

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**POLİTİYOFEN VE FULLEREN İÇEREN ORGANİK
FOTOVOLTAİK HÜCRELERİN OPTİMUM ÇALIŞMA
ŞARTLARININ BELİRLENMESİ**

ADEM KARSLI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. SERAP GÜNEŞ**

İSTANBUL,2011

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**POLİTİYOFEN VE FULLEREN İÇEREN ORGANİK
FOTOVOLTAİK HÜCRELERİN OPTİMUM ÇALIŞMA
ŞARTLARININ BELİRLENMESİ**

ADEM KARSLI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. SERAP GÜNEŞ**

İSTANBUL,2011

T.C
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POLİTİYOFEN VE FULLEREN İÇEREN ORGANİK
FOTOVOLTAİK HÜCRELERİN OPTİMUM ÇALIŞMA
ŞARTLARININ BELİRLENMESİ

Adem KARSLI tarafından hazırlanan bu tez 15.06.2011 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Serap GÜNEŞ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Serap GÜNEŞ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kubilay KUTLU

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Belkıs BİLGİN ERAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Yaşamım boyunca her zaman örnek alacağım, sahip olduğu bilgi, birikim ve tecrübesiyle kendini ispatlamış, danışmanlığını yaptığı sürece benden bu özelliklerini asla esirgemeyen, her zaman gerekli moral ve motivasyonu sağlayan, asil bilim kadını duruşuyla yoluma sürekli ışık tutan, çalışkanlığı, azmi ve kararlılığı ile kendine hep hayran bırakan, bizim her zaman bir aile olduğumuzu söyleyip bu şekilde davranan çok çok değerli ve kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Serap GÜNEŞ'e,

Tanıştığımız andan beri benden hiçbir desteğini esirgemeyen, laboratuardaki tecrübelerini ve sahip olduğu tüm bilgiyi bana titizlikle aktaran, güler yüzü, sevecen tavırlarıyla her zaman yüreğimi ferahlatan, hep sevgi ve saygıyla andığım biricik grup arkadaşım ve dostum Sayın Derya ILICALI'ya,

Verdiği çok değerli bilgiler, olgun duruşuyla, azim ve kararlığına hep imrendiğim sevgili grup arkadaşım Sayın Emel ÇEVİK'e,

Tezimde kullandığım AFM görüntülerini bana sağlayan, çok minnettar olduğum Sayın Doç. Dr. Mahmut KUŞ'a,

Tezimde kıymetli desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve sürekli yol gösteren Sayın Dr. Süreyya AYDIN YÜKSEL'e,

Psikolojik destekleri ve hoş sohbetleriyle her zaman yanımda olan sevgili dostlarım, grup arkadaşlarım İsmail KARATAŞ, Gülay GÜNDAY, Mücahit ALTUN, E. Meltem AKÇAY ve Nursel YAVUZ'a

Son olarak, bana gösterdikleri sabırla, yaptığım işte iyi olmam için seferber olan, maddi ve manevi desteklerinin eksikliğini hiç hissetmediğim, parçası olmaktan her zaman gurur ve onur duyduğum, eğitimci duruşlarıyla herkesin saygısını ve sevgisini kazanan sevgili ailem; annem, babam ve ablama

Tüm kalbimle sonsuz teşekkürlerimi sunarım...

Mayıs, 2012

Adem KARSLI

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiv
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	3
1.3 Hipotez.....	5
BÖLÜM 2.....	6
ENERJİ.....	6
2.1 Dünyada Enerji Kaynakları.....	7
2.2 Türkiye’de Enerji Kaynakları.....	9
2.2.1 Türkiye’de Yenilenebilir Enerji.....	11
BÖLÜM 3.....	12
FOTOVOLTAİK HÜCRELER.....	12
3.1 Yarıiletkenler.....	14
3.2 P-N Eklemler.....	18
BÖLÜM 4.....	20
FOTOVOLTAİK HÜCRELERİN SINIFLANDIRILMASI ve GELİŞİM SÜRECİ.....	20
BÖLÜM 5.....	25
ORGANİK FOTOVOLTAİK HÜCRELER.....	25
5.1 Kullanılan Malzemeler.....	26
5.2 Çalışma Prensibi.....	29
5.3 Aygıt Tipleri.....	31
5.3.1 Tek Tabaka Fotovoltaik Hücreler.....	31
5.3.2 İki Katlı Heteroeklem Fotovoltaik Hücreler.....	32

5.3.3	Hacim Heteroeklem Fotovoltaik Hücreler.....	32
5.4	Organik Fotovoltaik Hücre Karakterizasyonu.....	33
BÖLÜM 6	.....	36
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	.....	36
6.1	Deney Yapım Aşamaları.....	36
6.2	Konsantrasyon ve Çözücü Etkisinin İncelenmesi.....	39
6.2.1	Çözelti Konsantrasyonunun İncelenmesi.....	39
6.2.1.1	Deney Sonuçları.....	39
6.2.2	Donor-Akseptör Konsantrasyonu ve Çözücü Etkisinin İncelenmesi.....	43
6.2.2.1	Deney Sonuçları.....	43
6.3	Aktif Tabaka Kaplama Hızının Etkisinin İncelenmesi.....	51
6.3.1	Deney Sonuçları.....	52
6.4	Tavlama Etkisinin İncelenmesi.....	55
6.4.1	Deney Sonuçları.....	55
6.5	PEDOT:PSS Tabakasında Dönel Kaplama Hızının İncelenmesi.....	60
6.5.1	Deney Sonuçları.....	60
6.6	Farklı Saydam Elektrot (ITO) Etkisinin İncelenmesi.....	62
6.6.1	Deney Sonuçları.....	62
6.7	Tersine Çevrilmiş Devre Etkisinin İncelenmesi.....	64
6.7.1	Deney Sonuçları.....	65
6.8	Farklı P3HT Molekül Ağırlığı etkisinin İncelenmesi.....	67
6.8.1	Deney Sonuçları.....	67
BÖLÜM 7	.....	70
SONUÇ VE ÖNERİLER	.....	70
KAYNAKLAR	.....	72
ÖZGEÇMİŞ	.....	76

SİMGE LİSTESİ

Al	Alüminyum
$^{\circ}\text{C}$	Selcius derece
E	Elektrik alan
e	Elektron yükü
eV	Elektron volt
U	Uygulanan voltaj
ΔU	Potansiyel enerji değişimi
I	Akım
V	Gerilim
J_{max}	Maksimum akım yoğunluğu
V_{max}	Maksimum gerilim
λ	Dalga boyu
P_{LIGHT}	Gelen ışın şiddeti
mV	Milivolt
mA	Miliamper
μ	Mobilite
nm	Nanometre
η	Güç dönüşüm verimi
Voc	Açık devre gerilimi
Isc	Kısa devre akımı
Ge	Germanyum
Si	Silisyum
Se	Selenyum
CuO	Bakır Oksit
GaAs	Galyum Arsenit
InP	İndiyum Sülfür
PbS	Kurşun Sülfür
E_c	İletken bandı enerji seviyesi
E_v	Valans bandı enerji seviyesi
E_F	Fermi enerji seviyesi

KISALTMA LİSTESİ

TWh	Terawatt saat
MTEP	Megaton petrol eşdeğeri
ITO	İndiyum tin oksit
OLED	Işık yayan diyot
LCD	Sıvı kristal ekran
P3HT	Poli(3-hekziltiophen-2, 5-dil)
PC ₆₁ BM	(1-(3-metoksikarbonil) propil-1-fenil[6, 6]C61)
PFB	(poli (9-9 –dioktilfluoren–co–bis–N–N’-(4-butilfenil)–bis–N–N’-fenil–1, 4 fenilendiamin)
CN-MEH-PPV	(poli-[2-metoksi-5-(2’-etilhekziloksi)-1, 4-(1-siyanovinilen)-fenilen)
F8TB	(poli(9, 9’-dioktilfluoreneko-benzotiadiazol)
HOMO	İşgal edilmiş en yüksek enerji seviyesi
LUMO	İşgal edilmemiş en düşük enerji seviyesi
MIM	Metal-yalıtkan-metal
IPCE	Gelen fotonun elektrik akımına dönüşüm verimi
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
AM	Hava kütlesi
RPM	Dakika başına dolanım sayısı
TiO ₂	Titanyum Oksit
PCE	Güç dönüşüm verimi
EIE	Elektrik idaresi etüt işleri genel müdürlüğü

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1	Tezde kullanılacak (soldan sağa sırasıyla) P3HT ve PCBM'in kimyasal yapıları.....	xii
Şekil 2.1	Yenilenebilir enerji kaynakları.....	7
Şekil 2.2	Fosil yakıtlar (Yenilenemeyen enerji kaynakları).....	7
Şekil 2.3	Dünyada kullanılan enerji çeşitleri.....	8
Şekil 2.4	Farklı enerji kaynaklarının Türkiye toplam enerji tüketimi içindeki paylarının yıllara göre değişimi.....	10
Şekil 2.5	Farklı enerji kaynaklarının Türkiye yerli enerji üretimi içindeki paylarının yıllara göre değişimi.....	10
Şekil 3.1	Türkiye'de güneşlenme süresi.....	12
Şekil 3.2	İletken, yarı iletken ve yalıtkan hallerin band enerji seviyeleri.....	15
Şekil 3.3	N-tipi yarıiletken maddenin oluşumu.....	16
Şekil 3.4	P-tipi yarıiletken maddenin oluşumu.....	17
Şekil 3.5	P-N kavşak oluşumu.....	18
Şekil 3.6	P-N kavşağında enerji bandı.....	19
Şekil 4.1	Elektrolit içerisine batırılmış iki elektrot.....	20
Şekil 4.2	İnorganik fotovoltaiik hücre.....	22
Şekil 4.3	Boya duyarlı fotovoltaiik hücre yapısı.....	24
Şekil 5.1	Organik fotovoltaiik hücre (şarjlı fener olarak kullanılmakta).....	25
Şekil 5.2	Esnek yüzeye hazırlanmış organik fotovoltaiik hücre.....	26
Şekil 5.3	Organik fotovoltaiik hücrelerinde kullanılan malzemeler.....	27
Şekil 5.4	Değişik çözücülerde birkaç polimer.....	28
Şekil 5.5	Organik fotovoltaiik hücrelerinde kullanılan birkaç konjuge polimer ve fulleren türevinin kimyasal yapısı.....	29
Şekil 5.6	Organik fotovoltaiik hücre çalışma prensibi.....	30
Şekil 5.7	İki katlı fotovoltaiik hücre.....	32
Şekil 5.8	Hacim heteroeklem fotovoltaiik hücre.....	33
Şekil 5.9	Bir fotovoltaiik hücrenin I-V karakterizasyonu.....	34
Şekil 5.10	Çeşitli küresel hava kütleli tanımları.....	35
Şekil 6.1	Dönel kaplama cihazı.....	37
Şekil 6.2	Termal Buharlaştırma cihazı.....	37
Şekil 6.3	Solar Simülator.....	38
Şekil 6.4	Devre yapısı ve enerji seviyeleri.....	38
Şekil 6.5	%1, %2 ve %3 oranında hazırlanan çözeltilerin I-V karakteristikleri.....	40
Şekil 6.6	Değişik çözücü konsantrasyonundaki filmlerin AFM görüntüleri. (a) %3, (b) %2, (c) %1'lik çözelti.....	42

Şekil 6.7	Toluende hazırlanan, 1:3 oranı (a) ve 1:4 (b) oranındaki aygıtların I-V karakteristikleri.....	45
Şekil 6.8	Kloroformda hazırlanan 1:0,55 oranı (a), 1:2 oranı (b), 1:3 oranı (c) ve 1:4 oranındaki (d) aygıtların I-V karakteristikleri.....	46
Şekil 6.9	Klorobenzende hazırlanan 1:0,55 oranı (a), 1:2 oranı (b), 1:3 oranı (c) ve 1:4 oranındaki (d) aygıtların I-V karakteristikleri.....	48
Şekil 6.10	Kloroform, klorobenzen ve toluen çözücülerinde yapılan aygıtların AFM resimleri.....	50
Şekil 6.11	Aktif tabakaları 800 RPM'de (a) kaplanan, 1000 RPM'de (b) kaplanan ve 1500 RPM'de kaplanan aygıtların I-V karakteristikleri.....	53
Şekil 6.12	Farklı hızlarda kaplanan aktif tabaka AFM resimleri. (a) 800 RPM, (b) 1500 RPM.....	54
Şekil 6.13	Aktif tabakası tavlınmayan (a) ve aktif tabakası tavlınan aygıtların I-V karakteristikleri.....	56
Şekil 6.14	Yapımı tamamlandıktan sonra tavlınan (b) ve tavlınmayan (a) aygıtların I-V karakteristikleri.....	57
Şekil 6.15	Üretildikten sonra 120 ⁰ C'de 3dakika tavlınan (a) ve tavlınmayan (b) aygıtların AFM resimleri.....	58
Şekil 6.16	Farklı dönme hızlarında kaplanan PEDOT:PSS'li aygıtların I-V karakteristikleri. (a); 1500 RPM, (b); 2000 RPM, (c); 3000 RPM, (d);4000 RPM.....	61
Şekil 6.17	Farklı ITO kullanılarak hazırlanan aygıtların I-V karakteristikleri. (a) <15 Ω cm ⁻² , (b) 8-12 Ω cm ⁻²	63
Şekil 6.18	Tersine çevrilmiş devre yapısı.....	65
Şekil 6.19	Tersine çevrilmiş devre tipindeki aygıtların I-V karakterizasyonu.....	66
Şekil 6.20	Tersine çevrilmiş (inverted type) devrede AFM görüntüleri.....	67
Şekil 6.21	Farklı P3HT moleköl ağırlığında hazırlanan aygıtların I-V karakterizasyonu. (a) RIEKE (b) ADS.....	68
Şekil 6.22	Farklı moleköl ağırlığına sahip P3HT [(a) ADS, (b) RIEKE] kullanılarak hazırlanan aygıtların AFM resimleri.....	69

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Türkiye enerji kaynakları rezervi ve potansiyeli (2004).....9
Çizelge 2.2	Türkiye yıllık yenilenebilir enerji potansiyeli (MTEP Megaton eşdeğeri petrol).....11
Çizelge 3.1	Türkiye'nin yıllık toplam güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı .....13
Çizelge 3.2	Elektronikte yararlanılan yarı iletkenler ve kullanma yerleri.....17
Çizelge 6.1	Çözücü konsantrasyonu sonucu elde edilen değerler.....43
Çizelge 6.2	Hazırlanan farklı çözücü ve konsantrasyonları.....43
Çizelge 6.3	Toluen çözücüsü için elde edilen veriler.....44
Çizelge 6.4	Kloroform çözücüsü için elde edilen veriler.....45
Çizelge 6.5	Literatürde elde edilen sonuçlar .....46
Çizelge 6.6	Klorobenzen çözücüsü için elde edilen veriler.....47
Çizelge 6.7	Literatürde elde edilen sonuçlar .....47
Çizelge 6.8	Farklı dönel kaplama hızlarında elde edilen sonuçlar.....52
Çizelge 6.9	Literatürde elde edilen sonuçlar .....52
Çizelge 6.10	Aktif tabaka tavlama farkında elde edilen en iyi sonuçlar.....56
Çizelge 6.11	Literatürde elde edilen sonuçlar .....56
Çizelge 6.12	Yapımı tamamlandıktan sonra tavlanan aygıtlarda elde edilen sonuçlar.....57
Çizelge 6.13	PEDOT:PSS'in farklı kaplama hızlarında elde edilen sonuçlar.....60
Çizelge 6.14	Farklı, ITO kullanımında elde edilen sonuçlar.....63
Çizelge 6.15	Tersine çevrilmiş devrede elde edilen sonuçlar.....65
Çizelge 6.16	Literatürde elde edilen sonuçlar .....65
Çizelge 6.17	Molekül ağırlığı hafif P3HT'de elde edilen sonuçlar.....67

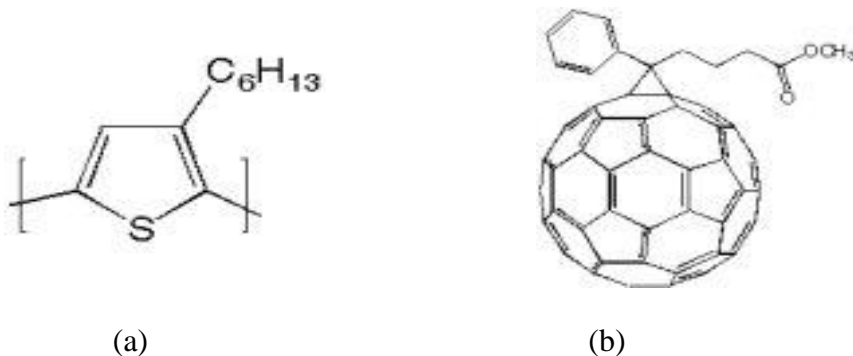
**POLİTIYOFEN VE FULLEREN İÇEREN ORGANİK GÜNEŞ
PİLLERİNİN OPTİMUM ÇALIŞMA ŞARTLARININ
BELİRLENMESİ**

Adem KARSLI

Fizik Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Serap GÜNEŞ

Bu tezde, kimyasal yapıları şekil 1’de gösterilen (p) tipli (elektron veren) poli(3-hekzil)tiyofen (P3HT) ve (n) tipli (elektron alan) 1-(3-metoksikarbonil) propil-1-fenil[6,6]C₆₁ (PCBM) fulleren türevi kullanılarak organik fotovoltaik hücrelerinin üretilmesi ve farklı çözücü etkisi, farklı konsantrasyon etkisi ve farklı molekül ağırlığı gibi etkileriyle beraber morfolojik ve fotofiziksel özellikleri incelenerek, bu tür organik fotovoltaik hücrelerin optimum çalışma koşullarının belirlenmesi hedeflenmiştir.



Şekil 1. Tezde kullanılan (a) P3HT ve (b) PCBM’in kimyasal yapıları

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik hücre, organik fotovoltaik hücre, optimum çalışma

**DETERMINATION OPTIMUM OPERATING CONDITIONS OF
ORGANIC PHOTOVOLTAIC CELLS WHICH CONTAIN
POLYTHIOPHENE AND FULLERENE**

Adem KARSLI

Department of Physics
MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Serap GÜNEŞ

In this thesis, it is aimed to produce organic solar cells using (p) type (electron donor) poly(3-hexyl)thiophene (P3HT) and (n) type (electron acceptor) 1-(3-methoxycarbonyl) propyl-1-phenyl [6,6] C₆₁ (PCBM) fullerene derivative whose chemical structures are shown in Figure 1. Also, the effect of different solvents, effect of different concentration and effect of different molecular weight on operating conditions of P3HT:PCBM based organic photovoltaic cells has been aimed.

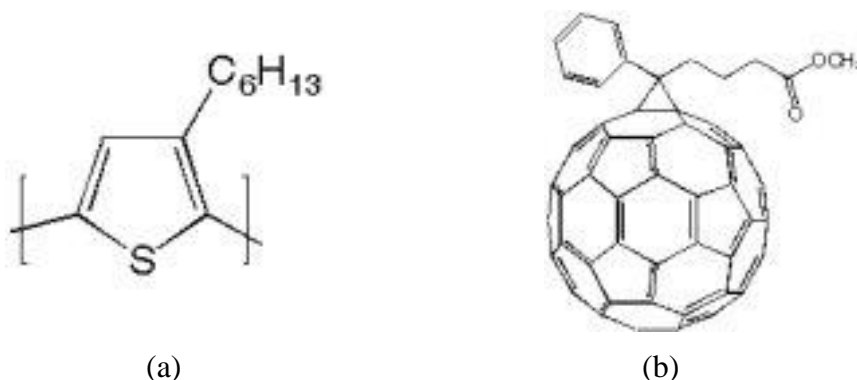


Figure 1. Chemical structures of (a) P3HT and (b) PCBM

Key words: Photovoltaic cell, organik photovoltaic cell, optimum operate

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Fotovoltaik hücreler, yüzeylerine düşen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken malzemelerden üretilen aygıtlardır. Fotovoltaik hücreler, fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışırlar.

Fotovoltaik hücreler yeni bir teknoloji olarak kabul edilse bile tarihsel gelişimi 1800'lü yıllara kadar uzanmaktadır. 1954 yılında Chapin, Fuller ve Pearson tarafından ilk silikon fotovoltaik hücre yapıldı. Bu fotovoltaik hücrelerinde önceki fotovoltaik hücrelerden 6 kat yüksek olan % 6 verim elde edildi ve bu sonuç fotovoltaik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edildi. Bu tarihi izleyen araştırmalar ve ilk tasarımlar, uzay araçlarında kullanılacak güç sistemleri için yapıldı.

1970'li yılların başında ortaya çıkan petrol krizi insanları alternatif enerji kaynakları aramaya yöneltti. Bu süreçte fotovoltaiklerin geliştirilmesiyle çevreye daha duyarlı ve daha ekonomik enerji üretilebileceği düşünüldü ve bu alanda çalışmalar çoğaltıldı. Bir yandan uzay çalışmalarında kendini ispatlayan silikon kristaline dayalı fotovoltaik hücre verimliliğini artırma çabaları vardı. Diğer yandan alternatif olmak üzere çok daha az yarıiletken malzemeye gerek duyulan ve bu nedenle daha ucuza üretilebilecek polikristal silikon, amorf silikon gibi ince film malzemelerle yapılan ince film fotovoltaik hücre ve daha sonra organik iletkenlerle yapılan organik fotovoltaik hücre çalışmalarına başlandı. İlk üretilen fotovoltaik hücrelerin verimleri çok düşük olmasına rağmen, şu an mevcut fotovoltaik hücrelerde güç dönüşüm veriminde % 24'lere ulaşmıştır.

Fotovoltaik hücreler, oluşturuldukları malzemelerin türüne göre 2 başlık altında incelenmiştir.

- ❖ İnorganik fotovoltaik hücreler
- ❖ Organik fotovoltaik hücreler

İnorganik fotovoltaik hücelere kıyasla daha düşük verime sahip olmalarına rağmen organik fotovoltaik hücreleri cazip kılan avantajları; hafiflikleri, esneklikleri, kolay ve hızlı üretim süreçleri ve düşük maliyetleridir. Organik yarıiletken malzemelerle hazırlanan hücreler, esnek altlıklara uygulanabilme kolaylığıyla birlikte, çok geniş alanlarda da rahatlıkla üretilip kullanılabilirler.

Organik fotovoltaik hücreler her ikisi de organik olan biri donör (elektron veren) diğeri akseptör (elektron alan) malzemelerin birleşiminden oluşmaktadır. Organik fotovoltaik hücrelerin genel yapısı ışık yayan diyotlarınkine (LED) benzemektedir. Bu aygıtlar sandviç geometrisinde hazırlanmaktadır. Organik fotovoltaik hücrelerde kullanılan malzemeler ve çalışma prensipleri ileriki bölümde detaylı olarak anlatılacaktır.

Organik fotovoltaik hücrelerin yukarıda sayılan avantajları bilim camiasında derin araştırmalara konu olmuştur. Organik fotovoltaik hücre araştırmaları genel olarak iki malzeme üzerine yoğunlaşmıştır: vakum işleme tabii ve ıslak işleme tabii malzemeler. Islak işleme tabii malzemelere örnek olarak polimerler verilebilir. Polimerler yüksek ısıya dayanıklı değildir. Yüksek ısı altında zincirler parçalanabilir ve polimerler bozunabilirler. Vakum işlemleri yüksek ısı gerektirdiğinden polimerleri bu işleme tabii bırakmak onların bozunmasına sebep olmaktadır. Polimer ve bazı organik malzemelere yan zincir fonksiyonelliği kazandırılarak kloroform, klorobenzen, toluen gibi genel organik çözücülerde çözümleri sağlanabilir. Bu tür işleme ıslak işlem adı verilir. Uygun çözücülerde çözünen polimerler ve fulleren türevleri dönel kaplama (spin coating) ve bıçak ağzı ile kaplama (doctor blading), püskürtmeli baskı (ink jet printing), elek baskı (screen printing) yöntemleri kullanılarak ince film haline getirilebilir. Literatürde ıslak işlem kullanılarak hazırlanan polimer ve fullerenler arasında P3HT ve PCBM önemli araştırmalara konu olmuştur.

P3HT, literatürde sıkça kullanılan polifenilen venilen (PPV) türevlerine kıyasla daha geniş soğurma spektrumuna sahiptir (650 nm'e kadar uzanmaktadır) ve yüksek delik (hol) mobilitesine sahiptir. Bunun yanı sıra sıcaklık uygulandığında kısmen kristalik

özellikler göstermektedir. Ayrıca da ticari olarak satın alınabildiğinden ulaşması kolaydır.

PCBM fulleren türevi bir malzemedir. Sahip olduğu yüksek elektron mobilitesinden dolayı bir akseptör tipli malzeme olarak kullanılmaktadır. Bir diğer önemli özellik de P3HT ve PCBM karıştırıldıklarında elde edilen delik mobilitesi, P3HT'nin tek başınayken elde edilen delik mobilitesinden daha yüksektir. Bu nedenle P3HT:PCBM karışımlarından elde edilen organik fotovoltaiik hücre araştırmaları oldukça ilgili çekicidir. Literatürde bu konuda yapılan çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Çözücü etkisine bağılı araştırmalar şu şekildedir: Kenji Kawano ve ekibinin yaptığı çalışmada, hava ortamından yalıtılmış bir sistemde, P3HT ve PCBM kullanılarak hazırlanan hacim heteroeklemlili organik fotovoltaiik hücrelerde çözücü etkisi araştırılmıştır. Diklorobenzen ve kloroform çözücülerinden hazırlanan bir karışım çözeltide, sadece klorobenzenden oluşan bir çözeltiye göre biraz daha iyi sonuç alınmıştır. Klorobenzenden alınan sonuçlar; açık devre gerilimi (V_{oc}), 0.60 V, kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}), 10.2 mA/cm² ve dolgu faktörü (FF), 0.54 ve güç dönüşüm verimi (PCE) η =%3.34 olarak bulunmuştur. Diklorobenzen ve kloroform karışımından elde edilen sonuçlar ise; V_{oc} =0.60 V, J_{sc} =11.1 mA/cm², FF=0.56 ve PCE=%3.73 şeklindedir (Kawano vd. [1]).

Yanfei Ding, Ping Lu ve Qiying Chen'in yaptığı çalışmada; kloroform, klorobenzen ve diklorobenzen çözeltilerinde hazırlanan P3HT:PCBM organik fotovoltaiik hücrelerde soğurma pikleri araştırılmıştır. Klorobenzende λ =544.9 nm, kloroformda λ =613.1 nm ve diklorobenzende λ = 673.8 nm olarak bulunmuştur (Ding [2]).

Al-İbrahim ve ekibinin yaptığı çalışmada: kloroform ve klorobenzen içerisinde hazırlanan P3HT:PCBM aygıtlarda güç dönüşüm verimi kloroformda PCE=%1.5 ve klorobenzende PCE=%2.2 olarak bulunmuştur (Al-İbrahim vd. [3]).

PEDOT:PSS etkisine bağılı yapılan bazı araştırmalar şu şekildedir: Sung Ho-Jin ve ekibinin yaptığı çalışmada, P3HT:PCBM hacim heteroeklem organik fotovoltaiik hücreler yapılmıştır. Çözücü, aktif tabaka kurutma işlemi ve donör akseptör oranı gibi parametreler araştırılmıştır. PEDOT:PSS'in içerisinde %6 oranında gliserol katılarak G-PEDOT:PSS oluşturulmuştur. En yüksek güç dönüşüm verimi P3HT:PCBM oranı 1:0,7 (P3HT oranı 1, PCBM oranı 0.7) olan hücrede %4.64 olarak bulunmuştur (Sung-Ho [4]).

Youngkyoo Kim ve ekibinin yaptığı çalışmada, P3HT:PCBM hücrelerde PEDOT:PSS tabakasının etkisi incelenmiştir. Aygıtta kullanılmasıyla güç dönüşüm verimini arttırmıştır. Ayrıca PEDOT:PSS tabakasına sıcaklık uygulanmasıyla kısa devre akımı (I_{sc}) artış göstermiş fakat doluluk faktörü kısmen düşmüştür. Elde edilen en iyi güç dönüşüm verimi %3,5'tur (Kim [5]).

P3HT:PCBM hücrelerde verimi arttırmak adına yapılan bazı araştırmalar şu şekildedir: Lukas Schmidt-Mende ve ekibinin yaptığı çalışmada, P3HT:PCBM aktif tabakası kullanılarak tersine çevrilmiş bir aygıt hazırlanmıştır. Sistem içeriği sırasıyla, ITO/TiO₂/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Ag şeklindedir. Burada metal elektrotlar termal buharlaştırma ve püskürtme yöntemiyle kaplanmıştır. Çalışma hava ortamına yapılmıştır. Alınan en iyi sonuçlar metal elektrotun püskürtme ile kaplandığı aygıtta tespit edilmiştir; $V_{oc}=0.58$ V, $I_{sc}=7.1$ mA/cm², FF=0.569 ve PCE=%2.44 (Weickert [6]).

Jianyong Ouyang ve Yijie Xia'nın yaptığı çalışmada, P3HT:PCBM organik fotovoltaiik hücreler hazırlanmıştır. Burada hazırlanan P3HT:PCBM çözeltisi içerisine (1-dodecanethiol) katılarak 1:1 ve 1:2 oranında çözeltiler hazırlanmıştır. Eklenen bu malzeme sayesinde güç dönüşüm verimi olağanüstü şekilde artmıştır. Elde edilen en iyi sonuçlar, 30mg ml⁻¹ P3HT ve PCBM içerisine 3mg ml⁻¹ 1-dodecanethiol katılarak elde edilmiştir ve PCE=%1.74'den %4.03'e ulaşmıştır (Jianyong [7]).

