofaz (N_D) ve kolumnar mezofaz (col) olmak üzere iki farklı faz çeşidi sergiler [33].



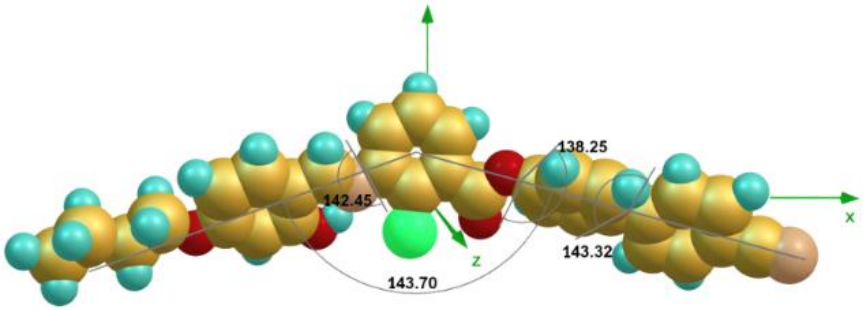
Şekil 2.8 Diskotik sıvı kristallerin şematik gösterimi [33]

2.3.1.3 Muz Tipi Sıvı Kristaller

1925 yılında Schröter ve Vorländer'in beş halkalı biesterler üzerine yaptıkları çalışma sayesinde ilk kez muz tipi sıvı kristal "bent-core" sentezi yapılmıştır. Sentezlenen izoftalat bileşiğinin yapısının 250ºC üzerinde beklenmedik şekilde davrandığı görülmüş ve bu sentez ile Vorländer'in sert lineer çekirdek ünitesi olmadan da sıvı kristalliğin sağlanabileceği hipotezi doğrulanmıştır.

Bükülmüş-çekirdek (bent-core) ya da muz şekilli sıvı kristaller temel olarak açısal merkezi çekirdek, iki sert lineer çekirdek ve iki terminal zincirden oluşur. Muz şekilli ismini yapılarındaki kıvrıklıktan dolayı almışlardır [33].

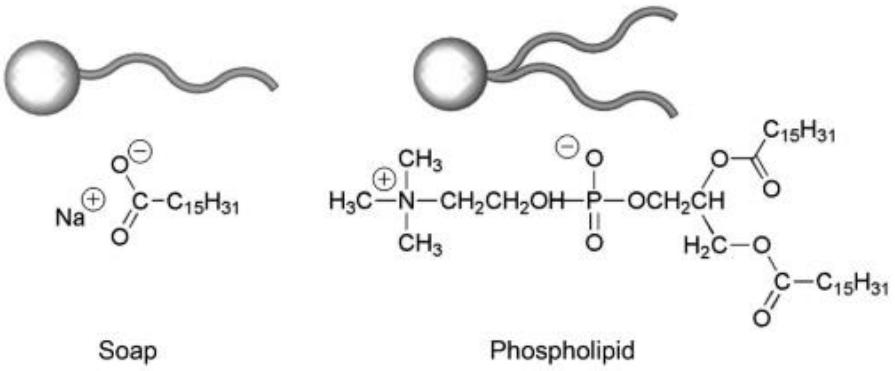
Çoğunluk olarak bent-core bileşikler beş, altı veya yedi halkalı sistemlerden oluşur ve muz fazları olarak adlandırılan fazları sergiler [34].



Şekil 2.9 Muz şekilli sıvı kristalin moleküler yapısı [34]

2.3.2 Liyotropik Sıvı Kristaller

Liyotropik sıvı kristaller en genel tanımıyla maddeye uygun çözücü eklenmesiyle oluşan yapılardır denilebilir. Çözücünün hangi oranda eklendiği önemlidir çünkü bu tür sıvı kristallerin dayanıklılığını sıcaklığından çok konsantrasyonu belirler [24]. Liyotropik sıvı kristal fazları genellikle bileşenlerinden biri amfifil (suyla güçlü şekilde etkileşen hidrofil kısım ya da suyu sevmeyen hidrofobik kısma sahip moleküller) diğeri ise su olmak üzere en az iki veya daha fazla bileşenden oluşur. Liyotropik sıvı kristallere en iyi örnek olarak sabunlar ve su karışımları verilebilir [30]. Liyotropik mezofazlar, bir çözücünün eklenmesiyle uzun menzilli bir düzen oluşturur ve tarihsel olarak amfifilik moleküllerden oluşan malzemeleri tanımlamak için kullanılmıştır. Liyotropik sıvı kristaller, amfifilik moleküller bir çözücü içinde eritildiğinde oluşur ve molekülün amfifilik yapısından, katkı maddelerinin varlığından ve çözeltinin koşullarından etkilenir. Liyotropik sıvı kristal sistemleri (LLCS'ler), katmanlı (La), altıgen ve kübik fazlar halinde sınıflandırılabilir [35].



Şekil 2.10 Liyotropik sıvı kristal olan sabun ve fosfolipitin yapısı [20]

Liyotropik sıvı kristaller birçok biyolojik sistemde bulunur ve sıvı kristal malzeme alanının önemli bir alt bölümünü temsil eder [19].

2.4 Sıvı Kristallerin Karakterizasyon Yöntemleri

Sıvı kristaller yukarıda da bahsedildiği üzere sıcaklık değişimi ya da çözücü eklenmesi, molekül geometrisi, mezofazın ortaya çıkması gibi farklı sebeplerle meydana gelirler. Sıvı kristallerin hangi sınıfa ait olduğunu bulmak için farklı karakterizasyon yöntemleri mevcuttur.

2.4.1 Polarizasyon Mikroskobu (PM)

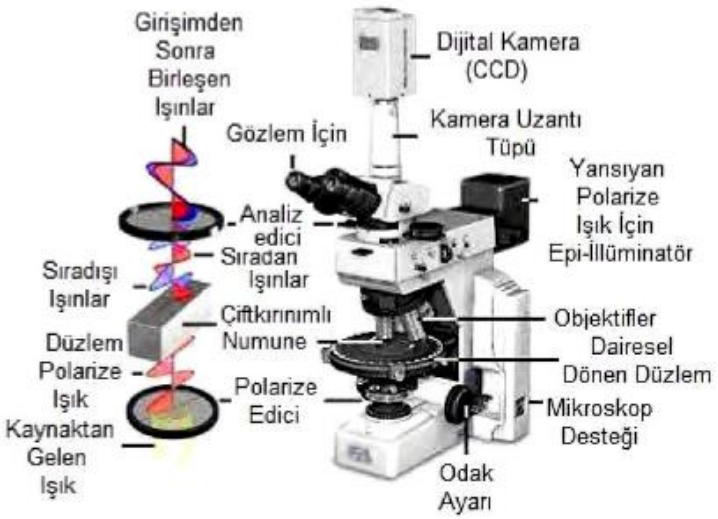
Sıvı kristaller, kolajen lifleri ve hücre iskeletleri dahil olmak üzere birçok malzeme optik olarak anizotropiktir. Yapısal anizotropi genellikle çift kırılma olarak adlandırılan kırılma indeksi anizotropisine yol açar. Polarizasyon mikroskopları, bu çift kırılımlı malzemeleri incelemek için güçlü görüntüleme araçlarıdır çünkü farklı polarizasyon yönlerindeki ışık bileşenlerini tespit ederek çift kırılımlı yapıları görselleştirebilirler. Polarizasyon mikroskobu canlı hücre içinde belirli yapıların nerede ve ne zaman oluştuğu ve değiştiği hakkında bilgi vermenin yanı sıra, bu yapıların mikroskobik bazı özellikleri hakkında da bilgi verir [37].

Canlı hücreleri incelemek için polarizasyon mikroskobunun kullanılmasına, 70 yıldan fazla bir süre önce, birçok orijinal gözlemi ünlü bir monografide yayınlanmış olan W. J. Schmidt öncülük etmiştir [38].

Polarize ışık mikroskobunun temel görevi, anizotropik bileşikleri veya yapıları seçici olarak görselleştirmektir ve bu sayede iyi optik ve uygun hizalamayla bu nesneler karanlık bir alanda parlak ve ışıltılı görünür. Anizotropik nesnelerin

sergilediği fenomenlerden biri olan çift kırılma polarizasyon mikroskobunun çalışma prensibinin temelini oluşturur. Çift kırılma, bir nesnenin düzlem polarize ışığı farklı yönlerde farklı hızlarda iletme özelliğidir. Başka bir deyişle, polarize olan ve dikey düzlemde ilerleyen bir ışının hızı, aynı yörüngeden geçen ancak yatay düzlemde polarize olan bir ışının hızından son derecede farklıdır. Anizotropinin varlığı, düzeni ve kutupluluğu gösterir. Yönlü hareket, basınç veya esneme sıklıkla moleküllerin paralel hizalanmasına ve dolayısıyla çift kırılmaya neden olur. Gevşeme, ısınma ve moleküllerin rastgele düzenlenmesine neden olan diğer faktörler genellikle anizotropinin kaybına neden olur.

Çift kırılımlı nesneler, polarizasyon mikroskobunda karanlık bir arka plan üzerinde parlayan cisimler olarak görülür. Farklı nesnelerin parlaklıkları, yani çift kırılmanın yoğunluğu farklılık gösterir. Aynı kalınlığa sahip iki nesnenin çift kırılma yoğunluğu, spesifik gecikmelerine göre farklılık gösterir, iki kırılma indisi arasındaki farkın daha büyük olduğu nesne, daha küçük farka sahip nesneden daha parlak görünür. Çift kırılmanın yoğunluğunu belirleyen diğer bir faktör de ışığın yolu boyunca yapının kalınlığıdır. Doku kesiti düzleminde yer alan aynı yapı ve yapıya sahip iki paralel lif birlikte incelendiğinde, diğerinin iki katı kalınlığındaki lif çift kırılma yoğunluğunun iki katını gösterecektir [39].



Şekil 2.11 Polarizasyon mikroskobu [40]

Çalışma prensibi olarak kutuplaştırıcı bir filtreden geçen normal ışık sadece bir yönde titreyerek çıkar. Bu filtrenin yani polarizörün üzerine ikinci bir filtre olan analizör, ana ekseni ikinci filtreye dik olacak biçimde yerleştirilir ve böylece

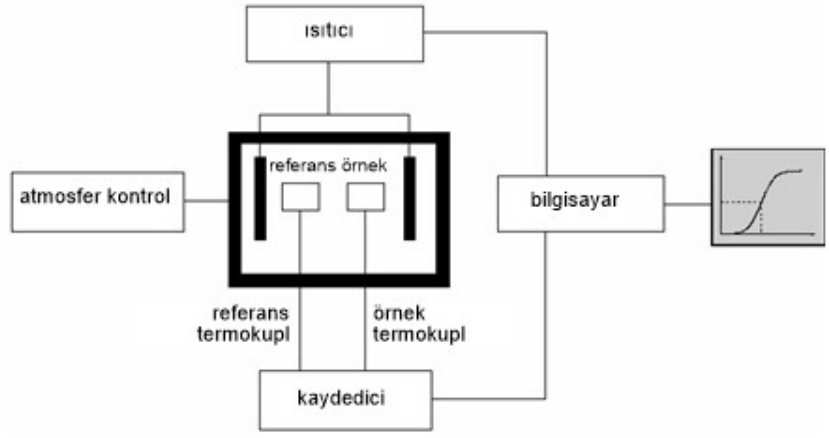
karanlık alan etkisi oluşur. Polarize edici iki filtre arasına belirli bir yöne doğru yönlenmiş molekül içeren doku yapıları yerleştirilirse belli düzende yinelenen yapılar polarizörden çıkan ışığın eksenini saptırırlar. Sonuçta koyu zemin üzerinde bu yapılar parlak görünür [41].

2.4.2 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)

Diferansiyel taramalı kalorimetrede (DSC), numuneye doğrusal bir sıcaklık verilir ve numuneye giren ısı akış hızı sürekli olarak ölçülür; bu ısı akış hızı, numunenin anlık özgül ısısıyla orantılıdır. DSC sıvı kristallerin geçiş sıcaklıklarını, cam geçişler veya mezofazlar gibi ince fiziksel dönüşümleri incelemek için kullanılır. DSC'de oda sıcaklığında tutulan bir kabın içine iki numune tutucu simetrik olarak yerleştirilir. Birincil sıcaklık kontrol sistemi, platin dirençli termometreleri ve numune tutuculara yerleştirilmiş ısıtma elemanlarını kullanarak iki numune tutucunun ortalama sıcaklığını kontrol eder. İkincil bir sıcaklık kontrol sistemi, iki numune tutucu arasındaki sıcaklık farkını ölçer ve toplam ısıtma gücünün diferansiyel bileşenini kontrol ederek bu farkı sıfıra ayarlar. Bu diferansiyel güç ölçülür ve kaydedilir [42].

2.4.3 Diferansiyel Termal Analiz (DTA)

Diferansiyel termal analiz (DTA), sistemin eşit şekilde ısıtılması veya soğutulması sırasında zaman-sıcaklık kayıtları aracılığıyla faz dönüşümlerini inceleyen bir çalışma sistemidir. İlk kez 1887'de Le Chatelier tarafından kullanılmıştır [43].



Şekil 2.12 Diferansiyel termal analiz sisteminin şematik diyagramı [44]

Diferansiyel termal analizde bir kimyasal sistem (örnek) ile inert bir referans bileşik arasındaki sıcaklık farkı ölçülerek sistemin absorbladığı veya emitlediği ısı

gözlenir. DTA'nın çalışma prensibinde sistem ve referansın sıcaklıkları sabit bir hızda artırılır. Örnek ve referans arasındaki sıcaklık farkı sıcaklığın fonksiyonu olarak izlenir. Tartılmış miktarlardaki örnek ve referans küçük tavalar içine konur. Sisteme bağlı olan bir programlayıcıdaki kontrol termokuplu, fırının sıcaklığının doğusal bir hızla yükselmesini kontrol eder. Örnek ve referans termokuplları seri olarak bağlanmışlardır. Örnek veya referansın sıcaklıkları arasındaki farklılık bir akım doğmasına neden olur ve yükseltilen akım programlayıcıdaki kalemin konumunu değiştirir [44].

2.5 Sıvı Kristallerin Uygulamaları

Sıvı kristallerin pek çok alanda uygulamaları mevcuttur. Özellikle 1970'li ve 1980'li yıllarda sıvı kristaller, teknolojik alanda insanların günlük yaşantısında ilk olarak hesap makineleri ve kol saatlerinde kullanılmaya başlanmış olup teknoloji ilerledikçe günümüze doğru LCD ekranlar ile bilgisayarlarda, kurşungeçirmez yeleklerde ve sterilize edilebilmesi kolay olduğundan dolayı tıp alanında çeşitli amaçlarda ve termometrelerde kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır [22].

