

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**POLİFENİLENVİNİLEN (PPV) BAZLI KONJUGE
POLİMERLERLE HAZIRLANAN ORGANİK
FOTOVOLTAİK HÜCRELER**

Gülay GÜNDAY

**FBE Fizik Anabilim Dalı Fizik Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Serap GÜNEŞ (YTÜ)

İSTANBUL, 2010

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**POLİFENİLENVİNİLEN (PPV) BAZLI KONJUGE
POLİMERLERLE HAZIRLANAN ORGANİK
FOTOVOLTAİK HÜCRELER**

Gülay GÜNDAY

**FBE Fizik Anabilim Dalı Fizik Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Serap GÜNEŞ (YTÜ)

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. FOTOVOLTAİK HÜCRELER	5
2.1 Giriş	5
2.2 Fotovoltaik Hücrelerin Tarihsel Gelişimi	6
2.3 İnorganik Fotovoltaik Hücreler	7
2.4 Organik Fotovoltaik Hücreler	11
2.4.1 İletken Polimerler	12
2.4.2 Organik Fotovoltaik Hücrelerde Kullanılan Malzemeler	14
2.4.3 Hazırlama Teknikleri	17
2.4.4 Organik Fotovoltaik Hücrelerin Temel Çalışma Prensibi	17
2.4.5 Aygıt Yapıları	19
2.4.5.1 Tek Katman	19
2.4.5.2 Çift Katmanlı Heteroeklem	20
2.4.5.3 Hacim Heteroeklemi	21
2.4.6 Fotovoltaik Hücre Karakterizasyonu	22
2.4.7 Fotovoltaik Hücre Veriminde Önemli Parametreler	24
2.4.7.1 Açık Devre Gerilimi (V_{oc})	24
2.4.7.2 Kısa Devre Akımı (I_{sc})	25
2.4.7.3 Dolgu Faktörü (Fill Factor-FF)	25
2.4.7.4 Nanomorfoloji	26
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	29
3.1 Kullanılan Malzemeler	29
3.2 Organik Fotovoltaik Hücrelerin Hazırlanması	30
3.2.1 Altlıkların Hazırlanması	31
3.2.2 Pedot:PSS Kaplanması	31
3.2.3 M3EH-PPV/PCBM Çözeltilerinin Hazırlanması ve Film Kaplanması	32
3.2.4 Metal Buharlaştırması	33
3.2.5 Fotovolotik Hücre Karakterizasyonu	33
3.3 DeneySEL Sonuçlar	34
3.3.1 Klorobenzen Çözücüsü Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar	34
3.3.1.1 Akım-Gerilim Karakterizasyonu	34
3.3.1.2 Film Morfolojisi	38
3.3.2 Toluen Çözücüsü Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar	39
3.3.2.1 Akım-Gerilim Karakterizasyonu	39

3.3.2.2	Film Morfolojisi	42
3.3.3	Kloroform Çözücüsü Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar	42
3.3.3.1	Akım-Gerilim Karakterizasyonu	42
3.3.3.2	Film Morfolojisi	45
3.3.3.3	Işık Şiddeti Değişiminin Organik Fotovoltaik Hücrenin Performansına Etkisi	46
4.	SONUÇLAR ve TARTIŞMA	49
KAYNAKLAR.....		52
ÖZGEÇMİŞ.....		56

SİMGE LİSTESİ

Al	Alüminyum
a-Si	Amorf Silisyum
C	Karbon
CB	Klorobenzen
CdSe	Kadmiyum Selen
CdTe	Kadmiyum Tellür
CF	Kloroform
CIGS	Bakır indiyum galyum disellenür
CO ₂	Karbondioksit
CuInSe ₂	Bakır indiyum diselenid
°C	Selsius derece
E	Elektrik alan
e	Temel yük birimi
eV	Elektron volt
FF	Dolgu faktörü
GaAs	Galyum Arsenid
GaAlAs	Galyum alüminyum arsenid
GaInAsP	Galyum indiyum arsenid fosfor
Ge	Germanyum
InAs	İndiyum arsenid
InSb	İndiyum Antimonit
InP	İndiyum Fosfit
I ₀	Karanlık akımı
I _{MPP}	Maksimum güç noktasındaki akım
I _{sc}	Kısa devre akımı
J _{sc}	Kısa devre akım yoğunluğu
mA	Miliamper
mV	Milivolt
μ	Mobilite
μm	Mikrometre
nm	Nanometre
n	Yük konsantrasyonu
η	Güç dönüşüm verimi
P _{MPP}	Maksimum güç çıkışı
P _{in}	Gelen ışığın gücü
Si	Silisyum
Tl	Toluen
W/m ²	Watt/metrekare
V _{MPP}	Maksimum güç noktasındaki gerilim
V _{oc}	Açık devre gerilimi

q	Elektron yükü
λ	Dalgaboyu
σ	Sigma bağı
π	Pi bağı
τ	Ömür

KISALTMA LİSTESİ

A	Angstrom
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
AM	Hava kütlesi (Air Mass)
CN-PPV	poli(2,5,2',5'-tetrahekziloaksi-7,8'-disiyanodi-p-fenilenvinilen)
CN-MEH-PPV	poli-[2- metoksi-5-(2'-etilhekziloaksi)-1,4-(1-siyanovinilen)-fenilen]
DC	Doğru akım
F8BT	poli(9,9'-dioktilfluorene benzo[2,1-b]furan-2,5-diyl)
FET	Alan Etkili Transistör
HOMO	En yüksek işgal edilmiş moleküler orbital, değerlik bandı
IR	Kızılötesi
ITO	İndiyum katkılı kalay oksit
LUMO	En düşük işgal edilmemiş moleküler orbital, iletkenlik bandı
M3EH-PPV	poli [2,5-dimetoksi-1, 4-fenilen - 1,2-etilen-2-metoksi-5-(2-etiloksi)- (1,4 fenilen-1,2 etilen)]
MEH-PPV	poli[2-metoksi-5-(2'-etil-hekziloaksi)-1,4-fenilen vinilen]
MDMO-PPV	poli[2-metoksi-5-(3,7-dimetiloktiloksi)]-1,4-fenilviniylen)
MIM	Metal yalıtkan metal (Metal/insulator/metal)
OLED	Organik ışık yayan diyotlar
PV	Fotovoltaik
P3HT	poli(3-hekziltiophen-2,5-dil)
PFB	poli (9-9'-dioktilfluorene-co-bis-N-N'-(4-butylfenil)-bis-N-N'-fenil-1,4-
PCBM	1-(3-metoksikarbonil) propil-1-fenil [6,6]C ₆₁)
PEDOT:PSS	Polietilendioksitiyofen: polistirensülfonat
PPV	polifenilenvinilen
P3HT	Poli(3-hekziltiophen-2, 5-dil)
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TEM	Geçirmeli elektron mikroskobu
UV	Ultraviyole (morötesi)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Fotovoltaik hücre ve fotovoltaik modül	5
Şekil 2.2	Dünyadaki fotovoltaik hücre pazarının tarihsel gelişimi [5]	10
Şekil 2.3	Organik Fotovoltaik Hücre [7]	11
Şekil 2.4	Konjuge çift bağ	12
Şekil 2.5	Bakırdan Kuvarsa kadar olan materyaller ile iletken polimerlerin iletkenliklerinin karşılaştırılması (Koyuncu, 2008).....	13
Şekil 2.6	Organik yarı iletkenlerin mekanik ve işlenebilme özelliklerine göre sınıflandırılmaları.....	15
Şekil 2.7	Organik fotovoltaik hücrelerde kullanılan donör ve akseptör malzemeler (Hoppe, 2004).	16
Şekil 2.8	Genel olarak kullanılan malzemelerin soğurma katsayıları ile standart hava kütlesi (Air Mass/AM) 1.5 doğal güneş spektrumunun kıyaslaması (Hoppe ve Sarıçiftçi, 2004).....	17
Şekil 2.9	Organik fotovoltaik hücrelerde ışığın elektrik akımına dönüştürülme işlemi. Polimer donörü ve fulleren akseptörü içeren aktif tabaka daha net görülebilmesi için büyütülmüştür. (Kietzke, 2007)	18
Şekil 2.10	Çift katlı heteroeklem fotovoltaik hücrelerin devre şeması	21
Şekil 2.11	Hacim heteroeklemine dayalı fotovoltaik hücrelerin devre şeması	21
Şekil 2.12	Hacim Heteroeklem Fotovoltaik Hücrenin İdeal Yapısı (Gunes vd., 2007)	22
Şekil 2.13	Bir fotovoltaik hücrenin akım-voltaj grafiği (I-V eğrisi). Kesik çizgiler karanlıkta, düz çizgi ise aydınlıktaki karakteristiği göstermektedir.	23
Şekil 2.14	AFM ile yüzeyi taranmış MDMO:PPV/PCBM (1:4) oranı için (a) klorobenzen içerisindeki yüzey görüntüsü, (b) toluen içerisindeki yüzey görüntüsü (Hoppe, 2004)	27
Şekil 2.15	MDMO-PPV:PCBM 1 : 4 oranında toluende hazırlanmış filmin tapping moddaki AFM’le alınan görüntüsü a)130 °C b)150°C c)165° C sıcaklık uygulanmıştır. (Hoppe vd., 2004)	28
Şekil 3.1	M3EH-PPV ve PCBM’in kimyasal yapıları	29
Şekil 3.2	Organik fotovoltaik hücrede kullanılan malzemelerin enerji diyagramları (Chasteen vd., 2008; Park vd., 2009).....	30
Şekil 3.3	Organik fotovoltaik hücre şematik yapısı	30
Şekil 3.4	Altıtlıkların temizleme işleminde kullanılan ultrasonik banyo cihazı.....	31
Şekil 3.5	PEDOT:PSS’in kimyasal yapısı.....	31
Şekil 3.6	İnce film kaplamak için kullanılan dönel kaplama (spin coating) cihazı.....	32
Şekil 3.7	Manyetik karıştırıcı	33
Şekil 3.8	Metal buharlaştırma aleti.....	33
Şekil 3.9	Akım-gerilim karakterizasyonu için Keithley 2400 ve solar simülatör cihazı.....	34
Şekil 3.10	Klorobenzen çözücüsü içerisinde hazırlanmış, farklı aktif tabaka (M3EH-PPV:PCBM) konsantrasyonlarının akım-gerilim karakteristiklerine etkisi (a) 1:1 (b) 1:2 (c) 1:3 (d) 1:4	36
Şekil 3.11	Klorobenzende hazırlanmış M3EH-PPV: PCBM filmlerin AFM resimleri (a) 1:1, (b) 1:4 karışım oranları	38
Şekil 3.12	Toluene çözücüsü içerisinde hazırlanmış, farklı aktif tabaka (M3EH-PPV:PCBM) konsantrasyonlarının akım-gerilim karakteristiklerine etkisi (a) 1:1 (b) 1:2 (c) 1:3 (d) 1:4.....	41
Şekil 3.13	Toluende hazırlanmış M3EH-PPV: PCBM filmlerin AFM resimleri (a) 1:1, (b) 1:3 karışım oranları	42
Şekil 3.14	Kloroform çözücüsü içerisinde hazırlanmış, farklı aktif tabaka (M3EH-PPV:PCBM) konsantrasyonlarının akım-gerilim karakteristiklerine etkisi (a)	

1:1 (b) 1:2 (c) 1:3 (d) 1:4	44
Şekil 3.15 Kloroformda hazırlanmış M3EH-PPV: PCBM filmlerin AFM resimleri (a) 1:1, (b) 1:3 karışım oranları	46
Şekil 3.16 0,5 güneş ışığında (sun) ölçülen M3EH-PPV:PCBM /CF fotovoltaik hücrelerin akım-gerilim eğrileri	47
Şekil 3.17 1 güneş ışığında (sun) ölçülen M3EH-PPV:PCBM /CF fotovoltaik hücrelerin akım-gerilim eğrileri	47
Şekil 3.18 1,5 güneş ışığında (sun) ölçülen M3EH-PPV:PCBM /CF fotovoltaik hücrelerin akım-gerilim eğrileri	48
Şekil 4.1 Fotovoltaik hücre eşdeğer devre diyagramı (a) ideal durum (b) ideal olmayan durum (Würfel, 2005)	50
Şekil 4.2 (a) Seri direncin akım-gerilim eğrisine etkisi (b) paralel direncin akım-gerilim eğrisine etkisi (Winder, 2001).....	50

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 Aktif tabakada kullanılan M3EH-PPV/ PCBM oranları	32
Çizelge 3.2 Klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan farklı aktif tabaka konsantrasyonlarının verime etkileri.....	37
Çizelge 3.3 Toluen çözücüsü kullanılarak hazırlanan farklı aktif tabaka konsantrasyonlarının verime etkileri	41
Çizelge 3.4 Kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan farklı aktif tabaka konsantrasyonlarının verime etkileri.....	45

ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca her türlü bilimsel ve teknolojik imkanları sağlayarak yardımlarını esirgemeyen ve yol gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Serap GÜNEŞ'e, sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda kullandığım polimerin sentezini yaparak, bu çalışmanın meydana gelmesine büyük katkı sağlayan Sayın Doç.Dr. Daniel A. M. EGBE'ye teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım esnasında deneysel ve moral desteklerinden dolayı grup arkadaşlarım Derya ILICALI, Emel ÇEVİK ve Adem KARSLI'ya çok teşekkür ederim.

Paylaştıkları fikirleri ve arkadaşlıkları ile her zaman yanımda olup beni cesaretlendiren sevgili arkadaşlarım Can KONAN, Filiz KAYADİBİ, Nesrin ATMACA ve Utku CANCI'ya sonsuz teşekkür ederim.

Son olarak, her zaman bana güvendikleri ve hayatım boyunca her türlü maddi ve manevi desteği benden esirgemedikleri için babam Ali GÜNDAY, annem Asiye GÜNDAY ve kardeşim Ufuk GÜNDAY'a tüm kalbimle teşekkür ederim.

ÖZET

Bu tez çalışmasında, polifenilen - vinilen (PPV) bazlı konjuge polimerle hazırlanan, hacim heteroeklemlili organik fotovoltaiik hücrelerin toluen, kloroform ve klorobenzen olmak üzere 3 farklı çözücüdeki üretimleri yapılıp, fotovoltaiik özellikleri incelenmiştir. Aktif tabaka olarak kullanılan poli [2,5-dimetoksi-1, 4-fenilen - 1,2-etilen-2-metoksi-5-(2-etiloksi)-(1,4 fenilen-1,2 etilen)] (M3EH-PPV) polimeri Doç. Dr. Daniel A. M. Egbe tarafından sentezlenmiştir. M3EH-PPV polimeri hazırlanan çözeltilerde donör olarak kullanılmış, [1-(3-metoksikarbonil)propi1-1 fenil-[6,6]-metanofulleren] (PCBM) ise akseptör olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak, M3EH-PPV ve PCBM'in 1:4 karışım oranı için sırasıyla güç dönüşüm verimleri klorobenzende %0,9 kloroformda %0,8 ve toluende %0,35 olarak bulunmuştur. Fotovoltaiik özellikler, akım - gerilim (I-V) karakterizasyonu ve yüzey görünümelerini veren AFM resimleri ile incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Organik fotovoltaiik hücre, iletken polimer, poli(fenilen vinilen), kısa devre akımı, açık devre gerilimi, dolgu faktörü.

ABSTRACT

In this thesis, effect of different solvents like toluene, chloroform and chlorobenzene on the photovoltaic properties of bulk heterojunction solar cells employing conjugated polymer based on polyphenylene-vinylene (PPV) was investigated. Poly[2,5-dimethoxy-1,4-phenylene-1,2-ethenylene-2-methoxy-5-(2 ethylexyloxy)-(1,4-phenylene-1,2 ethenylene)] (M3EH-PPV) which polymer was used as an active layer synthesized by Priv. Doz. Dr. Daniel A. M. Egbe. M3EH-PPV was used as donor and 1-(3-methoxycarbonyl)propyl 1-1 phenyl-[6,6]-methanofullerene (PCBM) was used as an acceptor. As a result, power conversion efficiencies were found to be 0,9%, 0,8% and 0,35% for chlorobenzene, chloroform and toluene respectively in which 1:1 ratio was used for M3EH-PPV and PCBM. Photovoltaic properties were investigated via current-voltage (I-V) characterization and AFM pictures which is shown surface images.

Keywords: Organic solar cell, conductive polymer, poly(phenylenevinylene), short circuit current, open circuit voltage, fill factor

1. GİRİŞ

Enerji, insanlığın varoluşundan bugüne kadar hem en büyük ihtiyaç hem de elde edilişi ve kullanımı açısından en büyük sorun olmuştur. İnsanoğlunun geliştirdiği her yeni teknolojiye sonra, yeni ve daha fazla enerji çeşidine ihtiyaç duyuldu. Dünya nüfusunun sürekli artması, enerji bağımlılığına paralel olarak enerji ihtiyacının da sürekli artmasına sebep olmaktadır. Bu ihtiyaçların büyük kısmı fosil yakıtlarda depolanmış enerjilerden sağlanır. Fosil yakıtları; yakılınca biten ve yenilenemeyen enerji kaynaklarıdır. Yenilenemeyen enerji kaynaklarının sanayi devriminin başlamasından günümüze kadar bilinçsizce tüketilmesi, tehlike çanlarının çalmasına sebep olmuştur. En iyimser hesaplar bile yenilenemeyen enerji kaynaklarının (petrol, kömür v.b.) yakın bir gelecekte tükeneceğini göstermektedir. Dünyanın bilinen petrol rezervlerinin 2050 yılında, doğalgaz rezervlerinin 2070 yılında ve kömür rezervlerinin 2150 yılında tükeneceği beklenmektedir [1]. Fosil yakıtların tükenerek olmasına ilaveten, fosil yakıtların kullanımı her geçen gün daha da ciddi bir tehlike haline gelen çevresel kirliliğe neden olmaktadır. Öyle ki bu kirlilik dünya iklimini çok hızlı bir şekilde değiştirmekte ve bütün ekolojik dengenin tehdit edilmesine sebep olmaktadır. Böylece yeni kuşakların yaşam kalitesine dair ciddi kaygılar ortaya çıkmaktadır.

Mevcut enerji üretim kaynaklarının hızla tükenme eğilimi içine girmesi, hammadde fiyatlarının artması, çevreye ve insan sağlığı üzerine olan olumsuz etkileri, kullanımlarındaki bir takım zorluklar son yıllarda alternatif enerji kaynakları üzerinde yapılan çalışmaları arttırmıştır. Maksimum enerji kullanımı sağlayabilecek ve minimum çevre kirliliği yaratacak enerji kaynakları arayışına gidilmiştir. Yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları olarak isimlendirilen başlıca alternatif kaynaklar; Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, dalga enerjisi, biyokütle enerjisi, jeotermal enerji, hidrolik enerji ve hidrojen enerjisidir. Yenilenebilir enerji, “doğanın kendi evrimi içinde, bir sonraki gün aynen mevcut olabilen enerji kaynağı” olarak tanımlanmaktadır. Yenilenebilir enerjiyi çekici kılan en önemli özellikleri; temiz olması, çevreye ve canlılara zararı olmaması, hiçbir atık içermemesi ve ekstra kaynak istememesidir. Fosil yakıtlar yakın gelecekte tamamen tükenme tehlikesi ile karşı karşıyadır. Ancak yenilenebilir enerjinin, tesisler, hayvanlar ve insanlar tarafından kalıcı olarak tüketilmesi mümkün değildir. Genel görüş şudur ki, gelecekteki enerji ihtiyacını karşılamak için çevreye karşı daha duyarlı olan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması gerekmektedir. Bütün gelişmiş ülkeler çevreye zararsız yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanmaya olağanüstü bir önem vermektedir. Bu yönüyle gelecek yüzyıl, yenilenebilir enerji kaynakları kullanımında atılım yapılacak bir yüzyıl olma görünümündedir. 2020 yılında dünyada üretilen

elektriğin yüzde 50'sinin yenilenebilir kaynaklardan olması planlanmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında Güneş enerjisi, çözmeye çalışılan enerji problemi için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Dünyada varlığı bilinen kömür, petrol, doğalgaz ve uranyumun tamamından daha fazla miktardaki enerji dünya yüzeyine güneş ışığı şeklinde gelmektedir. Bu enerji dünyanın yıllık enerji ihtiyacının yaklaşık 15.000 katına eşdeğerdir (Ocakoğlu, 2006). Güneş enerjisi; tükenme olasılığının az olması, tehlikesiz olması, çevre sorunlarına neden olmaması, temiz ve güvenilir olması gibi nedenlerle gittikçe daha çok önem kazanmaktadır. Güneş enerjisinin bir diğer özelliği, hiçbir ulaştırma harcaması olmaksızın her yerde sağlanabilmesidir. Dünyadaki bütün ülkeler az ya da çok güneş enerjisine sahiptir. Güneş tüm dünya ülkelerinin yararlanabileceği bir enerji kaynağı olduğundan ülkelerin enerji açısından bağımlılıklarını da ortadan kaldıracaktır.

