



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**FARKLI P-TİPİ YARIİLETKENLERİN TEK KRİSTALLERİNİN
BÜYÜTÜLMESİ, KARAKTERİZASYONU VE
ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİNDE PERFORMANS ÜZERİNE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Selen POLAT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2020
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Selen POLAT tarafından hazırlanan “FARKLI P-TİPİ YARIİLETKENLERİN TEK KRİSTALLERİNİN BÜYÜTÜLMESİ, KARAKTERİZASYONU VE ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİNDE PERFORMANS ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması 25/12/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Mustafa Ersöz

Danışman

Dr.Öğr.Üyesi Çisem Kırbıyık Kurukavak

Üye

Prof. Dr. Mahmut Kuş

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından 18201152 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Selen POLAT

Tarih:04.12.2020



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI P-TİPİ YARIİLETKENLERİN TEK KRİSTALLERİNİN BÜYÜTÜLMESİ, KARAKTERİZASYONU VE ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİNDE PERFORMANS ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Selen POLAT

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Çisem KIRBIYIK KURUKAVAK

2020, 66 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Çisem KIRBIYIK KURUKAVAK
Prof. Dr. Mustafa ERSÖZ
Prof. Dr. Mahmut KUŞ

Yapısal tasarım, organik yarıiletken elektroniğin elektriksel özelliklerini iyileştirmek için anahtar parametredir. Düzenli organik kristalin büyütülmesi, alan etkili transistörler veya güneş pilleri gibi gelişmiş organik cihazlar için daha fazla yük taşıyıcı hareketliliği ve daha uzun eksiton difüzyon uzunluğu elde etmenin anahtarıdır. İnce filmlere kıyasla, organik tek kristaller daha düzenlidir. Bu çalışma yenilenebilir enerji alanında ön plana çıkan konulardan biri olan güneş enerjisinde yeni yöntemler arasına giren, organik yarıiletkenlerin tek kristallerin büyütülmesi ve ikili tabaka güneş pillerinde uygulamalarının incelendiği araştırmaları içermektedir. Çalışmada organik malzemelerin tek kristal olarak büyütülmesi, güneş piline uygulanması, karakterizasyonu ve verimlilikleri üzerinde durulmuştur. Farklı inert gaz akış hızı altında fiziksel buhar taşınımı (PVT) ile istenen boyutta ve yüksek kalitede rubren, pentasen ve tetrasen tek kristallerinin büyütülmesi amaçlanmıştır. Bu yöntem, istenen özelliklere sahip tek kristalleri elde etmek için kolay ve kontrol edilebilir bir yöntemdir. Elde edilen tek kristaller, ikili tabaka organik güneş pillerini üretebilmek için PCBM ince filmlerinin üstünde kullanılmıştır. Tek kristaller ve güneş pilleri optik mikroskop, X-ışını kırınımı (XRD), UV-Görünür spektroskopisi, atomik kuvvet mikroskobu (AFM), taramalı elektron mikroskobu (SEM) teknikleri ve güneş simülatörü ile karakterize edilmiştir. Organik yarıiletkenlerin tek kristallerinin büyütülmesinde farklı inert gaz akış hızı kullanılmış ve büyütülen tek kristallerin yapısal ve optik özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. 1,6 L/sa ile 6 L/sa akış hızları aralığında yapılan denemelerde rubren, pentasen ve tetrasen tek kristalleri ile üretilen güneş pillerinin en yüksek enerji dönüşüm verimleri (EDV) sırasıyla %0,34, %0,0197, %0,0151 olarak ölçülmüştür. Üretilen tek kristallerde en yüksek verimlerin kalınlık ve iletkenlik uyumu sonucu elde edildiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fiziksel buhar taşınımı (PVT), güneş pili, ikili-tabaka güneş pili, organik tek kristal yarıiletken

ABSTRACT

MS THESIS

GROWTH OF SINGLE CRYSTALS OF DIFFERENT P-TYPE SEMICONDUCTORS, CHARACTERIZATION AND INVESTIGATION OF THEIR EFFECT ON THE PERFORMANCE OF ORGANIC SOLAR CELLS

Selen POLAT

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Chemical Engineering**

**Advisor: Asst. Prof. Dr. Çisem KIRBIYIK KURUKAVAK
2020, 66 Pages**

**Jury
Asst. Prof. Dr. Çisem KIRBIYIK KURUKAVAK
Prof. Dr. Mustafa ERSÖZ
Prof. Dr. Mahmut KUŞ**

Structural design is the key parameter to improve the electrical properties of organic semiconductor electronics. Growth of highly ordered organic crystal is the key to achieving greater charge carrier mobility and longer exciton diffusion length for advanced organic device such as field effect transistors or solar cells. Compared to thin films, organic single crystals are highly ordered and free from disorders. This study includes researches that are among the new methods in solar energy, which is one of the prominent topics in the field of renewable energy, the growth of single crystals of organic semiconductors and their applications in double layer solar cells. Highlights the growth of organic materials such as single crystals, their application to the solar cell, the characterization and efficiency of materials. In this study, we aimed to grow desired size and high-quality rubrene, pentacene and tetracene single crystals by physical vapour transport (PVT) under different inert gas flow rate. This method is easy control to get single crystals with desired properties. The single crystals obtained were used on top of the PCBM thin films to fabricate bilayer organic solar cells. The produced single crystals and solar cells characterized by optical microscope, X-ray diffraction (XRD), UV-Visible spectroscopy, atomic force microscope (AFM), and scanning electron microscope (SEM) techniques and solar simulator. Different inert gas flow rate is used as an organic semiconductor parameter. The highest energy conversion efficiency (EDV) of solar cells produced with rubren, pentasen, tetrasen and anthracene single crystals were measured as 0.31%, 0.0197%, 0.0151% and 0.344% respectively.

Keywords: Bilayer solar cell, organic single crystal semiconductor, physical vapor transport (PVT), solar cell

ÖNSÖZ

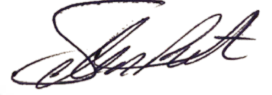
Öncelikle araştırmalarımın ve çalışmalarımın her aşamasında bana yardımcı olan değerli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Çisem KIRBIYIK KURUKAVAK' a, her zaman bilgi birikimiyle yol gösteren ve katkılarını esirgemeyen kıymetli hocamız Prof. Dr. Mahmut KUŞ' a ve tüm çalışma ekibine teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarım için laboratuvar ve altyapılarını kullanabilme imkânı sağladığı için Konya Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü ve Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezine teşekkürü borç bilirim.

Ek olarak, çalışmalarım boyunca sağladığı 3001-Başlangıç AR-GE programı kapsamında (PN: 118M641) burs ve imkânlardan dolayı TÜBİTAK'a ve Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu'na (PN: 18201152) teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, tüm eğitim hayatım süresince maddi ve manevi desteklerini esirgemeyip her zaman yanımda olan sevgili aileme çok teşekkür ederim.

Selen POLAT
KONYA-2020



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Durumu	2
1.1.1. Güneş enerjisi	3
1.2. Güneş Pillerinin Sınıflandırılması	3
1.2.1. Birinci nesil fotovoltaik piller	4
1.2.2. İkinci nesil fotovoltaik piller	4
1.2.3. Üçüncü nesil fotovoltaik piller	4
1.3. Organik Güneş Pilleri	5
1.3.1. Organik yarıiletkenler	6
1.3.2. Yük ayrımı ve temel çalışma prensibi	7
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	10
2.1. Kristal Büyüme	11
2.1.1. Gaz fazında büyüme	11
2.1.2. Çözelti süreçleri ile büyüme	13
2.1.3. Organik tek kristal yarıiletkenlerin elektronik uygulamaları	16
2.1.3.1. Alan etkili transistör uygulamaları	17
2.1.3.1. Işık yayan diyot uygulamaları	18
2.1.3.1. Güneş pili uygulamaları	19
3. MATERYAL VE YÖNTEM	21
3.1. Kimyasallar ve Güneş Pili Üretimi	21
3.2. Araçlar ve Teknikler	23
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	25
4.1. Rubren Yarıiletkeninin Tek Kristallerinin Büyütülmesi, Karakterizasyonu Ve Güneş Pili Uygulamaları	25
4.1.1. Yapısal ve morfolojik karakterizasyonlar	25
4.1.2. Elektriksel ve fotovoltaik karakterizasyonlar	31
4.2. Pentasen Yarıiletkeninin Tek Kristallerinin Büyütülmesi, Karakterizasyonu Ve Güneş Pili Uygulamaları	34
4.2.1. Yapısal ve morfolojik karakterizasyonlar	34
4.2.2. Elektriksel ve Fotovoltaik Karakterizasyonlar	38
4.3. Tetrasen Yarıiletkeninin Tek Kristallerinin Büyütülmesi, Karakterizasyonu Ve Güneş Pili Uygulamaları	42
4.3.1. Yapısal ve morfolojik karakterizasyonlar	42

4.3.2. Elektriksel ve fotovoltaiik karakterizasyonlar	46
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR	51
EKLER	55
ÖZGEÇMİŞ	56



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$^{\circ}\text{C}$	Santigrat Derece
$\text{\AA}$	Ångström
cm	Santimetre
$\text{cm}^2 / \text{V.s}$	Elektron hareketlilik birimi
cm^2	Santimetrekare
E_g	Enerji bant boşluğu
eV	Elektronvolt
$\hbar$	Planck Sabiti
I/I_0	Işık geçirgenliği
I	İletilen ışık
I_0	Gelen ışık
J	Akım yoğunluğu
kWh	Kilowatt.saat
L	Litre
m^2	Metrekare
mbar	Milibar
MW	Megawatt
nm	Nanometre
sa	Saat
V	Volt (gerilim)
W	Watt
Θ	Kırınım açısı
Λ	X-ışını dalga boyu

Kısaltmalar

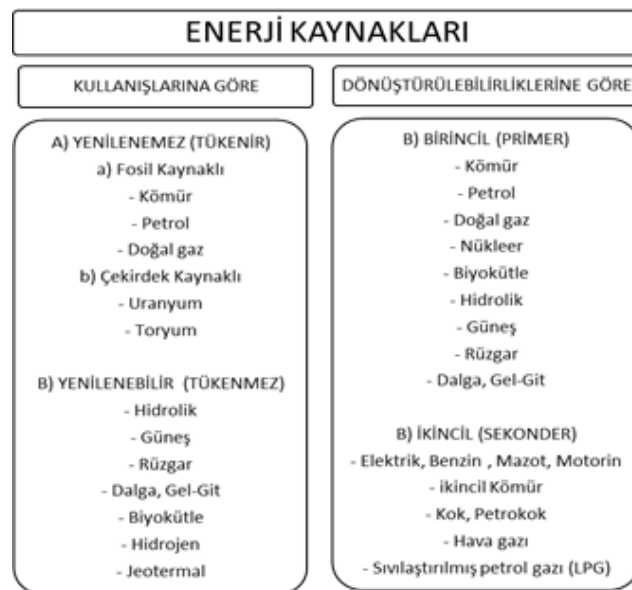
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
DSSC	Boya ile duyarlaştırılmış piller
EDV	Enerji dönüşüm verimi
FET	Alan etkili transistör
FV	Fotovoltaik
h k l	xrd miller indisleri
ITO	İndiyum kalay oksit
LED	Işık yayan diyot
LPG	Sıvılaştırılmış petrol gazı
OFET	Organik alan etkili transistör
OGP	Organik güneş pili
OLED	Organik ışık yayan diyot
OPV	Organik fotovoltaik
ppm	milyonda bir birim
PVD	Fiziksel buhar biriktirme
PVT	Fiziksel buhar taşınımı
r.p.m.	Dakikadaki devir sayısı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
UV-Vis	Ultraviyole görünür ışık
XRD	X-ışınları difraktometresi

1. GİRİŞ

İnsanoğlu varoluşundan itibaren, ihtiyaçlarını gidermek için doğadan faydalanarak elde ettiği enerjiyi kullanmıştır. Kimi zaman güneş ışıklarının ısısından, kimi zaman da bir nehrin kuvvetli akışından ihtiyaçlarını karşılayıcı yönde faydalanmıştır. Ancak toplulukların büyüyerek gelişmesi sonucu, ihtiyaç duyulan enerji miktarının artması kaçınılmaz olmuştur. Özellikle 1800’lü yıllardaki bilimsel buluşlar teknolojinin hızla gelişmesini sağlamıştır. Teknolojinin yaygın kullanılmaya başlanması sebebiyle de, ihtiyaç duyulan enerji miktarının artışı hızlanmıştır. Ülkemizde ve dünyada ihtiyaç duyulan enerjinin büyük bir bölümü, fosil yakıtlar olarak adlandırılan yer altı kaynaklarından ve nükleer enerjiden sağlanmaktadır.

Doğal olarak bu kaynaklar sınırsız değildir. Ayrıca bu kaynakların yoğun bir şekilde kullanılması sonucu, yeryüzünün ve atmosferin doğal dengesini bozan zehirli ve kirlletici atıklar oluşmaktadır. Bu sebeple araştırmacılar, sınırsız ve temiz enerji kaynakları üzerine araştırmalar yaparak yeni kaynaklar arayışına girmişlerdir(Akman ve ark., 2013).

Kullanışlarına göre enerji kaynakları yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları olarak ikiye ayrılırken; dönüştürülebilir olmalarına göre birincil ve ikincil enerji kaynakları (Şekil 1.1) olarak incelenmektedir.



Şekil 1.1. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması.

Dünya’da ve Türkiye’de fosil kaynaklı enerjiler en çok kullanılan ve en fazla enerji üretilen kaynaklardır. Ancak fosil kaynakların kullanımı doğayı tahrip etmekte ve pek çok çevresel felakete yol açmaktadır. Bu nedenle, dünya üzerinde enerji tüketiminde önde gelen bazı ülkeler petrol, doğalgaz vb. fosil yakıt tüketimini azaltmak ve yenilenebilir enerji kaynaklarını daha verimli kullanmak adına çalışmalara başlamıştır. Bu yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgâr, biyokütle) arasında güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren fotovoltaik piller önemli yer tutmaktadır.

1.1. Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Durumu

Günümüzde yaygın olarak kullanılan fosil yakıtlara alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynakları önem kazanmaya başlamıştır. Kaynakların tükenebilme ihtimali, devletlerin kendi enerjilerini üretebilme imkânı, çevresel faktörler, daha uygun maliyetler yenilenebilir enerji kaynaklarının ön plana çıkmasına imkân sağlamış ve bu alanda yapılan çalışmalar hız kazanmıştır.

Yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları; hidrolik enerji, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisidir. Türkiye, çeşitlilik ve yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli açısından zengin bir ülkedir. Ülkemiz, birçok ülkede bulunmayan dünya jeotermal potansiyelinin %8'ine, coğrafi konumu nedeniyle önemli bir güneş enerjisi potansiyeline, konum özellikleri ve kuvvetli rüzgâr potansiyeli nedeniyle hidrolik enerji potansiyeline sahiptir (Peumans ve ark., 2003).

Türkiye konumu itibarıyla yüksek güneş potansiyeline sahiptir. Ülke genelinde yıllık ortalama güneş enerjisi 1315 kWh/m^2 'dir. Buna göre Türkiye' nin tüm yüzeyine gelen enerji miktarı 1012-1025 kWh olmaktadır. Bu miktar Türkiye' nin 1996 yılında ürettiği toplam elektrik enerjisinin yaklaşık 11000 katına denk gelmektedir.

Fotovoltaik sistemin işletme kolaylığı, hareketli parçalarının olmaması nedeniyle uzun yıllar sorunsuz çalışması, modüler olması ve talebe bağlı olarak bir kaç yüz W 'tan bir kaç yüz MW 'a kadar büyüklükte kurulabilmesi, çok kısa sürede devreye alınabilmesi, kullanım noktasına yakın tesis edilerek hat kayıplarının azaltılması, uç noktalarda şebekeye bağlanarak elektrik kalitesinin artmasını sağlaması; böylece gerilim düşmeleri nedeniyle oluşan arızaların ortadan kalkmasıyla milli ekonomiye

katkısı, özellikle yaz aylarında pik yükleri karşılama özelliği ve en önemlisi çevresel açıdan son derece temiz bir enerji kaynağı olması fotovoltaik enerjinin başlıca üstünlükleridir (Peumans ve ark., 2003).

1.1.1. Güneş enerjisi

Güneş enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilirliği yenilenebilir enerji kaynakları arasında ön plana çıkmasını sağlamıştır. Böylece fotovoltaik (FV) piller üzerinde çalışmalar artmış, hızlı gelişmeler gözlenmiştir.

Güneş pilleri enerji üretim teknolojilerinde büyük ilerlemeler kaydetmesine rağmen, maliyet düşürme amacıyla malzeme kalınlığı azaltma ve enerji dönüşüm verimliliğini artırma çalışmaları devam etmektedir. Özellikle maliyet, güneş pillerinin ticari olarak üretilmesi konusunda önem arz etmektedir.

Günümüzde yaygın olarak silikon temelli güneş pilleri kullanılmaktadır. Ticari olarak da ön plana çıkmış olan güneş panellerinde kullanılan silikon temelli güneş pillerindeki anorganik malzemelerin maliyetinin yüksek olması nedeniyle kullanım oranında istenilen ivmeyi gösterememektedir. Bu nedenle, maliyeti azaltabilmek ve verimliliği arttırabilmek adına organik malzemelerin kullanımına yönelik çalışmalar başlamıştır. Böylece işletme ve bakım maliyetleri az olan fotovoltaik sistemlerin maliyetlerinin de düşürülmesiyle daha yaygın kullanımına imkân sağlanması hedeflenmektedir.

1.2. Güneş Pillerinin Sınıflandırılması

Güneş pillerinde kullanım alanlarına, kullanılan malzemeye, üretim yöntemine göre farklı sınıflandırmalar yapılabilir. Geçmişten günümüze teknolojik gelişmeler göz önüne alınarak sınıflandırma yapıldığında aşağıdaki şekilde kategorilere ayırmak mümkündür.

- 1) Birinci Nesil Fotovoltaik Piller
 - Monokristal Piller
 - Polikristal Silisyum Piller
- 2) İkinci Nesil İnce Film Fotovoltaik Piller
 - Amorf Silisyum Piller

- Kadmiyum Tellür Piller
- Bakır İndiyum Selenid Piller
- Galyum Arsenik Piller

3) Üçüncü Nesil Fotovoltaik Piller

- Nanokristal Piller
- Organik Piller (OPV)
- Boya İle Duyarlaştırılmış Piller (DSSC)
- Perovskite Piller
- Koloidal Kuantum Nokta Piller
- Çok Eklemlili Piller

1.2.1. Birinci nesil fotovoltaik piller

İlk olarak üretilmeye başlanan fotovoltaik piller bu sınıfta yer almaktadır. Yaklaşık %20' ye yakın verim üretebilen bu sınıftaki fotovoltaik piller yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat üretimi göreceli olarak zor olduğundan silisyum katkıli fotovoltaik pillerin dışında alternatif malzeme ve yöntemler araştırılmaya başlanmıştır.

1.2.2. İkinci nesil fotovoltaik piller

Araştırmalara ince film uygulamalarının dahil olmasıyla ikinci nesil olarak adlandırılan fotovoltaik piller ön plana çıkmaya başlamıştır. İnce film uygulamaları sayesinde maliyetlerin düşürülmesi sağlanırken verimliliklerinin birinci nesil pillerin verimliliğine ulaşamayıp yaklaşık %10' larda olması beklenen etkinin altında kalmıştır. Fakat uygulanan bu teknolojinin silisyum katkıli piller kadar eski olmaması ve çalışmaların devam etmesi hala geliştirilebilir olduğunu göstermektedir. Amorf silisyum, kadmiyum tellür, bakır indiyum selenid bu çalışmalarda kullanılan pillere örnek olarak verilebilir (Boz, 2011).

1.2.3. Üçüncü nesil fotovoltaik piller

Birinci ve ikinci nesil fotovoltaik pillerde kullanılan anorganik malzemelerin pahalı olması, esnek yapıya sahip olmaması, kısıtlı rezervleri araştırmacıları bu dezavantajları minimuma indirebilecek organik malzemelere yönlendirmiştir. Bununla birlikte yüksek molekül ağırlığına sahip, iletken özellik gösterebilen organik moleküller üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır. Günümüzde diğer güneş pillerine oranla düşük

verime sahip olsalar bile organik moleküllerin hafif olması, esnek yapıya sahip olması, toksik maddeler açığa çıkarmıyor oluşu maliyetinin diğerlerine göre daha düşük olması geleceğin güneş pili teknolojilerinde önemli bir yer tutacağını göstermektedir (AKAY ve YILDIRIM).

1.3. Organik Güneş Pilleri

Üçüncü nesil fotovoltaik güneş hücrelerinde kendine yer bulan yeni teknolojik gelişimlere açık organik güneş pilleri, metal iki elektrot arasına organik yarıiletken polimer malzemelerinin yerleştirilmesi ile elde edilmektedir. Kullanılan organik yarıiletken polimerler bu fotovoltaik pillerin avantajlı konuma geçmesinde önemli rol oynamaktadır.