LCD'ler aynı zamanda televizyonlar, dizüstü bilgisayarlar, tabletler ve akıllı telefonların ekranları, uçakların kokpit görüntüleri, kol saatleri, hesap makineleri, video oynatıcılar, oyun aletleri ve bazı tabelalar gibi diğer alanlarda da kullanılmaktadır. LCD'ler daha az elektrik tükettiğinden dolayı, CRT'den (katot ışını tüpü) enerji olarak daha verimlidir.

Sıvı kristallerin bir diğer uygulaması olan sıvı kristal polimerler (LCP), polimerlerin bir kategorisi olan polyesterlerdir bu sebeple de son derece kararlı olup, diğer bileşiklerle reaksiyona girmezler ve yanmaya karşı direnç gösterirler. Gerilme kuvveti ve dielektrik kuvveti yüksektir, kimyasal maddelere ve aşınmaya karşı dirençlidir, nemi absorbe etme oranı çok düşüktür. LCP'ler, yiyecek kaplarında, yiyeceklerin paketlenmesinde, düz ekran televizyonlarda, kol saatlerinde, dijital saatlerde, laptop ekranlarında, mikro elektromekanik sistemlerde olduğu gibi mikrodalga frekansa karşı etkindir. Aynı zamanda otomotiv sektöründe, arabaların mekanik parçalarının üretiminde kullanılmaktadır.

Sıvı kristal elastomerler (LCE) sıvı kristal uygulamaların başka bir uygulamasıdır ve yüksek termoelastik özelliğe sahiptirler. Bu nedenle de tıpta çeşitli amaçlarla

(yapay kas uygulamaları gibi) kullanımları mevcuttur. LCE'lerin elastik yapıları polimerik maddenin yapısına göre değişiklik gösterir. Liyotropik sıvı kristaller sıkıştırmayla izotropik yapılanmadan nematik duruma geçerler. Aynı zamanda LCE'ler sayesinde liyotropik nematik jeller, karbon nanotüpler ve elastomerik membranlar gibi farklı malzeme üretimi yapılmaktadır [36].

Biyoloji ve tıp alanındaki uygulamalarına örnek olarak spektroskopi, mikroskopi ve görüntüleme sistemlerine entegrasyon için sıvı kristal malzemeler kullanan optik cihazlar verilebilir. Gelişmiş optik görüntüleme ve teşhis için doğrudan sıvı kristal malzemelerle arayüz oluşturan biyosensör cihazları ve biyolojik malzeme ve sistemleri taklit eden sıvı kristal malzemeler mevcuttur [19].

Son olarak sıvı kristaller, güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren güneş pili teknolojisinde verimin arttırılması amacıyla kullanılmaya başlanmış olup nispeten yeni bir uygulamadır.

3
BOYA DUYARLI GÜNEŞ PİLLERİ

3.1 Kısa Tarihçe

Dünyanın temel sorunlarından biri olan enerji kaynaklarının tükeniyor olması, her geçen gün artan nüfus ve gelişen sanayi nedeniyle daha da hızlanarak ciddi bir problem arz etmekle birlikte gelecek nesiller için de bir endişe doğurmaktadır. Yenilenemeyen fosil yakıtların küresel ısınma, hava kirliliği, asit yağmurları gibi verdiği pek çok zarar da göz önünde bulundurulduğunda yenilenebilir enerjiye duyulan ihtiyaç kaçınılmaz olmuştur. Bu problemin üstesinden gelmek için akla ilk olarak yaşamın başından beri var olan ve tükenmeyen yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş gelmektedir. Yenilenebilir enerji kaynağı olarak güneşi kullanarak üretilen güneş pili teknolojisi dünyanın bu temel sorununa alternatif bir yöntem olarak sunulabilir [1, 45]. Güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren elektronik cihazlara güneş pilleri denir ve üç nesilde incelenir. Düşük üretim maliyeti, üretim kolaylığı, renk ve şeffaflık gibi değişken estetik özellikler ve çevreye zarar vermemesi gibi avantajlar bu teknolojiyi daha da cazip kılmaktadır [3]. 1839'da Alexandre-Edmond Becquerel'in ilk güneş hücresini üretmesinin ardından bu teknoloji verimlilikteki dikkate değer artışlarla birlikte istikrarlı bir şekilde ilerlemektedir. Tarihi dönüm noktası niteliğindeki başarılar arasında Charles Fritts'in 1883'te % 1 verime sahip güneş pili geliştirmesi, 1888'de Edward Weston'ın ilk güneş pili patenti sahibi olması, 1921'de fotoelektrik etki üzerine yaptığı çalışma nedeniyle Albert Einstein'a verilen Nobel Fizik Ödülü ve 1954'te Bell Labs'ın yaklaşık % 6 oranında ilk pratik silikon güneş pilini duyurması yer almaktadır [48]. 1991 yılında Profesör Michael Gratzel tarafından % 7.1 verimlilikle icat edilen boya duyarlı güneş pilleri geleneksel silikon güneş pillerine göre daha ucuz alternatif ince filmlerdir. Üretim yönteminin basit olması sebebiyle düşük maliyetli olup verimlidirler. Boya duyarlı güneş pilinin temel bileşenleri, gözenekli bir yarı iletken oksit (genellikle TiO_2) üzerine absorbe edilen tek katmanlı duyarlılaştırıcıdan (boya) oluşan fotoanottur [5, 50].

3.2 Güneş Pillerinin Sınıflandırılması

Birinci nesil güneş pilleri: Verimlilikleri yüksek olması nedeniyle en popüler olan ve hala kullanılan güneş pili çeşididir. Yapımında genellikle silisyum kullanılır. Kristal silikon hücrelerden oluşan birinci nesil güneş pilleri kristalliklerine göre iki çeşide ayrılır. Tek kristalden oluşan hücrelere mono-kristalin, kristal taneciklerinden oluşan hücrelere poli-kristalin hücreler adı verilir. Mono kristal güneş pillerinin verimlilik olarak çok kristalli güneş pillerine göre daha yüksektir ancak poli kristalin üretimi daha kolay ve daha ucuzdur. Birinci nesil güneş pillerinin verimlilikleri ortalama % 19-24 arasındadır [51].

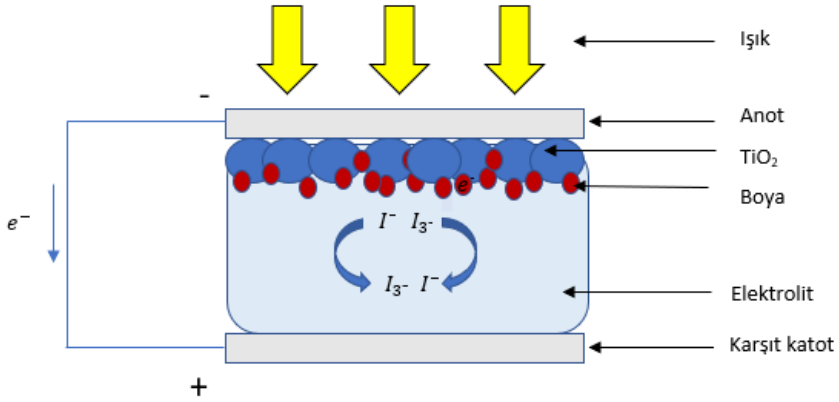
İkinci nesil güneş pilleri: İkinci nesil güneş pilleri, amorf Si (a-Si) bazlı ince film güneş pillerini, Kadmiyum Tellürid / Kadmiyum Sülfür (CdTe /CdS) güneş pillerini ve Bakır İndiyum Galyum Selenit (CIGS) güneş pillerini içerir. Kullanışlı olmalarının en büyük sebebi ince film olduklarından dolayı kolay şekil alabilmeleri ve daha esnek ve hafif olmalarıdır. Verimlilikleri birinci nesilden düşük olmasına karşın üretim maliyetleri de aynı şekilde düşüktür. İkinci nesil güneş pillerinin verimlilikleri ortalama % 13-16 arasındadır [51, 59].

Üçüncü nesil güneş pilleri: Ticari olarak hala gelişim gösteren yeni teknoloji çeşididir. Boya duyarlı güneş pilleri ve çok eklemli güneş pilleri bu sınıfta öne çıkan gelecek vadeden güneş pilleridir. Boya duyarlı güneş pilleri verimlilikleri bakımından diğer türlere göre düşük olup % 11 civarındadır ancak üretim maliyetleri de azdır ve de yapım aşaması bakımından kolaydır [51, 60].

3.3 Temel BDGP Yapısı

Boya duyarlı güneş pilleri temel olarak fotoelektrot ve karşıt elektrot arasına konulan TiO_2, boya ve elektrolit çözeltisinden meydana gelen bir sandviç yapısından oluşur (Şekil 3.1). Bu yapı kullanılan malzemelere göre her pilde değişiklik gösterebilir. Boya duyarlaştırıcılar (organik ya da inorganik), cam (FTO

ya da ITO), fotoelektrotlar (ZnO, Nb_2O_5, SnO_2) gibi malzemeler, boya duyarlı güneş pillerinde farklı yapılar şeklinde kullanılabilir [52].



Şekil 3.1 Boya duyarlı güneş pili şematik gösterimi

Fotoelektrot (Anot): Aynı zamanda anot olarak da isimlendirilen, boya duyarlı güneş pillerinin negatif tarafını meydana getiren saydam ince film kaplı iletken cam (TCO) ve nanokristal yapıda bulunan yarı iletken TiO_2 yapısından oluşur. BDGP'lerde TCO olarak genellikle elektriksel direnci düşük olduğundan ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı olduklarından dolayı flor katkılı kalay oksit (FTO) ve indiyum kalay oksit (ITO) tercih edilir [59]. Fotoelektrot kısmı boya duyarlı güneş pilinin verimliliği için oldukça önemlidir. En önemli görevi ise güneşten gelen foton sayesinde boyadan kopan elektronun dış devre sayesinde güneş piline aktarımını sağlamaktır [53]. Fotoelektrotun güneş pilinin diğer yapılarla uygun ve verimli bir şekilde çalışması için bazı özelliklere sahip olması gerekir;

Daha fazla boya absorbsiyonu sağlamak için daha geniş yüzey alanına ve güneş ışığını absorbe etme özelliğine sahip olmalıdır.

Boya ve dış devre arasındaki elektron transferini hızlı ve kolay şekilde yapmalıdır.

Foto korozyon olma riskine karşın direnci yüksek olmalıdır.

Elektron alış hızının hızlı ve yoğun olması gerekmektedir [54].

TiO_2: BDGP'lerde yarı iletken tabaka olarak ZnO, TiO_2, Fe_2O_3, ZnS, CdS gibi karışımlar kullanılır [61]. Ancak genellikle gözenekli yapıya sahip, yaklaşık 7 - 20 mikron kalınlığında ve 10 - 20 nm nanokristal yapılı partiküllerden oluşan, boyanın partiküllere sağlam tutunması için geniş bir yüzey alanı oluşturan TiO_2 kullanılır

[60]. TiO_2 temel olarak anataz, rutil ve brokit olarak üç farklı kristal yapıda bulunur. Termodinamik açıdan en kararlı faz rutil olmasına karşın güneş pillerinde en yüksek fotokatalitik performansa anataz fazının sahip olması nedeniyle genellikle anataz kullanılır. TiO_2'nin bu farklı kristal yapılarda bulunmasının faz çeşitliliği, tanecik boyutu ve yüzey alanı açısından güneş pilinin fotokatalitik performansının artmasına katkıda bulunan önemli parametrelerdir. Güneş pillerinde TiO_2 tercih edilmesinin diğer önemli sebepleri ise fiziksel ve kimyasal kararlılığının yüksek olması, bant aralığının geniş olup yüksek fotokatalitik performansa sahip olması, maliyetinin düşük olmasıyla birlikte kolay bulunabilen ve toksik olmayıp insan sağlığına zarar vermeyen bir yarı iletken olması başlıca sebepler arasındadır [53, 55].

Boya: Güneş pilinin fotovoltaik performansını etkileyen bir diğer yapı ise ışığa duyarlı boyadır. Boyanın güneş pilindeki görevi fotosentezde ışığı absorblayan yapılara benzer şekildedir. Duyarlaştırıcı boya güneşten gelen ışığı absorbe eder ve elektronların uyarılmasıyla birlikte serbest kalarak oksitlenmesini sağlar. Böylece elektron önce iletkenlik bandına transfer edilerek sırasıyla bütün devreyi gezmiş olur. Devrede elektron üreten tek yapı olması nedeniyle de BDGP'nin verimliliği için önemli bir göreve sahiptir. BDGP'nin verimliliğinin yüksek olması için duyarlaştırıcı boyanın sahip olması gereken bazı özellikler şu şekilde sıralanabilir;

Uzun dalga boylarında ışığın absorbsiyonu genellikle azaldığından güneşten gelen fotonların büyük bir kısmı kaybolacaktır. Bu nedenle boya duyarlaştırıcının fotoelektrot yüzeyine daha iyi absorbe edilmesini sağlaması gerektiğinden yüksek absorbsiyon katsayısına sahip olmalıdır.

Elektronun güneşten gelen fotonla oksitlenerek devreye transferinin gerçekleşebilmesi için boyanın en düşük dolu olmayan moleküler orbitalinin (LUMO) fotoelektrottaki iletkenlik bandı enerji seviyesinden daha yüksek olması gerekmektedir.

Boya viskozitesinin optimum düzeyde olup boyanın yenilenmesini sağlamalıdır.

Boyanın tüm sıcaklıklarda yüksek stabiliteye sahip olması ve elektronun rekombinasyonunu önlemek amacıyla hızlı yenilenmeye sahip olması gerekir.

Boya absorbsiyonunu yüksek seviyede tutabilmek için yüksek molar sönme katsayısına sahip olmalıdır [56].

Boya duyarlı güneş pillerinde organik ve inorganik olmak üzere iki çeşit boya duyarlaştırıcı kullanılmaktadır. İnorganik boyalar organik boyalara geçiş metallerinin eklenmesiyle meydana gelmektedir. BDGP'lerde genel olarak rutenyumun kompleksleri olan N3, N719, Z907 vb olarak isimlendirilen boyalar kullanılmış olup, literatürde en yüksek verime sahip çalışmalara (% 10-11 verim) bu boyalar kullanılarak erişilmiştir [53]. İnorganik boyaların dezavantajları ise rutenyumun doğada az bulunuşu sebebiyle pahalı olması ve metal kirliliğine sebebiyet verdiğinden dolayı toksik olması söylenebilir. Öte yandan organik boyalar metal içermediğinden dolayı çevre dostu ve ucuz olmaları yönleriyle avantajlıdır ve inorganik boyalara alternatif olarak sunulabilir. Ancak inorganik boyalara kıyasla enerji dönüşüm verimlilikleri oldukça düşüktür [57].