Ülkemiz, coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre şanslı durumdadır. “Güneş kuşağı” da denilen 45° kuzey-güney enlemleri arasında yer almaktadır. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğünde (DMI) mevcut bulunan 1966-1982 yıllarında güneşlenme süresi ve ışıyım şiddeti verilerinden yararlanarak Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü (EİE) tarafından yapılan çalışmaya göre Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7,2 saat), yıllık güneş enerjisi ışıyım şiddeti 1311 kWh/m²-yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m²) olarak belirlenmiştir [2]. 36-42° kuzey enlemleri arasında bulunması ve güneş enerjisinden yararlanma açısından en elverişsiz konumda bulunan Karadeniz Bölgesinde dahi yıllık güneşlenme süresinin 1971 saat ve bu değerin Güneydoğu Anadolu Bölgesinde 2993 saat olması, Türkiye'nin güneş enerjisinden yararlanmasının ne kadar uygun olduğunu açıkça ortaya koymaktadır [2].

Güneş enerjisi, daha çok binalarda ısıtma, soğutma ve sıcak su elde etmek için kullanılmaktadır. En yaygın olan kullanım biçimi; sıcak su elde etmek amacıyla kullanımıdır. Isıtma amacıyla kullanım, ısıyı depolama tekniklerinin gelişmesiyle birlikte daha verimli kullanılabilir hale gelecektir. Soğutma ise yıllık güneşlenme zamanının uzun olduğu bölgelerde verimli olarak kullanılabilir. Soğutma ise yıllık güneşlenme zamanının uzun olduğu bölgelerde verimli olarak kullanılabilir.

Güneş enerjisinin diğer bir uygulama türü ise fotovoltaiik hücrelerdir. Fotovoltaiik hücreler hesap makineleri, saatler, trafik lambaları, uzay araçları, gözetleme kuleleri gibi alanlarda kullanılabilir.

Fotovoltaik hücreler 3 genel kısım altında toplanabilir.

- **Birinci nesil:** Tek kristal silisyum ve polikristal silisyum fotovoltaik hücreler
- **İkinci nesil:** İnce film fotovoltaik hücre
- **Üçüncü nesil:** Nanoteknolojiye dayalı fotovoltaik hücreler, organik fotovoltaik hücreler, boya sensörlü fotovoltaik hücreler

Birinci ve ikinci nesil olarak adlandırılan fotovoltaik hücreler, Si, CdTe, GaAs gibi inorganik yarı iletkenlerden oluştuklarından inorganik fotovoltaik hücreler olarak adlandırılırlar. Teknolojik olarak uzun zamandır üretilen inorganik fotovoltaik hücrelerin verimi % 20'nin üstüne çıkmasına rağmen, üretim süreci, çok pahalı malzemeler ve oldukça pahalı işlem teknikleri gerektirmektedir. Günümüzde ticari olarak yaygın olmalarına karşın daha ucuz alternatifleri için araştırmalar yapılmaktadır. Bu bağlamda, organik malzemelerin, inorganik malzemelere göre, kolay işlenebilirlik, esneklik, ucuz malzeme ve ucuz işlem süreci gibi avantajlarının bulunması, bilim adamlarını organik fotovoltaik hücre üretimi üzerine çalışmaya yönlendirdi. Organik fotovoltaik hücreler çok ucuza ve az enerji gerektiren yüksek basınç teknikleriyle üretildiklerinden silisyum ve diğer inorganik ince film teknolojilerine kıyasla daha az anapara yatırımı gerektirirler. Ayrıca, piyasaya girebilmeleri için inorganik fotovoltaik hücreler kadar yüksek verime sahip olmalarına gerek yoktur.

Organik fotovoltaik hücrelerde kullanılan organik malzemeler; iletken polimerleri, boyaları, pigmentleri ve sıvı kristalleri içermektedir. Bunların içinde foto fiziksel özellikleri en iyi bilinen ve en çok çalışılan malzemeler iletken polimerlerdir (Sariciftci vd., 1992). İletken polimerler, ekonomik olmaları ve kolay işlem süreçleri ile ince film oluşturabilme gibi potansiyel avantajlara sahiplerdir. Yapılan ilk organik fotovoltaik hücre araştırmaları poli(fenilen-vinilen) (PPV) ve türevi iletken polimerler üzerine odaklanmıştır. Çünkü PPV' den fullerenlere çok hızlı yük transferi olduğu bilinmektedir (Sariciftci vd., 1992). Fotovoltaik hücrelerin verimini artırma yolunda yapılan önceki çalışmalar, PPV türevlerinden poli [2,5-dimetoksi-1, 4-fenilen - 1,2-etilen-2-metoksi-5-(2-etiloksi)-(1,4 fenilen-1,2 etilen)] (M3EH-PPV)'nin fotovoltaik hücre aktif tabakası için uygun bir donör olduğunu göstermektedir (Kietzke vd., 2006). Verimli fotovoltaik hücreler elde edebilmek için, donör ve akseptör malzemeler arasında ideal bir elektronik ilişki olmalıdır. M3EH-PPV iletken polimeri ile PCBM arasında da ideal bir elektronik ilişki bulunmaktadır.

Donör ve akseptör malzemeler ideal elektronik ilişkiye sahip olsa bile (enerji seviyeleri birbirine uysa bile) hacim heteroeklemlili fotovoltaik hücrenin performansı; donör ve akseptör

bileşenlerinin fiziksel etkileşimine bağlıdır. Bunu da morfoloji belirler. Aktif tabakanın morfolojisi, polimer ve fulleren özelliklerine bağlıdır. Örneğin iki bileşenin karışabilirliğine, devre üretimiyle ilgili etkilere, çözücü türüne, polimer fulleren konsantrasyonuna, kaplama tekniğine ve termal tavlamaaya bağlıdır (Barrau vd., 2009). Örneğin uygun çözücü seçiminin, verimi önemli ölçüde arttırdığı literatürde gösterilmiştir (Hoppe, 2004).

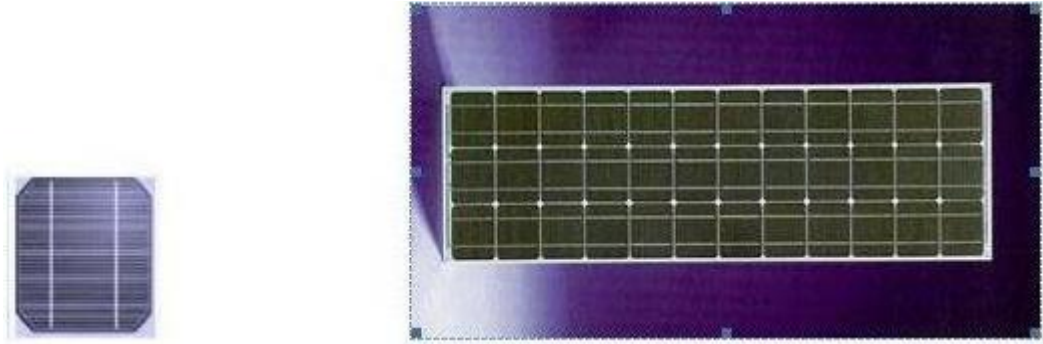
Bu çalışmada; donör olarak PPV türevleri içinden M3EH-PPV ve akseptör olarak fulleren türevi [1-(3-metoksikarbonil)propil-1 fenil-[6,6]-metanofulleren] (PCBM) kullanılarak organik fotovoltaiik hücreler üretildi ve bu fotovoltaiik hücrelerin karakterizasyonu yapılarak, güç dönüşüm verimleri hesaplandı. Çözücü türünün ve donör-akseptör konsantrasyonunun verimi nasıl etkilediği araştırıldı.

2. FOTOVOLTAİK HÜCRELER

2.1 Giriş

Fotovoltaik hücreler, yarı iletken malzemelerden yapılan ve yüzeylerine düşen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren aygıtlardır. Fotovoltaik hücreler fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışırlar. Yani üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Fotovoltaik hücrenin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisidir. Fotovoltaik hücreler doğru akım üretirler. Elde edilen elektrik, doğru akım olarak kullanılabilirdiği gibi, alternatif akıma dönüştürülerek de kullanılabilir.

Fotovoltaik hücrelerde mekanik olarak elektrik üreten cihazların aksine hareketli parçalar olmadığından teorik ömürleri uzundur. Güç çıkışını arttırmak amacıyla çok sayıda fotovoltaik hücre birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir, bu yapıya fotovoltaik hücre modülü adı verilir. Güç talebine bağlı olarak modüller birbirlerine seri ya da paralel bağlanarak bir kaç Watt'tan megaWatt'lara kadar sistem oluşturulur. Bu sistemlerde yeterli sayıda fotovoltaik hücre modülü, enerji kaynağı olarak kullanılır. Güneşin yetersiz olduğu zamanlarda ya da özellikle gece süresince kullanılmak üzere genellikle sistemde akümülatör bulundurulur. Modülleri gün boyunca elektrik enerjisi üreterek bunu akümülatörde depolar, yüke gerekli olan enerji akümülatörden alınır. Şebeke uyumlu alternatif akım elektriğinin gerekli olduğu uygulamalarda, sisteme bir invertör eklenerek akümülatördeki DC gerilim, 220 V, 50 Hz.lik sinüs dalgasına dönüştürülür [3].



Şekil 2.1 Fotovoltaik hücre ve fotovoltaik modül

Fotovoltaik hücreler uzay programları için geliştirilmeye başlanmış, ancak daha sonra elektrik enerjisinin gerekli olduğu birçok uygulamada kullanılmaya başlanmıştır. Orman gözetleme kuleleri, trafik ışıkları, deniz fenerleri, elektrik şebekesinden uzakta bulunan küçük yerleşim birimleri bu teknolojinin kullanılabileceği alanlardan bazılarıdır.

2.2 Fotovoltaik Hücrelerin Tarihsel Gelişimi

Fotovoltaik hücreler yeni bir teknoloji olarak kabul edilse bile tarihsel gelişimi 1800'li yıllara kadar uzanmaktadır. Fotovoltaik etki ilk olarak 1839 yılında Fransız fizikçi Alexandre Edmond Becquerel'in elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemlemesiyle bulundu. Becquerel'in bu araştırması, metal halojenür tuzu içeren bir çözelti içerisine iki platin elektrodun daldırılarak akım üretilmesi esasına dayanan fotoğrafının keşfi ile ivme kazandı.

1876'da G.W. Adams ve R.E. Day selenyum kristallerinde fotovoltaik olayı gözlemlemesiyle katı maddelerin de fotovoltaik etki oluşturabildiği kanıtlandı. 1883'te Charles Fritts selenyumu çok ince bir altın tabakasıyla kaplayarak ilk ciddi fotovoltaik hücreyi üretti. Bu fotovoltaik hücrenin verimi % 1'di (Şenol vd., 2008). Sonraki yıllarda fotovoltaik etkiler bakır-bakır oksit ince film yapılarında gözlemlendi (sülfid ve talyumsülfid gibi) (Würfel, 2005). Bu çalışmalar bakır oksit ve selenyuma dayalı foto diyotların, yaygın olarak fotoğrafçılık alanında ışık metrelerinde kullanılmasını beraberinde getirdi.

Fotovoltaik etki ile ilgili en kapsamlı teorik çalışma 1904'de Albert Einstein tarafından yapıldı. Bu teorik çalışma ona 1921'de Nobel ödülünü getirdi. Einstein'ın teorik açıklaması, 1916'da Robert Milikan tarafından denendi. 1932'de Cd-Se'de fotovoltaik etkinin gözlemlendiği açıklandı.

Yapılan ilk fotovoltaik hücreler schottky bariyer aygıtlarıydı. Yani metal- yarı iletken ara yüzeyinden oluşmaktaydılar. 1939'da Russel Ohl p-n eklemi keşfetti ve 1941'de p-n eklemi fotovoltaik hücrede kullandı. Bu yarı iletken- yarı iletken ara yüzeylerine sahip fotovoltaik hücrelerin daha iyi verim verdiği gözlemlendi (Würfel, 2005).

1954 yılında Chapin, Fuller ve Pearson tarafından ilk silikon fotovoltaik hücre yapıldı. Bu hücrelerde önceki fotovoltaik hücrelerden 6 kat yüksek olan % 6 verim elde edildi ve bu sonuç fotovoltaik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edildi (Würfel, 2005). Bu tarihi izleyen araştırmalar ve ilk tasarımlar, uzay araçlarında kullanılacak güç sistemleri için yapıldı. Silisyum esaslı fotovoltaik hücrelerden elektrik üretiminin ilk teknik uygulaması 1958 yılında Amerikan Vanguard uydusunda yapıldı. Uydunun kanatlarına bağlanan panellerden elde edilen elektrik enerjisi uydunun haberleşme, kontrol ve kumanda sistemlerinin enerjisinin sağlanmasında kullanıldı [4]. 1960'lı yıllarda silikon fotovoltaik hücreler uzay uygulamalarında geniş çapta kullanılmaya başlandı ve hala bu sistemler uzay çalışmalarının güvenilir kaynağı olmayı sürdürmektedir. Uzay çalışmalarında kullanımı

fotovoltaik hücre teknolojisinin çok hızlı gelişmesini sağladı. Daha 1960'ların başında verimleri %15' i buldu.

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 yarı iletken malzemeye gerek duyulan ve bu nedenle daha ucuza üretilebilecek polikristal silikon, amorf silikon gibi ince film malzemelerle yapılan ince film fotovoltaik hücreler ve daha sonra organik iletkenlerle yapılan organik fotovoltaik hücre çalışmalarına başlandı (Würfel, 2005). İlk üretilen fotovoltaik hücrelerin verimleri çok düşük olmasına rağmen, şu an mevcut fotovoltaik hücrelerde güç dönüşüm veriminde % 24'lere ulaşıldı (Green, 2001).

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

- İnorganik fotovoltaik hücreler
- Organik fotovoltaik hücreler

2.3 İnorganik Fotovoltaik Hücreler

1954 yılında ABD Bell Laboratuvarlarında % 6 verime sahip inorganik fotovoltaik hücrelerin geliştirilmesiyle fotovoltaik hücreler geniş oranda çalışılmaya başlandı (Chapin vd., 1954). İnorganik fotovoltaik hücreler silisyum, germanyum, galyum arsenit, kadmiyum sülfür ve kadmiyum tellür gibi inorganik yarı iletken malzemelerden yapılır. Silisyum en sık kullanılan yarı iletken malzemedir. Silisyum, dünyada oksijenden sonra en çok bulunan elementtir ve oksijenle birlikte kuartz veya daha bilinen haliyle kumu oluştururlar. Zehirsiz ve güvenilir olduğu kadar da bol bulunabilen bir malzemedir. Fotovoltaik hücrelerin imal edildiği silisyum, aynı zamanda bilgisayar çiplerinin yapımında da kullanılmaktadır (Çıtıroğlu, 2000). Uzay araştırmalarında kullanılan fotovoltaik hücrelerin çoğu silisyum fotovoltaik hücrelerdir. İnorganik fotovoltaik hücrelerde kullanılacak yarı iletkenlerin n ya da p tip katkıları gereklidir. Yarı iletken malzemenin içerisine, çok az miktarda uygun seçilmiş yabancı atom katkılanmasıyla yarı iletkenin elektriksel özellikleri önemli ölçüde değiştirilebilir. Saf yarı iletkenin yapısal özelliklerini bozmayacak oranda ve denetimli bir biçimde yarı iletken kristale yerleştirilen yabancı atomlara “safsızlık atomları” ve bu işleme de “katkılama” adı verilir.

Katkılamayı daha iyi açıklamak için çoğunlukla kullanılan silisyum kristali ele alındığında; saf silisyum kristalinde her atom 14 elektrona sahip olmakla birlikte, en dış yörüngedeki 4 elektron komşu atomlarla olan ilişkileri belirler. Değerlik elektronları adı verilen bu 4 elektronun her biri en yakınındaki 4 silisyum atomu ile bağ yaparak silisyum kristalindeki ana yapı taşını oluşturur. Ana yapı taşı küpün merkezindeki bir silisyum atomu ve küpün birbirine komşu olmayan köşelerinde birer silisyum atomu yerleşmesiyle kurulur. Silisyum kristali bu yapı taşlarının yinelenerek uzayı doldurması ile oluşur.

N tipi silisyum elde etmek için; yarı iletken periyodik cetvelin 5. grubundan bir element (fosfor, arsenik, antimon, bizmut gibi) eklenir. Örneğin saf silisyum kristali, içerisinde değerlik elektron sayısı 5 olan fosfor atomu ile katkılanırsa, fosfor atomu, silisyum atomunun yerine oturup 4 değerlik elektronu ile silisyum daha önce kristal içerisinde yaptığı bağları sağlar iken, fosforun beşinci değerlik elektronu açıkta kalacaktır. Fosfor atomunu çok zayıf olarak bağlı olan bu elektron çok küçük bir enerji ile atomundan ayrılarak silisyum kristalinin iletkenlik bandına çıkacaktır. Fosfor atomunda olduğu gibi, katıldığı kristal yapıya elektron veren safsızlık atomlarına “verici” denir. Bu şekilde katkılanmış yarı iletkenlerde elektriksel yük, elektronlar ile iletkenlik bandına taşınır ve bu nedenle bu yarı iletkenler “n-tipi” olarak sınıflandırılır (Hook ve Hall, 1999).

P tipi silisyum elde etmek için ise, yarı iletken periyodik cetvelin 5. grubundan bir element (alüminyum, indiyum, bor gibi) eklenir. Örneğin saf silisyum kristali içerisinde değerlik elektron sayısı 3 olan bor atomu katkılандığında silisyum atomunun yerini alan bor atomu, silisyum kristalindeki 3 atomla bağ yaparken dördüncü atomla paylaşacağı elektronu olmadığı için, bir eksik bağ ortaya çıkacaktır. Bu şekilde katkılanmış yarı iletkenlerde değerlik bandındaki deliklerin sayısı iletkenlik bandındaki serbest elektron sayısından daha çok olduğundan, çoğunluk taşıyıcıları artı yükleri gibi düşünülen deliklerdir. Deliklerin çoğunluk taşıyıcısı olduğu bu tür malzemelere “p-tipi yarı iletken” adı verilir (Hook ve Hall, 1999).

Yarı iletken ister n-tipi isterse p-tipi olsun kendi içerisinde nötrdür. Yani dışarıya karşı herhangi net bir elektrik yükü göstermezler; ancak, dışarıdan bir elektrik alan uygulandığında elektrik alana tepki veren çoğunluk yük taşıyıcılarıdır. N-tipi yarı iletkendeki çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlar ve azınlık yük taşıyıcıları delikler, p-tipi yarı iletkende rol değiştirirler. Elektronlar elektrik alan ile ters yönde hareket ederken, boşluklar elektrik alan doğrultusunda hareket ederler.

Çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlardan oluşan n tipi ile çoğunluk yük taşıyıcıları deliklerden oluşan p tipi yarı iletken bir araya gelip p-n eklemi oluştuğunda; n tipindeki çoğunluk yük

taşıyıcısı olan elektronlar, p tipine doğru akmaya başlar. P tipindeki çoğunluk yük taşıyıcısı boşluklar ise dolayısıyla n tipine doğru akmaya başlar. Bu olay her iki tarafta da yük dengesi sağlanana kadar devam eder. P-N tipi maddenin ara yüzeyinde, yani eklem bölgesinde, P bölgesi tarafında negatif, N bölgesi tarafında pozitif yük birikir. Bu eklem bölgesi geçiş bölgesi ya da yükten arındırılmış bölge adını alır. Fotovoltaik dönüşüm şu şekilde gerçekleşir. P-N eklem üzerine ışık düşmesiyle elektron delik çifti oluşur ve bu elektron delik çiftleri elektrik alan yardımıyla birbirinden ayrılırlar. Bu şekilde ayrılmış elektron ve delikler, bir dış devre üzerinden birleştirildiğinde, akan yükler, doğrudan güneş enerjisinden elde edilen elektrik enerjisinin kaynağıdır.

