

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

**YARIİLETKEN POLİMERLER KULLANILARAK ÇİFT EKLEMLİ ORGANİK
GÜNEŞ PİLLERİNİN HAZIRLANMASI**

AREN YAZMACIYAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI
FİZİK YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. SERAP GÜNEŞ**

İSTANBUL, 2013

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YARIİLETKEN POLİMERLER KULLANILARAK ÇİFT EKLEMLİ ORGANİK
GÜNEŞ PİLLERİNİN HAZIRLANMASI**

Aren YAZMACIYAN tarafından hazırlanan tez çalışması 23.08.2013 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

Doç. Dr. Mustafa OKUTAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Tarık EREN
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Lisans eğitimimin üçüncü senesinde kendisi ile tanışmamdan itibaren bana duyduğu güven ile Erasmus programı kapsamında Avusturya'ya gitmeme vesile olup hayatımın en büyük şansını bana tanıyan, vizyon ve çalışkanlığı ile kendisini kendime her zaman örnek alacağım değerli hocam ve tez danışmanım Doç. Dr. Serap GÜNEŞ'e,

Yüksek lisans tezim süresince laboratuardaki varlığı ile hem korumacı bir tavır sergileyen hem de her umutsuzluğa düştüğümde beni tekrar ayağa kaldıran sevgili Dr. Süreyya AYDIN'a,

Sahip olduğu bilgi birikimi ile tezim hakkında sayısız yapıcı tartışmalarda bulunduğum ve ağırbaşlı duruşu ile laboratuarda bir ağabey figürü olan Dr. Fatih ONGÜL'e,

Deneyisel çalışmalarımda yeni bir çalışma ortamı ve olanakları sağlayarak yardımlarını esirgemeyen Dr. Elif PARLAK'a,

Laboratuarda bulunduğu süre içerisinde birbirimize her daim destek ve dert ortağı olduğumuz, sürekliliği sağladığımız ve çoğu engeli beraber aştığımız kadim dostum Adem KARSLI'ya,

Bu tezin yazım sürecinde hiçbir zaman beni geri çevirmeyerek yardıma ihtiyacım olduğu her an sorumluluk alarak teze katkıda bulunan ve manevi desteğini hiç esirgemeyen Meltem AKÇAY'a,

Hiçbir fedakarlıktan kaçınmayarak tezin tamamlanmasında tüm imkanlarını seferber eden, değerli insan Sesil UZAŞCI'ya,

Yüksek lisans eğitimim esnasında, birlikte olduğumuz süre boyunca bana her zaman destek olan, hayatta ve akademik alanda başarımlarım için dualarını hiçbir zaman eksik etmediğine inandığım sevgili Zeynep ÜMİTLEN'e,

En önemlisi, hayatıma akademik kariyer ile devam etme kararını verdiğim andan itibaren desteğini bir an olsun esirgemeyen, rahat bir eğitim hayatı geçirmem için her türlü fedakarlıkta bulunup maddi ve manevi imkanlarını sonuna kadar zorlayan her şeyden kıymetli ablam Lara YAZMACIYAN, babam Berç YAZMACIYAN ve annem Alis YAZMACIYAN'a

Sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Ağustos, 2013

Aren YAZMACIYAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	xii
ABSTRACT	xv
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	4
1.3 Hipotez	7
BÖLÜM 2.....	8
ENERJİ	8
2.1 Enerji Politikası.....	8
2.2 Güneş Enerjisinin Önemi.....	8
2.3 Dünya Çapında Enerji Tüketimi.....	9
2.4 Güneş Enerjisi Teknolojisinin Beklenen Geleceği	9
2.5 Sera Gazı Kaynakları ve Etkileri	9
2.6 Güneş Enerjisinin Avantajları	10
BÖLÜM 3.....	11
KONJUGE POLİMERLER	12
3.1 Konjuge Polimerlerin Tarihi	12
3.2 Kullanılan Malzemeler	13

BÖLÜM 4.....	18
ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİ	18
4.1 Organik Güneş Pillerinin Çalışma Prensibi	18
4.1.1 Fotouyarılma, Eksitonlar, Yük Transferi	18
4.2 Aygıt Tipleri	19
4.2.1 Tek Katmanlı Fotovoltaik Hücreler	19
4.2.2 İki Katlı Heteroeklem Yaklaşımı	19
4.2.3 Hacim Heteroeklem Yaklaşımı.....	20
4.3 Çok Eklemlili Organik Güneş Pilleri	21
4.3.1 Yığılmış Piller (Stacked Cells)	21
4.3.2 Tandem Güneş Pilleri.....	22
4.4 Yük Ayrımı	23
4.5 Organik Güneş Pillerinin Karakteristiği	23
4.5.1 Çalışma Prensipleri	24
4.5.2 Akım-Gerilim Karakteristiği	25
4.5.2.1 Açık Devre Gerilimi (V_{OC}).....	25
4.5.2.2 Kısa Devre Akımı (I_{SC}).....	26
4.5.2.3 Maksimum Güç Noktası (mpp)	26
4.5.2.4 Hava Kütlesi (Air Mass, AM).....	26
4.5.2.5 Eşdeğer Devre	27
BÖLÜM 5.....	29
DENEYSEL ÇALIŞMA	29
5.1 Tek Eklemlili Fotovoltaik Hücrelerin Hazırlanması	29
5.2 Çok Eklemlili Fotovoltaik Hücrelerin Hazırlanması	30
5.3 Deneysel Sonuçlar.....	31
5.3.1 MDMO-PPV:PCBM Kullanılarak Hazırlanmış Tek Eklemlili Hücreler ...	31
5.3.2 PCDTBT:PCBM Kullanılarak Hazırlanmış Tek Eklemlili Hücreler.....	31
5.3.3 CuPc:C ₆₀ Kullanılarak Hazırlanmış Tek Eklemlili ve Yığılmış Hücreler..	33
5.3.4 CuPc:C ₆₀ ve PCDTBT:PCBM Kullanılarak Hazırlanmış Tandem Piller .	35
5.3.5 CuPc:C ₆₀ ve MDMO-PPV:PCBM Kullanılarak Hazırlanmış Tandem Piller.....	37
BÖLÜM 6.....	39
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	39
KAYNAKLAR.....	41
ÖZGEÇMİŞ.....	44

SİMGE LİSTESİ

a	İdealite faktörü
Ag	Gümüş
Al	Alüminyum
Au	Altın
B	Bor
°C	Selsius derece
C	Karbon
C ₆₀	Karbon 60
CdS	Kadmiyum Sülfür
CdTe	Kadmiyum Tellür
CH ₄	Metan
CO ₂	Karbondioksit
CuInSe ₂	Bakır İndium di Selenyum
CuO	Bakıroksit
CuPc	Bakırftalosiyenin
E	Elektrik alan
e	Elektron yükü
E _c	İletkenlik bandı enerji seviyesi
E _d	Donör enerji seviyesi
E _g	Yasak bant enerji seviyesi
E _v	Değerlik (valans) bandı enerji seviyesi
eV	Elektron volt
F	Kuvvet
Ga	Galyum
GaAs	Galyum Arsenit
Ge	Germanyum
I	Akım
I ₀	Karanlık doyma akımı
I _d	Diyot Akımı
I _L	Fotoakım
I _{SC}	Kısa devre akımı
I _{SH}	Kaçak akım
I _{MPP}	Maksimum akım güç noktası

J_{max}	Maksimum akım yoğunluğu
k_B	Boltzman sabiti
kW	Kilo watt
Li	Lityum
MW	Mega Watt
mV	Milivolt
mA	Miliamper
μ	Mobilite
N	Azot
n	Kalite faktörü
N_o	Etkin durum yoğunluğu
N_{CS}	Modül sayısı
n_i	Asal taşıyıcı yük yoğunluğu
nm	Nanometre
η	Güç dönüşüm verimi
P	Fosfor
P_{LIGHT}	Gelen ışın şiddeti
P_{MPP}	Maksimum güç çıkışı
P_{IN}	Optik giriş gücü
q	Yük
R_s	Seri direnç
R_{SH}	Paralel direnç
Sb	Antimon
Si	Silisyum
Se	Selenyum
T	Sıcaklık
TiO_2	Titanyumdioksit
U	Uygulanan voltaj
ΔU	Potansiyel enerji değişimi
V	Gerilim
V_{max}	Maksimum gerilim
V_{OC}	Açık devre voltajı
V_{MPP}	Maksimum gerilim güç noktası
λ	Dalga boyu
W	Watt
ZnO	Çinko oksit

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif akım
AM	Hava kütlesi
BM	Birleşmiş Milletler
CFC	Kloroflorokarbon
DC	Doğru akım
EBL	Elektron engelleyici tabaka
ETL	Elektron geçiren tabaka
HBL	Boşluk engelleyici tabaka
HTL	Boşluk geçiren tabaka
HOMO	İşgal edilmiş en yüksek enerji seviyesi
IPCE	Gelen fotonun elektrik akımına dönüşüm verimi
ITO	İndiyum kalay oksit
LUMO	İşgal edilmemiş en düşük enerji seviyesi
MDMO-PPV	poli[2-metoksi-5-(3',7'-dimetiloktiloksi)-1,4-fenilenvinilen]
NREL	Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
MIM	Metal yalıtkan metal
OFET	Organik alan etkili transistör
OLED	Organik ışık yayan diyot
OPV	Organik fotovoltaiik
P3HT	Poli(3-hekziltiophen-2, 5-dil)
PCBM	(1-(3-metoksikarbonil) propil-1-fenil[6, 6]C61)
PCDTBT	poli[N-9'-heptadekanil-2,7-karbazol-alt-5,5-(4',7'-di-2-tienil-2',1',3'-benzotiadiaazol)
RPM	Dakika başına dolanım sayısı
TWh	Tera watt saat

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Tek ve çok eklemli organik güneş pillerinin verimliliğinin gelişim süreci	3
Şekil 3.1 sp^2 hibritleşmiş karbon atomları üzerinde elektron delokalizasyonu	13
Şekil 3.2 PEDOT:PSS'nin kimyasal yapısı	14
Şekil 3.3 MDMO-PPV'nin kimyasal yapısı	15
Şekil 3.4 P3HT'nin kimyasal yapısı	15
Şekil 3.5 PCDTBT'nin kimyasal yapısı	16
Şekil 3.6 PCBM'nin kimyasal yapısı	16
Şekil 3.7 C_{60} 'ın kimyasal yapısı	17
Şekil 3.8 CuPc'nin kimyasal yapısı	17
Şekil 4.1 Polimer ve C_{60} arasındaki fotoindüklenmiş yük transferi	19
Şekil 4.2 Hacim heteroekleminin şematik gösterimi	20
Şekil 4.3 Çok eklemli yığılmış pillerin, (a) Mekanik olarak bağımsız (unconstrained) uygulaması (b) Monolitik (series constrained) uygulaması	21
Şekil 4.4 İki eklemli monolitik pillerde, (a) E_G 'si küçük olan p-n ekleminin J-V karakteristiği (b) E_G 'si büyük olan p-n ekleminin J-V karakteristiği (c) Pilin J-V karakteristiği	22
Şekil 4.5 Hacim heteroeklem güneş pili	23
Şekil 4.6 MIM modelleri. İki metal elektrot arasına sıkıştırılmış organik yarı iletken tabakaların farklı çalışma prensipleri: (a) kısa devre durumu (b) açık devre durumu (c) ters yönde kutuplama (d) ileri yönde kutuplama. ITO: yüksek iş fonksiyonlu elektrot, Al: düşük iş fonksiyonlu elektrot	24
Şekil 4.7 Organik fotovoltaik hücrenin karanlık ve aydınlık akım-gerilim eğrileri	25
Şekil 4.8 Hava kütlesi	27
Şekil 4.9 Bir güneş pilinin eşdeğer devresi	27
Şekil 5.1 Aktif tabakası MDMO-PPV:PCBM (1:4) olarak hazırlanmış fotovoltaik hücreye ait akım yoğunluğu-gerilim eğrileri	32
Şekil 5.2 Aktif tabakası PCDTBT:PCBM (1:4) olarak hazırlanmış fotovoltaik hücreye ait akım yoğunluğu-gerilim eğrileri	32
Şekil 5.3 PCDTBT:PCBM'in soğurma grafiği	33
Şekil 5.4 Aktif tabakası CuPc: C_{60} olarak hazırlanmış tek ve çift eklemli fotovoltaik hücrelere ait akım yoğunluğu-gerilim eğrileri	34
Şekil 5.5 CuPc: C_{60} ile oluşturulmuş tek eklemli hücrelere ait soğurma eğrisi	35
Şekil 5.6 CuPc: C_{60} ile oluşturulmuş çift eklemli hücrelere ait soğurma eğrisi	35
Şekil 5.7 Tek ve çift eklemli hücrelere ait J-V eğrileri	36

Şekil 5.8 PCDTBT:PCBM/CuPc:C ₆₀ çift eklemli hücreye ait soğurma eğrisi.....	37
Şekil 5.9 Tek ve çift eklemli hücrelere ait IPCE eğrileri	37
Şekil 5.10 Tek ve çift eklemli hücrelere ait J-V eğrileri	38

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1 Tek eklemli güneş pillerine ait çalışmalar	2
Çizelge 1.2 Çok eklemli güneş pillerine ait çalışmalar	2
Çizelge 2.1 Dünya çapında enerji tüketimi	11
Çizelge 2.2 Enerji sistemlerinin çevreye etkisi	11
Çizelge 5.1 Polimer:Fulleren oranları.....	30
Çizelge 5.2 CuPc:C ₆₀ ve CuPc:C ₆₀ /CuPc:C ₆₀ hücrelerine ait V _{OC} , J _{SC} , FF ve η değerleri ...	34
Çizelge 5.3 PCDTBT:PCBM, CuPc:C ₆₀ ve PCDTBT:PCBM/CuPc:C ₆₀ hücrelerine ait V _{OC} , J _{SC} , FF ve η değerleri	36
Çizelge 5.4 MDMO-PPV:PCBM ve CuPc:C ₆₀ tek eklemli ve tandem hücrelerin çalışma parametreleri	38
Çizelge 6.1 CuPc:C ₆₀ /CuPc:C ₆₀ , PCDTBT:PCBM/CuPc:C ₆₀ ve MDMO-PPV:PCBM/CuPc:C ₆₀ hücrelerine ait V _{OC} , J _{SC} , FF ve η değerleri	40

YARIİLETKEN POLİMERLER KULLANILARAK ÇİFT EKLEMLİ ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİNİN HAZIRLANMASI

Aren YAZMACIYAN

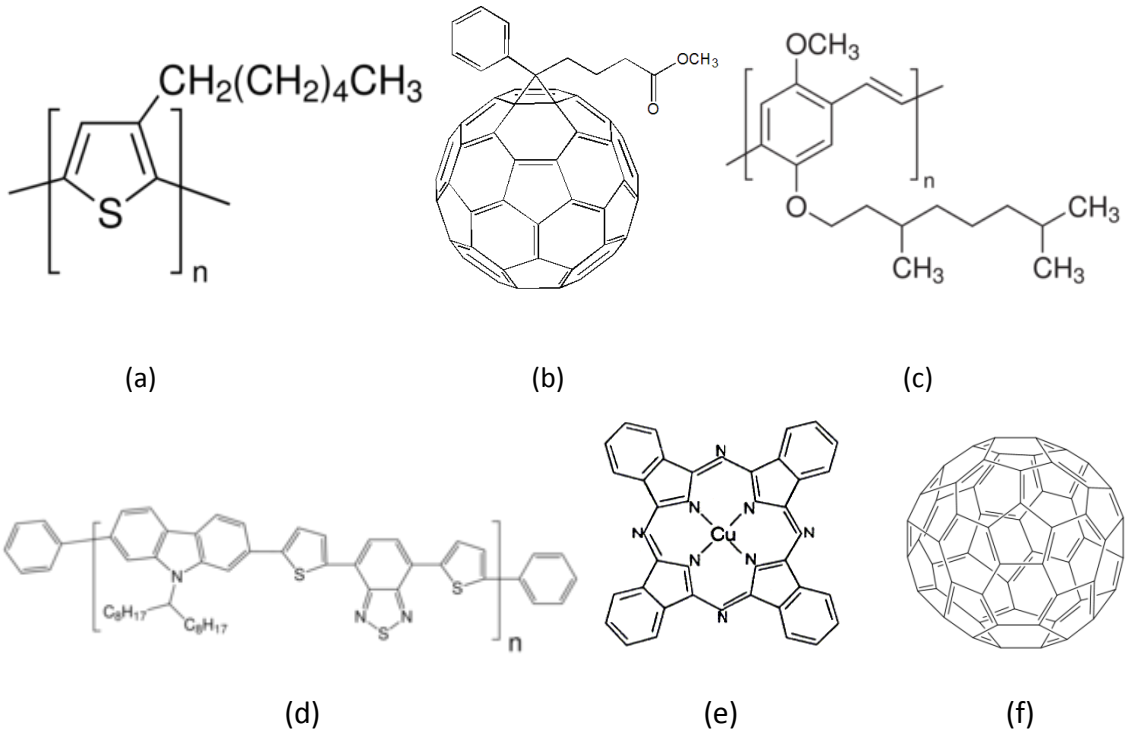
Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Serap GÜNEŞ

Dünya'nın enerji ihtiyacı her geçen gün katlanarak artmakta ve bu bağlamda doğal kaynaklar giderek azalmaktadır. Daha temiz bir enerji üretip tüketmek adına, organik elektronik gelecek vaat eden bir alandır. Düşük maliyetli üretim ve birçok ağıta kolay entegrasyon gibi avantajları ile organik yarıiletken malzemeler son çeyrek yüzyılda büyük bir önem kazanmıştır. Bu malzemeler; organik fotovoltaiik (OPV), organik alan etkili transistörler (OFET), organik LEDler (OLED) gibi uygulama alanlarına sahiptir. Özellikle organik güneş pili (OSC) araştırmaları bu zaman diliminde dünya çapında büyük ilgi uyandırmıştır. Son yıllarda da bu konudaki araştırmalarda teşvik edici sonuçlar elde edilmiş ve bu çalışmalar ışığında güneş pillerinin verimini arttıran tandem yapısı kullanılmaya başlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, kimyasal yapıları şekilde gösterilen p-tipli (elektron veren) poli(3-hekzil)tiyofen (P3HT), poli[N-9'-heptadekanil-2,7-karbazol-alt-5,5-(4',7'-di-2-tienil-2',1',3'-benzotiadiazol)(PCDTBT), bakırftalosiyanın (CuPc) ve poli[2-metoksi-5-(3',7'-dimetiloktiloksi)-1,4-fenilenvinilen] (MDMO-PPV) ile n-tipli (elektron alan) Buckminsterfulleren (C₆₀) ve 1-(3-metoksikarbonil) propil-1-fenil[6,6]C61 (PCBM) fulleren türevi kullanılarak hazırlanan tandem fotovoltaiik hücrelerinde farklı aktif tabaka konsantrasyonları ve kalınlıklarının, farklı rekombinasyon katmanlarının verime etkisi incelenmiş ve optimizasyon için sıcaklığın etkisi gözlemlenmiştir.