P3HT:PCBM konsantrasyon etkisine bağlı yapılan bazı araştırmalar şu şekildedir: Golap Kalita ve ekibinin yaptığı çalışmada, P3HT:PCBM fotovoltaiik hücreler hazırlanmış ve farklı konsantrasyonlarda morfolojik yapı incelenmiştir. Bu konsantrasyonlar sırasıyla 1:0.5, 1:2, 1:3 (P3HT oranı hep 1'dir.) şeklindedir. Hazırlanan hücrelerden bazıları 150°C'de 15 dakika sıcaklık işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen en iyi sonuçlar : $V_{oc}=0,51$ V, $J_{sc}=6,49$ mA/cm², FF=0,365 ve PCE=%1,21 şeklindedir (Kalita [8]).

Fang Cung Chen ve ekibinin yaptığı çalışmada; P3HT:PCBM oranları 1:3, 2:3, 1:1, 3:2, 3:1 olan aygıtlarda elde edilen verimleri sırasıyla PCE=%0.67, 2.50, 3.66, 3.22 ve 1.11'dir (Fang-Chung [9]).

Aktif tabaka döneel kaplama hızı etkisine bağlı Yong-Sang Kim ve ekibinin yaptığı çalışmada, P3HT:PCBM hücreleri klorobenzen ieisinde hazırlanan çözeltilerle oluşturulmuş ve bu çözeltili kaplanırken döneel kaplama hızı değiştirilmiştir. 300, 1000 ve

3000 RPM'de kaplanan çözeltilerde en iyi sonuç 300 RPM'de kaplanan aygıtta alınmıştır; $J_{sc}=7,25 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=0,603 \text{ V}$, $FF=0,44$ ve $PCE=\%1.58$ olarak bulunmuştur (Heejoo [10]).

P3HT:PCBM hücrelerde sıcaklık etkisini araştırıldığı bazı çalışmalar şu şekildedir: Wei-Fang Su ve ekibinin yaptığı çalışmada, 140°C 'de 10, 30 ve 60 dakika aktif tabakalar tavlansmıştır. Hiç tavlansmayan hücrede $PCE=\%1.039$, 10 dakika tavlansanda $PCE=\%2.185$, 30 dakika tavlansanda $PCE=\%2.308$ ve son olarak 60 dakika tavlansanda PCE oldukça düşer ve $\%0.810$ 'a geriler (Yu-Ching [11]).

Heejoo Kim ve ekibinin yaptığı çalışmada, P3HT:PCBM tabakası; 0, 60, 90, 120, 150 ve 180°C de tavlansmıştır. Elde edilen verimler sırasıyla; $PCE=\%0.34, 0.87, 1.18, 1.90, 2.80, 0.3$ şeklindedir (Woon-Hvuk [12]).

1.2 Tezin Amacı

Fotovoltaik teknoloji kullanılarak doğrudan güneş enerjisinden elektrik elde edilmesi, günümüz enerji krizinin aşılmasında en uygun yol olarak görülmektedir. Bu bağlamda, organik fotovoltaik hücreleri son yıllarda oldukça büyük ilgi görmektedir ve derin araştırmalara konu olmuştur. Ucuzluk, kolay işlenebilirlik, hafiflik ve esneklik, organik fotovoltaik hücrelerin en önemli avantajları arasındadır. Aygıt üretimi için kullanılan aktif tabakaların çözünebilirliği, sürekli basım teknikleri kullanılarak üretim yapılabilmesi onların benzersiz özellikleri arasındadır. İlk organik fotovoltaik hücre, farklı iş fonksiyonlarına sahip iki metal elektrot arasına sıkıştırılmış organik aktif tabakalardan oluşmaktaydı. Daha sonra iki organik tabakanın iki metal elektrot arasına arka arkaya kaplanmasıyla oluşturulan iki katlı heteroeklem prensibi organik fotovoltaik hücrelerin verimini önemli ölçüde arttırmıştır. Sarıçiftçi tarafından yarıiletken polimerlerden fulleren türevlerine ultra hızlı elektron transferinin keşfi, biri elektron veren (donor), diğeri elektron alan (akseptör) iki organik malzemenin karışımıyla oluşan hacim heteroeklemi prensibine dayalı polimer fotovoltaik hücrelerin gelişiminde bir çığır açmıştır ve polimer fotovoltaik hücrelerin verimi yaklaşık 5 kat artmıştır. O günden bugüne kadar, verimi iyileştirmek üzere farklı araştırma grupları arasında sürekli bir rekabet oluşmuştur. Bu rekabet, farklı özgün polimerlerin sentezlerinin yapılmasına, farklı aygıt tiplerinin dizaynına ve verimi iyileştirmek üzere yeni konseptlerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Dünyadaki pek çok araştırma grubu arasındaki bu rekabet, organik fotovoltaik hücrelerin verimini birkaç yıl öncesine kadar en gelişmiş teknolojik ürün için verim değeri olarak belirlenen $\%4$ 'ten, günümüzde

%8'lere taşımıştır. Organik fotovoltaik hücrelerin verimindeki bu hızlı ve teknolojik hamle, organik fotovoltaik hücrelerin aslında çok umut verici bir teknoloji olduğunu göstermektedir. Yeni yapılan teorik hesaplamalar, yeni, fotovoltaik gereksinimlere uygun malzemeler geliştirildiği takdirde verimin %10 ve üzerine çıkmasında herhangi bir teknolojik engel olmadığını ortaya koymaktadır. Günümüzde pek çok araştırma grubu bu hedef doğrultusunda verimin iyileştirilmesini sağlayacak yeni yarıiletken polimer malzemelerin sentezi üzerine yoğunlaşmışlardır. Organik fotovoltaik hücrelerin verimi artık ticarileşme aşamasına gelmiştir. İlk ürünler (üzerinde organik fotovoltaik hücre olan çanta ve el fenerleri) de satışa sunulmuştur. Organik fotovoltaik hücrelerin ticarileşmesi yolundaki ilk hedef, çatılardaki ya da uzay uydularında kullanılan Si-bazlı geleneksel fotovoltaik hücrelerin yerini almak değil, taşınabilir elektronik, akıllı tekstil uygulamaları, saatler, hesap makineleri, cep telefonu şarjı olarak karşımıza çıkacaktır. Organik fotovoltaik hücre konusunda oldukça tecrübeli olan Prof. Dr. Christoph Brabec, yakın zamanda "Organik fotovoltaikğin üretim beklentileri ve bunun aygıtların ticarileştirilmesine etkileri" başlıklı bir makale kaleme almıştır. Bu makalede üç önemli ticari başarı faktöründen bahsetmiştir: verim, yaşam ömrü (life time), fiyat. Verim, enerji üretimini azami mertebeye ulaştırmak ve fiyatı kırmak için çok önemli bir parametredir. Yaşam ömrü, diğer önemli parametre olarak görülmektedir. 3-5 yıllık bir yaşam ömrü (3000-5000 saatlik bir çalışma ömrü), ucuz aygıtlar için fotovoltaik pazarına giriş noktası olarak görülmektedir. Organik fotovoltaik hücreleri için ışık altında ve UV ışınmasına maruz kaldığında kararlılığın nasıl değişeceği, özellikle de plastik alt tabanlar üzerinde üretilmiş organik fotovoltaik hücreleri için nasıl değişeceği konusunda yapılan çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Fakat, yapılan çalışmalar sonuçların umut ve cesaret verici olduğunu göstermiştir. Diğer bir başarı parametresi olarak fiyat karşımıza çıkmaktadır. Organik fotovoltaik hücreleri için 1 \$/Wp fiyatın olası olduğu pek çok yerde belirtilmektedir.

Fotovoltaik pazarı, ilk ticari organik fotovoltaik hücre uygulamaları için bu anahtar parametrelerin hepsine eşit ölçüde cevap veren ürünlere açık olacaktır.

Bu parametrelerin her biri organik fotovoltaik hücrelerin ticarileşmesinin önünde duran birer problem olarak düşünülürse, dünyadaki pek çok araştırma grubunda olduğu gibi bu çalışmada da problemlerden ilki, yani verimin iyileştirilmesi probleminin çözümü üzerine yoğunlaşmıştır. Amaç, sadece verimin iyileştirilmesi hedefi değil, aynı zamanda yüksek verimin önünde duran engellerin araştırılarak, bunların aşılmasında

gerekli olan çözümlerin ortaya koyulmasıdır. Aynı zamanda Yıldız Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü bünyesinde Doç. Dr. Serap GÜNEŞ tarafından kurulan Organik Elektronik laboratuvarının çalışma koşullarının literatürdeki standartlarla uyumunu da kıyaslamak amacıyla özellikle literatürde derin araştırmalara konu olmuş ve kolay ulaşılabilen iki kimyasal malzeme P3HT ve PCBM bu tezde kullanılmıştır.

1.3 Hipotez

Literatürde yapılan P3HT:PCBM organik fotovolttaik hacim heteroeklem hücre çalışmalarında, hava ortamında elde edilen yaklaşık güç dönüşüm verimi $PCE=0,8-2\%$ arasındadır. Yapılacak bu tez çalışmasında; devre tipi, çözücü konsantrasyonu, çözücü etkisi gibi parametreleri değiştirmek verimi artırır ve literatür değerlerine ulaşılabilir veya arttırılabilir. Oluşturulan organik elektronik laboratuvarı koşulları ve hava ortamı göz önüne alındığında yaklaşık $1-1,5\%$ civarında güç dönüşüm verimi elde edilir.

BÖLÜM 2

ENERJİ

Enerji, kısaca iş yapabilme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Dünyada kullanılan enerji çeşitleri; ısı enerjisi, ışık (radyant enerji), mekanik enerji, elektrik enerjisi, kimyasal enerji ve nükleer enerjidir [13].

Enerji kaynakları genelde iki grup altında toplanırlar: yenilenebilir ve tükenbilir (veya yenilemeyen). Yenilenebilir enerji adında da anlaşılacağı gibi tekrar tekrar kullanılabilen enerjidir ve sınırsız varsayılmaktadır. Örnek verecek olursak güneş enerjisi, düzenlenen sistemlerle kolayca ısı ve elektrik enerjisine çevrilebilmektedir. Rüzgar enerjisi, yerküreden gelen jeotermal enerji, bitkilerden üretilen biyokütle ve sudan elde edilen hidrogüç de yenilenebilir enerji grubunda değerlendirilmektedir (Arısoy vd[14]).

Yenilenebilir enerji, kısa sürede yerine koyulabilen enerjidir. Tükenbilir enerji ise, kullanıldıktan sonra kısa zaman aralığında yeniden oluşamayan enerji olarak tanımlanır. Bunlar genelde, petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil yakıtlardır. Bu tür enerjiler, yaşamları milyonlarca yıl önce sona ermiş bitki ve hayvan gibi organik kalıntıların yerkürenin içinden gelen ısı ve bu kalıntıların üzerinde bulunan kayaçlardan kaynaklanan basınç altında oluşmuş fosillerinden kaynaklanmaktadır (Arısoy vd. [14]).



Şekil 2.1 Yenilenebilir enerji kaynakları



Şekil 2.2 Fosil yakıtlar (Yenilenemeyen enerji kaynakları)

2.1 Dünyada Enerji Kaynakları

Tüm enerji kaynakları (petrol, doğal gaz, kömür, nükleer enerji, alternatif enerji kaynakları) göz önüne alındığında dünyada her gün yaklaşık 210 milyon varil petrol eşdeğeri enerji tüketilmektedir. Enerji, bina sektöründe, endüstride, ulaşımda ve güç sektöründe kullanılmaktadır. Bu nedenle kişi başına enerji tüketimi yerine enerji başına

üretim verimliliği (enerji yoğunluğu) ülkelerin gelişmişlik düzeylerini açıklamak amacıyla tercih edilmektedir (Arısoy vd. [14]).

Bir ülke gelişmiş olsun veya olmasın enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla bir strateji geliştirmelidir. Artan nüfusla beraber her ülkede enerji gereksinimi artmıştır. 1950'den bu yana dünya nüfusu 2 katından fazla artarken, enerji talebi ise tam 6 kat artmıştır. Hala dünya nüfusu 6,5 milyar olarak tahmin edilmekte ve nüfusun Birleşmiş Milletler'in tahminine göre 2015 yılında 7,2 milyar ve 2050 yılında 8,9 milyar olacağı öngörülmektedir. Bununla beraber gelişen ekonomilere sahip ülkeler daha fazla enerji kullanacaklardır. Dünyada en çok enerjiyi başta Amerika Birleşik Devletleri kullanmaktadır ve Çin takipçisidir (Arısoy vd. [14]).



Şekil 2.3 Dünyada kullanılan enerji çeşitleri

Dünyada enerji ihtiyacının yaklaşık %80-85 kadarı fosil yakıtlar (petrol, kömür, doğalgaz v.b.) tarafından karşılanmaktadır. Kalan miktar ise çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmaktadır . Fakat kullanılan fosil yakıtlar, atmosferi etkileyerek neden olduğu asit yağmurları yüzünden bitkilerin, nehirlerin ve göllerin olumsuz etkilemesi, ozon tabakasına hasarlara yol açması, yaydıkları gaz ve parçacıklar yüzünden solunum yolu hastalıklarına ve kansere neden olması ve diğer yandan gün geçtikçe tükenen enerji kaynakları olduğundan dolayı insanları başka enerji kaynakları araştırmaya sürüklemiştir [15]. Bu kapsamda; rüzgar, dalga, güneş, biyokütle ve

jeotermal gibi yenilenebilir ve alternatif enerji kaynakları kullanılmaya başlanmıştır. Teknolojilerindeki gelişmelerden dolayı bu tür yenilenebilir enerji kaynaklarının maliyetleri gittikçe düşmekte olmasına rağmen ilk yatırım maliyeti ve rahat ulaşılamaması gibi nedenlerle, hala fosil yakıtlarla karşılaştırılabilecek düzeyde değillerdir. Bunların gelecekte önemli enerji kaynakları olacakları konusunda kimsenin şüphesi yoktur. Fakat, bilinen gerçekler bu geleceğin, en az 20 veya 30 yıl, pek yakın bir tarih olmadığını göstermektedir (Arısoy vd. [14]).

2.2 Türkiye’de Enerji Kaynakları

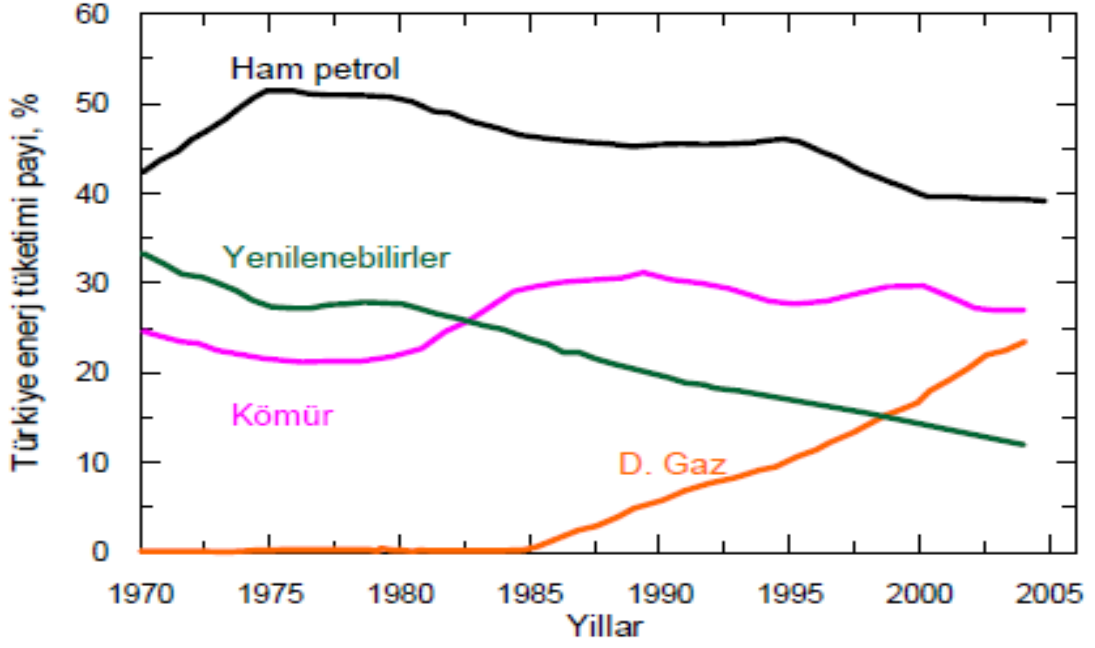
Diğer dünya ülkelerinde de olduğu gibi Türkiye’de de enerji ihtiyacının çoğunu fosil yakıtlar sağlamaktadır. Kömür ve yenilenebilir kaynaklarımızın rezerv ve potansiyelleri, girmeyi hedeflediğimiz Avrupa Birliği ülkelerine kıyasla iyi düzeyde olmasına rağmen, toplam enerji tüketimimizin %60’ını oluşturan petrolde ve doğal gazda rezervlerimiz yok denecek düzeydedir (Çizelge 2.1) (Arısoy vd. [14]).

Çizelge 2.1 Türkiye enerji kaynakları rezervi ve potansiyeli (2004)

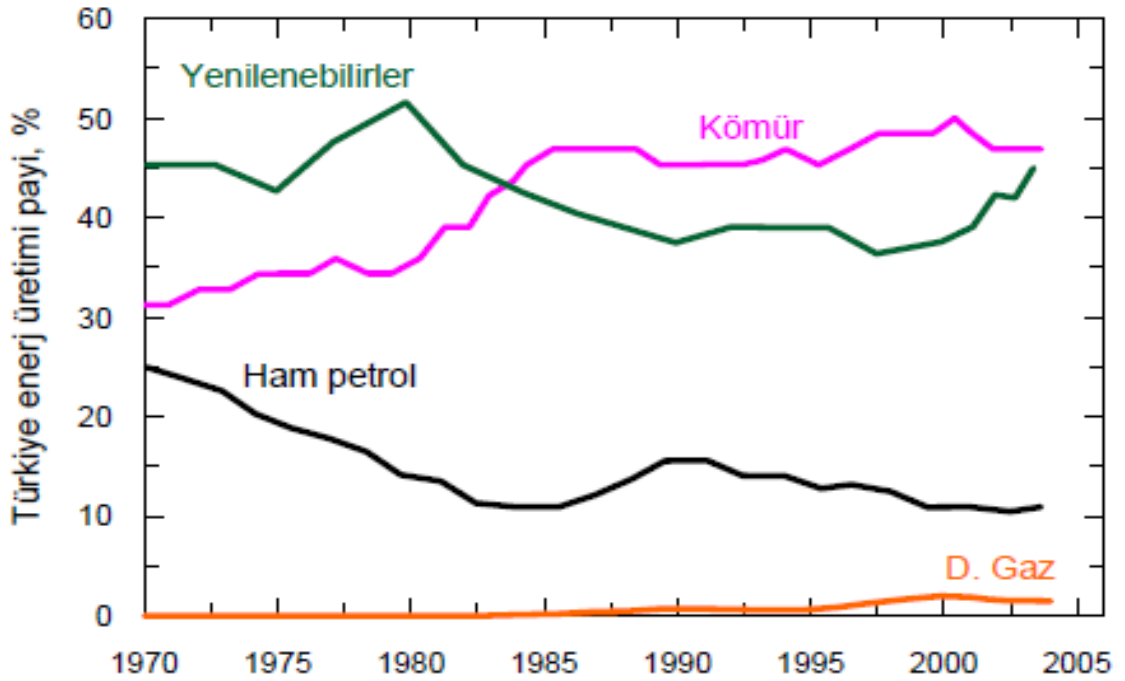
Kaynak	Birim	Rezerv	Rez./Tüketim
Taş K.	Milyon ton	1344	71 yıl
Linyit	Milyon ton	8375	187 yıl
Asfaltit	Milyon ton	79	110 yıl
Bitümler	Milyon ton	1641	
Hidrolik	GWh/yıl	129907	
	MW	36652	
Ham petrol	Milyon ton	43	17 ay
D.Gaz	Milyar m ³	8	4 ay
Doğal Uranyum	Ton	9129	
Toryum	Ton	380000	
Jeotermal- elektr.	MW _e	510	
Jeotermal-ısı	MW _t	31500	
Güneş-elektrik	Milyon tep	25	
Güneş-ısı	Milyon tep	87	
Rüzgar	MW	10000	

Türkiye’de toplam enerji tüketiminde en önemli pay ortalama %40 ile petroldedir. Bu rakam dünya ortalamasına yakındır. Bununla beraber Türkiye’de petrolün payı önceki yıllara göre azalma eğilimi göstermektedir (Arısoy vd. [14]).

Türkiye’nin toplam enerji üretim ve tüketiminde kullanılan çeşitli kaynaklarının payları şekil 2.4 ve şekil 2.5’te gösterilmiştir. (Şekil 2.4 ve 2.5’te yenilenebilir kaynaklar; odun, hayvan/bitki artıkları, hidrolik, jeotermal ve güneş enerjileridir.) (Arısoy vd. [14]).



Şekil 2.4 Farklı enerji kaynaklarının Türkiye'nin toplam enerji tüketimi içindeki paylarının yıllara göre değişimi



Şekil 2.5 Farklı enerji kaynaklarının Türkiye yerli enerji üretimi içindeki paylarının yıllara göre değişimi

Ülkemizde de sürekli artan nüfus miktarı, ekonomi ve yapılacak olan araştırma ve geliştirme çalışmaları dolayısıyla sürekli enerji ihtiyacı gündeme gelmiştir. Bu ihtiyaçların karşılanması kapsamında kullanılan fosil yakıtların yeterli

gözükmemesinden ve verdiği zararlardan, yenilenebilir kaynaklar bizim içinde önem arz etmektedir (Arısoy vd. [14]).

2.2.1 Türkiye’de Yenilenebilir Enerji

Türkiye, yenilenebilir enerji kaynakları bakımından çeşitliliği ve potansiyeli ile önemli bir ülkedir. Ülkemiz, birçok ülkede bulunmayan jeotermal enerjide dünya potansiyelinin % 8’ine sahiptir. Türkiye hidrolik enerji potansiyeli açısından da dünyanın sayılı ülkelerindedir. Rüzgar enerjisi potansiyeli yaklaşık 160 TWh olarak tahmin edilmektedir. Ayrıca konumu itibariyle güneş enerjisinden yararlanmak için çok uygundur [13].

Çizelge 2.2 Türkiye yıllık yenilenebilir enerji potansiyeli (MTEP Megaton eşdeğeri petrol)

Yenilenebilir Enerji Türü		Kullanım Enerji Türü	Doğal Potansiyel	Teknik Potansiyel	Ekonomik Potansiyel
Güneş Enerjisi		Elek.Enj.(milyar kWh)	977000	6105	305
		Isı (MTEP)	80000	500	25
Hidrolik Enerji		Elek.Enj.(milyar kWh)	430	215	124,5
Rüzgar Enerjisi	Direkt Rüzgar Enj. Karasal	Elek.Enj.(milyar kWh)	400	110	50
	Direkt Rüzgar Enj. Denizsel	Elek.Enj.(milyar kWh)	-	180	-
	Deniz Dalga Enj.	(milyar kWh)	150	18	-
Jeotermal Enerji		Elek.Enj.(milyar kWh)	-	-	1,4
		Isı (MTEP)	31500	7500	2843
Biyomas Enerjisi		Yakıt (klasik MTEP)	30	10	7
		Yakıt (modern MTEP)	90	40	25

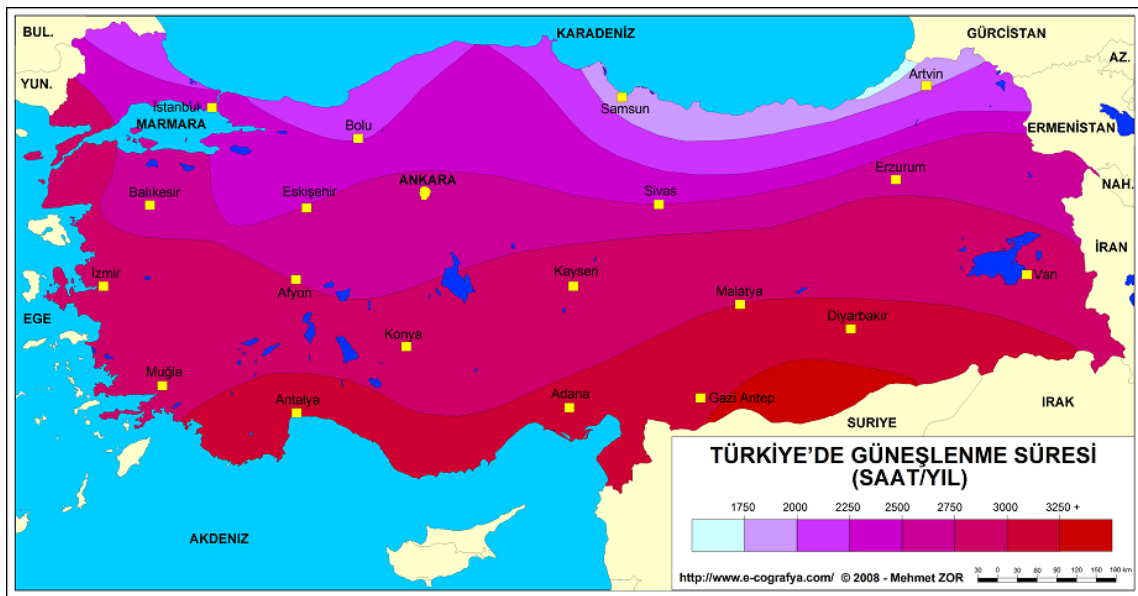
Türkiye 'deki enerji profili gözden geçirildiğinde yenilenebilir enerji kaynaklarının yeri ve önemi açıkça görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından doğru ve sağlıklı bir biçimde yararlanılması için gereken strateji, plan ve politikaların önemi giderek artmakta ve önemli boyutlara ulaşmaktadır Özellikle, güneş ve rüzgar enerjisinin kullanımı, Türkiye'nin enerji bütçesine ciddi katkılar sağlayacaktır (Öztürel [16]).

BÖLÜM 3

FOTOVOLTAİK HÜCRELER

Güneş enerjisinin öneminin giderek artması beklenmektedir. Çünkü güneş yeryüzünde tüketilen toplam enerjiden 10.000 kez daha fazla enerjiyi yeryüzüne yollar, çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Endüstride (fabrikalar ve organize sanayi bölgeleri) ile yerleşim alanlarında (evler, siteler) termal (sıcak su, radyatör ön ısıtma, havuz ısıtma) ve fotovoltaik uygulamaları bulunmaktadır. Ayrıca uydu ve uzay istasyonlarında güneşten elektrik elde etmek için kullanılan fotovoltaik hücre teknolojilerindeki gelişim, bunların verimlerindeki artış sayesinde daha ekonomik hale gelmektedirler (Arısoy vd. [14]).

EIE tarafından yapılan çalışmaya göre; Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7.2 saat), ortalama toplam ışınlam şiddeti 1311 kWh/ m² yıl (günlük toplam 3.6 kWh/m²) olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 3.1) (Arısoy vd. [14]).



Şekil 3.1 Türkiye'de güneşlenme süresi

Çizelge 3.1 Türkiye'nin yıllık toplam güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı (Kamil vd.[17]).

Bölge	Toplam ortalama güneş enerjisi	En çok güneş enerjisi (Haziran)	En Az güneş enerjisi (Aralık)	Ortalama güneşlenme süresi	En çok güneşlenme süresi (Haziran)	En az güneşlenme süresi (Aralık)
	kWh/m ² - yıl	kWh/m ²	kWh/m ²	saat/yıl	saat	saat
Güneydoğu Anadolu	1.460	1.980	729	2.993	407	126
Akdeniz	1.390	1.869	476	2.956	360	101
Doğu Anadolu	1.365	1.863	431	2.664	371	96
İç Anadolu	1.314	1.855	412	2.628	381	98
Ege	1.304	1.723	420	2.738	373	165
Marmara	1.168	1.529	345	2.409	351	87
Karadeniz	1.120	1.315	409	1.971	273	82

Fotovoltaik hücreler, üzerlerine gelen ışığı soğurduktan sonra direkt olarak elektriğe çeviren aygıtlardır. Bazı malzemeler fotoelektrik etki olarak bilinen bir özellik gösterirler ve bu özellik malzemelerin gelen ışığı soğurup elektron salmasına neden olur. Bu elektronlar yakalandığı zaman oluşan akım elektrik olarak kullanılabilir (Kamil vd. [17]).

Ülkemizdeki toplam kurulu fotovoltaik hücre gücü 2000 yılı içinde 250 kWp kadardır. Fotovoltaik sistemin işletme kolaylığı, hareketli parçalarının olmaması nedeniyle uzun yıllar sorunsuz çalışması, modüler olması yani 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 ve en önemlisi çevresel açıdan son derece temiz bir enerji kaynağı olması fotovoltaik enerjinin başlıca üstünlükleridir. Fotovoltaik hücreler bu bağlamda önemli bir yere sahiptir (Alaçakır [18]).

Fotovoltaik hücrelerin oluşumunda yarı iletken teknolojisi kullanılır. Dolayısıyla, yarı iletkenler bir sonraki kısımda incelenmiştir.