Yarı iletkenler, bir yasak enerji aralığı tarafından ayrılan iki enerji bandından oluşur. Bu bantlar değerlik bandı ve iletkenlik bandı adını alırlar. Bu yasak enerji aralığına eşit veya daha büyük enerjiye sahip bir foton, yarı iletken tarafından soğurulduğu zaman, enerjisini değerlik bandındaki bir elektrona vererek, elektronun iletkenlik bandına çıkmasını sağlar. Böylece, elektron delik çifti oluşur. Bu olay, p-n eklem fotovoltaik hücrenin ara yüzeyinde meydana gelmiş ise elektron delik çiftleri buradaki elektrik alan tarafından birbirlerinden ayrılır. Bu şekilde fotovoltaik hücre, elektronları n bölgesine, delikleri de p bölgesine iten bir pompa gibi çalışır. Birbirlerinden ayrılan elektron delik çiftleri, fotovoltaik hücrenin uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluştururlar. Bu süreç yeniden bir fotonun fotovoltaik hücre yüzeyinde soğurulmasıyla aynı şekilde devam eder. Yarı iletkenin iç kısımlarında da, gelen fotonlar tarafından elektron delik çiftleri oluşturulmaktadır. Fakat gerekli elektrik alan olmadığı için tekrar birleşerek kaybolmaktadırlar.

Belli başlı inorganik fotovoltaik hücre çeşitleri 3 grupta açıklanabilir.

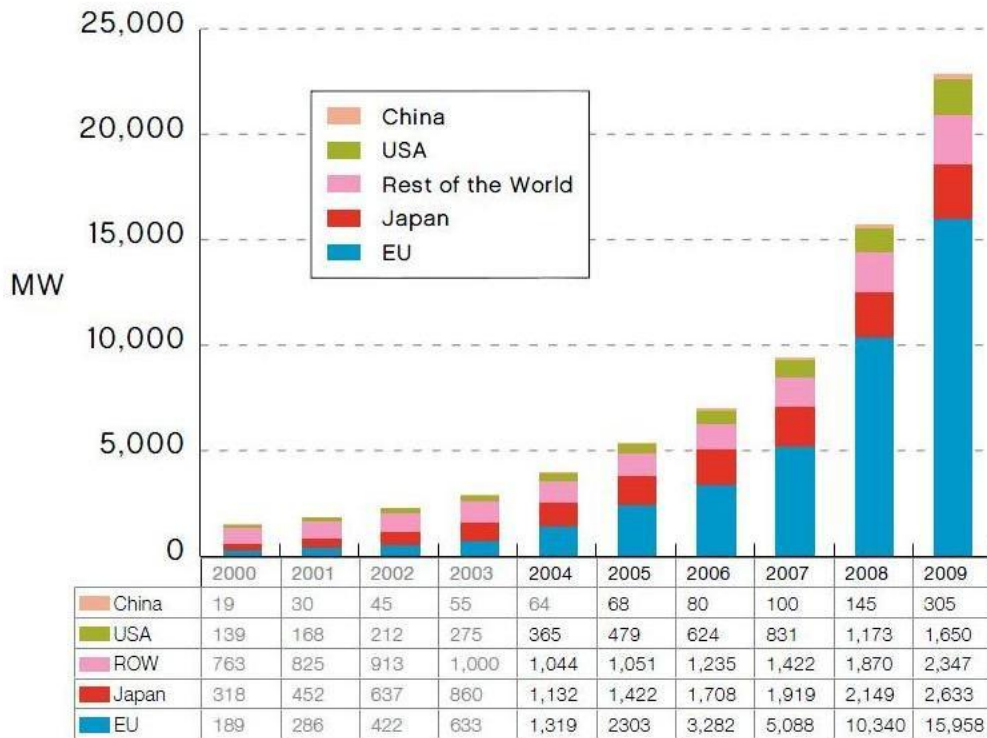
i) Tek Kristal ve Çok Yapılı Kristal Silisyum Fotovoltaik Hücreler: Kristal Silisyum fotovoltaik hücre uygulamaları, birinci nesil fotovoltaik teknolojiler olarak adlandırılmaktadır. Kristal silisyum fotovoltaik hücre üretimi ileri düzeyde yarı iletken teknolojisidir. Silisyum, elektriksel ve optik özelliklerini uzun süre koruyabilmektedir. Bu da silisyumu fotovoltaik hücreler için uygun bir malzeme haline getirmiştir. Silisyum aynı zamanda pahalı bir malzemedir. Silisyum fotovoltaik hücre üretiminin maliyeti, modül üretiminin %50'sine eşdeğerdir (Goetzberger ve Hebling, 2000).

ii) İnce Film Fotovoltaik Hücreler: İnce film fotovoltaik hücre uygulamaları, ikinci nesil fotovoltaik teknolojiler olarak adlandırılmaktadır. Fotovoltaik hücrelerde maliyetin düşürülmesi yönündeki çalışmalar, ince film fotovoltaik hücrelerin üretilmesine yol açmıştır. İnce film fotovoltaik hücreler; amorf silisyum (a-Si), kadmiyum tellür (CdTe), bakır indiyum

galyum disellenür (CIGS) ve ince film kristal silisyum fotovoltaik hücreleri kapsamaktadır. Direkt bant aralıklı yarı iletken malzemelerde olduğu gibi, ince film yarı iletken malzemeler silisyuma göre çok daha yüksek soğurma katsayısına sahip olduklarından ince film fotovoltaik malzemede kalınlık, silisyum üzerine yapılan fotovoltaik hücrelere göre çok daha azdır. Üstelik ince film yarı iletken, istenen şekilde çok farklı malzeme üzerinde ve geniş yüzeylere kaplanabilir.

iii) III-V Grup Yarı iletkenleri: İdeale yakın bant aralığına sahip GaAs, GaAlAs, GaInAsP, InAs, InSb, InP malzemeleri fotovoltaik hücreler için ilginç ve önemli malzemelerdir. Bu malzemelerin pahalı olmasından ötürü performansın maliyetten daha önemli olduğu uzay çalışmalarında kullanılmaktadır.

Fotovoltaik hücreler son yıllardaki gelişimiyle dünyadaki elektrik üretimi için büyük potansiyel oluşturduğundan fotovoltaik hücre pazarı hızla büyüme göstermektedir (Şekil 2.2). 1997 yılında tahmini üretim 100 MW iken bugün dünyadaki kurulu gücü 23 GW'a ulaşmıştır. Bu gücün aşağı yukarı % 70'i olan 16 GW'ını Avrupa ülkeleri oluştururken, 2,6 GW'ını Japonya oluşturmakta ve arkasından 1,6 GW ile ABD gelmektedir. Çin ise dünya fotovoltaik hücre pazarının ilk 10'u arasına girmiş ve ilerleyen yıllarda bu pazarda çok önemli bir rol alması beklenmektedir [5].



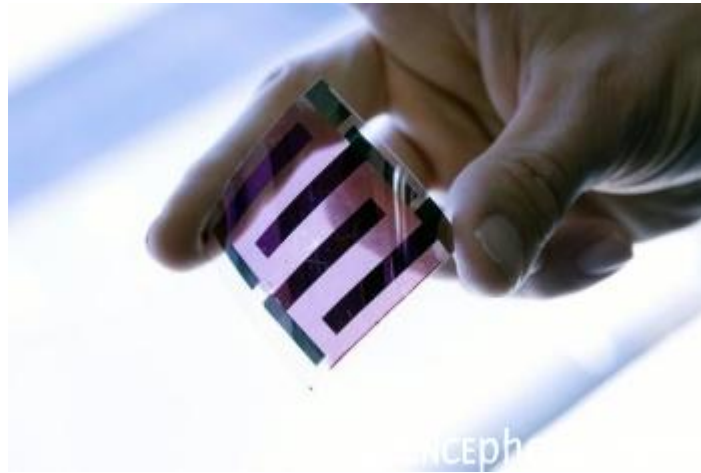
Şekil 2.2 Dünyadaki fotovoltaik hücre pazarının tarihsel gelişimi [5].

Günümüzde üretim ve tasarım maliyetleri gittikçe düşen inorganik fotovoltaiik hücreler, görüldüğü gibi dünya fotovoltaiik hücre pazarında çok büyük bir yer tutmaktadır. Ancak hala pahalı malzeme ve üretim teknikleri sebebiyle maliyetleri diğer sistemlere göre çok yüksektir. Bu sebeple daha ucuz ve daha kolay üretilebilecek fotovoltaiik sistemlere ve malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. İnorganik fotovoltaiik hücrelere bir alternatif; daha ucuz malzemelerden meydana gelen, kolay üretim tekniklerine sahip, esnek altlıklara ve geniş alanlara uygulanabilirliğe sahip organik fotovoltaiik hücrelerdir (Coakley ve McGehee, 2004).

2.4 Organik Fotovoltaiik Hücreler

Organik fotovoltaiik hücreler her ikisi de organik olan iki farklı malzemedan yapılmaktadır. İnorganik fotovoltaiik hücrelere kıyasla daha düşük verime sahip olmasına rağmen organik fotovoltaiik hücreleri cazip kılan avantajları; hafiflikleri, esneklikleri, kolay ve hızlı üretim süreçleri ve düşük maliyetleridir.

Organik fotovoltaiik hücreler ile ilgili mevcut çalışmalarda kullanılan malzemeler; iletken polimerler, boyalar, pigmentler ve sıvı kristalleri içermektedir. Bunların içerisinde en çok ilgiyi çeken iletken polimerler ve sıvı kristallerdir (Wallace vd., 2000; Brabec ve Sariciftci, 2001). Bu organik yarı iletken malzemelerin avantajları dolayısıyla elektronik malzemelerin temel yapı taşı olan inorganik yarı iletkenlerin yerine geçmesi çok muhtemel görünmektedir. Şekil 2.3 de bir organik fotovoltaiik hücre resmi görülmektedir.



Şekil 2.3 Organik Fotovoltaiik Hücre [7]

Son zamanlarda organik fotovoltaiik hücrelerde literatürde kaydedilen en yüksek verim By Yongye Liang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada (laboratuvar ortamında) %7.4 olarak ölçülmüştür (Liang vd., 2010).

İletken polimerlerin keşfi organik fotovoltaiik hücre araştırmalarına önemli bir ivme kazandırmıştır. Organik fotovoltaiik hücre çalışmalarında kullanılan malzemelerden olan iletken polimerlerle ilgili detaylı bilgi aşağıda verilmektedir.

2.4.1 İletken Polimerler

Polimerler, ilk kullanımlarından itibaren elektriksel yalıtkanlığına sahip maddeler olarak bilinmekteydiler. Bu özelliklerinden dolayı, elektriksel yalıtkanlığın gerekli olduğı yerlerde önemli kullanım alanı bulmuşlardır. Ancak 1977 yılında Alan G. MacDiarmid, Hideki Shirakawa ve Alan J. Heeger'ın çalışmalarıyla ilk iletken polimer olan poliasetilen keşfedildi. Poliasetilen filmlerin iyot, flor veya klor buharına tutularak yükseltgendiğinde, iletkenliğın 10^9 kat artarak 10^5 S/m düzeyine çıktığı gözlemlendi. Bu değıer yalıtkan karakterli teflonun iletkenlik değıerinden (10^{-18} S/m) ok yüksektir ve gümüş, bakır gibi metallerin elektrik değıerine (10^6 S/m) yakındır. Shirakawa, Hegeer ve MacDiarmid bu çalışmalarından dolayı 2000 yılı Kimya Nobel ödölünü aldılar (Erturan ve Deniz, 2006).

Günümüzde polipiröl, politiyofen, polianilin, polifuran, poli(N-vinilkarbozol) gibi çok sayıda polimerin iletken olduğı bilinmekte; bazılarının toz, film, süspansiyon veya levha şeklinde ticari üretimi yapılmaktadır. İletken polimerler, ekonomik olmaları ve ince film oluşturabilme gibi potansiyel avantajlara sahip olduklarından, her geçen gün kullanım alanları biraz daha genişlemektedir. Bunlara örnek olarak organik fotovoltaiik hücreler, alan etkili transistör (FET), fotodiyot teknolojisi, lazer teknolojisi, yarı iletken çipler, entegre devreler, sensörler, LCD monitörler, antistatik kaplama, bilgisayarların elektromanyetik perdelenmesinde ve çeşitli miktarda renkli ışıkların geçişine olanak verdiğıinden süslü camlardaki kullanımları verilebilir.

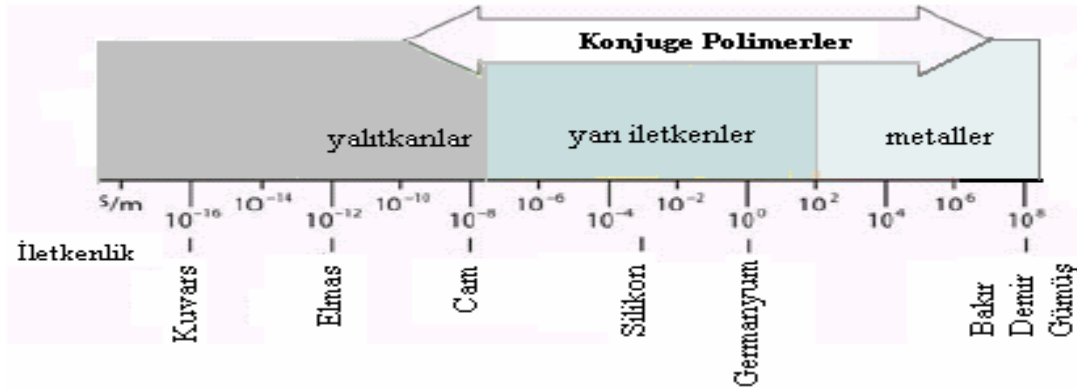
İletken polimer kavramı, yapı içindeki elektronlarla yeterli düzeyde elektriksel iletkenliğı sağılayan polimerler için kullanılır. Polimerlerin elektriksel iletkenlik gösterebilmeleri için polimer yapısında elektronların zincir boyunca taşınmasını sağılayan uygun yerlerin bulunması gerekir. Bu koşulu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



şekil 2.4 Konjuge ift bağı

Konjuge polimerler, birbirlerine, ardışık tek ve çift karbon-karbon bağıları ile bağılanmış, tekrarlanan gruplardan oluşmuş, uzun zincirli yapılardır. Tekli bağı sigma (σ) bağıdır, çift

bağın ise biri sigma (σ) bağı, diğeri ise pi (π) bağıdır. Elektronlar bu konjuge sistem üzerinde delokalize durumdadır. Ana zinciri üzerinde ard arda tek ve çift bağ sıraları içeren konjuge polimerler yarı iletkenlik gösterirler. Yarı iletkenlerde değerlik bandı ile iletkenlik bandı arasındaki enerji farkı, elektronların geçebileceği ölçüdedir (1-4 eV). Bu enerji, görünür bölgedeki ışımanın enerjisine karşı gelir, bu nedenle bu tür materyaller genellikle renklidir (Blasse ve Grabmaier, 1994). Şekil 2.5’de bazı maddelerin iletkenlik değerleri gösterilmektedir.



Şekil 2.5 Bakırdan Kuvarsa kadar olan materyaller ile iletken polimerlerin iletkenliklerinin karşılaştırılması (Koyuncu, 2008).

Sadece C atomlarından oluşan konjuge polimerler sp^2 hibridizasyonuna sahiptir. Sp^2 hibrid orbitallerinden ikisi polimer omurgasındaki sigma bağı oluşturur. Üçüncüsü hidrojen ve diğerleri arasında bağ oluşturur. Kullanılmayan 3. orbital p_z orbitali zincir boyunca geniş π sistemine sebep olur ve bu da konjuge polimerlere has bir özelliktir. Eğer bütün bağlar eşit uzunlukta olsaydı metalik malzeme olabilirdi. Fakat Peierls bükülmesine göre dimerizasyon oluşur ve bu da polimer zincirlerinin simetrisini kırar. Dimerize formda π elektronları ard arda gelen C atomları arasında konsantre olmuştur. Bu durum, zincirler boyunca çift-tek, kısa-uzun bağların gözlenmesiyle uyumludur. Simetrinin düşürülmesi, temel seviye enerjisini azaltmak için gerçekleşir. Temel seviyenin bu azalmasından dolayı π orbitali dolu HOMO (valans bandı) ve boş π^* orbitali LUMO (iletkenlik bandı) ve aradaki boşluk da bant aralığı π - π^* olarak adlandırılır ve bu da yarı iletkenlerinkine benzer bir durumdur.

Konjugasyon yüksek düzeyde iletkenlik için tek başına yeterli değildir. Konjuge polimerin elektriksel iletkenliği, yalıtkan veya yarı iletkenlik değerinden (10^{-10} - 10^{-5} S/cm), metalik iletkenlik değerine (1 - 10^4 S/cm) kadar artırılabilir. Polimerin elektriksel iletkenliğinin artırılması, katkılama olarak bilinen bir safsızlığın zincire katılması ile gerçekleşir. Yani, bir indirgenden polimere veya bir polimerden yükseltgene elektron ilavesi sonucu katkılama

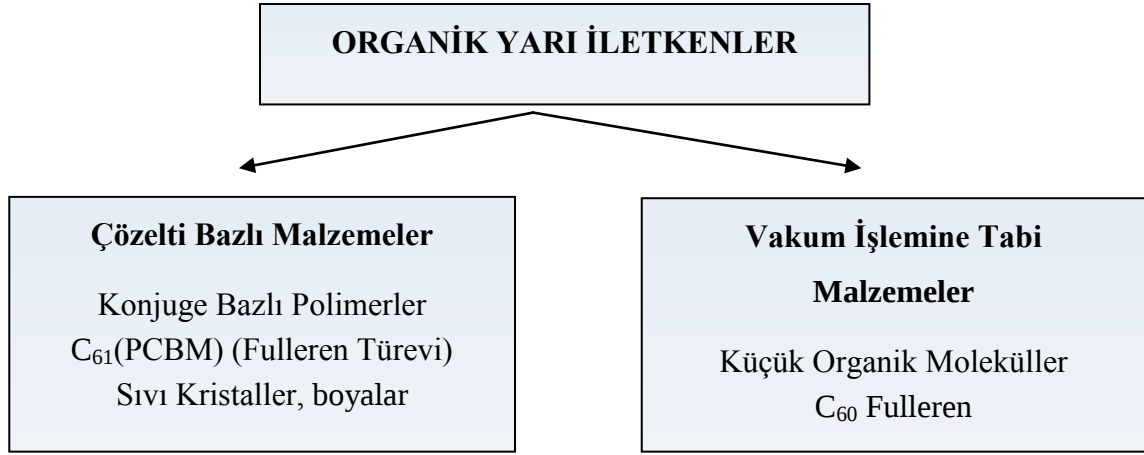
işlemi gerçekleşir (MacDiarmid ve Heeger, 1979; Kanatzidis, 1990). Konjuge polimer zinciri üzerindeki yük taşıyıcılar, ya pozitif (p tipi) ya da negatif (n tipi) olmak üzere polimerin yükseltgenip indirgenmesini sağlarlar.

Katkılama yoluyla iletkenliğin sağlanabilmesi şu şekilde açıklanabilir: Polimerlerde değerlik kabuğundaki elektronlar ya yükseltgen bir reaktif ile koparılabilir ve değerlik kabuğu pozitif hale gelir veya indirgen bir reaktif ile boş iletkenlik bandına bir elektron verilebilir. Bu işlemler, yükseltgenmeye karşılık olmak üzere “p türü katkılama”, indirgenmeye karşılık olmak üzere “n türü katkılama” olarak isimlendirilir. Katkılama işlemi sırasında katkılama moleküllerinin hiç birisi polimer atomları ile yer değiştirmez, katkılama molekülleri yalnızca elektronların enerji kabuklarından geçişlerine yardımcı olurlar. Katkılama işlemi, genellikle polimer zincirinin kimyasal yapısını değiştirmeyen, tersinir bir işlemdir.