ŞekilProjede kullanılan (a) P3HT, (b) PCBM, (c) MDMO-PPV, (d) PCDTBT, (e) CuPc ve (f) C₆₀'ın kimyasal yapıları.

Anahtar Kelimeler:Organik güneş pilleri, tandem, P3HT, PCBM, MDMO-PPV

**FABRICATION OF ORGANIC TANDEM SOLAR CELLS USING
SEMICONDUCTER POLYMERS**

Aren YAZMACIYAN

Department of Physics

M.Sc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Serap GÜNEŞ

World's energy demand is increasing rapidly and natural resources are running out proportionally. In order to produce and consume a cleaner energy, organic electronics seem to be promising. Due to advantages like low cost production and easy integration to many devices, organic semiconductors gained a higher importance in the last decades. These materials come along in applications such as organic photovoltaics (OPVs), organic field effect transistors (OFETs), organic light emitting diodes (OLEDs). Especially, research in the area of organic solar cells (OSCs) has got a great amount of attention worldwide in this time span. Encouraging results have been received in recent years which led scientists to synthesize new materials and develop device configuration to tandem structure, in order to increase the device efficiency.

In this thesis, it is aimed to examine the effects of different active layer concentrations and thicknesses on the efficiency of organic tandem solar cells. Moreover, the effect of annealing is also observed. Organic tandem solar cells are prepared by using (p) type (electron donor) poly(3-hexylthiophene (P3HT), Poly[N-9'-heptadecanyl-2,7-carbazole-alt-5,5-(4',7'-di-2-thienyl-2',1',3'-benzothiadiazole)] (PCDTBT), poly[2-methoxy-5-(3',7'-dimethyloctyloxy)-1,4-phenylenevinylene] (MDMO-PPV), copper phthalocyanine(CuPc) with (n) type (electron acceptor) Buckminsterfullerene (C₆₀) and 1-[3-(methoxycarbonyl)propyl]-1-phenyl-[6,6]C₆₁ (PCBM) fullerene derivative whose chemical structures are shown in Figure.

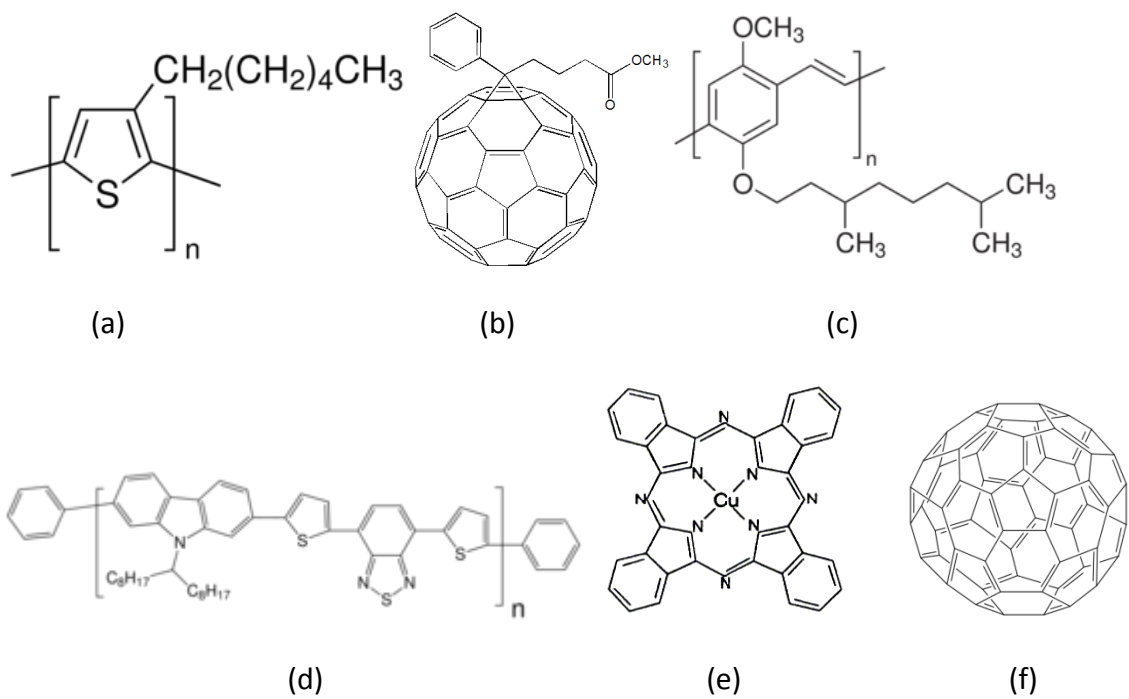


Figure The chemical structures of (a) P3HT, (b) PCBM, (c) MDMO-PPV, (d) PCDTBT, (e) CuPc and (f) C₆₀.

Keywords: Organic photovoltaic cells, tandem solar cells, P3HT, PCBM, MDMO-PPV

1.1 Literatür Özeti

Fotovoltaik olayının tarihsel gelişiminin ardından uzay çalışmalarında silikon kristaline dayalı güneş pilleri kullanımı yaygınlaştırılmış ve bu alanda verimliliğin artırılması için çalışmalar devam etmiştir. Silikon kristaline dayalı güneş pillerinin temel avantajı çok daha az iletken malzemeyle diğer güneş pillerine kıyasla yüksek verim elde edilmesi olmuştur. Ancak yüksek enerji gereksinimini karşılayamaması ve hassas ve kırılğan yapısı dezavantajları olmuştur.

Silikon kristaline dayalı güneş pillerine alternatif olarak ince film güneş pilleri geliştirilmiştir. İnce film güneş pilleri dünya çapında en çok kullanılan güneş pilleri sıralamasında ikincidir. Üretim maliyeti diğer türlere göre daha düşüktür. Verimi az olmasına rağmen esnek yapısı uygulama kolaylığı sağlar.

Üçüncü nesil olarak adlandırılan güneş pilleri ise iletken polimer bazlı ve boya ile duyarlılaştırılmış güneş pilleridir. Günümüzde tek eklemliler ve çok eklemliler türleri bulunmaktadır. Çizelge 1.1'de tek eklemliler, çizelge 1.2'de ise çok eklemliler güneş pilleri üzerindeki çalışmalar özetlenmiştir [1].

Son on yılda organik fotovoltaiklerin yapısında önemli değişiklikler yapılmış ve gelişmeler kaydedilmiştir. Yapılan çalışmalarda hacim heteroeklemliler ve fuleren güneş pilleri kullanımı yüzde 2,5'tan 11'e yükselmiştir. Şekil 1.1'de tek ve çok eklemliler organik güneş pillerinin verimliliğinin gelişim süreci gösterilmiştir. Buna göre günümüzde en verimli pilin etkinliği yaklaşık %11 olarak belirlenmiştir [2].

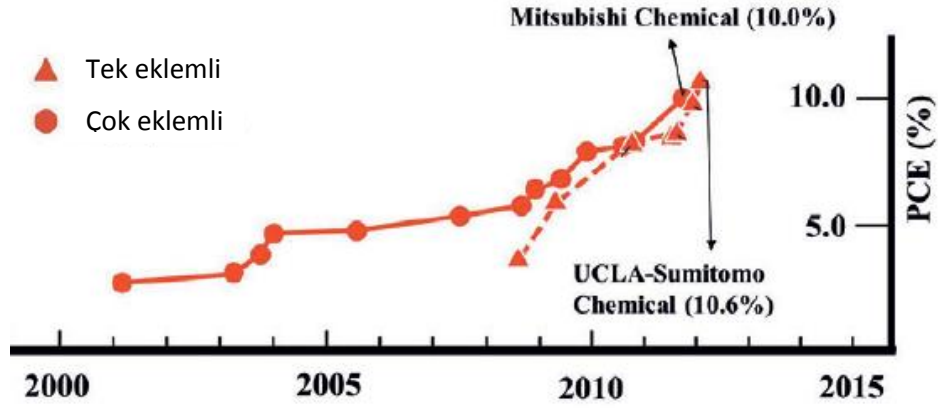
Çizelge 1.1 Tek eklemli güneş pillerine ait çalışmalar

Kaynak	Cihazın Yapısı (küçük molekül: füleren)	Aktif Alan cm^2	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF	PCE (%)
⁶ Sun	ITO/ MoO ₃ /DTS(PTh ₂):PC ₆₁ BM/Al	0.196	0.78	14.40	0.59	6.7
⁷ Zhou	ITO/PEDOT:PSS/DCAO3TSi:PC ₆₁ BM/LiF/Al	0.04	0.80	11.51	0.64	5.8
⁸ Wei	ITO/ MoO ₃ /Squaraine:PC ₇₁ BM/C ₆₀ /BCP/Al	0.008	0.92	12.00	0.50	5.5
Kaynak	Cihazın Yapısı (polimer: füleren)	Aktif Alan cm^2	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF	PCE %
Mitsubishi Chemical	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	10.0*
⁹ He	ITO/PFN/PTB7:PC ₇₁ BM/ MoO ₃ /Al	0.16	0.75	17.46	0.70	9.2*
¹⁰ Small	ITO/ZnO-PVP/PDTS-TPD:PC ₇₁ BM/MoO ₃ /Ag	0.03	0.86	14.00	0.67	8.5 7.4*
¹¹ Chen	ITO/PEDOT:PSS/PBDTTT-CF:PC ₇₁ BM/Ca/Al	0.1	0.75	15.20	0.67	7.7 6.8*
¹² Tan	ITO/TiPD/PBDTTT-C:PC ₇₁ BM/MoO ₃ /Ag	0.04	0.70	16.26	0.65	7.4
¹³ You	ITO/ZnO/PTB7:PC ₇₁ BM/MoO ₃ /Ag	0.1	0.72	14.72	0.69	7.3
¹⁴ Su	ITO/PEDOT:PSS/PBTPD:PC ₆₁ BM/Ca/Al	0.04	0.92	13.10	0.61	7.3
¹⁵ Zhou	ITO/PEDOT:PSS/PBnDT-DTffBT:PC ₆₁ BM/Ca/Al	0.12	0.91	12.91	0.61	7.2
¹⁶ Chang	ITO/ZnO/C-PCBSD/PFDCTBT-C8:PC ₇₁ BM/PEDOT:PSS/VO ₂ /Ag	0.04	0.83	12.57	0.67	7.0
¹⁷ Chu	ITO/ZnO/PDTSTPD:PC ₇₁ BM/MoO ₃ /Ag	1.0	0.89	11.30	0.67	6.7
¹⁸ Fan	ITO/MoO ₃ /P3HT:IC ₆₀ BA/Ca/Al	0.04	0.85	10.61	0.74	6.7
¹⁹ Zhang	ITO/PEDOT:PSS/PIDT-phanQ:PC ₇₁ BM/C ₆₀ /Al	0.1	0.87	11.20	0.64	6.2
²⁰ O'Malley	ITO/PEDOT:PSS/PIDT-phanQ:PC ₇₁ BM/C ₆₀ -bis/Ag	0.046	0.88	11.50	0.61	6.2

Çizelge 1.2 Çok eklemli güneş pillerine ait çalışmalar

Kaynak	Cihazın Yapısı	Aktif Alan cm^2	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF	PCE %
UCLA-Sumitomo ¹	N/A	N/A	1.50	8.75	N/A	10.6*
²¹ Dou	ITO/ZnO/P3HT:IC ₆₀ BA/PEDOT:PSS/ZnO/PBDTT-DPP:PC ₇₁ BM/MoO ₃ /Ag	0.1	1.56	8.26	0.67	8.6*
²² Yang	ITO/Ag/P3HT:IC ₆₀ BA/TiO ₂ /m-PEDOT/PSBTBT:PC ₇₁ BM/VO ₂ /Al	N/A	1.47	7.60	0.63	7.0
²³ Gevaerts	ITO/PEDOT:PSS/PCDTBT:PC ₆₁ BM/ZnO/PEDOT:PSS/PDPP5T:PC ₆₁ BM/Al	0.16	1.44	9.00	0.54	7.0
²⁴ Kim	ITO/PEDOT:PSS/PCPDTBT:PC ₆₁ BM/TiO ₂ /PEDOT:PSS/P3HT:PC ₇₁ BM/TiO ₂ /Al	0.045	1.24	7.80	0.67	6.5
²⁵ Sista	ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PC ₆₁ BM/Al/TiO ₂ /PEDOT:PSS/PSBTBT:PC ₇₁ BM/TiO ₂ /Cs/Al	N/A	1.25	7.44	0.63	5.8
²⁶ Kouijzer	ITO/ZnO/P3HT:IC ₆₀ BA/PEDOT:PSS/ZnO/PDPP5T:PC ₆₁ BM/MoO ₃ /Ag	0.16	1.35	7.23	0.60	5.8
²⁷ Kong	ITO/PEDOT:PSS/SDT-BT:PC ₇₁ BM/TiO ₂ /PEDOT:PSS/P3HT:PC ₇₁ BM/TiO ₂ /Al	0.14	1.17	7.20	0.62	5.2
²⁸ Sakai	ITO/PEDOT:PSS/P3HT:bis-PC ₆₁ BM/LiF/ITO/MoO ₃ /P3HT:PC ₇₁ BM/LiF/Al	0.06	1.14	6.14	0.74	5.2
²⁹ Chou	ITO/ZnO/P3HT:PC ₆₁ BM/MoO ₃ /Al/ZnO/PSBTBT:PC ₇₁ BM/MoO ₃ /Al	0.093	1.20	7.84	0.54	5.1

Bu hızlı gelişimin göstergesi olarak organik fotovoltaiğin ticarileştirilmesi teknik problemler çözüldüğü takdirde mümkün olacaktır. Organik fotovoltaiğin gelişmeleri dört başlıkta toplanabilir;



Şekil 1.1 Tek ve çok eklemli organik güneş pillerinin verimliliğinin gelişim süreci

- i) foton – elektron dönüşümünün daha iyi anlaşılması,
- ii) özel enerji seviyesi ve çözünürlüğe sabit malzemelerin geliştirilmesi,
- iii) aktif katmandaki mikroyapıların uyarılması için yeni yaklaşımlarda bulunulması,
- iv) yeni ara yüzler kullanılarak yeni cihazların tasarlanması[1].

Organik fotovoltaikler hafif tandem yapıları ve plastik malzemeler üzerinde üretilebilmeleri sayesinde insan vücuduyla uyumlu elektroniklerin üretiminde kullanılabilir. Bunun yanında saydam ve rengi ayarlanabilir türleri olduğundan çeşitli uygulamalar için yapı işlerinde de kullanılabilir.

Güneş pili teknolojisinin piyasaya sürülebilmesi için bazı teknik aksaklıkların üstesinden gelinmesi gerekir.

Literatürde tandem güneş hücreleri ile ilgili yapılan çalışmalar şu şekilde özetlenebilir:

Patrick Boland, Keejoo Lee, James Dean ve Gon Namkoong'un organik tandem güneş pilleri ile ilgili yayınladıkları makalede en iyi verimi sağlayabilmek için farklı şekillerde devre tasarımı yapılmış ve verim hesaplanmıştır. Her devre farklı kombinasyonlar ile hazırlanmış, PCPDTBT:PCBM ve P3HT:PCBM olmak üzere polimer:fulleren türevlerinden oluşan iki alt hücre kullanılmıştır. Çok eklemli hücre hazırlanırken yüksek bant aralıklı P3HT:PCBM katmanı alt kısma düşük bant aralıklı PCPDTBT:PCBM ise üst kısma kaplanarak en iyi verim elde edilmiş ve %9.2 olarak bulunmuştur [3].