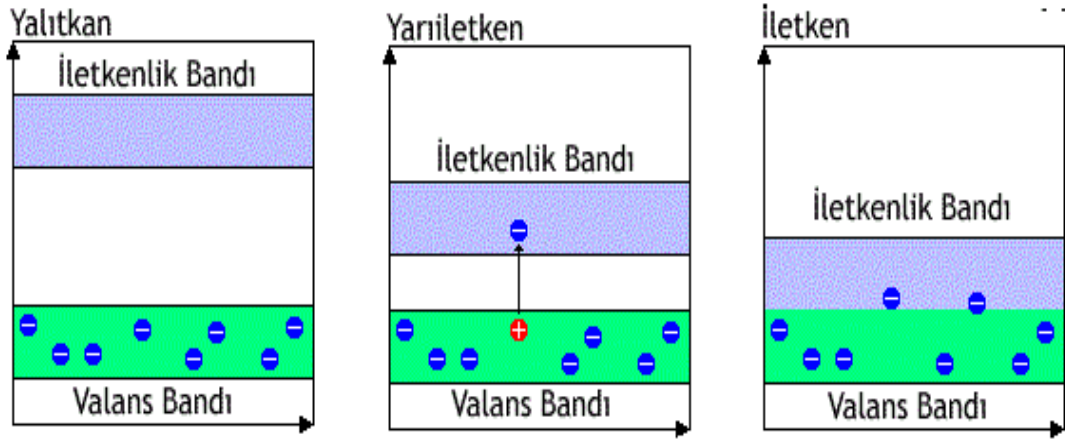
3.1 Yarıiletkenler

Elektrik akımını geçiren iki türlü iletken olabilir: elektronik geçişli ve iyonik geçişli iletkenler. Metallerde elektrik akımı taşıyıcıları elektronlar olduğu için metaller elektron iletkenlerdir. İyonik iletkenlerde elektrik akımını malzemenin iyonları ile taşınır. Elektrolitler iyon iletkenler grubunda olabilirler. Yarıiletken malzemeler hem elektron hem de iyon iletkenliğine sahip olabilirler. Yarıiletkenlerin çoğunluğu, silisyum (Si), germanyum (Ge), selenyum (Se), telluryum Te ve bileşik yarıiletkenler GaAs, InP, PbS, CdTe vb. elektron iletkenliğine sahiptirler (Cafer [19]).

Isı enerjisi etkisiyle yarıiletkenlerde serbest yük taşıyıcılarının (elektron ve deliklerin) konsantrasyonu artmaktadır. Bu yöntemle meydana gelen yük taşıyıcılarına ısıl veya dengeleyici yük taşıyıcıları denir. Bundan başka serbest yük taşıyıcıları; ışık, elektrik alan, basınç, γ -ışınları, hızlı parçacıkların (elektronların, protonların, nötronların, iyonların vb. bombardımanı) etkisiyle oluşabilirler (Cafer [19]).

Metallerde atomlar tam olarak iyonlaşmış durumdadırlar ve serbest elektronların konsantrasyonu atomların konsantrasyonuna eşittir. Bu nedenle metallerin özellikleri dış etkilerle çok az değişmektedir. Katkısız yarıiletkenlerde ise serbest elektronların konsantrasyonu ana atomların konsantrasyonundan çok azdır. Yarıiletken atomların dış etkilerle iyonlaşmasını ve serbest elektron konsantrasyonunu değiştirmek mümkündür. Bunun sonucunda yarıiletkenlerin özellikleri de değişebilmektedir (Cafer [19]).

Pauli ilkesine göre atomun her enerji düzeyine en çok iki ters yönlü spinlere sahip elektronlar yerleşebilir. Yarıiletken malzeme oluştuğunda, yani atomlar birbirine çok yaklaştığında, komşu atomların kuvvetli elektrik alanı etkisiyle valans elektronlarının enerji düzeyi bantta ayrılır. Valans elektronlarından oluşmuş enerji bantına valans bantı denir. Atomlardaki valans elektronlarının uyarılma düzeylerinden oluşan bant serbest veya iletim bantı olarak adlandırılır. İletim ve valans bantlarının arasında yasak bant bulunmaktadır (şekil 3.2) (Cafer [19]).



Şekil 3.2 İletken, yarı iletken ve yalıtkan hallerin band enerji seviyeleri

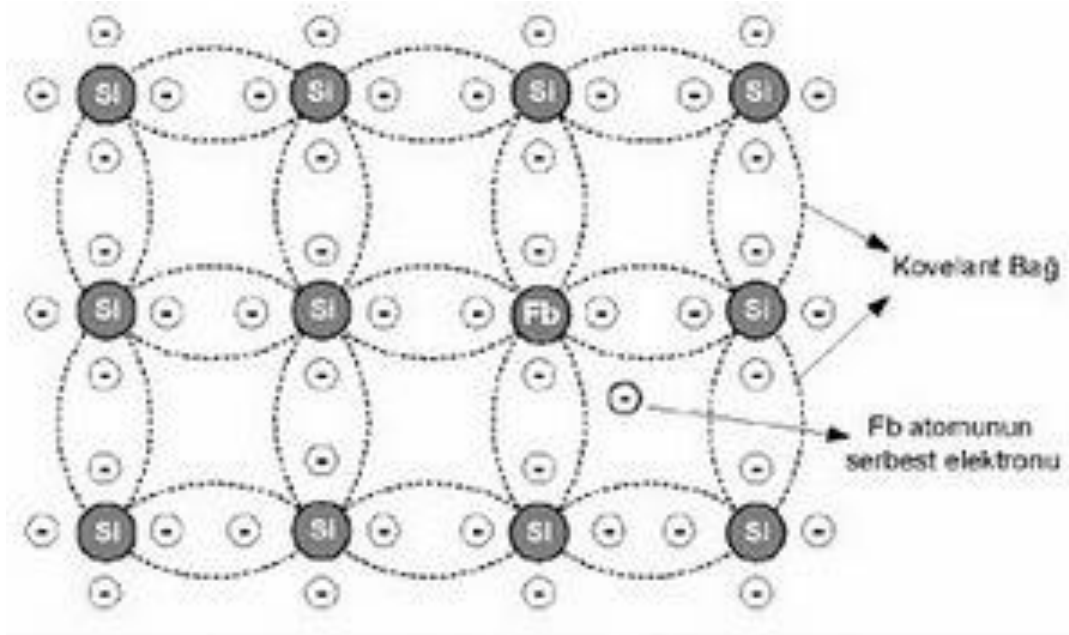
İletkenlik bandı E_c , valans bandı E_v ve yasak band E_g olarak gösterilir. Burada E_c iletim bandındaki elektronların en küçük enerjisidir. $E_c - E_v = E_g$ şeklinde bir bağıntıya sahiplerdir. E_g yasak enerji band genişliğini karakterize eder. Katkısız ve saf yarıiletkenlerde elektronların enerjisi yasak band enerjileri içinde olamaz. Yasak band aralığı yarıiletkenlerin kimyasal bağ türü ve atomların türü ile belirlenir. farklı yarıiletkenlerin yasak band genişliği 0,1 eV'dan 5eV'a kadar değişebilir (Cafer [19]).

Yarıiletkenlerin yasak band aralığı sıcaklık arttıkça değişir. Bu olayın nedenleri kristaldeki atomların ısısal titreşim genliğinin ve atomlar arası uzaklığın sıcaklıkla değişmesine bağlıdır. Yarıiletkenlerin çoğunda sıcaklık arttıkça yasak band genişliği küçülmektedir. Isı enerjisinin etkisiyle kristaldeki atomlar arası bağlar kopabilir ve bu bağın elektronu serbest kalabilir. Atomlar arası bağdan kopan elektronun yerinde boşluk meydana gelir ve boşluğa delik (hole) denir. Bu olay elektron delik çiftlerinin oluşması olarak tanımlanır. Bu olayın sonucunda iletim bandında serbest elektron ve valans bandında serbest delik meydana gelir. Aynı zamanda bu yarıiletkende bu olayın tersinide gözlemek mümkündür. Bu olaya rekombinasyon veya elektron delik çiftinin birleşmesi denir (Cafer [19]).

Yarıiletkenlerin çoğunluğunda oda sıcaklığında iletkenlik, katkı atomlarının etkisiyle değişir. İletkenliği katkılarla belirlenen yarıiletkenlere katkı yarıiletkenler denir.

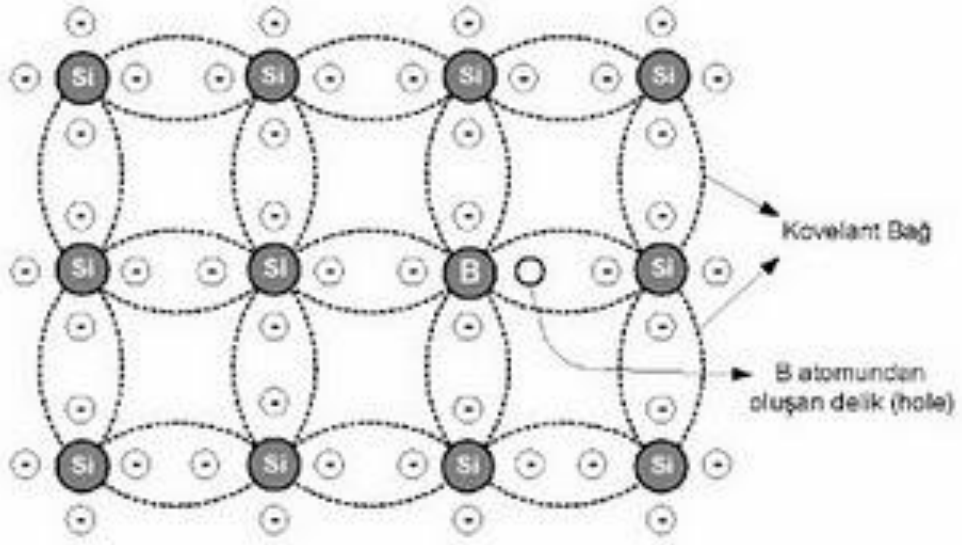
Silisyum yarıiletkeninde katkı iletkenliğin meydana gelmesini göze alalım. Silisyum örgüsünün bir düğümüne beşinci grup atomu olan fosforun yerleştiğini düşünelim (Cafer [19]). Fosforun dış yörüngesinde 5 elektron bulunmaktadır.

Fosforun dış yörüngesinde beş elektron bulunmaktadır, silisyumun ise son yörüngesinde dört elektron bulunmaktadır. Fosfor atomu silisyum örgüsünün bir düğümünü işgal ettiğinde, fosfor atomu dört valans elektronu komşu dört silisyum atomlarıyla kovalent bağ oluşturur ve fosforun bir elektronu bu şekilde açıkta kalır. Açıkta kalan elektron zayıf bağlıdır. Yüksek sıcaklıklarda fosforun etkisinden ayrılabilir ve serbest hale gelebilir. Yarıiletkende elektron veren katkı atomuna donör denir. İletkenliği donör katkısıyla karakterize olan yarıiletkene n-tipi yarıiletken denir. N-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlar ve azınlık yük taşıyıcıları deliklerdir (Cafer [19]).



Şekil 3.3 N-tipi yarıiletken maddenin oluşumu

Silisyum atomuna bor atomu katılırsa, valans bandında bulunan 3 elektronu silisyumun 3 atomuyla kovalent bağ oluşturacak fakat silisyumun bir elektronu boşta kalacak. Bor atomunun dolmamış bağına komşu silisyumdan bir elektron geçebilir ve bunun sonucunda negatif yüklü bor iyonu oluşur ve silisyum bağlarıyla hareket eden bir serbest delik meydana gelir. Yarıiletkende elektronları alan katkı atomlarına alıcı veya akseptör denir ve iletkenliği akseptör tipi katkıyla belirlenen yarıiletken, p-tipi yarıiletken olarak tanımlanır (Cafer [19]).



Şekil 3.4 P-tipi yarıiletken maddenin oluşumu

Yarıiletkenlerin kullanım alanları geniş bir yer kaplamaktadır. Bazı saf ve katkılı yarıiletkenlerin kullanım alanları da çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 Elektronikte yararlanılan yarı iletkenler ve kullanma yerleri [20].

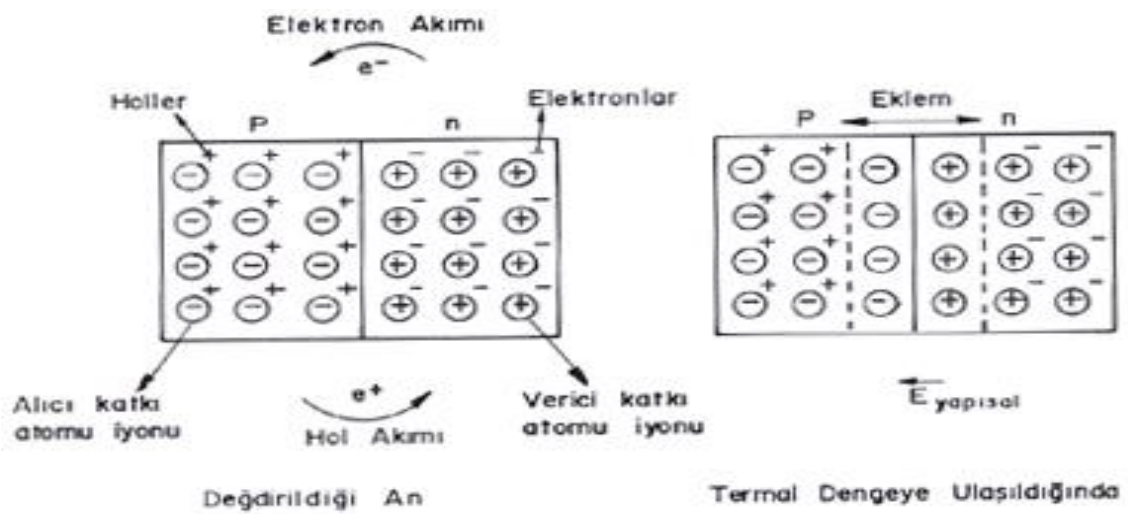
ADI	KULLANILMA YERİ
Germanyum (Ge) (Basit eleman)	Diyot, transistör, entegre, devre
Silikon (Si) (Basit eleman)	Diyot, transistör, entegre, devre
Selenyum (Se) (Basit eleman)	Diyot
Bakır oksit (kuproksit) (CuO) (Bileşik eleman)	Diyot
Galliyum Arsenid (Ga As) (Bileşik eleman)	Tünel diyot, laser, fotodiyot, led
İndiyum Fosfor (In P) (Bileşik eleman)	Diyot, transistör
Kurşun Sülfür (Pb S) (Bileşik eleman)	Güneş pili (Fotosel)

P veya N-tipi katkılıktan sonra bir araya getirilerek oluşturulan P-N eklemler fotovoltaik hücrelerin temelini oluşturmaktadır.

3.2 P-N Eklemler

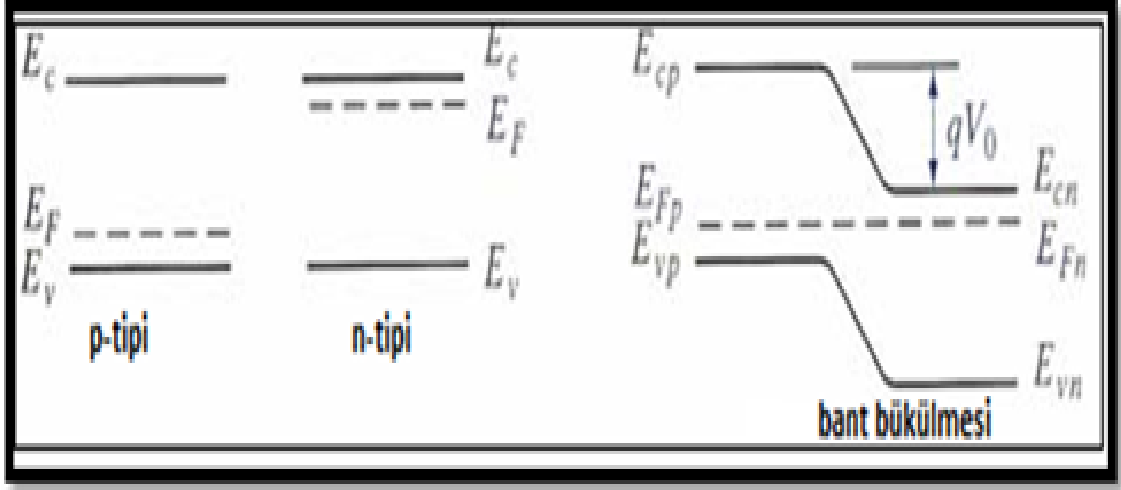
İki farklı tipli (p-tipi ve n-tipi) yarıiletkenler veya p-n eklemler mikroelettronik devre elemanlarının temelini oluşturmaktadır. İki kimyasal aynı malzemeden oluşan, fakat farklı iletkenlik tipine sahip olan kontak, elektron-delik eklemi veya p-n eklem olarak tanımlanır. P-n eklemler elektrik sinyallerinin lineer olmayan dönüşümü (doğrultucu modülasyon, jenerasyon vb.), ışının elektrik enerjisine dönüşümü için (Fotovoltaik hücreler) mikroelettronikte ve başka bir çok alanlarda geniş olarak kullanılmaktadır.

P- tipi ve n-tipi yarıiletkenler birbirleriyle temasa getirildiğinde, delik ve elektronların konsantrasyon gradyanı nedeniyle deliklerin difüzyonu p-tipi yarıiletkenden n-tipi yarıiletkene ve karşı yönde ise elektronların difüzyonu n-tipi yarıiletkenden p-tipi yarıiletkene doğrudur. Neticede, p-bölgesinin sınırında hacimsel negatif yük ve n-bölgenin sınırında hacimsel pozitif yük oluşmaktadır. Böylece, kontakın p-bölgesinde negatif yüklü akseptör iyonlarından oluşmuş, n-bölgesinde pozitif yüklü donör iyonlarından oluşmuş ve birbirinden ayrılmış yükler, güçlü bir elektrik alan meydana getirmektedir. P-n ekleminin iç elektrik alanı olarak adlandırılan bu alan, kontakın n-bölgesinden p-bölgesine yönlendirilmiştir ve elektronlarla deliklerin geçişlerini engellemektedir. Sonuçta elektronların difüzyon akışı (n-tipi yarıiletkenden p-tipi yarıiletkene), elektrik alanın etkisiyle meydana gelen karşı yöndeki elektronların sürüklenme akışı ile dengelenmektedir. Benzer şekilde, deliklerin difüzyon akışı (p-tipi yarıiletkenden n-tipi yarıiletkene) ve karşı yöndeki deliklerin sürüklenme akışı dengelenmektedir. Bu yük geçişleri sistem dengelenene kadar devam etmektedir.



Şekil 3.5 P-N kavşak oluşumu

P-N eklemlerde tüm P ve N atomlarının iyonlaşmış olduğu kabul edilir. Yani P (akseptor)'lerin enerji düzeyi valans bandına, N (donor)'lerin enerji düzeyi iletim bandına yakındır (şekil 3.6) (Cafer [19]).



Şekil 3.6 P-N kavşağında enerji bandı

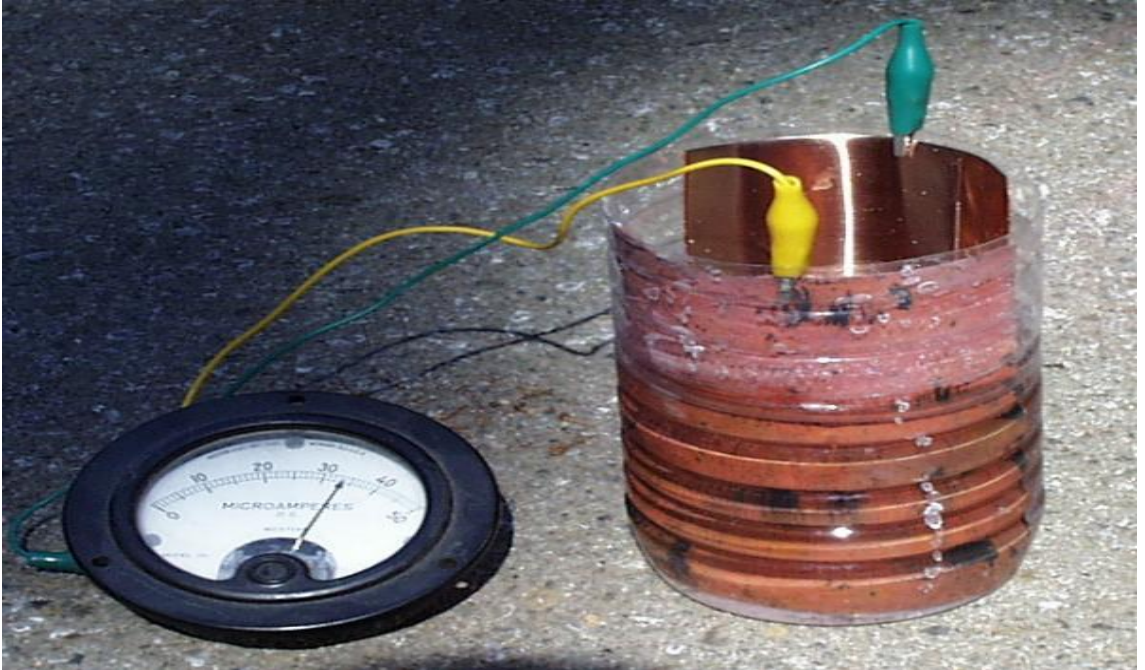
Yarı iletkende katkı konsantrasyonu arttıkça hacimsel yük bölgesinin kalınlığı azalmaktadır. Hacimsel yük bölgesinde serbest yük taşıyıcılarının sayısı az olduğunda direnci büyüktür (Cafer [19]).

BÖLÜM 4

FOTOVOLTAİK HÜCRELERİN GELİŞİM SÜRECİ VE SINIFLANDIRILMASI

Fotovoltaik hücreler, gelen ışığı soğurarak direk olarak elektriğe çeviren, yarıiletken malzemeler kullanılarak üretilen aygıtlardır. Alternatif enerji olarak kullanılmakta ve önemi giderek artmaktadır. İlk olarak keşfi de diğer buluşlar gibi tesadüfen meydana gelmiştir.

1839 yılında Alexandre-Edmond Becquerel, iki metal elektrotu, elektrolit içerisine batırdıktan sonra ışığa maruz kalan elektrotlar arasında bir akım oluştuğunu fark ederek fotovoltaik etkiyi keşfetmesiyle fotovoltaik hücrelerin temelleri atılmıştır [21].



Şekil 4.1 Elektrolit içerisine batırılmış iki elektrot

Fotovoltaik hücreler; uzun ömürlü, dayanıklı, kayda değer bir çevre kirliliği oluşturmayan yarı iletken aygıtlardır. Çalışmaları sırasında hiçbir elektriksel sorun çıkarmazlar ve çok az bakım gerektirirler. Modüler yapıda olan fotovoltaik hücreler birbirlerine seri ve paralel bağlanabilirler. Çok küçük güç gereksinimlerini karşılayabildikleri gibi, kendi başına bir güç santrali gibi de çalışabilirler. Verimlerinin düşük ve ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması fotovoltaik hücre sistemlerinin en büyük dezavantajıdır. Ancak 20 yıl içerisinde maliyetinin şebeke elektriği ile yarışabilecek düzeye geleceği umulmaktadır (Alaçakır [18]).

1940 yılında Bell laboratuvarlarında çalışma yapan Russel Shoemaker Ohl p-n eklemelerini keşfetmiştir. Bu buluşla yaptığı fotovoltaik hücrede %1'lik bir verim bularak patent almıştır [21]. Fotovoltaik hücre yapımında yarıiletken teknolojisi kullanılmaktadır ve günümüzde hala inorganik fotovoltaik hücrelerin temelini, ışık soğurma ve yük ayrımı oluşturmaktadır. Bu sistem içinde soğurulan ışığı elektron-boşluk çiftine dönüştürme görevini yarıiletkenler, yük ayrımını ise hücre içinde bulun p-n eklem sayesinde oluşan elektrik alanlar üstlenmektedir [22].

25 Nisan 1954'te bir kimyacı olan Calvin Fuller ve bir fizikçi olan Gerald Pearson silisyumda karşılaştıkları birkaç problemden sonra arsenik ve boronla p-n eklemi oluşturarak fotovoltaik hücre yaparlar. Birkaç hücreyi birbirine bağladıktan sonra "solar battery" adını verdikleri bir fotovoltaik hücre oluştururlar. Bu sistemi bir oyuncak dönme dolabını çevirmede kullanırlar [21]. P-tipi ve n-tipi yarı-iletkenlerle oluşturulan ilk p-n eklemine, CdS (Kadmiyum sülfür) ve Si (Silisyum) kullanılmıştır. Daha sonra Silisyum p-n eklemi kullanılarak %15 verim elde edilmistir. İlk fotovoltaik hücrelerin verimi %1-2 iken bugün %24'lere varan güç dönüşüm verimine sahip fotovoltaik hücreler geliştirilmiştir [21].

1974 yılında, Alan Heeger, Alan Mcdiarmid ve Hideki Shirkawa'nın yarıiletken polimerleri keşfiyle fotovoltaik hücre araştırmaları yeni bir boyut kazanmıştır. Bu alandaki ilk buluş 1979 yılında Tang isimli bilim adamının iki katlı organik fotovoltaik hücreyi oluşturmasıyla gerçekleşmiştir. Bu buluş 1986 yılında yayınlanmıştır. Bu süreçten sonra organik fotovoltaik hücrelerdeki araştırma ve geliştirme hız kazanarak devam etmiştir.

Farklı malzemelerin kullanıldığı 3 çeşit fotovoltaik hücre bulunmaktadır. Bu hücrelerde maliyeti düşük olarak hedeflenende vardır, maliyetine rağmen yüksek verim hedeflenen hücrelerde vardır.

Mono-Kristal ve Poli-Kristal Silisyum Fotovoltaik Hücreler ; Kristal Silisyum fotovoltaik hücre uygulamaları, birinci nesil fotovoltaik teknolojiler olarak adlandırılmaktadır. 1954 yılında Bell Laboratuvarlarında yaptığı ilk fotovoltaik hücrede silisyum kullanılmıştır. Zamanla verimlerinin kayda değer oranda artması silisyumun yarıiletken teknolojisinde önemli bir yere gelmesine neden oldu. Aynı zamanda Si, çok kolay bulunan bir hammaddedir. Yüksek verimlilik, ekolojik tesirinin az olması ve kristal formunun pratikte azalmasının mümkün olmaması nedeniyle fotovoltaik hücre yapımında kullanılan önemli bir yarıiletken malzemedir. Fakat, oldukça pahalı bir teknolojidir. Si hücre üretiminin maliyeti, modül üretiminin %50'sine eşdeğerdir. Üretim maliyetlerinin pahalı olması, bu sistemlerin yüksek verimle çalışmasına rağmen yaygın kullanılmasına engel teşkil etmektedir (Goetzberger ve Hebling [23]).



Şekil 4.2 İnorganik fotovoltaik hücre

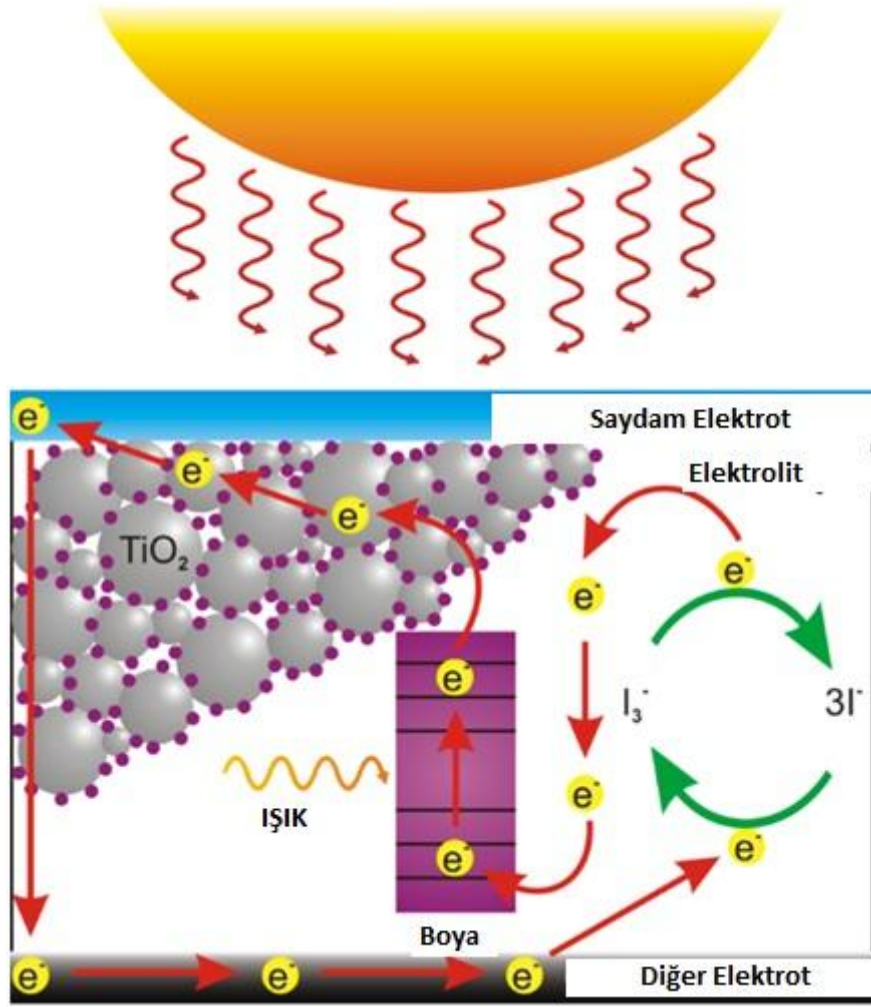
İnce Film Fotovoltaik Hücreleri; Birinci nesil fotovoltaik hücre teknolojisini olan kristal silisyum fotovoltaik hücrelerinden sonra ikinci sırayı ince film fotovoltaik hücreleri almaktadır. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda; amorf silisyum (a-Si), kadmiyum selen (CdSe), kadmiyum tellür (CdTe), bakır indiyum galyum diselenür (CIGS), ince film Si gibi malzemeler, ince film fotovoltaik hücre için önemli malzemeler olarak göze çarpmaktadır. İnce film fotovoltaik hücre üretimine başlanmasındaki en büyük sebep,

daha düşük üretim maliyetlerinin olmasıdır. Direkt bant aralıklı yarı iletken malzemelerde olduğu gibi, ince film yarı iletken malzemeler silisyuma göre çok daha yüksek soğurma katsayısına sahiptirler. Bu yüzden silisyum fotovoltaik hücrelerde, ince film fotovoltaik hücrelerine göre daha kalın bir filme ihtiyaç vardır. Buna göre pahalı yarıiletken malzemenin kullanımını azaltılarak maliyet düşürülmüş olur.