Doğadaki tüm moleküller, kızıl ötesi bölgeden (IR), mor ötesi bölgeye (UV) kadar olan ışığın belli bir bölgesiyle etkileşim halindedirler (Rohatgi, 1978). Bant aralığı değerleri 0,5 eV’ dan 4 eV’a kadar değişen yarı iletken konjuge polimerler çoğunluğu görünür bölge ışığından etkilenir. Işık yeterli bir enerji ile molekül tarafından soğurulduğunda, bir elektron temel hal enerji bandından (HOMO) uyarılmış hal enerji bandına (LUMO) geçer.

2.4.2 Organik Fotovoltaik Hücrelerde Kullanılan Malzemeler

Organik yarı iletken malzemelerin optik ve elektronik özellikleri konjuge sisteme bağlanacak fonksiyonel gruplar ile istenilen doğrultuda değiştirilebilmektedir. Bu özellikler fotovoltaik hücre veya OLED gibi sistemin çalışması için çok önemlidir. Ancak organik yarı iletkenlerin işlenebilme gibi “mekanik” özellikleri de çok önemlidir. Örneğin, fotovoltaik hücrenin hazırlanması için buharlaştırma yöntemi kullanılacak ise yüksek vakum ve ısı gerekirken, çözelti ile hazırlama sürecinde ise oda şartlarında gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 2.6 organik yarı iletkenlerin işlenebilme ve mekanik özelliklerine göre sınıflandırılmasını göstermektedir.



Şekil 2.6 Organik yarı iletkenlerin mekanik ve işlenebilme özelliklerine göre sınıflandırılmaları

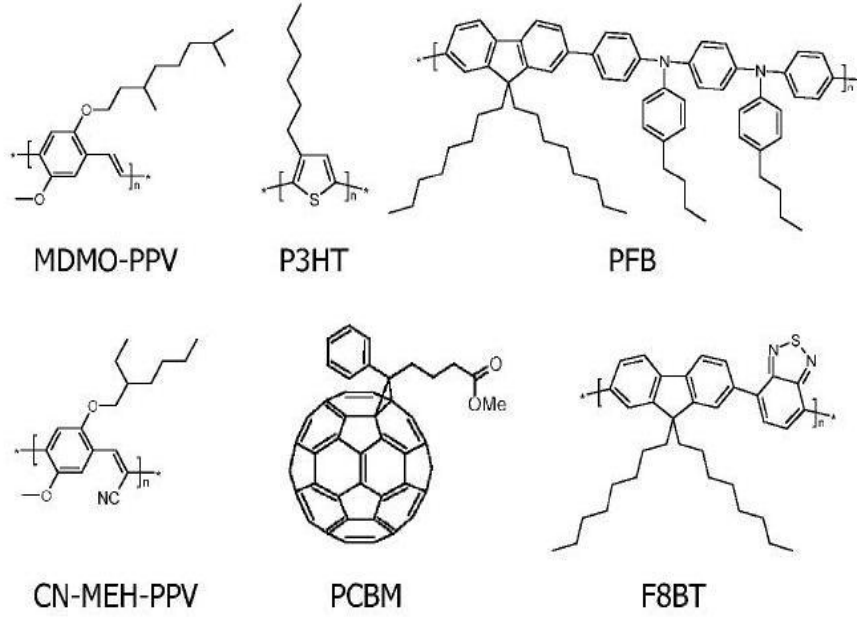
İletken polimerler, sıvı kristaller, fulleren türevi [1-(3-metoksikarbonil)propil 1-1 fenil-[6,6]-metanofulleren (PCBM) gibi malzemeler çözelti bazlı organik yarı iletkenler sınıfına girerken, küçük organik moleküller vakum işlemine tabi malzemelerdendir.

Sıvı kristal malzemelerin organik fotovoltaiik hücrelerde kullanılmaya başlaması son yıllarda olmuştur (Petritsch, 2000). Sıvı kristal malzemeler, belirli bir sıcaklık aralığında molekülleri sıvı fazdaymış gibi hareket etmekte ancak hala bir kristal malzeme gibi bir düzen içerisinde bulunmaktadır. Yan zincirler moleküle çözünürlük kazandırmak için veya çözünürlüğünü arttırmak için bağlanırlar. Yan zincirler molekülün çözünürlüğünü arttırmakla birlikte moleküllerin kümelenmesini de önlemektedirler. Düzlemsel moleküllerin moleküller arası π - π etkileşimi sebebi ile birbirlerine yapışıp çözelti içerisinde katı gibi davranma eğilimleri vardır.

Dallanmış yan zincirler veya gruplar moleküllerin birbiri ile etkileşimlerini önleyerek çözücü moleküllerinin molekülü daha rahat sarmasını ve çözünmesini sağlamaktadırlar. C₆₀, fitalosiyanin gibi bazı küçük organik moleküller genel organik çözücülerde çözünmezler ve süblimleştirilerek film oluşturabilirler. Günümüzde küçük organik malzemelerin de fonksiyonelleştirilerek çözünür hale getirilmesi başarılmıştır. İletken polimerler genellikle uygun genel organik çözücülerde çözünürler ve dönel kaplama (spin coating) yöntemiyle film oluşturabilirler.

Organik fotovoltaiik hücreler üzerindeki araştırmalar genellikle ya çözülebilir konjuge bazlı polimerler ya da küçük organik moleküler malzemeler üzerinedir (Hoppe ve Sarıçiftçi, 2004). Perilen ve türevleri akseptör (elektron alıcı) denilen, elektron ileten n tipi malzeme iken, fitalosiyanin, donör (elektron verici) denilen delik ileten p tipi malzemedir (Gunes vd., 2007). Organik fotovoltaiik hücrelerde kullanılan bazı donör ve akseptör malzemelerin kimyasal

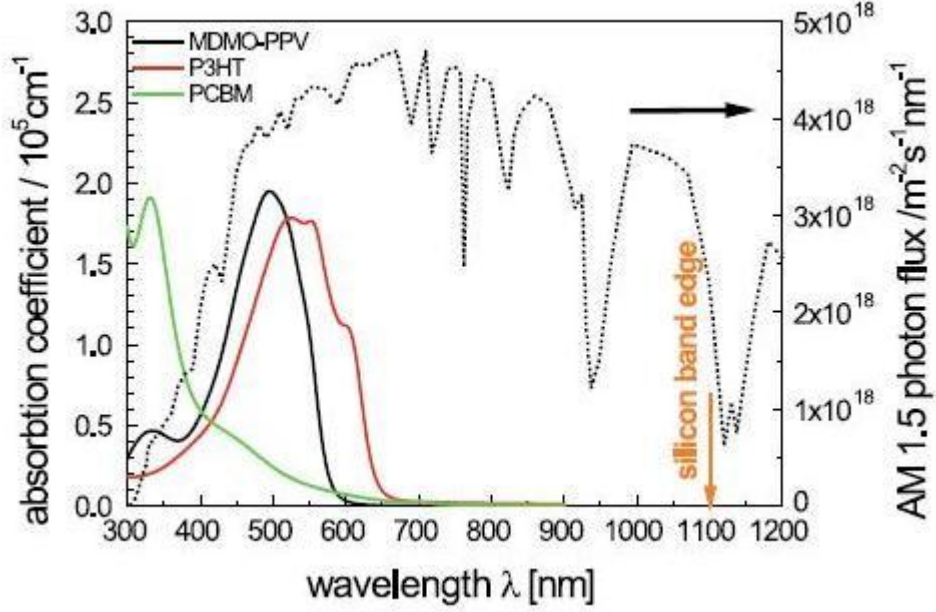
yapıları şekil 2.7’de verilmektedir.



Şekil 2.7 Organik fotovoltaiik hücrelerde kullanılan donör ve akseptör malzemeler (Hoppe, 2004).

Delik ileten donör tipli polimerlerin başlıcaları; (poli[2-metoksi-5-(3,7-dimetiloktiloksi)]-1,4-fenilviniylen) (MDMO-PPV) gibi fenilen türevleri, (poli(3-hekziltiyofen-2,5-dil) (P3HT) gibi tiyofen türevleri ve (poli (9-9'-dioktilfluoren-co-bis-N-N'-(4-butilfenil)-bis-N-N'-fenil-1,4-fenilendiamin) (PFB) gibi fluorene türevleridir (Gunes vd., 2007). Bunlar, (poli-[2-metoksi-5-(2'-etilhekziloksi)-1,4-(1-siyanovinilen)-fenilen) (CN-MEH-PPV) ve (poli(9,9'-dioktilfluoreneko-benzotiadiazol) (F8BT) gibi elektron ileten akseptör polimerlerle ve (1-(3-metoksikarbonil) propil-1-fenil [6,6]C₆₁) (PCBM) olarak adlandırılan çözünebilen C₆₀ türeviyle birlikte gösterilmektedirler (Hoppe ve Sarıçiftçi, 2004).

Donör tipli ve akseptör tipli malzemelerde enerji dönüşümüne katılan güneş ışığı kesrini gösterebilmek için, bazı malzemelerin filmlerinin soğurma katsayıları hava kütlesi (AM) 1.5 standart güneş spektrumuna kıyasla gösterilmiştir (Şekil 2.8). Silikon soğurma spektrumunun 1100 nm'ye kadar uzanmasına rağmen organik malzemeler güneş spektrumunun sadece mavi bölgesinde (UV) bulunmaktadır.



Şekil 2.8 Genel olarak kullanılan malzemelerin soğurma katsayıları ile standart hava kütlesi (Air Mass/AM) 1.5 doğal güneş spektrumunun kıyaslaması (Hoppe ve Sarıçiftçi, 2004).

2.4.3 Hazırlama Teknikleri

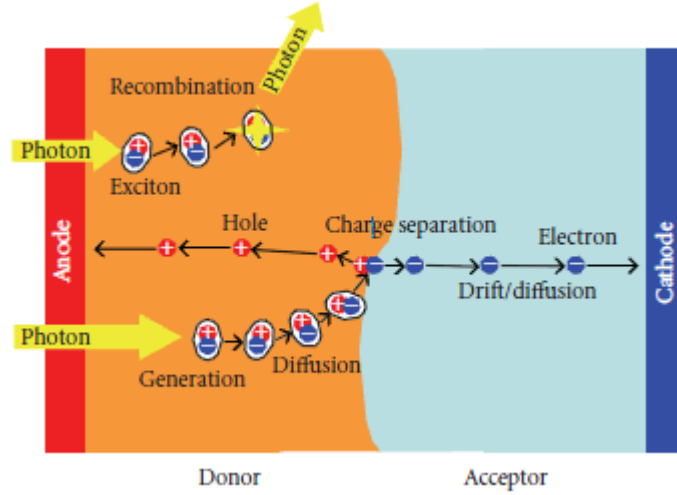
İnce film üretimi için çok kullanılan iki metot; süblimasyon ya da çözelti işlemi teknikleridir. Yarı iletken malzemenin özelliğine bağlı olarak kullanılacak metot seçilir. Termal kararlılık gösteren maddelerde süblimasyon tekniği kullanılırken, çözünabilir malzemelerde çözelti işlemi tekniği kullanılır. Küçük moleküller termal olarak polimerlerden daha stabil olmasına rağmen, daha az çözünürlüğe sahiptir. Polimerler çok yüksek sıcaklık altında ayrışır ve buharlaşma için çok büyük molar kütleye sahiptir. Bu nedenle, küçük moleküller için buharlaştırma en iyi seçimken, yarı iletken polimerler genel olarak çözeltiden işlem görmektedir. Ayrıca, C_{60} gibi çözünürlüğü az olan moleküller çözünürlüğü yüksek gruplar yardımıyla PCBM gibi daha çözünür hale getirilebilirler ve kısa polimerler veya oligomerler de buharlaştırılabilirler (Veenstra vd.,1997; Geens vd., 2002).

2.4.4 Organik Fotovoltaik Hücrelerin Temel Çalışma Prensibi

Organik fotovoltaik hücre ile ışığı elektrik enerjisine dönüştürme işlemi aşağıda tanımlanan dört adımda gerçekleşir.

1. Güneş ışığının soğurulması ile uyarılmış durumun oluşması ve eksiton (elektron-delik çifti) yaratılması,

2. Eksitonun yük ayrımının olacağı bölgeye geçişi,
3. Bu bölgede yük ayrımının oluşması,
4. Son olarak da yüklerin uygun elektrotlara (deliklerin anota ve elektronların katota) iletilmesi (Şekil 2.9) (Nunzi, 2002).



Şekil 2.9 Organik fotovoltaiik hücrelerde ışığın elektrik akımına dönüştürülme işlemi. Polimer donoru ve fulleren akseptörü içeren aktif tabaka daha net görülebilmesi için büyütülmüştür. (Kietzke, 2007)

Yüksek bir verim elde edebilmek için fotovoltaiik hücre, üzerine gelen güneş ışığının büyük kısmını soğurmalıdır (Blom vd., 2007). Organik malzemenin soğurma spektrumu, fotovoltaiik hücrenin ışığa hangi spektral aralıkta karşılık vereceğinin bir ölçüsüdür. Bu da polimerin veya molekülün kimyasal yapısına bağlıdır. Birçok boya ve molekül kuvvetli soğurucudur. Işığın elektrona dönüşümünde (foto dönüşüm) ilk önemli adım soğurma değildir. Soğurma verimliliği, malzemenin soğurma spektrumuna, kalınlığa ve aygıt yapısına bağlıdır.

Yüksek soğurma katsayısına (10^5 cm^{-1}) sahip olan konjuge polimerler maksimum soğurma spektrumlarında ışığı verimli olarak soğururlar. Eğer malzemenin bant aralığı içindeyse sadece birkaç yüz nanometre film ışığın önemli bir kısmını soğurmaya yeterlidir. Silikon bazlı fotovoltaiik hücrelerle kıyaslandığında bir indirekt geçişli yarı iletken silikonda yüzlerce mikrometre kalınlık gereklidir. Organik fotovoltaiik hücre, güneş spektrumunun çok küçük bir kısmını soğurmaktadır. Örneğin, 1.1 eV bant aralığına sahip bir malzeme hava kütlesi 1,5 olan güneş ışığının % 77 sini soğurur. Bununla birlikte yarı iletken polimerlerin büyük bir kısmının bant aralığı 1,9 eV'tan daha yüksektir. Bu da soğurma oranını %30'larla sınırlandırmaktadır (Blom vd., 2007).

Organik yarı iletkenlerde güneş ışığının soğurulmasının ardından hemen serbest yük taşıyıcıları oluşmaz. Eksiton olarak isimlendirilen birbirine bağlı elektron delik çifti oluşur. Organik yarı iletken malzeme içerisinde yük ayrımı olana kadar tek bir tür gibi hareket etmektedirler. İnorganik yarı iletkenlerle organik yarı iletkenler arasındaki başlıca farklardan biri de eksiton bağlanma enerjisidir. İnorganik yarı iletkenlerde bu bağlanma enerjisi çok küçük olduğundan normal koşullarda kendiliğinden serbest yük taşıyıcılarına ayrılabilirler (Bube, 1992). Organiklerde bunun tersi olarak eksiton bağlanma enerjisi büyüktür. Yani; inorganik fotovoltaiik hücrelerde ışık soğurulması ile serbest yük taşıyıcıları yaratılırken, polimer fotovoltaiik hücrelerde eksitonları serbest yük taşıyıcılarına dönüştürmek için ek bir mekanizmaya ihtiyaç vardır (Brabec vd., 2008).

Eksitonlar yaratıldıktan sonra kısa bir mesafeye kadar yayılabilirler. Eksiton difüzyon uzunluğu denen bu mesafe organik malzemenin yapısına göre farklılık gösterirken, genelde 10-20 nm civarındadır (Nunzi, 2002). Bu mesafe içerisinde yük ayrımı oluşmazsa eksiton yeniden birleşir ve bu enerji dışarıya ışık ya da ısı olarak verilir. Fotovoltaiik amaçlar için eksitonlar yaşam süreleri içinde (rekombine olmadan önce) birbirlerinden ayrılmalıdır. Konjuge polimerlerde oluşan eksitonların sadece %10'u serbest yük taşıyıcılarına dönüşür (Miranda vd., 2001). Eksitonların verimli ayrışabilmesi için güçlü bir elektrik alan gereklidir. Bu tip alanlar dışarıdan uygulanan bir voltajla sağlanabileceği gibi ara yüzeyler aracılığıyla da oluşturulabilir. Potansiyelin ani değiştiği bir ara yüzeyde güçlü elektrik alanlar vardır ($E = -\text{grad } U$). Foto etkili yük transferi eksitonun bu ara yüzeye yaşam süresi içinde ulaşabilmesi ile sağlanabilir. Eksiton ayrılması aynı zamanda hacimsel tuzak bölgelerinde de gerçekleşebilir. Böylece bir tuzaklanmış taşıyıcı ve bir potansiyel olarak serbest taşıyıcı oluşur.

Akımın oluşabilmesi için son aşama serbest yük taşıyıcılarının uygun elektrotlara iletilmesidir. Delikler anotta ve elektronlar katotta toplanmasıyla devre tamamlanmaktadır.

2.4.5 Aygıt Yapıları

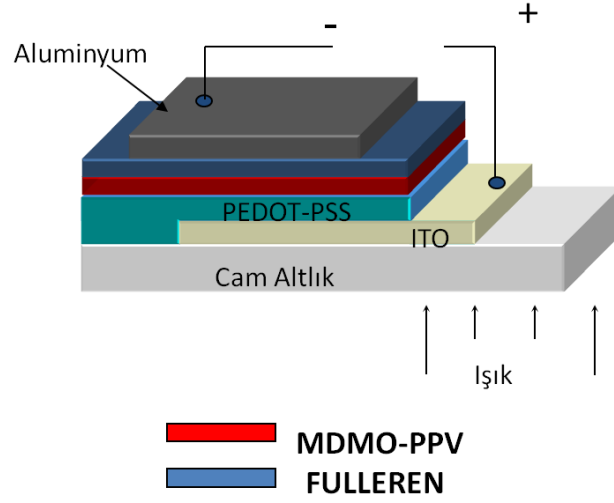
2.4.5.1 Tek Katman

İlk organik fotovoltaiik hücreler iş fonksiyonları farklı iki elektrot arasına sıkıştırılmış termal olarak buharlaştırılmış moleküler organik tek tabakadan oluşmaktadır. Bir elektrot ITO olmak üzere diğer elektrot alüminyum, altın, kalsiyum, magnezyum olabilir. Fotovoltaiik gereksinimlere göre, organik yarı iletkenlerde yaratılan eksitonlar serbest yük taşıyıcılarına dönüşmelidir.

Tek başına polimer içeren devrelerde (tek tabaka fotovoltaiik hücrelerde) eksitonları ayırmanın tek yolu elektrik alanları değerlendirmektir. Bu devrelerin doğrultucu özelliği metal-yalıtkan-metal (MIM) modeliyle (yalıtkanlar için) ya da düşük iş fonksiyonlu metal ile p tipli organik tabaka arasında Schottky bariyeri oluşumu (katkılanmış malzemeler için) ile açıklanabilmektedir (Sze, 1981). Basit metal-yalıtkan-metal (MIM) modeline göre devrede var olan yük taşıyıcılarının sayısı fazla değildir. Diğer taraftan eğer yarı iletken katkıları bant bükülmesi oluşarak metal elektrot yarı iletken ara yüzeyinde schottky kontağı oluşturabilir. Bu durumda tüm devrenin kalınlığı boyunca elektrik alan sabittir. Büyük elektrik alanlar eksitonları ayırmaya yeterli olduğundan tek konjuge polimerli devrelerde schottky devresi yük yaratılmasını arttıracaktır. Bu konuda yapılan çalışmalar tek tabaka fotovoltaiik hücrelerin veriminin kısıtlı olduğunu göstermiştir. Devre yapısı, verimde önemli rol oynamaktadır. Tek tabaka bir devrede sadece arınma bölgesine veya schottky kontağı yakın yaratılan foto uyarılmalar kısıtlı eksiton difüzyon uzunluğu nedeniyle ayrılmış yük taşıyıcıları oluşturacaktır. Böylece sadece kısıtlı bir bölge fotoakım yaratılmasına katkıda bulunur. Bu yüzden de bu devrelerin verimi oldukça düşüktür.