H.-J. Prall, R. Koeppe, R. Autengruber, M. Egginger, G. Dennler ve N. S. Sariciftci'nin yayınladıkları makale ise küçük molekül ile polimerlerin birlikte kullanımı ile ilgili bir

çalışmadır. MDMO-PPV veya P3HT elektron verici polimer olarak kullanılmış, elektron alıcı olarak seçilen fulleren türevi PCBM ile karıştırılmış ve buharlaştırılan ZnPc-C₆₀hacim heteroeklem güneş pili ile tandem hücre oluşturulmuştur. Literatürdeki standartlar altında elde ettikleri değerler $V_{OC}=1V$, $J_{SC}=5mA/cm^2$, $FF=0.35$ şeklindedir. Devreyi yigilmis (stacked) hale getirdiklerinde ise değerlerde belirgin artış görülmüş ve $V_{OC}=1.28V$, $J_{SC}=1.1mA/cm^2$, $FF=0.45$ olarak elde edilmiştir [4].

H. Hoppe, T. Glatzel, M. Niggeman, W. Schwinger, F. Schaeffler, A. Hinsch, M. Ch. Lux-Steiner ve N. S. Sariciftci'nin yayınladıkları makalede de elektron ve boşlukların iletiminde etkin rol oynayan polimer:fulleren tabakasının nanomorfolojisi ve morfolojideki faz ayrımı AFM (atomik kuvvet mikroskobu), Kevin Probe Kuvvet mikroskobu (KPFM), taramalı ve geçirmeli elektron mikroskobu (SEM ve TEM) altında incelenmiştir. Toluenli çözeltisi oluşturulan aktif tabakalarda elektron ve boşlukların yeterli derecede faz ayırımına uğrayamadıkları, bu sebepten dolayı da düşük akım değerlerine sahip oldukları morfolojik inceleme ile anlaşılmıştır [5].

J. D. Kotlarski ve P. W. M. Blom'un yayınladıkları makalede ZnO kompakt tabaka ile PEDOT:PSS kullanılarak tek eklemli hücrede %11.7, çok eklemli hücrede ise %14.1'lik verim elde edilmiştir [6].

Afshin Hadipour, Bert de Boer ve Paul W. M. Blom'un yayınladıkları makalede ise küçük molekül ve polimerik fotovoltaik hücrelerde değişik yapı, geometri ve malzeme kombinasyonları denenerek foton enerjisini en iyi şekilde soğuran devre için optimizasyon koşulları verilmiştir [7].

1.2 Tezin Amacı

Giderek artmakta olan enerji ihtiyacına karşılık üretilen enerji miktarının az olması bilim insanlarını farklı enerji kaynakları arayışına sürüklemiştir. Bugün pek çok ülkede özellikle az gelişmiş veya geri kalmış ülkelerde ana enerji kaynağı olarak kömür, petrol ya da doğalgaz kullanılmaktadır. Bu tür kaynaklar yenilenemeyen enerji kaynaklarıdır ve tüketimi sonucu atmosfere CO₂, CH₄ gibi zehirli gazlar salınmaktadır. Yenilenemeyen enerji kaynaklarına alternatif olarak hidroelektrik, jeotermal, rüzgar, biokütle, okyanus ve güneş enerjisi gibi temiz enerji kaynaklarının kullanımı yaygınlaştırılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları içinde en temiz ve ucuz olan güneş enerjisidir. Diğer

enerji kaynaklarının sınırlı olması, kullanımı için pahalı tesislerin gerekmesi, kullanımı sırasında az da olsa atmosfere CO₂ salınması (özellikle biokütlede) ya da elde edilen enerji miktarının az olması ucuz ve yüksek güçte enerji arayışına iyi bir alternatif oluşturamamaktadır. Her yıl Dünya'nın yüzeyine yaklaşık 89.000 TW'lık güneş ışını düşmektedir. Bu da demek oluyor ki sadece güneş enerjisi Dünya'nı ihtiyaç duyduğu enerjiyi tek başına karşılayabilmektedir.

Güneş ışınları doğrudan kullanılarak kurutma, su veya hava ısıtma gibi amaçlar için kullanılabilir. Güneş ışınlarının bir diğer kullanımı ise ışık enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çevirebilen fotovoltaik uygulamalardır.

Bugün Dünya'nın pek çok ülkesinde araştırmacıları fotovoltaik teknolojisini geliştirmek için çalışmaktadır. Ancak fotovoltaik hücrelerde kullanılan silikonun pahalı olması ve işleme hazır hale getirebilmek için pahalı ve uzun süreçlerden geçmesi bilim insanlarını yeni arayışlara sürüklemektedir. Organik fotovoltaik hücreler ihtiyaç duyulan ucuz ve kolay kaplama tekniklerine cevap vermektedir ve her geçen gün organik fotovoltaik teknolojisine ilgi artmaktadır. Organik fotovoltaik hücreler ışığı direkt olarak elektrik enerjisine çevirebilen karbon tabanlı organik yarıiletken küçük moleküller ya da polimerlerden oluşan devrelerdir [8].

Organik fotovoltaik cihazları inorganik fotovoltaiklerden ayıran en önemli fark üretim teknikleridir. Hücre yapımında kullanılan organik filmin kalınlığı nanometre mertebesinde mikrometre mertebesine kadar değişebilir ve filmler baskı teknikleri, vakum altında buharlaştırma ya da "roll to roll" kaplama teknikleriyle kaplanabilir, böylece hücrelerin ucuz maliyetle geniş yüzeylere kaplanması sağlanmış olur. Ayrıca bu üretim teknikleri organik fotovoltaik hücrelerin elektronik cihazlara ve hatta tekstil ürünlerine veya diğer esnek yapıların üzerine kolaylıkla entegre edilebilmesini sağlar. 1980'lerin sonundan 2013'e kadar organik fotovoltaik hücrelerin verimleri %1'den %15.3'lere [9] kadar çıkmıştır. Organik fotovoltaiklerin fiziksel işleyişleri ve fiziksel yapıları daha iyi anlaşıldıkça, yeni moleküler yapıları geliştirildikçe verim de artmaya devam edecektir. Artan verim, geniş yüzeylere kaplanabilmesi ve ucuz olması organik fotovoltaik hücreleri fotovoltaik teknoloji endüstrisinin vazgeçilmez haline getirmiştir [8].

Organik fotovoltaik hücrelerin inorganik hücrelerin yerini alabilmesi için önünde 3 engel bulunmaktadır: verim, yaşam süresive birim fiyatı [10]. Genellikle ilk parametre üzerindedurulmuş ve çalışmalar verimi arttırmayayönelikolmuştur. Ancak ticarileşebilmeiçingüneşgözelerinin oksijene karşıdayanıklılıolması yani ömürlerinin uzun olmasıönünde de çalışmalarınıyapılması gerekmektedir. Teknolojik çalışmalar genelde atmosfer basıncından daha yüksek basınçlarda oksijen gazı yerine azot gazı kullanılarak yapılmaktadır. Bu sebepten hücrelerin oksijene karşıdayanıklı hale gelmesi için enkapsulasyon (kaplama) işlemyapılır. Pilin ömrünü uzatmak için yapılan çalışmalardan bir diğeri de devre geometrisinin tersine çevrilmesidir. Normal tipte bir hücrenin yapısı anot/aktif tabaka/katot iken tersine çevrilmiş fotovoltaik hücrelerde bu yapı devreye eklenen kompakt tabaka ile katot/aktif tabaka/anot şekline çevrilmiştir. Böylece normal tipte kullanılan ve hava ortamında oksijene kararsız, düşük iş fonksiyonlu metaller yerini oksijene dayanıklı yüksek iş fonksiyonlu metallere bırakmakta, bu da pillerin daha kararlı ve uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır.

Ticarileşmeninönünde duran en önemli parametre verimdir. Verimi arttırmakiçin de yukarıdabahsedildiği gibi pek çok çalışmayapılmaktadır. Bu çalışmalardan en önemlisi ve gelecek vaat edeni çok eklemlili (tandem) hücrelerdir. Bir tandem hücrefarklıbant aralığına sahip alt hücrelerin birbirine seri bağlanmasıyla oluşturulmaktadır ve verimlerinin tek bir hücrenin veriminden yüksek olması amaçlanmaktadır. Alt hücrelerin bant aralıklarının uyumuna ve malzemenin seçimine bağlı olarak iki alt hücrenin bağlanmasıyla yapılan tandem hücrenin verimi en fazla %40, üç alt hücreli tandem yapı için ise verim yaklaşık olarak %50'ye çıkabilir [11].

Normal tipte hücrelerdesoğurmanın meydana geldiği katmanın kalınlığı taşıyıcı mobilitelerinin düşük olmasına sebep olmaktadır. Ayrıca organik malzemelerin genel özelliği bant aralıklarının düşük olmasıdır. Bu iki sebep normal tipte hücrelerin verimini kısıtlar, ancak bu sorunlar çok katmanlı güneş hücrelerinde ortadan kalkmaktadır [8].

Bu tezin amacı polimer güneş gözelerinin önünde duran verim kriterini aşmak için kullanılan çok katmanlı hücrelerin üretilmesi ve geliştirilmesidir. Tez çalışmaları boyunca literatürde en yaygın şekilde kullanılan malzemelerden P3HT, PCBM ve MDMO-PPV kullanılmış ve çalışmalar Yıldız Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü Genel Fizik

öğretim üyesi Doçent Dr. Serap Güneş tarafından kurulan Organik Elektronik Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

1.3 Hipotez

Organik fotovoltaik hücrelerin verimi akım ve gerilim ile doğru orantılıdır. Yapılacak tez çalışmasında hazırlanan çok katmanlı organik hücrelerin gerilimine aktif tabaka (MDMO-PPV:PCBM ve P3HT:PCBM) sıralamasının, aktif tabaka kalınlığının, farklı rekombinasyon tabakası ve rekombinasyon tabakasının kalınlığının etkisi gözlemlenip gerilim değeri yükseltilecektir. Hazırlanan çok katmanlı fotovoltaik hücrelerin gerilim değerleri laboratuvar koşulları göz önüne alındığında referans hücre için 400 mV iken yukarıdaki parametreler optimize edilerek bu değer 540 mV'a kadar çıkartılır.

2.1 Enerji Politikası

Enerji politikası; enerji endüstrisinin gelişimi için enerji üretimini, dağılımını ve tüketimini kapsayan konuların ele alındığı ve devletin söz sahibi olduğu bir stratejidir. Enerji politikası kapsamında bu konudaki yönetmelikler, uluslararası anlaşmalar ve yaptırımlar dikkate alınır. Küresel ısınma etkilerinin azaltılması ve enerji sağlanması konusunda hayati önem taşımaktadır [12].

2.2 Güneş Enerjisinin Önemi

Güneş enerjisi, küresel ısınmaya etkisi olmayan en temiz enerji kaynaklarından biridir. Güneş bir saniye içinde, insanların kullandığından daha fazla enerji yaymaktadır.

Çevreye ve ekolojiye zarar vermeden ucuz ve bol enerji sağlamak, insan hayatı kalitesinin artırılmasında önem taşıyan faktörlerden biridir. Bu kapsamda yağ ve kömür gibi fosil yakıtların yanında alternatif enerji kaynağı olarak adlandırılır. Fosil yakıt miktarlarındaki önemli azalma dünya çapında güneş enerjisi kullanımında artışa sebep olmuştur.

Günümüzde güneş enerjisi küresel enerji ihtiyacının sadece % 0,05'ini karşılarsa da gelecek vaat eden en önemli enerji kaynağıdır. Günümüzdeki kullanımının bu değerde kalmasının en önemli sebebi, güneş enerjisinin en pahalı yenilenebilir enerji çeşidi olarak değerlendirilmesidir. Buna rağmen çeşitli ülkelerde özek enerji kaynağı için en iyi çözüm güneş enerjisidir. 2010 BP Statistical Energy Survey sonuçlarına göre güneş

enerjisi birikim kapasitesi 2009 yılında bir önceki seneye göre % 46,9 artarak 22928,9 MW'a ulaşmıştır [13].

2.3 Dünya Çapında Enerji Tüketimi

Reference Scenerio tarafından, dünya çapında enerji talebinde, 2002'den 2030'a kadar yıllık ortalama %1,7 artışla %60 genişleme öngörülmektedir. Çizelge 2.1'de gösterildiği gibi, 2002 yılında belirlenen 10,3 milyar tonluk petrol eşdeğeri ihtiyaç 16,5 miyar tona ulaşacaktır. Bunun yanında küresel enerji tüketiminde fosil yakıtlar 2002-2030 yılları arasında talebin yaklaşık %85'ini karşılayıp baskın kalacaktır. Nükleer enerji payı %7'den %5'e düşerken, yenilenebilir enerji kaynaklarının payı %4 oranında seyredecektir [14].

Petrol, küresel enerji kaynağı karışımları içinde 2002 ile 2030 yılları arasında en fazla tüketilen yakıt olacaktır. Petrol talebinin 2002'deki 77MBD'lik miktarının yıllık % 1,6 artışla 2010 yılında 90 MBD'ye 2030 yılında ise 121 MBD'ye ulaşılacağı öngörülmektedir [14].

2.4 Güneş Enerjisi Teknolojisinin Beklenen Geleceği

Geniş çapta, güvenli ve çevre dostu elektrik sağlamak için fotovoltaik teknolojide güneş enerjisi kullanılabilir. Güneş enerjisi piyasası 2005 yılında 2004 yılına göre % 55 artışla 11,8 milyar dolara ulaşmıştır. Varolan güneş enerjisi kaynakları 2006 yılında 2,76 W enerji sağlarken bu değer 2010 yılında 156 W olarak belirlenmiştir. Güneş pilleri için silikon ihtiyacı 2006 yılında 41.000 ton, 2010 yılında 120.000 ton iken 2015 yılında 400.000 tona ulaşması beklenmektedir [15].

2.5 Sera Gazı Kaynakları ve Etkileri

En yaygın sera gazı (GHG) karbondioksittir (CO₂). En belirgin sera gazı kaynakları; elektrik, ısı (%32) ve ulaşımdır (%17). Hizmet sektörüne ait şirketler gerek elektrik tüketimi, gerekse ısınma, soğutma ve gezme eylemleri vasıtasıyla sera gazlarının oluşumuna sebep olmaktadır. Bu sektörün arazi kullanımı ve ormancılık (%24), imalat ve inşaat (%13) işleri de dünya çapında önemli karbondioksit emisyon

kaynaklarıdır. Çizelge 2.2’de günümüzde kullanılan enerji sistemlerinin çevreye etkileri gösterilmiştir [16].

Küresel ısınmanın bazı değerleri hayati önem taşımaktadır, aksi takdirde bu gezegen yaşama olanak sağlamak için fazla soğuk olurdu. Buna rağmen, atmosfere bırakılan karbondioksit miktarının doğal dengeyi bozduğu bilinmektedir.

2.6 Güneş Enerjisinin Avantajları

Güneş enerjisi diğer enerji kaynaklarına göre çevre için daha avantajlı ve sürdürülebilir enerji kaynağıdır. Doğal kaynakları tüketmez, karbondioksit veya diğer gaz salınımlarına sebep olmaz ve sıvı ya da katı atık oluşturmaz. Güneş enerjisinin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir [17]:

- Karbondioksit ve azot oksitler gibi sera gazları veya toksik gazlar oluşturmaması,
- Değersiz arazi geri kazanımı,
- Elektrik şebekelerinin iletim hatlarının azalması,
- Su kaynaklarının kalitesinin artması,
- Enerji bağımsızlığının bölgesel ve doğal olarak artması,
- Çeşitlendirme ve güvenli enerji tedariği,
- Gelişmekte olan ülkelerde kırsal alana elektrik sağlanmasıdır.

İklim değişikliği göz önüne alınarak; enerji tüketim hızının azaltılması, sera gazlarının azaltılması ile ilgili ulusal anlaşmalar yapılması ve ısı enerjisi sağlanması istenmektedir. Bu sebeple de yenilenebilir enerjiden elektrik sağlamak ve çeşitli ülkelerde çeşitli politikalar oluşturmak için ulusal hedefler konmaya başlanmıştır [18].