Boya Duyarlı Fotovoltaik Hücreler: Üçüncü nesil fotovoltaik hücreler olarak adlandırılmaktadır. Hibrit fotovoltaik hücreler, katıhal boya duyarlı fotovoltaik Hücreler, nanoparçacıklarla boya duyarlı fotovoltaik hücreler, çok ince soğurucu fotovoltaik hücreler ve organik fotovoltaik hücreler gibi hücreler bu gruba dahildir.

Hibrit Fotovoltaik Hücreler: hem organik hemde inorganik malzemelerin nano yapılı birleşiminden oluşur. Dolayısıyla yarıiletken nano parçacıkların kendine özgü özellikleriyle organik polimerik malzemelerin özelliklerini birleştirir. İnorganik yarı iletken nano parçacıklar yüksek absorpsiyon katsayısına sahip olabilir ve parçacık boyutuna bağlı olarak optik band aralığının ayarlanabilme özelliğine sahiptir.

Katıhal Boya Duyarlı Fotovoltaik Hücreleri: Bu tür fotovoltaik hücrelerde sıvı elektrot yerine p-tipli bir yarı iletken yada organik boşluk ileten malzemeler kullanılmaktadır. Böylece sıvı elektrolitin sızması veya buharlaşması sorununun ortadan kaldırılması hedeflenmektedir. Organik delik ileten malzeme, boyadan boşlukları iletebilecek durumda olmalıdır. Görünür bölgede ışığı soğurmamalıdır.



Şekil 4.3 Boya duyarlı fotovoltaiik hücre yapısı [42]

Nanoparçacıklarla Boya Duyarlı Fotovoltaiik Hücreleri: Bu tür fotovoltaiik hücreleri, boya yerine inorganik nano parçacıklar veya kuantum noktaları kullanılarak elde edilebilir. Kuantum noktalar veya inorganik nano parçacıklar, TiO_2 üzerine kuantum nokta çözeltisi kullanılarak veya doğrudan kuantum noktalar TiO_2 elektrotlar üzerine büyütülerek kaplanabilir. Boya yerine inorganik parçacıkların veya kuantum noktaların kullanılması band aralıklarının parçacık boyutlarına bağlı olarak ayarlanabilmesinden dolayı soğurma aralığının ayarlanabilmesi avantajını doğurur. Çalışma prensibi katı hal boya duyarlı fotovoltaiik hücrelerine benzer [24].

Çok İnce Soğurucu Fotovoltaiik Hücreler (ETA): Bu tür hücreler konsept olarak katı hal boya duyarlı fotovoltaiik hücrelere benzerdir. Bu tip fotovoltaiik hücrelerin avantajı yarıiletken film içerisindeki çoklu saçılmaların artmasıdır. Bu konsept kullanılarak hazırlanan fotovoltaiik hücrelerin verimi %4 ve üzeridir.

Organik fotovoltaiik hücreler aşağıda kapsamlıca incelencektir.

ORGANİK FOTOVOLTAİK HÜCRELER

İnorganik fotovoltaik hücrelerinden elde edilen yüksek verime rağmen, sahip oldukları maliyet, gerektirdiği ileri teknoloji gibi dezavantajlardan dolayı çalışmalar başka bir alan olan organik malzemelerle hazırlanan organik fotovoltaik hücrelere kaymıştır. Yapılan çalışmalarda da elde edilen sonuçlar hızla gelişim göstermiştir.

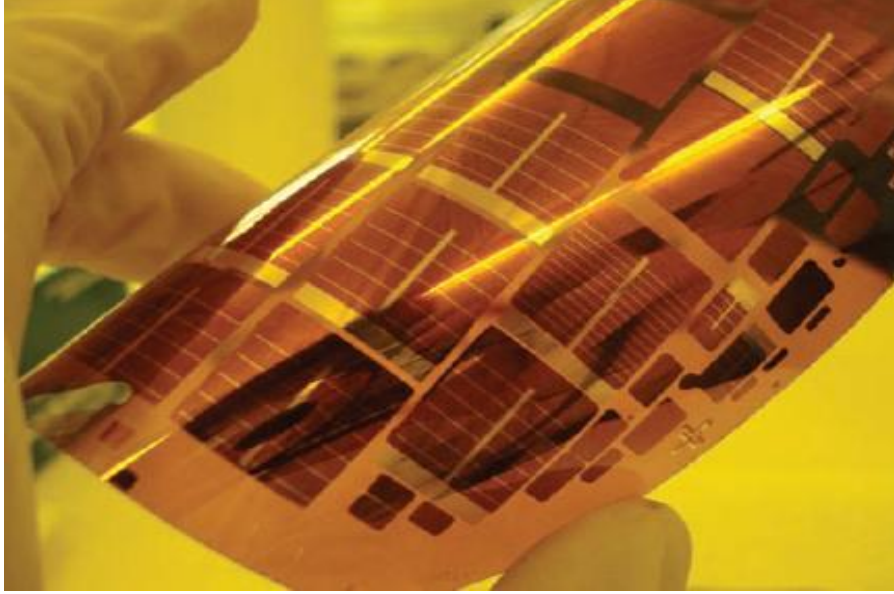
Üçüncü nesil fotovoltaik hücre teknolojisi olarak adlandırılan organik fotovoltaik hücreler, iki metal elektrot arasına organik bazlı malzemelerin sıkıştırılmasıyla oluşturulmaktadır. Bu organik bazlı malzemelerde, yarıiletken polimerlerin kullanılması kayda değer bir gelişim sağlamıştır (Winder ve Sarıçiftçi [25]). En sık kullanılan aygıt tipi, biri donör (p) diğeri akseptör (n) malzemelerin bir arada kullanıldığı şeklindedir. Ayrıca kullanılan malzemelerin kimyasal yapılarını değiştirebilmek mümkündür. Bu şekilde malzemelerin soğurma aralığının güneş spektrumuna daha uygun hale getirilerek daha fazla foton enerjisi soğurabilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 5.1 Organik fotovoltaik hücre (şarjlı fener olarak kullanılmakta)

Verimlerinin inorganik fotovoltaiik hücrelere oranla düşük olmasına rağmen; esnek yüzeylere kaplanabilmesinden dolayı geniş alanlarda kullanılabilmesi, hafif ve ucuz olmaları, kolayca üretilibilmeleri nedeniyle cazip bir hal almaktadır.

Kullanılan malzemeler, devre tipleri ve çalışma prensibi daha sonraki bölümlerde incelenecektir.



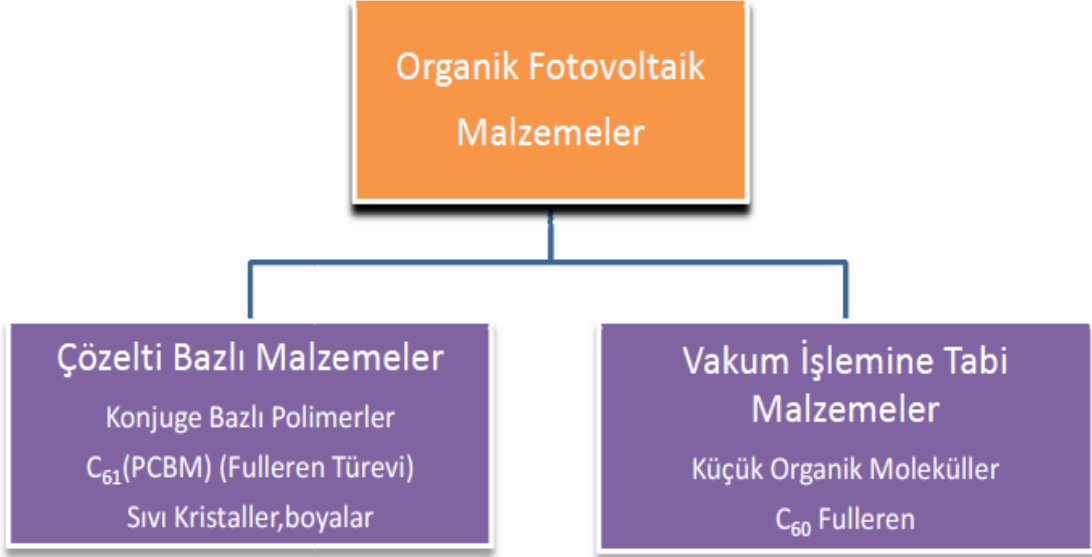
Şekil 5.2 Esnek yüzeye hazırlanmış organik fotovoltaiik hücre

5.1 Kullanılan Malzemeler

Yakın zamana kadar elektronik endüstrisinde yalıtkan malzeme olarak kullanılan polimerlerin, iletken olabildiğinin Alan Heeger, Alan McDiarmid ve Hideki Shirakawa tarafından keşfi, organik fotovoltaiik hücrelerin gelişimindeki ilk önemli aşama olmuştur. Bu tip iletken polimerlere konjuge polimerler denmektedir. Bu da organik fotovoltaiik hücrelerinin oluşumunda büyük katkı sağlamıştır.

Organik fotovoltaiik hücreler her ikisi de organik olan biri donör (elektron veren) diğeri akseptör (elektron alan) malzemelerin birleşiminden oluşmaktadır. Organik fotovoltaiik hücrelerin genel yapısı ışık yayan diyotlarınkine (LED) benzemektedir. Bu aygıtlar sandviç geometrisinde hazırlanmaktadır. Alt taban olarak saydam, iletken elektrotlar kullanılmaktadır (indiyum kalay oksit (ITO) kaplı cam ya da plastik altlıklar). ITO elektrotlar saydam ve iletkendir. ITO elektrot, kimyasal dağlama (etching) yöntemi kullanılarak yapılandırılabilir. Saydam, iletken alt taban üzerine polistren sulfonik asit (PSS) katkılanmış poli (etilen-dioksitiyofen) sulu çözeltiden kaplanır. Bu PEDOT:PSS

tabakası, ITO elektrotun yüzey kalitesini iyileştirir ve de delik enjeksiyon veya ekstraksiyonuna yardımcı olur. Aynı zamanda bu elektrotun iş fonksiyonu, PEDOT tabakasının kimyasal/elektrokimyasal redoks reaksiyonlarıyla değiştirilebilir. Aktif tabakalara (genellikle polimer-fulleren) ıslak işlem veya vakum kaplama tekniği uygulanır (Hoppe ve Sarıçiftçi [31]).



Şekil 5.3 Organik fotovoltaik hücrelerinde kullanılan malzemeler

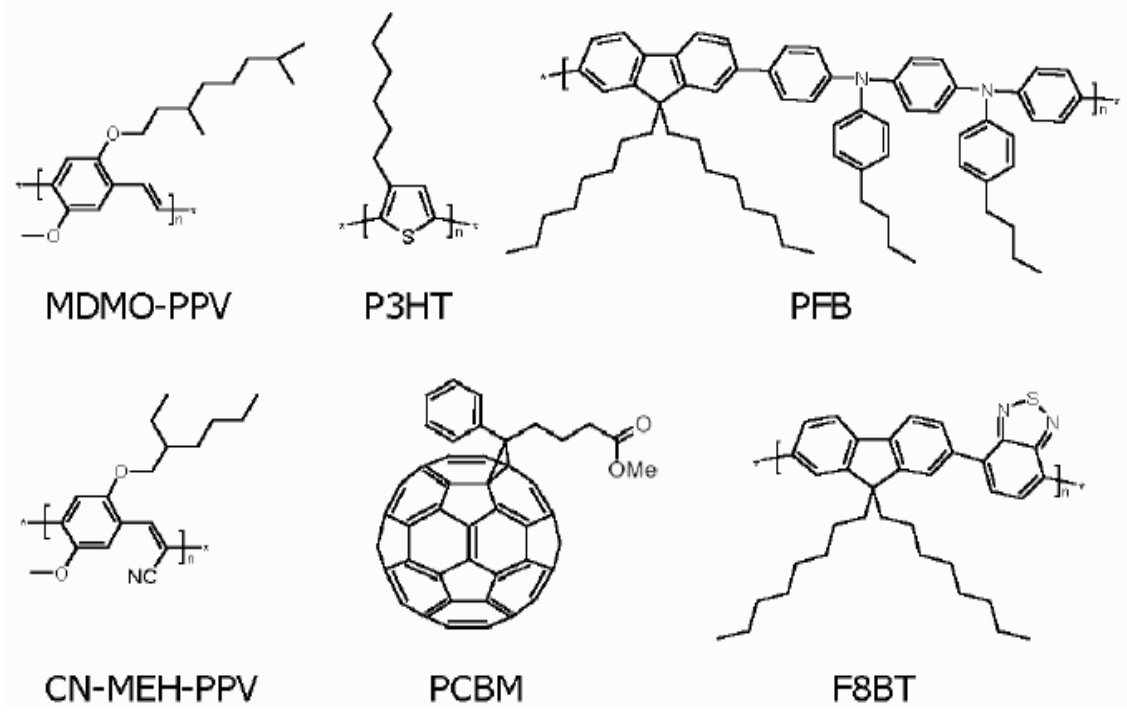
Organik fotovoltaik hücre araştırmaları iki tür malzeme üzerine yoğunlaşmıştır: Islak işleme tabii ve vakum işleme tabii malzemeler. Islak işleme tabii malzemelerin genel, organik çözücülerde çözünmesi gerekmektedir. Organik malzemelere kazandırılan yan zincir fonksiyonelliği onların genel organik çözücülerde çözünmelerine olanak sağlar. Islak işleme tabii malzemelere dönel kaplama (spin coating), bıçak ağzı ile kaplama (doctor blading), elek baskı (screen printing), püskürtmeli baskı (ink jet printing) işlemleri uygulanabilir. Yarı iletken polimerler, fulleren türevleri organik çözücülerde kolaylıkla çözünebildiklerinden bu gruba dahildirler (Hoppe ve Sarıçiftçi [31]).



Şekil 5.4 Değişik çözücülerde birkaç polimer (Sarıçiftçi ve Mozer [27])

Polimerler uzun makro moleküller oldukları için onları buharlaştırmak mümkün değildir. Genel organik çözücüler içerisinde çözünemeyen bazı küçük organik moleküller vakum işlemine tabii olurlar ve süblimleştirme yöntemi kullanılarak vakumda kaplanabilirler. Bu tür güneş fotovoltaik hücrelerinde ön elektrot (ışığın geldiği taraf olduğu için böyle adlandırılır) ITO'dur. Arka elektrot (üst kontak olarak da adlandırılır) olarak genellikle alüminyum kaplanır.

Aktif tabaka olarak kullanılan malzemelerden en iyi sonuç veren malzemelerden ikisi P3HT ve PCBM'dir. Fulleren türevi olarak bilinen PCBM bilinen en iyi N tipi malzemelerden biridir. Fotovoltaik hücre sistemlerinde akseptör olarak görev yapar ve optik soğurması görünür bölgenin altındadır. P3HT ise PCBM'e iyi uyum sağlayan, donör olarak görev yapan bir malzemedir. Şekil 5.4'de organik fotovoltaik hücrelerinde kullanılan bir takım polimerlerin yapıları verilmiştir.



Şekil 5.5 Organik fotovoltaik hücrelerinde kullanılan birkaç konjuge polimer ve fulleren türevinin kimyasal yapısı (Hoppe ve Sarıçiftçi [31])

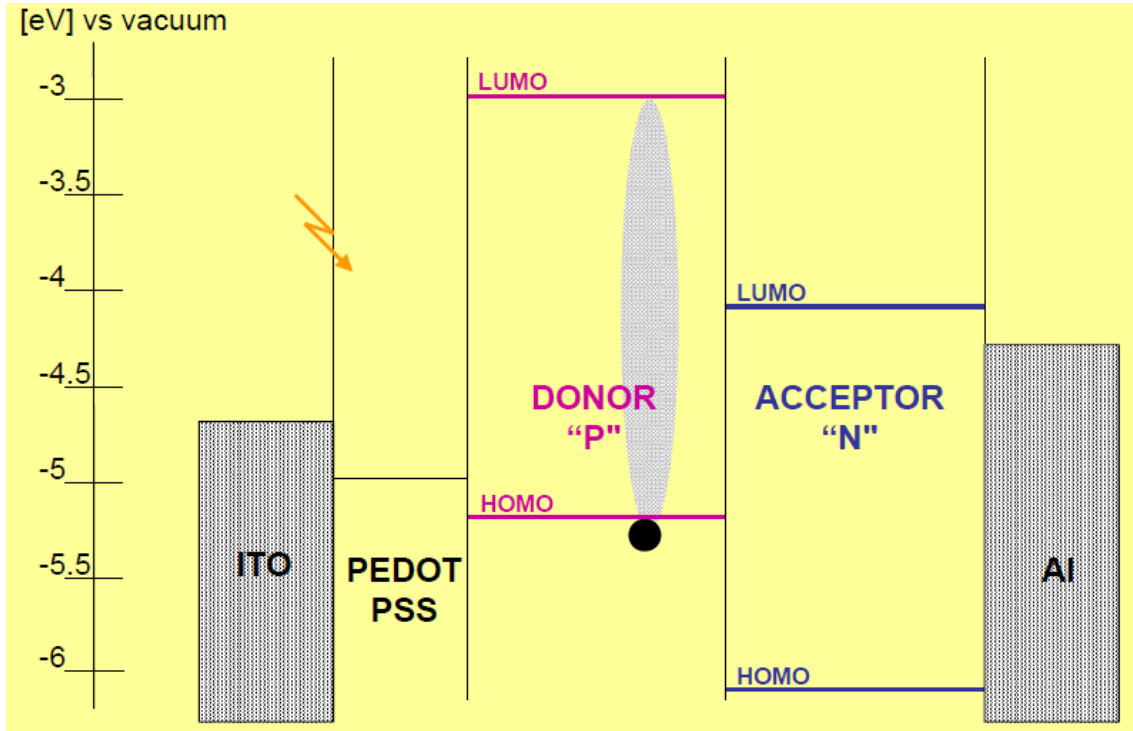
Delik ileten donör tipli polimerlerin en önemli üç temsilcisi MDMO-PPV (poli[2-metoksi-5-(3, 7-dimetiloktiloksi)]-1, 4-fenilviniylen), P3HT (poli(3- heksiltiophen-2, 5-dil) ve PFB (poli (9-9'-dioktilfluoren-co-bis-N-N'-(4-butylfenil)-bis-N-N'- fenil-1, 4-fenilendiamin)dir. Bunlar, CN-MEH-PPV (poli[2-metoksi-5-(2'-etilheksiloksi)-1, 4-(1-siyanovinilen)-fenilen) ve F8TB (poli(9, 9'-dioktilfluoreneko-benzotriazol) gibi elektron ileten akseptör polimerlerle ve PCBM (1-(3-metoksikarbonil) propil-1-fenil [6, 6] C61) olarak adlandırılan çözünebilir C60 türeviyle birlikte gösterilmişlerdir. Yan zincir çözünebilirliklerinden dolayı bu malzemeler çözelti bazlıdır ve polimerler de foto ve elektroluminesans özelliği göstermektedirler (Hoppe ve Sarıçiftçi [26]).

5.2 Çalışma Prensibi

İnorganik kristal malzemelerdeki fotovoltaik özellikler, enerji bandı modeliyle açıklanabilir. Moleküler veya polimerik organik fotovoltaik hücrelerinde ise durum çok daha karışık ve açıklanması zordur. İnorganik malzemelerin aksine organik malzemelerde, üç boyutlu kristal yapı bulunmazken; farklı molekül içi ve moleküller arası etkileşimler mevcuttur (Wohrle ve Meissner[28]). Organik malzemelerin fotofiziği henüz daha tam olarak anlaşılmiş değildir. İnce film organik fotovoltaik hücrelerin çalışma prensibini moleküler özellikler seviyesinde açıklayan teorik bir model henüz

mevcut değildir. Konjuge polimerlerde fotovoltaiik etki, literatürde çok basitleştirilmiş düzeyde ele alınmaktadır. Organik fotovoltaiik hücrenin çalışma prensibini anlamak için inorganik p-n eklemi temel alınmaktadır (Lane [30]). Organik fotovoltaiik hücrelerinde ışığın elektrik akımına dönüştürülme işlemi arka arkaya dört adımda gerçekleşir:

- 1) Eksiton (elektron-delik çifti) yaratılması için foton soğurulması,
- 2) Donor ve akseptör ara yüzeyine eksiton difüzyonu (yayılması),
- 3) Bu bölgede yük ayrımının olması,
- 4) Son olarak da doğru akım elde etmek için deliklerin anotta ve elektronların katotta toplanması (Hoppe vd. [31]).



Şekil 5.6 Organik fotovoltaiik hücre çalışma prensibi (Sarıçiftçi ve Mozer [27]).

Organik malzemenin soğurma spektrumu fotovoltaiik hücrenin ışığa hangi aralıkta karşılık vereceğinin bir ölçüsüdür. Bu da polimerin ya da molekülün kimyasal yapısına bağlıdır. Birçok boya ve molekül kuvvetli soğurucudur. Eğer malzemenin bant aralığı içindeyse sadece birkaç yüz nanometre film, ışığın önemli bir kısmını soğurmaya yeterlidir.

Foto dönüşümde ilk önemli adım soğurmadır. Soğurma verimliliği malzemenin soğurma spektrumuna, kalınlığına ve aygıt tipine bağlıdır. Organik yarı iletkenlerde optik uyarılmalar oda sıcaklığında bağlı elektron delik çifti (eksiton) oluşumuna yol

açar. Organik yarı iletken malzemelerde uyarılmış haldeki elektronlar ile temel haldeki elektron boşlukları arasında kuvvetli bir kulombik bağ mevcuttur. Eksiton yayılma (difüzyon) verimliliği, eksiton difüzyon uzunluğu ve donör-akseptör ara yüzeyindeki morfolojiyle belirlenir. Eksitonlar oluştuktan itibaren 5-15 nanometre uzunluğuna kadar beraber yayılabilirler. Sonra yeniden birleşip bunun sonucunda dışarıya ışık verebilirler de vermeyebilirler de. Fotovoltaik amaçlar için eksitonlar, yaşam süreleri içerisinde yeniden birleşmeden (rekombine olmadan) önce birbirlerinden ayrılmalıdırlar. Eksitonların verimli ayrılması için güçlü elektrik alanları değerlendirilebilir. Potansiyelin ani değiştiği, bir ara yüzeyde güçlü elektrik alanlar vardır ($E=-\Delta U$). Eksiton ayrılması elektron bir fazda, delik diğer fazda kalacak şekilde ara yüzeyde oluşabilir. Eksiton ayrılma aynı zamanda hacimsel tuzak bölgelerinde gerçekleşebilir. Böylece bir tuzaklanmış taşıyıcı ve bir potansiyel olarak serbest taşıyıcı oluşur. Elektronla ve delikler ayrılır ayrılmaz elektrotlara hareket ederler. Organik fotovoltaik hücrelerinin büyük çoğunluğunda oluşan elektron ve delikler zıt kutuplara taşınmaktadır. Bu taşınma işlemi, elektrotların asimetrisi (farklı iş fonksiyonları) veya uygulanan potansiyel sebebi ile oluşan içsel elektrik alanda gerçekleşmektedir (Yoshino [32]). Geri yük transferlerini önlemek amacı ile elektron ve elektron boşlukları tercihen farklı malzemelerde veya fazlarda taşınmaktadır. Örneğin donör-akseptör hücrelerde, elektron iletkenliği iyi olan akseptör ve boşluk iletkenliği iyi olan donör malzeme kullanımı idealdir.

Yüksek yük toplama verimliliği için organik yarı iletken malzeme ile metal elektrot arasında enerji bariyeri olmaması gerekmektedir. Bazı durumlarda iki malzeme arasındaki enerji bariyerini gidermek için ilave bir malzeme daha kullanılması yük toplama verimliliğini arttırmaktadır (Sahaheen [33]).

5.3 Aygıt Tipleri

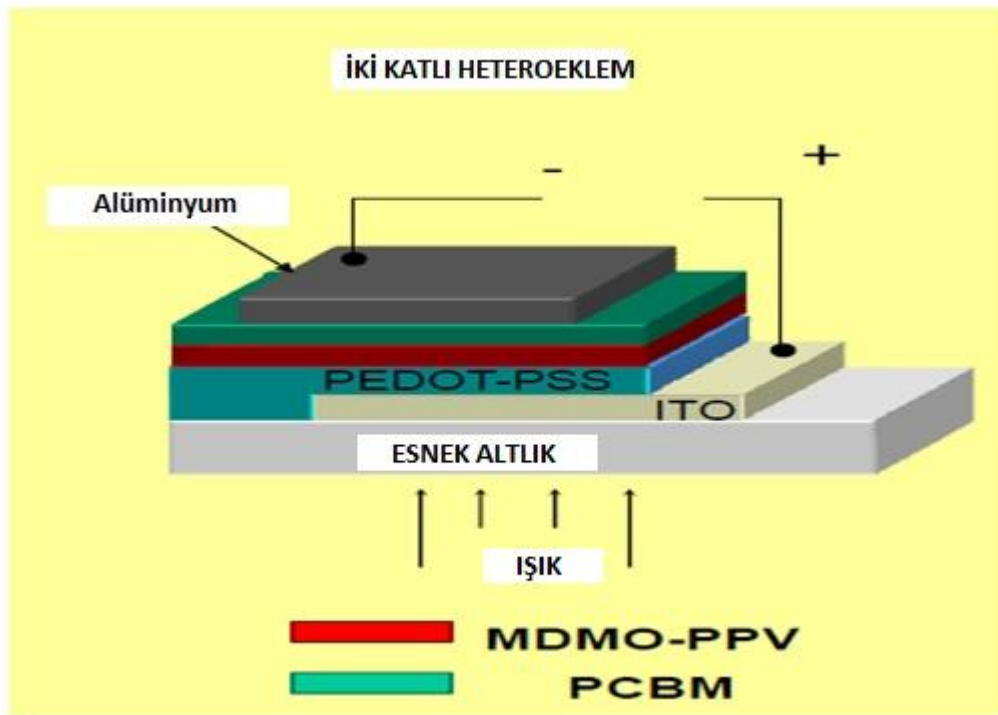
5.3.1 Tek Tabaka Fotovoltaik Hücreler

Oluşturulan ilk tip fotovoltaik hücrelerdir. İş fonksiyonu farklı iki farklı metal elektrot arasına sıkıştırılmış yarı iletken polimerlerden oluşmaktadır. Fotovoltaik gereksinimlere göre; organik yarı iletkenlerde oluşan eksitonlar serbest yük taşıyıcılarına dönüşmelidir. Tek başına polimer içeren aygıtlarda, eksitonları ayırmanın en önemli yolu elektrik alanları değerlendirmektir. Bu tür fotovoltaik hücrelerin çalışmaları, karanlıkta metal-yarı iletken-metal (MIM modeli) ile açıklanırken, sadece schottky kontak oluşumuyla

açıklanmaktadır. Bu tür aygıtlarda, sadece kısıtlı bir bölge fotoakım yaratılmasına katkıda bulunduğundan bu tür fotovoltaik hücrelerin verimi oldukça düşüktür.

5.3.2 İki katlı Heteroeklem Fotovoltaik Hücreler

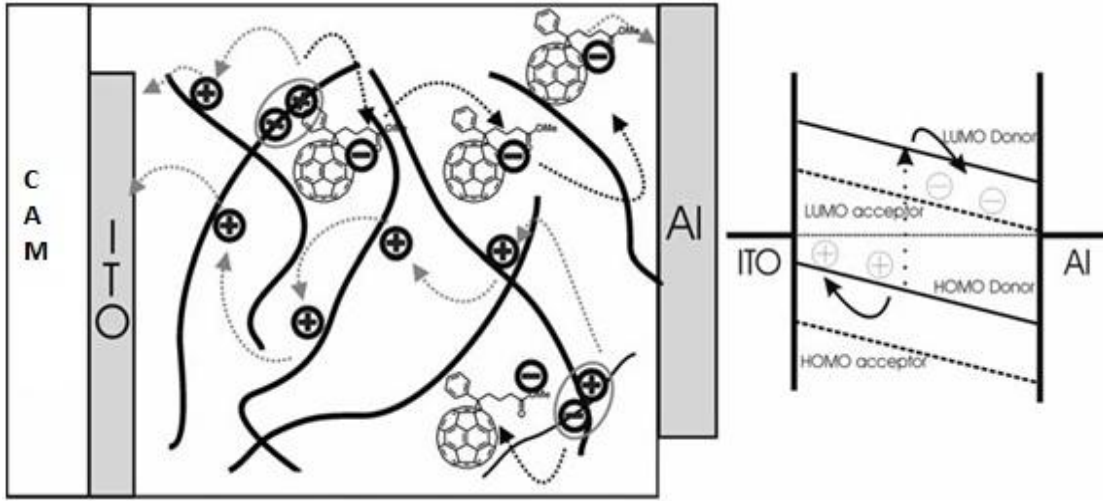
İki katlı bir aygıt donör ve akseptör malzemeyi üst üste sıkıştırarak oluşturulabilir. Donör ve akseptör arasındaki etkileşim ikisinin birbirine temas ettiği geometrik ara yüzeyde sağlanır. Konjuge polimerler ve fullerenler üzerine yapılan fotofizik çalışmaları, konjuge polimerlerden fullerenlere ultra hızlı yük transferi olduğunu göstermektedir. Bu tür aygıtların verimi, eksitonların sadece güçlü elektrik alan bulunduğu ara yüzeylerde ayrılması sebebiyle kısıtlıdır.