2.4.5.2 Çift Katmanlı Heteroeklem

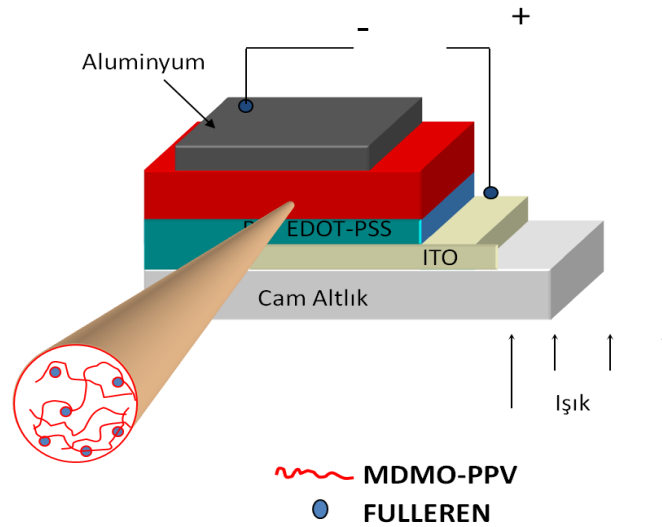
Tek tabakalarda ortaya çıkan serbest yük taşıyıcıları yaratılması kısıtlılığını ortadan kaldırmak için donör-akseptör yaklaşımı önerilmiştir. İki katlı devre, bir donör (p tipi yarı iletken) ve bir de akseptör (n tipi yarı iletken) malzemeyi üst üste sıkıştırarak oluşturulabilir. Donör ve akseptör arasındaki etkileşim geometrik ara yüzeyde gerçekleşir. Bu ara yüzeyde yük ayrılması oluşur (Tang, 1986; Pettersson vd., 1999; Rostalski ve Meissner, 2000; Peumans vd., 2003a). Böyle organik yarı iletken kullanılan iki katlı devrelerin çoğu, farklı malzeme birleşiminden oluşturulurlar. (Tang, 1986; Halls vd., 1995). Bu devrelerde sadece ara yüzeye 10-20 nanometre uzaklıkta olan eksitonlar heteroeklem ara yüzeye ulaşabilirler. Bu da çoğu soğurulmuş fotonun ara yüzeye ulaşmadan kaybına sebep olur ve düşük kuantum verimiyle sonuçlanır (Winder ve Sarıciiftci, 2004). İki katlı fotovoltaiik hücrelerin verimi; donör akseptör ara yüzeye eksiton difüzyon uzunluğu (10-20 nm) kadar yakın bölgedeki yük oluşumuyla sınırlı kalır. Şekil 2.10'da iki katlı heteroeklem devre tipi şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.10 Çift katlı heteroeklem fotovoltaik hücrelerin devre şeması

2.4.5.3 Hacim Heteroeklemi

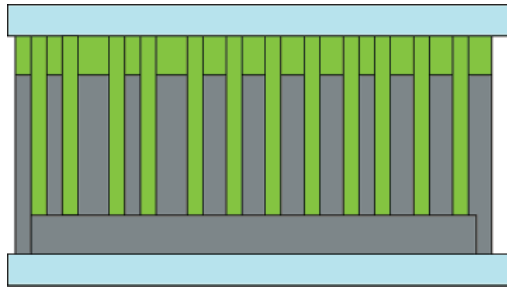
Hacim heteroeklemi; donör ve akseptör bileşenlerinin bir hacimde karışımıdır. Bu yöntemde donör ve akseptör malzemeleri nanometre ölçeğinde iç içe nüfuz eden bir ağ oluşturmak üzere karıştırılırlar. Böylece donör-akseptör ara yüzeyi tüm hacim içerisine dağılmıştır ve bu ara yüzeyler eksiton difüzyon uzunluğundan daha kısa uzaklığa düşmektedirler. Böylece oluşan elektron delik çiftinin rekombine olmadan donör akseptör ara yüzeyine ulaşma olasılığı artmaktadır. Bu aygıt yapısı filmde yaratılmış eksitonların neredeyse tümünün serbest yük taşıyıcılarına ayrılmaları sağlanabilmektedir (Coakley ve McGehee, 2004). Şekil 2.11’de hacim heteroeklem devre tipi şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.11 Hacim heteroeklemine dayalı fotovoltaik hücrelerin devre şeması

Donor ve akseptör arasındaki faz ayrımı dolayısıyla morfolojiyi kontrol ederek iç içe nüfuz eden ağ oluşturması sağlanırsa hacimsel malzemenin içinde çok sayıda ara yüzeyel bölge elde edilir. Hacim heteroeklemi donor ve akseptör fazı arasındaki ara yüzeyi artırır ve bu fotovoltaiik hücrelerin verimini geliştirmeye olanak sağlamıştır. İki katlı heteroeklemlerde, donor ve akseptör fazı birbirinden tamamen ayrıyken, hacim heteroekleminde iki faz birbirine karışmıştır. Bu karışım içinde ayrılmış yüklerin iç alanları için tercih edilmiş yönler yoktur, elektron ve delikler hareket etmeleri gereken yönleri kendileri yaratır (Hoppe ve Sarıçiftçi, 2004). Bu yüzden hacim heteroeklemlerde bir simetri kırma şartı (farklı iş fonksiyonlu elektrotlar gibi) gereklidir. Aksi takdirde sürükleyici kuvvet olarak sadece konsantrasyon gradyenti etki edebilir. Üstelik ayrılmış yükler, elektron ve delikleri kontaklara taşıma evresi için ayrılmış yollara gereksinim duyarlar. Böylece hacim heteroeklemi diğer bir deyişle donor ve akseptör fazları sürekli ve iç içe geçmiş ağ oluşturmak durumundadır (Hoppe, 2004). Bu yüzden hacim heteroeklem devreleri nano ölçekli morfolojiye daha duyarlıdır.

Hacim heteroeklem fotovoltaiik hücrelerin ideal yapısı şekil 2.12'deki gibi olmalıdır. Akseptör ve donor fazları arasında; eksiton difüzyon uzunluğuna eşit ya da daha kısa (10-20 nm) bir aralık olmalıdır (Gunes vd., 2007). Genel olarak, hacim heteroeklemleri donor ve akseptör pigmentlerinin birlikte buharlaştırılmasıyla (Hiramoto vd., 1991; Geens vd., 2002; Peumans vd., 2003b) ya da polimer/polimer (Yu ve Heeger, 1995; Tada vd., 1997), polimer/molekül (Yu vd., 1995; Yang vd., 1996; Dittmer, 2000a; 2000b) ya da molekül/molekül (Petritsch vd., 2000; Mende vd., 2001) donor akseptör karışımlarından çözelti bazlı kaplama yaparak elde edilebilir.

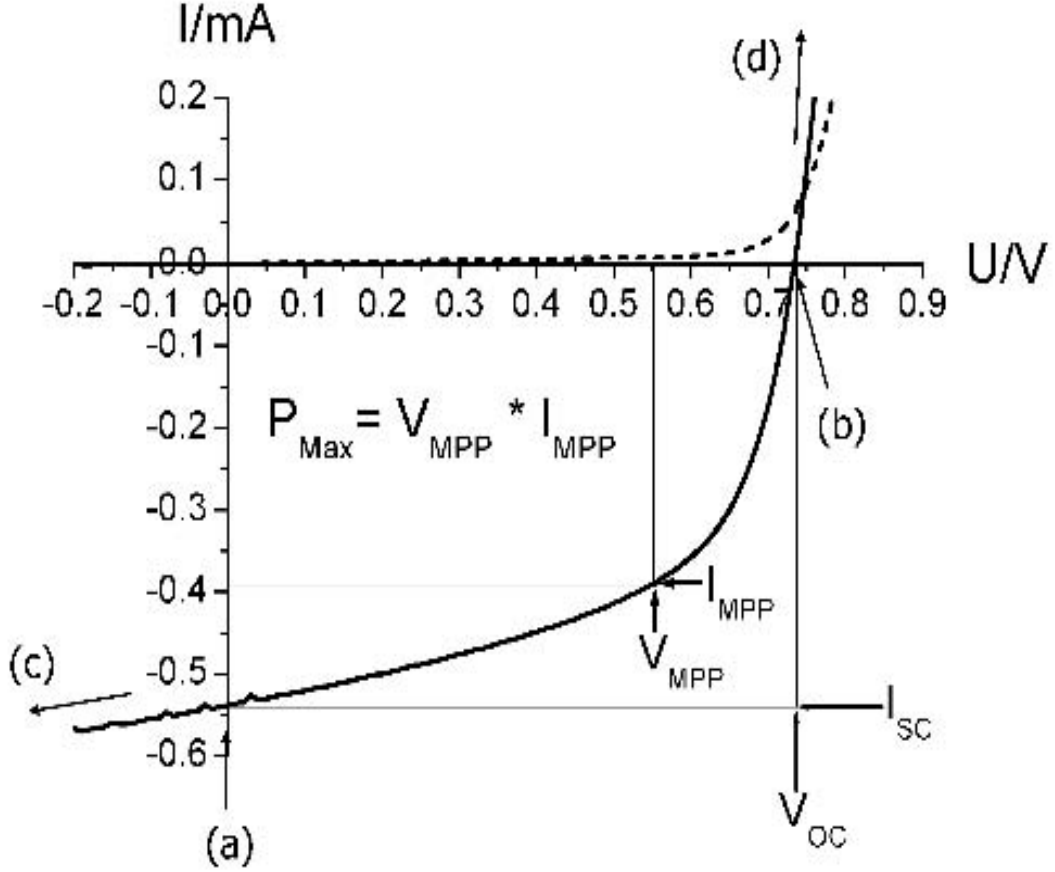


Şekil 2.12 Hacim Heteroeklem Fotovoltaiik Hücresinin İdeal Yapısı (Gunes vd., 2007)

2.4.6 Fotovoltaiik Hücre Karakterizasyonu

Şekil 2.13'te bir fotovoltaiik hücresinin karanlıkta ve aydınlıkta akım-voltaj (I-V) karakteristiği gösterilmektedir. Açık devre geriliminden daha büyük voltajlar için ileri yönde kutuplamada kontaklar şiddetle enjekte edene kadar karanlıkta neredeyse hiç akım yoktur. Işık altında ise akım; enjekte edilen akımın tersi yönde akar. (a) noktasında kısa devre koşulları altında

yaratılan maksimum fotoakım akar, (b) noktasında foto etkili akım sıfıra dengelenmiştir (düz bant koşulları). (a) noktası ve (b) noktası arasında x-y koordinat düzleminin 4. bölgesinde devre güç (akım*voltaj) üretir. Maksimum güç noktası (MPP) ile gösterilen belli bir noktada, akım ve gerilimin çarpımı ve dolayısıyla güç çıkışı en büyüktür (Gunes vd., 2007).



Şekil 2.13 Bir fotovoltaik hücrenin akım-voltaj grafiği (I-V eğrisi). Kesik çizgiler karanlıkta, düz çizgi ise aydınlıktaki karakteristiği göstermektedir.

Karanlık ve aydınlıktaki karakteristiklerin x eksenine ile kesiştikleri noktalar açık devre gerilimini (V_{oc}) ve y eksenine ile kesiştikleri noktalar ise kısa devre akımını (I_{sc}) göstermektedir. Maksimum güç çıkışı eğrideki akım ve voltajın çarpımının maksimum olduğu noktada elde edilmektedir. Bu maksimum gücün açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımı (I_{sc}) çarpımına bölümü ise dolgu faktörünü (Fill Factor-FF) verir.

$$FF = \frac{I_{MPP} * V_{MPP}}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (2.1)$$

Bir fotovoltaik hücrenin verimini belirlemek için maksimum güç gelen ışık şiddetiyle kıyaslanmalıdır. Güç dönüşüm verimi;

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{I_{MPP} * V_{MPP}}{P_{in}} = \frac{FF * I_{sc} * V_{oc}}{P_{in}} \quad (2.2)$$

V_{oc} = Açık devre gerilimi

I_{sc} = Kısa devre akımı

FF = Dolgu faktörü

V_{MPP} = Maksimum gerilim

I_{MPP} = Maksimum akım

P_{in} = Gelen ışık şiddeti

Gelen Işık Şiddeti (P_{in}): Hava kütlesi 1,5 olarak adlandırılan 48,2° açı ile dünyanın yüzeyine gelen güneş ışığı ile eşleşen 1000 W/m² olarak standartlaştırılmıştır.

Hava Kütlesi (Air Mass - AM) : Dünyanın her yerinde üretilen ve karakterize edilen fotovoltaiik hücrelerin karşılaştırılabilmesi için ölçümlerin tümü standart test şartlarında yapılmalıdır. Bu şartlara göre sıcaklık 25 °C, ölçüm alınan ışığın şiddeti 1000 W/m² ve spektral dağılımı 1,5 AM olmalıdır. Burada hava kütlesi (AM) güneş ışınlarının, güneş Zenit konumuna θ° konumunda iken, atmosferde aldığı yolun, ışınların Zenit konumunda iken atmosferde aldığı yola oranıdır. 1,5 AM hava kütlesi spektral dağılımı, standart test şartı olarak belirlenmiştir ve güneş ışınları $\theta=48^\circ$ açıyla gelirken sahip oldukları spektral güç dağılımıdır.

2.4.7 Fotovoltaiik Hücre Veriminde Önemli Parametreler

2.4.7.1 Açık Devre Gerilimi (V_{oc})

Açık devre gerilimi; metal-yalıtkan-metal (MIM) modeline göre, iki metal kontağının iş fonksiyonlarının farkına göre belirlenir (Peumans vd., 2003a). Buna karşın p-n kavşağında elde edilebilecek maksimum gerilim iki yük taşıyıcısının yarı fermi seviyesinin farkına göre yani p katkılı yarı iletken enerji seviyesi ve n katkılı yarı iletken enerji seviyesi farkına göre belirlenir. Organik fotovoltaiik hücrelerde açık devre gerilimi, p tipli yarı iletkenin en yüksek işgal edilen moleküler orbital seviyesi (HOMO) ve n tipli yarı iletkenin işgal edilmemiş en düşük moleküler orbital seviyesine (LUMO) lineer olarak bağımlıdır (Brabec vd., 2001; Scharber vd., 2006). Sonuç olarak açık devre gerilimi, kullanılan metallerin enerji seviyelerine ve onların ara yüzeylerine ait hassas bir fonksiyondur. Güneş ışığı altında fotovoltaiik hücreden hiç akım geçmediği andaki gerilim olarak da tanımlanır (Gunes vd., 2007).

2.4.7.2 Kısa Devre Akımı (I_{sc})

Kısa devre akımı, ışık altında dış direnç olmadan fotovoltaiik hücreden elde edilen akımdır. Kısa-devre akımı fotovoltaiik hücrenin üretebileceği en yüksek akım değeridir. Bu akım ışıının bir fonksiyonudur. Kısa devre akımı yoğunluğu ise (J_{sc}), kısa devre akımının, foto aktif yüzey alanına bölümüdür.

Kısa devre akımı (I_{sc}), organik yarı iletkendeki uyarılmış yük taşıyıcı yoğunluğu ve yük taşıyıcı mobilitelerinin çarpımıyla doğru orantılıdır.

$$I_{sc} = ne\mu E \quad (2.3)$$

Burada n yük taşıyıcı yoğunluğu; e temel yük; μ mobiliteler ve E elektrik alandır. Hacim heteroeklemi karışımında foto etkili yük oluşumunun %100 verimle olduğu varsayılırsa; n buradaki birim hacim başına soğurulan foton sayısıdır (Gunes vd., 2007).

Kısa devre akımı aynı zamanda yük taşıyıcı mobilitelerine de bağlıdır. Organik yarı iletkenler genellikle düşük mobilitelere sahiptirler. Bu doğrudan organik fotovoltaiik devrenin aktif tabakasının kalınlığını sınırlar. Belli bir kalınlığın ötesinde, rekombine olmadan önce yük taşıyıcıları elektrotlara ulaşamayacaktır. Dolayısıyla, yüksek mobiliteli/düşük bant aralıklı malzemeler kısa devre akımının iyileştirilmesi için genel bir yoldur (Hoppe ve Sarıçiftçi, 2004).

2.4.7.3 Dolgu Faktörü (Fill Factor-FF)

Dolgu faktörü, fotovoltaiik hücrenin bir güç kaynağı olarak kalitesinin bir ölçüsüdür ve maksimum gücün, açık devre gerilimi ile kısa devre akımı çarpımına oranıdır. Dolgu faktörü; elektrik alanın açık devre gerilimine doğru azalmaya başladığında, yük taşıyıcılarının elektrotlara ulaşması ile tanımlanır. Aslında yük taşıyıcı rekombinasyonu ve taşınması arasında bir rekabet vardır. Ömür (τ) ve mobiliteler (μ)'nin çarpımı yük taşıyıcılarının belli bir E elektrik alanı altında sürüklenebileceği mesafe d 'yi belirler.

$$d = \mu \times \tau \times E \quad (2.4)$$

Büyük dolgu faktörleri elde etmek için $\mu \times \tau$ maksimum olmalıdır. d yaklaşık olarak kısa devre koşulları altında aktif tabaka kalınlığına eşit olursa çıkarılan fotoakım uygulanan elektrik akıma güçlü bir bağımlılık gösterir ve dolayısıyla daha düşük dolgu faktörüne neden olur. Diğer yandan, büyük $\mu \times \tau$ çarpımı daha fazla soğurma dolayısıyla da dolgu faktörü toplam güç dönüşüm verimini sınırlayana kadar I_{sc} elde etmek için aktif tabaka kalınlığının

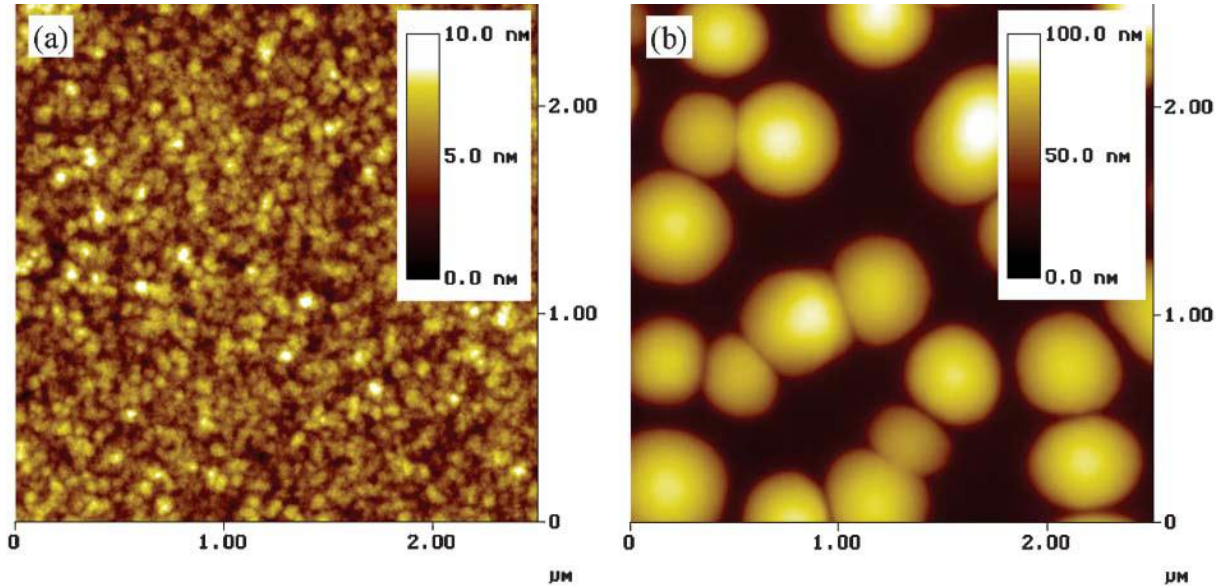
arttırılmasına olanak sağlar. Seri direnç de dolgu faktörünü önemli ölçüde etkiler (Gunes vd., 2007). Örneğin, ITO altlıkların sonlu iletkenliğinden dolayı gözlenen aktif alan üzerinde dolgu faktörüne bağımlılık gösterir. Bununla baş etmek için yüksek iletkenlikli yarı geçirgen altlıklar geliştirilmelidir. Paralel shunt dirençlerini maksimize etmek için kısa devrelerden arınmış olmalıdır.