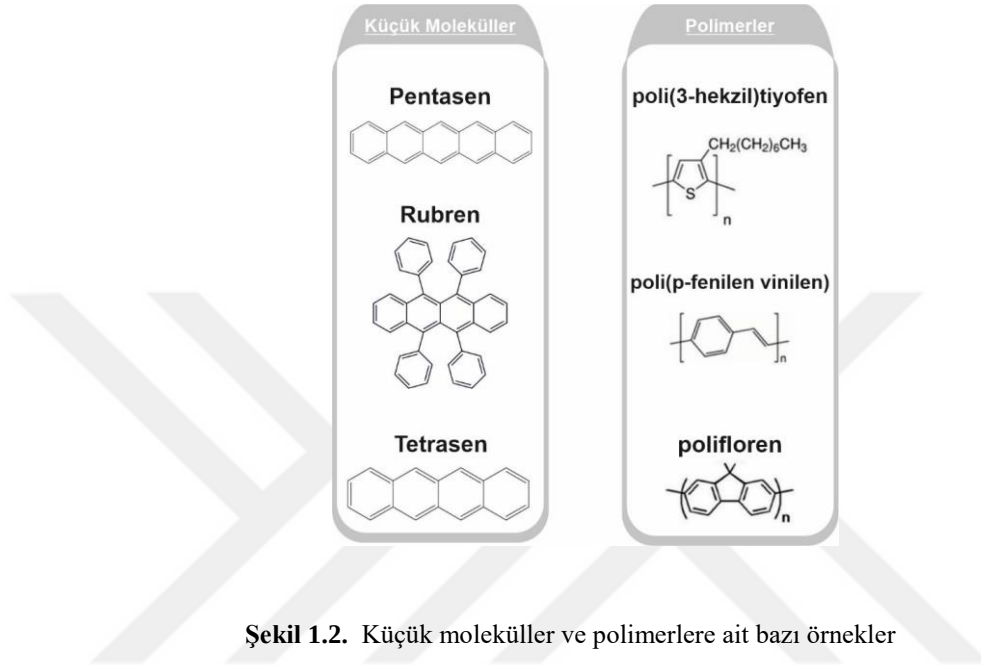
Organik güneş pilleri geniş alanlara kolay uygulanabilir olduğundan gelecek vaat eden bir alandır. Başlıca avantajları arasında kolay hazırlık, düşük işlem sıcaklıkları, düşük maliyetli malzemeler ile işleme teknolojisi ve plastik yüzeyler üzerinde esnek cihazlar üretebilme imkanı bulunmaktadır. Organik güneş pilleri bu nedenle, çok küçük sistemler için düşük maliyetli çözümler dahil olmak üzere birçok uygulama için kullanılabilir. Saatler ve cep hesaplayıcıları, yarı saydam pencereler, rulolarda güç üretimi ve esnek sistemler gibi alanlarda uygulanabilmektedir. Ancak tüm bu avantajlarına rağmen organik güneş pillerinin güç verimliliği silikon güneş pillerine kıyasla düşüktür. Ancak yapılan pek çok çalışma sonucunda her geçen gün verimlilikleri artmaktadır.

Organik güneş pillerinin çoğu, ışığı yüksek düzeyde absorbe edici iki malzeme arasındaki hetero-eklem yapıya dayanır. Bu hetero-eklem yapı, organik yarıiletkenlerde oldukça güçlü bir şekilde bağlı olan eksitonları ayırmak için gereklidir. Organik yarıiletkenlerin çoğundaki küçük difüzyon uzunlukları nedeniyle, bu tür güneş pillerinin aktif bölgesi, hetero-arayüzün her iki tarafında dar bir katmandır. Bununla birlikte, metalik temaslarda kısa devre ve geri yük birleşimini önlemek için aktif bölgenin kalınlığının uygun bir değerde olması gerekmektedir.

Karbon hidrojen ve oksijen atomlarının yer aldığı organik moleküllerin yapılarında yapılabilen değişiklik ile iletkenlik özelliği kazandırılabilmesinin ardından bu alanda çalışmalar artmıştır ve organik yarıiletkenlerin kullanıldığı elektronik cihazlar geleceğin teknolojisi olarak adlandırılmaya başlanmıştır.

1.3.1. Organik yarıiletkenler

Organik yarıiletken terimi kükürt, oksijen ve azot gibi birkaç heteroatom ile çoğunlukla karbon ve hidrojen atomları tarafından oluşturulan ve tipik bir yarıiletken özellikleri gösteren malzemeleri tanımlamaktadır.



Şekil 1.2. Küçük moleküller ve polimerlere ait bazı örnekler

Organik yarıiletkenlerin çeşitli avantajları vardır. Düşük maliyetli sentez, ince film cihazlarının kolay üretimi, vakum buharlaştırma/süblimleştirme ile kaplanabilme, çözelti süreçlerine uygunluk ve baskı teknolojileri ile cihaz üretilebilmesi bunlardan bazılarıdır (Günes ve ark., 2007). Ek olarak, organik yarıiletken ince filmler 10^5 cm^{-1} den büyük yüksek soğurma katsayıları sergileyebilir ve bu da onları optoelektronik uygulamalar için iyi kromoforlar haline getirir. Ayrıca $10 \text{ cm}^2/\text{V.s'}$ ye varan yük taşıma hareketliliği, organik yarıiletkenleri amorf silikonla rekabet edebilir bir hale getirmektedir. Organik güneş pilleri ile ilgili araştırmalar genellikle işlenebilir organik çözeltiler, yarıiletken moleküller/polimerler veya vakum altında biriktirilen küçük moleküler malzemeler üzerinde yoğunlaşmaktadır.

İletken polimer kavramı, yapı içindeki elektronlarla yeterli düzeyde elektriksel iletkenliği sağlayan polimerler için kullanılır. Polimerlerin elektriksel iletkenlik gösterebilmeleri için polimer yapısında elektronların zincir boyunca taşınmasını sağlayan uygun yerlerin bulunması gerekir. Bu koşulu ana zincirinde konjuge çift bağlar

bulunan polimerler sağlar. Bu tip iletken polimerlere konjuge polimerler denilmektedir. Konjuge polimerler birbirlerine ardışık tek ve çift karbon-karbon bağları ile bağlanmış, tekrarlanan gruptan oluşmuş, uzun zincirli yapılardır. Tekli bağ sigma (σ) bağıdır, çift bağın biri sigma (σ) bağı, diğeri ise pi (π) bağıdır. Ana zinciri üzerinde artarda tek ve çift bağ sıraları içeren konjuge polimerler yarıiletkenlik gösterirler (GÜNEŞ ve SARIÇİFTÇİ, 2007). Genel olarak organik yarıiletkenlerin, geniş bant aralıklı yarıiletkenler (1,4 eV'nin üzerindeki bant boşluğuna sahip) ile yalıtkanlara (3 eV'nin üzerindeki bant boşluğuna sahip) kadar ihmal edilebilir derecede düşük yoğunluğa sahip oldukları kabul edilebilir (Günes ve ark., 2007).

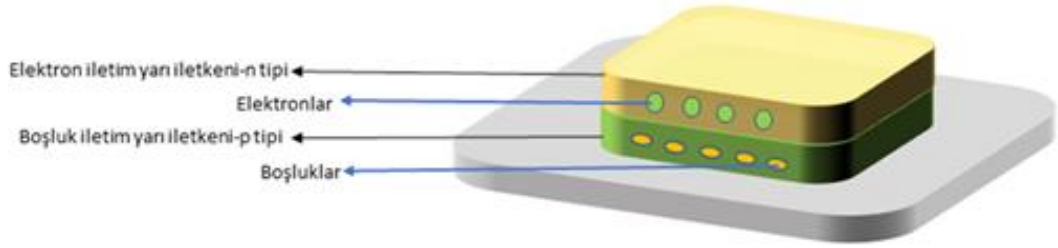
Organik yarıiletkenlerin en büyük avantajlarından biri de dağılma özelliği ile işlenebilir olmalarıdır. Bu yarıiletkenlerin elektriksel özellikleri, organik sentez yöntemleri ve gelişmiş dispersiyon teknikleriyle ayarlanabilir niteliktedir. Ek olarak, organik yarıiletkenlerin elektronik bant boşluğu, ışık yayan diyotların (LED'ler) basit renk değişimi için kimyasal sentez ile tasarlanabilir. Organik yarıiletkenlerin büyük çoğunluğu boşluk iletici olarak görev yaparlar ve optik bant boşlukları 2 eV civarındadır ki bu silisyumdan dikkate değer şekilde büyüktür. Ayrıca bu durum güneş spektrumunun toplanmasını önemli ölçüde sınırlandırır. Bu tür özellikleri nedeniyle organik malzemeler, kısıtlı absorpsiyon spektrumunun dezavantaj olmadığı tandem (çok eklemlili) yapılarda kullanım olanağı sunar (Würfel, 2007).

1.3.2. Yük ayrımı ve temel çalışma prensibi

Güneş enerjisinin soğurulmasıyla ortaya çıkan eksitonlar, yük taşıyıcıların meydana gelmesine olanak sağlamaktadırlar. Foto-akımın oluşabilmesi için eksitonların sorunsuz bir şekilde akması gerekmektedir. Foto-akımın oluşmasına yaşam süresi uzun olan eksitonlar katkıda bulunur. Işığın aktif yüzeyde soğurulmasını arttırabilmek için ikili-tabaka hetero-eklem ve yığın hetero-eklem olarak bilinen iki yeni yöntem geliştirilmiştir. Bu sistemlerde donör ve akseptör iki farklı malzeme ve uygun bir çözücü sayesinde karışım halinde bulunmaktadır. Böylece gerekli olan yük ayrımı en yüksek seviyeye çıkarılmıştır (Akman ve ark., 2013).

Organik yarıiletkenlerde de en sık kullanılan aygıt tipi, biri alıcı (donör, p) diğeri verici (akseptör, n) malzemelerin bir arada kullanıldığı p-n eklem şeklinde oluşturulan aygıtlardır. Organik güneş pilleri iki başlık altında sınıflandırılabilir. Bunların ilki, ikili-

tabaka olarak adlandırılan foto-aktif bileşenin bir diğeri üzerine kaplandığı tiptir. İkincisi ise yığın hetero-eklem adı verilen alıcı ve verici malzemelerin bir foto-aktif tabakada karışım halinde bulunduğu tiptir. Bu iki tür organik güneş pili yalnızca farklı dizilime sahip olmayıp aynı zamanda üretimlerinde kullanılan malzemeler ve üretim süreçleri de birbirinden oldukça farklıdır. Güneş pilinde fotonun soğurulmasının ve yük ayrımının ardından elektronlar alıcı malzemeye (n-tipi), pozitif yükler yani boşluklar verici malzemeye (p-tipi) taşınmaktadır. İkili-tabaka organik güneş pillerinde yük taşıyıcılarının ara yüzeye geri dönmesi veya diğerkatmana geçmesi ve geri yük birleşimi ihtimali oldukça düşüktür. Bu da ikili-tabaka güneş pillerinin en önemli avantajıdır. Şekil 3’ de gösterildiği gibi, ikili tabaka güneş pili diziliminde elektronların negatif terminale, boşlukların pozitif terminale ayrılmasıyla yük ayrımının gerçekleşmesi elektrik enerjisi üretimini sağlamaktadır.



Şekil 1.3. İkili tabaka yâri letken dizilimi

Bir güneş pilinde yüksek enerji dönüşüm verimi sağlanabilmesi için optimize edilmesi gereken bazı koşullar vardır. Işığın absorbe edilmesi, yük iletimi ve yüklerin ayrılması, yüklerin taşınması, yüklerin toplanması bu koşulların başında gelmektedir. Fotonları toplayan foto-aktif katmanın verimli olabilmesi için güneş spektrumuna uygun düzeyde ve kalınlıkta olması gerekmektedir. Böylece üzerine düşen ışığı yeterince absorbe etmesi sağlanabilir. Bunun dışında güneş pilinin verimliliği birçok parametreden etkilenmektedir. Bunlar;

- Kullanılan yarıiletkenlerin uygun bant aralığına sahip olması,
- Enerji üretimi sırasında oluşan enerji kayıplarının önüne geçilmesi,
- Pil uygulamasına bağlı olarak kullanılan yarıiletken tabaka sayısı, polimer ve pilin toplam kalınlığının optimize edilmesi,

- Uygulama sırasında oluşabilecek kirliliklerin engellenmesi ve
- Yansılardan oluşan kayıpların en aza indirilmesidir.

Bu özellikler incelendiğinde organik yarıiletkenlerin kullanıldığı güneş pilleri üzerine yapılan çalışmalar, kullanılacak yarıiletkenlerin bant yapısı, fiziksel ve optik özellikleri enerji dönüşüm verimlerindeki gelişmeleri hızlandırma açısından önemli rol oynayacaktır. Bu nedenle, yapılan çalışma kapsamında kullanılacak organik yarıiletken materyallerin ince film, kristal yapıda kullanılması, karakteristik özelliklerinin incelenmesi, yük iletiminin iyileştirilmesi ve stabilizasyonu üzerinde durulmuştur.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Güneş pillerinde kullanılan malzemelerde gelen ışığın yüksek soğurulma verimliliği ve yüksek saflığı gibi özellikler aranmaktadır. Malzeme etkileşim hacminin artırılması, malzeme boyutunun büyütülebilmesi olasılığı ile doğrudan ilişkilidir. Bununla birlikte istenilen gereksinimleri karşılayan inorganik malzemeler, uygulamalarda gerekli boyutlarda kullanıldığında maliyet artışına yol açmaktadır. Bu nedenle istenilen özellikleri karşılayabilecek daha uygun maliyetli malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle organik malzemeler optoelektronik cihazlarla kendini kanıtlamış uygun potansiyelleri ve uygun maliyetli işleme teknolojileri sayesinde inorganik malzemelere alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Özellikle organik tek kristal yarıiletkenler düzgün simetri ve yüksek saflık dereceleriyle üstün yük taşıma özelliği ve yüksek performans göstermektedirler. Organik tek kristallere olan ilgi son zamanlarda kaliteli kristal büyümesine izin veren uygun çözelti-büyütme süreçlerinin gelişmesiyle daha da artmıştır (Fraboni ve ark., 2016) .

Organik yarıiletkenlerde bugüne kadar tekrarlanabilir en yüksek yük taşıyıcı mobilite, p-tipi tek kristal yarıiletken rubren kullanılan OFET’ lerde elde edilmiştir (Reese ve Bao, 2007). Bunun yanında, moleküller arası etkileşim ve yapısal-elektronik özelliklerin anlaşılması ile geliştirmesinde temel yöntemleri belirleme ve yük taşıma özelliklerinin üzerindeki çalışmalar önem kazanmıştır (Noriega ve ark., 2013). Ayrıca, yüksek düzene sahip organik yarıiletkenlerde moleküller arası paketlenme zayıf moleküller arası etkileşimler nedeniyle dahili/harici kafes gerilimleri ile değiştirilebilir ve sonuç olarak kristal yapıdaki yük transferinin modülasyonuna olanak tanınabilir (Park ve ark., 2017). Günümüzde rubren, pentasen ve antrasen gibi organik yarıiletkenlerin fiziksel özellikleri incelenmekte ve yüksek yük hareketliliğine sahip transistörler için kullanılmaktadır (Gershenson ve ark., 2006).

Şimdiye kadar pek çok organik molekül sentezlenmiş ancak bir kısmı elektriksel yük taşınım süreçleri için katı örnekler içerisinde değerlendirilebilmiş ve daha da azı yine elektriksel süreçler için yeterince büyük bağımsız tek kristaller olarak elde edilebilmiştir. Yapının belirlenebilmesi için tek kristal kalınlığının en az 10-20 mikrometre ölçülerinde olması gerekmektedir. Bu nedenle çok sayıda organik kristal büyütme yöntemi geliştirilmiştir. Yöntemlerin çoğu modifiye edilmiş inorganik kristal büyütme yöntemine dayanmaktadır (Jiang ve Kloc, 2013).

Bilindiği gibi, inorganik malzemelerle karşılaştırıldığında, organik bileşiklerin erime noktaları nispeten daha düşüktür. Örneğin, tiyofen (C_4H_4S) çok düşük erime noktasına ($-38^{\circ}C$) sahiptir. Ancak, 2,2'-bitiyofen ($C_8H_6S_2$) ve 2,2':5'2''-tertiyofen molekülleri oda sıcaklığında katıdır ve erime noktaları sırasıyla 32 ve $93^{\circ}C$ ' tır. Daha büyük oligotiyofenler, örneğin, kuatertiyofen (dört tiyofen halkası), kuinertiyofen (beş tiyofen halkası) heksatiyofen (altı tiyofen halkası) veya en uzun sentezlenen oktatiyofen (sekiz tiyofen halkası) oda sıcaklığında katı haldedir ve pek çok alan etkili transistör denemesinde kullanılmıştır (Melucci ve ark., 2003). Dolayısıyla, yapıdaki moleküllerin doğası ve moleküller arasındaki etkileşimler, hangi materyal için hangi büyüme metodunun tercih edileceğini belirler. Bu nedenle, literatürde sıklıkla karşılaşılan organik yarıiletken tek kristal büyüme yöntemleri detaylıca incelenmelidir.

2.1. Kristal Büyütme

Organik yarıiletken tek kristallerin büyütülmesinde en çok kullanılan yöntemlerden biri buhar taşınımı ile büyümedir. Organik moleküllerin çoğu buhar büyüme yönteminin verimli olarak kullanılabileceği buhar basıncına sahiptir. Pentasen, rubren, antrasen vb. organik malzemeler kapalı cam borularda iğne şeklinde veya geniş hacimli olarak kristallendirilebilmektedir. Literatüre bakıldığında organik yarıiletkenlerin çoğu taşıyıcı gaz akışında buharlaştırma-yoğunlaştırma ile büyütüldüğü görülmüştür.

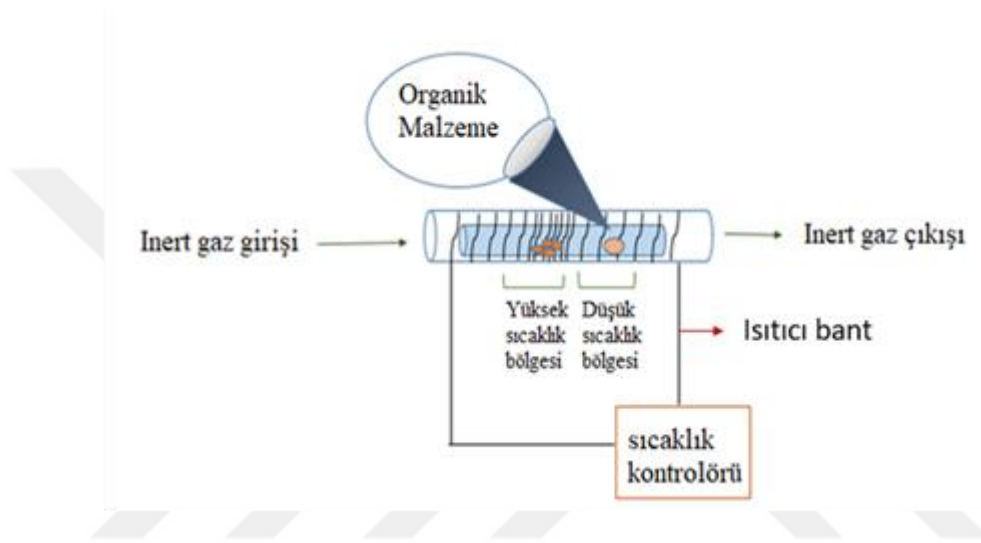
2.1.1. Gaz fazında büyüme

Van der Waals bağlarına sahip malzemelerin ortam sıcaklığında yüksek saflık ve kalitede büyütülebilmesinde öne çıkan yöntem gaz fazı taşınım yöntemidir. Fiziksel buhar iletimi (physical vapour transport, PVT) yöntemi, organik yarıiletkenlerin istenmeyen safsızlıklardan arındırılarak kristallenmesini sağlamak amacıyla geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntemde inert gaz altında veya vakum ortamında gerçekleştirilen 3 alt yöntem uygulanabilmektedir. Bu alt yöntemler şu şekilde açıklanabilir;

- Cam bir boru içerisinde tek kristalin büyütüldüğü ve inert gaz girişi-çıkışı olan açık sistem,
- Her iki uçtan açık cam bir boru içerisinde bulunan kapalı ampulde tek kristallerin büyütüldüğü kapalı sistem,

- Cam bir boru içerisinde bulunan delikli ampulden malzemenin bir kısmının uzaklaştırıldığı yarı kapalı sistem(Jiang ve Kloc, 2013).

PVT yönteminde, inert gaz cam borudan geçerek yüksek sıcaklık noktasında gaz fazına geçmiş olan malzemenin düşük sıcaklık noktasına ilerlemesi ve burada birikerek yoğunlaşmasını sağlar (Şekil 2.2.). Yüksek buhar basıncı safsızlıkları gaz akımı ile taşır ve ağır kirletici maddeler buharlaşma bölgesinde kalarak istenilen yüksek saflığa ulaşılır. Açık PVT yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.1' de verilmektedir.



Şekil 2.1. Açık PVT sistem şematik gösterimi

İnert gazın varlığı açık ya da kapalı sistemde, kristal büyümesi ortamında büyük değişikliklere sebep olur. Horowitz ve ark. bu yöntemle birkaç mbar basınçtaki argon atmosferinde büyütülen α -heksatiyofen moleküllerinin tekli kristal şeklinde büyüdüğünü bildirmişlerdir. Ancak yapılan çalışmada vakumda buharlaştırma sırasında α -heksatiyofenin sıcaklık gradyanından bağımsız olarak bir toz halinde biriktiği rapor edilmiştir. Daha yüksek sıcaklıklarda, vakum buharlaşma çok hızlıdır ve buharlaşan moleküller büyüme noktalarına takılmadan önce yeniden yönlenebilirler, bu nedenle, kristalden ziyade toz şeklinde oluşur (Horowitz ve ark., 1995). Literatürde diğer yöntemlerle kıyaslandığında rubren ve pentasen gibi bazı organik yarıiletkenlerin tek kristallerinin üretilmesinde bu yöntemin daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir (Reese ve Bao, 2007). Bu nedenle çalışma kapsamında öncelikli olarak açık sistem PVT yöntemi tercih edilmiştir. Yapılan başka bir çalışmada yüksek vakum altında termal buharlaşma sırasında serbest etkileşim göstermeyen ve bükülme nedeniyle düzensiz

yapıda film özelliği gösterebilen rubrenin inert gaz altında birkaç cm boyutunda tek kristaller oluşturabildiği görülmüştür (Jiang ve Kloc, 2013).