Şekil 5.7 İki katlı fotovoltaik hücre (Sarıçiftçi ve Mozer[27])

5.3.3 Hacim Heteroeklem Fotovoltaik Hücreler

Bu aygıt tipinde donör ve akseptör bileşenleri nanometre ölçeğinde iç içe nüfus eden ağ oluşturmak suretiyle karıştırılırlar. Bu yöntemde donör ve akseptör arasındaki kontak alanının maksimum olması hedeflenir. Donör ve akseptör her zaman birbirleri ile tam olarak karışamayabildiklerinden faz ayrımı ortadan kaldırılarak veya azaltılarak, donör ve akseptör arasında iç içe nüfus eden ağlar oluşturularak arttırılabilir.



Şekil 5.8 Hacim heteroeklem fotovoltaik hücre (Sarıçiftçi ve Mozer[27])

5.4 Organik Fotovoltaik Hücre Karakterizasyonu

Fotovoltaik hücreyi tamamlayıp fotoakım oluşturduktan sonra, bu sistemi karakterize etmenin en iyi yollarından biri akım-gerilim (I-V) grafiklerini incelemektir. Bu grafikteki iki nicelik açık devre gerilimi V_{oc} ve kısa devre akım yoğunluğu J_{sc} 'dir. J_{sc} aydınlatma altında sıfır gerilimde oluşan fotoakımdır ve birçok parametreye bağlıdır; ışık şiddeti, dalga boyu ve malzeme soğuruma aralığı dahil. Aynı zamanda aygıttan geçen akımın, aygıtın aktif alanına bölünmüş halidir. Işık şiddeti düşüğe J_{sc} 'de doğru orantılı olarak düşük olur. V_{oc} ise hiç akım akmadığı zaman sistemden geçen gerilimdir. Kullanılan kontak metallere sahip olduğu iş fonksiyonlarına ve aktif tabaka olarak kullanılan malzemelere oldukça bağlı değişim göstermektedir. Kullanılan malzemelerin enerji seviyeleriyle (p) tipi malzemenin işgal edilebilir en yüksek moleküler orbital (HOMO) seviyesi ile n tipi malzemesinin işgal edilmemiş en düşük moleküler orbitali (LUMO) seviyesi farkı orantılıdır. Hücredeki güç dönüşüm verimi (η),

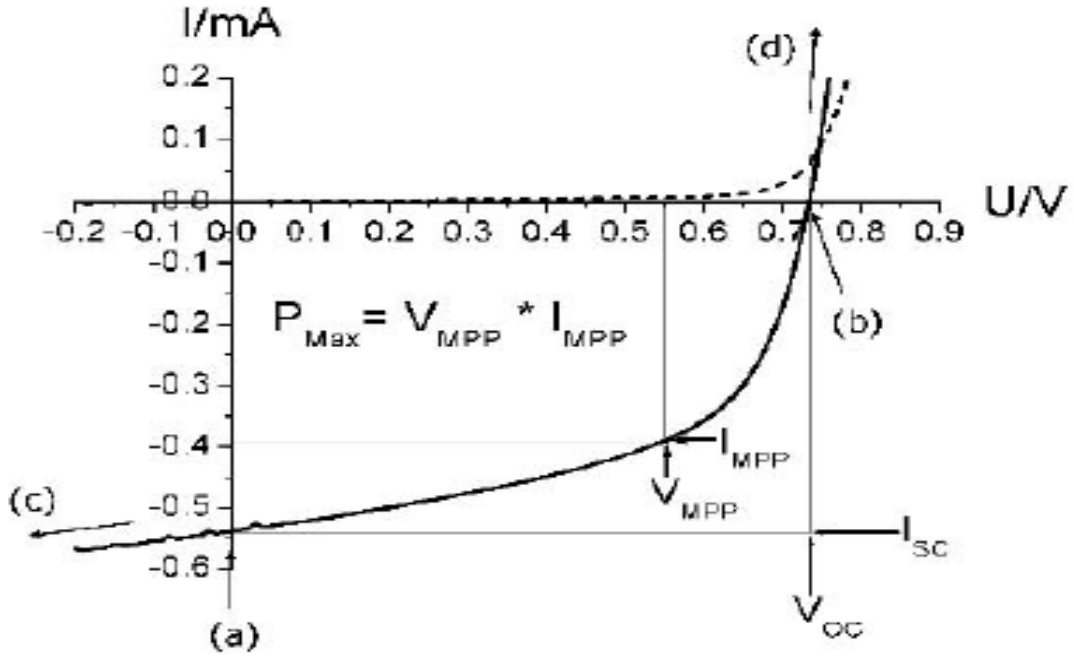
$$\eta = \frac{P_{MAX}}{P_{ISIK}} = \frac{J_{SC} \times V_{OC} \times FF}{P_{ISIK}}$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada FF dolgu faktörü, $P_{ışık}$ gelen ışık şiddetidir. Dolgu faktörü de,

$$FF = \frac{J_{MAX} \times V_{MAX}}{J_{SC} \times V_{OC}}$$

olarak tanımlanır. V_{max} maksimum güç noktasındaki gerilim, J_{max} maksimum güç noktasındaki akım yoğunluğudur. Dolgu faktörü bize sistemin çalışma performansını anlamada önemli bir rol oynar. İyi bir doğru akım oluşturulursa yüksek dolgu faktörü oluşacaktır. İdealde bire yakın olması gerekmektedir [34].

Şekil 4.11' de V_{MAX} ve J_{MAX} gösterilmektedir.



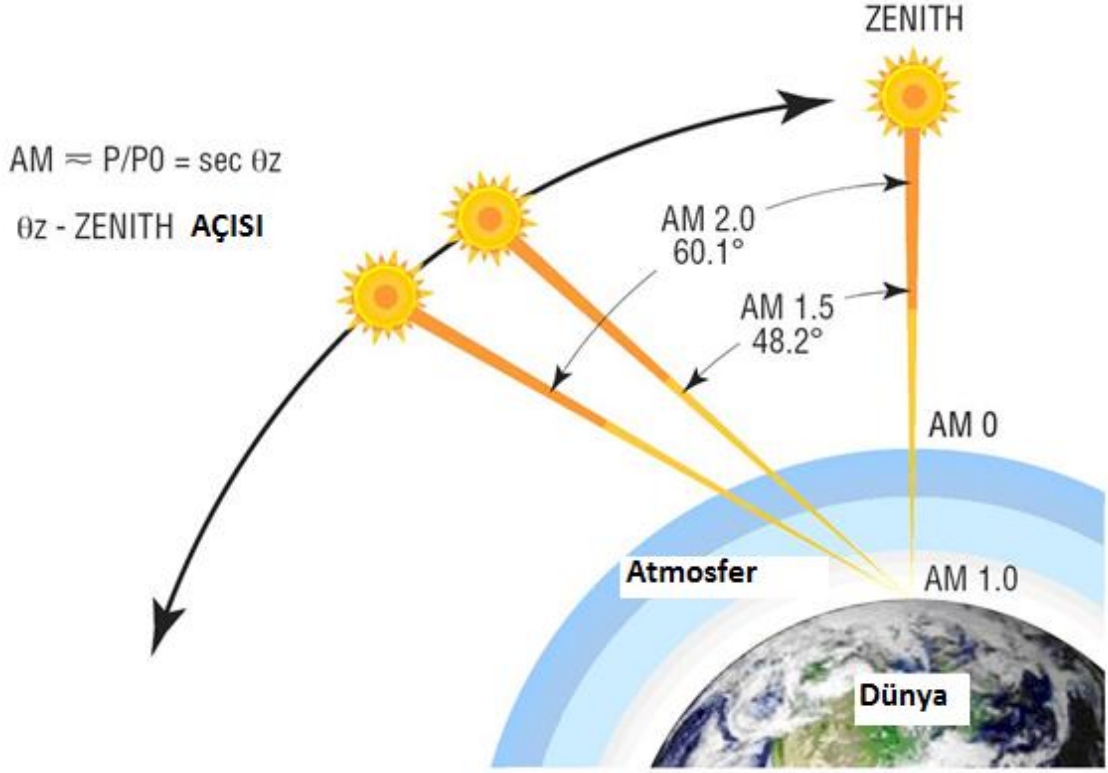
Şekil 5.9 Bir fotovoltaik hücrenin I-V karakterizasyonu (Burada MPP, maksimum çıkış noktalarını (MAX) temsil etmektedir.) (Hoppe vd.[31]).

Güç dönüşüm veriminden başka bir de kuantum verimi vardır. Gelen foton başına, fotoakıma katkısı olan taşıyıcı verimi ya da kuantum verimi olarak adlandırılır. IPCE (Incident Photon to Current Efficiency) (dış kuantum verimi) gelen fotonun ne kadarının elektrona dönüşeceği bir ölçüsüdür. [34].

$$IPCE = \frac{1240 \times J_{SC}}{\lambda \times P_{ISIK}}$$

Literatürde yapılan çalışmaların birbiri ile tutarlı olabilmesi için güç dönüşüm verimi hesaplarken standart koşulların uygulaması gerekmektedir. Alınan ölçümler sırasında hava kütlesinin standart koşulu hava kütlesi AM 1.5 altında olmalıdır. Hava kütlesi

(AM) güneş ışınlarının atmosferden geçerken aldığı yoldur. AM 1.5 (1.5 atmosfer kalınlığı) hava kütlesi 1.0 ile arasında $\theta = 48.2^\circ$ bulunmaktadır (Wohrle ve Meissner [28]). Bu hava kütlesi altında gelen güneş ışığın şiddeti 1000 W/m^2 veya 100 mW/cm^2 olmalıdır. Bu şartlarda yapılan ölçümlerde aynı zamanda ortam sıcaklığı 25°C olmalıdır [35].



Şekil 5.10 Çeşitli küresel hava kütlesi tanımları

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarda donör olarak P3HT ve akseptör olarak fulleren türevi PCBM kullanılmıştır.

P3HT:PCBM fotovoltaik hücrelerin değişik parametreleri incelenmiş ve umut verici sonuçlar elde edilmiştir. Popüler olan bu alanda çalışmamızın nedeni, bu sistem hakkında bir protokol oluşturmaktır. Ayrıca yapılan çalışmaların literatürün neresinde olduğunu bilmek ve bu standartları yakalayıp sonrasında geliştirmek de hedefler arasındadır.

6.1 Organik Fotovoltaik Hücrelerin Hazırlanması

İndiyum tin oksit (ITO) kaplı camlar altlık olarak kullanılmıştır. Bu camlar en ve boyu 1.5 cm olacak şekilde kesilerek hazırlanmıştır. Bu hazırlanan camların yaklaşık üçte birlik kısmı asitle aşındırarak (etching) kaldırıldı. Bu işlemde sonra hazırlanan camlar sırasıyla, aseton, isoproponal ve destile su ile ayrı ayrı on beşer dakika temizlendi. Bu işlemler deneysel her aşamada aynı şekilde tekrarlandı.

Kullanılacak malzemeler belli çözücüler içerisinde manyetik karıştırıcılar yardımıyla tamamen çözününceye kadar karıştırıldı. Bu şekilde kaplanan filmler daha homojen olmaktadır. Daha sonra ITO kaplı bu cam numuneler üzerine PEDOT:PSS tabakası dönel kaplama (spin coater) yöntemiyle kaplandı. Kaplanan PEDOT:PSS tabakasına 120⁰C'de ısı işlem uygulandı.



Şekil 6.1 Dönel kaplama cihazı

Aktif tabaka olarak kullanılan P3HT:PCBM çözeltisi dönel kaplama yöntemiyle PEDOT:PSS'in üstüne kaplanmıştır. Aktif tabaka kaplandıktan sonra ikinci bir elektrot olan alüminyum yaklaşık 100 nm civarında termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak buharlaştırıldı (Şekil6.2).



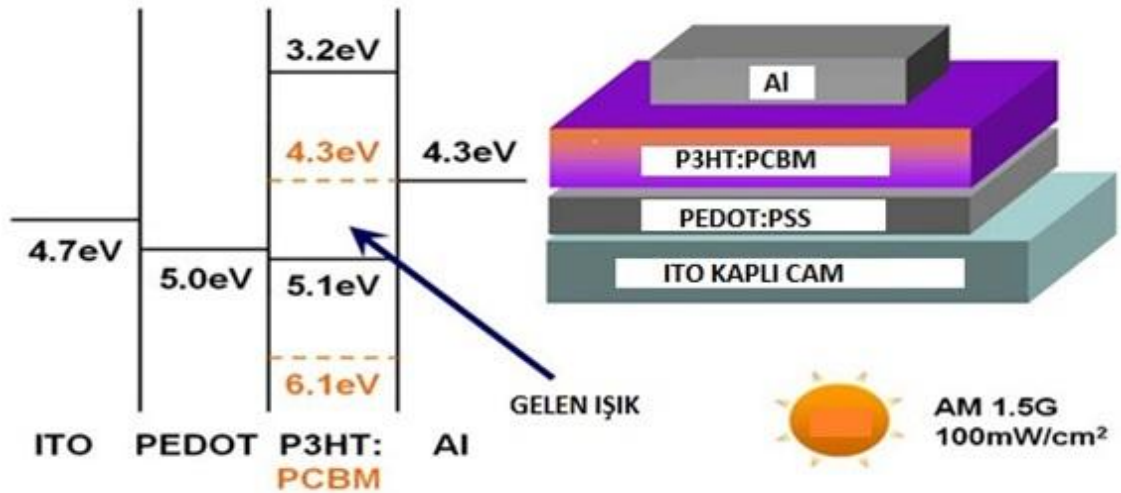
Şekil 6.2 Termal Buharlaştırma cihazı

Bu şekilde yapımı tamamlanan fotovoltaik hücre solar simülatör yardımıyla karakterize edildi. Karakterize edilmeden önce literatürde kullanılan AM 1.5 G hava kütlesine kalibrasyon etmek için silisyum fotovoltaik hücre ile cihazın 1 SUN'a ayarlanması gerekmektedir. 1 SUN yaklaşık AM 1.5 G hava kütlesine denk geldiği kabul edilmiştir.



Şekil 6.3 Solar Simülör

Tamamlanan fotovoltaik hücre şekil 6.4'te gösterildiği gibidir. Bu işlemler her deney aşamasında tekrarladı. Fakat parametreler değiştirildi. Değişen parametreler deney kısmında belirtildi.



Şekil 6.4 Aygıt yapısı ve enerji seviyeleri [12]

Ayrıca organik fotovoltaik hücrelerinin performanslarının, doğru bir şekilde analiz edilebilmesi için yüzey morfolojik özelliklerini bilmek büyük önem taşımaktadır. Organik filmlerin yüzey morfolojisini ve özelliklerini incelemek için mikroskopik analiz yöntemlerinden biri olan AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) kullanılmıştır.

AFM, sıvı ya da katı örneklerin yüzey topografisini nanometre (nm) seviyesinde görüntüleyebilen ve moleküller arası kuvvetleri ölçebilen bir sistemdir.

6.2 Konsantrasyon ve Çözücü Etkisinin İncelenmesi

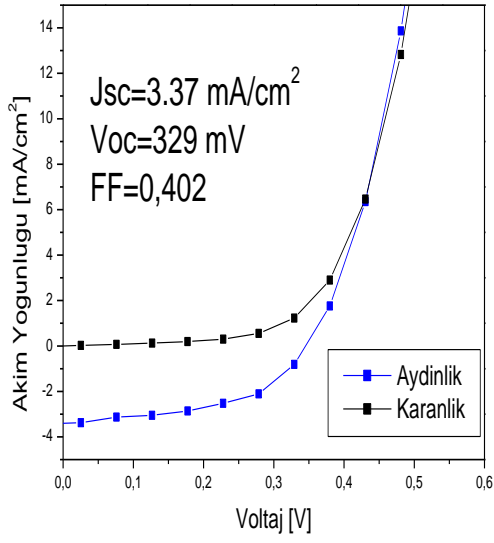
Donor ve akseptör malzeme ideal elektronik ilişkiye sahip olsa bile hacim heteroeklemine sahip fotovoltaik hücrelerin performansını donor ve akseptör malzemelerin fiziksel etkileşimine bağlıdır. Bunu da morfoloji belirler. Morfoloji oluşturulan filmlerin yüzey yapısı ile ilişkilidir ve polimer-fulleren özelliklerine bağlıdır. Şöyle ki, konsantrasyon ve çözücü etkisi morfolojiyi direkt olarak etkilemektedir. Dolayısıyla aygıtın verimini etkileyen önemli iki unsurdur.

6.2.1 Çözelti Konsantrasyonu Değişikliğinin İncelenmesi

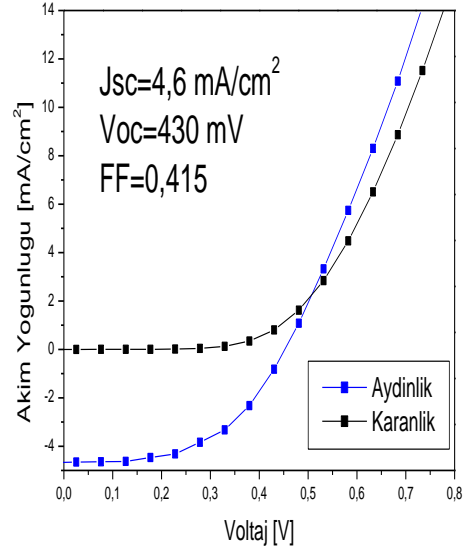
1 ml klorobenzen içerisinde P3HT:PCBM çözeltisi hazırlandı. Bu çözelti ayrı ayrı %1, %2 ve %3 oranlarında hazırlandı. Aktif tabaka 800 RPM'de, PEDOT:PSS tabakası 2000 RPM'de kaplandı.

6.2.1.1 Deney Sonuçları

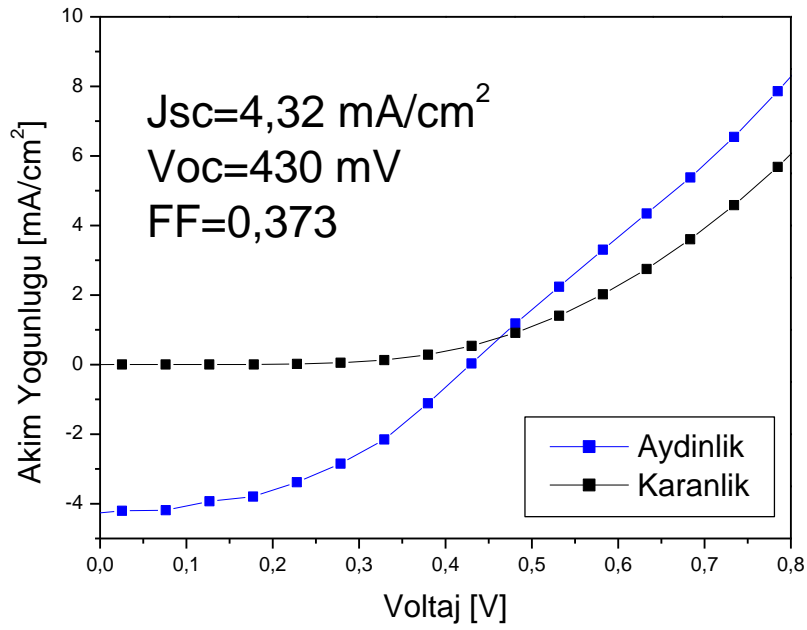
Şekil 6.5 (a) %1'lik çözelti kullanılarak elde edilen fotovoltaik hücrelerin I-V eğrisini göstermektedir. Bu tür aygıtlarda $J_{sc}=3.37 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=329 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF= 0,402$ ve $\eta=\%0,44$ olarak hesaplanmıştır. %2'lik olarak hazırlanan fotovoltaik hücrelerin I-V eğrileri şekil 6.5 (b)'de gösterilmiştir. Bu tür aygıtlarda, $J_{sc}= 4,6 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}= 430 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0,415$ ve $\eta= 0,82$ olarak hesaplanmıştır. Son olarak yapılan %3'lük çözülden hazırlanan organik fotovoltaik hücrelerin I-V eğrileri şekil 6.5 (c)'de gösterilmiştir. Bu tür aygıtlarda, $J_{sc}= 4,32 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}= 430 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF= 0,373$ ve $\eta=\%0,69$ olarak hesaplanmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.5 %1 (a), %2 (b) ve %3 (c) oranında hazırlanan çözeltilerin I-V karakteristikleri.

Literatüre kıyasla akımın düşük olmasının sebebi, tüm organik fotovoltaik hücrelerin hava ortamında hazırlanıp, karakterize edilmesi olarak öngörülmektedir. Bu sebeple kullanılan malzemeler hava ortamında bozulabilmektedir. Organik fotovoltaik hücrelerde V_{oc} p-tipli yarı iletkenin (HOMO)'su ve n tipli yarı iletkenin (LUMO)'su arasındaki enerji farkına doğrudan bağlıdır. Markus Scharber'in yaptığı çalışmada V_{oc} 6.1 eşitliğine göre hesaplanmaktadır:

$$V_{oc}=(1/e) (E_{HOMO}^{DONOR}-E_{LUMO}^{PCBM})-0.3 \quad (6.1)$$

PCBM'in LUMO'su 4.3 eV ve P3HT'nin HOMO'su 5.1 eV'tur. (6.1) eşitliğine göre hesaplanan teorik V_{oc} değeri 970 mV'tur. Elde edilen V_{oc} değerinin düşük olması J-V eğrilerinin standarttan sapması ve dolayısıyla aygıttaki paralel ve seri dirençlerin değişmesiyle açıklanabilir. Organik fotovoltaik hücrelerde paralel direncin oldukça büyük, seri direncin oldukça düşük olması istenir. Seri ve paralel dirençler devrede performans kısıtlıklarının bir göstergesidir.

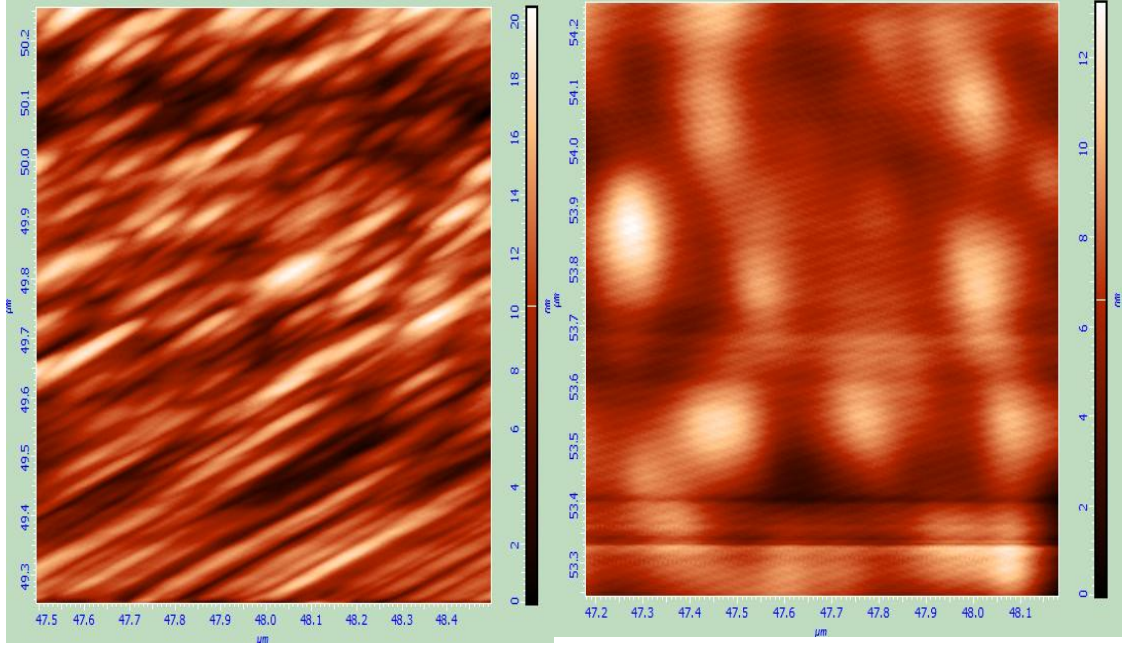
Dolgu faktörü ise yük taşınmasını karakterize eden bir fotovoltaik parametredir. Dolgu faktörünün düşük olmasının sebebi yük taşıyıcı mobilitesinin düşük olması ve ideal morfolojinin oluşturulamaması olarak ön görülmektedir.

Hacim heteroeklem fotovoltaik hücrelerde yük taşıyıcılarının elektrotlara iyi bir şekilde iletilmesi için bozulmamış, düzgün iletim yolları oluşturulmalıdır. Oluşacak büyük faz ayrımları organik fotovoltaik hacim heteroeklem hücrelerde istenmeyen bir durumdur. Bu araştırma, AFM resimlerini incelemekle yapılabilir.

Fotovoltaik performansın filmlerin morfolojisi ile olan bağlantısını inceleyebilmek için AFM görüntüleri alınmıştır. AFM görüntülerindeki yüzey pürüzlülüğü hücre performansını etkilemektedir. Yükseklik skalası olarak adlandırılan veriye yüzey pürüzlülüğünün ölçüsünü gösteren bir parametre olarak bakılabilir.

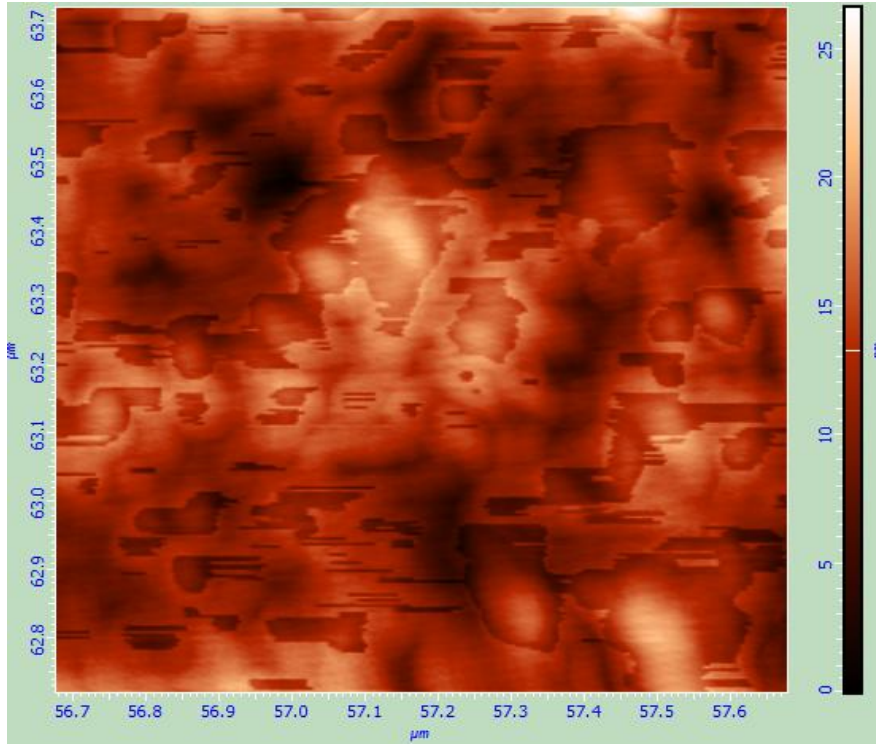
Elde edilen AFM resimleri 2.5 μ m X 2.5 μ m boyutlarında çekilmiştir. Resimlerde gösterilen skala yükseklik skalasıdır.

%1, %2 ve %3'lük çözeltilerle hazırlanan aygıtların AFM resimleri şekil 6.6'da gösterilmiştir.



(a)

(b)



(c)

Şekil 6.6 Değişik çözücü konsantrasyonundaki filmlerin AFM görüntüleri. (a) %3, (b) %2, (c) %1'lik çözelti

Şekil 6.6'da görüldüğü gibi en düşük yükseklik skalası 12 nm olarak %2'lik çözeltide, en yüksek skala 25 nm olarak %1'lik çözeltide bulunmaktadır. AFM görüntüleri ve fotovoltaik performanslar kıyaslandığında, sonuçların uyumlu olduğu gözlenmektedir.

Çizelge 6.1 Çözücü konsantrasyonu sonucu elde edilen değerler

Çözelti Konsantrasyonu	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	FF	η (%)
%1	3,37	329	0,402	0,44
%2	4,6	430	0,415	0,82
%3	4,32	430	0,373	0,69

6.2.2 Donor-Akseptör Konsantrasyonu ve Farklı Çözücü Etkisinin İncelenmesi

Aktif tabaka hazırlanmasında, klorobenzen, kloform ve toluen çözücü olarak kullanıldı. Her bir çözücü için P3HT konsantrasyonu sabit tutularak, PCBM konsantrasyonu değiştirildi (Çizelge 6.2).