Çizelge 2.1 Dünya çapında enerji tüketimi

	1971	2002	2010	2030	2002-2030 (%)
Kömür	617	502	516	526	0,2
Petrol	1893	3041	3610	5005	1,8
Gaz	604	1150	1336	1758	1,5
Elektrik	377	1139	1436	2263	2,5
Isı	68	237	254	294	0,8
Biyokütle	641	999	1101	1290	0,9
Diğer yenilenebilir	0	8	13	41	6,2
Toplam	4200	7075	8267	11.176	1,6

Çizelge 2.2 Enerji sistemlerinin çevreye etkisi

Enerji kaynağı	Doğal		Kaçınılabılır	
	Küresel	Bölgesel	Küresel	Bölgesel
Kömür	CO ₂	Madencilik	Asit Yağmuru	Hava Kirliliği
Petrol	CO ₂		Okyanus Kirliliği	Hava ve Bölgesel Su Kirliliği,
Gaz	CO ₂		Sera Gazları	
Su Enerjisi		Sulu Ekosistem		Sulu Ekosistem
Nükleer	Sınırlama	Kazalar / Politik İstikrar		Radyoaktif Atık

KONJUGE POLİMERLER

3.1 Konjuge Polimerlerin Tarihi

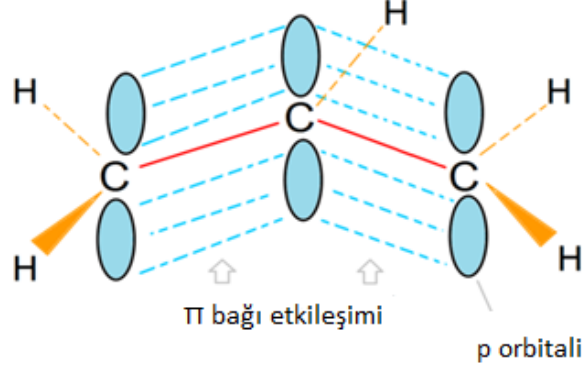
1977 yılında poliasetilenin metalik özelliklerini bildirerek; Heeger, MacDiarmid ve Shirakawa yeni bir malzemeye yol açmış oldular: elektronik olarak iletken polimerler.

Konjuge polimerleri kimyasal olarak katkılamanın elektronik iletkenliği birkaç merteye arttırdığını keşfettiler. Bu çalışmaları ile 2000 yılında kimya dalında Nobel Ödülü'nün sahibi oldular [19].

Son 25 yılda bu malzemelerin elektriksel, fiziksel, yapısal ve optik özellikleri üzerine birçok deneysel ve teorik çalışma yapıldı. Bunun sonucu olarak, günümüzde biosensörler, LEDler, güneş pilleri, fotodiyotlar ve transistörler gibi birçok uygulama mevcuttur.

Konjuge polimerler, değişken tek ve çift bağlı karbonların meydana getirdiği lineer bir iskeletten oluşur. Bu lineer zincirde, karbon atomlarının üst üste binen sp^2 – hibritleşmiş orbitalleri σ - bağlarını oluştururken, geriye kalan ve her biri bir elektron tarafından işgal edilmiş düzlemsiz p_z - orbitalleri komşu p_z - orbitalleri ile üst üste binerek π - bağlarını verir [20].

Bu konjuge polimerlerin kimyasal yapısı değişebilen tek ve çift bağlar sunar ve π - bağlarını oluşturan elektronlar lokalize değildir fakat izomerik etkiden dolayı komşu atomlar üzerinde ilerleyebilir.



Şekil 3.1 sp^2 hibritleşmiş karbon atomları üzerinde elektron delokalizasyonu

Bu delokalizasyon aynı zamanda bu polimerlerin iletkenlik özelliklerini de açıklar. İki p_z – orbitalinin üst üste binmesi iki tane moleküler orbital oluşturur, biri bağlayıcı π – orbitali ve diğeri antibağlayıcı π^* – orbitali. Daha alçak olan bağlayıcı π – orbitali inorganik bir yarıiletkenin valans bandına eşittir ve daha yüksek enerjili olan π^* – orbitali de iletim bandını oluşturur. Bu iki enerji seviyesi arasındaki farka “bant aralığı” denir. Bir malzemenin optik ve elektriksel özellikleri bu bant aralığına bağlıdır [20].

Çoğu organik polimer hol iletkendir. Bu, valans bandındaki yük taşıyıcılarının genellikle boş durumlar (holler) olduğu anlamına gelir. Bu tür malzemeler “p – tipi” olarak adlandırılır. Öbür yandan, iletim bandında yük taşıyıcıları elektronlar olan malzemeler “n – tipi” diye adlandırılır [21]. Organik güneş pillerinde katkılama, bir donörün işgal edilmemiş en düşük moleküler orbitalinden (LUMO), daha alçakta bulunan bir elektron akseptör molekülün en düşük moleküler orbitaline (LUMO) fotoindüklenmiş bir elektron transferi ile olur.

Genellikle, konjuge polimerler 2 eV civarında bir bant aralığına sahiptir ki bu, fotovoltaik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan inorganik yarıiletkenlerinkinden daha yüksektir. Bu, kısıtlı soğurma spektrumuna neden olur ki, güneşten yayılan 600-800 nm aralığındaki spektrumu kapsamaz [22].

3.2 Kullanılan Malzemeler

İndiyum Kalay Oksit (ITO)

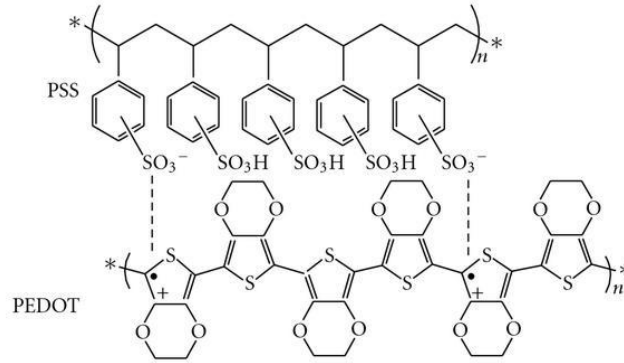
İndiyum oksit (In_2O_3) ve kalay(4)oksit (SnO_2)’in karışımından oluşan katı çözeltilidir. İletkenliği yüksektir. İnce filminin şeffaf ve renksiz olması organik elektronikte saydam

elektrot olarak kullanılmasını sağlar[23].

PEDOT: PSS

İki iyonomerin karışımından oluşan bir polimerdir. İyonomerlerden biri negatif yüklerin taşınmasını sağlayan sodyum polistiren sulfonat'tır. Diğer bileşen ise poli (3,4 etilendioksitiyofen) ya da PEDOT adlı konjuge polimerdir ve politiyofen pozitif yüklerin taşınmasında etkilidir. PEDOT, PSS ile katkılanınca metalik derecede iletken hale gelir [24]. PEDOT:PSS'in kararlı ve suda çözünebilir bir malzeme olması numuneler üzerine kolaylıkla işlenebilmesine olanak sağlar.

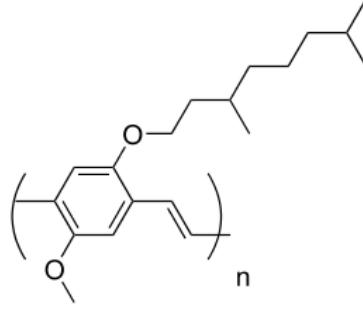
Dönel kaplama yöntemi ile 80 nm kalınlığa sahip ince bir tabaka elde edildiğinde, yaklaşık % 80 saydamlığa ve ~10 S/cm elektrik iletkenliğine sahip olur. Yüksek oranda p- katkılanmış ve iletken sağlayan ve elektron bloklayan katman olarak kullanılır [25]. PEDOT ve PSS'nin kimyasal yapıları şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.2 PEDOT:PSS'nin kimyasal yapısı

MDMO-PPV

(Poli-(2-metiloksi,5-(3,7-dimetiloktiloksi)) para-fenilenvinilen) güneş pillerinde kullanımı için yaygın olarak incelenen polimerlerden biridir. Genellikle elektron verici (p-tipi) malzeme olarak kullanılır. Vakum seviyesinden, sırası ile 5.3 ve 3.0 eV HOMO ve LUMO seviyelerine sahiptir. MDMO-PPV'nin kimyasal yapısı şekilde gösterilmiştir [25].

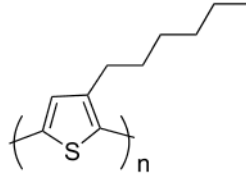


MDMO-PPV

Şekil 3.3 MDMO-PPV'nin kimyasal yapısı

P3HT

Organik güneş pillerinde elektron verici olarak kullanılan diğer bir polimer ise poli(3-heksiltiyofen)'dir. Bu malzeme, bilinen en yüksek boşluk mobilitesinesahip konjuge polimerden biridir. Bu yüksek mobilite yan zincirden indüklenen yapısından kaynaklanır. HOMO seviyesi 5.1 eV, LUMO seviyesi ise 2.9 eV'ta bulunur.P3HT'nin kimyasal yapısı şekilde gösterilmiştir [25].

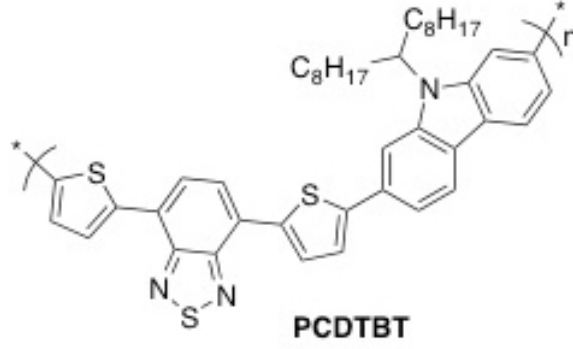


P3HT

Şekil 3.4P3HT'nin kimyasal yapısı

PCDTBT

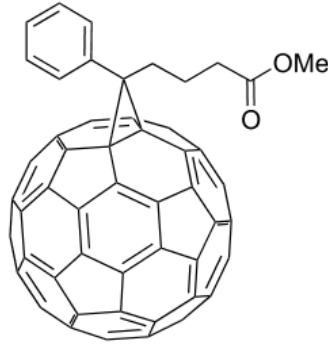
Poli[N-9'-heptadekanil-2,7-karbazol-alt-5,5-(4',7'-di-2-tienil-2',1',3'-benzotiadiazol) organik güneş pillerinde elektron verici olarak kullanılan bir malzemedir. HOMO seviyesi 5.4 eV, LUMO seviyesi ise 3.6 eV'ta bulunur [26].



Şekil 3.5 PCDTBT'nin kimyasal yapısı

PCBM

PCBM, C_{60} 'ın yüksek çözünürlüğe sahip bir türevidir ve elektron alıcı olarak kullanılır. (1-(3-metoksikarbonil)propil-1-fenil grubunun zincir olarak eklenmesi ile çözünürlüğü sağlanır. Klorobenzen, toluen ve benzer organik çözücülerde çözünür. PCBM'nin kimyasal yapısı şekilde gösterilmiştir [25].

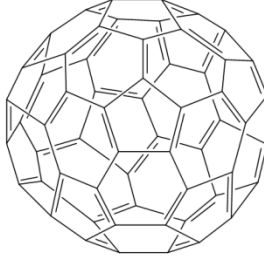


PCBM

Şekil 3.6 PCBM'nin kimyasal yapısı

Fulleren C_{60}

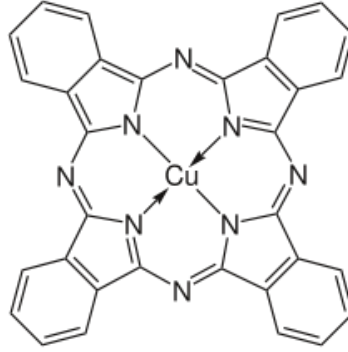
Fulleren C_{60} , 60 adet sp^2 hibrit karbon atomundan meydana gelir. Her bir atom diğer üç atoma bağlıdır. 20 hegzagonal ve 12 pentagonal halka, küresel bir şekil oluşturur [27]. 1996 yılında Sir Harold W. Kroto, Richard E. Smalley ve Robert F. Curl Jr. *Fullerenlerin Keşfi* sonucu Nobel Kimya Ödülü'nün sahibi oldular [19]. C_{60} elektron alıcı polimer gibi davranır ve 6 elektrona kadar alabilir.



Şekil 3.7 C₆₀'ın kimyasal yapısı

CuPc

CuPc, bakır-ftalosiyanin küçük molekülüdür ve boşluk taşıyıcı p-tip malzeme gibi davranır. Organik güneş pillerinin yapımında kullanılabilmesi için buharlaştırma sisteminde çok yüksek vakum değerlerinde buharlaştırılmalıdır [28].



Şekil 3.8 CuPc'nin kimyasal yapısı

ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİ

4.1 Organik Güneş Pillerinin Çalışma Prensibi

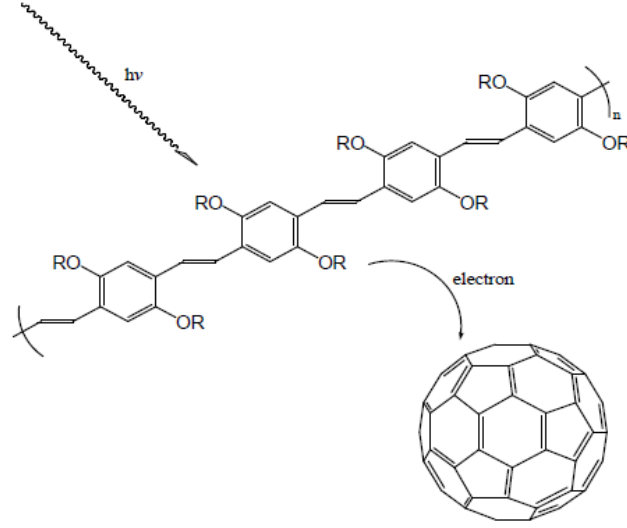
4.1.1 Fotouyarılma, Eksitonlar, Yük Transferi

Organik ve inorganik yarıiletkenler ile oluşturulan güneş pilleri arasında önemli bir fark vardır. İnorganik yarıiletkenler ile hazırlanmış güneş pillerinde fotonlar direk olarak serbest yük taşıyıcılarına dönüştürülür. Bu yükler daha sonra uygun elektrotlarda toplanır.

Organik fotovoltaiik cihazlarda molekülün fotouyarılması sonucu hol – elektron çifti oluşur ki buna “eksiton” denir. Bu eksitonlar, bağlanma enerjisi 0.05 ile >1 eV arasında değişen, Kulombik bağlı yük taşıyıcılarından oluşur. 5 – 15 nm üzerinde bir uzunlukta dağılılabılır ve sonunda ışıyarak veya ışımayarak bozulabilir [25].

Fotovoltaiik uygulamalarda eksitonlar serbest yüklere bölünmelidir. Bu bölünmeyi tetiklemenin etkili yollarından biri akseptör molekül kullanımınıdır: Valans ve iletim bandı arasındaki yasak enerji aralığından daha büyük bir enerji ile gelen bir fotonun soğrulması üzerine, aktif malzemenin HOMO’sundan ile LUMO’suna bir elektron geçişi olur. Eğer ortaya çıkan eksiton, LUMO’su soğuran malzemeninkinden daha düşük başka bir malzemeye geçerse, elektron alıcı birime geçer [29].

Organik fotovoltaiiklerde fotoindüklenmiş yük transferinin nasıl olduğu şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Polimer ve C₆₀ arasındaki fotoindüklenmiş yük transferi

4.2 Aygıt Tipleri

4.2.1 Tek Katmanlı Fotovoltaik Hücreler

İş fonsiyonu farklı iki metal elektrot arasına kaplanmış yarıiletken polimerden oluşmaktadır. Organik yarıiletkenler ile oluşturulan fotovoltaik hücrelerde ortaya çıkan eksitonların serbest yük taşıyıcılarına dönüşmesi amaçlanmaktadır. Sadece polimer içeren bu tip aygıtlarda eksitonları ayırmanın en verimli yolu elektrik alanlardan faydalanmaktır. Ancak, organik yarıiletkenlerde meydana gelen elektron-hol çiftleri arasındaki bağlanma enerjisi inorganik yarıiletkenlere göre o kadar büyüktür ki, yapısal elektrik alan etkisinde bu eksitonların yaşam süreleri içerisinde ayrılmaları mümkün olmayabilir. Bu tip aygıtlarda kısıtlı bir bölgede fotoakım üretildiği için verim kısıtlıdır, bu yüzden iki katlı heteroeklem yaklaşımı geliştirilmiştir [30].

4.2.2 İki Katlı Heteroeklem Yaklaşımı

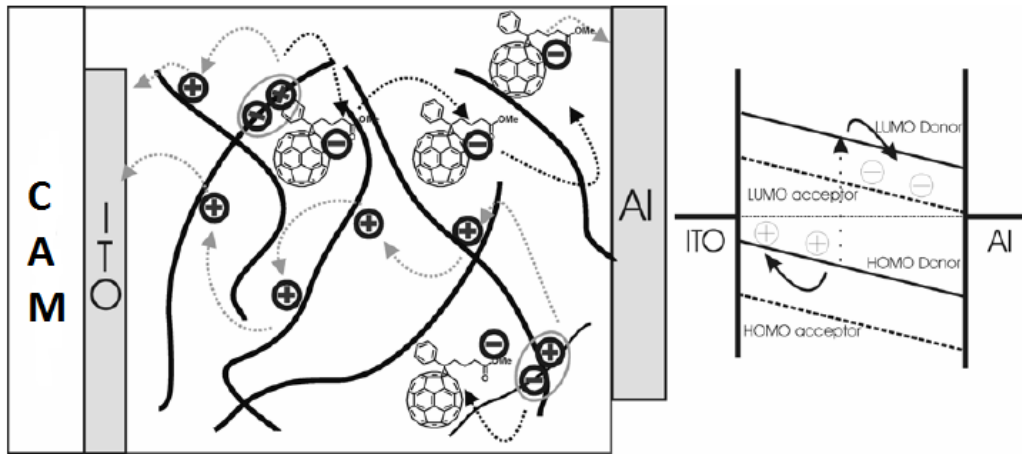
Organik güneş pillerinde genel olarak iki tip “donör-akseptör” yaklaşımı vardır. Bunlardan ilki iki katlı heteroeklemdir. İki katlı heteroeklem düzeninde donör ve üzerine akseptör malzemenin gelmesi sonucu keskin bir arayüzey elde edilir. Gelen fotonun soğurulması sonucu donör veya akseptörde oluşan eksiton bu arayüzeye gelir ve yük ayrımı gerçekleşir [31].