Şekil 2.2. PVT yöntemi kullanılarak büyütülmüş tek kristal rubren

PVT yöntemi organik yarıiletkenlerin uygun maliyetlerle işleminden geçirilebilme olanağı sağlaması, inorganik bileşiklere alternatif olarak doğrudan geniş boyutlu kristaller oluşturabilmesi ile organik malzemelere olan ilgi daha da artmıştır (Fraboni ve ark., 2016).

2.1.2. Çözelti süreçleri ile büyütme

Pek çok organik molekül basınç ve sıcaklık altında organik çözücülerde çözünmektedir. Böylece kristallerin büyütülebilmesi için çözünürlük kullanılabilir olmaktadır. Organik yarıiletkenin molekül kütlesinin artmasıyla çözünürlüğü, buhar basıncı ve kararlılığı azalır. Bu nedenle, gaz fazı kristal büyütme yöntemleri büyük molekül kütleli yarıiletkenler için uygun değildir, çünkü moleküller erime veya buharlaşmadan önce parçalanma eğilimi gösterirler. Bu gibi durumlarda tercih edilen tek kristal büyütme yöntemi, çözelti süreçleri ile tek kristal büyütme yöntemidir. Örneğin sık kullanılan çözücüler ile çözünmeyen bir malzeme olan heksatiyofenin, cam ampul içinde kapatılmış benzil fenil sülfür içinde iyi çözünbileceği rapor edilmiştir. Soğutma sırasında, heksatiyofen küçük yapraklar halinde çökmüştür. Laudise ve ark. yapmış olduğu bu çalışmada kristal büyütme işlemini optimize etmedikleri için sadece birkaç yüz mikrometre boyutunda tek kristaller elde etmişlerdir. Ancak elde edilen tek kristallerin boyutları mobilite ölçümü ya da transistör üretimi için oldukça yetersizdir (Laudise ve ark., 1997). Çözelti ile büyütme sürecinde çözücü buharlaştırıldığında veya

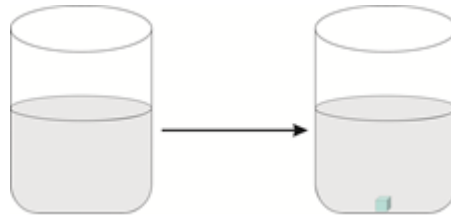
doymuş çözeltinin soğutulması ile malzeme toz veya kristal olarak çökmektedir. Çözelti süreçleri ile tek kristallerin büyütülmesinde malzeme özelliklerine göre aşağıda verilen yöntemler tercih edilebilir.

- Çözücü buharlaştırma yöntemi
- Yavaş soğutma yöntemi
- Buhar difüzyon yöntemi

2.1.2.1. Çözücü buharlaştırma yöntemi

Çözücü buharlaştırma işlemi en kolay ve etkili yöntemlerden biridir. Organik tek kristallerin birçoğunda bu işlem tek kristal büyütme için kullanılabilir. Çözücü olarak kloroform, toluen, klorobenzen gibi kolay bulunabilir organik çözücüler kullanılabilir. Bu yöntemde, beher içinde kristallendirmek istenilen bileşiğin doymuş bir çözeltisi hazırlanarak yavaş yavaş çözücünün buharlaşması ile aşırı doymuş bir çözelti oluşturulur. Aşırı doymuş çözelti zamanla dibe çökerek çekirdek oluşumu ve sonrasında daha büyük kristallerin oluşumunu sağlar (Şekil 2.3). Özellikle tek kristal alan etkili transistörlerin (FET) üretiminde çok kullanılan bir yöntemdir.

Kim ve arkadaşları 2006 yılında yaptıkları bir çalışmada, bu kolay çözelti işleme yolu ile aşırı doymuş poly(3-hekziltiyofen) (P3HT) çözeltisinin yüzey üzerinde biriktirme yapılarak 1 boyutlu yüksek kaliteli mikro-telleri başarılı şekilde ürettiklerini rapor etmişlerdir (Kim ve ark., 2006).



Şekil 2.3. Çözücü buharlaştırma yöntemi

2.1.2.1. Yavaş soğutma yöntemi

Organik çözücüler içinde çözünürlüğü oda sıcaklığında orta olan ancak sıcaklıkla belirgin şekilde çözünürlüğü değişiklik gösteren yarıiletkenler için oldukça uygun bir yöntemdir. Doymuş çözeltinin sıcaklığı yavaş yavaş düşürüldüğünde, organik

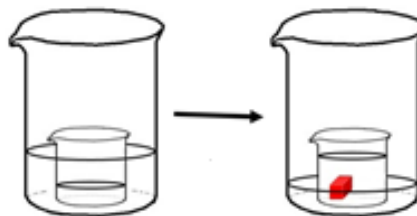
yarıiletken malzeme kendiliğinden çekirdekler oluşturur ve çekirdek tohumları üzerinde ek malzeme birikintilerinin oluşturulmasıyla büyük kristaller elde edilebilir. İşlem, doyma sıcaklığında birkaç kez tekrarlanabilir. Böylece malzemenin sadece küçük bir kısmı sonraki sıcaklık değişim periyodunda çözülür ve kristallenme sağlanır (Jiang ve Kloc, 2013). Bu yöntem ile mm boyutunda tek kristal oluşumlarının gözlemlendiği rapor edilmiştir.



Şekil 2.4. Yavaş soğutma yöntemi

2.1.2.1. Buhar difüzyon yöntemi

Buhar difüzyon yönteminde iki farklı çözücü kullanılır. Organik malzemenin bir çözücünde yüksek oranda çözünebilmesi arzu edilirken, diğer çözücünde düşük oranda çözünmesi istenir. Organik malzeme yüksek çözünürlük elde edilebilecek çözücünde çözündürülerek doymun bir çözeltisi oluşturulur. Küçük bir beherde hazırlanan bu doymun çözelti, daha büyük bir beher içindeki düşük çözünürlük sağlayacak diğer çözücünün içine konularak kapalı bir sistem oluşturulur. Düşük çözünürlük sağlayan çözücü buharlaştıkça doymun çözeltiyi aşırı doymun hale getirerek kristallerin oluşmasını sağlar. Sıcaklık değerlerinin değiştirilmesi ile buharlaşma hızı artırılarak süreç hızlandırılabilir.



Şekil 2.5. Buhar difüzyon yöntemi

2016 yılında yapılan bir çalışmada Shi ve arkadaşları bu yöntemi kullanarak spiro-OMETAD[2,2',7,7'-tetrakis(N,N-di-p-methoxyphenyl-amine)9,9'-spirobifluorene] malzemesinin tek kristal olarak büyütülebilmesini sağlamış ve malzemeyi karakterize etmişlerdir. Böylece yeni nesil güneş hücrelerinde çok kullanılan bu malzemenin taşınım özelliklerinin belirlenebilmesi, eksiklerin öngörülebilmesi ve elektronik özelliklerinin iyileştirilebilmesi adına katkı sağlamıştır (Shi ve ark., 2016). Bu yöntemle büyütülen tek kristaller hassas bir yapıya sahip olduğu için işlem sırasında veya sonrasında herhangi bir kusur oluşmaması adına, soğutma ve ölçüm işlemlerinde oldukça dikkatli olunmalıdır.

2.1.3. Organik tek kristal yarıiletkenlerin elektronik uygulamaları

Yarıiletken mikroelettronik ve katı hal bilimi gelişimine bakıldığında organik veya inorganik malzeme farketmeksizin en yüksek performansı sağlayan cihazların temeli mükemmel simetriye sahip, yüksek kimyasal saflık içeren tek kristal malzemelere dayanmaktadır. Özellikle organik yarıiletkenlerin inorganik malzemelere göre avantajları, bu malzemelerin transistör gibi elektroniklerde kullanımını arttırmaya başlamıştır. Organik yarıiletken tek kristallerin transistör gibi elektronik cihazlarda sıkça kullanılmaya başlanmasına rağmen güneş pili uygulamalarında çok fazla kendine yer bulamamıştır.

Güneş pili uygulamalarında yeni bir araştırma konusu olan organik tek kristallerin avantajlı yönleri gözlemlendikçe gelecek vaad eden ve gelişime açık bir alan olduğu öngörülmektedir. Güneş pili uygulama ve araştırmalarına bakıldığında yeni bir teknoloji olmasına rağmen diğer yöntemler arasında hızlı bir ivme göstermiştir. Özellikle özgün organik moleküllerin keşfi ve yüksek performanslı organik tek kristal içeren cihazların optimizasyonu üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Bazı organik tek kristallerin mobilitesi $10 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ten daha büyüktür. Organik yarıiletkenlerin bahsedilen kolay uygulanabilirlik ve büyütme özelliklerinin yanında uzun ve düzenli yapısı, minimum yapı kusurlarına sahip olması, düzgün tanecik yapısı organik tek kristallere olan ilginin artmasını sağlamıştır.

Bu nedenle, organik yarıiletken tek kristaller, yapısal özellikleri ortaya çıkarmak, yapı-özellik ilişkilerini incelemek, yüksek performanslı cihazlar için önemli faktörleri geliştirmek ve organik yarıiletkenlerdeki temel fiziği ortaya çıkarmak için güçlü bir araçlardır. Literatüre bakıldığında alan etkili transistörler (OFET' ler), ışık

yayan diyotlar (OLED' ler) ve fotovoltaiik pillerde (OPV' ler) denemelerine rastlanılmaktadır.

2.1.3.1. Alan etkili transistör uygulamaları

Organik alan etkili transistörlerin (OFET) üretimi için genellikle yaygın kullanılan yöntemler ince film teknolojisine dayanmaktadır. İnce film teknolojileri cihaz üretiminde büyük kolaylıklar sağlasa da elde edilen ince film yarıiletkenler genellikle transistör performansını olumsuz etkileyen önemli miktarda yapısal kusur barındırır. Küçük organik moleküller için, yapısal kusurların miktarını azaltmak amacıyla kristal filmler tercih edilebilmektedir.

Organik tek kristale dayanan ilk OFET 1996 yılında rapor edilmiştir (Horowitz ve ark., 1996). Aktif yarıiletken olarak kullanılan sititiyofen (a-6T) kristali, PVT tekniği kullanılarak büyütülmüştür. a-6T tek kristalinin mobilitésinin yaklaşık $0,075 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ olduğu belirlenmiştir. 2007 yılında, Takenobu ve arkadaşları tarafından organik yarıiletken tek kristallere dayanan ilk ambipolar OLET' ler rapor edilmiştir. Yapılan bu çalışmada yarıiletken katman olarak tetrasen tek kristalleri kullanılmış ve kaynak elektrotları olarak Ag-Ag simetrik elektrotları ile Mg-Au asimetrik elektrotları tercih edilmiştir. Kapı gerilimi sabit tutulup kaynak gerilimi uygulandığında, ambipolar taşıma ve ışık emisyonu elde edilmiştir. Ek olarak, geri yük birleşiminin ve emisyon bölgesinin konumunun, kaynak geriliminin değiştirilerek iletken kanal boyunca ayarlanabileceği rapor edilmiştir (Takahashi ve ark., 2007). Benzer şekilde, iki elektrot olarak Ag ve Mg:Ag kullanıldığında perilen tek kristallerinden turuncu emisyon yaptığı gözlenmiştir (Yee ve ark., 2006).

Genellikle, yüksek performansa sahip OFET' lerin üretiminde yüksek yük hareketliliği elde etmek için daha ince yassı kristaller tercih edilmektedir. Üst kontak/alt kapı cihaz dizilimi göz önünde bulundurulduğunda organik tek kristalin kalınlığının yük hareketliliği üzerinde etkisinin büyük olduğu bildirilmiştir (Li ve ark., 2019). Kaynak elektrottan gelen yük taşıyıcılar, tek kristalin üst yüzeyine enjekte edilir ve tek kristalin dikey yönünde ilerler; bu nedenle organik tek kristalin erişim direnci dikkate alınmalıdır. Deneysel olarak, organik tek kristallerin yük hareketliliğinin, kristal kalınlığı azaltılarak artırılabilir olduğu gözlemlenmiştir. Çok ince tek kristallerde daha yüksek yük hareketliliği elde edilebilir (Jiang ve ark., 2011).

2.1.3.1. Işık yayan diyot uygulamaları

Organik ışık yayan diyotlar (OLED' ler) şeffaf bir anottan (genellikle ITO) boşluk enjeksiyonu ve bir katottan elektron enjeksiyonu gerçekleştiren iki terminalden oluşur. Boşluklar ve elektronlar organik emisyon tabakasında eksitonlar oluşturmak için birleşir ve daha sonra ışık vermek için ışıma yoluyla bozunma meydana gelir (Helfrich ve Schneider, 1965). Normal olarak, ince film OLED' ler en az iki kat organik yarıiletken içerir. Bir katman boşluk enjeksiyonu ve iletimi için p-tipi ve bir katman da elektron enjeksiyonu ve iletimi için n-tipi yarıiletkendir. Boşluk-elektron enjeksiyon ve iletim dengesi OLED' lerin yüksek verimliliği için oldukça önemlidir. Tek kristaller kullanılarak üretilen ilk OLED 1963' te rapor edilmiş ve 400 V' tan daha fazla gerilim uygulanmıştır (Pope ve ark., 1963). Tek katmanlı cihazlar için, aktif emisyon tabakası etkili emisyon için iki kutuplu özelliklere sahip olmalıdır. Ambipolar iletimin sağlanması için elektron iletimini kolaylaştırmak amacıyla düşük iş fonksiyonlu malzemeler kullanılmaktadır. Örneğin, katot olarak Al veya Li ve anot olarak Au kullanıldığında α,ω -bis-bifenil-4-iltiyofen (BP3T) kristallerinin ambipolar iletim özellikleri gösterdiği belirlenmiştir. Üretilen cihazların mükemmel elektrolüminans gösterdiği rapor edilmiştir (Ichikawa ve ark., 2005). Benzer şekilde, iki elektrot olarak Ag ve Mg:Ag kullanıldığında perilen kristallerinin turuncu emisyon gösterdiği belirlenmiştir (Yee ve ark., 2006). Tek katmanlı yapılara ek olarak, çift katmanlı yapılar da uygulama sırasında büyük kolaylık sağlayan ince film OLED' lerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, p- ve n-tipi yarıiletken tek kristal içeren çift katmanlı yapılar bu OLED konfigürasyonunu araştırmak için idealdirler. Yüksek performanslı OLED' lerin elde edilebilmesi için boşluk ve elektron iletimi dengesinin sağlanması gerekmektedir. Örnek olarak, boşluk iletim ve elektron iletim malzemesi olarak sırasıyla 1,4-bis (4-metilstiril) benzen (CH₃- P3V2) ve 5,5'-bis (4-triflorometil fenil) [2,20] bitiyofen (P2TCF3) kullanılarak çift katmanlı OLED' lerde %0,025' e yakın bir dış elektrolüminesans kuantum verimi elde edilmiştir. Bu çalışmada, ışık emisyonu için p-n eklemesinin önemi, tek katmanlı cihazlara göre 10 kat fazla verim vermesinden anlaşılmaktadır. Ek olarak, cihazın toplam kalınlığı geleneksel ince film cihazlarda çok daha fazla olmasına rağmen 19 V' luk gerilim altında 100 mA cm⁻²' lik bir akım yoğunluğu elde edilmiştir. Bu sonuç, geleneksel ince film cihazına kıyasla çok daha düşük elektrik alanında tek kristaldeki yüksek yük hareketliliği sayesinde elde edilmiştir.

Özetle, ışık emisyonunu arttırmak için gereken yüksek mobilitayı sağlamada aktif tabaka olarak tek kristal içeren çift katmanlı cihazların üretimi gerekmektedir (Nakanotani ve Adachi, 2010).

2.1.3.1. Güneş pili uygulamaları

Organik güneş pillerinde ışığı elektriğe dönüştürmek için organik yarıiletkenlerin fotoelektrik etkisi kullanılır. Bu işlem birkaç basamakta gerçekleşir.

- Eksiton üretimi için ışığın organik yarıiletken tarafından absorpsiyonu,
- Eksitonların organik yarıiletkenlerde serbest yük taşıyıcılarına difüzyonu ve ayrışması,
- Serbest yük taşıyıcıların iletimi,
- Ve son olarak yük taşıyıcıların elektrotlar tarafından toplanmasıdır.

Yüksek absorpsiyon sağlayabilme, difüzyon ve etkin ayrışma, elektron-boşluk çiftlerinin geri yük birleşiminin azaltılması ve iletim hızı verimli organik güneş pilinin üretimi için çok önemlidir. Şimdiye kadar organik tek kristallere yönelik sadece birkaç çalışma bulunmasına rağmen eksiton ömrünü uzatmak, yük ayrımını kolaylaştırmak, difüzyon uzunluğunu arttırmak gibi tüm bu özellikler için alternatif olarak p-n eklemlerinde tek kristal kullanımı tercih edilebilmektedir. Heteroeklem p-n yapının elde edilebilmesi eksitonların ayrılması için en etkili yöntemlerden biri olmasına karşın bu yöntemle düzgün yapıda büyük bir p-n yapının elde edilmesi zordur. Bu durum yüksek geri yük birleşimiyle sonuçlanabilmektedir.

Yarıiletken çalışmaları incelendiğinde bu olumsuzlukların giderilmesinde tek kristal yarıiletkenlerin önemli bir rol oynayabileceği söylenmektedir. Diğer bir yöntem ise p-n çekirdek-kabuk yapılarına sahip eş-eksenli yapılar gibi ayrılmış p-n katmanları olan yapılar üretmektir. Bu yöntemde, geri yük birleşiminin azaltılması ve enerji dönüşüm verimliliğinin arttırılmasında çok düzenli kristallerin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu yöntemin en büyük dezavantajı düşük cihaz performansına sebep olan pek çok küçük p-n ara yüzeylerinin var olmasıdır. Diğer bir dezavantaj ise ikili katman kristal yapının üretiminin zorluğudur (Briseno ve ark., 2010).

Yapılan bir çalışmada, rubren tek kristali ve Al veya LiF/Al elektrodu arasındaki Schottky eklemine benzer şekilde fotovoltaiik etki elde etmek için denemeler

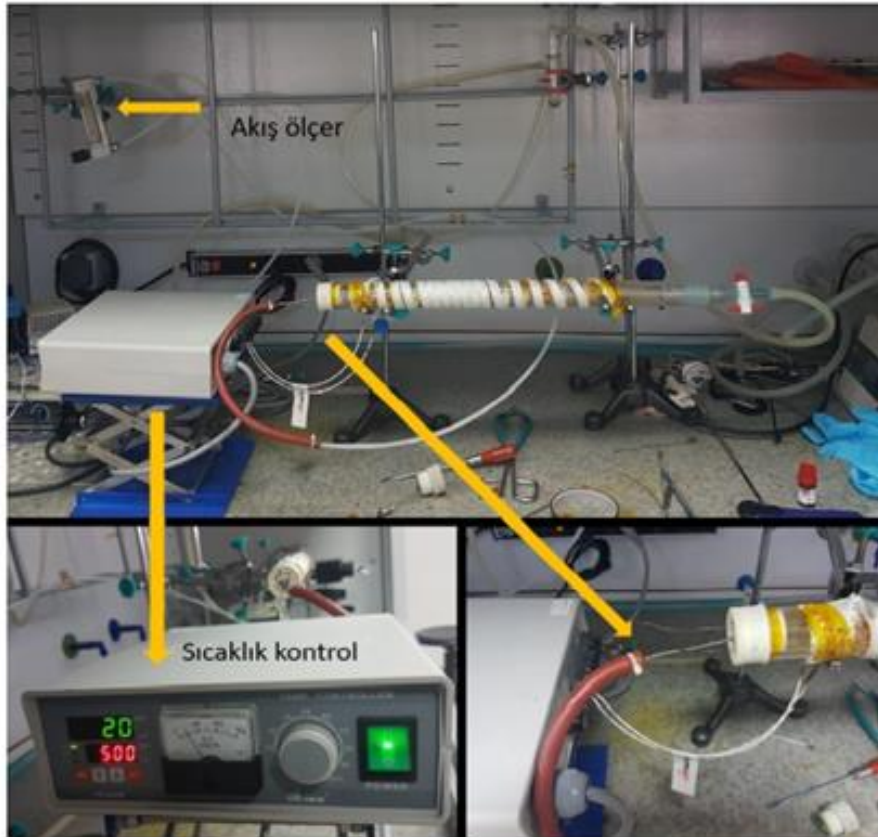
gerçekleştirilmiştir (Karak ve ark., 2014). Bu çalışmada LiF' ün varlığının Al elektrodun çalışma fonksiyonunu azaltarak akımı arttırdığı belirlenmiştir. Son yıllarda denemesi yapılan diğer bir organik güneş pilli üretim tekniği ise bir n- veya p-tipi yarıiletken tek kristali ile diğer tipte bir yarıiletkenin ince filmlerinin kullanılmasıdır. Ancak yapılan çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Bu nedenle bu çalışma kapsamında güneş pili üretiminde bu yöntem tercih edilmiştir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

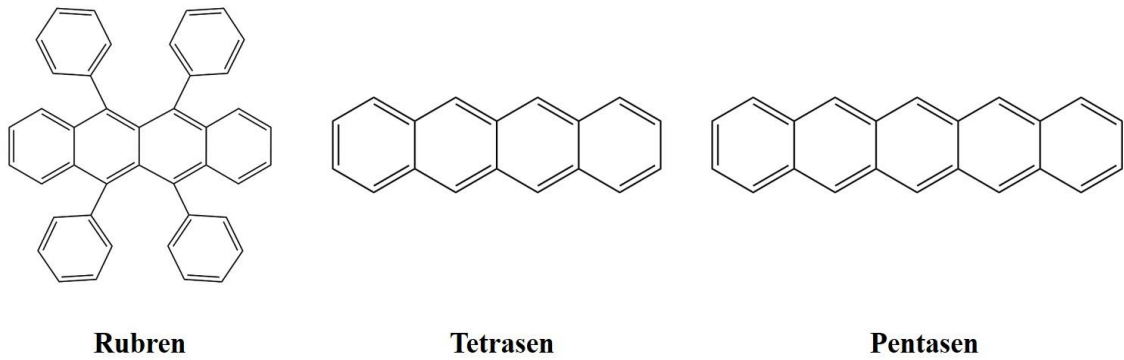
3.1. Kimyasallar ve Güneş Pili Üretimi

Organik yarıiletkenlerin büyütülmesi için açık sistem PVT yöntemi tercih edilmiştir. PVT sisteminde, cam boru içerisine yerleştirilen iki ucu açık bir cam boru içine organik yarıiletken malzeme yerleştirilmiştir. Dıştaki cam borunun etrafına yüksek sıcaklık bölgesini sağlamak için daha sık, soğutma bölgesini sağlamak için daha seyrek olacak şekilde ısıtma kabloları sarılmıştır. Böylece boru içinde yüksek sıcaklık bölgesinde malzemenin buharlaşması ve düşük sıcaklık bölgesinde buharlaşan malzemenin kristallenmesini sağlamak için iki farklı ısıtma-soğutma bölgesi oluşturulmuştur. Boru içinde inert gaz akışı sağlanarak buharlaşan malzemenin soğutma bölgesine ilerlemesi sağlanmıştır. Isıtma kabloları sıcaklık kontrolü sağlanan cihazla malzemenin buharlaşması için uygun sıcaklığa ayarlanarak cam borunun içi istenilen sıcaklığa ayarlanabilmektedir. Bu sistem ile istenilen boyutlarda tek kristal malzeme elde edilebilmektedir.



Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan açık sistem PVT yöntemi

Çalışma kapsamında rubren (Sigma-Aldrich, %99,9), pentasen (Sigma-Aldrich, %99) ve tetrasen (Sigma-Aldrich, %99,9) tek kristallerinin büyütülmesi ve organik güneş pillerinde denenmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu yarıiletkenlerin molekül yapıları Şekil 3.2’ de gösterilmektedir. Literatür çalışmaları incelendiğinde seçilen organik yarıiletkenlerin tek kristallerinin büyütülmesinde PVT yönteminin iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

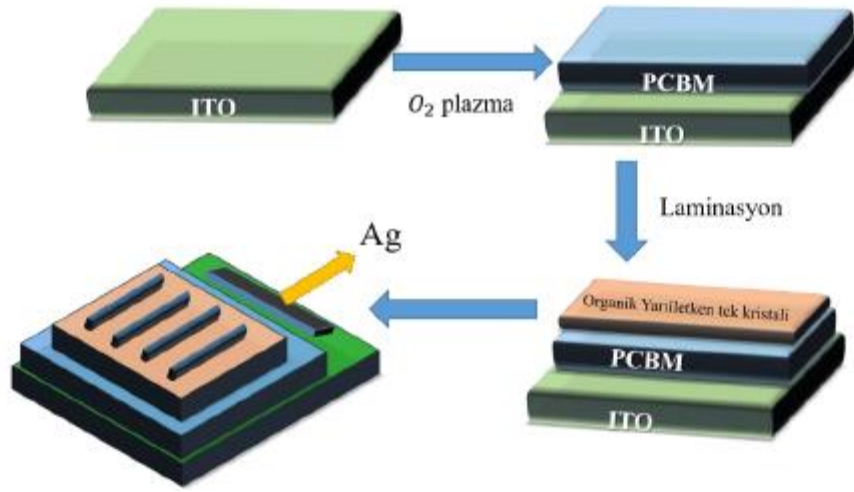


Şekil 3.2. Çalışmada tek kristalleri büyütülen yarıiletkenlerin molekül yapıları

Tek kristali büyütülen yarıiletkenlerin kullanılacağı ikili tabaka güneş pillerin üretimi için indiyum kalay oksit (ITO) kaplı cam yüzeylerin bir kısmı maskelenerek diğer kısmı 15-20 dk kadar kral suyuna maruz bırakılarak aşındırılmış daha sonra birkaç çözücü yardımıyla kalıntıların temizlenmesi sağlanmıştır. Temizlik işleminde ilk olarak elektronik cihazların temizliğinde kullanılan Hellmanex (1:50 oranında seyretilmiş), saf su, aseton, isopropanol ile 15'er dakika ultrasonik banyoda yıkanarak aşındırılmış yüzeyin kalıntılardan arındırılması, morfolojik bozuklukların engellenmesi ve yüzey kirliliğinin giderilmesi sağlanmıştır. Yıkanan cam yüzeyler azot gazı yardımıyla kurutulmuştur. Kurutma işleminin ardından yüzeyler 10 dk boyunca oksijen plazma cihazında bekletilerek yüzeylerin ince film kaplanması için daha aktif olması sağlanmıştır.

İkili tabaka hetero-eklem yapıda güneş pilinde ilk olarak elektron iletim tabakası kaplanmalıdır. Çalışma kapsamında n-tipi yarıiletken olarak [6, 6]-fenil C61 bütirik asit metil ester (PCBM, Lumtec, %99,5) seçilmiş ve temizlenmiş ITO yüzeyler üzerine kaplanmıştır. Çözelti klorobenzen:kloform (1:1 hacimde) çözücü karışımında ağırlıkça

%2' lik derişimde olacak şekilde hazırlanmıştır. PCBM kaplama için, kolay bir yöntem olan spin kaplama yöntemi tercih edilmiştir. Hazırlanan PCBM çözeltisi 2000 r.p.m. de 1 dk kaplanmış ve kaplanan yüzeyler film oluşumunun tamamlanması için 80°C' ta 30 dk boyunca tavlansmıştır. PCBM kaplı yüzeyler üzerine organik yarıiletkenlerin PVT yöntemiyle büyütülen tek kristalleri laminasyon yöntemiyle tutturulmuştur. Kaplama ve laminasyon işlemlerinin şematik gösterimi Şekil 3.3' te verilmiştir. Pil üretiminde son aşama olarak fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemiyle 100 nm kalınlığında gümüş elektrot kaplanmıştır.



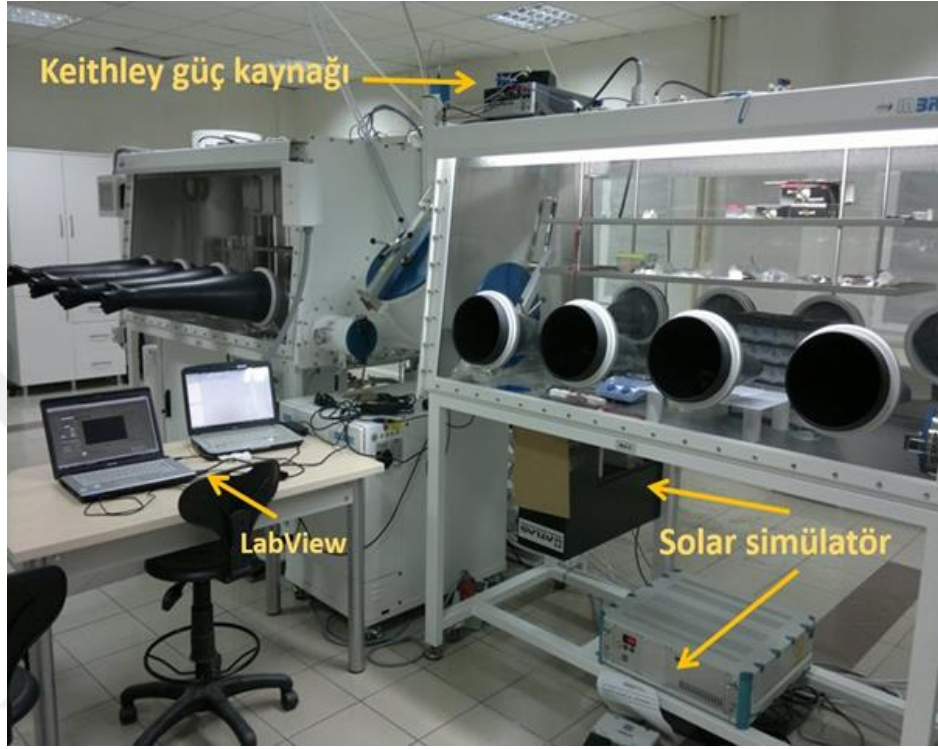
Şekil 3.3. İkili tabaka hetero-eklem yapıları güneş pili kaplama ve laminasyon işlemlerinin şematik gösterimi

3.2. Araçlar ve Teknikler

Güneş pillerinin üretimi için kullanılan PVD sistemi, su ve oksijen seviyesinin 0,1 ppm altında tutulduğu azot atmosferindeki MBraun marka eldivenli kutu (Glove box) sistemine entegredir. Sayıcı elektrotların kaplanması ve güneş pili ölçümleri bu sistem içerisinde yapılmıştır.

Tek kristallerle üretilen güneş pillerinin karşılaştırılması amacıyla kullanılan organik yarıiletkenlerin ince filmlerinin kaplanması ise Vaksis marka ısı buharlaştırma sisteminde gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemleri yapılarak üretimi tamamlanan güneş pillerinin akım yoğunluğu-gerilim (J-V) eğrilerinin ölçümü için AM 1.5 koşullarında ATLAS güneş simülatörü kullanılmıştır. MBraun M200 Glovebox sistemine entegre

simulator sistemi ile üretilen güneş pillerinin J-V değerleri koruyucu kaplama yapılmaksızın, bilgisayar sistemine bağlı Keithley 2400 potansiyostat kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen veriler LabView ile hazırlanarak veri işleme programı ile kaydedilmiştir.



Şekil 3.4. Güneş pillerinin üretiminin ve ölçümünün yapıldığı inert ve kuru atmosfer (Glove Box) sistemi

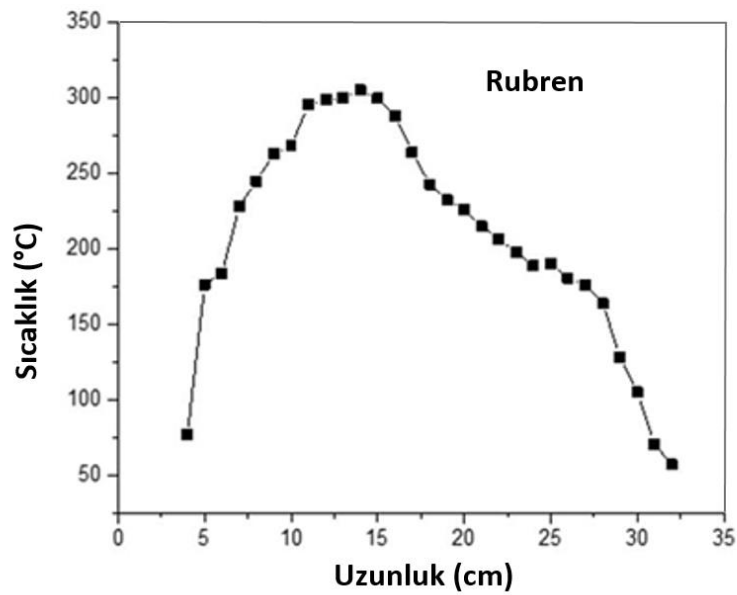
Elde edilen tek kristallerin yapı aydınlatmasında Bruker New Advance D8 marka X ışınları difraktometresi kullanılmıştır. Hazırlanan güneş pillerinin ince film ve tek kristal karakterizasyonları NT-MDT AFM NTEGRA Solaris marka Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile yarı-temaslı metotta ve iScope Euromex optik mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. Optik absorpsiyon çalışmaları ise Shimadzu UVmini-1240 UV-Görünür bölge (UV-Vis) absorpsiyon cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan ince filmlerin ve tek kristallerin kalınlıkları bir temaslı profilometre (NanoMap-500LS 3D Stylus) ile ölçülmüştür.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Rubren Yarıiletkeninin Tek Kristallerinin Büyütülmesi, Karakterizasyonu ve Güneş Pili Uygulamaları

4.1.1. Yapısal ve morfolojik karakterizasyonlar

Organik rubren malzemesi, PVT sistemi kullanılarak tek kristal olarak büyütülmüştür. PVT sisteminde buharlaşma bölgesindeki sıcaklık 300°C' a ayarlanmış ve tek kristal büyütme işlemleri bu sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. PVT sisteminde ısıtma kablolarının sarımı ile sağlanan buharlaşma ve soğuma bölgelerine ait sıcaklık dağılım grafiği Şekil 4.1' de verilmiştir.

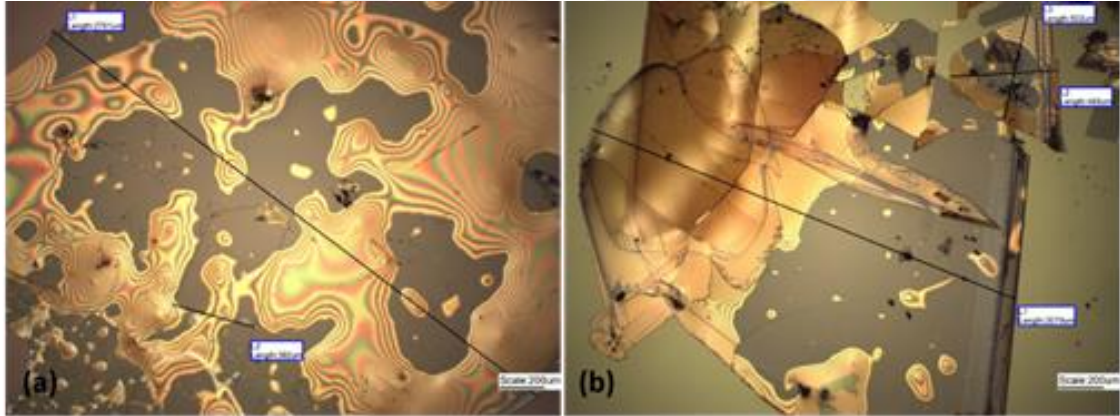


Şekil 4.1. PVT sisteminde rubren için ısıtma kabloları yardımıyla oluşturulan buharlaşma ve soğuma bölgelerinin sıcaklık dağılım grafiği.

Tek kristal büyütme işleminde tek kristaller farklı bölgelerde oluşabilmektedir. Farklı sıcaklık bölgelerinde oluşan kristallerin yapısal, elektriksel ve morfolojik özelliklerinde farklılıklar görülmüştür. Sistemde kullanılan inert gaz akış hızı aynı olsa da tek kristaller oluştukları yere göre farklı kanlıklara sahip olabilmektedirler. Bundan dolayı sıcaklık kontrolünün sağlanması ve kullanılacak olan tek kristallerin aynı yerden alınıyor olması önemlidir. Buharlaştıran organik rubren yarıiletken malzemenin yüksek

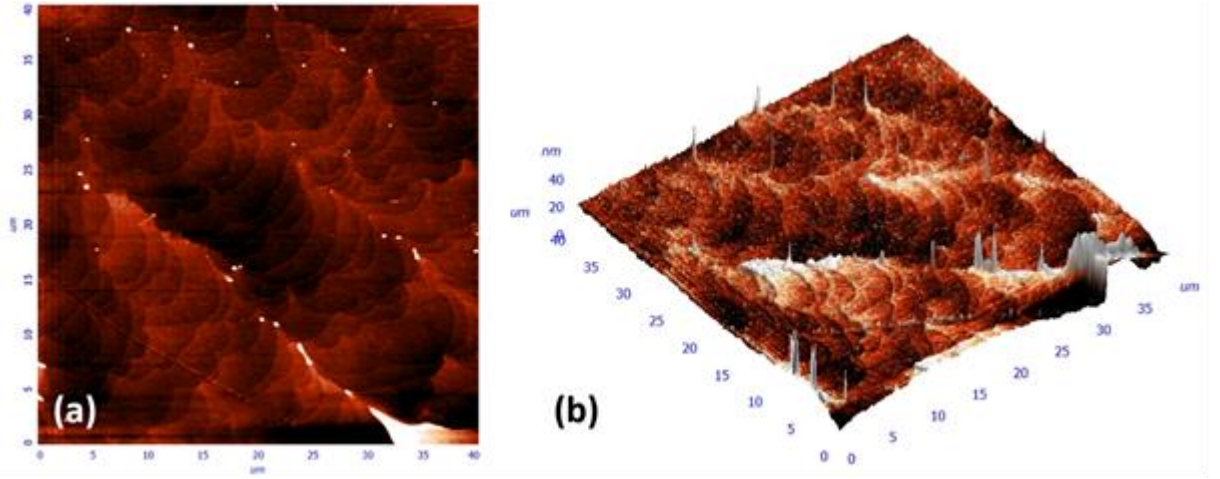
sıcaklık bölgesinden düşük sıcaklık bölgesine taşınmasına yardımcı olan inert argon gazı değişken parametre olarak kullanılmıştır. Tek kristalin uygun kalınlıkta ve istenilen özellikte büyütülebilmesi için inert argon gazı farklı akış hızlarına ayarlanmıştır. Akış hızı değerlerinin ayarlanmasında düşük hacimli cam tüplü şamandıralı debimetre (VF-DH800-A3 marka ve modeli) kullanılmıştır. Kullanılan debimetre ölçüm değerleri 1,6 ile 6,0 L/saat aralığındadır.

Üretilen tek kristaller optik mikroskopta görüntülenerek yapıları incelenmiştir. Optik mikroskop görüntülerinde molekülde altıgen yapıların oluşumu gözlemlenmiştir. Düz ve pürüzsüz yapılu tek kristaller oluşurken, aynı zamanda çizgi benzeri yapıların oluşumu gözlemlenmemiştir. Şekil 4.2' de rubren tek kristalinin optik mikroskop görüntüleri verilmektedir. Büyütülen tek kristallerin boyutları farklılıklar göstermektedir. Güneş pili uygulamalarında genellikle aynı bölgede oluşan, elektrotların kaplanabileceği büyüklük ve ortalama kalınlıkta tek kristaller kullanılmıştır.



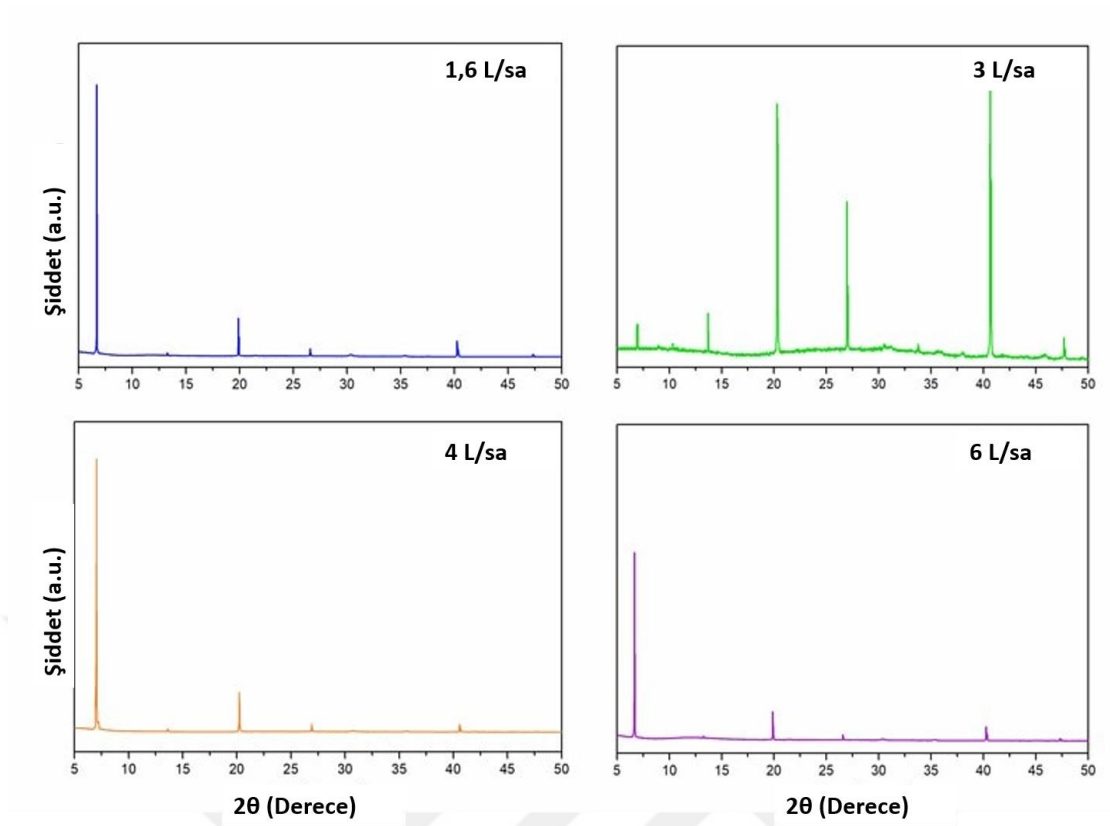
Şekil 4.2. (a) ve (b) rubren yarıiletkeni için üretilen tek kristallerin optik mikroskop görüntüleri.

Şekil 4.3 (a) ve (b) rubren yarıiletkeninin tek kristallerinin AFM görüntülerini ve AFM yazılımıyla elde edilen basamak yüksekliklerini göstermektedir. Rubren tek kristali yüzeyinde 5 nm (en üst) yüksekliklerinde iyi ayrılmış molekül basamaklar görülmektedir. AFM görüntüleri, katman aralığına karşılık gelen basamak yüksekliği ile kristalin iyi yük taşıması için gereken yüksek kaliteyi doğrulayan molekül basamakları ortaya koymaktadır (McGarry ve ark., 2013).