Elektrolit: BDGP'de uyarılarak boyadan kopan elektronun devreyi dolaşarak tekrar boyaya dönmesini yani temel olarak boyanın rejenerasyonunu sağlar. Elektrolit genellikle fotoelektrot ve karşıt elektrot arasına konulur. Elektrolitler sıvı, katı ve yarı katı olmak üzere fiziksel durumlarına göre üç farklı halde sınıflandırılırlar. BDGP'lerde en çok kullanılan elektrolit boya ile uyumu yüksek olduğundan dolayı sıvı elektrolitlerdir. Çalışmalarda genellikle elektron transferinin iyot-iyodür dönüşümüyle yapıldığı I^-/I_3^- redoks çiftleri kullanılmıştır. Bunun sebebi birçok boya ile uyumlu olması ve kolay sentezlenebilmesidir. Ancak sıvı elektrolitlerin de dezavantajları mevcuttur. En önemli dezavantajları sızdırma ve farklı sıcaklıklarda kararlılığını koruyamaması (düşük sıcaklıklarda elektrolitin donması ve yüksek sıcaklıklarda elektrolitin genleşme olasılığı problemi) örnek verilebilir. Bu gibi sorunlar sebebiyle sıvı elektrolite alternatif olarak katı elektrolit ve yarı katı elektrolit üretilmiştir. Ancak BDGP'lerde enerji dönüşüm verimliliğinin ulaşılan en yüksek değeri sıvı elektrolitler kullanılarak elde edilmiştir [53, 57]. Elektrolitin sahip olması gereken bazı özellikler şu şekilde sıralanabilir;

Işığın fotoelektrottan boyaya geçebilmesi için elektrolitin şeffaf olması gerekir.

İletkenliğinin yüksek olması ve redoks reaksiyonunun hızlı bir şekilde gerçekleştirebilmesi gerekir.

Boyanın rejenere edilebilmesi için redoks çiftlerinin yeterli sayıda olması gerekir. Bu sebeple de elektrolitteki yük taşıyıcılarının sayısının fazla olması için elektrolitin yüksek çözünürlüğe sahip olması gerekir.

Elektrolit özelliklerini kaybetmemesi ve sonuç olarak verimliliğin düşmemesi için kimyasal olarak fotoelektrot ve boya ile reaksiyona girmemelidir [56].

Karşıt elektrot (Katot): Karşıt elektrotun ana görevi, bir katalizör gibi davranarak boyanın rejenarasyonunun sağlanması için dış devre aracılığıyla gelen elektronların redoks tepkimesinin gerçekleştiği elektrolite aktarılmasıdır. BDGP'lerde kullanılan karşıt elektrotların sahip olması gereken bazı özellikler şu şekilde sıralanabilir;

Güneş pilinin stabilitesinin uzun süreli olabilmesi için elektrolitte gerçekleşen redoks tepkimelerinin kısa sürede tamamlanması ve elektronların tekrar yakalanmaması için katotun iletkenliği yüksek olmalıdır.

Elektronların sürekli ve hızlı şekilde yenilenebilmesi, elektron rekombinasyonunun oluşmaması için elektron hareketliliğinin yüksek olması gerekir.

Redoks çiftlerinin indirgenmesi için elektrik direncinin düşük olması gerekir.

Akım yoğunluğunun değişim hızının yüksek olması gerekir.

Karşıt elektrot olarak farklı malzemeler kullanılabilir. BDGP'lerde genellikle kullanılan malzeme ise metal bazlı olması ve I^-/I_3^- elektrolitinin indirgenmesinde kullanılabilecek uygun bir katalizör olması sebepleriyle platin (Pt) tercih edilir. Metal bazlı elektrotlar ışık toplama verimliliğini arttırdıklarından dolayı sıklıkla kullanılırlar. Ancak doğada nadir bulunması sebebiyle maliyetinin yüksek olması, elektrolitteki kararsızlık gibi dezavantajları da mevcuttur. Bu nedenle platine alternatif olarak grafit, karbon, poli(3,4-etilendioksitiyofen), polipirol, $CoNi_2S_4$ ve polianilin gibi karşıt elektrot için kullanılabilecek malzeme örnekleri verilebilir [56].

3.4 BDGP Çalışma Prensibi

Boya duyarlı güneş pillerinin çalışma prensibi günlük hayatta gerçekleşen fotosentez olayına benzemektedir [52].

Boya duyarlı güneş pilleri elektrotlar arasına yerleştirilmiş nanokristal yapıda bulunan TiO_2, TiO_2 üzerine absorbe edilen boya ve elektrolitten oluşur. Temel olarak çalışma prensibi ise, güneşten gelen ışık fotonları BDGP'nin TiO_2'ye absorbe edilmiş boya tarafından emilir ve elektronlar uyarılmış hale gelir. Eğer elektronların güneşten gelen fotondan aldığı enerji yasak bant aralığını geçmeye

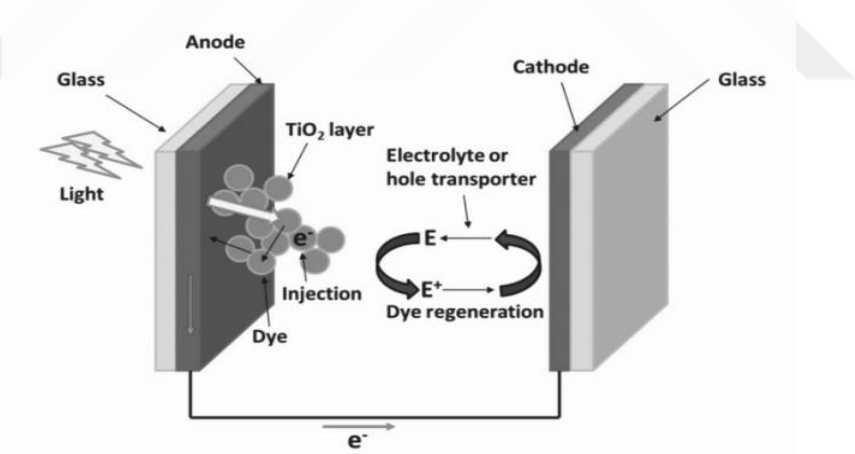
yetecek düzeydeyse uyarılmış elektronlar iletkenlik bandına geçer. Böylelikle boya elektron kaybederek oksitlenmiş olur. Oksitlenmiş olan boya, iyodür iyonundan elektron alır, bu da boyayı orijinal formuna geri döndürür. Bu süreçte iyodür iyonları (3.1) eşitliğinde görüldüğü gibi elektron kaybederek yükseltgenir.

$$3I^- \rightarrow I_3^- + 2e^- \tag{3.1}$$

TiO_2'ye aktarılan elektronlar sırayla önce anoda, oradan da dış devre yardımıyla karşıt katota geçer. Katota gelen elektronlar son olarak genellikle yapısında I^-/I_3^- içeren elektrolitine aktarılırlar. Elektrolitin burada asıl görevi katot ve TiO_2 arasında bir aracı gibi davranarak elektronu TiO_2'ye geri göndermektir. Elektrolit dış devreden gelen elektronu boyaya geri aktarır ve (3.2) eşitliğinde gösterildiği üzere I_3^- iyonunu tekrar iyodür iyonuna indirger [72].

$$I_3^- + 2e^- \rightarrow 3I^- \tag{3.2}$$

Bu sayede boya duyarlı güneş pilinde toplam yük korunmuş olur ve kimyasal bir değişim olmaz.



Şekil 3.2 BDGP'nin sandviç hücre yapısı [58]

3.5 BDGP Parametreleri

Boya duyarlı güneş pillerinin verimlerinin hesaplanmasında kullanılan önemli parametreler mevcuttur. Temel olarak bunlar, güneş pilinin toplam güneş enerjisinden elektriğe dönüşüm verimliliği (η), açık devre gerilimi (Voc), kısa devre akım yoğunluğu (Jsc) ve doldurma faktörü (FF)'dür.

Akım sıfırken meydana gelen ve güneş pilinden elde edilen voltajın maksimum halini veren parametreye açık devre gerilimi (Voc) denir [52]. Açık devre gerilimi, nanokristal yapıdaki TiO_2 ile karşıt elektrotun fermi seviyeleri arasında bulunan enerji farkı sayesinde belirlenir [56].

Güneş piline uygulanan gerilim sıfırken pil sayesinde üretilen akım kısa devre akımıdır (I_{SC}). Kısa devre akımının bağlı olduğu parametreler güneş pilinin optiksel özellikleri, güneşten gelen fotonun yakalanma hızı ve pilin üstüne düşen ışığın spektrumudur [59]. Kısa devre akım yoğunluğu ise birim alana düşen akım (mA/cm^2) anlamına gelmektedir. Kısa devre akım yoğunluğunun bağlı olduğu parametreler boyanın soğurma katsayısı ve TiO_2 tabakası ile boya molekülleri arasındaki etkileşmedir [60].

Doldurma faktörü (FF) güneş pili ile elde edilebilecek en büyük gücün teorik olarak elde edilebilecek en büyük güce oranı ile hesaplanır ve güneş pili hücrelerindeki güç kaynağının niteliğini verir [59].

$$P_{max} = I_{max} \times V_{max} \tag{3.3}$$

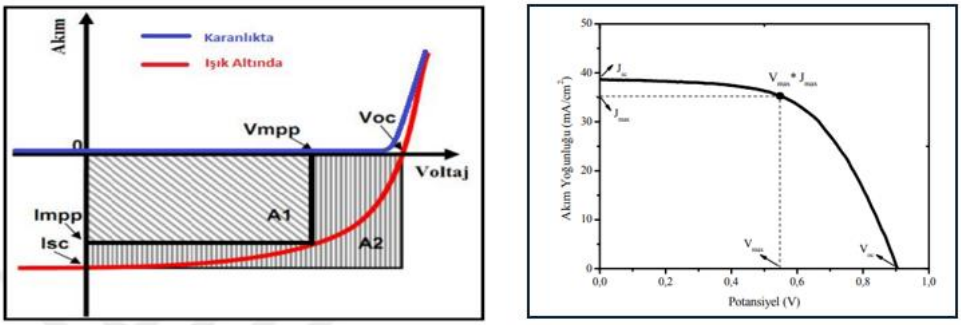
$$FF = \frac{I_{max} \times V_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} = \frac{P_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \tag{3.4}$$

Verim (η), güneş pilinden elde edilen maksimum güç (P_{max}) ile pilin yüzeyine düşen ışığın şiddetiyle (P_{in}) oranı ile hesaplanır [60].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{max} \times V_{max}}{P_{in}} \tag{3.5}$$

$$\eta = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{P_{in}} \tag{3.6}$$

Boya duyarlı güneş pillerinin performanslarının değerlendirilebilmesi için karanlıkta ve belli bir ışık şiddetinde (yeryüzüne düşen ışığın spekturumu AM1.5G olduğu için genellikle AM1.5G ışık şiddetinde) akım-voltaj (I-V) karakteristikleri ilgili cihaz sayesinde ölçülerek, elde edilen veriler yardımıyla kısa devre akım yoğunluğu-voltaj (J-V) grafikleri çizilmektedir [59, 62].



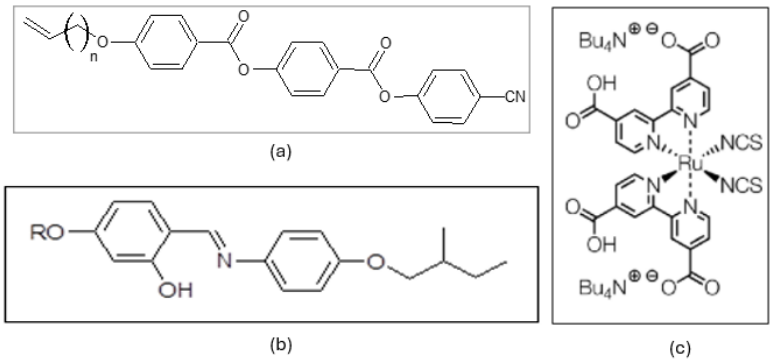
Şekil 3.3 Güneş pilinin karanlıkta ve belli bir ışık altında I-V ve J-V grafikleri [63, 70]

4
MATERYAL VE YÖNTEM

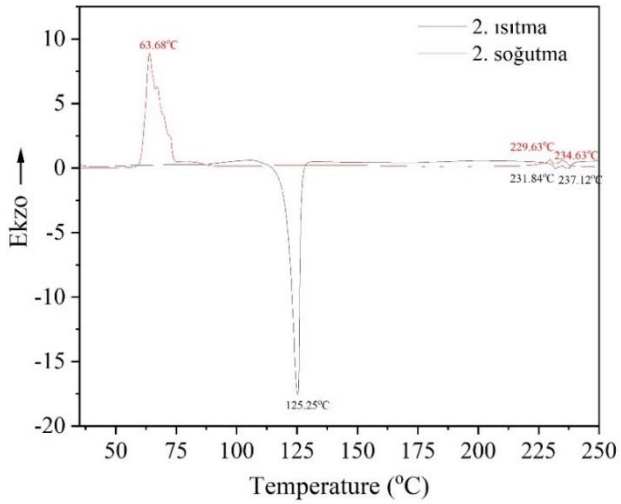
4.1 Malzemeler

Çalışma kapsamında Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Bölümünün sentezlemiş olduğu sıvı kristaller kullanılmıştır. Sentezlenen sıvı kristaller **LC1** ve **LC2** molekül yapıları Şekil 4.1(a) ve 4.1(b) de verilmiştir. Toz yapıda bulunan Titanium (IV) Oxide Sigma Aldrich'ten temin edilmiştir. Elektrolit Iodolyte AN-50, Platisol T/SP ve boya Ruthenizer 535-bisTBA (N719) Solaronix'ten alınmıştır. Ruthenizer 535-bisTBA (N719)'nın moleküler yapısı Şekil 4.1(c)'de verilmiştir. Titania Paste 791547-10G ise Sigma Aldrich'ten temin edilmiştir.

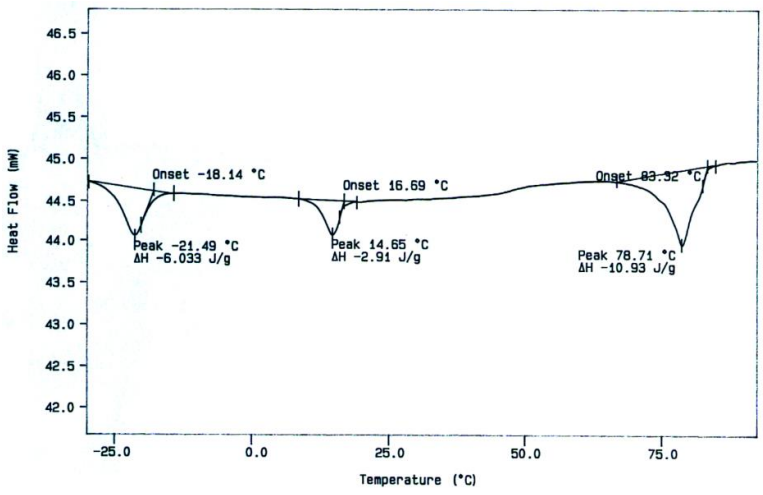
LC1 ve LC2 için ısıtma ve soğutma DTA-DSC termogramları sırasıyla Şekil 4.2 ve 4.3'te gösterilmiştir. Aynı şekilde faz geçiş sıcaklıkları (^{o}C) ve entalpi (Jg^{-1}) değerleri de (K: kristal, I: izotropik sıvı, Sm: smektik mezofaz) Tablo 4.1'de verilmiştir. LC1 ve LC2 bileşiklerinin soğutma sürecindeki PM tekstür görüntüleri sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te verilmiştir.