Organik güneş pillerinde meydana gelen eksitonlar yaklaşık 5-15 nm [32] gibi kısa bir difüzyon uzunluğuna sahiptir. Bu, donör ve akseptör arasındaki arayüzeye sadece bu uzaklıkta oluşan eksitonların ayrışabileceği ve pilin akımına katkı sağlayacağı anlamına gelir. Arayüzeyden uzakta soğurulan fotonlardan faydalanılamazken, verim de büyük oranda kısıtlanmış olur. Bu yüzden hacim heteroeklem yaklaşımı geliştirilmiştir.

4.2.3 Hacim Heteroeklem Yaklaşımı

Elektron donör malzemenin (konjüge polimer) LUMO'sundan elektron akseptör malzemenin (fulleren) LUMO'suna fotoindüklenmiş elektron transferi sonucu yük taşıyıcıları meydana gelir. Verimli bir yük üretimi için karışımın herhangi bir noktasında ortaya çıkan eksitonun yaşam süresi içerisinde akseptör arayüzeyine ulaşması gerekmektedir. Bu yüzden, izin verilen maksimum faz ayrımının büyüklüğü eksitonun difüzyon uzunluğu ile belirlenir. Verimli fotovoltaiik pillerde üretilen yük taşıyıcılarının yaşam süreleri içerisinde ilgili elektrotlara taşınması gereklidir ki, bu da malzemelerin mobilitelerine bağlıdır [21].

Son olarak, yük taşıyıcıları pilden iki kontakt üzerinden çekilir. Aydınlatılan yüzde, saydam indium tin oksit (ITO) kaplı bir cam konjüge polimerin HOMO'suna denk gelirken, buharlaştırılan ince bir alüminyum metal kontakt da diğer tarafta PCBM'in LUMO'suna karşılık gelir. Pillerin bugün geldiği son noktada, hol aktarım katmanı olarak ince (100 nm) bir PEDOT-PSS tabakası da kullanılmaktadır. Bu, aynı zamanda ITO yüzeyinin pürüssüzleşmesini ve cihaz kararlılığının artmasını sağlar [33].



Şekil 4.2 Hacim heteroekleminin şematik gösterimi

4.3 Çok Eklemlı Organik Güneş Pilleri

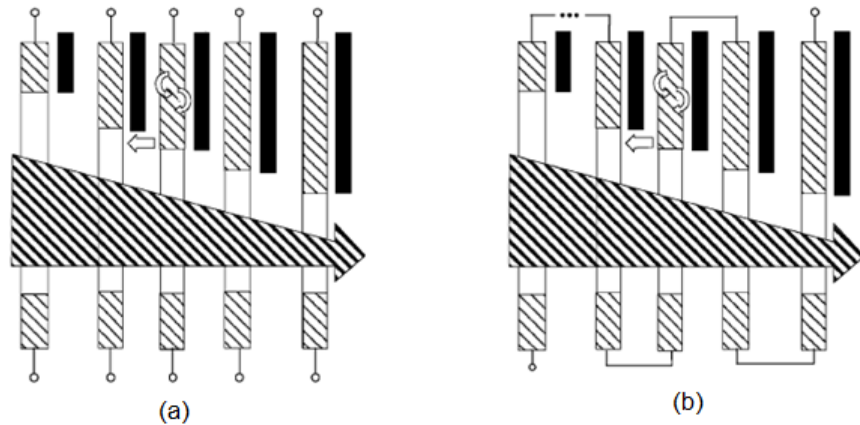
Geleneksel p-n eklem güneş pillerinde, yüksek enerjili fotonların enerji fazlalıklarının ısıya dönüşmesi ve düşük enerjili fotonların soğurulamaması gibi sorunların sebep olduğu verim kayıpları, güneş pillerinin verimini %44'e sınırlamaktadır [34]. Bu kayıpları önlemenin bir yolu, güneş spektrumunu farklı enerji aralıklarına bölerek, her bir enerji aralığında belirtilen bu kayıpların en aza indirildiği fotovoltaik dönüşümleri gerçekleştirecek yasak bant aralığına sahip p-n eklemlerini oluşturmaktır [35]. Çok eklemlı bu yapı sayesinde; yüksek enerjili fotonların daha fazla elektron-hol çifti oluşturması ve düşük enerjili fotonların da fotovoltaik dönüşümde kullanılması sağlanarak, güneş pilinin verimi arttırılmaktadır.

Çok eklemlı güneş pilleri hazırlanış şekline göre ikiye ayrılır. Bunlar yığın piller (stacked cells) ve tandem güneş pillerdir. Yığın pillerde; farklı piller için aynı malzemeler kullanılırken, tandem pillerde bunun aksine farklı malzemeler kullanılmaktadır.

4.3.1 Yığılmış Piller (Stacked Cells)

Yığılmış pillerin kullanılmasındaki amaç aynı malzemelerle hazırlanmış pillerin ardışık sınırlanışı ile verimin arttırılmasıdır. Çok eklemlı yığılmış pilleri, tek heteroeklem pillerin birbirleri üzerine yerleştirilerek çok katmanlı bir yapı oluşturulması sonucu elde edilir.

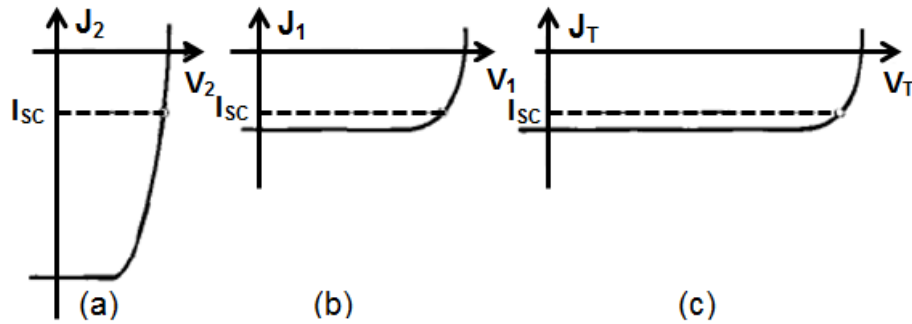
Yığılmış yapılarda, pillerin mümkün olduğu kadar birbirinden izole edilmiş olarak çalışması verimi yükseltmektedir. Bunun için piller arasına optik filtreler yerleştirilir.



Şekil 4.3 Çok eklemlı yığılmış pillerin, (a) Mekanik olarak bağımsız (unconstrained) uygulaması (b) Monolitik (series constrained) uygulaması

Yığılmış pillerin de iki farklı uygulaması mevcuttur. Birincisi tüm pillerin birbirinden bağımsız olarak çalıştırıldığı mekanik olarak bağımsız (Şekil 4.3a) uygulamasıdır. Bu yapıda teorik olarak en yüksek verim elde edilmektedir. Ancak, her p-n eklemine ayrı ayrı çıkışı olması sistemin karışık olmasına sebebiyet verdiği için, pratik uygulamalarda tercih edilmemektedir [36].

İkinci uygulama ise p-n eklemlerinin birbirine seri olarak bağlandığı (Şekil 4.3b) monolitik yapıdır. Burada p-n eklemleri birbirine seri olarak bağlandığı için, şekil 4.4'te görüldüğü gibi çok eklemli pilin toplam akım yoğunluğu, en küçük akım yoğunluğuna sahip p-n eklemine akımı ile sınırlı kalmaktadır. Bu durum, mekanik olarak bağımsız uygulamaya göre çıkış gücünün biraz azalmasına yol açmaktadır. Ancak, pilin çıkış gerilimi p-n eklemlerinin her birinin çıkış geriliminin toplamına eşit olduğundan (Şekil 4.4c), toplam güç artmaktadır [36].



Şekil 4.4 İki eklemli monolitik pillerde, (a) E_G 'si küçük olan p-n eklemine J-V karakteristiği (b) E_G 'si büyük olan p-n eklemine J-V karakteristiği (c) Pilin J-V karakteristiği

4.3.2 Tandem Güneş Pilleri

Tandem yapısında ise farklı malzemelerle hazırlanmış pillerin kullanılması ile farklı soğurma aralıklarına sahip olunur. Her bir pilin optik soğurması dengelenerek pilin veriminin düzenlenmesi mümkündür.

Tandem güneş pilleri, farklı yasak band aralığına sahip p-n eklemlerinden, yasak band aralığı en yüksek olanın üste, yasak band aralığı en düşük olanın ise alta gelecek şekilde yerleştirilmesi ile oluşturulur [37]. Yüksek enerjili fotonlar üst p-n eklemi tarafından, düşük enerjili fotonlar alttaki p-n eklemi tarafından soğurulur. Varsa, ortada bulunan p-

n eklemi, bir önceki eklemden yayılan fotonları ve diğer eklemler tarafından soğurulmayan fotonları soğurur.

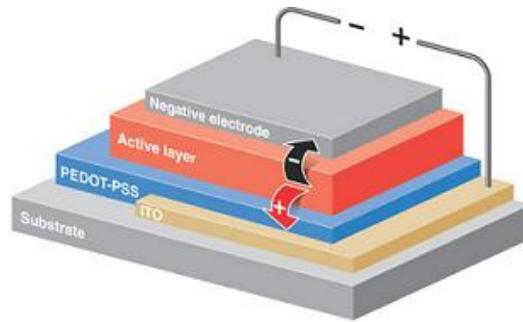
Monolitik uygulamada p-n eklemleri seri olarak bağlanır. Bu yapıda en az akım yoğunluğu olan p-n eklemi, pilin toplam akım yoğunluğunu sınırlamaktadır. Toplam güç, seri bağlı güçlerin toplamına eşit olduğundan diğer uygulamaya göre daha fazladır.

Monolitik yapılarda farklı p-n eklemleri birbirine seri olarak tünel diyotları ile bağlanmaktadır. Geleneksel p-n eklem güneş pili modül yapılarında olduğu gibi, çok eklemli monolitik güneş pillerinde de, her bir p-n ekleminin akımlarının uyumlandırılması (current matching) gerekmektedir [35].

4.4 Yük Ayrımı

Eksiton, donör ve akseptör arasındaki yüzeye geldiğinde yük ayrımı 45 femtosaniye gibi çok yüksek bir hızda gerçekleşir [38]. Elektronlar akseptöre geçerken holler polimer üzerinde kalır.

Transfer işleminden sonra yükler elektrotlara taşınır. Bu taşınmaya, elektrot olarak kullanılan farklı iş fonksiyonlarına sahip metallerin indüklediği alanın neden olduğu kabul edilir. Tipik bir hacim heteroeklem güneş pili [39] şekil 4.5'deki gibidir.



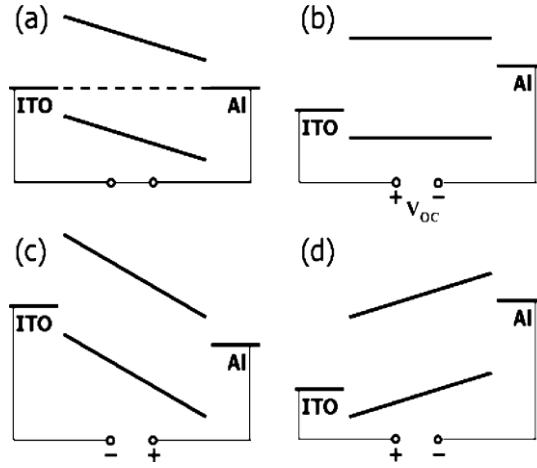
Şekil 4.5Hacim heteroeklem güneş pili

4.5 Organik Güneş Pillerinin Karakteristiği

Bir güneş pilini tanımlayan birçok parametre vardır.

4.5.1 Çalışma Prensipleri

Metal-yalıtkan-metal (MIM) modeli genelde organik diyotları tanımlamada kullanılır [40]. Bu model ilk yaklaşım olsa da, bize cihaz içerisindeki enerji seviyeleri ile ilgili bir izlenim verir. Şekil 4.6'da donör-akseptör tabanlı bir cihazın farklı çalışma koşulları altındaki MIM modelleri gösterilmiştir.



Şekil 4.6 MIM modelleri. İki metal elektrot arasında sıkıştırılmış organik yarı iletken tabakaların farklı çalışma prensipleri: (a) kısa devre durumu (b) açık devre durumu (c) ters yönde kutuplama (d) ileri yönde kutuplama. ITO: yüksek iş fonksiyonlu elektrot, Al: düşük iş fonksiyonlu elektrot

- (a) Kısa devre koşulunda iki elektrodun Fermi seviyeleri aynı hizaya gelir ve hacim heteroeklemi içerisinde yerleşik bir alan oluşur. Bu, donör ve akseptörün HOMO ve LUMO seviyeleri ile vakuum seviyeleri için sabit bir eğime yol açar. Işık altında, fotonların gelmesi ile oluşan yükler ilgili elektrotlara taşınır, yani holler yüksek iş fonksiyonlu elektroda, elektronlar ise düşük iş fonksiyonlu elektroda.
- (b) Açık devre koşulunda farklı malzemelerin vakuum seviyeleri sıralanır ve cihaz içerisinde herhangi bir alan bulunmaz. Yük taşıyıcılarını harekete geçirecek herhangi bir kuvvet bulunmadığı için cihaz içerisindeki akım sıfırdır.
- (c) Diyot ileri yönde kutuplandığı takdirde, yani yüksek iş fonksiyonuna sahip elektrot pozitif kontakta ve düşük iş fonksiyonuna sahip elektrot negatif kontakta bağlandığında, elektronlar düşük iş fonksiyonlu elektrottan akseptörün LUMO'suna, holler ise yüksek iş fonksiyonlu elektrottan donörün HOMO'suna geçiş yapar. Cihaz içerisindeki etkili alan, elektronların düşük iş fonksiyonlu

elektrottan yüksek olana ve hollerin yüksek iş fonksiyonlu elektrottan düşüğe akmasını sağlar. Eğer bu yükler ışıkla tekrar birleşirse cihaz LED olarak çalışır.

- (d) Diyot geri yönde kutuplandığında, yani yüksek iş fonksiyonlu elektrot negatif kontakta ve düşük iş fonksiyonlu elektrot pozitif kontakta bağlandığında, yük akışı cihaz içerisindeki alan nedeni ile engellenir. Işık altında, oluşan yük taşıyıcıları potansiyelce kuvvetli bir elektrik alan etkisi altında ilgili elektrotlara aktarılır ve böylece diyot, fotodetektör olarak çalışır [25].

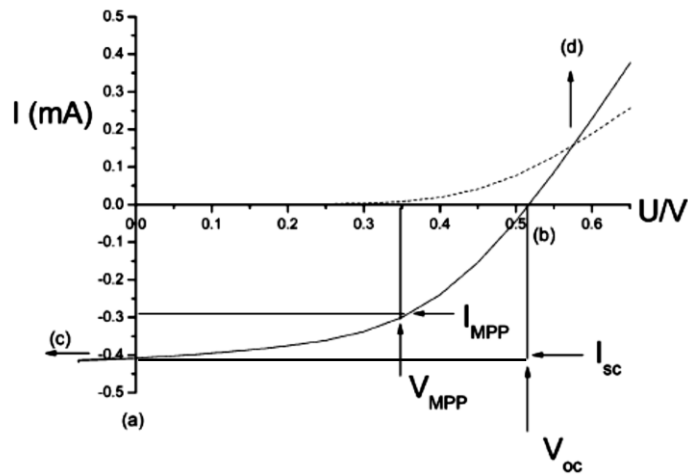
4.5.2 Akım-Gerilim Karakteristiği

Güneş pilleri açık devre ve kısa devre durumlarında çalışır. Bu, akım-gerilim karakteristiğinin dördüncü bölgesinde gösterildiği gibidir.

Akım-gerilim eğrisi cihaz karakteristiği ile ilgili genel bir bilgi verir. Bu karakteristiği belirleyen parametrelerin başlıcaları şunlardır:

4.5.2.1 Açık Devre Gerilimi (V_{oc})

V_{oc} bir güneş pilinden elde edilebilecek en yüksek gerilim değeridir. Bu gerilim değerinde akım sıfırdır. MIM modelindeki düz bant durumuna benzerdir. Heteroeklem cihazlarda, donör malzemenin HOMO'su ile akseptör malzemenin LUMO'su arasındaki enerji farkının V_{oc} 'yi kısıtladığı düşünülür [41].