Şekil 4.3. Rubren yarıiletkeninin tek kristallerinin (a) iki-boyutlu (2D) ve (b) üç-boyutlu (3D) AFM görüntüleri

Rubren tek kristallerinin büyütülmesinde katı hal paketlenmesi üzerine inert gaz akış hızının etkisinin belirlenmesi için 1,6 L/sa, 3,0 L/sa, 4,0 L/sa ve 6,0 L/sa olarak 4 farklı argon akış hızında kristal büyütülmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Büyütülen tek kristaller güneş pili çalışmalarında kullanılmadan önce atomik düzenin uygunluğunun doğrulanması için XRD yöntemiyle analiz edilmiştir. Şekil 4.4’ te farklı akış hızlarında büyütülen rubren tek kristallerinin XRD analizleri görülmektedir. Literatüre bakıldığında kristal yapıdaki malzemelerde tabanın genelinde düzlük olması ve keskin, net bir pik görüntüsü beklenir. Şekil 4.4’ e bakıldığında istenen görüntünün bütün akış hızlarında elde edildiği ve dolayısıyla bütün akış hızlarında rubren tek kristalinin başarılı bir şekilde büyütüldüğü söylenebilir (McGarry ve ark., 2013). Rubren tek kristalleri için 3 L/sa gaz akış hızı ile elde edilen tek kristal hariç 6.55° deki en güçlü kırınım piki (1 0 0) kristal düzlemine karşılık gelmektedir. Diğer eşdeğer periyodik pikler ise sırasıyla (2 0 0), (3 0 0), (4 0 0), (5 0 0), (6 0 0) ve (7 0 0) kristal düzlemlerine karşılık gelmektedir (Zeng ve ark., 2007). 3 L/sa gaz akış hızı ile elde edilen rubren tek kristalinin XRD deseninin farklı olması safsızlıkların etkisinden kaynaklanabilmektedir. Grafiklere bakıldığında akış hızındaki değişim ve farklı kalınlıklarda büyütülmüş olması kristal yapısında büyük farklılık oluşturmadığını göstermektedir.



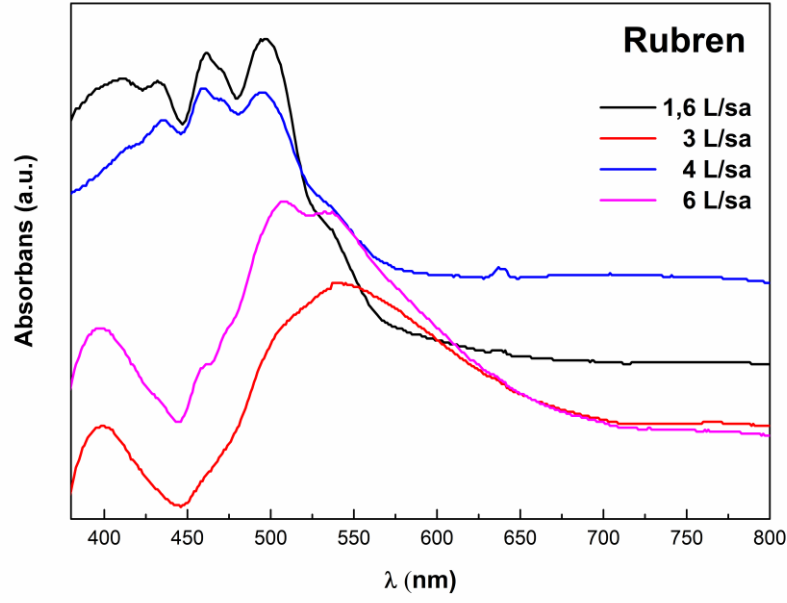
Şekil 4.4. Farklı gaz akış hızlarında büyütülen rubren tek kristallerinin XRD desenleri

Aynı zamanda büyütülen tüm tek kristallerin düzlemler arası mesafeleri (d) hesaplanmış ve bulunan düzlemler arası mesafeler literatürdeki düzlemler arası mesafelerle karşılaştırılmıştır. Rubren tek kristalleri için hesaplanan XRD verileri Çizelge 1’ de verilmiştir. Bu hesaplamalara bakıldığında AFM görüntülerindeki yükseklikleri ile uyumlu olduğu söylenebilir.

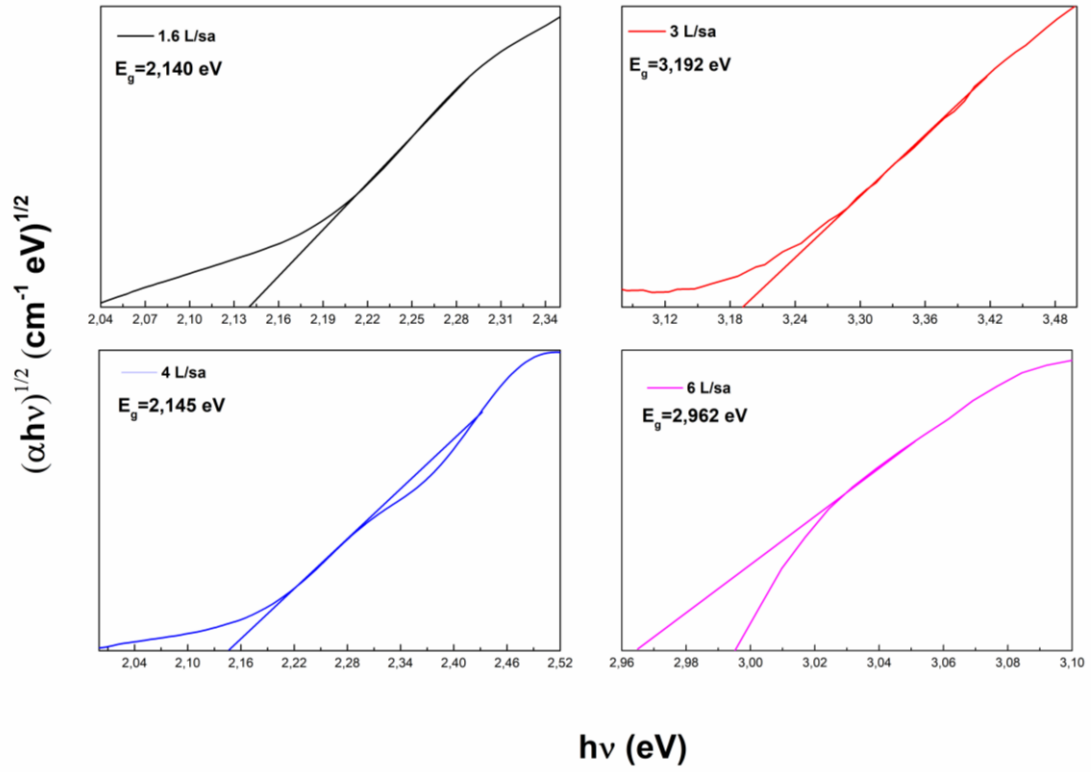
Çizelge 4.1. Rubren tek kristalinin X ışını kırınım deseni verileri

	(h k l)	1 0 0	2 0 0	3 0 0	4 0 0	5 0 0	6 0 0	7 0 0
	$2\Theta_{\text{exp}} (^{\circ})$	6,689	13,269	19,881	26,573	33,354	40,296	47,322
1,6 L/sa	I/I ₀	100,0	0,9	13,4	2,7	0,1	1,8	1,0
	$d_{\text{exp}} (\text{\AA})$	13,203	6,667	4,462	3,352	2,684	2,236	1,919
	$2\Theta_{\text{exp}} (^{\circ})$	6,966	13,695	20,289	26,982	33,755	40,647	47,818
3 L/sa	I/I ₀	15,5	19,3	91,7	57,9	8,8	100,0	10,3
	$d_{\text{exp}} (\text{\AA})$	12,256	13,873	4,769	3,327	2,614	2,205	1,909
	$2\Theta_{\text{exp}} (^{\circ})$	7,044	13,615	20,222	26,907	33,685	40,608	47,631
4 L/sa	I/I ₀	100,0	1,0	14,3	2,9	0,1	0,7	0,2
	$d_{\text{exp}} (\text{\AA})$	12,539	6,498	4,3888	3,311	2,659	2,219	1,908
	$2\Theta_{\text{exp}} (^{\circ})$	6,685	13,264	19,878	26,572	33,344	40,255	47,321
6 L/sa	I/I ₀	100,0	1,2	15,4	3,0	02	7,8	1,4
	$d_{\text{exp}} (\text{\AA})$	13,211	6,669	4,463	3,352	2,685	2,239	1,919

Moleküler düzenlemedeki değişiklikler malzemenin hem absorbandsında hem de dolaylı olarak enerji bant boşluklarında değişikliğe sebep olmaktadır. Bu nedenle öncelikli olarak absorbands değerleri kıyaslanmıştır. Şekil 4.5, 4 farklı gaz akış hızında büyütülen rubren tek kristallerinin UV-Vis bölgedeki absorbands eğrilerini göstermektedir. Grafikde dalga boyu verilerine bakıldığında 500-800 nm dalga boyu aralığında en yüksek absorbsiyon değeri 4 L/sa gaz akış hızında büyütülen rubren tek kristalidir. Fotonun daha fazla sayıda absorplanması ara yüzey yük aktarımını da arttırmaktadır. Yüksek absorbsiyon katsayısı ile daha fazla yük aktarımının enerji dönüşüm verimini arttıracığı söylenebilir.



Şekil 4.5. Rubren tek kristallerinin UV-Vis absorbans eğrileri



Şekil 4.6. Tauc-çizimi ile elde edilen rubren enerji bant boşluğu (E_g) değerleri

Bunun yanında üretilen güneş pilindeki tabakaların enerji bant aralığı uyumu yük aktarımında önemli değerlerden biridir. Çalışma kapsamında elde edilen tek

kristallerin UV-Vis absorbans değerleri ile Tauc-çizimi yardımıyla enerji bant aralığı değerleri belirlenmiştir. Elde edilen eğriler Şekil 4.6' da görülmektedir. Bu değerlere bakıldığında PCBM değerlerine en yakın olan enerji bant aralığı değerinin 3 L/sa akış hızında büyütülen rubren tek kristali olduğu söylenebilir. Yapılan bu ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek enerji dönüşüm verimlerinin 3 L/sa ve 4 L/sa gaz akış hızında büyütülen tek kristaller ile elde edilebileceği söylenebilir.

4.1.2. Elektriksel ve fotovoltaiik karakterizasyonlar

Bir numunenin iletkenlik ve direnç değerleri içsel iletkenliğinin yanı sıra fiziksel şekline ve çevresel etkenlere de bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. İletim kanallarında şekil düzensizliği numunenin ölçümünü zorlaştırırken sistematik hatalar ortaya çıkartabilmektedir. Bu nedenle elde edilen kristallerin ve ince filmlerin direnci birbirinden farklılık gösterecektir. Eğer numunenin direnci, kontakların toplam direnciyle karşılaştırılabilir bir değerdeyse veya daha küçükse, dört nokta temaslı metot kullanılmalıdır. Özellikle tek kristal malzemelerde kristal büyüklüğü yeterliyse dört nokta temaslı ölçüm idealdir (Sun ve ark., 2016).

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemiyle ince film olarak kaplanan ve PVT yöntemiyle tek kristal olarak büyütülen rubren yarıiletkenin profilometre yardımıyla ölçülen kalınlık ve dört nokta temaslı metot ile ölçülen iletkenlik değerleri Çizelge 4.2' de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Rubren ince filminin ve tek kristallerinin ölçülen kalınlık ve dört nokta iletkenlik değerleri

Yöntem		Kalınlık (nm)	İletkenlik ($s\ cm^{-1}$)
PVD (İnce Film)		200	$8,97 \times 10^{-2}$
	Gaz Akış Hızı (L/sa)		
	1,6	390	$1,21 \times 10^{-4}$
PVT (Tek Kristal)	3	200	$2,95 \times 10^{-4}$
	4	800	$2,22 \times 10^{-4}$
	6	855	$2,50 \times 10^{-4}$

Yapılan çalışma kapsamında seçilen organik yarıiletkenlerin yapısal-elektriksel özellikleri ve molekülerarası etkileşimlerinin anlaşılması daha verimli ve yüksek

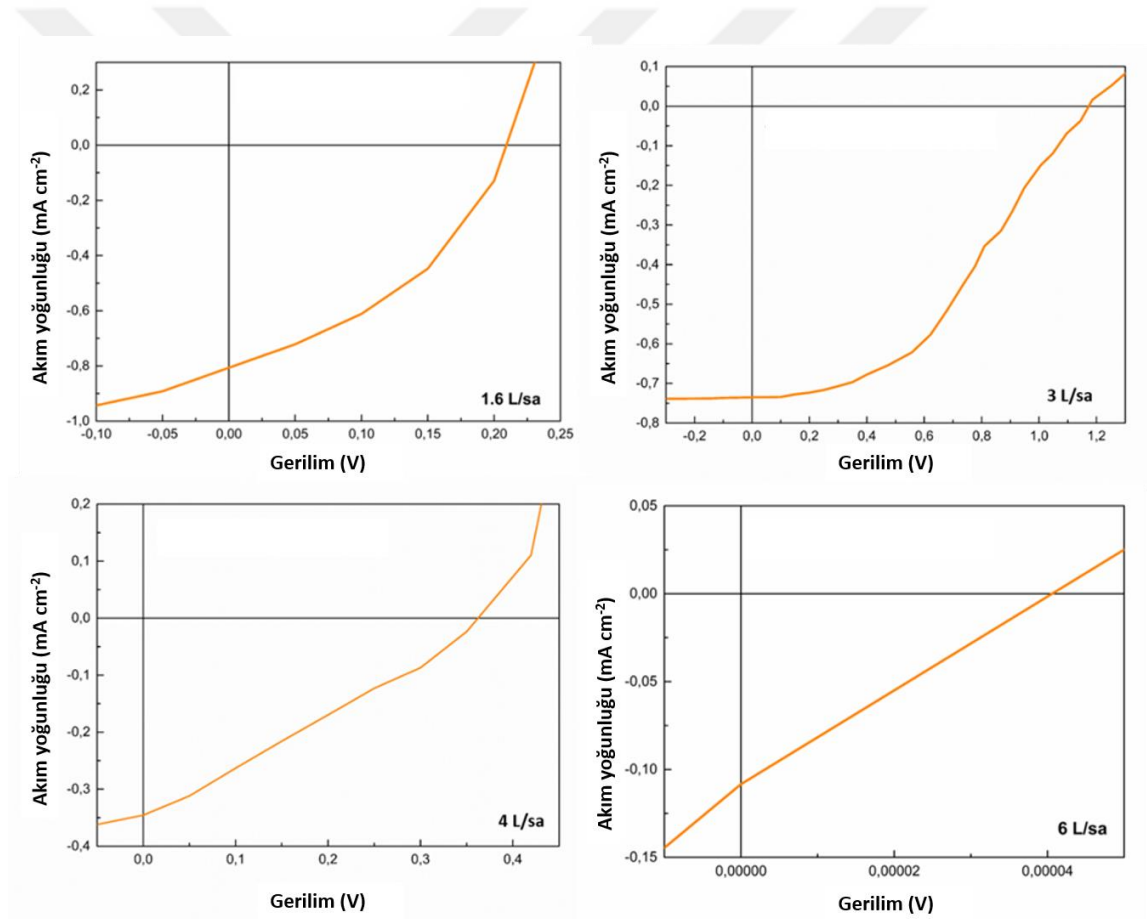
performanslı organik elektroniklerin üretim yöntemlerinin geliştirilmesi açısından önemlidir. PVD yönteminde istenilen boyut ve kalınlıkta ince film oluşumu sağlanabiliyor olsa da yapısal bozukluklar görülebilmekte, bu da organik tek kristallerde elde edilebilen düzgün yapıların sağladığı elektriksel özelliklerin aksine yük taşınım özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Düzenli yapıda yük ayrımının daha başarılı olacağı beklenmektedir. Çalışmalarda esas alınan 4 farklı inert gaz akışında büyütülen tek kristallerin iletkenlik değerleri farklılık göstermektedir. Çizelgeye bakıldığında 3 L/sa akış hızında büyütülmesi en uygun kalınlık ve iletkenlik değerlerini oluşturduğu söylenebilir.

PCBM üzerine 4 farklı gaz akışında büyütülen rubren tek kristalleri lamine edilerek ikili-tabaka güneş pilleri imal edilmiş ve fotovoltatik performansları incelenmiştir. Şekil 4.7' de görülen akım yoğunluğu ve gerilim eğrilerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3' te verilmiştir. PVD yöntemiyle hazırlanan rubren ince filmi ile üretilen kontrol cihazı, kısa devre olduğundan %0,00' lık bir enerji dönüşüm verimi (EDV, η) vermiştir. Yani ince film olarak üretilen güneş pillerinin iletkenlikleri yüksek olmasına rağmen düzensiz yapıları nedeniyle ara yüzeyde gerçekleşen yük ayrımı tek kristallere göre daha kötü olduğu için verim kaydedilememiştir. Kontrol cihazı en yüksek EDV' ni veren rubren tek kristali ile üretilen kalınlığa göre hazırlanmıştır. İnce film kaplama ve kalınlığında değişiklikler yapılarak fotovoltatik karakteristiklerde iyileştirme yapılmaya çalışılsa da herhangi bir kıyaslama yapılması doğru sonuçları vermeyecektir.

Çizelge 4.3. Rubren ince filmi ve tek kristalleri ile üretilen ikili-tabaka güneş pillerinin fotovoltatik özellikleri

Yöntem		V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Kalınlık					
PVD (İnce Film)	200 nm	-	-	-	0,000 (Kısa devre)
Gaz Akış Hızı (L/sa)					
PVT (Tek Kristal)	1,6	0,805	0,21	39,97	0,066
	3	0,733	1,17	36,09	0,309
	4	0,346	0,36	29,21	0,037
	6	0,109	4,08x10 ⁻⁵	26,00	1,16x10 ⁻⁶

Büyütülen rubren tek kristallerinde en uygun kalınlık ve en yüksek iletkenlik değerleri 3 L/sa argon akış hızında görüldüğü için bu koşullarda büyütülen tek kristaller ile üretilen güneş pili, 0,733 V' luk V_{oc} , 1,17 mA cm^{-2} 'lik J_{sc} ve %36,1'lik FF ile %0,31' lik en yüksek EDV' ye ulaşmıştır. 1,6, 4 ve 6 L/sa akış hızlarında büyütülen tek kristallere bakıldığında iletkenliklerindeki düşüş nedeniyle J_{sc} değerlerinde de düşüş gösterdiği söylenebilir. Özellikle yüksek film kalınlığına sebep olan 4 ve 6 L/sa' lik gaz akışında büyütülen rubren tek kristalleri ile üretilen güneş pillerinde FF değerlerinin ciddi bir düşüş gösterdiği görülmektedir. Bu durum, film kalınlığının artışıyla yük ayrımı ve transferinin zorlaştığını, aynı zamanda filmler arasındaki temas problemlerini de arttığını göstermektedir.

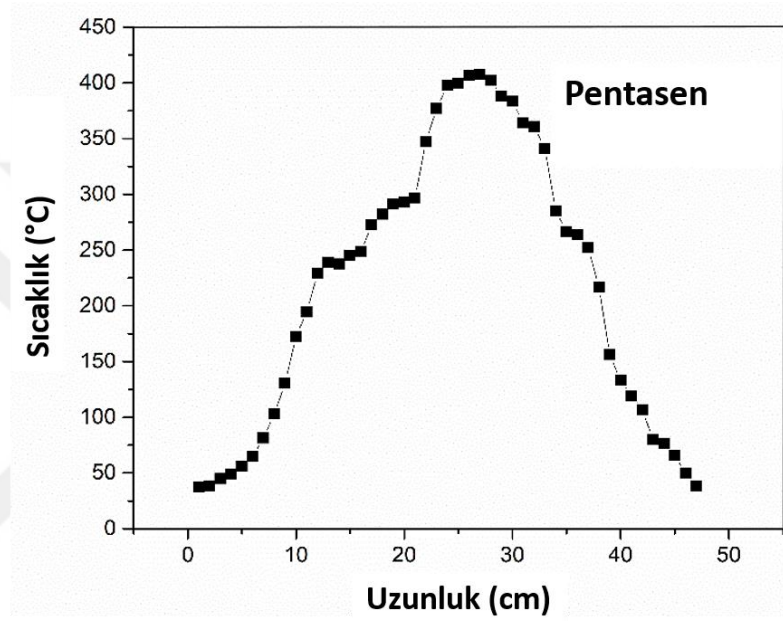


Şekil 4.7. Aydınlık koşullar altında, farklı gaz akış hızlarıyla büyütülen rubren tek kristalleriyle üretilen ITO/PCBM/Rubren/Ag güneş pillerinin J-V eğrileri

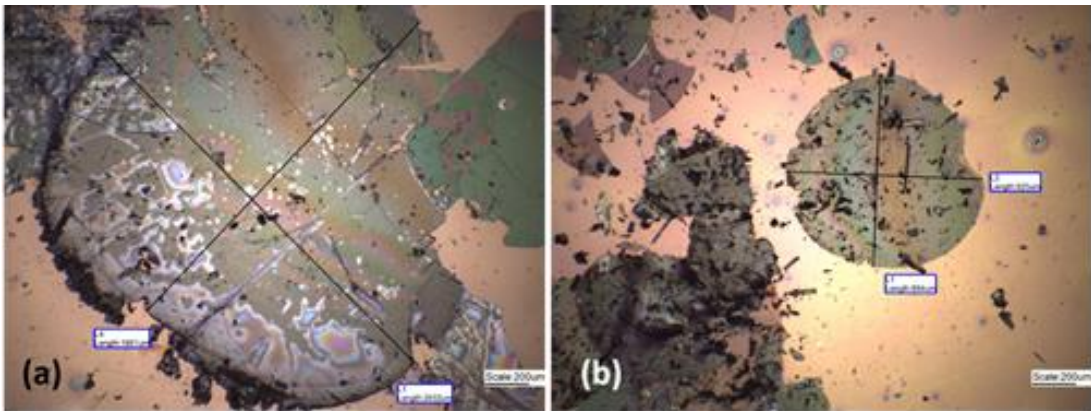
4.2. Pentasen Yarıiletkeninin Tek Kristallerinin Büyütülmesi, Karakterizasyonu ve Güneş Pili Uygulamaları

4.2.1. Yapısal ve morfolojik karakterizasyonlar

Pentasen PVT sisteminde tek kristal olarak büyütülme çalışmalarında yüksek sıcaklık bölgesi ve düşük sıcaklık bölgesi oluşturulabilmesi için ısıtıcı tellerle sağlanan sıcaklık değerlerinin dağılım grafiği şekil 4.8' de verilmiştir.