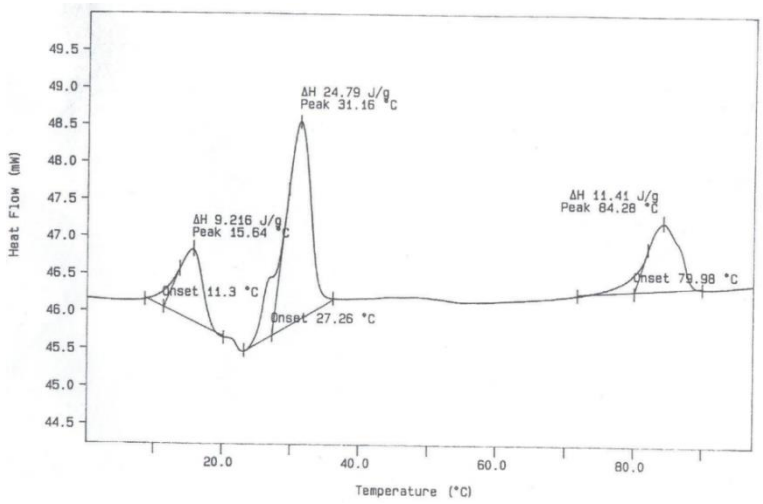
Şekil 4.1 Sıvı kristal molekül formülleri (a) LC1 (b) LC2 (c) Ruthenizer 535-bisTBA (N719)'nın moleküler yapısı



Şekil 4.2 LC1 bileşiği için DTA grafiği



(a)

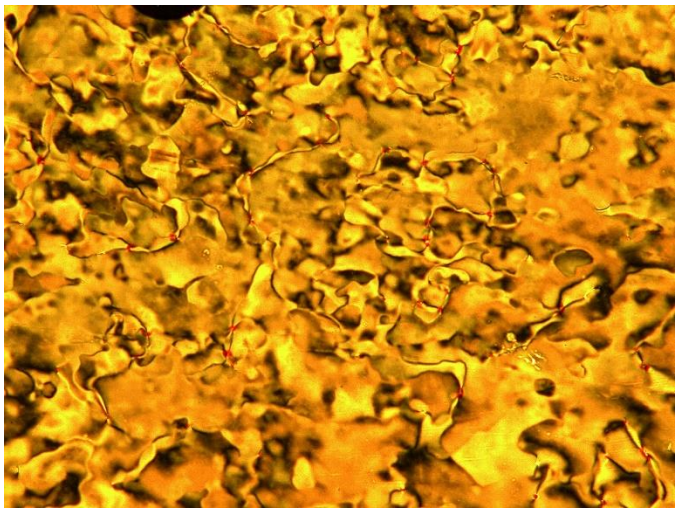


(b)

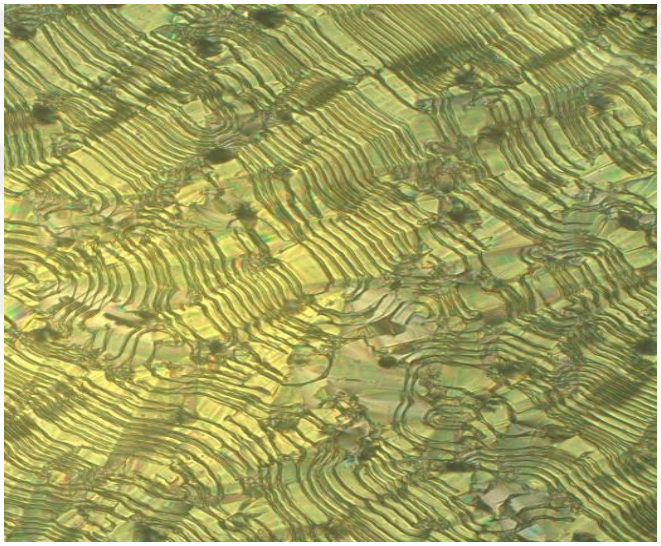
Şekil 4.3 LC2 bileşiğinin (a) ısıtma ve (b) soğutma sırasındaki DSC termogramları

Tablo 4.1 LC1 ve LC2'nin faz geçiş sıcaklıkları (^oC) ve entalpi (Jg^{-1}) değerleri

Bileşik	**T °C (ΔH kJ/mol)**
LC1	**Isıtma →: K 125.25 (27.27) N* 231.84 (0.21) N 237.12 (0.21) Iso** **Soğutma →: K 63.68 (20.12) N* 229.63 (0.23) N 234.63 (0.20) Iso**
LC2	**Isıtma →: K_1 15.6 (9.22) K_2 31.2 (24.8) SmC* 84.3 (11.4) I** **Soğutma →: I 78.7 (-10.93) SmC* 14.7 (-2.91) K_2 -21.5 (-6.03) K_1**



Şekil 4.4 LC1 bileşiğinin soğutma sürecindeki (180^{o}C) PM tekstür görüntüsü



Şekil 4.5 LC2 bileşiğinin soğutma sürecindeki (75^{o}C) PM tekstür görüntüsü

4.2 Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Hazırlanması

4.2.1 Camların Temizlenmesi

Kullanılan flor katkılı kalay oksit (FTO) camların temiz olması boya duyarlı güneş pillerinin verimlerini doğrudan etkilediği için önemlidir. Deney kapsamında Solaronix'ten alınan (TCO30-8) ve 2x2 cm boyutlarında kesilen camlar öncelikle deterjanla temizlenmiştir. Ardından metanolle silindikten sonra sırasıyla aseton ve izopropanol ile ultrasonik banyoda yıkanmışlardır. Ultrasonik banyodan alınan camlar saf su ile yıkandıktan sonra azot makinesi ile kurutulmuştur.

4.2.2 Elektrotların Hazırlanması

Boya duyarlı güneş pillerinin anot kısmı nanokristal yapıda TiO_2 ile kaplanıp boyaya daldırılırken katot kısmı metal olan platisol ile kaplanmıştır. TiO_2 aşağıda açıklanmış olan iki farklı yöntemle kaplanmıştır.

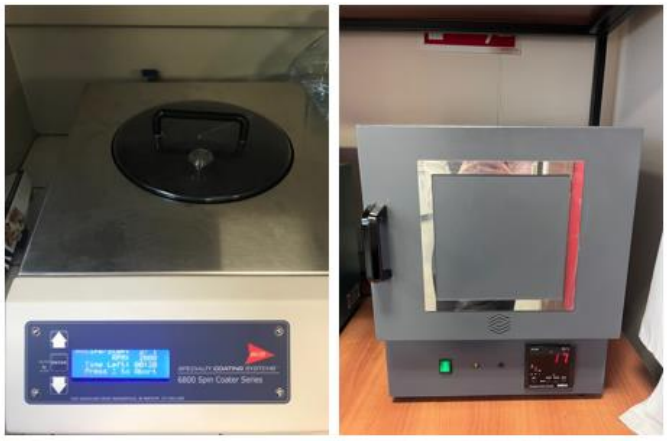
1. Yöntem: Sigma Aldrich'ten alınan Titanium (IV) Oxide etanol ile (1:2) oranında 30 dk karıştırıldıktan sonra birkaç damla asetik asit ve Triton (X-100) eklenerek hazırlanmıştır. 2x2 cm kesilen FTO kaplı camların iletken yüzeylerine aktif yüzeyleri $1cm^2$ olacak şekilde dört tarafından şeffaf bant (Scotch ^{TM}, 3M) yapıştırılmıştır. Hazırlanan TiO_2, bantla kaplanmış camlara cam baget yardımıyla doctor blade kaplama yöntemi ile sürülerek kaplanmıştır. Camlar belli bir süre kurumaya bırakıldıktan sonra bantlar çıkarılmış ve 120˚C de 10 dk ısıtılmıştır. TiO_2 kaplı camlar daha sonra 450˚C fırında 30 dk boyunca tavlanmaya bırakılmıştır. Tavlanan camlar (1:5) oranında etanol ile çözünmüş rutenyum (N719) boya içine daldırılarak 24 saat karanlık ortamda bekletilmiştir. 24 saatin sonunda alınan camlara tutunmayan boya etanol yardımı ile akıtılmıştır ve boya duyarlı güneş pilinin anot kısmı hazır hale gelmiştir.



Şekil 4.6 Deneyin ilk kısmı için TiO_2'nin camlara uygulanması ve boyaya daldırılması

2. Yöntem: Bu yöntemde ise Sigma Aldrich'ten alınan Titania Paste 791547-10G önce (1:2) oranında etanol ile çözündürülmüş ardından fotoelektrota spin coater yöntemi (2000 rpm, 1 dk) ile homojen bir şekilde kaplanmıştır. Kaplanan substratlar 450˚C fırında 30 dk boyunca tavlanmaya bırakılmıştır. Tavlanan camlar hazırlanan N719 boya içinde 24 saat bekletilmiş ve süre sonunda TiO_2'nin yüzeyine tutunmayan boya molekülleri asetonitril ile yıkanarak temizlenmiştir. Böylelikle deneyin ikinci kısmında kullanılan fotoelektrotlar hazır hale gelmiştir.

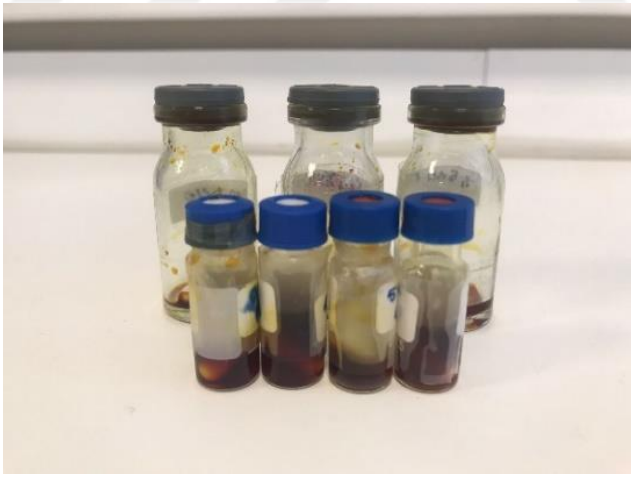
FTO kaplı karşıt elektrotun iletken kısmına ise platisol (1:1) oranında etanol ile çözdürülerek spin coater yöntemi ile (2000 rpm, 1 dk) homojen olarak kaplanmıştır. Pt ile kaplanan substratlar 450˚C fırında 30 dk boyunca tavlanmaya bırakılmıştır. Bu şekilde boya duyarlı güneş pillerinin katot kısmı hazırlanmıştır.



Şekil 4.7 Deneyde kullanılan spin coater ve fırın

4.2.3 Sıvı Kristal Katkılı Elektrolitlerin Hazırlanması

LC1 ve LC2 sıvı kristalleri farklı konsantrasyonlarda Iodolyte AN-50 elektroliti ile karıştırılarak hazırlanmıştır.

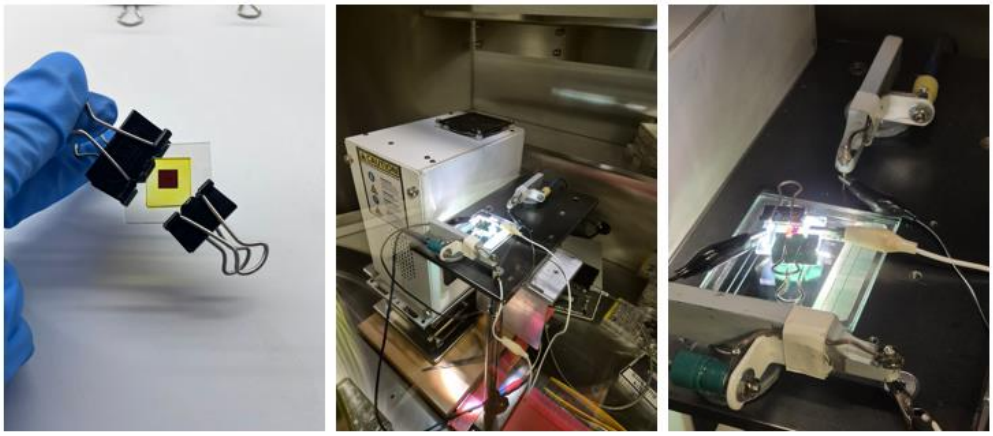


Şekil 4.8 Farklı konsantrasyonlarda hazırlanan sıvı kristal katkılı elektrolitler

4.2.4 BDGP'lerin Birleştirilmesi ve Ölçüm Alınması

Hazırlanan elektrotlar TiO_2 ve Pt kaplı kısımları birbirlerine bakacak şekilde küçük klipsler yardımıyla, kenarlarında I-V ölçümü yapabilmek için krokodil kablo takmaya boşluk kalacak şekilde birleştirilmişlerdir. Daha sonra sıvı kristal katkı edilmiş elektrolitler mikro pipetler yardımıyla elektrotların üst kısımlarından birkaç

damla damlatılarak BDGP'lere enjekte edilmiştir. Hazırlanan hücrelerin akım gerilim ölçümleri için (100 mW/cm^2) AM1.5G aydınlatma altında bir güneş simülatörü kullanılmıştır. Simülatörden elde edilen V_{OC}, I_{SC}, FF ve verim sonuçları sayesinde akım yoğunluğu-gerilim (J-V) grafikleri çizilmiştir.



Şekil 4.9 BDGP hücrelerine elektrolit eklenmesi ve akım-gerilim ölçümlerinin alınması

4.3 Kullanılan Cihaz ve Yardımcı Düzenekler

Hazırlanan sıvı kristal katkılı boya duyarlı güneş pillerinin performansının, morfolojik özelliklerinin ve kristal yapı analizinin tayini için çeşitli cihaz ve düzenekler kullanılmıştır.