Çizelge 6.2 Hazırlanan farklı çözücü ve konsantrasyonları

KLOROBENZEN	KLOROFORM	TOLUEN
1:0,55	1:0,55	1:0,55
1:2	1:2	1:2
1:3	1:3	1:3
1:4	1:4	1:4

ITO kaplı numuneler üzerine PEDOT:PSS tabakası 2000 RPM'de kaplandı. Aktif tabaka 800 RPM'de dönel kaplama yöntemiyle her bir farklı çözücü için, 1:0.55, 1:2, 1:3, 1:4 konsantrasyonlarında PEDOT:PSS'in üzerine kaplandı.

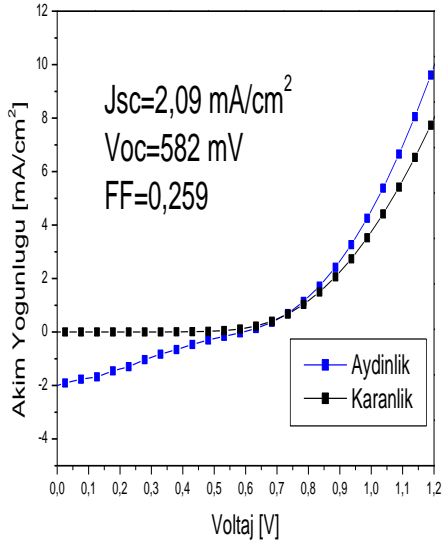
6.2.2.1 Deney Sonuçları

Toluen için 1:0.55, 1:2, 1:3, 1:4 oranlarında elde edilen en iyi sonuçlar çizelge 6.3'te gösterilmiştir.

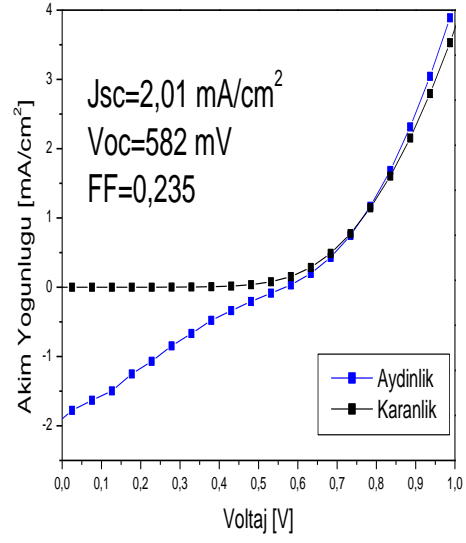
Çizelge 6.3 Toluen çözücüsü için elde edilen veriler

Konsantrasyon	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	FF	η (%)
1:0,55	0,048	987	0,201	0,02
1:2	0,16	784	0,243	0,06
1:3	2,09	582	0,259	0,31
1:4	2,01	582	0,235	0,27

Farklı konsantrasyonlarda hazırlanan aygıtların lineer ölçekteki akım yoğunluğu/gerilim eğrileri şekil 6.7’de gösterildi. 1:0.55 ve 1:2 oranlarında toluende hazırlanan fotovoltaik hücrelerin akım değerleri çok düşük olduğundan I-V eğrileri elde edilememiştir. Şekil 6.7 (b)’den görüldüğü gibi 1:3 oranında Jsc=2.09 mA/cm², Voc=582 mV olarak belirlenmiş ve FF=0.259, PCE=% 0.31 olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.7 (c)’de görüldüğü gibi 1:4 oranında hazırlanan aygıtta; Jsc=2,01 mA/cm², Voc=582 mV olarak belirlenmiş ve FF=0,235, PCE=% 0,27 olarak hesaplanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 6.7 Toluende hazırlanan, 1:3 oranı (a) ve 1:4 (b) oranındaki aygıtların I-V karakteristikleri

Toluende hazırlanan fotovoltaik hücrelerde en iyi güç dönüşüm verimi 1:3 konsantrasyonunda hazırlanan aygıtta elde edildi.

Kloroform için 1:0.55, 1:2, 1:3, 1:4 oranlarında elde edilen sonuçlar çizelge 6.4'te gösterilmiştir.

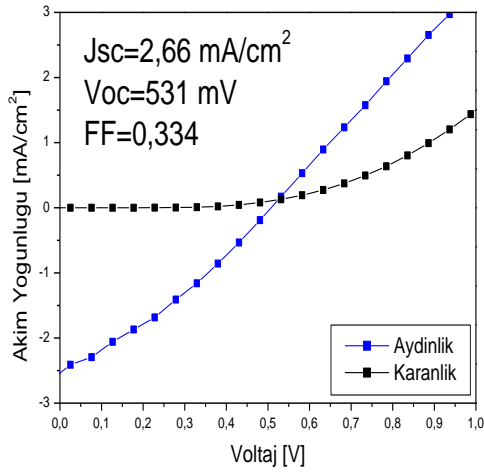
Çizelge 6.4 Kloroform çözücüsü için elde edilen veriler

Konsantrasyon	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	FF	η (%)
1:0.55	2,66	531	0,334	0,47
1:2	0,84	683	0,185	0,10
1:3	1,37	683	0,202	0,18
1:4	1,19	582	0,221	0,15

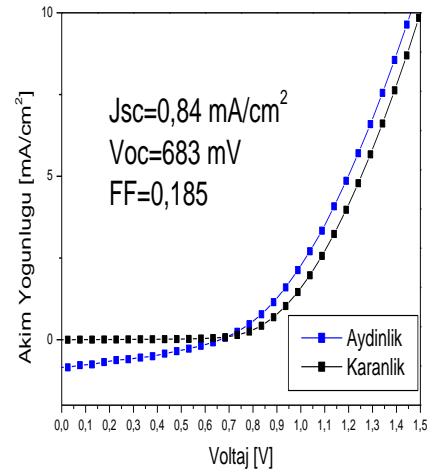
Kloroformda hazırlanan aygıtların linear ölçekte çizilen I-V eğrileri şekil 6.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.5 Literatürde elde edilen sonuçlar (Kawano vd. [1])

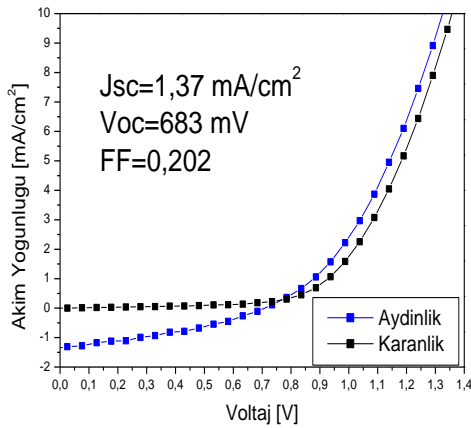
Çözücü	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	FF	η (%)
Kloroform- Diklorobenzen	11.1	600	0.56	3.73



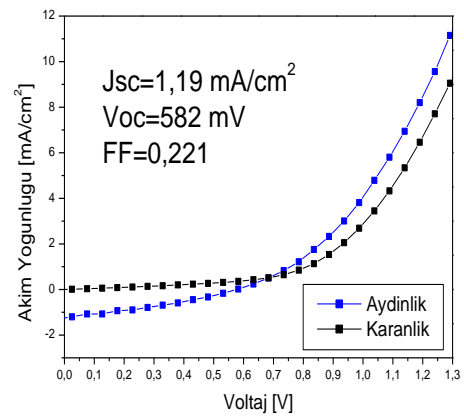
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 6.8 Kloroformda hazırlanan 1:0,55 oranı (a), 1:2 oranı (b), 1:3 oranı (c) ve 1:4 oranındaki (d) aygıtların I-V karakteristikleri

Şekil 6.8 (a)'dan görüldüğü gibi kloroformda hazırlanan aygıtta: 1:0.55 oranında; $J_{sc}=2.66 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=531 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0,334$ ve $PCE=\%0,47$ olarak hesaplanmıştır.Şekil 6.8 (b)'de 1:2 oranında hazırlanan aygıtta: $J_{sc}=0.84 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=683 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0.185$, $PCE=\%0.1$ olarak hesaplandı. . 1:3 oranında hazırlanan aygıtta: $J_{sc}=1.37 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=683 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0.202$, $PCE=\%0.18$ olarak hesaplanmıştır.Şekil 6.8 (c)'de 1:4 oranında hazırlanan aygıtta: $J_{sc}=1.19 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=582 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0.221$, $PCE=\%0.15$ olarak hesaplanmıştır.

Klorobenzen için 1:0.55, 1:2, 1:3, 1:4 oranlarında elde edilen sonuçlar çizelge 6.6'te gösterilmiştir.

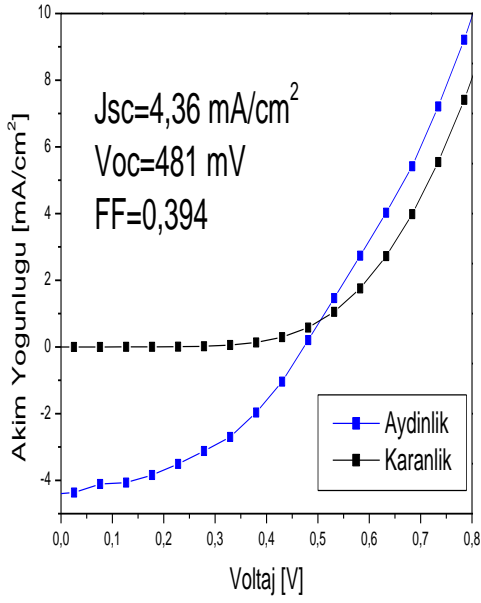
Çizelge 6.6 Klorobenzen çözücüsü için elde edilen veriler

Konsantrasyon	$J_{sc} \text{ (mA/cm}^2\text{)}$	$V_{oc} \text{ (mV)}$	FF	$\eta \text{ (\%)}$
1:0,55	4,36	481	0,394	0,82
1:2	1,08	683	0,222	0,16
1:3	1,44	734	0,243	0,25
1:4	2,18	683	0,289	0,43

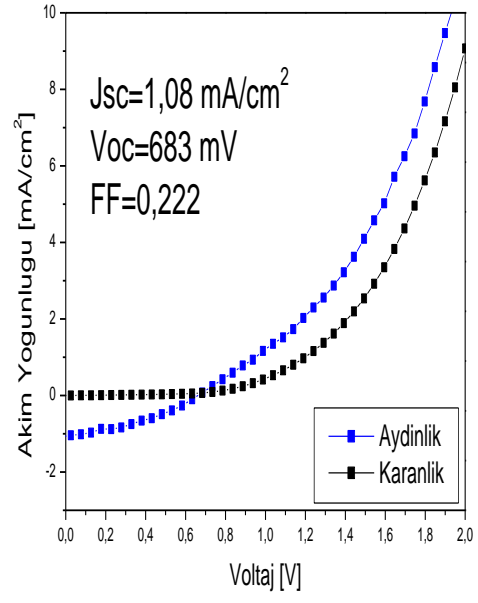
Klorobenzende hazırlanan aygıtların lineer ölçekte çizilen I-V eğrileri şekil 6.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.7 Literatürde elde edilen sonuçlar (Kawano vd. [1])

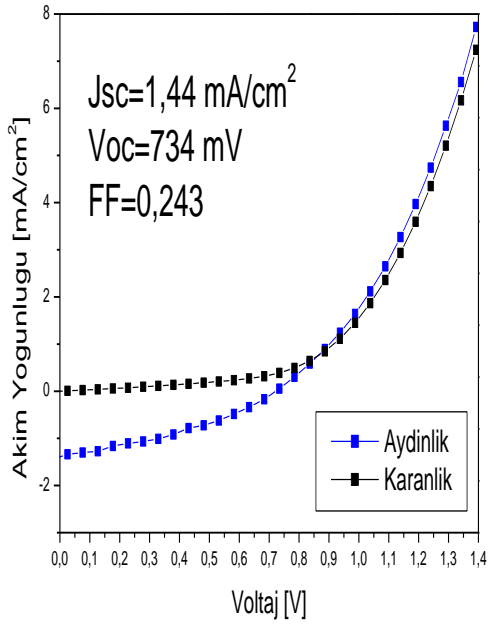
Çözücü	$J_{sc} \text{ (mA/cm}^2\text{)}$	$V_{oc} \text{ (mV)}$	FF	$\eta \text{ (\%)}$
Klorobenzen	10.1	600	0.54	3.34



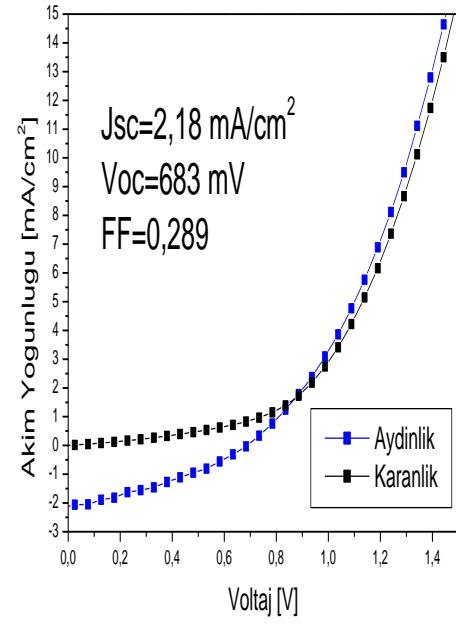
(a)



(b)



(c)

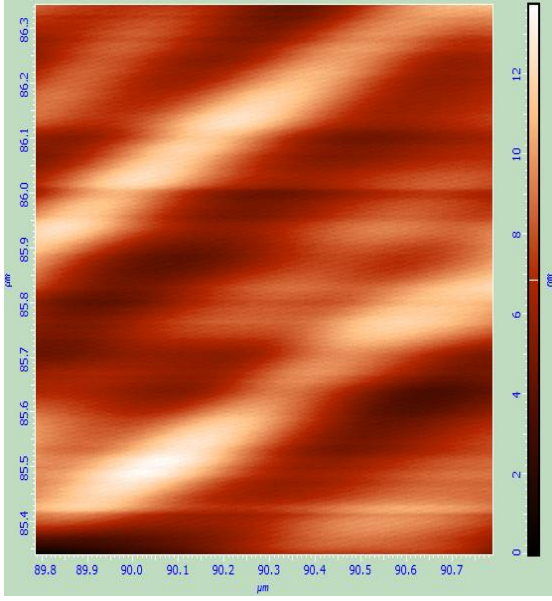


(d)

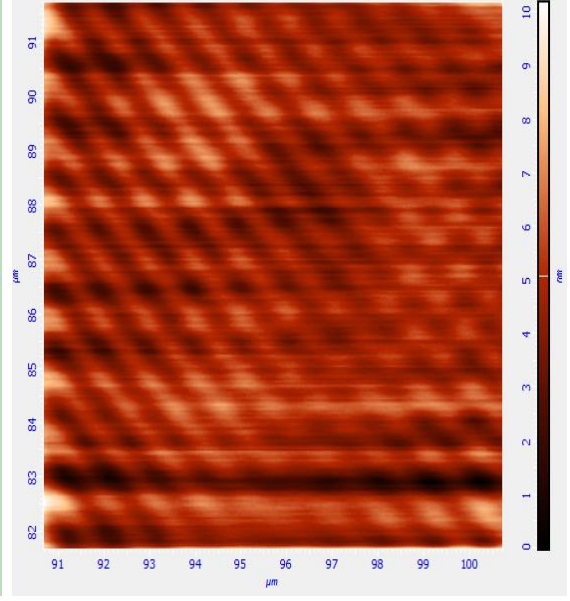
Şekil 6.9 Klorobenzende hazırlanan 1:0,55 oranı (a), 1:2 oranı (b), 1:3 oranı (c) ve 1:4 oranındaki (d) aygıtların I-V karakteristikleri

Şekil 6.9 (a)'da görüldüğü gibi klorobenzende hazırlanan aygıtlarda: 1:0.55 oranında hazırlanan aygıtta; $J_{sc}=4.36\text{mA/cm}^2$, $V_{oc}=481\text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0.394$, $PCE=\%0.82$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.9 (b)'de 1:2 oranında hazırlanan aygıtta; $J_{sc}=1.08\text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=683\text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0.222$, $PCE=\%0.16$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.9 (c)'de 1:3 oranında hazırlanan aygıtta; $J_{sc}=1.44\text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=734\text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0.202$, $PCE=\%0.25$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.9 (d)'de 1:4 oranında hazırlanan aygıtta; $J_{sc}=2.18\text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=683\text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0.289$, $PCE=\%0.43$ olarak hesaplanmıştır.

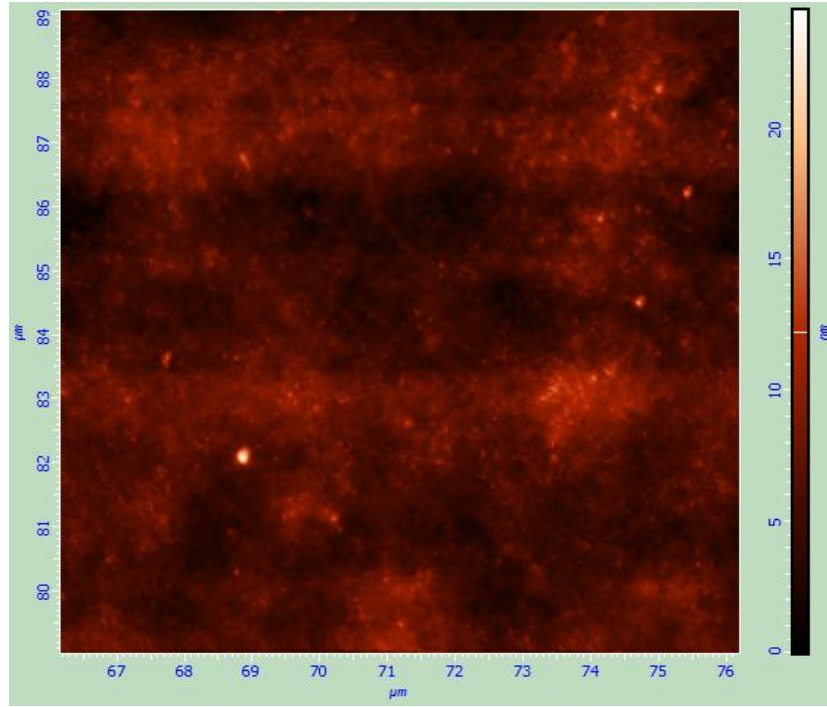
Kloroform, klorobenzen ve toluen çözücülerinde yapılan aygıtların AFM resimleri şekil 6.10'da gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.10 Kloroform, klorobenzen ve toluen çözücülerinde yapılan aygıtların AFM resimleri. (a) kloroform, (b) klorobenzen ve (c) toluen.

Kloroformda oluşan pürüzlülük seviyesi 12 nm olarak ölçüldü, klorobenzende pürüzlülük seviyesi 10 nm olarak ölçüldü ve toluende pürüzlülük seviyesi 20 nm olarak ölçüldü. Yüksek pürüzlülüğe sahip toluende en düşük akım elde edilirken, en az pürüzlü yüzeye sahip klorobenzende en iyi akım değeri elde edildi. Diğer yandan farklı

çözücülerde oluşan farklı faz ayrımlarından dolayı elde edilen veriler farklılık gösterdi. Elde edilen fotovoltatik sonuçlar AFM resimleriyle uyumludur.

Sonuç olarak, yapılan bu araştırmalarda üç çözücü içerisinde en iyi sonuç, klorobenzen çözücüsünde 1:0,55 oranında hazırlanan çözeltilerden elde edilmiştir.

Klorobenzen, kloroform ve toluen çözücülerini kullanılma sebebi farklı kaynama noktalarına (boiling point) sahip olmalarıdır. En yüksek kaynama noktası 1310°C ile klorobenzene aittir. Kloroform en düşük kaynama noktasına sahiptir. Toluene ise bu iki kaynama noktası arasında bir değere sahiptir. Farklı kaynama noktalarına sahip çözücülerin farklı film oluşturma özelliklerine sahip olduğu bilinmektedir. Farklı film oluşumunun farklı morfoloji oluşturabileceği düşünülmüştür. AFM resimleriyle bu durum ispatlanmıştır.

Daha önce literatür özetinde de belirtildiği gibi yapılan bu konseptteki benzer çalışmalarda güç dönüşüm verimi $\eta = \%1\text{-}\%4$ arasında değişmektedir. [1], [2], [3]. Literatürdeki birkaç araştırma grubu ise en iyi morfoloji ve hücre performansının 1:1 oranında hazırlanan çözeltilerde olduğunu göstermişlerdir [26], [27]. Bu tezde elde edilen verilerin literatüre oranla daha düşük olmasının sebepleri; yapılan çalışmaların hava ortamında yapılarak oksijene maruz kalmasından dolayı organik malzemelerin degrades olması, kullanılan alüminyum kontakların hava ortamında çabucak okside olarak Al_2O_3 'e dönüşerek işlevini kaybetmesinden dolayıdır. Bu yüzden akım değerleri literatürde hava ortamından yalıtılmış çalışmalara göre düşüktür.

6.3 Aktif Tabaka Dönel Kaplama Hızının Etkisinin İncelenmesi

Yapılan çalışmalarda P3HT:PCBM konsantrasyonunun ve dönel kaplama hızının; kristal yapı düzeni, ara zincir etkileşimi, morfolojiyi, çözücünün kuruma sürecindeki faz ayrımını ve sonrasındaki tavlama etkilediği açıkça gösterilmiştir (Winder ve Sarıçiftçi [25]). Ayrıca film kalınlığına göre aygıtın gelen ışığın ne kadarını soğurup soğurmeyeceği değişkenlik gösterecektir.

Deneyin yapılış kısmında; ITO kaplı camlar üzerine PEDOT:PSS, 2000 RPM'de kaplandı ve ardından 120°C'de 4 dakika tavlama tabi tutuldu. Bu tabakanın üzerine P3HT:PCBM, 800, 1000 ve 1500 RPM'de kaplanarak aktif tabaka oluşturuldu.

6.3.1 Deney Sonuçları

Dönel kaplama hızı değiştirilerek yapılan çalışmalarda alınan sonuçlar çizelge 6.8'da gösterildi.

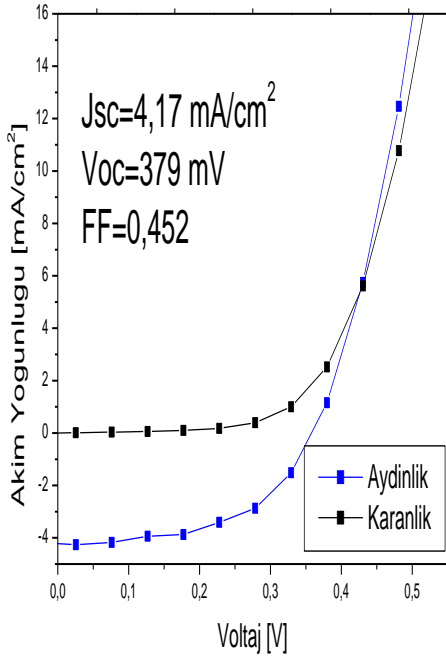
Çizelge 6.8 Farklı dönel kaplama hızlarında elde edilen sonuçlar

Kaplama Hızı	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	FF	η (%)
800	4,17	379	0,452	0,71
1000	4	379	0,446	0,67
1500	2,30	429	0,233	0,22

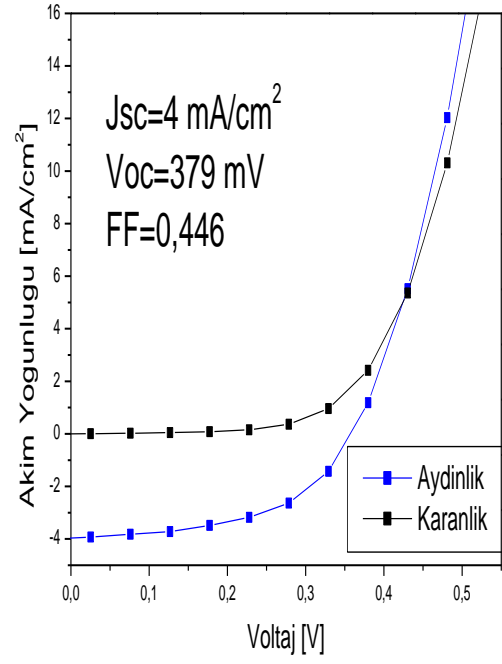
Farklı dönel kaplama hızlarında hazırlanan aygıtların lineer ölçekte çizilen I-V eğrileri şekil 6.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.9 Literatürde elde edilen sonuçlar (Heejoo [10])

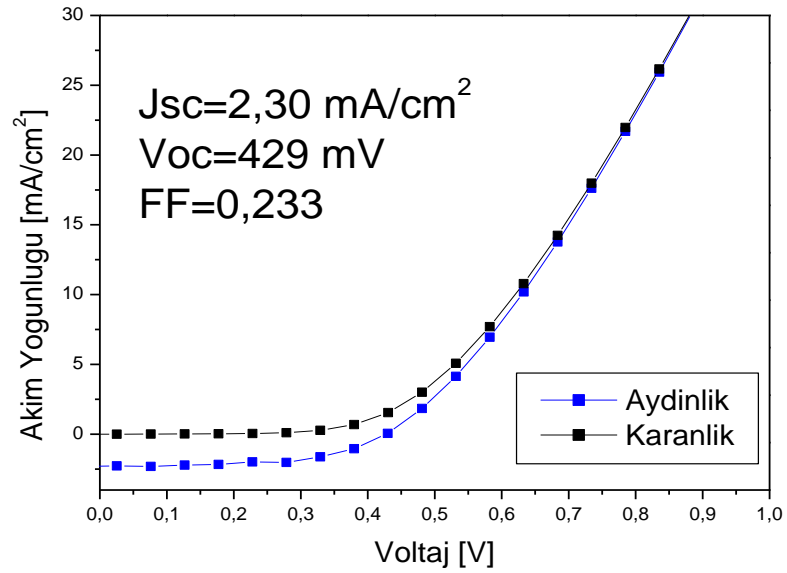
Kaplama Hızı	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	FF	η (%)
300	7.25	0.603	0.49	2.11
1000	5.97	0.616	0.44	1.58
1500	4.96	0.623	0.44	1.35



(a)



(b)

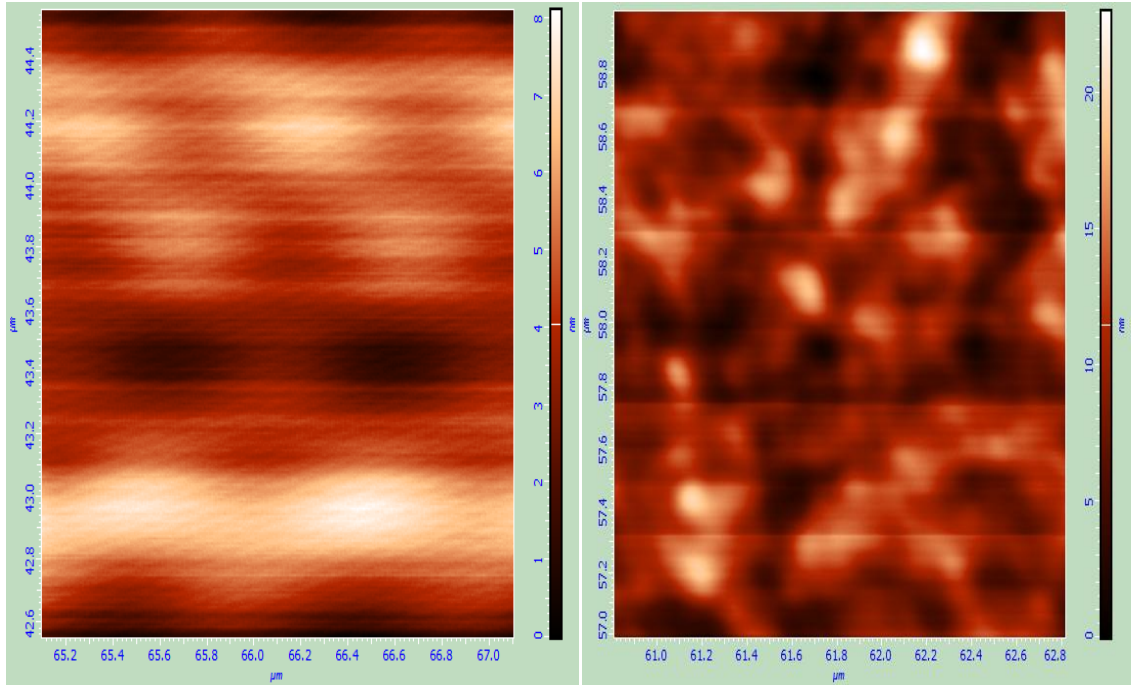


(c)

Şekil 6.11 Aktif tabakaları 800 RPM’de (a) kaplanan, 1000 RPM’de (b) kaplanan ve 1500 RPM’de kaplanan aygıtların I-V karakteristikleri

Şekil 6.11 (a)'da görüldüğü gibi, aktif tabakası 800 RPM'de kaplanan aygıtta; $J_{sc}=4.17$ mA/cm^2 , $V_{oc}=379$ mV olarak belirlenmiş ve $FF=0,452$, $PCE=\%0.71$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.11 (b)'de aktif tabakası 1000 RPM'de kaplanan aygıtta; $J_{sc}=4$ mA/cm^2 , $V_{oc}=379$ mV olarak belirlenmiş ve $FF=0.446$, $PCE=\%0.67$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.11 (c)'de aktif tabakası 1500 RPM'de kaplanan aygıtta; $J_{sc}=2.30$ mA/cm^2 , $V_{oc}=429\text{mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0.233$, $PCE=\%0.22$ olarak hesaplanmıştır. 800 RPM'de kaplanan filmlerden oluşan organik fotovoltaik aygıtlardan en iyi sonuç elde edilmiştir..