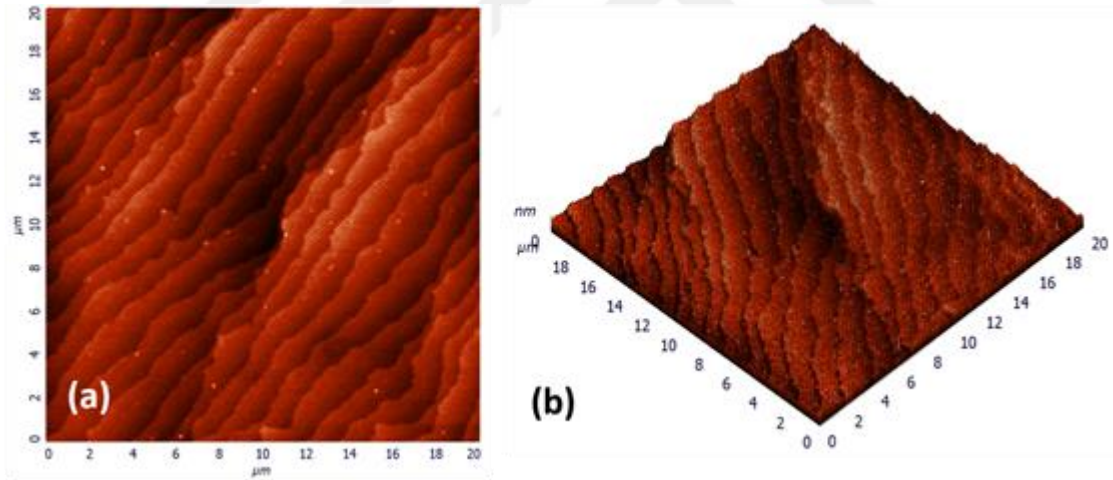
Şekil 4.8. PVT sisteminde pentasen için ısıtma kabloları yardımıyla oluşturulan buharlaşma ve soğuma bölgelerinin sıcaklık dağılım grafiği



Şekil 4.9. (a) ve (b) Pentasen yarıiletkeni için üretilen tek kristallerin optik mikroskop görüntüleri

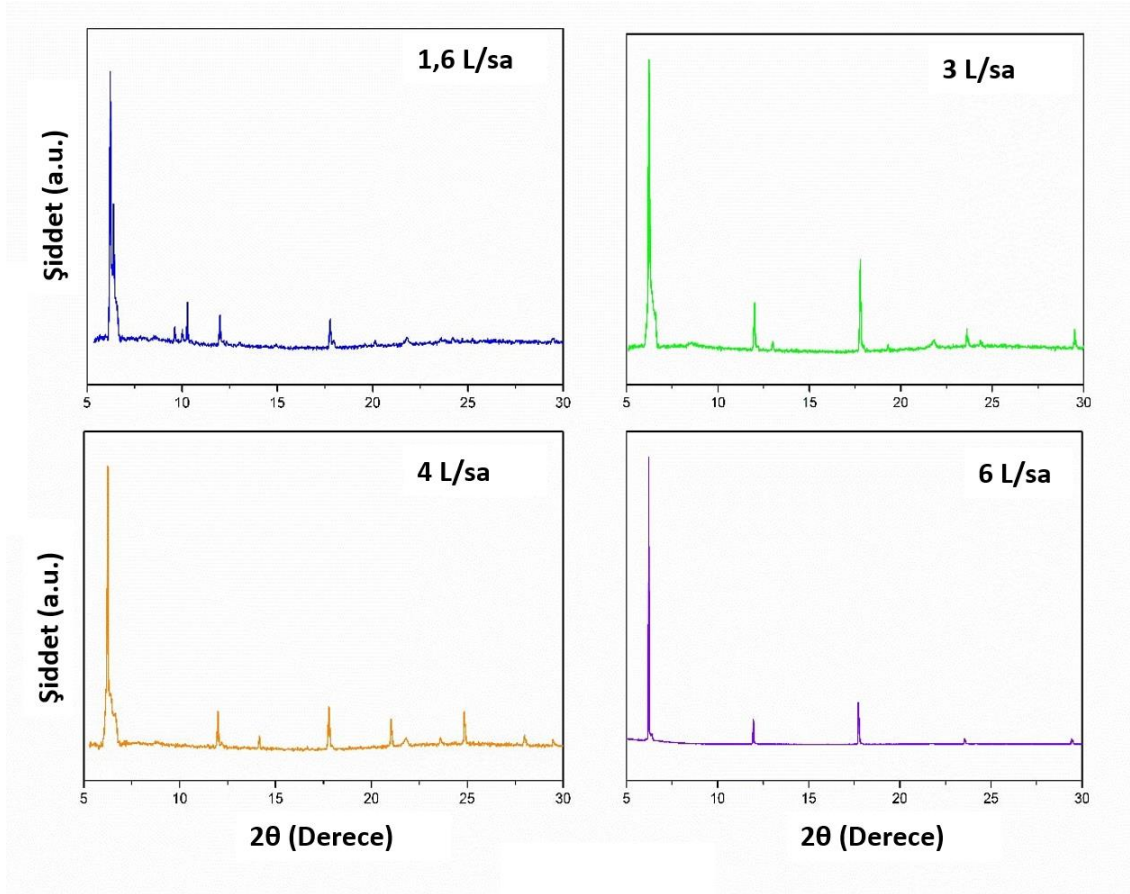
PVT sisteminde büyütülen pentasen tek kristallerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.9’ da verilmiştir. Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde pentasen tek kristallerinin rubren tek kristallerine kıyasla daha küçük boyutlu, kırılmaya elverişli ve daha hassas bir yapıda olduğu söylenebilir. Çevresinde gözüken çapaklı yapı ve küçük boyutlu olmasının nedeni soğuma bölgesinde geniş bir alanda dağınık ve birbirinden bağımsız çok sayıda küçük kristallerin büyümesidir.

Şekil 4.10 (a) ve (b) pentasen yarıiletkeninin tek kristallerinin AFM görüntülerini ve basamak yüksekliklerini göstermektedir. Rubren tek kristalleri ile kıyaslandığında basamak yüksekliklerinin daha sık ve birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu da kristal büyümesi sırasında daha kolay kırılmalara sebep olabileceğini göstermektedir. Şekil 4.10 incelendiğinde pentasen tek kristali yüzeyinde ortalama 1-1,5 nm (en üst) yüksekliklerinde iyi ayrılmış moleküler basamaklar görülmektedir.



Şekil 4.10. Pentasen yarıiletkeninin tek kristallerinin (a) iki-boyutlu (2D) ve (b) üç-boyutlu (3D) AFM görüntüleri.

Kısa moleküler basamaklar iyi yük ayrımı sağlasa da elde edilen tek kristallerin küçük ve kırılkan yapıda olması nedeniyle laminasyonu ve dört noktalı iletkenlik ölçümünü zorlaştırmaktadır. Kristal yüzeyinde kırılmalar olması iletkenlik değerlerinin ölçülememesine neden olmaktadır.



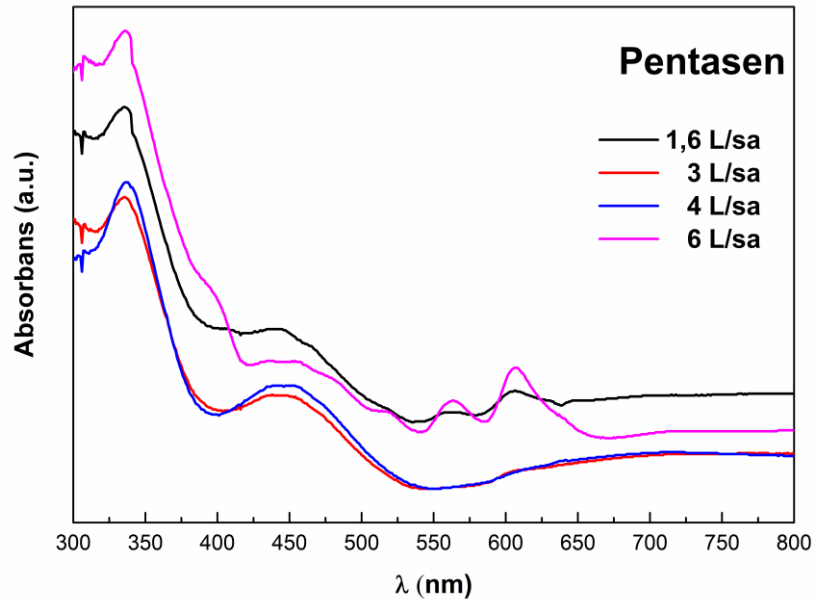
Şekil 4.11. Farklı gaz akış hızlarında büyütülen pentasen tek kristallerinin XRD desenleri

Rubren tek kristalinde olduğu gibi dört farklı akış hızında büyütülen pentasen tek kristallerinin XRD ölçümünden elde edilen grafikler Şekil 4.11’ de verilmektedir. 1,6 L/sa, 3 L/sa, 4 L/sa ve 6 L/sa gaz akış hızlarında büyütülen tüm pentasen tek kristalleri için kafes parametrelerinde 0 0 1 düzleminde birbirine paralel hizalanmalar görülmektedir. Literatürle uyumlu olarak net bir pik görüntüsü ve taban genelindeki düzlük pentasen tek kristallerinin uygun olarak büyütüldüğünü göstermektedir (Ohashi ve ark., 2010). En şiddetli pikler 6° civarında oluşmuştur. Literatürle uyumlu olarak kırınım pikleri çok keskindir, bu da çok kaliteli pentasen tek kristallerinin elde edildiğini göstermektedir.

Çizelge 7’ de verilen pentasen tek kristalinin X-ışını kırınım deseni verilerine bakıldığında d001 kafes düzleminde yaklaşık 14 Å boşluklar olduğu görülmektedir. Elde edilen pikler 0 0 1 düzlemine yansıma olarak endekslenabilen (0 0 1) vektörü ile güçlü bir yönelimsel hizalanmayı göstermektedir.

Çizelge 4.4. Pentasen tek kristalinin X-ışını kırınım deseni verileri

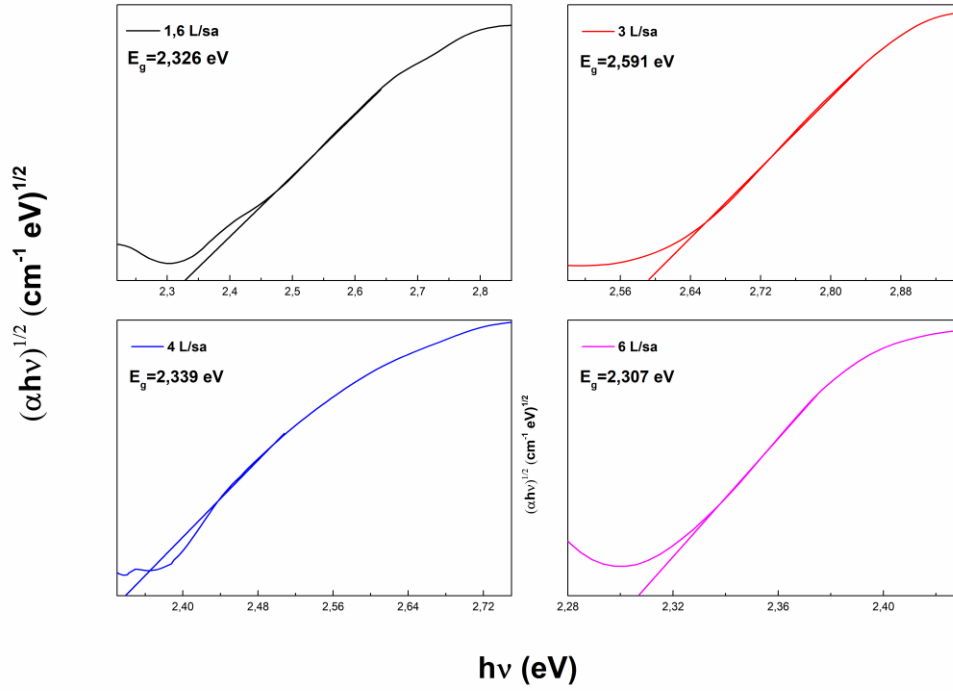
	(h k l)	1 0 0	2 0 0	3 0 0	4 0 0	5 0 0
1,6 L/sa	$2\Theta_{\text{exp}} (^{\circ})$	6,362	11,984	17,760	23,620	29,478
	I/I ₀	100,0	74,2	68,0	9,2	10,1
	$d_{\text{exp}} (\text{\AA})$	13,883	7,379	4,989	3,765	3,028
3 L/sa	$2\Theta_{\text{exp}} (^{\circ})$	6,226	12,006	17,792	23,614	29,491
	I/I ₀	100	18,1	36,4	6,5	7,5
	$d_{\text{exp}} (\text{\AA})$	12,256	13,873	4,769	3,327	3,026
4 L/sa	$2\Theta_{\text{exp}} (^{\circ})$	6,249	11,998	17,780	23,610	29,529
	I/I ₀	100,0	14,8	17,7	3,0	1,3
	$d_{\text{exp}} (\text{\AA})$	14,133	7,371	4,985	3,765	3,023
6 L/sa	$2\Theta_{\text{exp}} (^{\circ})$	6,231	11,794	17,735	23,558	29,431
	I/I ₀	100,0	8,6	13,9	1,5	1,8
	$d_{\text{exp}} (\text{\AA})$	14,173	7,385	4,997	3,773	3,032



Şekil 4.12. Pentasen tek kristallerinin UV-Vis absorbans eğrileri.

Pentasen tek kristallerine ait UV-Vis absorbans eğrileri Şekil 4.12’ de verilmiştir. Eğrilere bakıldığında 300-400 nm aralığında en yüksek absorbans değeri 6 L/sa akış hızından büyütülen tek kristale aittir. 400-800 nm aralığında ise en yüksek

absorbans değerine sahip pentasen tek kristali 1,6 L/sa gaz akış hızında büyütülmüştür. 4 farklı akış hızında büyütülen tek kristallerin absorbans değerleri kendi aralarında değerlendirildiğinde 3 akış hızının paralel bir eğilimde olduğu görülürken 6 L/sa akış hızında büyütülen tek kristalde farklılık görülmektedir. Bu absorbans değerinde görülen farklılığın kalınlıktan kaynaklanabileceği söylenebilir.



Şekil 4.13. Tauc-çizimi ile elde edilen pentasen E_g değerleri

E_g değerlerinin belirlenmesi için absorbans verilerine Tauc-çizimi yapılmış ve sonuçlar Şekil 4.13’ te verilmiştir. E_g değerlerine bakıldığında 3 L/sa akış hızında büyütülen tek kristale ait değer dışındakiler birbirine yakın sonuçlar vermiştir, bu farklılıkların PVT yönteminde oluşabilecek safsızlıklardan kaynaklanmaktadır.

4.2.2. Elektriksel ve Fotovoltaik Karakterizasyonlar

Pentasen yarıiletkeni kullanılarak PVD yöntemiyle hazırlanan ince filmleri ile PVT yöntemiyle büyütülen tek kristallerine ait kalınlık ve iletkenlik değerleri Çizelge 4.5’ te verilmiştir. Rubren tek kristalinde olduğu gibi kıyaslama yapılabilmesi için PVD yöntemi kullanılarak 200 nm kalınlığına sahip olması sağlanan pentasen ince filmi

kaplanmıştır. Rubren yarıiletkenin tek kristal olarak büyütüldüğü gaz akış hızlarında elde edilen pentasen tek kristallerinin sonuçları incelendiğinde 3 L/sa argon gaz akış hızında büyütülen tek kristalin en yüksek iletkenlik değerine sahip olduğu görülmektedir. İletkenlik değerinin yanında yüksek absorpsiyon değeri ile başarılı yük ayrımı ve enerji dönüşüm verimi elde edilebilmesi için iyi ayrılmış moleküler düzenlenme ve bunun yanında maksimum incelik ile laminasyon işlemine dayanıklı olan tek kristal elde edilebilmesi gereklidir. Tek kristallerin oldukça ince olmasından kaynaklı olarak üretilen güneş pillerinde verim elde edilebilmesinin temeli, kırılmayan pentasen tek kristallerine ve çapaksız kristal sınırlarının elde edilmesine dayanmaktadır.

Çizelge 4.5. Pentasen ince filminin ve tek kristallerinin ölçülen kalınlık ve dört nokta iletkenlik değerleri

Yöntem		Kalınlık (nm)	İletkenlik (s cm ⁻¹)
PVD (İnce Film)		200	8,16×10 ⁻¹
	Gaz Akış Hızı (L/sa)		
	1,6	260	2,44×10 ⁻⁴
PVT (Tek Kristal)	3	290	2,50×10 ⁻⁴
	4	560	2,13×10 ⁻⁴
	6	610	1,02×10 ⁻⁴

Çizelge 4.5 incelendiğinde farklı gaz akış hızlarında yapılan denemelerde hem iletkenlik hem de kalınlık olarak en iyi sonuçların 1,6 ve 3 L/sa hızlarında olduğu görülmüştür. Rubren yarıiletkeninde olduğu gibi özellikle tek kristal kalınlığı üzerindeki gaz akış hızının etkisi görülmektedir. Pentasen tek kristalinin küçük ve hassas yapıda olması nedeniyle iletkenlik ölçümü yapılırken tek kristallerin 4 noktalı ölçüm sisteminde bulunan proplara dayanıksız olması, kristallerin kırılmasına ve buna bağlı olarak da ölçümde hataların olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

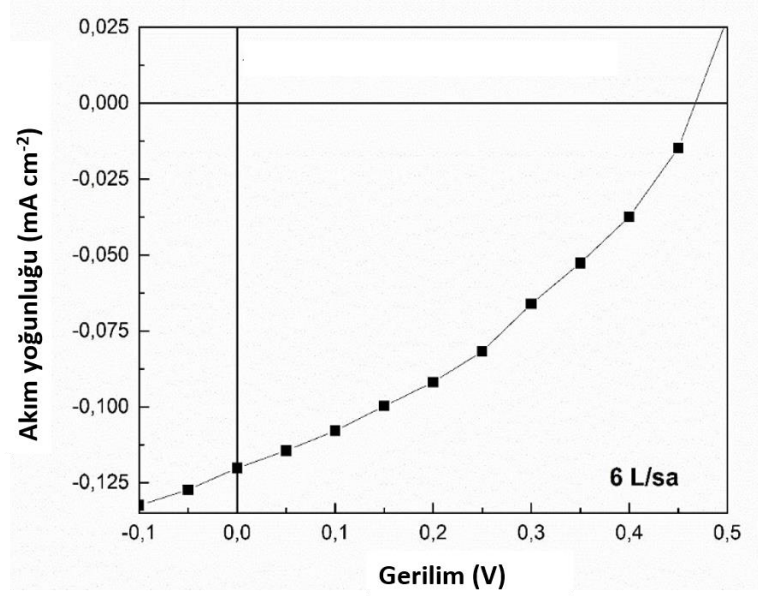
PCBM üzerine lamine edilen pentasen tek kristallerin güneş pili performanslarının incelenmesi amacıyla fotovoltaiik karakteristikleri belirlenmiştir. Şekil 4.14' te elde edilen J-V eğrileri görülmektedir. Eğrilerden elde edilen fotovoltaiik değerler Çizelge 4.6' da verilmiştir. İnce film pentasen ile üretilen ikili tabaka güneş pili %0,00' lık EDV göstermiştir. Referans olarak üretilen ince film güneş pillerinin kısa

devre olmasına sebep tek kristallerle üretilen cihazların çok daha yüksek J_{sc} sağlamasıdır. 2018 yılında yapılan bir çalışmaya bakıldığında 50 nm TPB (N,N,N',N'-tetraphenylbenzidine) tek kristalleri ve PCBM ile üretilen ikili tabaka güneş pillerinin verimi %0,00835 olarak kaydedilmiştir. Buna karşılık olarak TPB ince filmiyle üretilen güneş pillerinin verimi %0,00580 olarak hesaplanmıştır (Sondermann ve ark., 1985; Zhao ve ark., 2018). Tek kristalli cihazların J_{sc} 'sinin ince filmlili cihazlardan çok daha yüksek olduğunu belirtmek gerekir ki bu da tekli kristalli verici-alıcı hetero-eklemlerin çok daha yüksek yoğunluklu bir foto-akım ürettiğini doğrular.