Sonuç olarak, verimi belirleyen faktörler arasında etkileşme bulunmaktadır ve birlikte çözülmelidir (Hoppe ve Sarıçiftçi, 2004).

2.4.7.4 Nanomorfoloji

Hacim heteroeklemi yöntemi, biri donör (genellikle konjuge polimer), diğeri akseptör olan iki organik malzemeden oluşur. Donör ve akseptör malzemeler arasında ideal bir elektronik ilişki olmalıdır. Donör ve akseptör malzemeler ideal elektronik ilişkiye sahip olsa bile (enerji seviyeleri birbirine uysa bile) hacim heteroeklemlili fotovoltaiik hücrenin performansı donör ve akseptör bileşenlerinin fiziksel etkileşimine bağılıdır. Bunu da morfoloji belirler. Aktif tabakanın morfolojisi, polimer ve fulleren özelliklerine bağılıdır. Örneğin iki bileşenin karışabilirliğine, devre üretimiyle ilgili etkilere, çözücü türüne, polimer fulleren konsantrasyonuna, kaplama tekniğine ve termal tavlamaya bağılıdır (Barrau vd., 2009).

Konjuge polimerler ve fulleren türevleri içeren organik fotovoltaiik hücrelerin güç dönüşüm verimi moleküler morfolojiden etkilenir. Uygun çözücü seçiminin, verimi önemli ölçüde arttırdığı literatürde gösterilmiştir (Hoppe ve Sariciftci, 2006). Polimer zincirlerinin konformasyonu, organik çözücünün seçimi, polimer çözücünün konsantrasyonu ve dönel kaplama işleminin dönme hızına bağılıdır. Şekil 2.14'de çözücünün morfolojiye olan etkisine bir örnek gösterilmektedir.



Şekil 2.14 AFM ile yüzeyi taranmış MDMO:PPV/PCBM (1:4) oranı için (a) klorobenzen içerisindeki yüzey görüntüsü, (b) toluen içerisindeki yüzey görüntüsü (Hoppe, 2004)

Şekil 2.14’de MDMO-PPV: PCBM (1:4) oranında, klorobenzende ve toluende dönel kaplama yöntemi kullanılarak hazırlanmış iki örnek için yüzey resimleri görülmektedir. Tarama boyutu her iki film içinde 2,5 µm.’dir. Toluenli film klorobenzene kıyasla 10 kat fazla yükseklik skalasına sahiptir. Resimlerden de anlaşılacağı üzere toluende hazırlanmış örneğin yüzeyinde faz ayrımları gözlenirken, klorobenzende hazırlanan örnekte ise daha homojen bir yapı görülmektedir. Sonuçta oluşan morfoloji hem malzeme hem de devre karakteristiklerini önemli ölçüde etkiler (Liu vd., 2001).

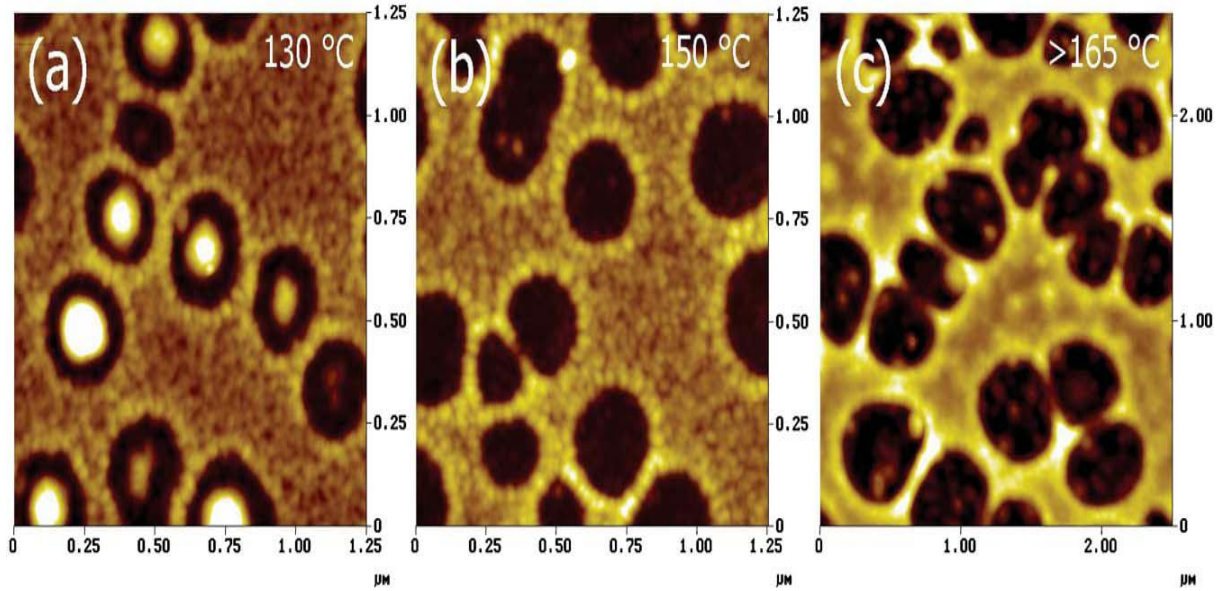
Kısa devre akımı ve açık devre gerilimi polimer işlem koşullarına oldukça bağlıdır. Aromatik olmayan çözücüler, aromatik çözücülerin kullanıldığı duruma göre daha düşük akıma neden olabilirler. Sonuçların farklı olmasının sebebi, farklı çözücülerin farklı polimer morfolojisi oluşturmaya yol açmasıdır. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), geçirmeli elektron mikroskobu (TEM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) yüzey morfolojisini karakterize etmede en sık kullanılan yöntemlerdir. Yapılan çalışmalarda, farklı PCBM konsantrasyonlarının faz ayrımına yol açtığı gözlenmiştir. Örneğin PCBM konsantrasyonu %50’den %67’ye ve daha üzerine çıkarıldığında, nano ölçekli faz ayrımı gözlenmiştir (VanDuren vd., 2004).

Sıcaklık işlemi uygulanması da morfolojiyi değiştirebilir (VanBavel vd., 2009). Organik fotovoltaiik hücrelerde kullanılan polimerler içerisinde PPV’den başka kullanılan en önemli polimerlerden bir tanesi poli(3-hekziltiyofen-2, 5-dil (P3HT)’dir. Bu malzeme kullanılarak oluşturulan fotovoltaiik hücrelerde yüksek verim elde etmenin bir yolu, fotovoltaiik hücreler

hazırlandıktan sonra sıcaklık işlemi uygulanmasıdır (VanBavel vd., 2009). Sıcaklık uygulandığında organik tabakaların morfolojisi değişecektir. Bu da serbest hacmin azalması ve çözücü buharlaşması sırasında, ara yüzeydeki kusur yoğunluğunun azalması ve zincirler arası etkileşimin güçlendirilmesiyle sağlanabilir.

Sıcaklık işlemi uygulanmasının kristallliği arttırdığı gözlenmiştir (VanBavel vd., 2009). Ayrıca sıcaklık işlemi uygulanmasıyla polimer filmdeki oksijen içeriği azaltılabilir. Literatürde farklı sıcaklık değerleri bulunmasına karşın en sık kullanılanı 110 °C’de 10 dakikadır. Ayrıca sıcaklık işlemi fotoiletkenliği artırır. Bu işlemler sırasında oluşabilecek faz ayrımının derecesi ve uzunluğunun polimer fotovoltaiik hücrelerin performansına etkisi mevcuttur. Faz ayrımı için kritik uzunluk eksiton difüzyon uzunluğudur.

Şekil 2.15’de sıcaklığın morfolojiye etkisine bir örnek görülmektedir.



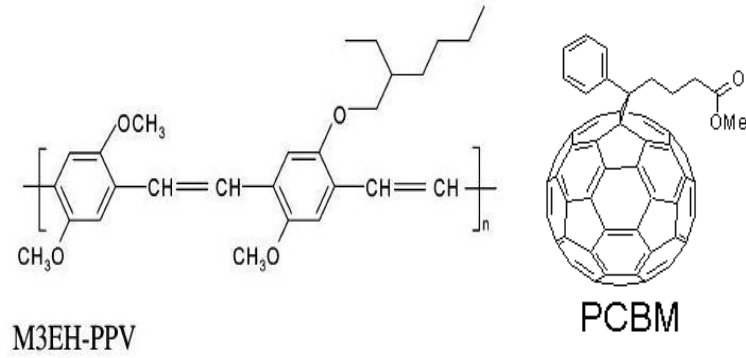
Şekil 2.15 MDMO-PPV:PCBM 1 : 4 oranında toluende hazırlanmış filmin tapping moddaki AFM’le alınan görüntüsü a)130 °C b)150°C c)165° C sıcaklık uygulanmıştır. (Hoppe vd., 2004)

Şekil 2.15’de MDMO:PPV (1:4) oranında toluen içerisinde hazırlanmış fotovoltaiik hücrenin farklı sıcaklık değerlerindeki yüzey görüntüsü gösterilmektedir. Yüzey görüntü resimleri Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanılarak, tapping modda alınmıştır. Resimlerden de görüldüğü üzere 150°C’ye kadar nano boyuttaki topaklanmalar gözlenebilirken 165°C’den sonra gözlenmemiştir (Hoppe ve Sariciftci, 2006).

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Kullanılan Malzemeler

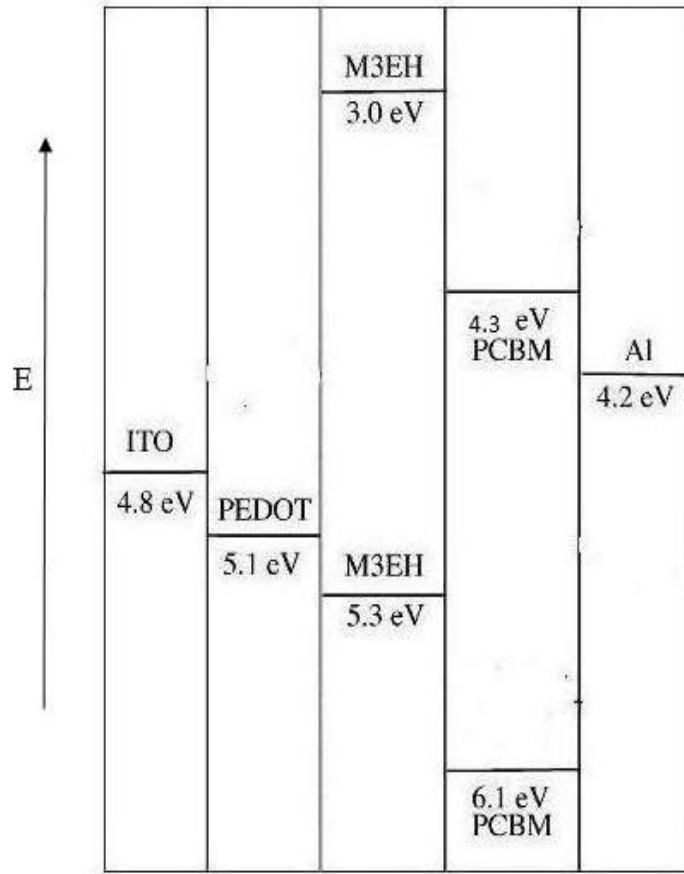
Bu tez çalışmasında aktif malzeme olarak poli [2,5-dimetoksi-1, 4-fenilen - 1,2-etinilen-2-metoksi-5-(2-etiloksi)-(1,4 fenilen-1,2 etilen)] (M3EH-PPV) ve [1-(3-metoksikarbonil)propil 1-1 fenil-[6,6]-metanofulleren] (PCBM) kullanılmıştır. Bu iki malzemenin kimyasal yapıları şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 M3EH-PPV ve PCBM’in kimyasal yapıları

M3EH-PPV; donor (elektron veren) bir konjuge polimerdir. Bu polimer 500 nm’de $2,3 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$ yüksek soğurma katsayısına sahip olmasıyla güneş spektrumunun 400-600 nm arasını soğuran, delik ileten malzemedir (Pfeiffer ve Horhold, 1999). M3EH-PPV’nin HOMO-LUMO enerji seviyeleri sırasıyla 5,3 eV ve 3,0 eV’tur. Eksiton difüzyon uzunluğu diğer PPV’lere benzer olarak 10 nm olduğu tahmin edilmektedir (Savenije vd., 1998).

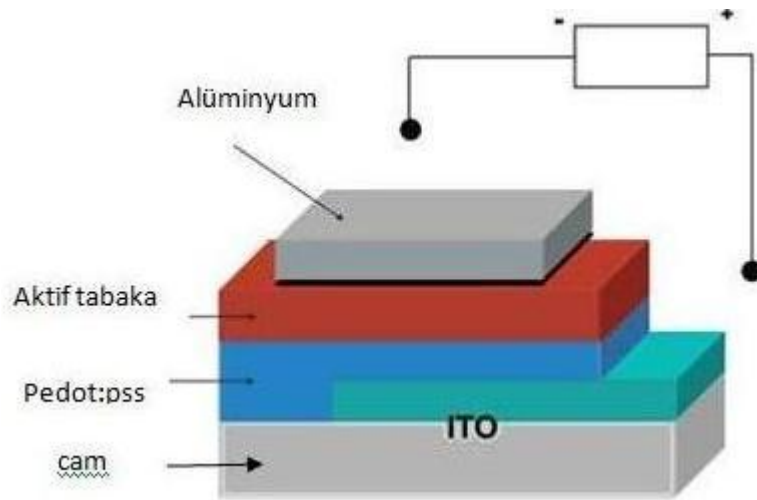
PCBM gibi fullerene türevleri, iletken polimerlerle kombinasyonlarında yaratılan elektronları çok hızlı iletirler (Kraabel vd., 1994). PCBM iyi elektron mobilitesine sahip olup ($10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$), iyi bir akseptördür (Yokoyama, 1998). Donörün HOMO seviyesi ile akseptörün LUMO enerji seviyesi arasındaki fark, yük transferinde önemlidir ve V_{oc} ile orantılıdır (Brabec vd., 2008).



Şekil 3.2 Organik fotovoltaiik hücrede kullanılan malzemelerin enerji diyagramları (Chasteen vd., 2008; Park vd., 2009)

3.2 Organik Fotovoltaiik Hücrelerin Hazırlanması

Bu çalışmada, M3EH-PPV polimeri donör (p tipli) malzeme, PCBM de akseptör (n tipli) malzeme olarak kullanıldı. Elektrot olarak ise ITO ve alüminyum kullanıldı. Şekil 3.3 yaptığımız organik güneş fotovoltaiik hücrelerin şematik yapısını göstermektedir.



Şekil 3.3 Organik fotovoltaiik hücre şematik yapısı

3.2.1 Altlıkların Hazırlanması

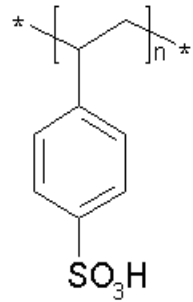
Ticari olarak satın alınan bir yüzü indiyum tin oksit (ITO) kaplı camlar $1,5 \times 1,5 \text{ cm}^2$ boyutlarında kesildi. Kesilen camların bir kısmı asit çözeltisi hazırlanarak çözme (etching) işlemine tabi tutuldu. Asit işleminden sonra ITO kaplı camlar sırasıyla aseton, isopropanol ve destile su ile ultrasonik banyoda (Şekil 3.4) yıkanıp temizlenerek azot tabancası vasıtasıyla kurulandı.



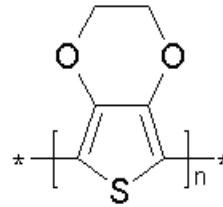
Şekil 3.4 Altlıkların temizleme işleminde kullanılan ultrasonik banyo cihazı

3.2.2 Pedot:PSS Kaplanması

Camlar kurutulduktan sonra kimyasal yapısı şekil 3.5'te gösterilen polistren-sulfonik asit katkılanmış poly(etilen-dioksitiyofen) PEDOT:PSS, altlıklara ince film şeklinde dönel kaplama (spin coating) yöntemi ile kaplanıp açık havada kurumaya bırakıldı. Şekil 3.6 'da spin coater cihazı görülmektedir.



PSS



PEDOT

Şekil 3.5 PEDOT:PSS'in kimyasal yapısı

Pedot:PSS malzemesi fotovoltaik hücrede elektrotların elektriksel özelliklerinin düzenlenmesini sağlar ve aynı zamanda pürüzlü bir yapıya sahip olan ITO yüzey pürüzlülüğünün azaltılmasında kullanılır.



Şekil 3.6 İnce film kaplamak için kullanılan dönel kaplama (spin coating) cihazı

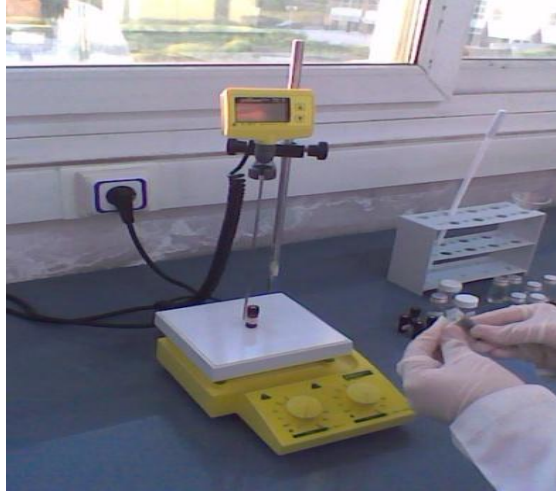
3.2.3 M3EH-PPV/PCBM Çözeltilerinin Hazırlanması ve Film Kaplanması

M3EH-PPV ve PCBM çizelge 3.1’de gösterilen miktar ve oranlarda karıştırıldı. Çizelgede görüldüğü gibi M3EH-PPV oranı sabit tutulup, düzenli olarak PCBM oranı arttırıldı. Çözücü olarak klorobenzen (1 mL) kullanıldı. Daha sonra aynı oran ve miktarlarda M3EH-PPV ve PCBM karıştırılarak çözücü değiştirildi. Klorobenzenden sonra sırasıyla kloroform ve toluen çözücüleri kullanılarak çözeltiler hazırlandı.

Çizelge 3.1 Aktif tabakada kullanılan M3EH-PPV/ PCBM oranları

M3EH-PPV(mg)	PCBM (mg)	ORAN
6	6	1:1
6	12	1:2
6	18	1:3
6	24	1:4

Malzemelerin birbirleriyle tamamen karışması için örnekler manyetik karıştırıcıda (Şekil 3.7) bir gün bekletildi. Hazırlanan çözeltiler PEDOT:PSS kaplı ITO altlıklar üzerine yine dönel kaplama yöntemi kullanılarak kaplandı.



Şekil 3.7 Manyetik karıştırıcı

3.2.4 Metal Buharlaştırması

Son aşama olarak Vaksis firmasından alınan termal metal buharlaştırma sistemi (Şekil 3.8) kullanılarak 100 nm alüminyum elektrot buharlaştırıldı. Buharlaştırma 10^{-5} mbar basınç altında yapıldı.



Şekil 3.8 Metal buharlaştırma aleti

3.2.5 Fotovoltaik Hücre Karakterizasyonu

Bütün fotovoltaik hücreler Şekil 3.9’da gösterilen ve güneş ışığını simüle eden solar simülatör altında karakterize edilerek, akım gerilim eğrileri Keithley 2400 (Şekil 3.9) cihazı ile kaydedildi.