4.3.1 XRD

X-ışını kırınımı (XRD), faz bileşimi, yapı, doku ve daha pek çok toz, katı ve sıvı numune gibi malzeme özelliklerini analiz etmek için kullanılan ve numuneye hasar vermeyen analitik bir yöntemdir. Bu yöntemde fazların tespit edilebilmesi için, bilinmeyen bir numuneden elde edilen XRD modeli ile kayıt altında olan referans veri tabanının modelleri ile karşılaştırılması sayesinde gerçekleştirilir. Bu süreç aynı zamanda, olay yeri incelemelerinde yapılan parmak izinin tespit edilmesine çok benzemektedir [64]. XRD makinelerinin kullanışının kolaylığı ve hızı sebebiyle oldukça tercih edilen analitik bir yöntemdir. Çalışma prensibi, numuneyi sabit dalga boyunda bir katot ışını tüpünden elektron emisyonlarıyla bombardıman edilmesi şeklindedir. Daha sonra ise (4.1) eşitliğinde gösterilen Bragg yasası, ölçülen yansıma açısıyla birlikte kullanılarak iç atom aralığı bulunur.

$$n\lambda = 2d \sin\theta \tag{4.1}$$

Bragg yasası XRD için oldukça önemli bir denklemdir. Bu denklemde n bir tam sayı olduğunda, d atomlar arası mesafedir, λ nm cinsinden dalga boyudur ve teta (θ) kırınımların açılarıdır. Bu denklem, yoğunluğu bulmak için açıları gösteren bir grafik oluşturmak için kullanılır. Bu grafikte numunenin ne olduğunu tanımlamak için Bragg yasası kullanılarak bulunan d mesafesinin ortaya çıkan grafiğinde en fazla kırınıma neden olan açıların en belirgin üç tanesinin yaptığı pikler kullanılır. Ayrıca bu sayede numunenin birim hücresinin kübik, tetragonal, altıgen, trigonal, ortorombik, monoklinik veya triklinik bir parçası olabileceği yedi kristal sınıfının mümkün olduğu da bulunmuştur [65].



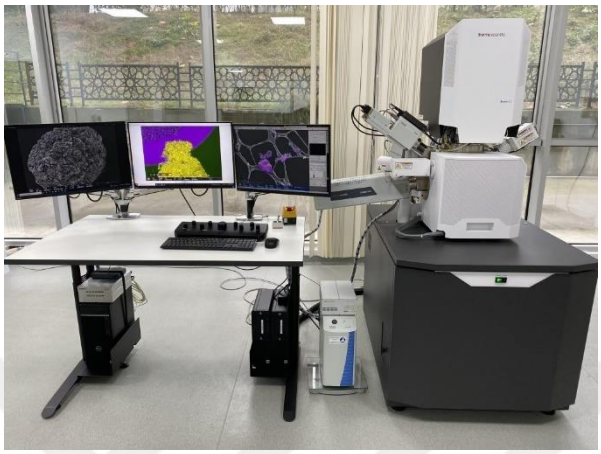
Şekil 4.10 Deneyde kullanılan XRD cihazı

Bu deneyde kullanılan TiO_2 filmlerin yapısal parametreleri, Empyrean MultiCore X-Işını Difraktometresi (XRD) cihazında oda sıcaklığında ve $5 \leq 2\theta \leq 90$ aralığında Cu-Kα radyasyonu (λ = 1.5406 Å, 45 kV, 40 mA) ile ölçümleri alınmıştır.

4.3.2 FESEM

Yüksek çözünürlüklü elektron mikroskobu (FESEM), ışık yerine negatif yüklü parçacıklar olan elektronlarla çalışan bir mikroskoptur. Bu elektronlar bir kaynak tarafından serbest bırakılır. Ölçülecek malzeme desenine göre elektronlar tarafından taranır. FESEM cihazı genellikle düşük hızlanma gerilimlerinde ve çalışma mesafesinin küçük olduğu zamanlarda yüksek görüntüleme sağlar. Nanofilmlerin üst yüzeylerinin detaylı bir şekilde incelenmesine olanak sağlayan

bu mikroskop fizik, kimya, mineraloji, seramik, polimer gibi geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir [66]. Gözenek yapılarının incelenmesinde yaygın olarak kullanılan FESEM, malzemenin ölçümünden önce konumuna ve kullanılacak büyütme oranına karar verilmesi gerekir ancak bu, insan hatalarına oldukça açıktır [67].

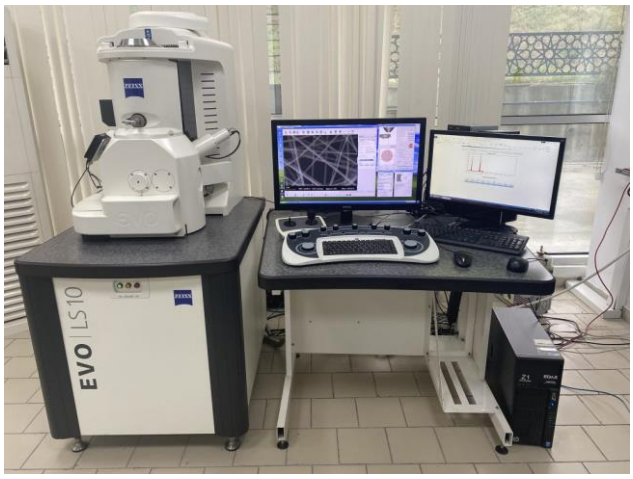


Şekil 4.11 Deneyde kullanılan FESEM cihazı

Bu deneyde kullanılan TiO_2 filmlerin FESEM sonuçları, Thermo Scientific Apreo 2 S LoVac cihazıyla ölçülmüştür.

4.3.3 SEM

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), bir parçacığın çözünürlüğünün yüksek, kaliteli ve ayrıntılı görüntüsünü veren bir elektron mikroskobu tekniğidir. SEM genellikle numunenin yüzeyini gözlemlemek ve karakterizasyon özelliklerini belirlemek için kullanılır. SEM'in çalışma prensibinde ölçülecek numuneye yüksek enerjili elektron ışını verilerek malzemelerin karistalografisi (malzemedeki atomların dizilişi), morfolojisi (şekli ve boyutu) ve topografyası (yüzey özellikleri, dokusu, pürüzlü ya da pürüzsüz olması vb.) belirlenir [68].

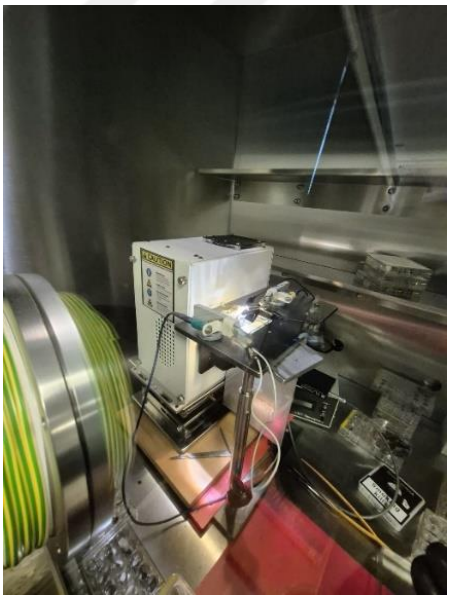


Şekil 4.12 Deneyde kullanılan SEM cihazı

Bu deneyde kullanılan TiO_2 filmlerin SEM sonuçları, EVO LS 10, Zeiss cihazıyla ölçülmüştür.

4.3.4 I-V Ölçümü

Akım-gerilim ölçümü temel olarak cihazdaki voltaj değişirken cihazdan geçen akımın kaydedilmesidir ve yarı iletken cihazlar için en temel ölçümlerden biridir [69].



Şekil 4.13 Deneyde kullanılan güneş simülatörü cihazı

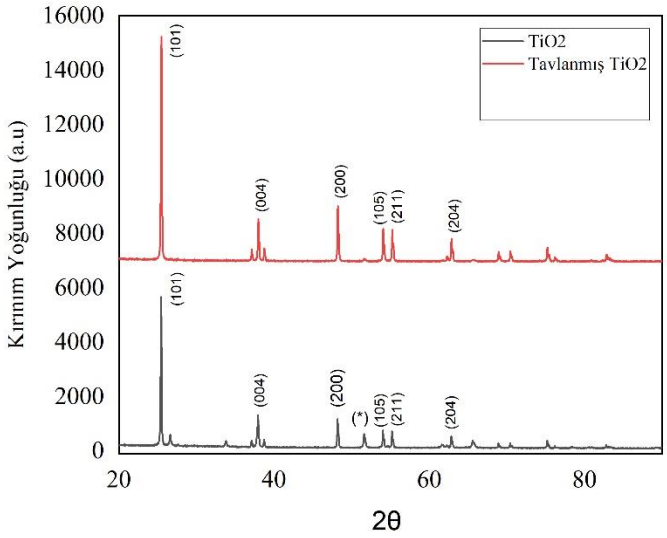
Bu deneyde kullanılan TiO_2 filmlerin akım-gerilim özellikleri, Keithley 2400 ölçüm sistemi ile ölçülmüştür. Fotoakım yoğunluğu-voltaj verileri, 100 mW/cm^2-AM1.5G aydınlatma altında bir güneş simülatörü (ABET) kullanılarak alınmıştır.

5
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 TiO_2'nin Kristal Yapısının Farklı Yöntemlerle İncelenmesi

5.1.1 XRD

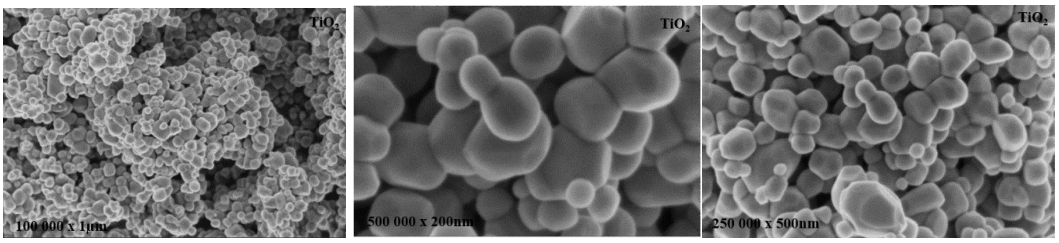
TiO_2'nin anataz faz modeli sırasıyla (101), (004), (200), (105) ve (211) düzlemlerine karşılık gelen 25.4, 37.9, 48.1, 54.0 ve 55.1°'lik tepe noktaları gösterir [71]. Büyük miktarda boyayı absorbe etmek için belirli bir yüzey alanını tercih eden ve elektron taşınması ve hareketliliği gibi özellikler sağlayan küçük boyutlu nanopartiküller ile karakterize edilen anataz fazı, boya duyarlı güneş pilleri için en iyi fazdır [58]. Şekil 5.1'de TiO_2 ve tavlanmış TiO_2'nin XRD deseni anataz fazı gösterilmiştir. Toz TiO_2 tavlandığında piklerin 25.45°'den 25.49°'ye doğru yani daha büyük bir açıya kaydığı görülmektedir. Bunun nedeni, numunenin tavlama işleminden kaynaklanmaktadır ve tepe noktalarını değiştiren tekdüze gerinim (gerilim) ve tepe noktalarını genişleten tek biçimli olmayan gerinim (sıkıştırma) neden olabilir. Yapıdaki değişiklik, alt tabakaların mekanik davranışındaki (mikro sertlik) değişikliğin kaynağı olabilmektedir [47].



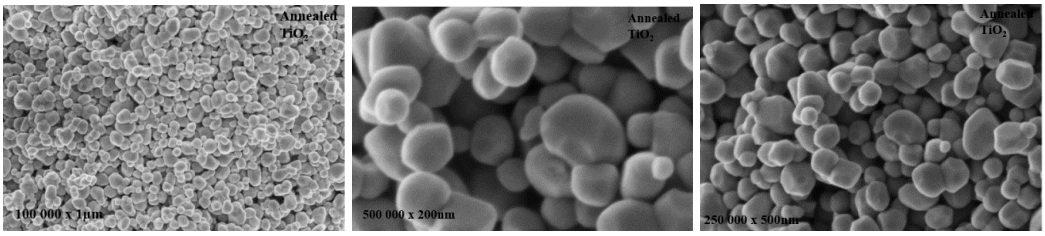
Şekil 5.1 TiO_2 ve tavlanmış TiO_2'nin XRD spektrumları

5.1.2 FESEM

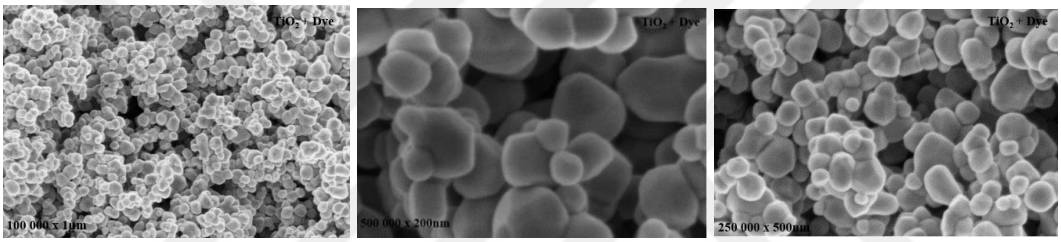
Şekil 5.2'de hazırlanan TiO_2, tavlanmış TiO_2 ve boya katkılı TiO_2'nin farklı boyutlardaki FESEM görüntüleri verilmiştir.