Şekil 4.7 Organik fotovoltaik hücrenin karanlık ve aydınlık akım-gerilim eğrileri

4.5.2.2 Kısa Devre Akımı (I_{SC})

I_{SC} cihaza herhangi bir dış alanın etkemediği, yüklerin sadece iç alanın etkisi ile çekildiğindeki akım değeridir. I_{SC} 'nin, iki elektrotun farklı iş fonksiyonları ile belirlendiği düşünülür. Pil kısa devre durumunda olur ve iki elektrotun Fermi seviyeleri karşılıklı gelir. I_{SC} pildeki yük ayrımı ve malzemelerin taşıma özellikleri ile ilgili bilgi verir [42].

4.5.2.3 Maksimum Güç Noktası (mpp)

Akım ve gerilim çarpımının maksimum sonucu verdiği noktaya mpp denir ve cihazın bu noktada işlem görmesi beklenir. Bu durumda, V_{mpp} ve I_{mpp} cihazın karakteristik gerilim ve akım değerleridir.

Bu parametrelerden yola çıkarak Dolgu Faktörü (FF) hesaplanabilir. Dolgu faktörü, güneş pilinin ne kadar iyi bir diyot davranışı gösterdiğinin ölçütüdür.

Dolgu faktörü şu eşitlikle verilebilir:

$$FF = \frac{V_{mpp} * I_{mpp}}{V_{OC} * I_{SC}} \quad (1)$$

Güneş pilinin fotovoltaik enerji dönüşüm verimi ise şu şekilde hesaplanır:

$$\eta_{AM 1.5} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{I_{SC} * V_{OC} * FF}{P_{in}} \quad (2)$$

Burada P_{in} gelen ışık ve P_{out} pilin maksimum güç noktasında (mpp) ürettiği elektrik enerjisidir. Gelen ışığın gücü genellikle AM 1.5 spektrumu ile standartize edilir [43].

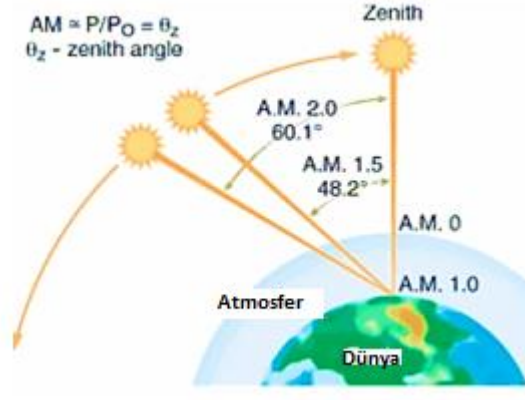
Güneş pilinin verimi oda sıcaklığında (25 °C), 1000 W/m² gücünde ışık altında ve ışığın spektral dağılımının 1.5 AM olduğu şartlar altında hesaplanmalıdır.

4.5.2.4 Hava Kütlesi (Air Mass, AM)

Işığın atmosferde izlediği yol hava kütlesi olarak tanımlanır. Hava kütlesi, ışığın atmosferde ilerlerken ve hava veya tozlar tarafından soğurulurken gücünde meydana gelen azalmayı ölçer ve şu ifade ile verilir [44]:

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (3)$$

Burada θ dikey ile açıdır ve zenit açısı olarak adlandırılır. Şekil 4.8’de hava kütlesi gösterilmektedir.

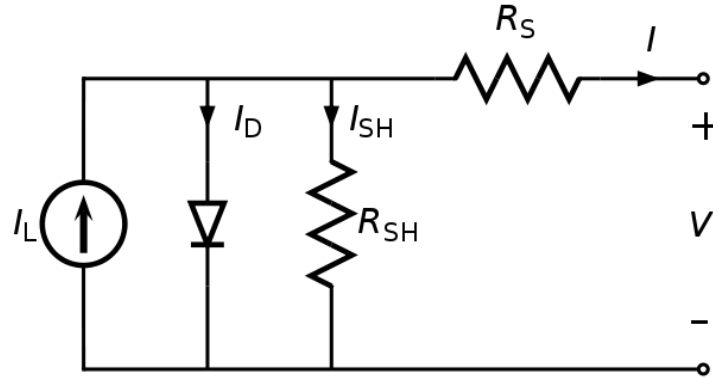


Şekil 4.8 Hava kütlesi

4.5.2.5 Eşdeğer Devre

Fotovoltaik bir hücrenin eşdeğer devre diagramı şekil 4.9’ da görüldüğü gibidir ve aşağıdaki öğelerden oluşur:

- (a) Işık altındaki pilde meydana gelen fotoakımı temsil eden bir akım kaynağı. Bu akım, diyot akımının tersi yönde akar ve cihaz içerisindeki gerilime bağlıdır.



Şekil 4.9 Bir güneş pilinin eşdeğer devresi

- (b) Bir gerilim kaynağı.
- (c) Elektrotların ve organik yarıiletken ile metal arasındaki temasın ohmik katkıları ile aktif malzemenin öz direncini içeren bir seri direnç. Bu direnç, maksimum verim için minimum seviyede tutulmalıdır. Azalan pil kalınlığı ve artan sıcaklık ile ışık şiddeti bu direncin düşmesine sebep olur [45].

- (d) Cihaz içerisindeki olası kaçak akımını gösteren bir paralel direnç. Maksimum pil verimi elde etmek için bu direncin de değerinin mümkün merteye yüksek olması gerekir. Paralel direnç, azalan kalınlık ile artarken, artan ışık şiddeti ile birlikte keskin bir düşüş yaşar.

Şekil 4.9'da, I_L ışık altında meydana gelen akımı (foto akım), I_0 karanlık doyma akımını, R_S seri direnci, R_{SH} paralel direnci, I_D diyot akımını, I_{SH} kaçak akımı olarak verilmiştir. Devreden geçen akım, a düzeltilmiş idealite faktörü olmak üzere, I_L , I_0 , R_S , R_{SH} ve a 'ya bağlıdır. Düzeltilmiş idealite faktörü, N_{CS} seri bağlı güneş pili sayısı, n diyot idealite veya kalite faktörü, k_B Boltzmann sabiti, q elektron yükü, T_C pilin mutlak sıcaklığı olmak üzere $a = N_{CS} n k_B T_C / q$ şeklinde hesaplanmaktadır. Kirchhoff'un akım kuralına göre seçilen herhangi bir noktada devreden geçen akım için; I_L güneş pilinde üretilen fotoakım, V pil üzerine düşen gerilim, I_D diyot akımı, I_{SH} kaçak akım olmak üzere devreden geçen akım;

$$I = I_L - I_D - I_{SH} \quad (4)$$

şeklinde yazılabilir. I_D diyot akımı ve paralel direnç üzerinden geçen I_{SH} kaçak akım yukarıdaki denklemde yerine konulursa devreden geçen akım;

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{V + I R_S}{a} \right] - 1 \right\} - \frac{V + I R_S}{R_{SH}} \quad (5)$$

olarak elde edilir. Karanlık doyma akımı I_0 , fotovoltaik hücrelerin yapıldığı malzemelerin bant yapısına ve büyük ölçüde sıcaklığa bağlıdır [46]. Işık altında herhangi bir besleme olmaksızın ve ideal durumda iken devreden geçen akım I_{SC} kısa devre akımı olarak ifade edilir. I_{SC} yaklaşık olarak I_L değerine eşittir ve gelen ışığın karakteristiği ile orantılıdır. İdeal bir fotovoltaik hücrede seri direnç sıfır, paralel direnç sonsuz olmalıdır.

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmalarda donör olarak polimerler MDMO-PPV, PCDTBT ile küçük molekül CuPc ve akseptör olarak C₆₀ ve fulleren türevi olan PCBM kullanılmıştır.

MDMO-PPV:PCBM, PCDTBT:PCBM ve CuPc:C₆₀ ile hazırlanan fotovoltaik hücrelerin değişen parametreleri ile hazırlanmış güneş pilleri incelenmiştir. Son yıllarda üzerine birçok bilimsel çalışmanın yapıldığı bu alanda çalışılmasının nedeni, bu sistem hakkında bir protokol oluşturmaktır. Ayrıca yapılan çalışmaların literatürün neresinde olduğunu bilmek ve bu standartları yakalayıp sonrasında geliştirmek de hedefler arasındadır.

5.1 Tek Eklemlili Fotovoltaik Hücrelerin Hazırlanması

Deneylerde altlık olarak kullanılan ITO (indium kalay oksit) kaplı camlar dışarıdan satın alınmıştır ve dirençleri yaklaşık olarak $< 15 \Omega\text{cm}^{-2}$ civarındadır. Hücrelerin hazırlanacağı altlıklar $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ boyutlarında kesilmiştir. Sistemin kısa devre olmasını önlemek için camların 1/3'lük kısmı literatürde belirtildiği şekilde ıslak asitle aşındırma yöntemi (wet etching) ile kaldırılmıştır. Aşındırma için kullanılan çözelti 4.6:0.4:5 oranlarında HCl_{konz}:HNO_{3konz}:H₂O'nun karıştırılması ile elde edilmiştir ve 2/3'ü maskelenmiş camlar çözeltide yaklaşık 40 dakika bekletilerek üzerindeki ITO tabakasının eritilmesi sağlanmıştır. Asitle aşındırma işleminden sonra camlar 15'er dakika sırası ile deiyonize su, aseton ve isopropanol içerisinde ultrasonik banyoda yıkanmıştır.

ITO kaplı altlık camların yukarıda belirtilen adımlarla temizlenmesinin ardından bu numuneler dönel kaplama yöntemi ile 1500 rpm'de PEDOT:PSS kaplanmıştır. Asit aşındırma yöntemi ile eritilen ITO'nun karşı tarafında PEDOT:PSS yaklaşık aynı miktarda

silindi. Kaplama işlemi tamamlandıktan sonra numunelere kül fırın içerisinde 150 °C'de 4 dk. ısı tavlama işlemi uygulanmıştır.

Deneylerde aktif tabaka olarak kullanılacak olan polimer ve fulleren türevleri ticari olarak satın alınmıştır. Hazırlanan aktif tabaka bileşenleri ve çözücü oranları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 5.1 Polimer:Fulleren oranları

Çözücü Miktarı	Polimer Adı ve Miktarı	PCBM Miktarı
1 ml	12 mg P3HT	6.5 mg
1 ml	7.5 mg MDMO-PPV	30 mg
1 ml	4 mg PCDTBT	16 mg

Hazırlanan bu çözeltiler PEDOT:PSS kaplı numuneler üzerine 50 µL'lik pipetler kullanılarak damlatılmış ve tek eklemliler ile çok eklemlilerde aranan kriterlere göre 800 ve 1500 rpm olmak üzere iki farklı rpm değerinde dönel kaplama ile kaplanmıştır. Bazı deneylerde kaplanan P3HT:PCBM tabakasına 120 °C'de 4 dk. ısı tavlama işlemi uygulanmış ve bu katmana sıcaklığın etkisi incelenmiştir. Dönel kaplama yöntemi ile katmanlar elde edildikten sonra termal buharlaştırma sisteminde 100 nm Al metali buharlaştırılmıştır. Tamamlanan tek eklemliler güneş hücrelerinin devre yapısı ITO/PEDOT:PSS/aktif tabaka/Al şeklindedir.

5.2 Çok Eklemliler Fotovoltaik Hücrelerin Hazırlanması

Çok eklemliler fotovoltaik hücrelerin hazırlanmasında ITO kaplı cam altlıklar temizlik için tek eklemliler fotovoltaik hücrelerdeki ile aynı işlemlere tabi tutulmuştur. Hazırlanacak çok eklemliler hücrenin yapısına göre ilk göze, daha önce anlatıldığı gibi uygun polimer:fulleren çözeltilerinden dönel kaplama yöntemi ile ince film elde edilecek şekilde oluşturulmuştur.

İlk göze yapısı tamamlandıktan sonra ikinci göze ile arasına, HOMO-LUMO seviyeleri göz önünde bulundurularak ilk hücreden gelen elektronları ve ikinci hücreden gelecek

holleri birleştirecek uygun bir rekombinasyon tabakası kaplanmıştır. Bu tabaka, ışığı soğurmadan geçirecek kadar ince ve saydam, aynı zamanda ilk gözenin üzerine kaplanacak olan ikinci göze filmlerinin de alttaki gözeyi kimyasal olarak çözmemesini sağlayacak kadar kalın ve dayanıklı olmalıdır.

Üst gözenin de kaplanması ile elde edilen ITO/PEDOT:PSS/aktif tabaka/rekombinasyon tabakası/aktif tabaka yapısından sonra metal elektrot olan Al buharlaştırılarak çok eklemli hücre sistemi tamamlanmıştır.

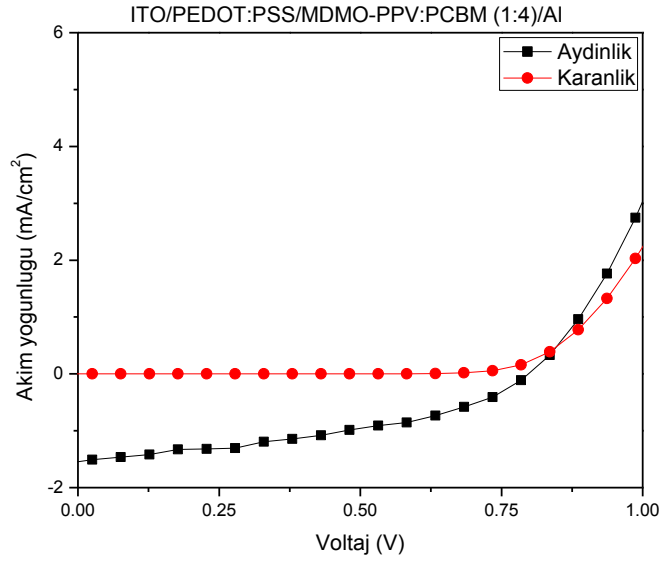
5.3 Deneysel Sonuçlar

5.3.1 MDMO-PPV:PCBM Kullanılarak Hazırlanmış Tek Eklemli Hücreler

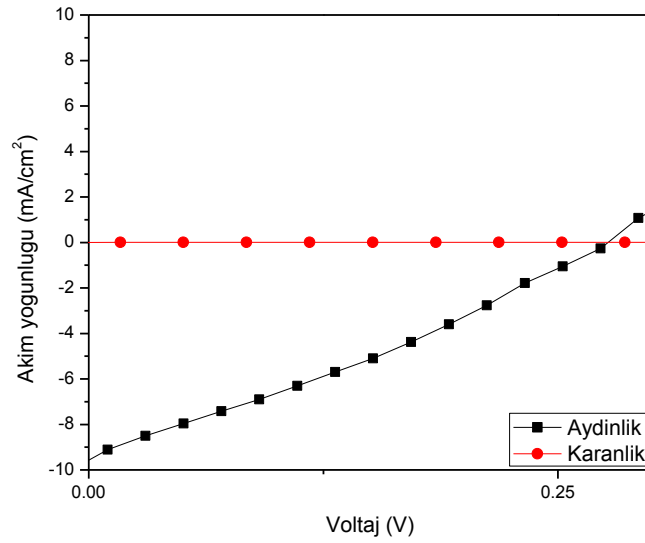
ITO kaplı cam altlıkların 1500 rpm'de PEDOT:PSS kaplanmasının ardından 1:4 oranında klorobenzen içinde karıştırılarak hazırlanmış olan MDMO-PPV:PCBM çözeltisi 800 rpm'de dönel kaplama yöntemi ile numuneler üzerine uygulanmıştır. Aktif tabakanın tamamlanmasından sonra katot olarak 100 nm kalınlığında Al, metal buharlaştırma sistemi içerisinde numune üzerine kaplanmıştır. Bu güneş gözesine ait aydınlık ve karanlık akım yoğunluğu-gerilim eğrileri Şekil 5.1'de verilmiştir. Akım yoğunluğu $J_{SC}=1.55 \text{ mA/cm}^2$, açık devre gerilimi $V_{OC}=784 \text{ mV}$, dolgu faktörü $FF=0.40$ ve verim $\eta=\% 0.48$ olarak elde edilmiştir.

5.3.2 PCDTBT:PCBM Kullanılarak Hazırlanmış Tek Eklemli Hücreler

PEDOT:PSS katmanı kaplandıktan sonra ITO tabakalı cam altlıklar 800 rpm değerinde, 1:4 oranında klorobenzen içinde karıştırılmış PCDTBT:PCBM çözeltisi ile kaplanmıştır. Metal kontak olarak 100 nm kalınlığında Al, metal buharlaştırma sistemi içerisinde kaplanmıştır. Bu tip hücreye ait aydınlık ve karanlık akım yoğunluğu-gerilim eğrileri Şekil 5.2'de verilmiştir. Akım yoğunluğu $J_{SC}=9.66 \text{ mA/cm}^2$, açık devre gerilimi $V_{OC}=272 \text{ mV}$, dolgu faktörü $FF=0.29$ ve verim $\eta=\% 0.76$ olarak bulunmuştur.