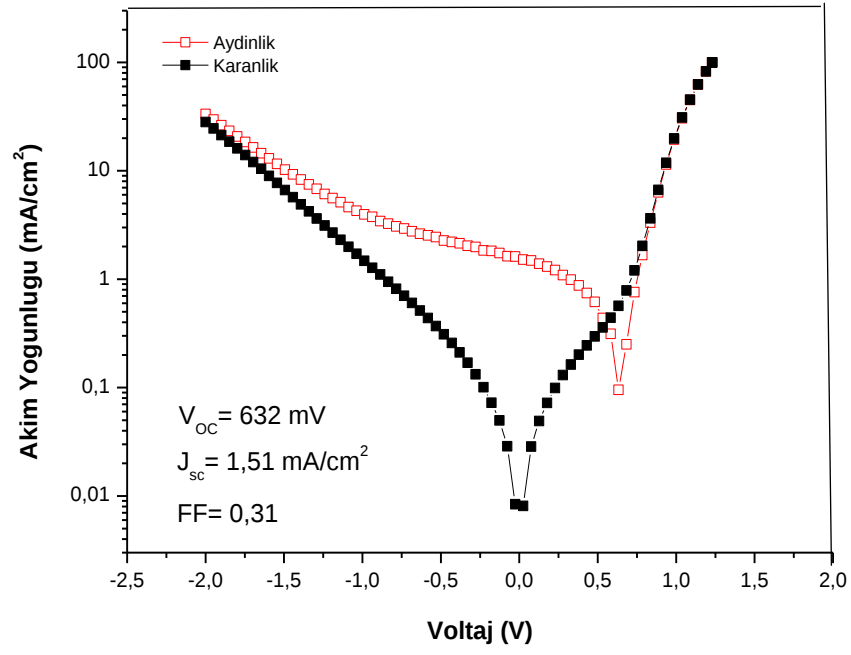
Şekil 3.9 Akım-gerilim karakterizasyonu için keithley 2400 ve solar simülatör cihazı

3.3 Deneysel Sonuçlar

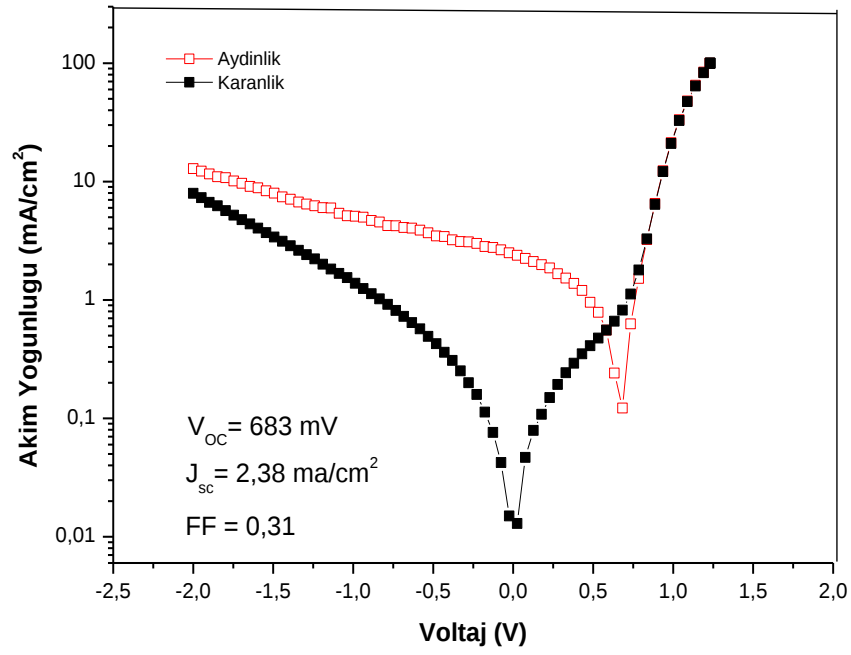
3.3.1 Klorobenzen Çözücüsü Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar

3.3.1.1 Akım-Gerilim Karakterizasyonu

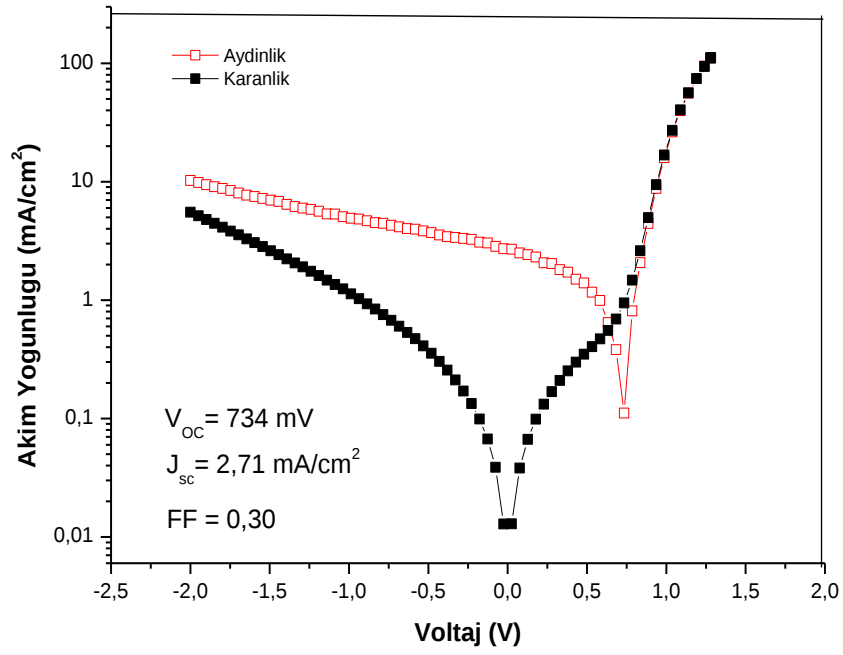
Fotovoltaik hücreler güneş ışığını simüle eden solar simülatör altında hava kütlesi 1.5, 100 mW/cm^2 şiddet değerinde, güneş ışığı ITO yüzey tarafından gelecek şekilde karakterize edilmiştir. ITO/PEDOT:PSS/M3EH-PPV:PCBM/Al konfigürasyonuna göre hazırlanan fotovoltaik hücrelerde aktif tabakayı oluşturan M3EH-PPV:PCBM çözeltisi 1:1, 1:2, 1:3 ve 1:4 oranlarında klorobenzen (cb) içerisinde hazırlanmıştır. 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 oranlarında hazırlanan örneklerin aydınlık ve karanlık, akım-gerilim eğrileri Şekil 3.10'da gösterilmiştir. M3EH-PPV:PCBM karışımı kullanılarak hazırlanan örneklerde 1:1 oranı için, akım yoğunluğu $J_{sc}=1,51 \text{ mA/cm}^2$, açık devre gerilimi $V_{oc}=632 \text{ mV}$ ve dolgu faktörü $FF=0.31$ olarak bulunmuştur (Şekil 3.10 (a)).



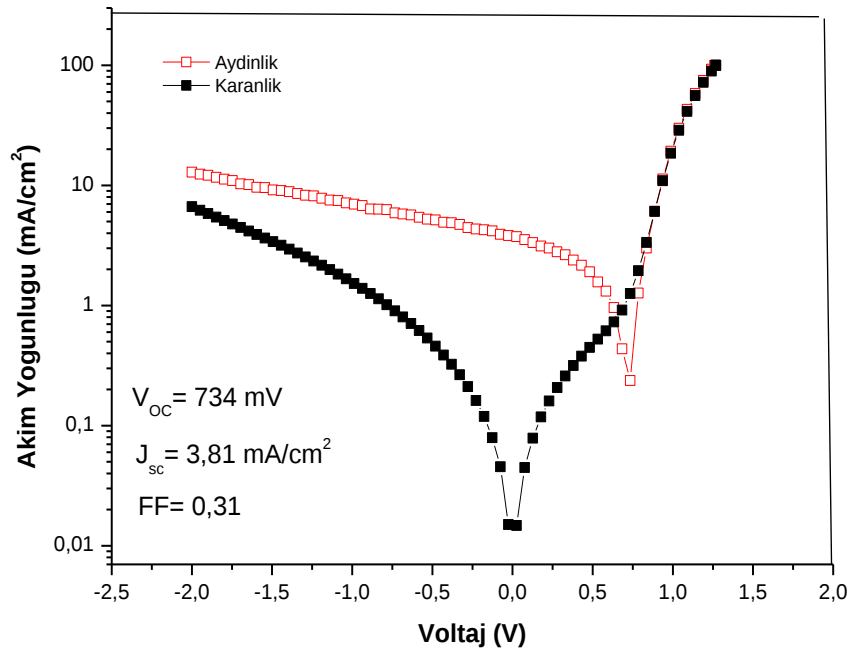
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.10 Klorobenzen çözücüsü içerisinde hazırlanmış, farklı aktif tabaka (M3EH-PPV:PCBM) konsantrasyonlarının akım-gerilim karakteristiklerine etkisi (a) 1:1 (b) 1:2 (c) 1:3 (d) 1:4

Şekil 3.10 (b)'de gösterilen 1:2 oranında hazırlanmış örnek için akım yoğunluğu $J_{sc}=2,38$ mA/cm², açık devre gerilimi $V_{oc}=683$ mV olarak ölçülmüş ve dolgu faktörü $FF=0,31$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.10 (c)'de gösterilen 1:3 oranında hazırlanmış örnek için akım yoğunluğu $J_{sc}=2,71$ mA/cm², açık devre gerilimi $V_{oc}=734$ mV olarak ölçülmüş ve dolgu faktörü $FF=0,30$ olarak hesaplanmıştır. Son olarak, şekil 3.10 (d)'de gösterilen 1:4 oranında hazırlanmış örnek için ise akım yoğunluğu $J_{sc}=3,81$ mA/cm², açık devre gerilimi $V_{oc}=734$ mV olarak ölçülmüş ve dolgu faktörü $FF=0,31$ olarak hesaplanmıştır.

Aşağıdaki çizelge akım-gerilim karakteristiklerinden elde edilen parametreleri ve verim değerlerini göstermektedir.

Çizelge 3.2 Klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan farklı aktif tabaka konsantrasyonlarının verime etkileri

Oran	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF	Verim (%)
1:1	1.51	632	0.31	0.3
1:2	2.38	683	0.31	0.5
1:3	2.71	734	0.3	0.6
1:4	3.81	734	0.31	0.9

Çizelgeden de görüldüğü gibi, en yüksek verim, M3EH-PPV ve PCBM'in 1:4 oranında karıştırılmasıyla elde edilmiştir. V_{oc} 'nin teorik değerleri Scharber vd. tarafından aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

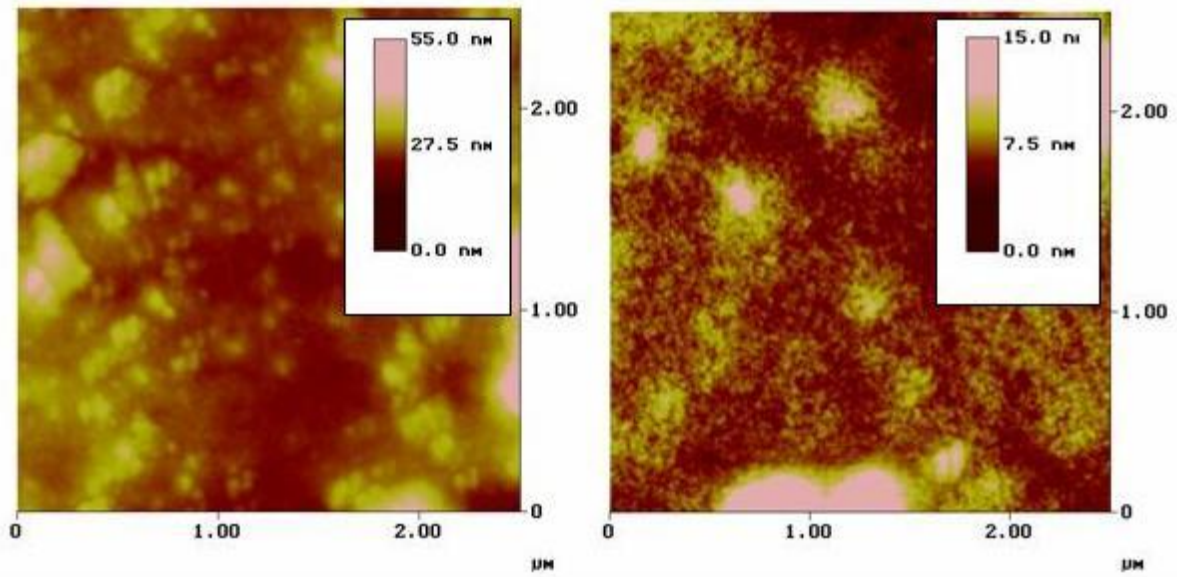
$$eV_{oc} = \frac{J_{sc}}{J_0} - 0.3 \quad (3.1)$$

0.3 değeri deneysel bir değer olmasına rağmen yukarıdaki formülden bu tezde kullanılan M3EH-PPV ve PCBM aktif tabakasından hazırlanan fotovoltaiik hücrelerin teorik V_{oc} değeri 0.7 V olarak hesaplanmıştır. Yapılan deneylerde elde edilen maksimum 0.734 V'luk V_{oc} değeri teorik limite yaklaşıldığını ve verim kayıplarının akım kayıplarından kaynaklanabileceğine işaret etmektedir.

Akım kayıplarını incelemek için aktif tabakanın morfolojisi araştırılmıştır.

3.3.1.2 Film Morfolojisi

Fotovoltaik performansın, filmlerin morfolojisi ile olan bağlantısını inceleyebilmek için AFM görüntüleri alınmıştır. AFM, sıvı ya da katı örneklerin yüzey topografisini nanometre (nm) seviyesinde görüntüleyebilen ve moleküller arası kuvvetleri (nN, pN) ölçebilen bir sistemdir. AFM görüntülerindeki yüzey pürüzlülüğü fotovoltaik hücre performansını etkilemektedir. Şekil 3.11, klorobenzende dönel kaplama yöntemi ile hazırlanmış M3EH-PPV: PCBM filmlerin arasından en kötü ve en iyi performansa sahip fotovoltaik hücrelerin AFM resimlerini göstermektedir.



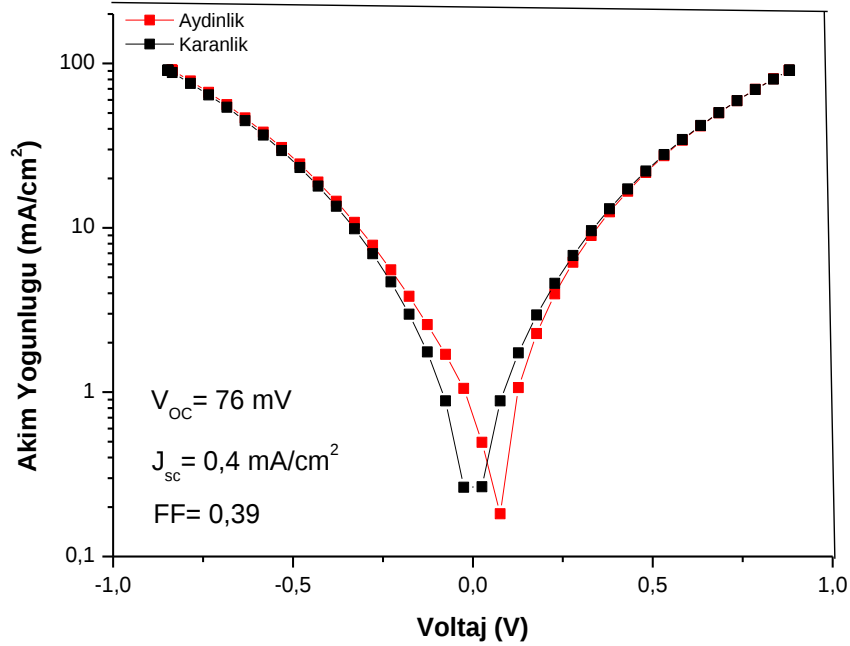
Şekil 3.11 Klorobenzende hazırlanmış M3EH-PPV: PCBM filmlerin AFM resimleri (a) 1:1, (b) 1:4 karışım oranları

Yükseklik skalası olarak adlandırılan veriye yüzey pürüzlülüğünün ölçüsünü gösteren bir parametre olarak bakılabilir. Şekil 3.11’de görüldüğü gibi, yükseklik skalası değerinden okunan büyüklüklere göre, M3EH-PPV: PCBM filmlerinin arasında (b)’deki 1:4 oranında hazırlanmış film, (a)’daki 1:1 oranında hazırlanmış filmden daha pürüzsüzdür. 1:4 oranında hazırlanan fotovoltaik hücrenin performansı da, yüzey görüntüleriyle uyumlu olup daha yüksek güç dönüşüm verimine sahiptir ve şekil 3.11(b) daha homojen bir yapıya sahipken şekil 3.11(a)’da öbekenme ve kümelenmeler gözlenmektedir. Bu kümelenmelerin içerisinde hangi fazların olduğunu anlamak için AFM elverişli bir metod değildir, daha hassas cihazlarla detaylı ölçümler yapılmalıdır.

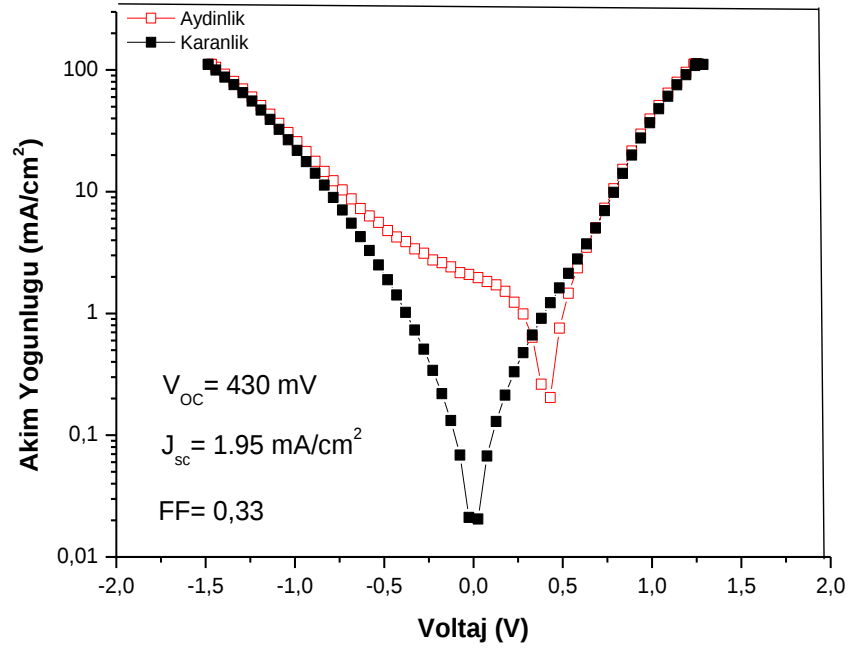
3.3.2 Toluen Çözücüsü Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar

3.3.2.1 Akım-Gerilim Karakterizasyonu

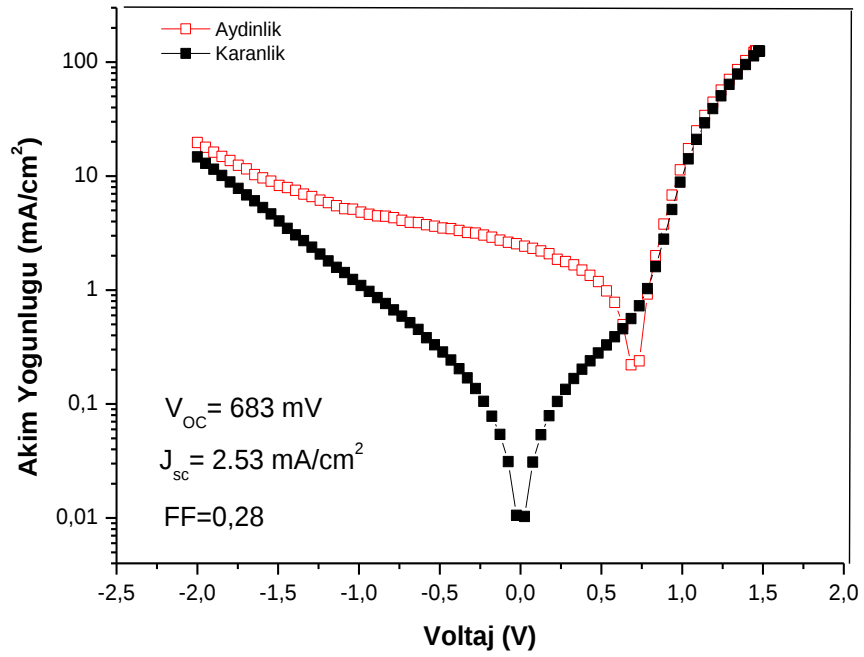
ITO/PEDOT:PSS/M3EH-PPV:PCBM/Al konfigürasyonuna göre hazırlanan fotovoltaiik hücrelerde aktif tabakayı oluşturan M3EH-PPV:PCBM çözeltisi 1:1, 1:2, 1:3 ve 1:4 oranlarında farklı bir organik çözücü olan toluen (tl) içerisinde hazırlanmıştır. 1:1 oranı için, akım yoğunluğu $J_{sc}=0.40 \text{ mA/cm}^2$, açık devre gerilimi $V_{oc}=76 \text{ mV}$ ve dolgu faktörü $FF=0,39$ olarak bulunmuştur (Şekil 3.12 (a)). Şekil 3.12 (b)'de gösterilen 1:2 oranında hazırlanmış örnek için akım yoğunluğu $J_{sc}=1,95 \text{ mA/cm}^2$, açık devre gerilimi $V_{oc}=430 \text{ mV}$ olarak ölçülmüş ve dolgu faktörü $FF=0,33$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.12 (c)'de gösterilen 1:3 oranında hazırlanmış örnek için akım yoğunluğu $J_{sc}=2,53 \text{ mA/cm}^2$, açık devre gerilimi $V_{oc}=683 \text{ mV}$ olarak ölçülmüş ve dolgu faktörü $FF=0,28$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.12 (d)'de gösterilen 1:4 oranında hazırlanmış örnek için akım yoğunluğu $J_{sc}=1,43 \text{ mA/cm}^2$, açık devre gerilimi $V_{oc}=734 \text{ mV}$ olarak ölçülmüş ve dolgu faktörü $FF=0.33$ olarak hesaplanmıştır.