Farklı kaplama hızlarında hazırlanan filmlerin AFM resimleri şekil 6.12'de gösterilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 6.12 Farklı hızlarda kaplanan aktif tabaka AFM resimleri. (a) 800 RPM, (b) 1500 RPM

Elde edilen fotovoltaik sonuçlar AFM resimleriyle uyumludur.

Farklı kaplama hızları aynı zamanda farklı kalınlıklarda filmler elde edilmesine sebep olacaktır. Düşük kaplama hızlarında yüksek kaplama hızlarına kıyasla daha kalın filmler elde edilmesi beklenmektedir. Kalın filmler soğurma açısından uygun olsa da organik malzemelerin mobilitesi düşük olduğundan kalın filmlerin organik fotovoltaik

aygıtlarda kullanılması uygun değildir. Ancak, yüksek mobilitelere sahip malzemeler için bu durum uygundur. Bu yüzden, optimum kalınlığın belirlenmesi çok önemlidir.

Literatürde yapılan bir çalışmada P3HT:PCBM tabakası; 300, 1000, 1500 RPM’lerde kaplanmış ve elde edilen sonuçlar sırasıyla şu şekildedir: 300 RPM’de kaplanan aygıtta; $J_{sc}= 7,25 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=0,603 \text{ mV}$, $FF=0,49$ ve güç dönüşüm verimi $\eta=\% 2,11$ ’dir. 1000 RPM’de kaplanan aygıtta; $J_{sc}=5,97 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=0,616 \text{ mV}$, $FF=0,44$ ve güç dönüşüm verimi $\eta=\%1,58$ ’dir. Son olarak 3000 RPM’de kaplanan aygıtta; $J_{sc}=4,96 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}= 0,623 \text{ mV}$, $FF=0,44$ ve $\eta=\%1,35$ ’dir [7]. Bizim yaptığımız çalışmalar literatürle uyumludur.

Sonuç olarak, en iyi güç dönüşüm veriminin 800 RPM’de kaplanan aygıtlarda görüldü. Bundan sonra yapılan deneylerde aktif tabaka 800 RPM’de kaplanarak yapılmıştır.

6.4 Tavlama Etkisinin İncelenmesi

Literatürde yapılan çalışmalar, özellikle P3HT:PCBM içeren aygıtlarda hücreler üretildikten sonra sıcaklık işlemi uygulandığında aygıt veriminin önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak da P3HT’nin sıcaklık işleminden sonra kısmen kristalleşmesi olarak gösterilmiştir (Yu-Ching [36]).

Literatürde yapılan diğer çalışmalarda, PEDOT:PSS tabakasının tavllanması, aygıtlardaki akım yoğunluğunu arttırdığı gözlenmiştir [37], [38], [17]. Bu akım yoğunlukları aktif tabakanın morfolojisini değiştirmeye olası olmasa da, PEDOT:PSS tabakasının iletkenliği veya aktif tabakanın morfolojisiyle alakalı olabilir (Shirotriva ve Li [37]).

Deneysel kısımda; ITO kaplı numuneler üzerine PEDOT:PSS tabakası 2000 RPM’de kaplandı ve ardından 120°C ’de 4 dakika boyunca tavlandı. Hazırlanan %2’lik P3HT:PCBM çözeltisi 800 RPM’de kaplandı. Bazı örneklerin aktif tabakaları 120°C ’de 3 dakika boyunca tavlandı. Bir başka deneyde ise aygıtlar hazırlanıp, alüminyum buharlaştırıldıktan sonra ölçümleri alındıktan sonra 120°C ’de 3 dakika tavlansın tekrar karakterize edildi.

6.4.1 Deney Sonuçları

Aktif tabakası tavlanan ve tavlansınmayan aygıtlarda alınan sonuçlar çizelge 6.10’de gösterilmiştir.

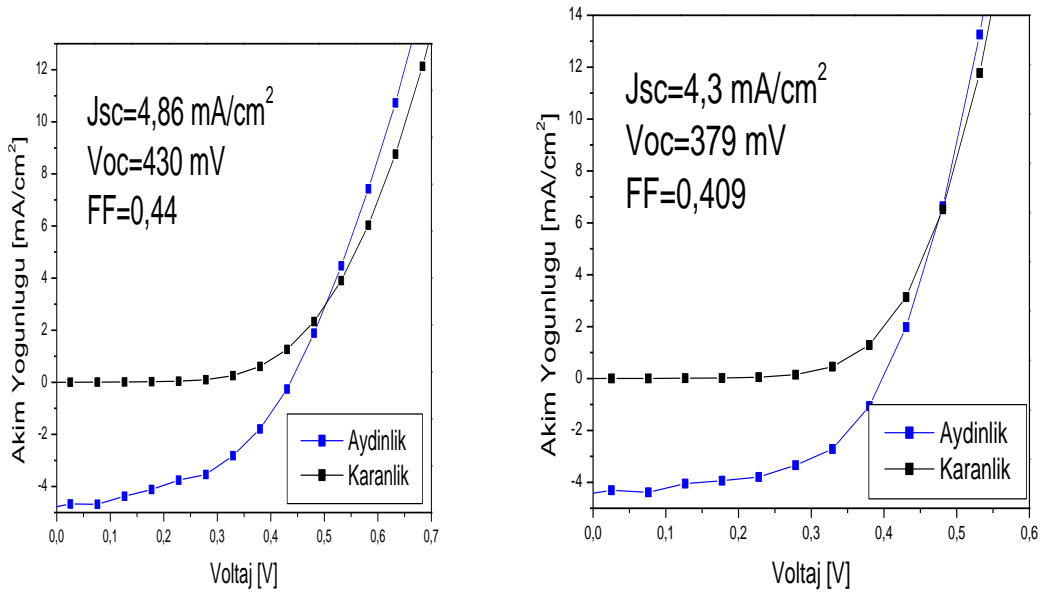
Çizelge 6.10 Aktif tabaka tavlama farkında elde edilen en iyi sonuçlar

Tavlama şekli	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	FF	η (%)
120 ⁰ C, 3 dk.	4,3	379	0,409	0,66
Yok	4,86	430	0,44	0,91

Aktif tabaka tavlaması sonucu lineer ölçekte çizilen I-V eğrileri şekil 6.13'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.11 Literatürde elde edilen sonuçlar (Heejoo [10])

Sıcaklık (°C)	0	60	90	120	150	180
η (%)	0.34	0.87	1.18	1.90	2.80	0.3



(a)

(b)

Şekil 6.13 Aktif tabakası tavlamanmayan (a) ve aktif tabakası tavlanan (b) aygıtların I-V karakteristikleri.

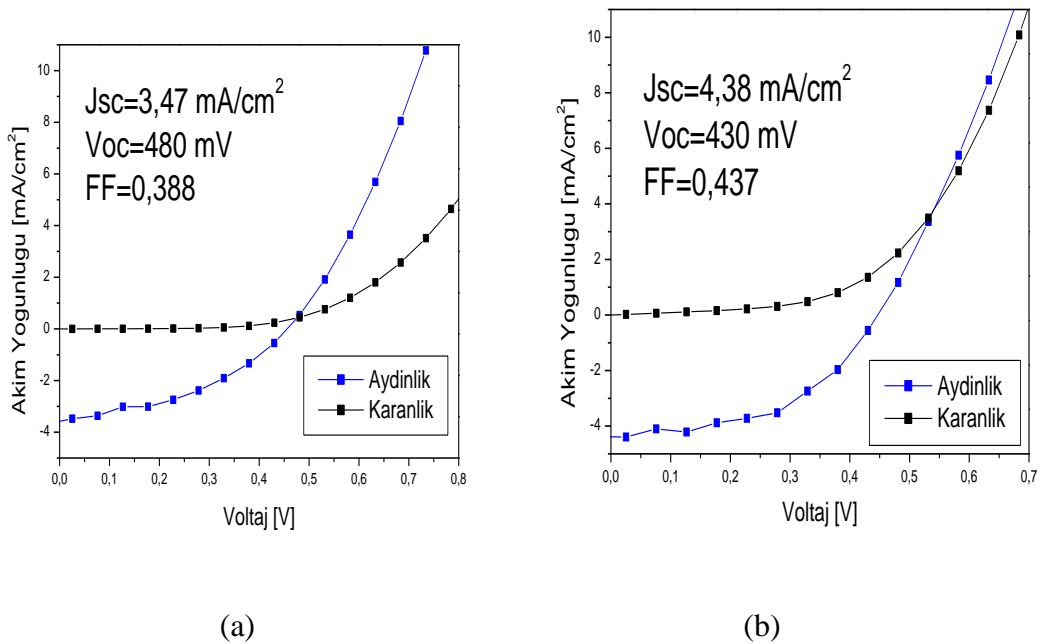
Şekil 6.13 (a)'dan görüldüğü gibi aktif tabakası tavlamanmayan aygıtta; $J_{sc}=4.86 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=430 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0.44$, $PCE=\%0.91$ olarak hesaplanmıştır. Aktif tabakası 120°C 'de tavlanan aygıtta; $J_{sc}=4.86 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=430 \text{ mV}$ olarak okundu ve $FF=0.44$, $PCE=\%0.91$ olarak hesaplandı.

Aluminyum buharlaştırılıp fotovoltaik aygıt üretildikten sonra 120°C 'de tavlانیp tekrar karakterize edilen aygıtlarda alınan sonuçlar çizelge 6.12'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.12 Yapımı tamamlandıktan sonra tavlanan aygıtlarda elde edilen sonuçlar

Tavlama Şekli	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (mV)	FF	η (%)
120°C , 3 dk.	3,47	480	0,388	0,64
Yok	4,38	430	0,437	0,82

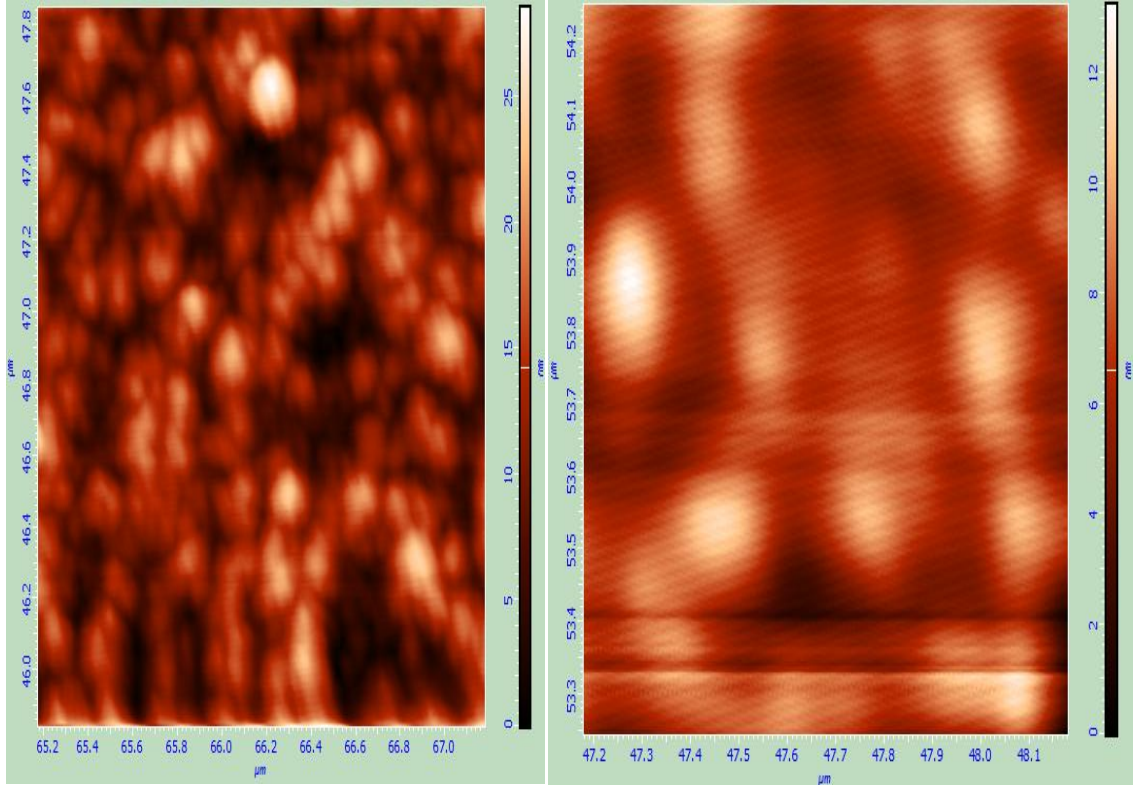
Üretildikten sonra tavlanan ve tavlamanmayan aygıtların lineer ölçekte çizilmiş I-V eğrileri şekil 6.14'te gösterilmiştir.



Şekil 6.14 Yapımı tamamlandıktan sonra tavlanan (a) ve tavlamanmayan (b) aygıtların I-V karakteristikleri

Şekil 6.14 (a)'da üretildikten sonra 120⁰C'de tavlanan aygıtta; Jsc=3.47 mA/cm², Voc=480 mV olarak belirlenmiş ve FF=0.388, PCE=%0.64 olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.14 (b)'de üretildikten sonra tavlansayan aygıtta; Jsc=4.38 mA/cm², Voc=430 mV olarak belirlenmiş ve FF=0.437, PCE=%0.82 olarak hesaplanmıştır.

Yapımı tamamlandıktan sonra tavlansarak hazırlanan filmlerin AFM resimleri şekil 6.15'da gösterilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 6.15 Üretildikten sonra 120⁰ C'de 3dakika tavlansayan (a) ve tavlansayan (b) aygıtların AFM resimleri

Elde edilen fotovoltaiik sonuçlar AFM resimleriyle uyumludur. Tavlansayan aygıtta oluşsyan faz ayrımı daha fazladır.

Bu tezde yapılan çalışmalarda öncelikle aktif tabaka tavlama işleminde, aktif tabakanın tavlansmadığı sistemde daha iyi güç dönüşüm verimi elde edildi. Ardından yapılan organik fotovoltaiik hücrenin tamamen yapımından sonra tavlansma işleminde ise Voc'de biraz iyileşme olmasına rağmen Jsc'de oluşsyan düşüşle güç dönüşüm verimi düştü.

Literatür özetinde de belirtildiği gibi yapılan bir çalışmada, P3HT:PCBM hücrelerde sıcaklık etkisini araştırılmıştır. 140⁰C'de 10, 30 ve 60 dakika aktif tabakalar tavlansmıştır. Hiç tavlansmayan hücrede PCE=%1.039, 10 dakika tavlansanda

PCE=%2.185, 30 dakika tavlanaında PCE=%2.308 ve son olarak 60 dakika tavlanaında PCE oldukça düşer ve %0.810'a geriler (Yang vd. [38]).

Yapılan bir diğler çalışmada ise, tamamlanan aygıt 150⁰C'de 15 dakika boyunca tavlanaır. Tavlanaımdan önce elde edilen veriler; Jsc=1,075 mA/cm², Voc=0,58 V, FF=0,32 ve PCE=%0,2 olarak bulunmuştur. Tavlamaımdan sonra ise Jsc=6,42mA/cm², Voc=0,51, FF=0,36 ve PCE=%1,21 olmuştur. Tavlamaımdan sonra akım yoğunluğundaki artış göze çarpmaktadır. Bununla beraber güç dönüşüm veriminde kayda değler artış olmuştur. Bizim yaptığımız çalışmada tavlamaımdan sonra Voc artmış fakat Jsc düşmüştür [18].

Literatürdeki çalışmada, bu tezde yapılan çalışmada elde edilen sonuçlarda farklılıklar göstermektedir. Tavlama işlemleri hava ortamında yapıldığından dolayı, üst metal kontak, alüminyumun oksitlenmesi ve sıcaklık işlemlerinin oksitlenmeyi hızlandırmasından dolayı aktif tabakada gözlenen morfoloji değışimleri AFM resimleriyle ispatlanmıştır. Aynı işlemlerin azot veya argon (eldivenli kutu (glovebox)) ortamında hazırlanması durumunda literatürdekine benzer sonuçlar elde edilmesine neden olacaktır.

6.5 PEDOT:PSS Tabakasında Dönel Kaplama Etkisinin İncelenmesi

Daha önceki kısımlarda da bahsedildiğı gibi PEDOT:PSS tabakası, organik fotovoltaiik hücrelerin birçoğunda kullanılmaktadır. Aygıt performansında önemli artışlara sebep olmaktadır. Kaplandığı ITO tabakasının yüzey pürüzlülüğünü ortadan kaldırarak elektronların daha kolay akmasını sağlamak, yük taşımlı sırasında boşluklara bir adım görevi görerek geçişlerini kolaylaştırmak, ITO'nun iş fonksiyonunu değıştirebilmek gibi özellikleri vardır.

ITO saydam iletkeninin üzerine kaplanan PEDOT:PSS tabakası; 1500, 2000, 3000,4000 RPM hızlarda dönel kaplama işlemleriyle kaplandı.

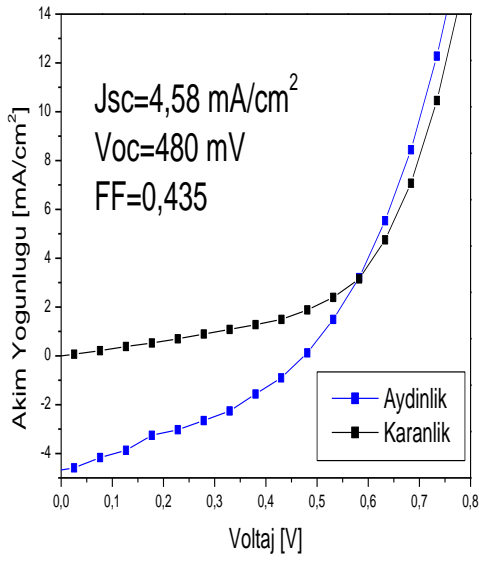
6.5.1 Deney Sonuçları

Farklı kaplama hızlarında elde edilen sonuçlar çizelge 6.13'da gösterilmiştir.

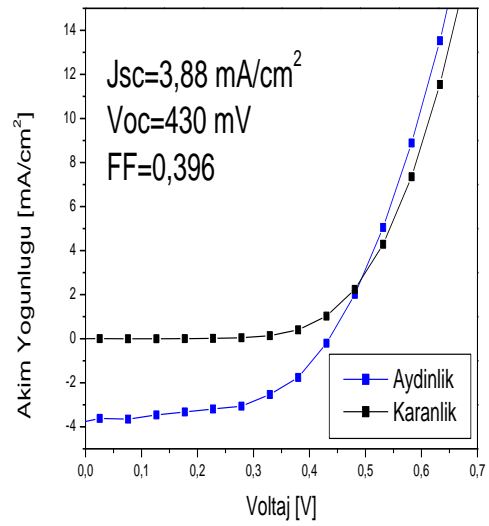
Çizelge 6.13 PEDOT:PSS'in farklı kaplama hızlarında elde edilen sonuçlar

Kaplama Hızı	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	FF	η (%)
1500 RPM	4,58	480	0,435	0,95
2000 RPM	3,88	430	0,396	0,66
3000 RPM	3,46	430	0,352	0,52
4000 RPM	3,78	430	0,367	0,59

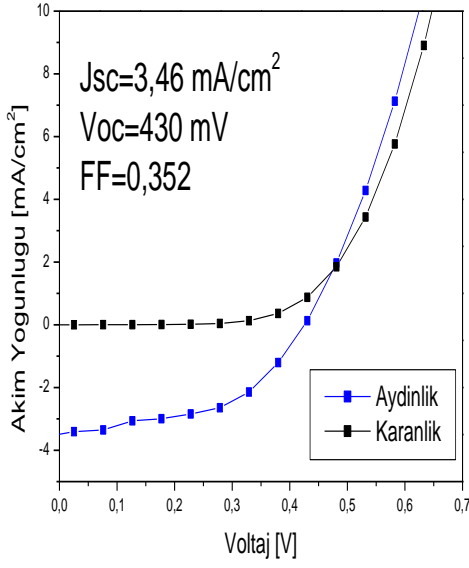
Farklı hızlarda kaplanan PEDOT:PSS tabakarı için lineer ölçekte çizilen I-V eğrileri şekil 6.16'da gösterilmiştir.



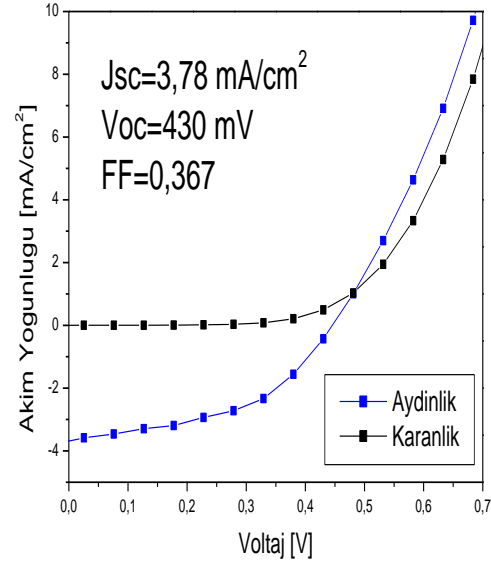
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 6.16 Farklı dönme hızlarında kaplanan PEDOT:PSS'li aygıtların I-V karakteristikleri. (a); 1500 RPM, (b); 2000 RPM, (c); 3000 RPM, (d);4000 RPM Şekil 6.16 (a)'da 1500 RPM'de kaplanan aygıtta; $J_{sc}=4,58 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=480 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0.435$ ve $PCE=\%0.95$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.16 (b)'de 2000 RPM'de kaplanan aygıtta; $J_{sc}=3.88 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=430 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0.396$ ve $PCE=\%0.66$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.16 (c)'de, 3000 RPM'de kaplanan aygıtta; $J_{sc}=3.46 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=430 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0.352$ ve $PCE=\%0.52$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.16 (c)'de 4000 RPM'de kaplanan aygıtta; $J_{sc}=4,78 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=430 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0.367$ ve $PCE=\%0.59$ olarak hesaplanmıştır.

Yapılan deneylerde en iyi güç dönüşüm veriminin 1500 RPM'de ($PCE=\%0,95$) kaplanan aygıtta olduğu saptandı.

Literatür özetinde de belirtildiği gibi, Yongkyoo Kim ve ekibinin yaptığı çalışmada kalınlıkları; 60, 65, 70, 85, 100, 110, 165 nm olarak kaplanan PEDOT:PSS tabakalı aygıtlarda güç dönüşüm verimi 110 nm'de kaplanan aygıtta bulunmuştur. Dönel kaplama cihazında, dönme hızı ne kadar fazla olursa kaplanacak film ince olacaktır. Bizim kapladığımız 1500 RPM hızı yaklaşık 100 nm'ye tekabül etmektedir. Bulunan sonuçlar literatür çalışmalarıyla uyumludur. PEDOT:PSS ışığın ilk karşılaştığı tabaka olduğundan, kalınlığı aygıt veriminde önemli rol oynamaktadır.

6.6 Farklı Saydam Elektrot (ITO) Etkisinin İncelenmesi

Saydam olması nedeniyle ışığı geçirebilmesi ve uygun iş fonksiyonu sayesinde organik fotovoltaiik hücrelerde kullanılabilir bir elektrotur. Üzerine kaplanan PEDOT:PSS sayesinde iş fonksiyonu değiştirebilir. Devrede boşlukların taşındığı elektrotur. Ayrıca ITO yüzeyinin direncinin düşük olması istenen bir parametredir.

Yapılan tüm deneylerdeki ITO direnci $< 15 \Omega \text{ cm}^{-2}$ değerindedir. Bu kısımda farklı ITO elektrotu incelenecektir.

6.6.1 Deney Sonuçları

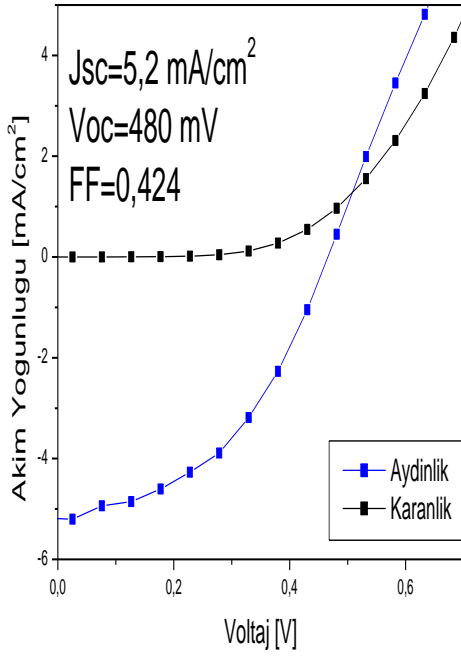
Yapılan bütün işlemler daha önce bulunan optimum koşullara göre hazırlanmıştır. Tek fark kullanılan ITO elektrotudur. ITO elektrotlar, farklı firmalardan satın alınmıştır.

Elde edilen en iyi sonuçlar çizelge 6.14'de gösterilmiştir.

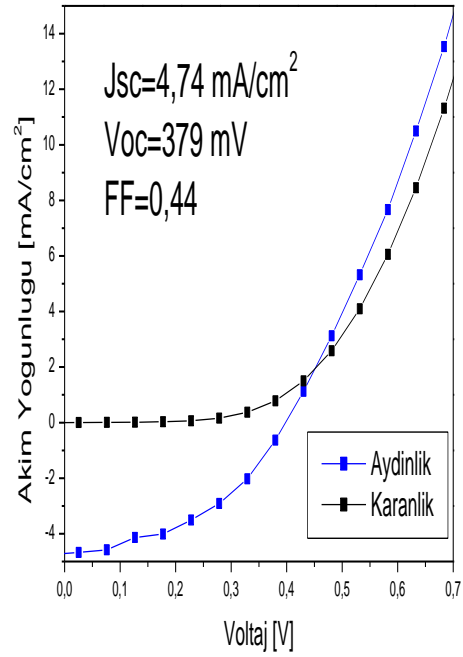
Çizelge 6.14 Farklı, ITO kullanımında elde edilen sonuçlar

Kullanılan ITO	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	FF	η (%)
$< 15 \Omega \text{ cm}^{-2}$	5,2	480	0,424	1,058
8-12 $\Omega \text{ cm}^{-2}$	4,74	379	0,44	0,79

Farklı ITO ile hazırlanan aygıtların lineer ölçekte çizilen I-V eğrileri şekil 6.17'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.17 Farklı ITO kullanılarak hazırlanan aygıtların I-V karakteristikleri. (a) $<15 \Omega \text{ cm}^{-2}$, (b) $8-12 \Omega \text{ cm}^{-2}$

Şekil 6.17 (a)'da direnci $<15 \Omega \text{ cm}^{-2}$ olan ITO'da; $J_{sc}=5.2 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=480 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0.424$, $PCE=\%1.058$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.17 (b)'de direnci $8-12 \Omega \text{ cm}^{-2}$ olan ITO'da; $J_{sc}=4.74 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=379 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0.44$, $PCE=\%0.79$ olarak hesaplanmıştır. En iyi güç dönüşüm verimi direnci $< 15 \Omega \text{ cm}^{-2}$ olan ayıtta elde edildi.

Literatürde buna benzer bir çalışmaya rastlanmamıştır. Farklı firmalardan elde edilen ITO'ların kaplama şekilleri ve kaplama hızları farklı olduğundan fotovoltaik sonuçların farklı olduğu düşünülmektedir.

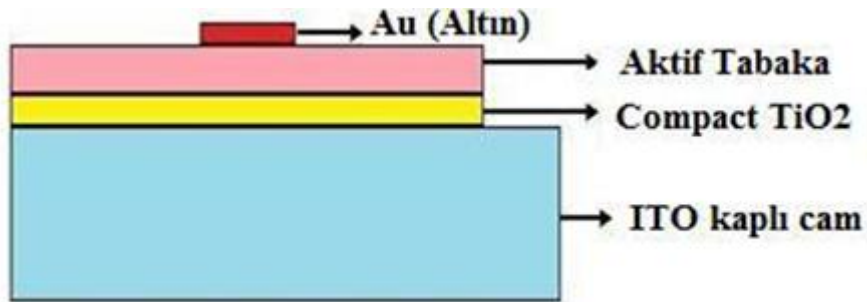
6.7 Tersine Çevrilmiş Devre Etkisinin İncelenmesi

Organik fotovoltaik hücrelerde verimi arttırmanın bir diğer şekli ise alternatif devreler (sıralı (tandem) devreler, tersine çevrilmiş (inverted type) devreler vb. gibi) üretmektir. Bu kısımda tersine çevrilmiş devre etkisi incelenecektir.

Normal organik fotovoltaik hücre devrelerinde metal elektrot olarak sıklıkla Alüminyum (Al) kullanılmaktadır. Fakat Alüminyum yüzeyi hava ortamında kolaylıkla

oksidize olup yalıtkan olan Al_2O_3 'e dönüşmektedir. Bu problemi aşabilmek için birçok çalışma grubu Al elektrot yerine, oksidize olmayan elektrotlar üzerine yoğunlaşmıştır. Bu elektrotlardan bir tanesi de Altın (Au)'dır. Bu elektrot kullanılarak hazırlanan devreler tersine çevrilmiş devre tipi olarak adlandırılır. Bu aygıt tipinde elektronlar ITO kontakten Au kantağa doğru akmaktadır. Çünkü aktif tabaka içinde meydana gelen elektron-delik çiftleri elektrik alan içinde serbest hale geldikten sonra normal devre tipinin tam tersi olacak şekilde uygun kontaklara doğru hareket etmektedirler (Ginley vd.[39]).