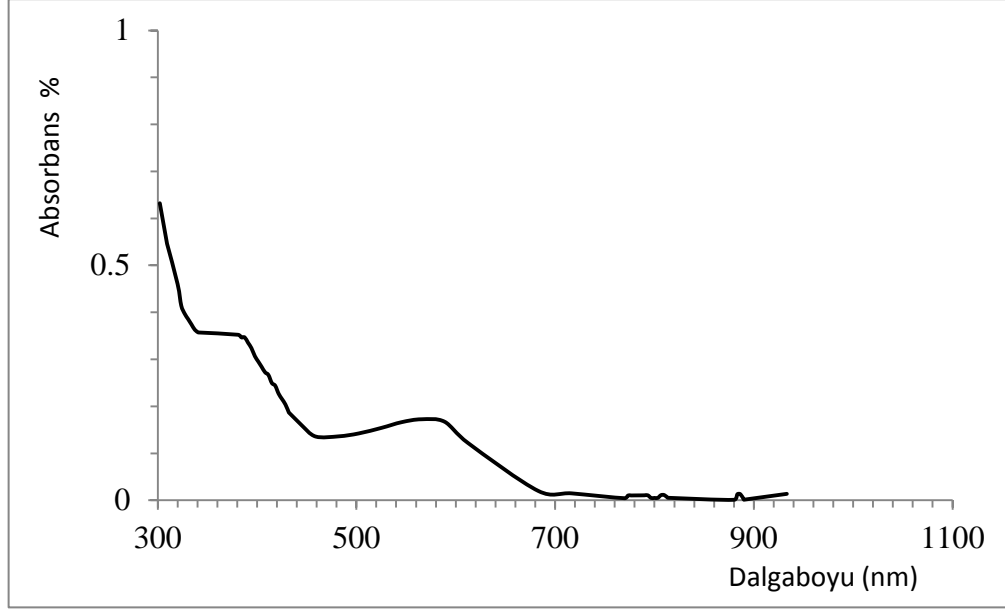


Şekil 5.1 Aktif tabakası MDMO-PPV:PCBM (1:4) olarak hazırlanmış fotovoltaiik hücreye ait akım yoğunluğu-gerilim eğrileri



Şekil 5.2 Aktif tabakası PCDTBT:PCBM (1:4) olarak hazırlanmış fotovoltaiik hücreye ait akım yoğunluğu-gerilim eğrileri

Aktif tabakasında PCDTBT:PCBM kullanılarak hazırlanmış tek eklemlı güneş hücresine ait soğurma eğrisi Şekil 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5.3 PCDTBT:PCBM'in soğurma grafiği

5.3.3 CuPc:C₆₀ Kullanılarak Hazırlanmış Tek Eklemler ve Yığılmış Hücreler

Bu çalışmada CuPc:C₆₀ kullanılarak tek eklemler ve yığılmış hücreler hazırlanmıştır. Tek eklemler hücre hazırlanırken yukarıda belirtilen hız değerinde PEDOT:PSS tabakası kaplanmıştır. Bu işlemin ardından numuneler 150 °C'de 4 dk. boyunca kalsinasyona tabii tutulmuştur.

Numuneler, tutucu maskenin üzerine yerleştirilip organik malzeme buharlaştırma sistemine konulmuştur. Hans-Jürgen Prall'ın 2005 yılında sunduğu tezin bazı adımları takip edilerek başta 10 nm CuPc, ardından 1:1 oranında olacak şekilde 15'er nm CuPc ve C₆₀ ve son olarak 15 nm saf C₆₀ buharlaştırılmıştır.

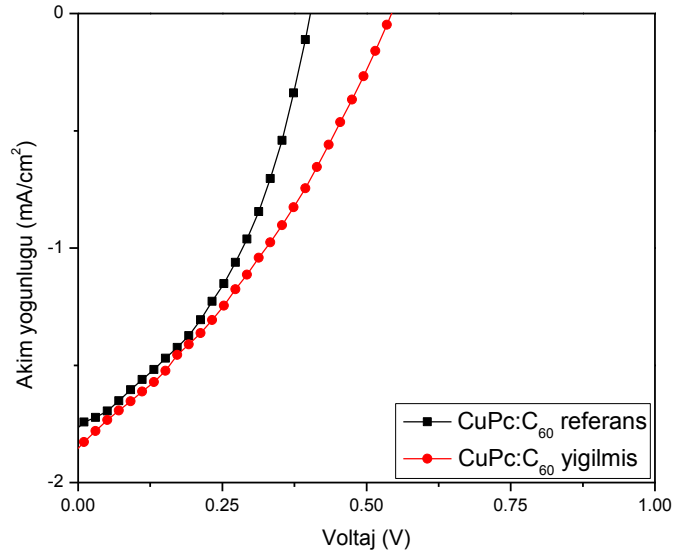
Aktif tabakası tamamlanan piller ardından uygun metal elektrot kaplanması için metal buharlaştırma sistemine alınmış. 5×10^{-6} mbar vakum değerinde 100 nm Al buharlaştırma işlemi gerçekleştirildikten sonra tek eklemler güneş hücreleri tamamlanmıştır.

Referans amaçlı, tek eklemler olacak şekilde tasarlanan hücreler diğer numunelerden ayrılmıştır. CuPc ve C₆₀'ın HOMO-LUMO seviyeleri göz önüne alındığında rekombinasyon tabakası olarak iş fonksiyonu en uygun metal Ag seçilmiş ve yığılmış pil olarak hazırlanacak numuneler metal buharlaştırma sistemine yerleştirilmiştir. Yığılmış hücreleri tamamlayacak olan ikinci göze, ilk göze ile aynı şekilde hazırlanmıştır.

Elde edilen değerlere göre tek eklemli hücrelerde açık devre gerilimi $V_{OC}=393$ mV iken, bu değer yığılmış hücrelerde $V_{OC}=535$ mV olarak görülmektedir (Çizelge 5.2). İki tip hücrenin aydınlatma altındaki akım yoğunluğu-gerilim eğrileri karşılaştırılarak Şekil 5.4'te verilmiştir.

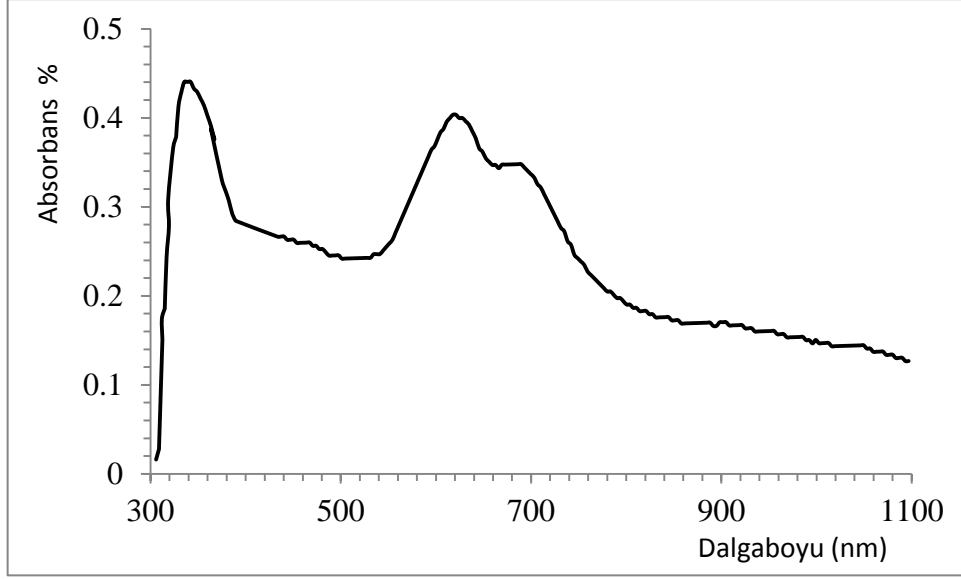
Çizelge 5.2 CuPc:C₆₀ ve CuPc:C₆₀/CuPc:C₆₀ hücrelerine ait V_{OC} , J_{SC} , FF ve η değerleri

Pil tipi	V_{OC} (mV)	J_{SC} (mA/cm ²)	FF	η
CuPc:C ₆₀	393	1.79	0.41	0.28
CuPc:C ₆₀ /CuPc:C ₆₀	535	1.88	0.32	0.32

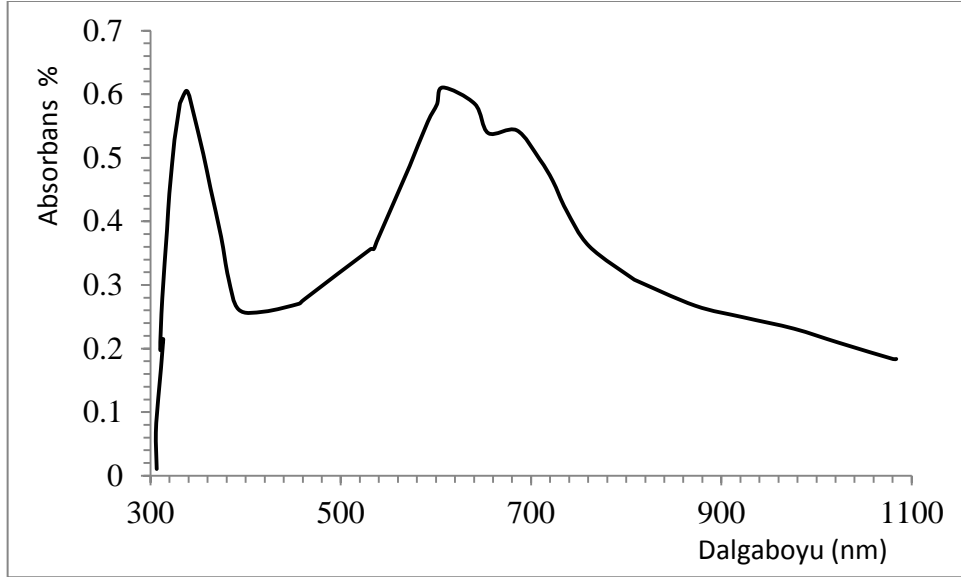


Şekil 5.4 Aktif tabakası CuPc:C₆₀ olarak hazırlanmış tek ve çift eklemli fotovoltaik hücrelere ait akım yoğunluğu-gerilim eğrileri

CuPc:C₆₀ ile oluşturulmuş tek ve çift eklemli hücrelere ait soğurma eğrileri sırası ile Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.5 CuPc:C₆₀ ile oluşturulmuş tek eklemlü hücrelere ait soğurma eğrisi



Şekil 5.6 CuPc:C₆₀ ile oluşturulmuş çift eklemlü hücrelere ait soğurma eğrisi

5.3.4 CuPc:C₆₀ ve PCDTBT:PCBM Kullanılarak Hazırlanmış Tandem Piller

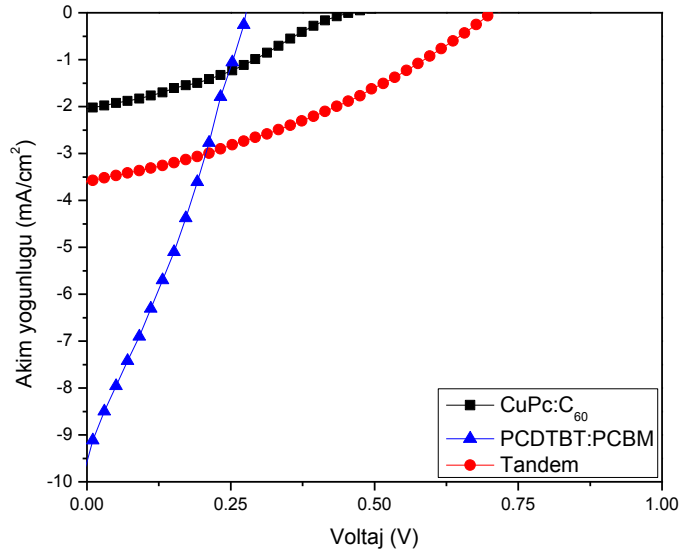
Güneş spektrumunda daha geniş bir bölgeden faydalanabilmek için farklı soğurma aralıklarına sahip organik malzemelerden çok eklemlü hücreler yapılmıştır. Bu amaçla, literatürde yer alan ve çift eklemlü hücrelerin hazırlanmasında kullanılan düşük band aralıklı organik polimer PCDTBT, fulleren türevi PCBM ve geniş band aralıklı CuPc ile fulleren C₆₀ kullanılmıştır.

Tek eklemlü iki farklı hücrenin açık devre gerilimleri toplamı, bu iki hücreden oluşturulmuş tandem hücrenin açık devre gerilimine eşit bulunmuştur (Çizelge 5.3).

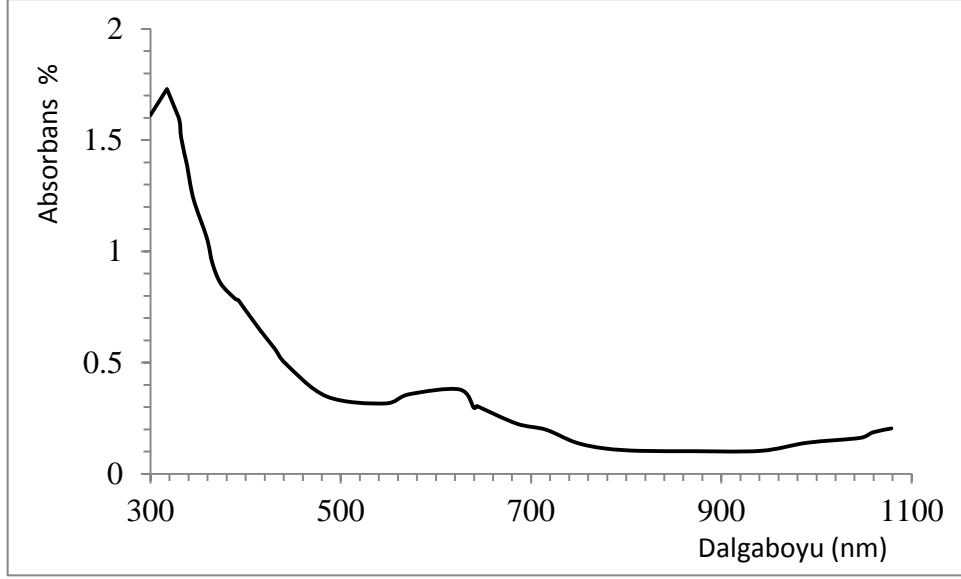
Çizelge 5.3 PCDTBT:PCBM, CuPc:C₆₀ ve PCDTBT:PCBM/CuPc:C₆₀ hücrelerine ait V_{OC}, J_{SC}, FF ve η değerleri

Pil tipi	V _{OC} (mV)	J _{SC} (mA/cm ²)	FF	η
PCDTBT:PCBM	272	9.66	0.29	0.76
CuPc:C ₆₀	454	2.06	0.33	0.30
PCDTBT:PCBM/CuPc:C ₆₀	697	3.61	0.34	0.85

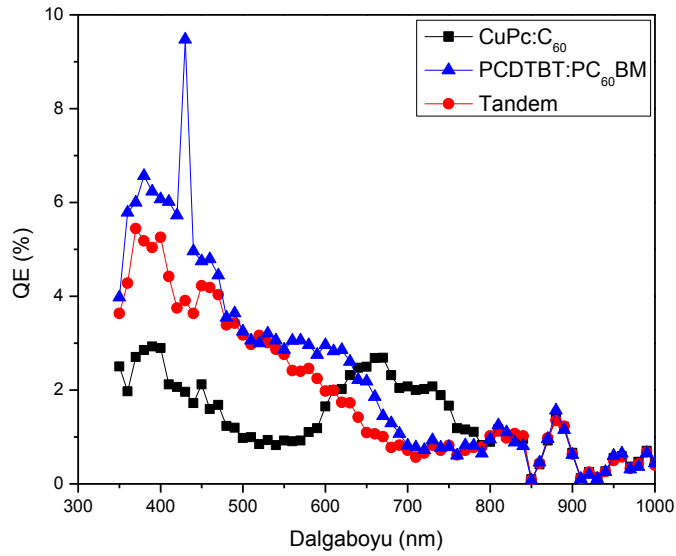
Aktif tabakalarında PCDTBT:PCBM ve CuPc:C₆₀ kullanılan tek eklemlili hücrelere ve bu malzemelerden hazırlanmış tandem yapıdaki hücreye ait aydınlatma altında akım yoğunluğu-gerilim ve soğurma eğrileri sırası ile Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Şekil 5.9’de gösterilen eğri, güneş gözesine gelen fotonlarınne kadarının elektron koparttığını gösteren İç Kuantum Verimi (IPCE)’dir.