Çizelge 4.6. Pentasen ince filmi ve tek kristallerinden üretilen ikili-tabaka güneş pillerinin fotovoltaiik özellikleri

Yöntem		V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Kalınlık					
PVD (İnce Film)	200 nm	-	-	-	0,000
Gaz Akış Hızı (L/sa)					
PVT (Tek Kristal)	1,6	-	-	-	0,000
	3	-	-	-	0,000
	4	-	-	-	0,000
	6	0,467	0,120	35,07	0,0197

Farklı inert gaz akış hızında büyütülen rubren tek kristalleri ile karşılaştırıldığında pentasen tek kristallerinin oldukça ince tek kristaller olmasından dolayı veriminin ölçülemediği söylenebilir. Bu durum optik mikroskop ölçümlerinde de görüldüğü gibi kırılmalar ve çapaklanmalar ile açıklanabilir. Pentasen tek kristallerinin ince olması laminasyon işlemini zorlaştırmakta, kırılmalar nedeniyle boşluk transferi gerçekleşemediği için foto-akım elde edilememektedir. Ayrıca bu kırılmalar elektrotlarla temas problemi de yaratmaktadır. 6 L/sa argon akışı altında büyütülen en kalın tek kristal ile üretilen ikili-tabaka güneş pili, 0,467 V' luk V_{oc} , 0,120 mA cm⁻²'lik J_{sc} ve %35,07'lik FF ile %0,0197' lik en yüksek EDV' ye ulaşmıştır. Ancak yüksek kalınlığın sebep olduğu düşük FF değeri, pentasen tek kristali ile üretilen güneş pilinin verimliliğinde oldukça sınırlayıcı bir parametredir.



Şekil 4.14. Aydınlık koşullar altında, farklı gaz akış hızlarıyla büyütülen pentasen tek kristalleriyle üretilen ITO/PCBM/Pentasen/Ag güneş pillerinin J-V eğrisi

PVT yöntemiyle farklı akış hızında ısıtma kablolarının oluşturduğu yüksek sıcaklık bölgesi ve düşük sıcaklık bölgesi yardımıyla büyütülen tek kristaller mesafe aralıklarının değişimiyle farklı kalınlık ve şekillerde büyüme sağlayabilir. Yapılan çalışmalarda tek kristallerin ince iğne yapılı olarak büyüdüğü Şekil 4.15' te görülmektedir. Bu yapının güneş pillerinde kullanılan elektrotlar için elverişli olmaması denemelerin başarısız olmasına neden olsa da farklı uygulamalarda kullanılabilirliği olduğu söylenebilir.

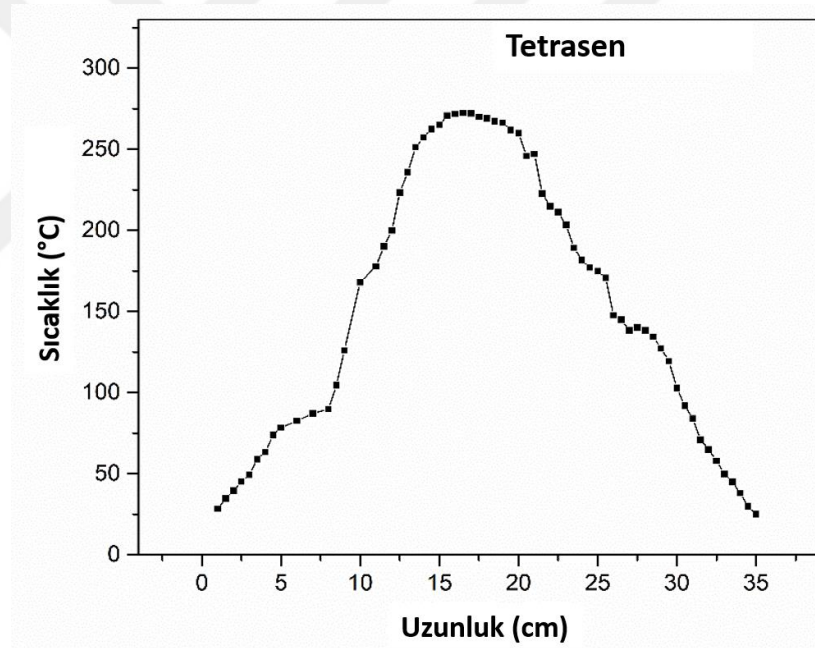


Şekil 4.15. İğne yapılı pentasen tek kristalleri

4.3. Tetrasen Yarıiletkeninin Tek Kristallerinin Büyütülmesi, Karakterizasyonu ve Güneş Pili Uygulamaları

4.3.1. Yapısal ve morfolojik karakterizasyonlar

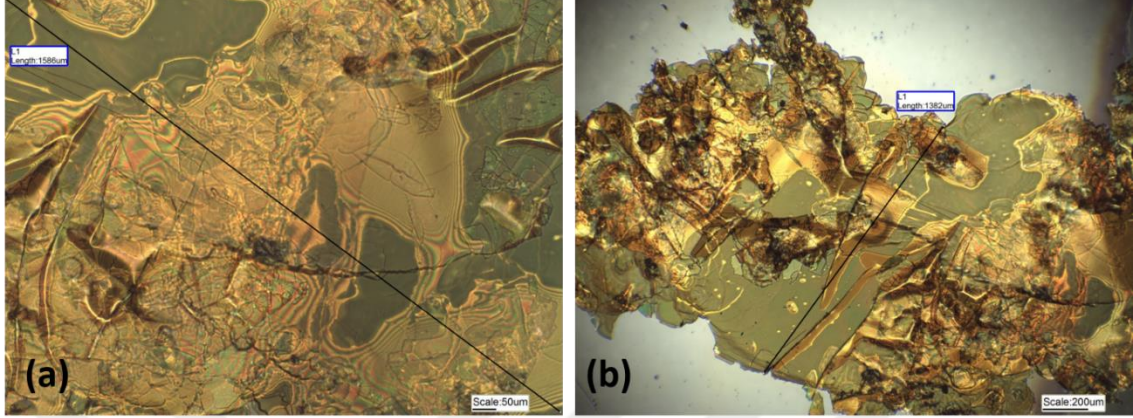
Tetrasen yarıiletkenin PVT sisteminde büyütülebilmesi için ısıtıcı teller yardımıyla oluşturulan sıcaklık dağılım değerleri Şekil 4.16’ da görülmektedir. Tetrasen, rubren ve pentasene kıyasla daha düşük sıcaklıkta buharlaşmaktadır. Bundan dolayı inert gazın yüksek akış hızlarında, PVT sisteminde tek kristalin oluşması beklenen cam boru dışına sürüklenerek istenilen bölgede kristallenme görülememiştir. Bu durum dış katmana sürüklenen yarıiletkende kirlilik ve dağınık oluşum görülmesine neden olmuştur. Bundan dolayı tetrasen tek kristallerinin büyütülmesi için PVT yönteminde 1,6, 2 ve 3 L/sa olarak daha düşük gaz akış hızları kullanılmıştır.



Şekil 4.16. PVT sisteminde tetrasen için ısıtma kabloları yardımıyla oluşturulan buharlaşma ve soğuma bölgelerinin sıcaklık dağılım grafiği

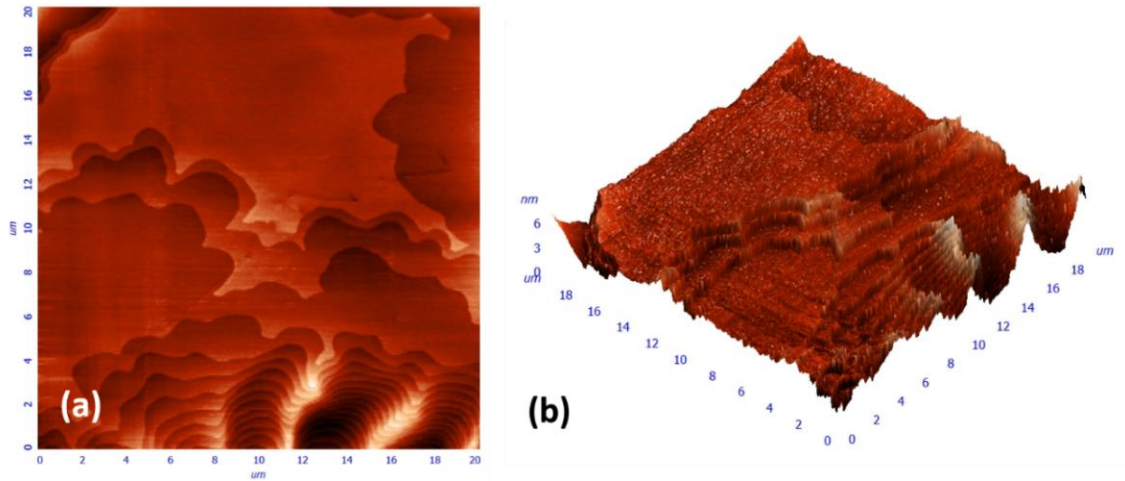
Tetrasen tek kristallerinin optik mikroskop ile alınan görüntüleri Şekil 4.17 (a) ve (b)' de verilmiştir. Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde diğer tek kristallere kıyasla büyütülen tetrasen tek kristallerinin daha kalın olduğu görülmektedir. Düşük sıcaklıkta buharlaşabilmesi ve düşük akış hızında kolay sürüklenmesi nedeniyle PVT sisteminin soğuma bölgesinde çekirdeklenmenin kolay oluşumu ve yüzeyde

yeterince büyümeden yeni kristallerin oluşumu görülmektedir. Özellikle tek kristallerin sınırlarının bu nedenle oldukça çapaklı olduğu açık bir şekilde belirlenebilmektedir.



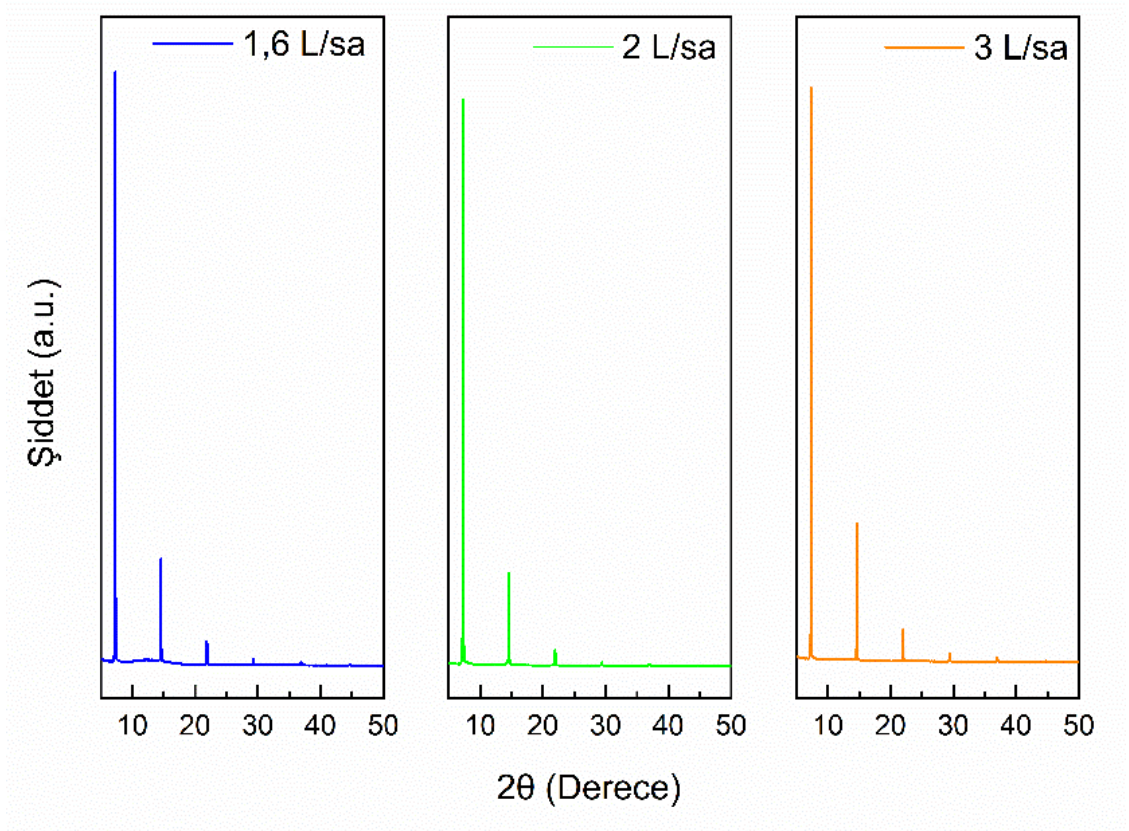
Şekil 4.17. (a) ve (b) Tetrasen yarıiletkeni için üretilen tek kristallerin optik mikroskop görüntüleri.

Şekil 4.18 (a) ve (b)' de tetrasen tek kristallerinin AFM görüntüleri ve basamak yükseklikleri verilmiştir. Adacık ve çukur olmayan geniş basamakların varlığı, tetrasen tek kristallerinin neredeyse hiçbir kusur olmadan büyütüldüğünü göstermektedir. Tüm basamakların yüksekliği 1,0-1,5 nm civarındadır ve monomolekülerdir. Görüldüğü gibi yönelimlerin hemen hemen tümü birbirine paraleldir.



Şekil 4.18. Tetrasen yarıiletkeninin tek kristallerinin (a) iki-boyutlu (2D) ve (b) üç-boyutlu (3D) AFM görüntüleri.

Şekil 4.19’ da PVT yöntemiyle farklı gaz akış hızları altında büyütülen tetrasen kristallerinin XRD ölçüm değerleri verilmiştir. Tüm akış hızlarında elde edilen grafiklerdeki pikler de literatür ile uyumlu triklinik yapıyı göstermektedir. Gaz akış hızlarının değişmesi sonucu tek kristallerin sistem içerisinde büyüdüğü noktalar değişse bile faz geçişlerinin gerçekleşmediği ve yük iletim özelliklerinin benzer olacağı sonucuna varılabilir (Sondermann ve ark., 1985).



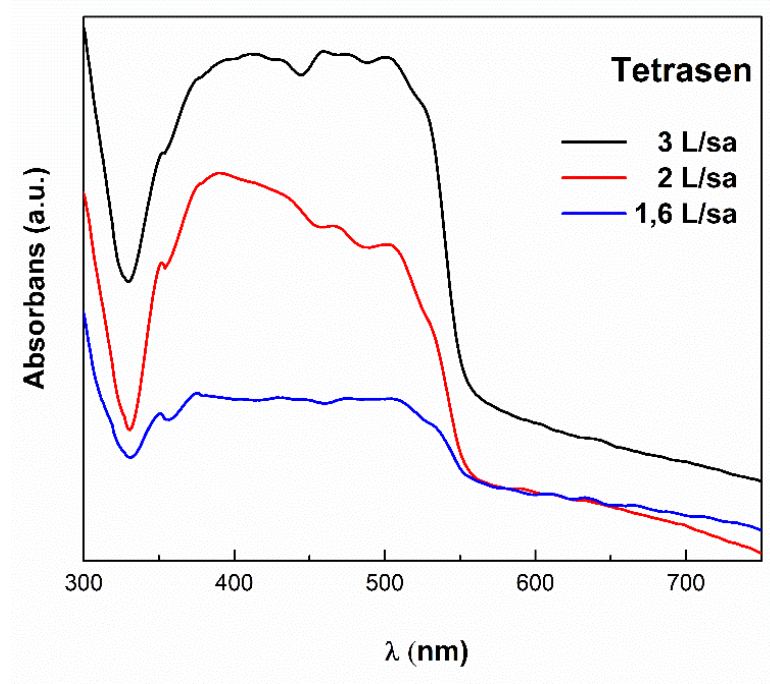
Şekil 4.19. Farklı gaz akış hızlarında büyütülen tetrasen tek kristallerinin XRD desenleri

Çizelge 4.7’ de tetrasen tek kristalinin X-ışını kırınım deseni verileri verilmiştir. Bragg denkleminde göre, büyütülen kristallerinin tek tabaka kalınlıkları 12 Å (7,3°), 6 Å (14,5°), 4 Å (21,9°), 3 Å (29,4°), 2,5 Å (36,9°) ve 2 Å (44,7°) olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar AFM görüntülerinde elde edilen tek kristallerin adım yüksekliğine karşılık gelmektedir. Ayrıca birincil kırınım deseni mesafesi ($I/I_0 = \%100$) 12 Å olarak belirlenmiştir ki bu sonuç literatürle uyumludur (Wang ve ark., 2014).

Çizelge 4.7. Tetrasen tek kristalinin X-ışını kırınım deseni verileri

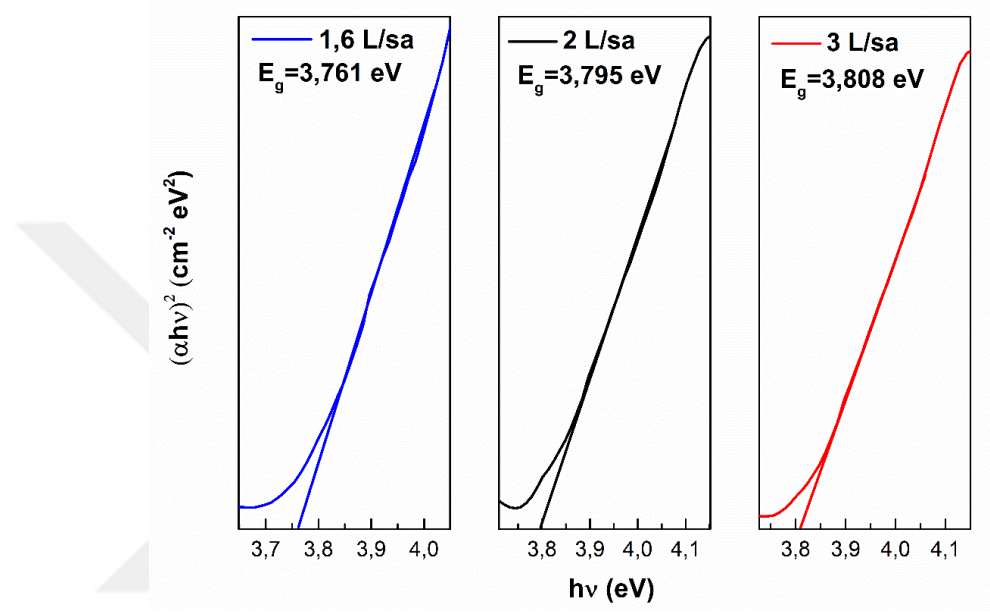
	(hkl)	100	200	300	400	500	600
1,6 L/sa	$2\Theta_{\text{exp}} (^{\circ})$	7,302	14,567	21,893	29,311	36,864	44,560
	I/I ₀	100	17,6	4,0	1,0	0,5	0,1
	$d_{\text{exp}} (\text{\AA})$	12,097	6,076	4,057	3,045	2,436	2,031
2 L/sa	$2\Theta_{\text{exp}} (^{\circ})$	7,310	14,596	21,943	29,938	36,938	44,683
	I/I ₀	100	16,4	2,8	0,6	0,3	0,1
	$d_{\text{exp}} (\text{\AA})$	12,083	6,064	4,047	3,038	2,432	2,026
3 L/sa	$2\Theta_{\text{exp}} (^{\circ})$	7,331	14,616	21,962	29,400	36,963	44,720
	I/I ₀	100,0	24,2	5,6	1,4	0,8	0,2
	$d_{\text{exp}} (\text{\AA})$	12,049	6,056	4,044	3,036	2,429	2,048

Tetrasen tek kristallerinin UV-Vis absorbans eğrileri Şekil 4.20' de verilmiştir. Kalınlık arttıkça absorbans katsayılarında da artış görülmektedir. Tek kristaller birbirleriyle benzer eğilimdedirler ve en yüksek absorbans değerleri 350-550 nm arasında görülmüştür. Görünür bölgenin büyük oranda absorplanması ara yüzeyde yük ayrımının artacağını göstermektedir.



Şekil 4.20. Tetrasen tek kristallerinin UV-Vis absorbans eğrileri

UV-Vis absorbans verilerinden elde edilen E_g değerleri Şekil 4.21’ de verilmiştir. Tauc çiziminden elde edilen optik bant boşluklarına bakıldığında gaz akış hızı ve kalınlık arttıkça E_g değerlerinde de artış görülmektedir. Elde edilen ortalama 3,8 eV bant boşluğu değerleri literatürde ince film tetrasen ile elde edilen bant boşluğu değerlerine yakındır (Buurma ve ark., 2007). Bant boşluğundaki artış düzlemler arası mesafenin azalmasından kaynaklanabilir.



Şekil 4.21. Tauc-çizimi ile elde edilen tetrasen E_g değerleri.

4.3.2. Elektriksel ve fotovoltaik karakterizasyonlar

Tetrasen yarıiletkenin PVD ve PVT yöntemleri kullanılarak hazırlanan ince filmleri ve tek kristallerinin kalınlık ve iletkenlik değerleri Çizelge 4.8’ te verilmiştir. Profilometre kalınlık ölçüm değerlerine bakıldığında diğer yarıiletkenlere kıyasla daha kalın tek kristaller elde edildiğini görülmektedir. Dört nokta iletkenlik değerleri ise 1,6 L/sa akış hızında büyütülen tek kristalin en yüksek iletkenlik değerine sahip olduğunu göstermektedir. Sonuçlar AFM ve optik mikroskop görüntüleri ile uyumludur. Tek kristallerin kalın olmasının uygulama kolaylığı sağlayacağı düşünülse de kalın ve çapaklı olması laminasyon ve elektrot kaplama işlemlerinde düzgün film oluşumunun engellenmesine neden olmaktadır.