Bir çok opto-elektronik aygıtta, organik ışık veren diyotlar da dahil olmak üzere ön kontak transparan iletken, indiyum tin oksit (ITO) gibi yüksek iş fonksiyonuna sahip pozitif elektrot olarak görev alan metalden oluşmaktadır. Arka elektrot ise yapısal güçlü elektrik alanlar elde etmek için düşük iş fonksiyonuna sahip negatif elektrot olarak yer alan metallere meydana gelmelidir. Tipik polimer-fulleren karışımı hacim heteroeklemine dayalı fotovoltaiik hücrelerde meydana gelen elektronlar, arka elektrot tarafından ve deliklerde ön kontak tarafından toplanmaktadır. Fakat, aktif tabaka ile ITO arasına eklenen bir boşluk engelleyici tabaka ile devre tersine çevrilebilir. Burada bahsedilen ara tabaka TiO_2 [40,41] ve ZnO [40,42] gibi malzemelerden meydana gelmektedir. Böylece foto uyarılma ile meydana gelen elektronlar kullanılan malzemenin iletkenlik bandını basamak olarak kullanarak ITO'ya ulaşabilmektedir ve arka elektrot delikleri toplayan pozitif elektrot olarak yer almaktadır (Ginley vd.[39]). Bu çalışmada kullanılan kompakt TiO_2 tabakası, sistemde hücrenin kısa devre olmasını önleyen "boşluk engelleyici tabaka (hole blocking layer)" olarak görev yapmaktadır. Bu tabakanın tamamen gözeneksiz ve mümkün olduğunca ince olması gerekmektedir.



Şekil 6.18 Tersine çevrilmiş devre yapısı

6.7.1 Deney Sonuçları

Hazırlanan fotovoltaiik hücre sırasıyla; cam/ITO/TiO₂/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Au şeklindedir. TiO₂ dönel kaplama yöntemiyle 8000 RPM'de kaplandı. Ardından 450 °C'de 30 dakika tavlandı. Diğer deneysel kısımlar bulunan yukarıda elde edilen optimum koşullar ile hazırlanmıştır.

Elde edilen sonuç, çizelge 6.15'de gösterilmiştir.

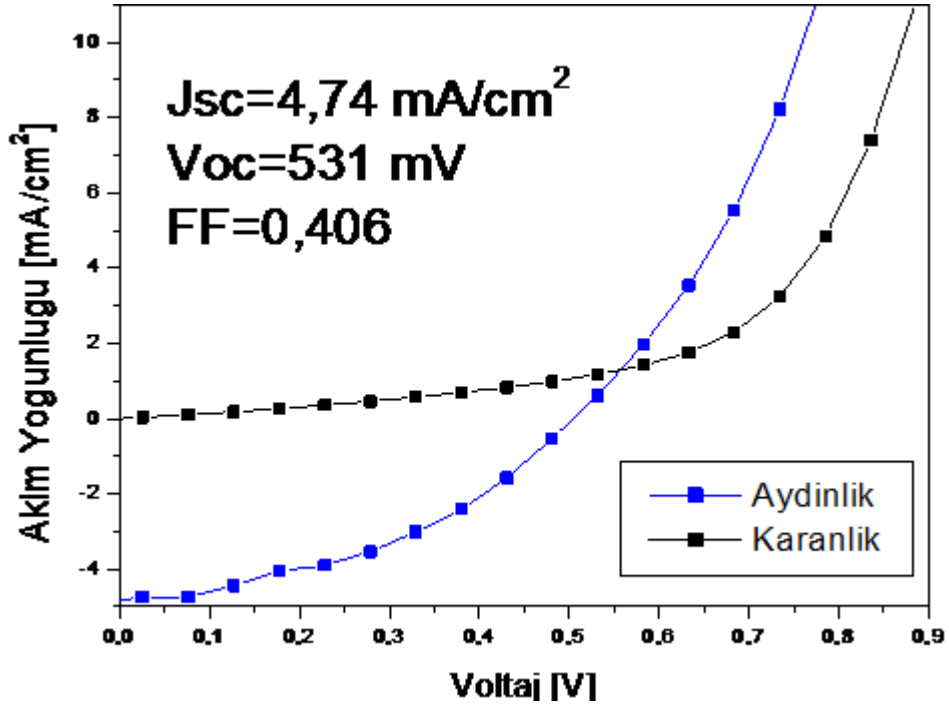
Çizelge 6.15 tersine çevrilmiş devrede elde edilen sonuçlar

	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	FF	η (%)
Tersine çevrilmiş aygıt	4,74	480	0,406	0,92

Tersine çevrilmiş olarak hazırlanan aygıtların lineer ölçekte çizilen I-V eğrisi şekil 6.19'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.16 Lieratürde elde edilen sonuçlar

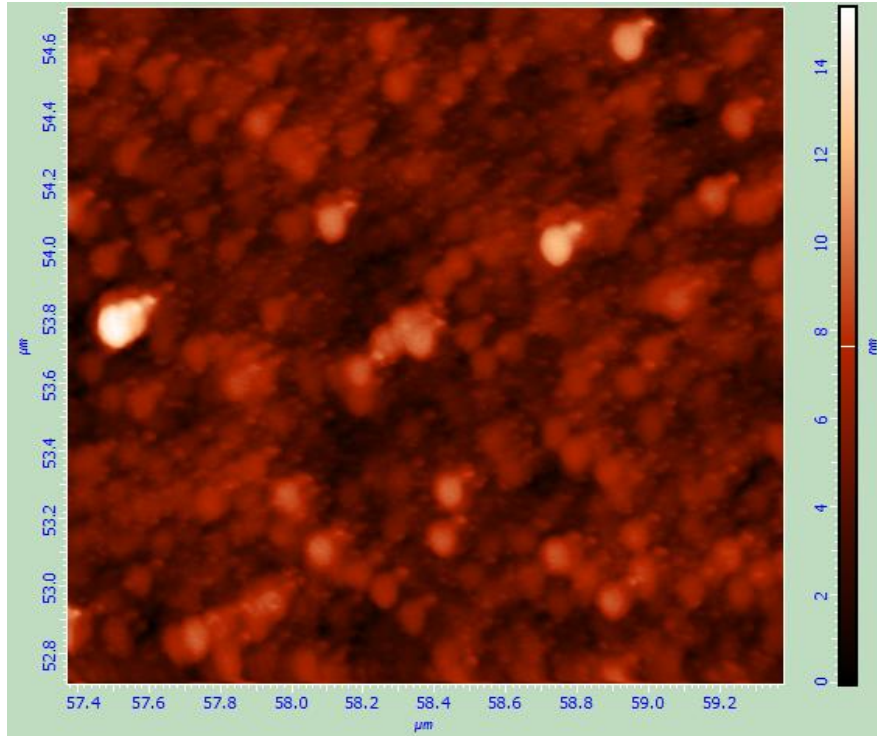
	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	FF	η (%)
Tersine çevrilmiş aygıt	7.1	0.58	0.569	2.44



Şekil 6.19 Tersine çevrilmiş devre tipindeki aygıtın I-V karakterizasyonu

Şekil 6.19’da görüldüğü gibi, $J_{sc}=4.74 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=480 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0,406$, $PCE=\%0.92$ olarak hesaplanmıştır.

Tersine çevrilmiş devre şeklinde elde edilen AFM resimleri şekil 6.20’de gösterilmiştir.



Şekil 6.20 Tersine çevrilmiş (inverted type) devrede AFM görüntüleri

Elde edilen veriler, klasik organik fotovoltaik hücrelerle neredeyse aynıdır. Böylece, Altının, Alüminyuma göre oksijene daha dayanıklı olması, kararlılık açısından önemlidir.

6.8 Farklı P3HT Molekül Ağırlığı etkisinin İncelenmesi

P3HT p-tipli polimer olarak hazırlanan aktif tabakalarda kullanılmaktadır. Oluşturulan aktif tabakaların soğurma spektrumu güneş spektrum aralığında olması yapılan deneyler için oldukça önemlidir. Ayrıca kullanılan malzemelerin birbiri ile olan uyumu da önemlidir. Farklı ticari firmadan alınan polimerlerin farklı molekül ağırlığına sahip olduğu bilinmektedir.

Bu çalışmada iki farklı firmadan elde edilen (Rieke ve ADS), farklı molekül ağırlığına sahip iki farklı P3HT incelenmiştir.

6.8.1 Deney Sonuçları

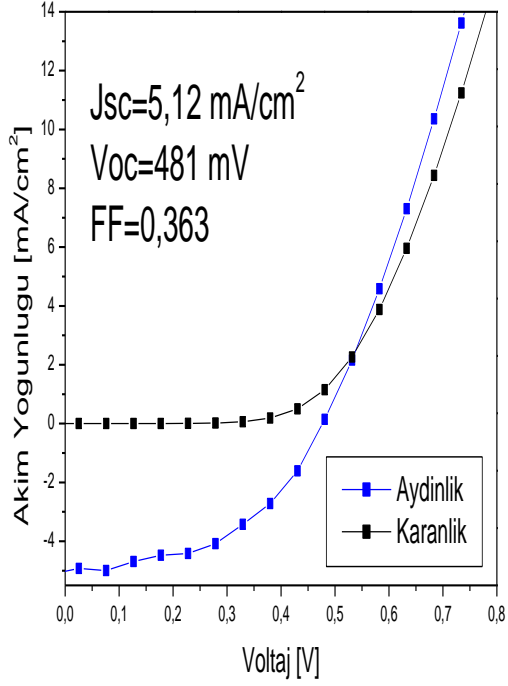
Buraya kadar olan deneysel kısımda kullanılan P3HT, Rieke Metals INC. şirketinden sağlanmıştır. Bu kısımda kullanılacak olan P3HT, American Dye Source (ADS) şirketinden temin edilmiştir ve ADS firmasından elde edilen P3HT'nin molekül ağırlığı 38.000 g/mol, Rieke Metals INC. P3HT'nin molekül ağırlığı 50.000 g/mol'dür.

Elde edilen sonuçlar çizelge 6.17'te gösterilmiştir.

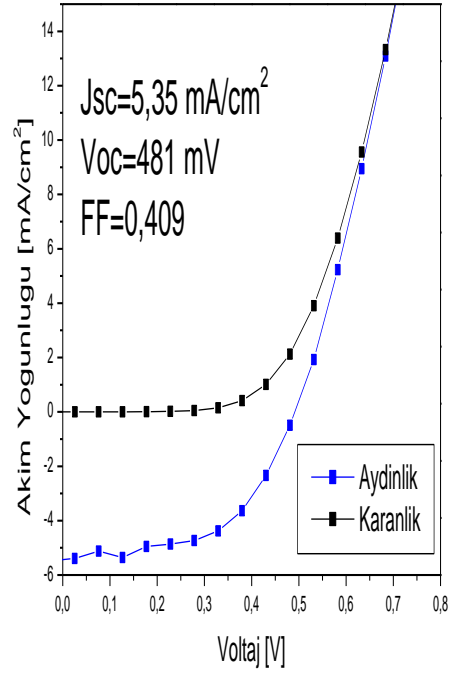
Çizelge 6.17 Molekül ağırlığı hafif P3HT'de elde edilen sonuçlar

P3HT Türü	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	FF	η (%)
ADS	5,35	481	0,409	1,05
RIEKE	5,12	481	0,363	0,89

Farklı molekül ağırlıklı P3HT ile hazırlanan aygıtların lineer ölçekte çizilmiş I-V eğrileri şekil 6.21'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

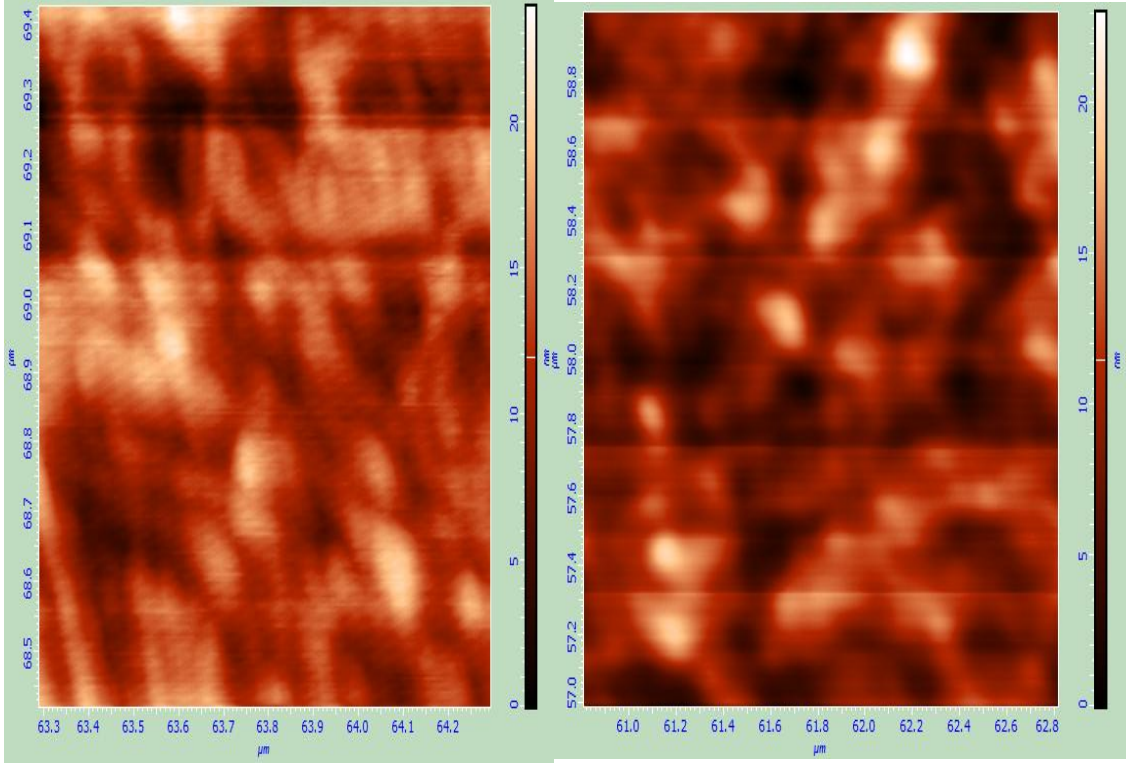
Şekil 6.21 Farklı P3HT molekül ağırlığında hazırlanan aygıtların I-V karakterizasyonu.
(a) RIEKE (b) ADS

Şekil 6.21 (a)'da görüldüğü gibi, Rieke firmasından alınan P3HT'de; $J_{sc}=5.12 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=481 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0.363$, $PCE=\%1.05$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.21 (b)'de ADS firmasından alınan P3HT'de; $J_{sc}=5.35 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=481 \text{ mV}$ olarak belirlenmiş ve $FF=0.409$, $PCE=\%0.89$ olarak hesaplanmıştır.

ADS P3HT'de kısmen daha fazla verim elde edilmiştir. Dolayısıyla her iki türlü P3HT'de organik fotovoltaik hücrelerde kullanılmaya uygundur ve elde edilen güç dönüşüm verimlerinde büyük farklılıklar olmayacaktır.

Düşük molekül ağırlığına sahip P3HT'nin mobilitesinin daha yüksek ve soğurma aralığının da yüksek molekül ağırlıklı olana kıyasla az da olsa kırmızıya kayması beklenmektedir. Bunun da akımın artmasında rol oynadığı düşünülmektedir.

Farklı molekül ağırlığına sahip P3HT kullanılan aygıtların AFM resimleri şekil 6.22'de gösterilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 6.22 Farklı molekül ağırlığına sahip [(a) ADS, (b) RIEKE firmalarından elde edilen P3HT kullanılarak hazırlanan aygıtların AFM resimleri

Faz ayrımları benzerlik göstermektedir. Elde edilen fotovoltajik sonuçlar AFM resimleriyle uyumludur.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında P3HT ve PCBM kullanılarak hazırlanan organik fotovoltaiik hücrelerde sırasıyla; çözelti konsantrasyonu, çözücü (toluen, kloroform ve klorobenzen) değişikliği, aktif tabaka için dönel kaplama hızı değişikliği, tavlama etkisi, PEDOT:PSS için dönel kaplama hızı değişikliği, ITO saydam elektrot değişikliği, tersine çevrilmiş devre etkisi ve farklı P3HT molekül ağırlığı etkileri incelenmiştir.

Bu aygıtlarda P3HT donör, PCBM ise akseptör olarak kullanılmıştır. Aygıtlar; Cam/ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al şeklinde hazırlanmıştır. Tersine çevrilmiş devrede ise, Cam/ITO/TiO₂/P3HT:PCBM/PEDOT:PSS/Au şeklinde hazırlanmıştır.

Çözelti konsantrasyonu ile ilgili çalışmalarda %2'lik P3HT:PCBM konsantrasyonundan hazırlanan fotovoltaiik hücrelerin en iyi performansı gösterdiği saptanmıştır.

Çözücü etkisi incelendiğinde klorobenzen çözücüsünün P3HT:PCBM içeren organik fotovoltaiik hücreler için en uygun çözücü olduğu saptanmıştır.

Uygun dönel kaplama hızının belirlenmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda 800 RPM'in en uygun kaplama hızı olduğu saptanmıştır.

Aktif tabakaya sıcaklık işleminin etkilerinin incelenmesi sonucunda ister üst metal elektrot kaplanmadan önce, ister kaplandıktan sonra olsun, sıcaklık işleminin hava ortamında üretilen P3HT:PCBM içeren organik fotovoltaiik hücrelerin fotovoltaiik performansını olumsuz etkilediği gözlenmiştir.

Farklı PEDOT:PSS kaplama hızlarının P3HT:PCBM içeren organik fotovoltaiik hücrelerin performansına etkileri incelendiğinde optimum kaplama hızının 1500 RPM olduğu belirlenmiştir.

Farklı saydam ITO kullanımının aygıt performansına etkilerinin incelenmesi amacıyla direnci $<15 \Omega\text{cm}^{-2}$ ve direnci $8-12 \Omega\text{cm}^{-2}$ olan, farklı iki firmadan temin edilen ITO'nun fotovoltaiik performansa etkileri incelenmiştir. Direnci $<15 \Omega\text{cm}^{-2}$ olan ITO'nun daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Yalnız, ITO kaplama yöntemlerinin de performans üzerinde etkileri olduğu düşünülmektedir.

P3HT:PCBM içeren organik fotovoltaiik hücrelerin kararlılığını arttırmak üzere anot ve katodun yeri değiştirilerek tersine çevrilmiş fotovoltaiik hücreler hazırlandı. Bu aygıt yapısında klasik organik fotovoltaiik cihazlarda kullanılan ve kolayca oksitlenebilen alüminyum katot yerine altın, katot olarak kullanılmıştır. Tersine çevrilmiş hücrelerde de benzer sonuçların elde edilmesi, kararlılık sorununun iyileştirilmesi açısından önemli bir adım olmuştur.

Farklı P3HT molekül ağırlıklı P3HT'nin organik fotovoltaiik hücre performansına etkilerinin incelenmesi amacıyla iki farklı firmadan elde edilen P3HT incelenmiştir. Düşük molekül ağırlıklı P3HT'nin fotovoltaiik performansı iyileştirdiği gözlenmiştir.

Sonuç olarak, hava ortamında çalışılan, laboratuvar şartlarına göre optimum koşullar şu şekilde bulunmuştur: P3HT:PCBM çözeltisi %2 olarak hazırlanmalı, çözücü olarak klorobenzen kullanılmalı ve P3HT:PCBM oranı sırasıyla 1:0,55 olmalı, Aktif tabaka dönel kaplama ile 800 RPM'de kaplanmalı, PEDOT:PSS tabakası dönel kaplama ile 1500 RPM'de kaplanmalı, PEDOT:PSS tabakası 120°C 'de 4 dakika tavlmalı ve aktif tabaka tavlammamalı, $<15 \Omega \text{cm}^{-2}$ yüzey direçli ITO ve düşük molekül ağırlıklı P3HT kullanılmalıdır.

Organik fotovoltaiik hücrelerin verimini arttırmak için; devre tipi, çözücü türü, kullanılan malzemelerin konsantrasyonunun önemli olduğu bu çalışmayla gösterilmiştir. Şu da belirtilmelidir ki; tüm polimer ve fullerenlerden oluşan organik fotovoltaiik hücrelere uygulanabilecek genel geçer bir reçete yoktur. Her yeni malzeme ile çalışıldığında yukarıdaki etkiler yeniden incelenmeli ve optimum koşullar yeniden belirlenmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] Kenji K., Jun S., Masayuki Y. ve Chihaya A., (2009) Effect of solvent on fabrication of active layers inorganic solar cells based on poly(3-hexylthiophene) and fullerene derivatives, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 93 (2009) 514–518.
- [2] Ding, Y., Lu, P. ve Chen Q., (2008) Optimizin material properties of bulk hetero-junction polymer films for photovoltaic applications, *Proc.of SPIE*, 7099 709919-1.
- [3] Al-Ibrahim, Ambacher, M., Sensfuss, O. ve Gobsch, S., (2009), Effects of solvent and annealing on the improved performance of solar cells based on poly(3-hexylthiophene): Fullerene, *Applied Physics Letters*, 86-0003-6951.
- [4] Sung-Ho J., Vijaya K.N., Han-Soo J., Sung-Min P., Jin-Soo P., Sung C.K., Jae Wook L. Ve Yeong-Soon G., (2007), Optimization of process parameters for high-efficiency polymer photovoltaic devices based on P3HT:PCBM system, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 91: 1187–1193.
- [5] Kim Y., Choulis, S.A., Nelson, J., Bradley, D.D.C., Cook, S., Durrant, D.J., (2005) Effects of thickness and thermal annealing of the PEDOT:PSS layer on the performance of polymer solar cells *Appl. Phys. Lett.* 86: 063502.
- [6] Weickert, J., Haiyan S., Palumbiny, C., Hesse,H.C. ve Schmidt-Mende L.(2010) Spray-deposited PEDOT:PSS for inverted organic solar cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 94: 2371–2374.
- [7] Jianyong O. ve Yijie X., (2009) High-performance polymer photovoltaic cells with thick P3HT:PCBM films prepared by a quick drying process, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 93:1592–1597.
- [8] Kalita, G., Masahiro, M., Koichi, W. ve Umeno, M., (2010), Nanostructured morphology of P3HT:PCBM bulk heterojunction solar cells, *Solid-State Electronics* 54:447–451.

- [9] Fang-Chung C., Chu J., Jyh-Lih W. ve Wei-Chi C., (2010), Morphological study of P3HT:PCBM blend film prepared through solvent annealing for solar cell applications, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 94: 2426–2430.
- [10] Heejoo K., Won-Wook S. ve Sang-Jin M., (2006) Effect of Thermal Annealing on the Performance of P3HT/PCBM Polymer Photovoltaic Cells, *Journal of the Korean Physical Society*, No. 3, .48: 441-445.
- [11] Yu-Ching H., Yu-Chia L., Shao-Sian L., Ming-Chung W., Chun, W. Ve Wei-Fang S., (2009) Study of the effect of annealing process on the performance of P3HT:PCBM photovoltaic devices using scanning-probe microscopy, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 93:888–892.
- [12] Woon-Hyuk B., Yang, H., Tae-Sik Y., Kang, C.J., Hyun Ho L., Yong-Sang K., (2009) Effect of P3HT:PCBM concentration in solvent on performances of organic solar cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 93: 1263–1267.
- [13] Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 23279 Elazığ, Mayıs 2011
http://perweb.firat.edu.tr/personel/yayinlar/fua_612/612_502.pdf
- [14] Arısoy, A., Ateşok, G., Bayülken, A., Derbentli, T., Kadırgan, F., Karadoğan, H., Karaosmanoğlu, F., Onaygil, S., Onur, M., Önal, G., Önöz, B., Özgener, A., Satman, A., Şerpen, U., Şen, M., Şişman, A., Tolun, S. ve Ünsal, İ., *Türkiyede Enerji ve Geleceği, İTÜ Raporu, Nisan 2007, İstanbul.*
- [15] <http://www.main-board.eu/cevre-bilimi/394905-fosil-yakitlarin-zararlari-nelerdir.html>, Mayıs 2011
- [16] Öztürel, N., Zilan, R. ve Ecevit, A., (2001) Türkiye ‘de Yenilenebilir Enerji Kaynakları İçin İzlenmesi Gereken Strateji, Planlama Politikaları ve Bunların Sosyal ve Siyasi Etkileri. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, 28-32, İzmir.
- [17] Varınca, Kamil B., Gönüllü ve M. Talha, (2006). *Türkiyede Güneş Enerjisi ve Potansiyelin Kullanım Derecesi, Yöntemi ve Yaygınlığı Üzerine Bir Araştırma*, UGHEK’2006: I. Ulusak Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi 21-23, ESOGÜ, Eskişehir.
- [18] Alaçakır, F.B., (2001) Ülkemizde Elektrik Üretimini Destekleyen Bir Çözüm: Güneş Pilleri. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, 182-185, İzmir.
- [19] Cafer, T., (2000) *Katıhal Elektroniği*, Yıldız Teknik Üniversitesi basım yayın merkezi.
- [20] Balıkesir Üniversitesi Fizik Bölümü ders notları, Mayıs 2011
<http://w3.balikesir.edu.tr/~kahveci/dersler/te-04.pdf>

- [21] American Physical Society resmi internet sitesi, Mayıs 2011
<http://www.aps.org/publications/apsnews/200904/physicshistory.cfm>
- [22] The Electrochemical Society Interface, (2008), Inorganic Photovoltaic Solar Cells: Silicon and Beyond.
- [23] Goetzberger, A. ve Hebling, C., (2000), "Photovoltaic materials, past, present, future", Solar Energy Materials & Solar Cells, 62: 1-19.
- [24] Zafer, C. (2006), Organik Boya Esaslı Nanokristal Yapılı İnce Film Güneş Pili Üretimi.
- [25] Winder, C. ve Sarıçiftçi, N.S., (2004), Low Bandgap Polymers for Photon Harvesting in Bulk Heterojunction Solar Cells, J. Mater. Chem., 14:1077-1086.
- [26] Çevik, E., (2010), Tiyofen ve Antrasen İçeren Konjuge Polimerlerle Hazırlanan Hacim Heteroeklemlili organik Güneş Gözeleri" Yüksek Lisans Tezi Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
- [27] Sarıçiftçi, S. ve Mozer, J., (2006) Conjugated polymer photovoltaic devices and materials, 21 February 2005, C. R. Chimie 9 (2006) 568–577.
- [28] Wöhrle, D. ve Meissner, D., (1991), Organic Solar Cells, Advance Materials 3:129-138.
- [29] Caferov, T., Yarıiletken Fiziği-1, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları.
- [30] Lane, P.A., Rostalski, J., Giebeler, C., Martin, S. J., Bradley, D.D.C. ve Meissner, D., (2000), Electroabsorption studies of phthalocyanine/ perylene solar cells, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 63:3-13.
- [31] Hoppe, H., Arnold, N., Meissner, D. ve Sarıçiftçi, N.S., (2004), Modeling of optical absorption in conjugated polymer/fullerene bulk heterojunction plastic solar cells, Thin Solid Films, 451:589-592.
- [32] Yoshino, K., (1997), Novel Photovoltaic Devices Based on Donor- Acceptor Molecular and Conducting Polymer Systems, IEEE Transaction on Electron Devices, 44, 8:1315-1324.
- [33] Shaheen, S. E, Brabec, C ve Padinger, F., (2001), 2.5 % Efficient Organic Plastic Solar Cells, 78:841-843.
- [34] Orta Doğu Teknik Üniversitesi "Organik solar cells preparation", Mayıs 2011
www.metu.edu.tr/~acirpan/solar.pdf
- [35] http://en.wikipedia.org/wiki/Air_mass_coefficient
- [36] Yu-Ching H., Yu-Chia L., Shao-Sian L., Ming-Chung W., Chun W. ve Wei-Fang S., (2009) Study of the effect of annealing process on the performance of

- P3HT:PCBM photovoltaic devices using scanning-probe microscopy, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 93 (2009) 888–892.
- [37] Shrotriya, V. ve Li, G., (2006) Accurate Measurement and Characterization of Organic Solar cells, *Adv. Funct. Mater.* 16, 2016–2023.
- [38] X. Yang, J. Loos, S.C. Veenstra, W.J.H. Verhees, M.M. Wienk, J.M. Kroon, M.A.J. Michels ve R.A.J. Janssen, *Nano Lett.* 5 (2005) 579.
- [39] Shaheen, S.E., White, M.S., Olson, D.C., Kopidakis, N. ve Ginley, D.S., (2007), Inverted bulk-heterojunction plastic solar cells, *SPIE*, doi 10.1117/2.1200705.0756.
- [40] Takahashi, K., Nishi, T., Suzaka, S., Sigeyama, Y., Yamaguchi, T., Nakamura, J. ve Murata, K., (2005), Performance Improvement by Inserting an Electrodeposited ZnO into ITO/Organic Solid Interface in Organic Solid-state Solar Cells”, *Chem. Lett.*, 34: 768-769.
- [41] Waldauf, C., Morana, M., Denk, P., Schilinsky, P., Coakley, K., Choulis, S.A. ve Brabec, C.J., (2006), Highly efficient inverted organic photovoltaics using solution based titanium oxide as electron selective contact, *Appl. Phys. Lett.*, 89: 233517-1-3.
- [42] Ningbo Sanmoo Co.,Ltd şirketinin internet sitesi, Mayıs, 2011
http://www.energyer.com/Know_How/dye-sensitized-solar-cell.html

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Adem KARSLI
Doğum Tarihi ve Yeri : 19.07.1987
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : ademkarsli@msn.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul	Mezuniyet Yılı
Y.Lisans	Fizik	Yıldız Teknik Üniversitesi	2011
Lisans	Fizik	Kocaeli Üniversitesi	2009
Lise	Fen Bilimleri	Cibali Lisesi	2005

YAYINLAR

Proje

1. Bursiyer, Tübitak Projesi, 108-T-485, “Yarıiletken Polimerler Kullanılarak Organik Fotovoltaik Hücrelerin Üretilmesi”