Şekil 5.7 Tek ve çift eklemlili hücrelere ait J-V eğrileri



Şekil 5.8 PCDTBT:PCBM/CuPc:C₆₀ çift eklemli hücreye ait soğurma eğrisi



Şekil 5.9 Tek ve çift eklemli hücelere ait IPCE eğrileri

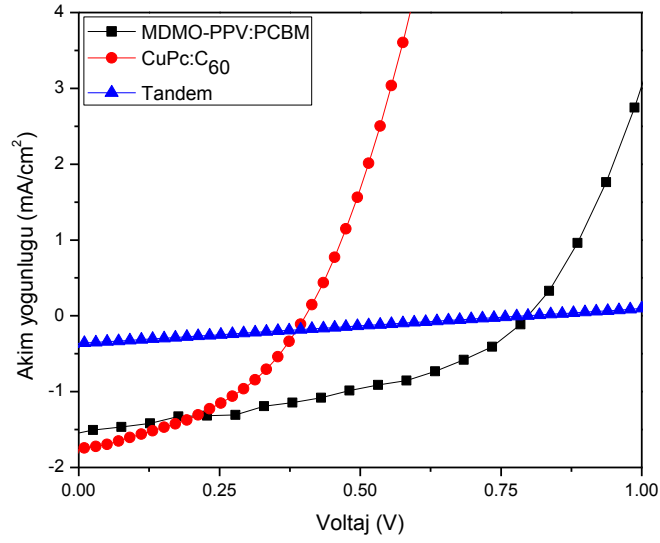
5.3.5 CuPc:C₆₀ ve MDMO-PPV:PCBM Kullanılarak Hazırlanmış Tandem Piller

PCDTBT:PCBM ve CuPc:C₆₀ ile yapılan çift eklemli fotovoltaik hücrelerden sonra çok eklemli hücre performansına kullanılan polimerin etkisinin incelenmesi için literatürde sık kullanılan MDMO-PPV polimeri tercih edilmiştir. Bu deneyde, Hans-Jürgen Prall'in çalışmasındaki polimer:fulleren/ftalosiyanın bazlı küçük molekül:C₆₀ çok eklemli hücre yapısı referans alınmıştır.

Deneylerde elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu olmama sebebi atmosfer ortamında çalışılmış olunmasıdır. MDMO-PPV:PCBM ve CuPc:C₆₀ tek eklemli ve tandem hücrelerin çalışma parametreleri verilmiş (Çizelge 5.4) ve aydınlatma altındaki akım yoğunluğu-gerilim eğrileri Şekil 5.10'da gösterilmiştir.

Çizelge5.4 MDMO-PPV:PCBM ve CuPc:C₆₀ tek eklemli ve tandem hücrelerin çalışma parametreleri

Pil tipi	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	η
MDMO-PPV:PCBM	784	1.55	0.40	0.48
CuPc:C ₆₀	393	1.79	0.41	0.28
MDMO-PPV:PCBM/ CuPc:C ₆₀	777	0.36	0.25	0.07



Şekil 5.10 Tek ve çift eklemli hücrelere ait J-V eğrileri

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çok eklemli hücreler, organik fotovoltaiik sistemlerde verimi arttırmak için kullanılan devre yapılarından biridir. Bu konudaki çalışmalar hızla ilerlemekte ve gelecek vaat eden sonuçlar elde edilmektedir. Bu tezde yapılan deneysel çalışmalarda, literatürde en sık kullanılan MDMO-PPV ve PCDTBT polimerleri ile PCBM fulleren türevi ve CuPc küçük molekülleri ile C₆₀ fullereni kullanılmıştır. Devre tasarımı olarak yine literatürde en çok karşılaşılan tek eklemli ve çok eklemli geometriler hazırlanmıştır. Çok eklemli devre yapıları aynı tek eklemli gözelerin üst üste tekrarlanması ile veya farklı tek eklemli gözelerin birleştirilmesiyle hazırlanmıştır. Çok eklemli gözeler referans olarak öncelikle MDMO-PPV:PCBM heteroeklemli ile tek eklemli güneş pili hazırlanmış ve $J_{SC}=1.55$ mA/cm², $V_{OC}=784$ mV ve $FF=0.40$ olarak bulunmuştur. Benzer şekilde PCDTBT:PCBM ve CuPc:C₆₀ için de tek eklemli gözeler hazırlanmış ve bulunan değerler sırasıyla PCDTBT:PCBM için $J_{SC}=9.66$ mA/cm², $V_{OC}=272$ mV, $FF=0.29$; CuPc:C₆₀ için ise $J_{SC}=1.79$ mA/cm², $V_{OC}=393$ mV, $FF=0.41$ 'dir. Yukarıda da bahsedildiği gibi iki aynı tek eklemli hücrenin birleştirilmesiyle oluşturulan yığılmış hücre yapısı CuPc:C₆₀ için denenmiş ve yapının çalışması sağlanmıştır. Diğer tek eklemli hücreler için yığılmış yapı denenmesine rağmen istenilen sonuç elde edilememiştir, ancak sorunun rekombinasyon tabakasından kaynaklandığına literatürdeki makalelerin taranması sonucu karar verilmiştir.

Tandem yapıdaki çok eklemli hücreler hazırlanarak tek eklemli hücreler ile karşılaştırılmış, böylece tandem güneş pilinin açık devre geriliminin iki tek eklemli hücrenin gerilimlerinin yaklaşık olarak toplamı olduğu gözlemlenmeye çalışılmıştır.

Çok eklemli devre yapılarıITO/PEDOT:PSS/CuPc:C₆₀/Ag/CuPc:C₆₀/Al, ITO/PEDOT:PSS/CuPc:C₆₀/Ag/PCDTBT:PCBM/Al,ITO/PEDOT:PSS/CuPc:C₆₀/Ag/MDMO-PPV:PCBM/Alşeklinindedir. Bulunan sonuçlar aşağıda verilmiştir (Çizelge 6.1).

Çizelge 6.1CuPc:C₆₀/CuPc:C₆₀, PCDTBT:PCBM/CuPc:C₆₀ve MDMO-PPV:PCBM/CuPc:C₆₀ hücrelerine ait V_{OC}, J_{SC}, FF ve η değerleri

Pil tipi	V _{OC} (mV)	J _{SC} (mA/cm ²)	FF	η
CuPc:C ₆₀ /CuPc:C ₆₀	535	1.88	0.32	0.32
PCDTBT:PCBM/CuPc:C ₆₀	697	3.61	0.34	0.85
MDMO-PPV:PCBM/ CuPc:C ₆₀	777	0.36	0.25	0.07

GörüldüğüüzerePCDTBT:PCBM ile hazırlanançok eklemli hücre MDMO-PPV:PCBM ile hazırlanana oranla daha iyi sonuçvermiştir. Bunun sebebiPCDTBT:PCBM ile hazırlanan tek eklemli hücrenin daha iyi çalışmasıve MDMO-PPV:PCBM yapısının oksijen ortamında stabil olmamasıdüşünülmektedir. Çünkü güneş spektrumunda PCDTBT, MDMO-PPV'den daha geniş bir bölgeyi soğurmakta, bu da devreden geçen akımın yüksek olmasını, dolayısıyla da verimin yüksek olmasını sağlamaktadır.

Elde edilen sonuçlarliteratürdekisonuçlara oranla daha düşüktür. Bunun en büyük sebebi deneylerin atmosfer basıncında ve oksijen ortamında yapılmasıdır. Oysa literatürdeki deneyler düşük basınç ve azot gazı ortamında yapılmış böylece kullanılan malzemelerin hava ortamından etkilenmesi önlenmiştir. Hazırlanan pillerden en iyi çalışanı, aktif tabakası PCDTBT:PCBM/CuPc:C₆₀ olacak şekilde tasarlanandır. Rekombinasyon tabakası üzerine yapılançalışmalarartıp yeni polimerler üretildikçe tandem güneş pillerinde de verim değişecektir. Bu sebepten dolayı, yeni malzemeler geliştirildikçe polimer etkisi incelenmelidir.

KAYNAKLAR

-
- [1] Yu-Wei, S., Shang-Che, L. ve Kung-Hwa, W., (2012). "Organic Photovoltaics", *Materials Today*, 15: 554-562.
 - [2] National Center for Photovoltaics, Efficiency of Solar Cell, www.nrel.gov/ncpv/, 2013.
 - [3] Boland, P., Lee, K., Dean, J. ve Namkoong, G., (2010). "Desing of organic tandem solar cells using low-and high band gap polymer: fullerene composites", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94: 2170-2175.
 - [4] Prall, H.J., Koppe, R., Autengruber, R., Egginger, M., Dennler, G., ve Sariciftci, S., (2006). "From evaporation to solution processed organic tandem solar cells", *Photonics for Solar Energy Systems*, DOI:10.1117/12.662589.
 - [5] Hoppe, H., Gratzel, T., Niggemann, M., Schwinger, W., Schaeffeler, F., Hinsch, A., Luxsteiner, M. ve Sariciftci, N.S., (2006). "Efficiency limiting morphological factors of MDMO-PPV:PCBM plastic solar cells", *Thin Solid Films*, 511: 587-592.
 - [6] Kotlarski, J. ve Blom, P.W.M., (2011). "Ultimate performance of polymer:fullerene bulk heterojunction tandem solar cells", *Applied Physics Letters*, 98: 53301-53304.
 - [7] Hadipour, A., Boer, B., ve Bloom, P.W.M., (2008). "Organic tandem and multi-junction solar cells", *Advanced Functional Materials*, 18: 169-181.
 - [8] Glowacki, E., *Fabrication of Polymer/Fullerene Organic Solar Cells (P3HT/PCBM) Organic Device favrication Ders Notları*, Bahar 2011.
 - [9] Burschka, J., Pellet, N., Moon, S., Humphry-Baker, R., Gao, P., Nazeeruddin, M. ve Gratzel, M., (2013). "Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells", *Nature*, 499: 316-319.
 - [10] Brabec, C.J., Hauch, J.A., Schilinsky, P. ve Waldauf, C., (2005). "Production Aspects of Organic Photovoltaics and Their Impact on The Commercialization of Devices", *Mrs Bulletin*, 30: 50-52.
 - [11] Vos, A., (1980). "Detailed balanced limit of the efficiency of tandem solar cells", *Applied Physics*, 13: 839-846.
 - [12] Tutorvista, Energy policy definition, <http://www.tutorvista.com/ks/energy-policydefinition>; 2010.
 - [13] Othman, A.K., Jakhrani, A.Q., Abidin, W.A.W.Z., Zen, H., ve Baharun, A., (2010). "Renewable Energy: Solar PV System", *World Engineering Congress*, 2–5 Ağustos 2010, Malezya.
 - [14] International Energy Agency (IEA), Solar Energy, <http://www.iea.org/>, 2013.

- [15] MBendi Information Services, World Solar Power Introduction, www.mbendi.com/indy/ener/sola/p0005.htm, 2013.
- [16] Bilen, K., Özyurt, O., Bakırcı, K., Karlı, S., Erdoğan, S., Yılmaz, M., et al. (2008). "Energy production, consumption, and environmental pollution for sustainable development: a case study in Turkey", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12:1529–1561.
- [17] Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N.ve Gekas, V., (2005). "Environmental impacts from the solar energy Technologies", *Energy Policy*, 33: 289–296.
- [18] Solangi, K.H., Islam, M.R., Saidur, R., Rahim, N.A. ve Fayaz, H., (2011). "A review on global solar energy policy", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15: 2149-2163.
- [19] The Official Web Site of Nobel Prize, Chemistry Nobel Prizes, http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1996/, 2013.
- [20] Strobl, G.R., (2007). *The Physics of Polymers Concepts for Understanding Their Structures and Behavior*, 3rd Edition, Springer Berlin Heidelberg, New York.
- [21] Kazmerski, I., (1980). *Introduction to Photovoltaics: Physics, Materials and Technology*, Photovoltaics Branch Solar Energy Research Institute Golden, Colorado.
- [22] You, J., Dou, L., Hong, Z., Li, G. ve Yang, Y., (2013). "Recent trends in polymer tandem solar cell research", *Progress in Polymer Science*, DOI: 2013.04.005.
- [23] Brumbach, M., Veneman, F., Saneeha, M., Schulmeyer, T., Simmonds, A., Xia, W., Lee, P. ve Armstrong, N.R., (2007). "Surface Compositions and Electrical and Electrochemical Properties of Freshly Deposited and Acid-Etched Indium Tin Oxide Electrodes", *Langmuir*, 23:11089-11099.
- [24] Dietrich, M., Heinze, J., Heywang, G. ve Jonas, F., (1994). "Electrochemical and spectroscopic characterization of polyalkylenedioxythiophenes", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 369: 87-92.
- [25] Prall, H.J., (2005). *Tandem Solar Cells*, Diplomarbeit, Johannes Kepler Üniversitesi, Linz.
- [26] Lu, X., Hlaing, H., S.Germack, D., Peet, J., Ho Jo, W., Andrienko, D., Kremer, K. ve M.Ocko, B., (2012). "Nature Communications 3" DOI: 10.1038.
- [27] World of Molecules, Fullerene, <http://www.worldofmolecules.com/materials/fullerene.htm> , 2013.
- [28] Gregory, P., (2000). "Industrial applications of phthalocyanines", *Journal of Porphyrins and Phtalocyanines*, 4:432-437.
- [29] Sariciftci, S., Smilowitz, L., Heeger, A.J. ve Wudi, F., (1993). "Semiconducting polymers (as donor) and bulkminsterfullerene (as acceptor): Photoinduced electron transfer and heterojunction devices", *Applied Physics Letters*, 62: 585-588.
- [30] Zhou, H., Yang, L. ve You, W., (2012). "Rational design of High performance Conjugated Polymers for Organic Solar Cells", *Macromolecules*, 45: 607-632.
- [31] Sariciftci, N.S., Smilowitz, L., Heeger A.J. ve Wudi, F., (1992). "Photoinduced Electron Transfer from a Conducting Polymer to Buckminsterfullerene", *Science*, 258: 1474-1476.
- [32] Haugeneder, A., Neges, M., Kallinger, C., Spirkl, W., Lemmer, U., Feldmann, J., Scherf, U., Harth, E., Gugel, A. ve Mullen, K., (1999). "Exciton diffusion and dissociation in

- conjugated polymer/fullerene blends and heterostructures”, *Physical Review B*, 59: 15346-15351.
- [33] Mozer, A.J., (2004). Charge Transport and Recombination in Bulk Heterojunction Plastic Solar Cells, Doktora Tezi, Johannes Kepler Üniversitesi, Linz.
- [34] Green, M., (2002). “Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversation”, *Physica E*, 14:65-70.
- [35] Green, M., (2006). “Third Generation Photovoltaics: Solar Cells for 2020 and Beyond”, Springer, 5:59-67.
- [36] Şenay, G., (2011). Çok Eklemlı Güneş Pillerinde Detaylı Denge Modeli İle Verim Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [37] Dennier, G., Forberich, K., Ameri, T., Waldauf, C., Denk, P., Brabec, C., Hingerl, K. ve Heeger, A., (2007). “Design of efficient organic tandem cells: On the interplay between molecular absorption and layer sequence”, *Journal of Applied Physics*, 102: 123109-123115.
- [38] Brabec, C.J., Zerza, G., Cerullo, G., De Silvestri, S., Luzzati, S., Hummelen, J.C. ve Sarıciftci, S., (2001). “Tracing photoinduced electron transfer process in conjugated polymer/fullerene bulk heterojunctions in real time”, *Chemical Physics Letters*, 340: 232-236.
- [39] Solar and Alternative Energy, Inverted Bulk-heterojunction Solar Cells, <http://spie.org/x14269.xml?pf=true&ArticleID=x14269>, 2013.
- [40] Parker, I.D., (1994). “Carrier tunneling and device characterization in polymer light emitting diodes”, *Journal of Applied Physics*, 75: 1656-1667.
- [41] Gunes, S., Neugebauer, H. ve Sarıciftci, N.S., (2007). “Conjugated Polymer- Based Organic Solar Cells”, *Chemical Reviews*, 107:1324-1338.
- [42] Yuen, M.H., (2004). *Electrical Installation Handbook Volume 2: Electrical Devices*, ABB SACE, Bergamo, Italy.
- [43] ASTM G173 - 03(2012) Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface.
- [44] Akcay, M., (2012). Sol-gel yöntemleriyle hazırlanmış titanyum oksit (TiO₂) ve çinko oksit (ZnO) kompakt tabakalarının tersine çevrilmiş fotovoltaik hücrelerin verimine etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTU Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [45] Riedel, I., Parisi, J., Dyakonov, V., Lutsen, L., Vanderzande, D. ve Hummelen, J.C., (2004). “Effect of temperature and illumination on the electrical characteristic of polymer-fullerene bulk-heterojunction solar cells”, *Advanced Functional Materials*, 14: 38-44.
- [46] Onat, N. ve Ersöz, S., (2009). “Fotovoltaik Sistemlerde Maksimum Güç Noktasızleyici Algoritmalarının Karşılaştırılması”, V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 19-21 Haziran 2009, Diyarbakır.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Aren YAZMACIYAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 19.09.1988 Şişli/İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce, Almanca
E-posta : ryazmaci@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Fizik	Yıldız Teknik Üniversitesi	2013
Lisans	Fizik	Yıldız Teknik Üniversitesi	2011
Lise	Sayısal	Özel Avusturya Lisesi	2007

PROJE

1.Bakır İndiyum Disülfid (CuInS₂), Kadmiyum Çinko Sülfür (CdZnS), Kadmiyum Tellür (CdTe) Yarıiletkenlerinin Polimer Güneş Pillerinde Elektron Taşıyan Tabaka Olarak Kullanılması