Çizelge 4.8. Tetrasen ince filminin ve tek kristallerinin ölçülen kalınlık ve dört nokta iletkenlik değerleri

Yöntem	Kalınlık (nm)	İletkenlik ($s\ cm^{-1}$)
PVD (İnce Film)	200	$1,72 \times 10^{-1}$
Gaz Akış Hızı (L/sa)		
PVT (Tek Kristal)	1,6	$2,22 \times 10^{-2}$
	2	$1,82 \times 10^{-2}$
	3	$1,86 \times 10^{-2}$

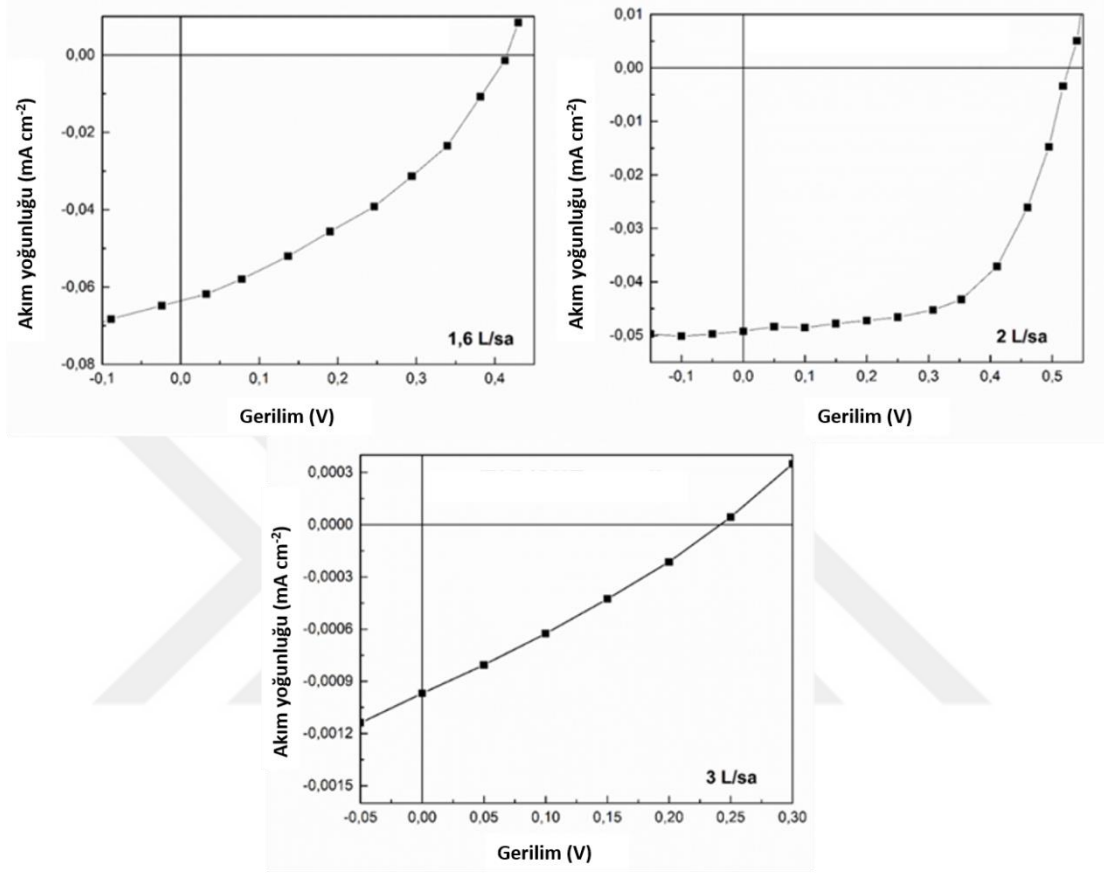
Tetrasen tek kristalleri, rubren ve pentasen tek kristallerine göre daha yüksek kalınlıklarda elde edilmiştir. İnert gaz akış hızı arttıkça kalınlık ve iletkenlik değerlerinde de artış görülmektedir. Yapılan denemelere bakıldığında en uygun kalınlık ve iletkenlik değerleri 1,6 L/sa akış hızına sahip tek kristalde görülmüştür.

Çizelge 4.9. Tetrasen ince filmi ve tek kristallerinden üretilen ikili-tabaka güneş pillerinin fotovoltaiik özellikleri

Yöntem	Kalınlık	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
PVD (İnce Film)	200 nm	-	-	-	0,000 (Kısa devre)
Gaz Akış Hızı (L/sa)					
PVT	1,6	0,416	0,064	47,04	0,0125
(Tek Kristal)	2	0,527	0,049	58,10	0,0151
	3	0,241	0,001	25,05	$6,03 \times 10^{-5}$

Şekil 4.22 ITO/PCBM/Tetrasen/Ag diziliminde güneş pillerinin güneş simülatörü vasıtasıyla elde edilen J-V eğrilerini göstermektedir. Eğrilerden elde edilen fotovoltaiik parametreler ise Çizelge 4.9’ da listelenmiştir. Tek kristal kalınlığının azalması daha yüksek yük ayrımı sağladığı için kristal kalınlığının 1020 nm’ den 705 nm’ ye düşmesi, J_{sc} değerinin artmasını sağlamıştır. Buna bağlı olarak kalınlık azaldıkça EDV artış göstermiştir. Diğer yandan ince tek kristallerin laminasyonu ile yüzeye daha iyi tutunma sağlanabildiği için yüksek elektriksel temas sağlanmış olur. Kristal kalınlığı daha da azaltılabilirse daha yüksek verim elde edilebilir (Tseng ve ark., 2008). Pil üretimi için oldukça yüksek bir değer olan 1000 nm kalınlığa sahip tetrasen tek kristali ile üretilmiş güneş pili hem geri yük birleşiminin artması hem de kristalin

yüzeyde iyi tutunamaması dolayısıyla en düşük V_{oc} değeri 3 L/sa gaz akışında elde edilmiştir. Tetrasen tek kristalleri kullanılarak üretilen güneş pili, 0,527 V' luk V_{oc} , 0,049 mA cm⁻²' lik J_{sc} ve %58,1' lik FF ile %0,0151' lik en yüksek EDV' ye ulaşmıştır.



Şekil 4.22. Aydınlık koşullar altında, farklı gaz akış hızlarıyla büyütülen tetrasen tek kristalleriyle üretilen ITO/PCBM/Tetrasen/Ag güneş pillerinin J-V eğrileri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada literatürde sıklıkla kullanılan organik yarıiletkenlerin tek kristallerinin uygun yöntemlerle büyütülmesi, koşulların optimizasyonu ve büyütülen tek kristallerin ikili-tabaka güneş pillerinde uygulanması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda seçilen her bir organik yarı iletken için karakterizasyon değerlendirmesi ve güneş pili uygulamalarından elde edilen verimler aşağıdaki gibi listelenebilir.

- 1,6 L/sa, 3,0 L/sa, 4,0 L/sa ve 6,0 L/sa argon akışı altında PVT yöntemiyle büyütülen rubren tek kristallerinin iletkenlik ölçümleri yapıldığında en ince (200 nm) ve en yüksek iletkenliği ($2,95 \times 10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$) gösteren tek kristalin 3 L/sa argon gaz akış hızında elde edildiği belirlenmiştir.
- 3 L/sa argon akış hızında büyütülen rubren tek kristalleri kullanılarak üretilen güneş pili, 0,733 V' luk V_{oc} , 1,17 mA cm^{-2} ' lik J_{sc} ve %36,1' lik FF ile %0,31' lik en yüksek EDV' ye ulaşmıştır. Benzer bir dizilimde rapor edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında V_{oc} değerlerinin literatürle uyumlu olduğu görülmektedir. Tek kristal güneş pillerinin verimliliğini etkileyen en büyük parametre p-n eklemindeki temas sorunudur. Elde edilen rubren güneş pillerindeki J_{sc} ve FF düşüklüğü temel olarak laminasyon işleminin getirdiği temas sorunundan kaynaklanmaktadır.
- Pentasen tek kristalleri PVT yöntemi ile en düşük 260 nm kalınlığında elde edilebilmiştir. Güneş pili denemelerinde ise 610 nm kalınlığındaki tek kristaller kullanılan güneş pillerinden sonuç alınabilmektedir. Bu güneş pilinde 0,467 V' luk V_{oc} , 0,120 mA cm^{-2} ' lik J_{sc} ve %35,07' lik FF ile %0,0197' lik en yüksek EDV' ye ulaşılmıştır. Literatür ile kıyaslandığında 610 nm tek kristal kalınlığı ikili-tabaka pentasen güneş pili için oldukça yüksektir. Bu nedenle pentasen tek kristalleri ile üretilen güneş pillerinde verimliliğin yükseltilmesi olasıdır.
- Literatürde polikristal pentasen (40 nm) ile üretilen pentasen/PCBM güneş pilinin verimliliği %0,9 olarak verilmiştir ki bu değer proje kapsamında tek kristal pentasen ile elde edilen değerden oldukça yüksektir (Tabachnyk ve ark., 2013). PVT yönteminden çok daha ince şekilde pentasen kristallerinin büyütülmesini sağlayan termal buharlaşma sistemi ikili-tabaka güneş pillerinin üretiminde göz önünde bulundurabilir.

- Tetrasen yarıiletkeninin PVT yöntemiyle büyütülmesi sırasında rubren ve pentasene kıyasla buharlaşma bölgesinde daha düşük sıcaklıkta buharlaştığı belirlenmiştir. 1,6 L/sa, 2,0 L/sa ve 3,0 L/sa gaz akış hızlarında yapılan denemelere bakılarak hem iletkenlik hem de kalınlık olarak en iyi sonuçların 1,6 L/sa hızlarında olduğu belirlenmiştir. Ancak en yüksek pil verimi (0,527 V' luk V_{oc} , 0,049 mA cm⁻², lik J_{sc} ve %58,1' lik FF ile %0,0151' lik) 2 L/sa argon akışında büyütülen tetrasen tek kristalleri kullanılarak üretilen güneş pilinde elde edilmiştir.
- Tetrasen tek kristalleri ile üretilen güneş pili J-V karakteristiklerine bakıldığında FF ve V_{oc} değerleri literatürle uyumludur. Farklı yarıiletkenler ve tetrasen tek kristali kullanılarak üretilen (ITO/PEDOT: PSS/Tetrasen/PCBM/BCP/Al) güneş pilinin verimi %0,34 olarak kaydedilmiştir.

Sonuç olarak, çalışma kapsamında belirlenen moleküllerin tek kristalleri 2 farklı yöntemle başarılı bir şekilde büyütülmüş ve uygun tek kristaller ile ikili-tabaka güneş pili uygulamaları yapılmıştır. Üretilen güneş pillerinin EDV değerleri çok yüksek olmasa da, bu değerlerin çok küçük bir aydınlatılmış alana (0,023 cm²) ve küçük bir p-n bağlantı ara yüzeyine sahip bir tek kristalden elde edildiği unutulmamalıdır.

Literatürde belirlenen tek kristalin büyütülüp sonrasında laminasyon işlemi yardımıyla ikili-tabaka güneş pillerinin üretilmesi büyük oranda yük hareketliliğini arttırmakta ve safsızlıkların önüne geçmektedir. Organik yarıiletken tek kristalleri kullanılarak üretilen güneş pillerinde p-n tabakaları arasında temas problemi yaşandığı bilinmektedir. Bu nedenle laminasyon işlemi her ne kadar avantajlı olsa da, temas problemini arttıran bir yöntem olduğundan yüzeyde tek kristallerin büyütülmesi daha yüksek EDV' leri elde edilmesini sağlayacaktır. Ayrıca, ikili-tabaka güneş pillerinin özelliklerinin geliştirilebilmesi için daha iyi ara yüzey temasına ek olarak daha yüksek ışık absorpsiyonuna sahip moleküllerin geliştirilmesi gerekmektedir. Perovskite gibi daha yüksek absorpsiyon sağlayan alıcı-verici malzemelerin tek kristallerinin büyütülmesi ve fotovoltaiklerde denenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- AKAY, Ö. G. C. ve Yıldırım, O., Organik Tabanlı Güneş Hücrelerinin Yapısal Ve Fotovoltaik Özelliklerinin Tanımlanması.
- Akman, E., Akın, S., Karanfil, G. ve Sönmezoğlu, S., 2013, Organik güneş pilleri, *Trakya University Journal of Engineering Sciences June*, 14 (1).
- Boz, O. H., 2011, Günümüzün alternatif enerji kaynağı: Fotovoltaik güneş pilleri, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Briseno, A. L., Holcombe, T. W., Boukai, A. I., Garnett, E. C., Shelton, S. W., Fréchet, J. J. ve Yang, P., 2010, Oligo-and polythiophene/ZnO hybrid nanowire solar cells, *Nano letters*, 10 (1), 334-340.
- Buurma, A., Jurchescu, O., Shokaryev, I., Baas, J., Meetsma, A., de Wijs, G., de Groot, R. ve Palstra, T., 2007, Crystal Growth, Structure, and Electronic Band Structure of Tetracene– TCNQ, *The Journal of Physical Chemistry C*, 111 (8), 3486-3489.
- Fraboni, B., Fraleoni-Morgera, A. ve Zaitseva, N., 2016, Ionizing Radiation Detectors Based on Solution-Grown Organic Single Crystals, *Advanced Functional Materials*, 26 (14), 2276-2291.
- Gershenson, M., Podzorov, V. ve Morpurgo, A., 2006, Colloquium: Electronic transport in single-crystal organic transistors, *Reviews of modern physics*, 78 (3), 973.
- Günes, S., Neugebauer, H. ve Sariciftci, N. S., 2007, Conjugated polymer-based organic solar cells, *Chemical reviews*, 107 (4), 1324-1338.
- GÜNEŞ, S. ve SARIÇİFTÇİ, N. S., 2007, An overview of organic solar cells, *Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 25, 1-5.
- Helfrich, W. ve Schneider, W., 1965, Recombination radiation in anthracene crystals, *Physical Review Letters*, 14 (7), 229.
- Horowitz, G., Bachet, B., Yassar, A., Lang, P., Demanze, F., Fave, J.-L. ve Garnier, F., 1995, Growth and characterization of sexithiophene single crystals, *Chemistry of Materials*, 7 (7), 1337-1341.
- Horowitz, G., Garnier, F., Yassar, A., Hajlaoui, R. ve Kouki, F., 1996, Field-effect transistor made with a sexithiophene single crystal, *Advanced Materials*, 8 (1), 52-54.

- Ichikawa, M., Nakamura, K., Inoue, M., Mishima, H., Haritani, T., Hibino, R., Koyama, T. ve Taniguchi, Y., 2005, Photopumped laser oscillation and charge-injected luminescence from organic semiconductor single crystals of a thiophene/phenylene co-oligomer, *Applied physics letters*, 87 (22), 221113.
- Jiang, H., Tan, K. J., Zhang, K. K., Chen, X. ve Kloc, C., 2011, Ultrathin organic single crystals: fabrication, field-effect transistors and thickness dependence of charge carrier mobility, *Journal of Materials Chemistry*, 21 (13), 4771-4773.
- Jiang, H. ve Kloc, C., 2013, Single-crystal growth of organic semiconductors, *MRS bulletin*, 38 (1), 28-33.
- Karak, S., Lim, J. A., Ferdous, S., Duzhko, V. V. ve Briseno, A. L., 2014, Rubrene: Photovoltaic Effect at the Schottky Interface with Organic Single Crystal Rubrene (Adv. Funct. Mater. 8/2014), *Advanced Functional Materials*, 24 (8), 1038-1038.
- Kim, D. H., Han, J. T., Park, Y. D., Jang, Y., Cho, J. H., Hwang, M. ve Cho, K., 2006, Single-crystal polythiophene microwires grown by self-assembly, *Advanced Materials*, 18 (6), 719-723.
- Laudise, R., Bridenbaugh, P., Kloc, C. ve Jouppi, S., 1997, Organo-thermal crystal growth of $\alpha 6$ thiophene, *Journal of crystal growth*, 178 (4), 585-592.
- Li, H., Shi, W., Song, J., Jang, H., Dailey, J., Yu, J. ve Katz, H., 2019, Chemical and Biomolecule Sensing with Organic Field-Effect Transistors, *Chemical reviews*, 119 (1), 3-35.
- McGarry, K. A., Xie, W., Sutton, C., Risko, C., Wu, Y., Young Jr, V. G., Brédas, J.-L., Frisbie, C. D. ve Douglas, C. J., 2013, Rubrene-based single-crystal organic semiconductors: synthesis, electronic structure, and charge-transport properties, *Chemistry of Materials*, 25 (11), 2254-2263.
- Melucci, M., Gazzano, M., Barbarella, G., Cavallini, M., Biscarini, F., Maccagnani, P. ve Ostoj, P., 2003, Multiscale self-organization of the organic semiconductor α -quinoxithiophene, *Journal of the American Chemical Society*, 125 (34), 10266-10274.
- Nakanotani, H. ve Adachi, C., 2010, Organic light-emitting diodes containing multilayers of organic single crystals, *Applied physics letters*, 96 (5), 19.
- Noriega, R., Rivnay, J., Vandewal, K., Koch, F. P., Stingelin, N., Smith, P., Toney, M. F. ve Salleo, A., 2013, A general relationship between disorder, aggregation and charge transport in conjugated polymers, *Nature materials*, 12 (11), 1038-1044.

- Ohashi, N., Tomii, H., Sakai, M., Kudo, K. ve Nakamura, M., 2010, Anisotropy of electrical conductivity in a pentacene crystal grain on SiO₂ evaluated by atomic-force-microscope potentiometry and electrostatic simulation, *Applied physics letters*, 96 (20), 97.
- Park, Y., Park, K. S., Jun, B., Lee, Y.-E. K., Lee, S. U. ve Sung, M. M., 2017, Quantitative Correlation between Carrier Mobility and Intermolecular Center-to-Center Distance in Organic Single Crystals, *Chemistry of Materials*, 29 (9), 4072-4079.
- Peumans, P., Yakimov, A. ve Forrest, S. R., 2003, Small molecular weight organic thin-film photodetectors and solar cells, *Journal of Applied Physics*, 93 (7), 3693-3723.
- Pope, M., Kallmann, H. ve Magnante, P., 1963, Electroluminescence in organic crystals, *The Journal of Chemical Physics*, 38 (8), 2042-2043.
- Reese, C. ve Bao, Z., 2007, Organic single-crystal field-effect transistors, *Materials Today*, 10 (3), 20-27.
- Shi, D., Qin, X., Li, Y., He, Y., Zhong, C., Pan, J., Dong, H., Xu, W., Li, T. ve Hu, W., 2016, Spiro-OMeTAD single crystals: Remarkably enhanced charge-carrier transport via mesoscale ordering, *Science advances*, 2 (4), e1501491.
- Sondermann, U., Kutoglu, A. ve Bassler, H., 1985, X-ray diffraction study of the phase transition in crystalline tetracene, *The Journal of Physical Chemistry*, 89 (9), 1735-1741.
- Sun, L., Park, S. S., Sheberla, D. ve Dincă, M., 2016, Measuring and reporting electrical conductivity in metal–organic frameworks: Cd₂ (TTFTB) as a case study, *Journal of the American Chemical Society*, 138 (44), 14772-14782.
- Tabachnyk, M., Ehrler, B., Bayliss, S., Friend, R. H. ve Greenham, N. C., 2013, Triplet diffusion in singlet exciton fission sensitized pentacene solar cells, *Applied physics letters*, 103 (15), 190_191.
- Takahashi, T., Takenobu, T., Takeya, J. ve Iwasa, Y., 2007, Ambipolar light-emitting transistors of a tetracene single crystal, *Advanced Functional Materials*, 17 (10), 1623-1628.
- Tseng, R. J., Chan, R., Tung, V. C. ve Yang, Y., 2008, Anisotropy in Organic Single-Crystal Photovoltaic Characteristics, *Advanced Materials*, 20 (3), 435-438.

- Wang, H., Zhao, Y., Xie, Z., Wang, H., Wang, B. ve Ma, Y., 2014, The thermodynamic characteristics of organic crystal growth by physical vapor transport: towards high-quality and color-tunable crystal preparation, *CrystEngComm*, 16 (21), 4539-4545.
- Würfel, P., 2007, Photovoltaic principles and organic solar cells, *CHIMIA International Journal for Chemistry*, 61 (12), 770-774.
- Yee, K. W., Yokoyama, M. ve Hiramoto, M., 2006, Very-thin-perylene-crystal-based electroluminescent devices, *Applied physics letters*, 88 (8), 083511.
- Zeng, X., Zhang, D., Duan, L., Wang, L., Dong, G. ve Qiu, Y., 2007, Morphology and fluorescence spectra of rubrene single crystals grown by physical vapor transport, *Applied surface science*, 253 (14), 6047-6051.
- Zhao, X., Liu, T., Zhang, Y., Wang, S., Li, X., Xiao, Y., Hou, X., Liu, Z., Shi, W. ve Dennis, T. J. S., 2018, Organic Single-Crystalline Donor–Acceptor Heterojunctions with Ambipolar Band-Like Charge Transport for Photovoltaics, *Advanced Materials Interfaces*, 5 (14), 1800336.

EKLER**EK-1 ÖZGEÇMİŞ**

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Selen Polat
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Ankara / 06.04.1994
Telefon : 0554 352 43 04
Faks :
E-Posta : selnplt@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı	İlçe	İl	Bitirme Yılı
Lise	: Eryaman Lisesi	Etimesgut	Ankara	2012
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi	Selçuklu	Konya	2017
Yüksek Lisans:	Konya Teknik Üniversitesi	Selçuklu	Konya	-

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2019	BİL-PLAS LTD ŞTİ.	Ar-Ge Mühendisi

YABANCI DİLLER

İngilizce

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

-

YAYINLAR ve BİLDİRİLER

Polat Selen, KIRBIYIK ÇİSEM (2019). The Adjustment of Electrical Properties of PEDOT:PSS Films by Methoxy-ethanol-DMSO Mixture Additive and Their Solar Cells Performance. III. INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND VOCATIONAL STUDIES CONGRESS – ENGINEERING 2019 (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)

Polat Selen, KIRBIYIK ÇİSEM, SAHİN ÖZLEM, KUS MAHMUT (2019). Growth of Rubrene Single Crystal by Physical Vapor Transport and Its Application on Organic Solar Cell. II. International Science and Academic Congress'xx19 (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

KIRBIYIK KURUKAVAK ÇİSEM, Polat Selen (2020). Influence of the volume of EGME-DMSO mixed co-solvent doping on the characteristics of PEDOT:PSS and their application in polymer solar cells. Polymers and Polymer Composites.