(a)



(b)

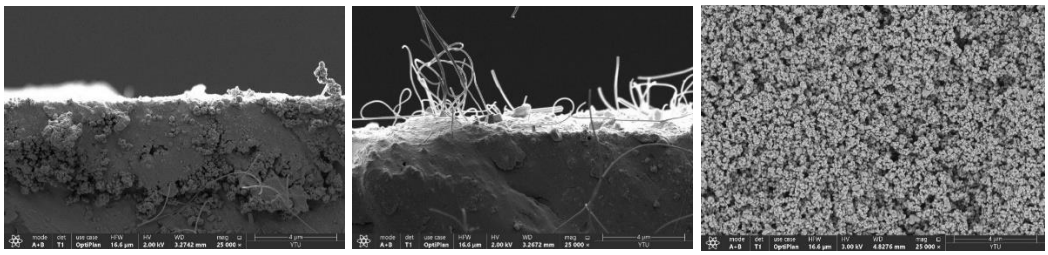


(c)

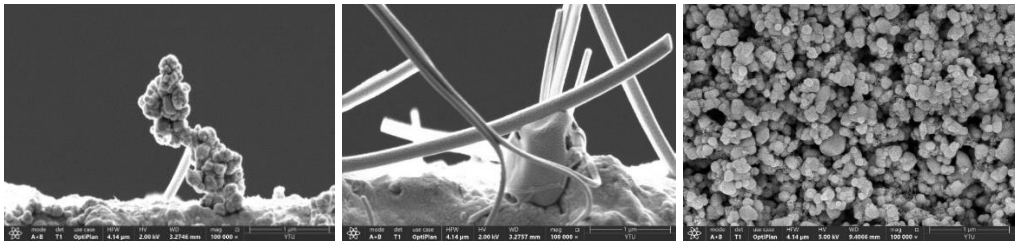
Şekil 5.2 TiO_2 (a), tavlanmış TiO_2 (b), Boya+TiO_2 (c)'nin 100 000 x 1µm, 500 000 x 200nm ve 250 000 x 500nm boyutlarındaki FESEM görüntüleri

5.1.3 SEM

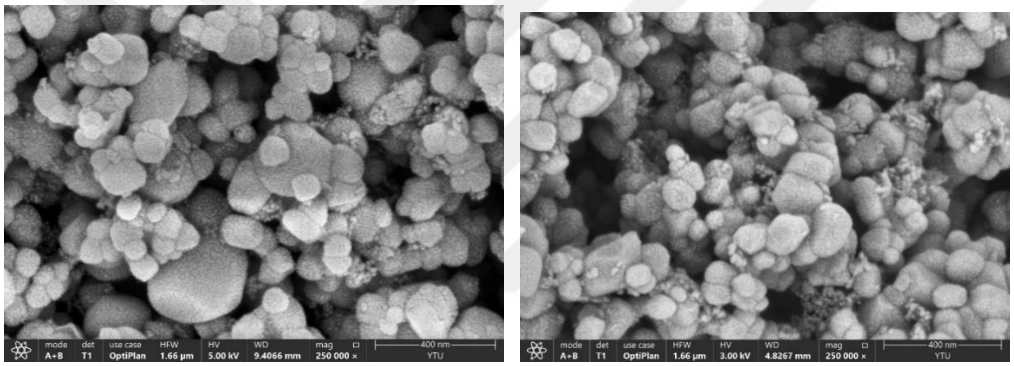
Boya katkılı TiO_2'nin farklı boyutlardaki SEM görüntüleri Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.3 Boya+TiO_2'nin 25 000 x 4µm boyutlarındaki SEM görüntüleri



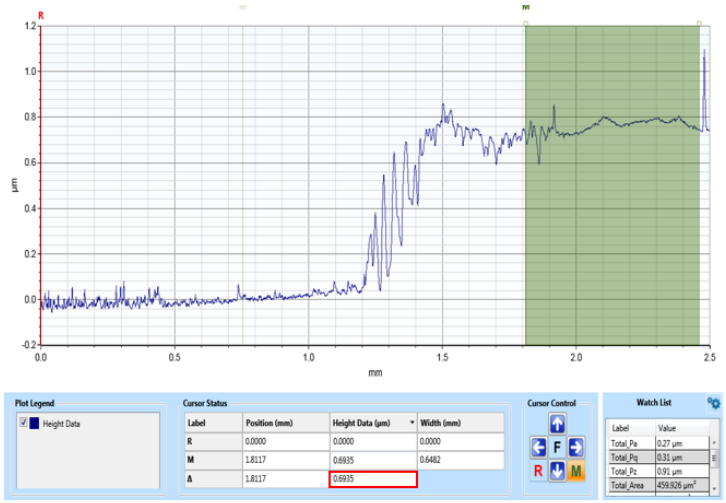
Şekil 5.4 Boya+TiO_2'nin 100 000 x 1µm boyutlarındaki SEM görüntüleri



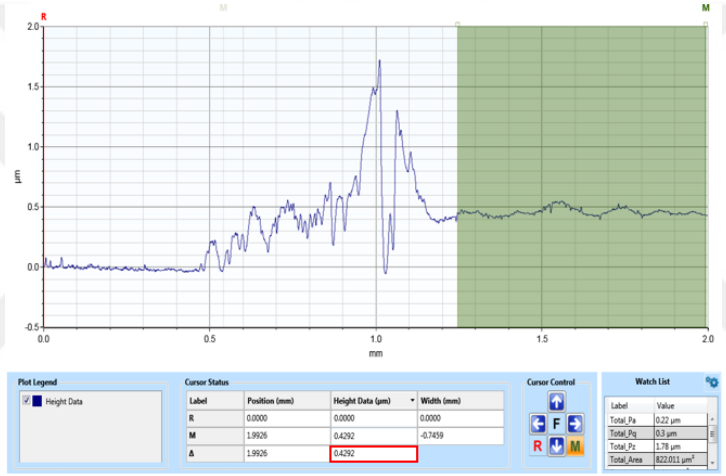
Şekil 5.5 Boya+TiO_2'nin 250 000 x 400nm boyutlarındaki SEM görüntüleri

5.1.4 TiO_2'nin Optik Özelliklerinin İncelenmesi

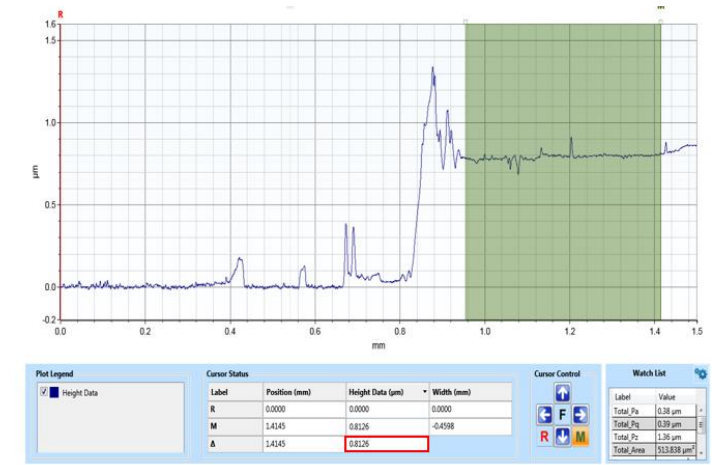
TiO_2'nin yasak enerji bant aralığının hesaplanabilmesi için üç farklı TiO_2 numune örneği (tavlanmamış TiO_2, tavlanmış TiO_2 ve tavlanmış TiO_2+Boya) hazırlanmıştır. Shimadzu UV spektroskopi cihazı ile görünür ışık altında dalga boyuna bağlı optiksel geçirgenlik ve soğurma ölçümleri yapılmıştır. Numunelerin kalınlıkları Şekil 5.6'da görüldüğü üzere profilometre ile (0.8126µm, 0.4292µm, 0.6935µm) belirlenmiştir. Origin programında Tauc Plot yöntemi ile $(\alpha h\upsilon)^2 - h\upsilon$ grafiği çizilerek Eg bulunmuştur.



(a)

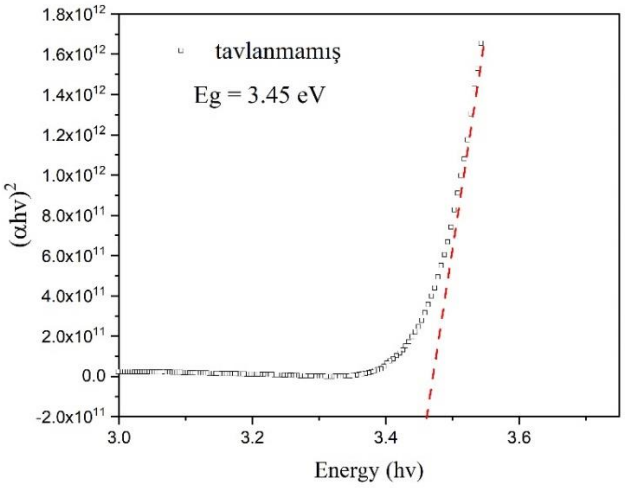


(b)

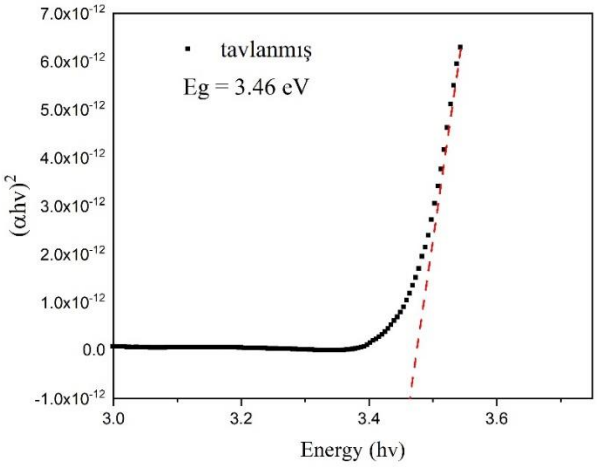


(c)

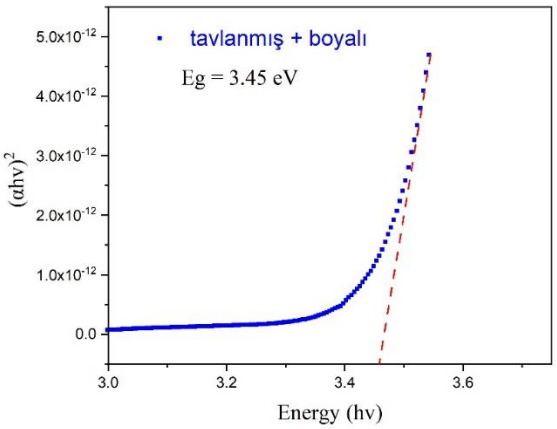
Şekil 5.6 Profilometre ile ölçülen (a) tavlanmamış TiO_2 (b) tavlanmış TiO_2 (c) boyaya daldırılmış TiO_2'nin kalınlıkları


tavlanmamış
Eg = 3.45 eV
(αhv)²
Energy (hv)

(a)


tavlanmış
Eg = 3.46 eV
(αhv)²
Energy (hv)

(b)



(c)

Şekil 5.7 Tauc plot yöntemi ile hesaplanan (a) tavlanmamış TiO_2 (b) tavlanmış TiO_2 (c) boyaya daldırılmış TiO_2'nin yasak bant aralıkları

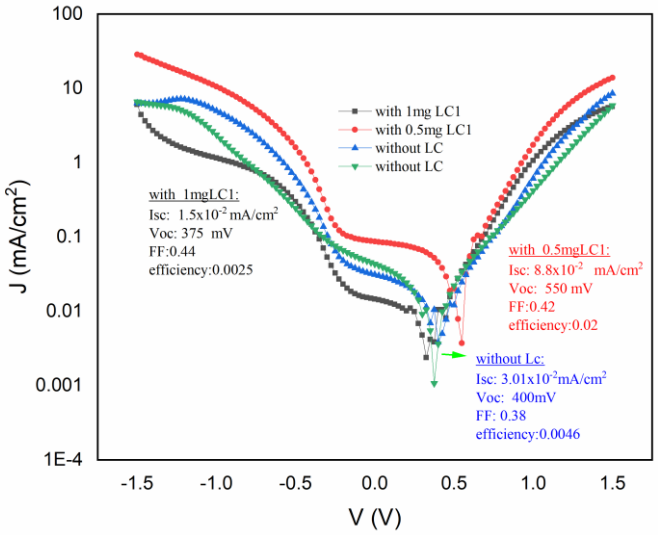
Şekil 5.7'de de görüldüğü üzere üç malzemenin de (tavlanmamış TiO_2, tavlanmış TiO_2 ve tavlanmış TiO_2+boya) yasak bant enerjileri hemen hemen aynı olup değişmemiştir.

5.2 Sıvı Kristal ile Katkılı Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Fotovoltaik Performanslarının Karakterizasyonu

Bu bölümde **LC1** ve **LC2** sıvı kristallerinin elektrolite katkı edilmesiyle birlikte iki farklı yöntemle hazırlanan boya duyarlı güneş pillerinin fotovoltaik ölçümleri incelenecektir.

Tablo 5.1 Referans, 0.5mg LC1 ve 1mg LC1 BDGP'lerinin fotovoltaik parametreleri

	Voc (mV)	**Isc (mA)**	**FF**	**η**
REF	400	$\mathbf{3.01 \times 10^{-2}}$	0.38	0.0046
0.5 mg LC1	550	$\mathbf{8.8 \times 10^{-2}}$	0.42	0.02
1 mg LC1	375	$\mathbf{1.5 \times 10^{-2}}$	0.44	0.0025

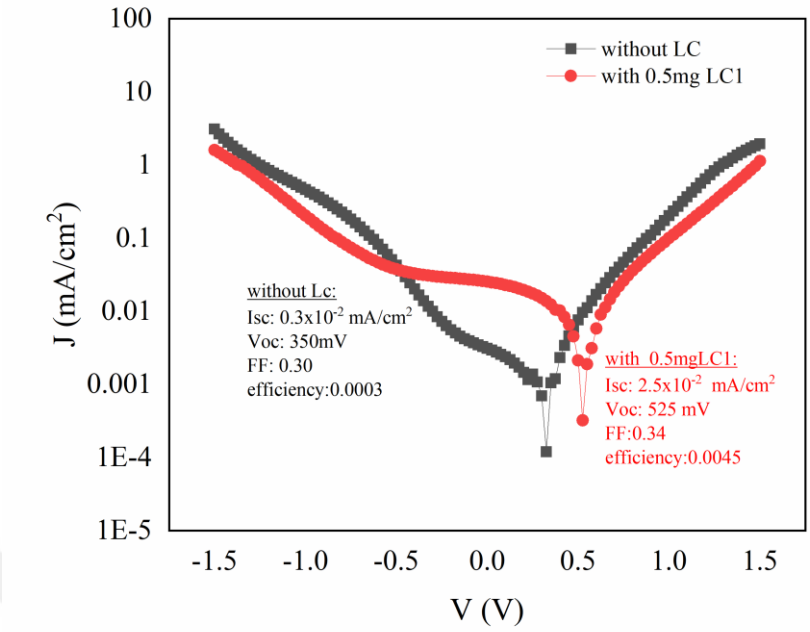


Şekil 5.8 Referans, 0.5mg LC1 ve 1mg LC1 BDGP'lerinin J-V grafikleri

1.yöntem kullanılarak hazırlanan ilk deneyde 0.5mg ve 1mg konsantrasyonlarında hazırlanan LC1 sıvı kristalinin referansa göre etkileri gösterilmiştir. 0.5mg LC1 sıvı kristalinin verimi referansa göre 4.3 kat artarken 1mg LC1 sıvı kristalinin referansa göre FF değeri artmıştır (Tablo 5.1).

Tablo 5.2 Referans, 0.5mg LC1 BDGP'lerinin fotovoltaik parametreleri

	Voc (mV)	**Isc (mA)**	**FF**	**η**
REF	350	$\mathbf{0.3 \times 10^{-2}}$	0.30	0.0003
0.5 mg LC1	525	$\mathbf{2.5 \times 10^{-2}}$	0.34	0.0045

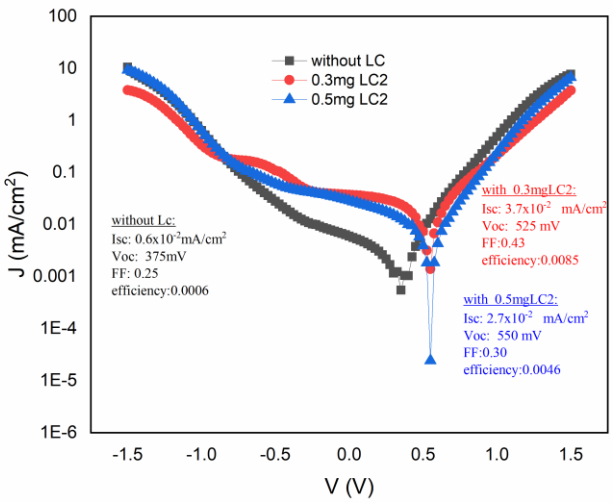


Şekil 5.9 Referans, 0.5mg LC1 BDGP'lerinin J-V grafikleri

1.yöntem kullanılarak hazırlanan ikinci deneyde 0.5mg konsantrasyonunda hazırlanan LC1 sıvı kristalinin referansa göre etkisi gösterilmiştir. 0.5mg LC1 sıvı kristalinin verimi referansa göre 15 kat artmıştır (Tablo 5.2).

Tablo 5.3 Referans, 0.3mg LC2 ve 0.5mg LC2 BDGP'lerinin fotovoltaik parametreleri

	Voc (mV)	**Isc (mA)**	**FF**	**η**
REF	375	$\mathbf{0.6 \times 10^{-2}}$	0.25	0.0006
0.3 mg LC2	525	$\mathbf{3.7 \times 10^{-2}}$	0.43	0.0085
0.5 mg LC2	550	$\mathbf{2.7 \times 10^{-2}}$	0.30	0.0046

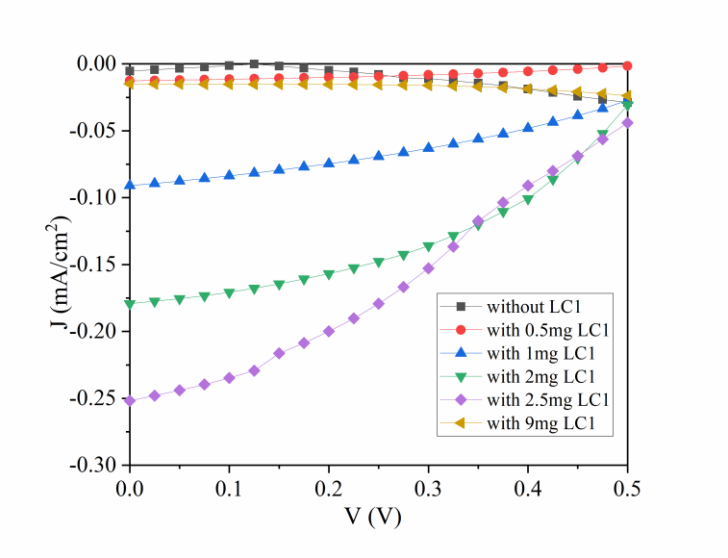


Şekil 5.10 Referans, 0.3mg LC2 ve 0.5mg LC2 BDGP'lerinin J-V grafikleri

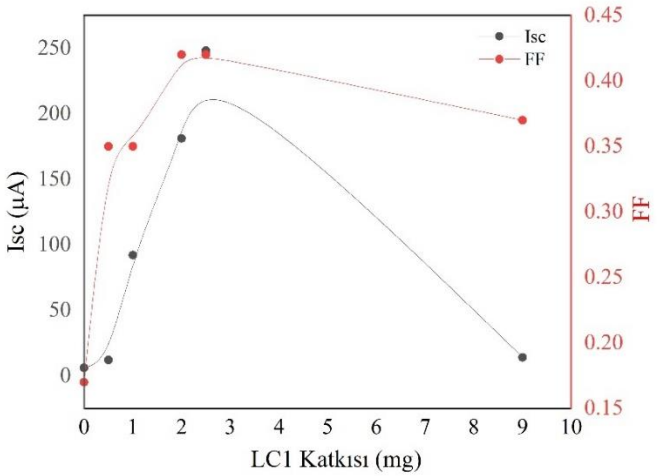
1.yöntem kullanılarak hazırlanan üçüncü deneyde 0.3mg ve 0.5mg konsantrasyonlarında hazırlanan LC2 sıvı kristalinin referansa göre etkisi gösterilmiştir. 0.3mg LC2 sıvı kristalinin verimi referansa göre 14 kat artarken 0.5mg LC2 sıvı kristali katkılanan BDGP'nin verimi referansa göre 7.6 kat artmıştır (Tablo 5.3).

Tablo 5.4 LC1 sıvı kristalinin konsantrasyona göre farklı katkılarla hazırlanan BDGP'lerinin fotovoltaik parametreleri

	Voc (mV)	**Isc (mA)**	**FF**	**η**
REF	150	0.6×10^{-2}	0.17	0.0002
0.5 mg LC1	550	1.2×10^{-2}	0.35	0.0025
1 mg LC1	600	9.2×10^{-2}	0.35	0.0197
2 mg LC1	550	18.1×10^{-2}	0.42	0.0420
2.5 mg LC1	475	24.8×10^{-2}	0.42	0.0501
9 mg LC1	550	1.4×10^{-2}	0.37	0.0031



Şekil 5.11 LC1 sıvı kristalinin konsantrasyona göre farklı katkılarla hazırlanan BDGP'lerinin J-V grafikleri



Şekil 5.12 Farklı konsantrasyonlardaki LC1 katkısına bağlı I_{SC}-FF değişim grafiği

1.yöntem kullanılarak hazırlanan sonraki deneyde LC1 sıvı kristalinin konsantrasyona göre farklı katkılarla hazırlanan BDGP'lerinin referansa göre etkisi gösterilmiştir. Eklenen sıvı kristal konsantrasyonu arttıkça verimin de arttığı gözlemlenmiştir. 2.5mg LC1 sıvı kristal katkılı BDGP'nin referansa göre verimi 250.5 kat artmıştır (Tablo 5.4).

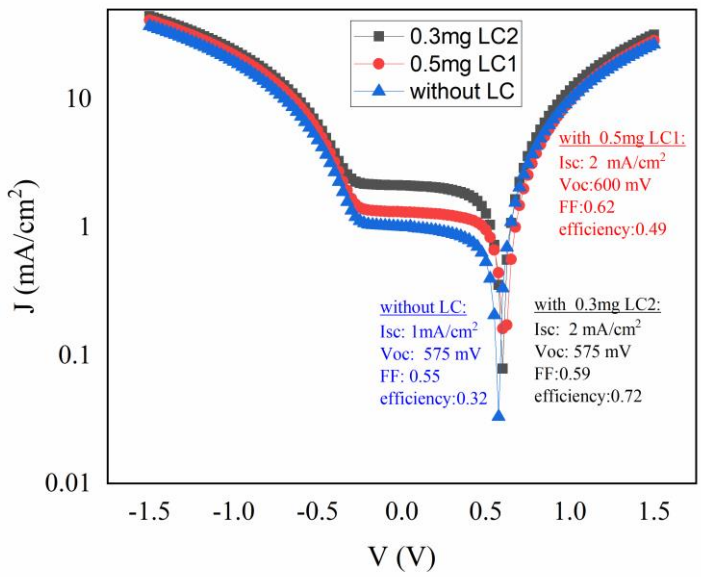
Tablo 5.5 Referans, 0.5mg LC1 ve 1mg LC1 BDGP'lerinin fotovoltaik parametreleri

	V_{OC} (mV)	**I_{SC} (mA)**	**FF**	**η**
REF	525	1	0.55	0.32
0.5 mg LC1	600	2.7	0.56	0.94
1 mg LC1	525	1.8	0.58	0.57

2.yönteme göre hazır olarak satın alınan TiO_2 kullanılarak hazırlanan ilk deneyde 0.5mg ve 1mg konsantrasyonlarında hazırlanan LC1 sıvı kristalinin referansa göre etkileri gösterilmiştir. 0.5mg LC1 eklenen BDGP referansa göre 2.9 kat artarken 1mg LC1 eklenen BDGP referansa göre 1.7 kat artmıştır (Tablo 5.5).

Tablo 5.6 Referans, 0.3mg LC2 ve 0.5mg LC1 BDGP'lerinin fotovoltaik parametreleri

	V_{OC} (mV)	**I_{SC} (mA)**	**FF**	**η**
REF	575	1	0.55	0.32
0.3 mg LC2	575	2	0.59	0.72
0.5 mg LC1	600	2	0.62	0.49



Şekil 5.13 Referans, 0.3mg LC2 ve 0.5mg LC1 BDGP'lerinin J-V grafikleri

2.yönteme göre hazır olarak satın alınan TiO_2 kullanılarak hazırlanan ikinci deneyde 0.3mg LC2 ve 0.5mg LC1 konsantrasyonlarında hazırlanan BDGP'lerin referansa göre etkileri gösterilmiştir. 0.3mg LC2 eklenen BDGP'nin referansa göre verimi 2.25 kat artarken 0.5mg LC1 eklenen BDGP'nin verimi referansa göre 1.5 kat artmıştır (Tablo 5.6).

6
SONUÇ

Bu tez çalışmasında boya duyarlı güneş pillerinde verimliliği arttırmak amacı ile pilin elektrolitine LC1 ve LC2 sıvı kristalleri eklenmiştir. En iyi sonuca ulaşmak için deneyler birden fazla kez tekrarlanarak sonuçlar stabilize edilmeye çalışılmıştır. LC1 ve LC2 sıvı kristallerinin önce kendi içlerinde konsantrasyona bağlı artarak değiştiği durumlarda sonucuna bakılıp ardından birbirleriyle karşılaştırmalı durumlar incelenmiştir. LC1 ve LC2 sıvı kristallerinin ikisi de kalamitik sıvı kristal grubuna ait olup, LC1 nematik sıvı kristal, LC2 kiral smektik sıvı kristaldir. Alınan ölçüm sonuçlarına bakıldığında iki bileşiğinde hemen hemen aynı oranda boya duyarlı güneş pilinin parametrelerini (voltaj, akım, doldurma faktörü, verim) arttırdığı gözlemlenmiştir. Güneş pilinin performansındaki bu artış sıvı kristal eklenmesiyle birlikte artan mobiliteye bağlanmaktadır. Boya duyarlı güneş pilindeki iletkenlik mekanizmasını arttırmak için akmaya karşı direnç anlamına gelen viskozitenin düşük olması gerekir. Viskozitedeki azalma elektronların daha hızlı hareket etmesine neden olur. Elektrolite eklenen sıvı kristaller çözücü ortamında yönlenerek viskoziteyi azaltmış gibi davranırlar ve elektron hareketi yani mobilite artar bunun sonucunda da iletkenlik yani dolayısıyla verim artmış olur. Yapılan her deneyin sonucunda da elektrolitine sıvı kristal katkı edilen güneş pillerinin, sıvı kristalsiz olan numuneye göre arttığı gözlemlenmiştir. Tezin ilk aşamasında TiO_2 laboratuvar ortamında hazırlanarak doctor blade yöntemi ile kaplama yapılmıştır. Bu yöntemle elde ettiğimiz verimler düşük olsa da sıvı kristal katkısıyla numunede bariz bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Tezin ikinci aşamasında hazır olarak satın alınan TiO_2 spin coater yöntemi ile elektrotlara kaplanmıştır. Bu yöntem sonucunda verimler birinci aşamaya kıyasla artmıştır ve yine sıvı kristal katkılı pillerin numuneye göre daha yüksek verime sahip olduğu gözlemlenmiştir. TiO_2 boya duyarlı güneş pillerinde boyanın partiküllere sağlam tutunması için geniş bir yüzey alanı oluşturduğundan çok önemli bir yapıdır. Bu sebeple tez kapsamında TiO_2'nin kristal yapısı ve morfolojik özellikleri XRD, SEM, FESEM ölçüm cihazlarında incelenmiş ve enerji bant aralığı hesabı yapılmıştır. Boya duyarlı güneş pillerinin verimlerinin düşük çıkmasının

nedenlerinden biri, Şekil 5.5'te verilen SEM ölçüm sonuçlarından da görüleceği üzere TiO_2'ye boya katkısı yapıldığında boya moleküllerinin yüzeye yeterli bir şekilde tutunup homojen olarak dağılmadığındandır. Diğer nedeni ise TiO_2'nin yasak bant enerji aralığı literatüre kıyasla yüksek çıkmıştır (Şekil 5.7). Literatür kısmında da bahsedildiği gibi boya duyarlı güneş pillerinde sıvı kristal kullanımı yeni bir teknolojidir ve henüz çok sayıda çalışma bulunmamaktadır. Ancak şu ana kadar literatürde yapılmış ve bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan da görüldüğü gibi gelecek vadeden bir konu olup üzerine yapılan çalışmaların artması gerekmektedir.

KAYNAKÇA

[1] M. Čolović, J. Volavšek, E. Stathatos, N. Č. Korošin, M. Šobak and I. Jerman, "Amphiphilic POSS-based ionic liquid electrolyte additives as a boost for dye-sensitized solar cell performance," *Solar Energy*, vol. 183, pp. 619-631, May 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.03.070.

[2] M. Kumar, and S. Kumar, "Liquid crystals in photovoltaics: a new generation of organic photovoltaics," *Polymer Journal*, vol. 49, no. 1, pp. 85-111, Jan 2017, doi: 10.1038/pj.2016.109.

[3] S. Mathew, et al. "Dye-sensitized solar cells with 13% efficiency achieved through the molecular engineering of porphyrin sensitizers," *Nature chemistry*, vol. 6, no. 3, pp. 242-247, Mar 2014, doi: 10.1038/nchem.1861.

[4] S. Balamurugan, and S. Ganesan, "Novel cobalt redox materials admitted in natrosol polymer with a thiophene based additive as a gel polymer electrolyte to tune up the efficiency of dye sensitized solar cells," *Electrochimica Acta*, vol. 329, 135169, Jan 2020, doi: 10.1016/j.electacta.2019.135169.

[5] B. O'Regan, and M. Grätzel, "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal Ti02 films," *Nature*, vol. 353, pp. 737–740, Oct 1991, doi: 10.1038/353737a0.

[6] M. A. Kamarudin, et al. "Self-assembled liquid crystalline nanotemplates and their incorporation in dye-sensitised solar cells," *Electrochimica Acta*, vol. 222, pp. 657-667, Dec 2016, doi: 10.1016/j.electacta.2016.11.021.

[7] M. A. Kamarudin, A. A. Khan, S. M. Said, M. M. Qasim, and T. D. Wilkinson, "Composite liquid crystal-polymer electrolytes in dye-sensitised solar cells: effects of mesophase alkyl chain length," *Liquid Crystals*, vol. 45, no. 1, pp. 112-121, Mar 2017, doi: 10.1080/02678292.2017.1302011.

[8] S. K. Ahn, et al. "Development of dye-sensitized solar cells composed of liquid crystal embedded, electrospun poly (vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene) nanofibers as polymer gel electrolytes," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 4, no. 4, pp. 2096-2100, Mar 2012, doi: 10.1021/am3000598.

[9] N. Yamanaka, et al. "Dye-sensitized TiO2 solar cells using imidazolium-type ionic liquid crystal systems as effective electrolytes," *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 111, no. 18, pp. 4763-4769, Jan 2007, doi: 10.1021/jp0671446.

[10] R. Kawano, M. K. Nazeeruddin, A. Sato, M. Grätzel, and M. Watanabe, "Amphiphilic ruthenium dye as an ideal sensitizer in conversion of light to electricity using ionic liquid crystal electrolyte," *Electrochemistry*

Communications, vol. 9, no. 5, pp. 1134-1138, May 2007, doi: 10.1016/j.elecom.2007.01.005.

[11] H. K. Kim, M. J. Lee, S. H. Jin, and G. D. Lee, "Optimization of liquid crystal concentration in the dye-sensitized solar cell for high efficiency," *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol. 510, no. 1, pp. 323-1457, Oct 2009, doi: 10.1080/15421400903070283.

[12] G. Vijayakumar, et al. "New liquid crystal-embedded PVdF-co-HFP-based polymer electrolytes for dye-sensitized solar cell applications," *Macromolecular Research*, vol. 17, pp. 963-968, Dec 2009, doi: 10.1007/BF03218643.

[13] R. D. Costa, et al. 1Beneficial effects of liquid crystalline phases in solid-state dye-sensitized solar cells," *Advanced Energy Materials*, vol. 3, no. 5, pp. 657-665, Feb 2013, doi: 10.1002/aenm.201200860.

[14] D. Högberg, et al. "Liquid-crystalline dye-sensitized solar cells: design of two-dimensional molecular assemblies for efficient ion transport and thermal stability," *Chemistry of Materials*, vol. 28, no. 18, pp. 6493-6500, July 2016, doi: 10.1021/acs.chemmater.6b01590.

[15] S. Tan, Z. Zhao, C. Wang, and Y. Wu, "A thiolate/disulfide liquid crystalline electrolyte for dye-sensitized solar cells: Promotion of the Grotthuss-type charge transport through lamellar nanostructures," *Electrochimica Acta*, vol. 288, pp. 165-172, Oct 2018, doi: 10.1016/j.electacta.2018.09.003.

[16] C. Wang, X. Li, Y. Wu, and S. Tan, "An efficient and thermally stable dye-sensitized solar cell based on a lamellar nanostructured thiolate/disulfide liquid crystal electrolyte and carbon/PEDOT composite nanoparticle electrode," *RSC advances*, vol. 9, no. 61, pp. 35924-35930, Nov 2019, doi: 10.1039/c9ra07043e.

[17] S. Zhu, Y. Su, Y. Liu, X. Niu, W. Zhang, and W. Chen, "Liquid crystals as electrolyte additives for improving the transmission paths of redox couples and performances of dye-sensitized solar cells," *Optical Materials*, vol. 149, 115007, Mar 2024, doi: 10.1016/j.optmat.2024.115007.

[18] F. Reinitzer, "Beiträge zur kenntniss des cholesterins," *Monatshefte für Chemie und verwandte Teile anderer Wissenschaften*, vol. 9, no. 1, pp. 421-441, Dec 1888, doi: 10.1007/BF01516710.

[19] S. J. Woltman, G. D. Jay, and G. P. Crawford, "Liquid-crystal materials find a new order in biomedical applications. *Nature materials*, vol. 6, no. 12, pp. 929-938, Dec 2007, doi: 10.1038/nmat2010.

[20] P. J. Collings, and M. Hird, "Types of liquid crystals," in *Introduction to Liquid Crystals: Chemistry and Physics*, G. W. Gray, J. W. Goodby and A. Fukuda, Eds. London, U.K.: Taylor & Francis, 2009, ch. 305, pp. 5-9.

[21] M. Kılıç, "Siyano Grubu İçeren Sıvı Kristal Moleküllerinin Elektronik Yapıları Ve Mezomorfik Özelliklerinin Moleküler Mekanik Ve Kuantum Mekaniksel Yöntemlerle İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2004.

[22] G. Karanlık, "Farklı Terminal Uçlu Kiral Kalamitik Mesogenler," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2013.

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

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

[25] A. Yıldız, "Sıvı Kristallerde Faz Geçişlerinin Dielektrik Spektroskopi Yöntemi ile İncelenmesi," Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2019.

[26] B. Bahadur, Ed. *Liquid Crystal-Applications and Uses.* Etobicoke, Ontario, Canada: World scientific, 1990.

[27] N. Y. Canlı, "Sıvı Kristal Sistemlerin Mesomorfik, Morfolojik Ve Elektro-Optik Özelliklerinin İncelenmesi," Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2012.

[28] P. G. De Gennes, and J. Prost, *The Physics of Liquid Crystals*. Oxford New York, U.S.: Oxford University Press, 1993.

[29] E. B. Priestly, *Introduction to Liquid Crystals.* Princeton New Jersey, US: Springer Science & Business Media, 2012.

[30] S. Dindar, "Bazı Mezojenik/Nonmezojenik Sıvı Kristal Karışımların Termal Ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye, 2021.

[31] R. Achten, *Banana-Shaped Liquid Crystals.* Wageningen University and Research, (2006).

[32] N. Tamaoki, "Cholesteric liquid crystals for color information technology," *Advanced materials*, vol. 13, no. 15, pp. 1135-1147, August 2001, doi: 10.1002/1521-4095(200108)13:15<1135::AID-ADMA1135>3.0.CO;2-S.

[33] S. Nuray, "4-Siyano Rezorsinol Merkezi Üniteli Asimetrik Muz Şekilli Mesogenlerin Sentezi, Karakterizasyonu Ve Mesomorfik Özelliklerinin İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2013.

[34] K. Upadhyaya, V. Gude, G. Mohiuddin, and R. V. Nandiraju, "A new family of four-ring bent-core nematic liquid crystals with highly polar transverse and end groups," *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, vol. 9, no. 1, pp. 26-35, 2013.

[35] D. H. Kim, A. Jahn, S. J. Cho, J. S. Kim, M. H. Ki, and D. D. Kim, "Lyotropic liquid crystal systems in drug delivery: a review," *Journal of Pharmaceutical Investigation*, vol. 45, pp. 1-11, (2015), doi: 10.1007/s40005-014-0165-9.

[36] B. Beşergil. "Mühendislik Plastikleri; Sıvı Kristaller (liquid crystals)." Blogger.com. [Online]. Available: https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_796.html

[37] B. Ge, et al. “Single-shot quantitative polarization imaging of complex birefringent structure dynamics,” *ACS photonics*, vol. 8, no. 12, pp. 3440-3447, Nov 2021, doi: 10.1021/acsphotonics.1c00788.

[38] R. Oldenbourg, “Polarization microscopy with the LC-PolScope,” *Live cell imaging: A laboratory manual*, pp. 205-237, 2005.

[39] M. Wolman, “Polarized light microscopy as a tool of diagnostic pathology,” *Journal of Histochemistry & Cytochemistry*, vol. 23, no. 1, pp. 21-50, Jan 1975, doi: 10.1177/23.1.1090645.

[40] H. Melik, “Sıvı Kristallerde Moleküler Yönlendirme ve Elektrooptik Etkiler,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, Türkiye, 2010.

[41] Z. Karakoç, M. A. Ketani, and Ş. Ketani, “Mikroskopların Çalışma Mekanizması ve Çeşitleri,” Dicle Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, no. 1, pp. 1–6, June 2016.

[42] M. J. O'neill, “Measurement of Specific Heat Functions by Differential Scanning Calorimetry,” *Analytical chemistry*, vol. 38, no. 10, pp. 1331-1336, September 1966.

[43] M. J. Vold, “Differential thermal analysis,” *Analytical chemistry*, vol. 21, no. 6, pp. 683-688, June 1949.

[44] B. Beşergil. “Termal Analiz Yöntemleri (thermal analysis methods).” Blogger.com. [Online]. Available: https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_118.html

[45] E. Akman, “Bakır katkılı TiO2 fotoanotların boya duyarlı güneş pilleri performansı üzerindeki etkisi,” *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, no. 18, pp. 129-135, April 2020, doi: 10.31590/ejosat.672079.

[46] R. Yew, S. K. Karuturi, J. Liu, H. H. Tan, Y. Wu, and C. Jagadish, “Exploiting defects in TiO 2 inverse opal for enhanced photoelectrochemical water splitting,” *Optics Express*, vol. 27, no. 2, pp. 761-773, Jan 2019, doi: 10.1364/OE.27.000761.

[47] A. D. Prasetya, M. Rifai, Mujamilah, and H. Miyamoto, “X-ray diffraction (XRD) profile analysis of pure ECAP-annealing Nickel samples,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1436, no. 1, 012113, Sep 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1436/1/012113.

[48] A. Daniel, and J. H. Delcamp, “Dye-Sensitized Solar Cells: A Brief Historical Perspective and Uses in Multijunction Devices,” *Springer*, vol. 32, pp. 81-98, May 2021, doi: 10.1007/978-3-030-69445-6_4.

[49] A. Dastider, H. Saha, M. J. F. Anik, M. Jamal, and M. M. Billah, “Second phase Cu2O boosted photocatalytic activity of fluorine doped CuO nanoparticles,” *RSC advances*, vol. 14, no. 17, pp. 11677-11693, April 2024, doi: 10.1039/D3RA08790E.

[50] O. I. Francis, and A. Ikenna, “Review of dye-sensitized solar cell (DSSCs) development,” *Natural Science*, vol. 13, no. 12, pp. 496-509, 2021, doi: 10.4236/ns.2021.1312043.

[51] İ. Kabaçelik, "Fotovoltaik Uygulamalar için Germanyum Güneş Pillerinin ve Germanyum İnce Filmlerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu," Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye, 2015.

[52] G. Battal, "Organik Boya Duyarlı Güneş Pilleri Üzerine Yapılan Bir Araştırma," *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik Ve Teknoloji Dergisi*, vol. 4, no. 1, pp. 1–6, June 2020.

[53] O. Gürbüz, "Boya Duyarlı Güneş Pillerinde Makro Halkalı Tetra Pirollerin Etkisi," Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2016.

[54] M. S. Ahmad, A. K. Pandey, and A. N. Rahim, "Advancements in the development of TiO2 photoanodes and its fabrication methods for dye sensitized solar cell (DSSC) applications. A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, pp. 89-108, Sep 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.129.

[55] T. Dikici and M. Yurddaşkal, "Anodik spark oksitleme tekniği ile üretilen titanyum dioksit (TiO2) kaplamaların karakterizasyonu ve fotokatalitik özellikleri", BAUN Fen. Bil. Enst. Dergisi, vol. 20, no. 1, pp. 83–93, 2018, doi: 10.25092/baunfbed.427766.

[56] N. Prabavathy, S. Shalini, R. Balasundaraprabhu, D. Velauthapillai, S. Prasanna, and N. Muthukumarasamy, "Enhancement in the photostability of natural dyes for dye-sensitized solar cell (DSSC) applications: a review," *International Journal of Energy Research*, vol. 41, no. 10, pp. 1372-1396, Jan 2017, doi: 10.1002/er.3703.

[57] M. Cesur, "Boya Duyarlı Güneş Pillerinde Berberis Vulgaris Ekstraktlarının Fotoduyarlaştırıcı Olarak Kullanımlarının İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2019.

[58] M. Belhi, Z. Kaddachi, R. Gharbi, and M. B. Karoui, "Effect of TiO 2 blocking layer on photovoltaic performances of solar cells sensitized with N719," in *2019 International Conference on Signal, Control and Communication (SCC)*, (Hammamet, Tunisia), 2019, pp. 175-178, doi: 10.1109/SCC47175.2019.9116174.

[59] S. Ok, "Boya Duyarlı Güneş Pilleri İçin TiO2 Bazlı Malzemelerin Sentezi, Karakterizasyonu Ve Uygulaması," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Antalya, Türkiye, 2019.

[60] M. Güngör, "Boya Duyarlı Güneş Pilleri için Yeni Boya Oluşturulması ve Elektronik Özelliklerinin Hesaplanması," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Karaman, Türkiye, 2021.

[61] M. R. Hoffmann, S. T. Martin, W. Choi, and D. W. Bahnemann, "Environmental applications of semiconductor photocatalysis," *Chemical reviews*, vol. 95, no. 1, pp. 69-96, 1995.

[62] A. P. Yaka, "Farklı Boyaların ZnO Tabanlı Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Verimine Etkisi," Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2022.

[63] Y. Nuhoğlu, "P3ht:Pcbm Tabanlı Heteroeklem Organik Güneş Pillerinin Fabrikasyonu ve ZnO İnce Film Tabakasının Inverted Yapıya Uygulanması,"

Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum Teknik Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, 2019.

[64] M. Ermrich, and D. Opper, "X-Ray powder diffraction," *XRD for the Analyst, Getting Acquainted with the Principles,* pp. 63-85, 2011.

[65] James, Reuben, "X-Ray Diffraction" (2014). A with Honors Projects. 115.

https://spark.parkland.edu/ah/115

[66] R. S. Prabhu, R. Priyanka, M. Vijay, and G. K. Vikashini, "Field emission scanning electron microscopy (fesem) with a very big future in pharmaceutical research," *International Journal of Pharmacy and Biological Sciences*, vol. 11, no. 2, pp. 183-187, April 2021, doi: 10.21276/ijpbs.2021.11.2.21.

[67] H. Deng, X. Hu, H. A. Li, B. Luo, and W. Wang, "Improved pore-structure characterization in shale formations with FESEM technique," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 35, pp. 309-319, Sep 2016, doi: 10.1016/j.jngse.2016.08.063.

[68] K. Akhtar, S. A. Khan, S. B. Khan, and A. M. Asiri, "Scanning Electron Microscopy: Principle and Applications in Nanomaterials Characterization," *Springer International Publishing*, pp. 113-145, September 2018, doi: 10.1007/978-3-319-92955-2_4.

[69] H. M. Alishah, "Solution Processable Inverted Type Perovskite Solar Cells," Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2021.

[70] S. Çakar, "Yeni Yaklaşımlarla Tanin Esaslı Boya Duyarlı Güneş Pillerinin Geliştirilmesi," Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2017.

[71] T. Theivasanthi, and M. Alagar, "Titanium dioxide (TiO2) Nanoparticles XRD Analyses: An Insight," *arXiv preprint arXiv:1307.1091*, Jul 2013, doi: 10.48550/arXiv.1307.1091.

[72] Mike Sugiyama Jones, U.K. *C.8 Dye-Sensitized Solar Cells (HL).* (Apr. 22, 2016). [Online Video]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=CWEKfxBc4_8

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. I. Cakir, N. Yilmaz Canli, B. Bilgin Eran, "**Investigation of Liquid Crystal Doped Electrolytes in Dye Sensitive Solar Cells",** Turkish Physical Society 39 th International Physics Congress, Bodrum, Turkey, 31 August - 4 September 2023

Projeler

1. Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü, FYL-2023-5583 **"Boya Duyarlı Güneş Pillerinde Farklı Mesofaz Sergileyen Sıvı Kristal Katkılı Elektrolitlerin Geliştirilmesi"** Proje Yürütücüsü: Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI, Proje Ekibi: İrem ÇAKIR (Yüksek Lisans Öğrencisi)