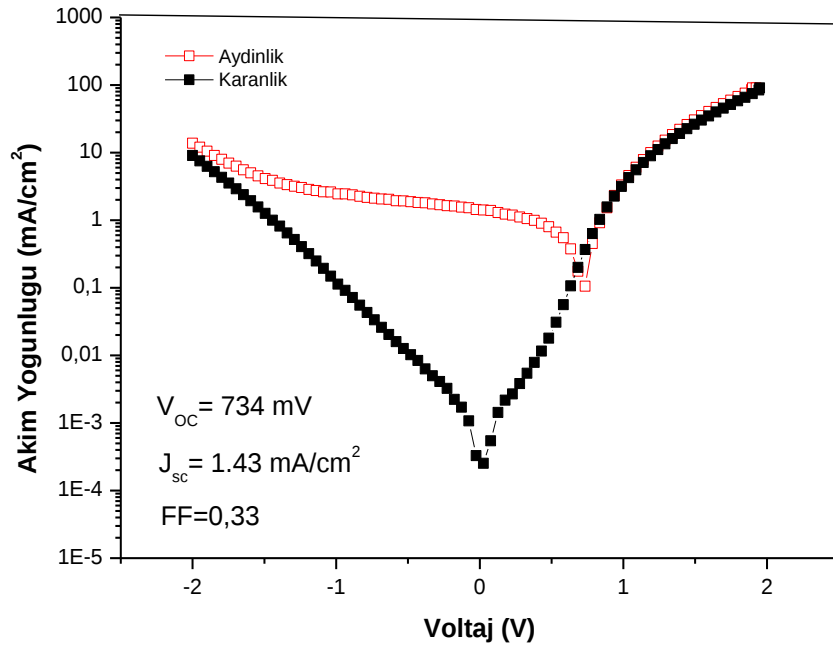
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.12 Toluen çözücüsü içerisinde hazırlanmış, farklı aktif tabaka (M3EH-PPV:PCBM) konsantrasyonlarının akım-gerilim karakteristiklerine etkisi (a) 1:1 (b) 1:2 (c) 1:3 (d) 1:4

Aşağıdaki çizelge akım-gerilim karakteristiklerinden elde edilen parametreleri ve verim değerlerini göstermektedir.

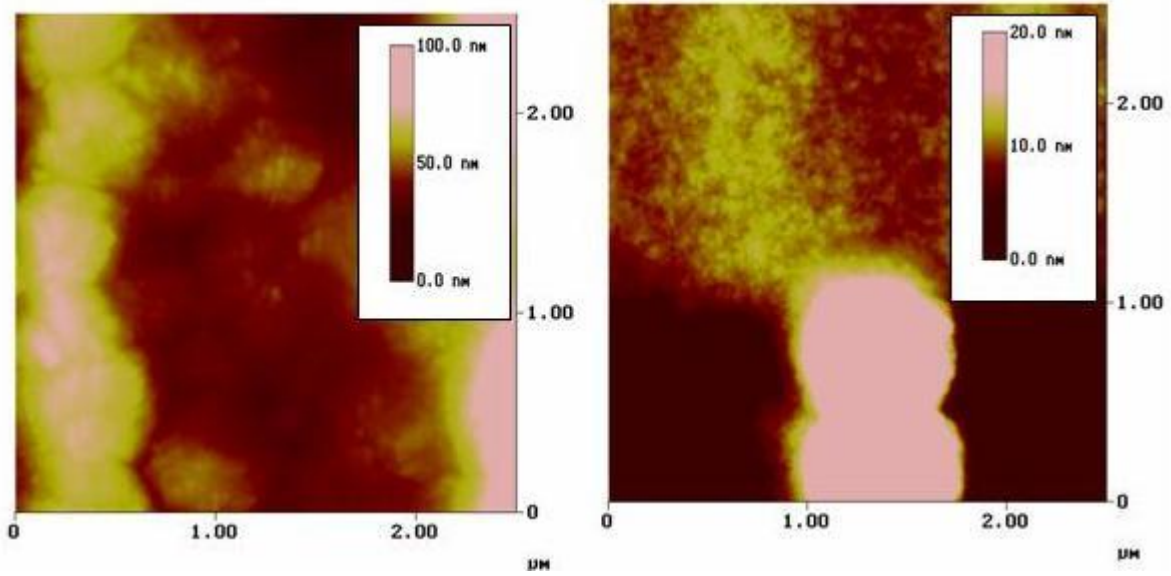
Çizelge 3.3 Toluen çözücüsü kullanılarak hazırlanan farklı aktif tabaka konsantrasyonlarının verime etkileri

Oran	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF	Verim (%)
1:1	0.4	76	0.39	0.01
1:2	1.95	430	0.33	0.3
1:3	2.53	683	0.28	0.5
1:4	1.43	734	0.33	0.35

Çizelge 3.3'den görüldüğü gibi en iyi verim 1:3 oranında hazırlanan aktif tabaka konsantrasyonunda elde edilmiştir. Verimdeki farklılıkları anlamak üzere morfolojik incelemeler yapılmıştır.

3.3.2.2 Film Morfolojisi

Fotovoltaik performansın, filmlerin morfolojisi ile olan bağlantısını inceleyebilmek için AFM görüntüleri alınmıştır. Şekil 3.13, toluende dönel kaplama yöntemi ile hazırlanmış M3EH-PPV:PCBM filmlerin arasından en kötü ve en iyi performansa sahip fotovoltaik hücrelerin AFM resimlerini göstermektedir.



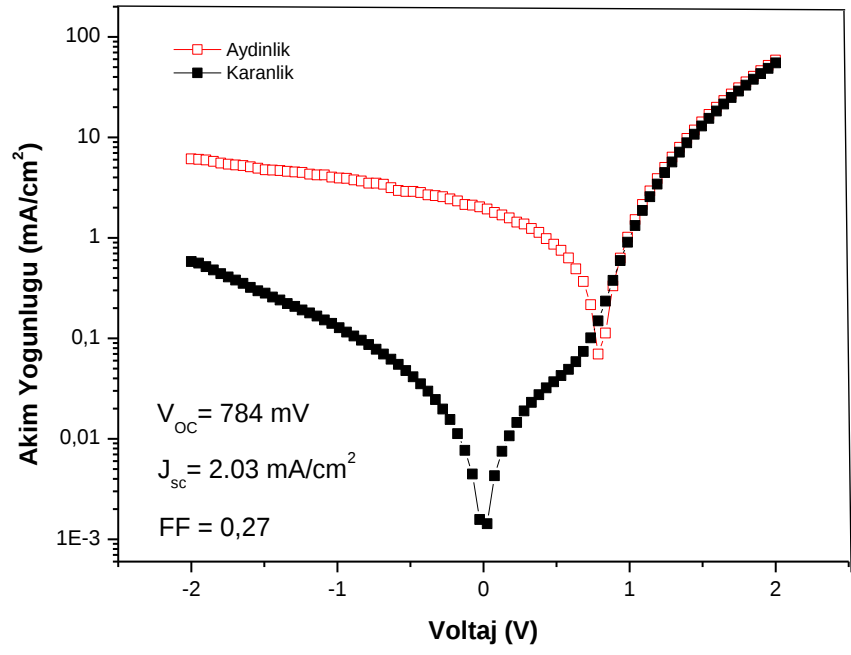
Şekil 3.13 Toluende hazırlanmış M3EH-PPV:PCBM filmlerin AFM resimleri (a) 1:1, (b) 1:3 karışım oranları

Şekil 3.13’de görüldüğü gibi, yükseklik skalası değerinden okunan büyüklüklere göre, M3EH-PPV:PCBM filmlerinin arasında (b)’deki 1:3 oranında hazırlanmış film, (a)’daki 1:1 oranında hazırlanmış filmde daha pürüzsüzdür. 1:3 oranında hazırlanan fotovoltaik hücrenin performansı da, yüzey görüntüleriyle uyumlu olup daha yüksek güç dönüşüm verimine sahiptir. Ayrıca, 1:1 oranında hazırlanan filmlerde yine öbeklenme ve kümelenmeler gözlenmiştir.

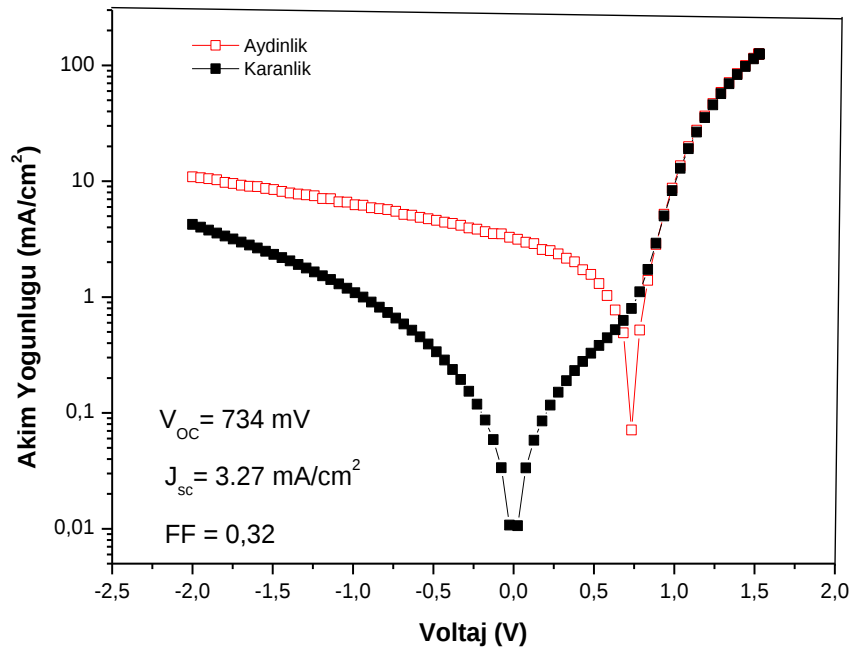
3.3.3 Kloroform Çözücüsü Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar

3.3.3.1 Akım-Gerilim Karakterizasyonu

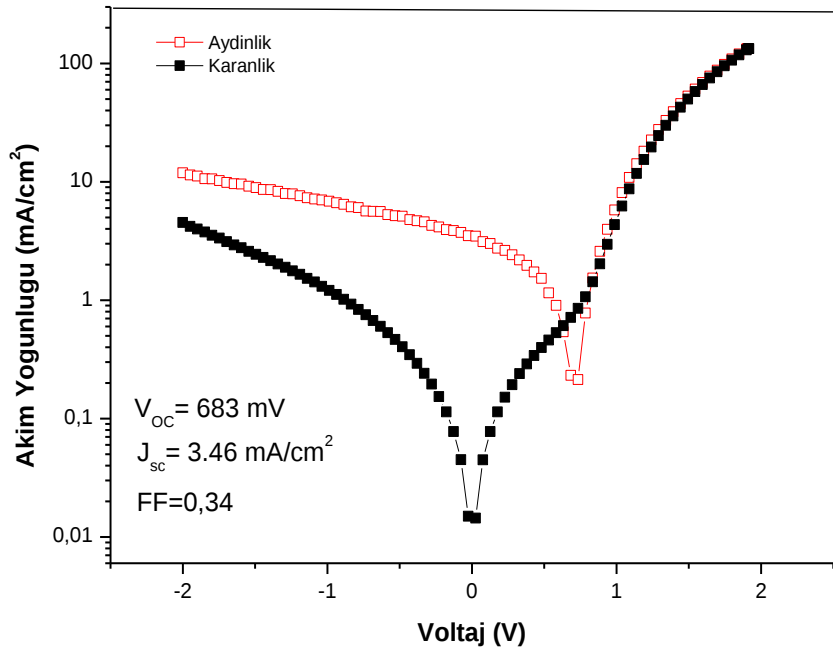
ITO/PEDOT:PSS/M3EH-PPV:PCBM/Al konfigürasyonuna göre hazırlanan fotovoltaik hücrelerin aktif tabakayı oluşturan M3EH-PPV:PCBM çözeltisi 1:1, 1:2, 1:3 ve 1:4 oranlarında kloroform (cf) çözücü içerisinde hazırlanmıştır. 1:1 oranı için, akım yoğunluğu $J_{sc}=2,03 \text{ mA/cm}^2$, açık devre gerilimi $V_{oc}=784 \text{ mV}$ olarak ölçülmüş ve dolgu faktörü $FF=0,27$ olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.14 (a)).



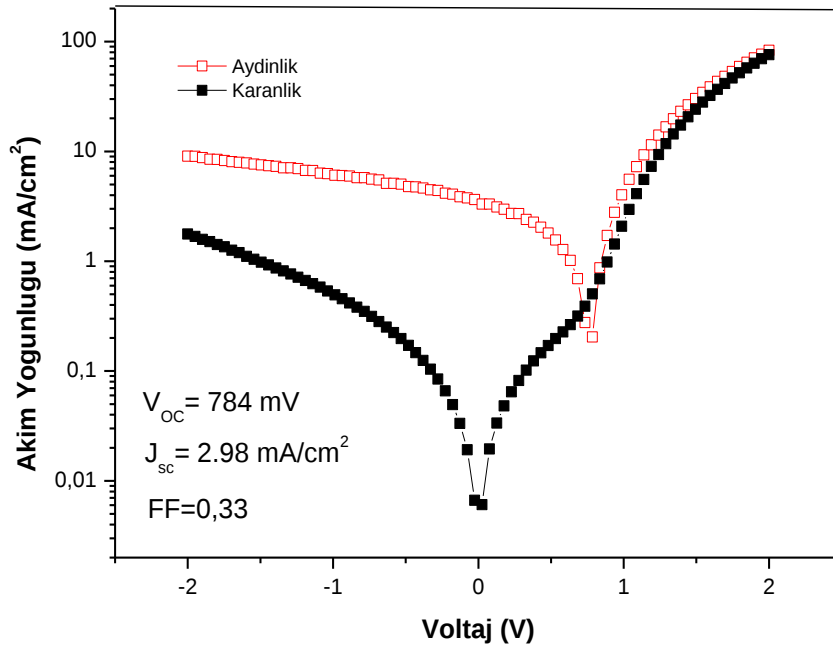
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.14 Kloroform çözücüsü içerisinde hazırlanmış, farklı aktif tabaka (M3EH-PPV:PCBM) konsantrasyonlarının akım-gerilim karakteristiklerine etkisi (a) 1:1 (b) 1:2 (c) 1:3 (d) 1:4

Şekil 3.14 (b)'de gösterilen 1:2 oranında hazırlanmış örnek için akım yoğunluğu $J_{sc}=3,27$ mA/cm², açık devre gerilimi $V_{oc}=734$ mV olarak ölçülmüş ve dolgu faktörü $FF=0,32$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.14 (c)'de gösterilen 1:3 oranında hazırlanmış örnek için akım yoğunluğu $J_{sc}=3,46$ mA/cm², açık devre gerilimi $V_{oc}=683$ mV olarak ölçülmüş ve dolgu faktörü $FF=0,34$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.14 (d)'de gösterilen 1:4 oranında hazırlanmış örnek için akım yoğunluğu $J_{sc}=2,98$ mA/cm², açık devre gerilimi $V_{oc}=784$ mV olarak ölçülmüş ve dolgu faktörü $FF=0,33$ olarak hesaplanmıştır.

Aşağıdaki çizelge akım-gerilim karakteristiklerinden elde edilen parametreleri ve verim değerlerini göstermektedir.

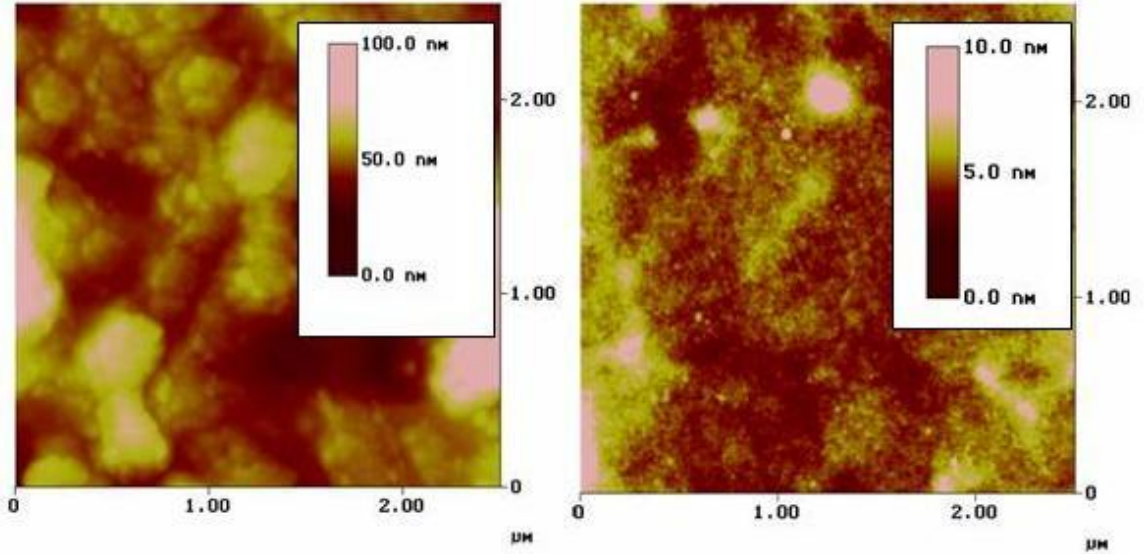
Çizelge 3.4 Kloroform çözücüsü kullanılarak hazırlanan farklı aktif tabaka konsantrasyonlarının verime etkileri

Oran	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF	Verim (%)
1:1	2.03	784	0.27	0.4
1:2	3.27	734	0.32	0.8
1:3	3.46	683	0.34	0.8
1:4	2.98	784	0.33	0.8

Çizelge 3.4'den görüldüğü gibi 1:2, 1:3 ve 1:4 oranında hazırlanan aktif tabaka konsantrasyonunda benzer verimler elde edilmiştir. Verimdeki farklılıkları anlamak üzere morfolojik incelemeler yapılmıştır.

3.3.3.2 Film Morfolojisi

Fotovoltaik performansın, filmlerin morfolojisi ile olan bağlantısını inceleyebilmek için AFM görüntüleri alınmıştır. Şekil 3.15, kloroformda dönel kaplama yöntemi ile hazırlanmış M3EH-PPV: PCBM filmlerin arasından en kötü ve en iyi performansa sahip fotovoltaik hücrelerin AFM resimlerini göstermektedir.

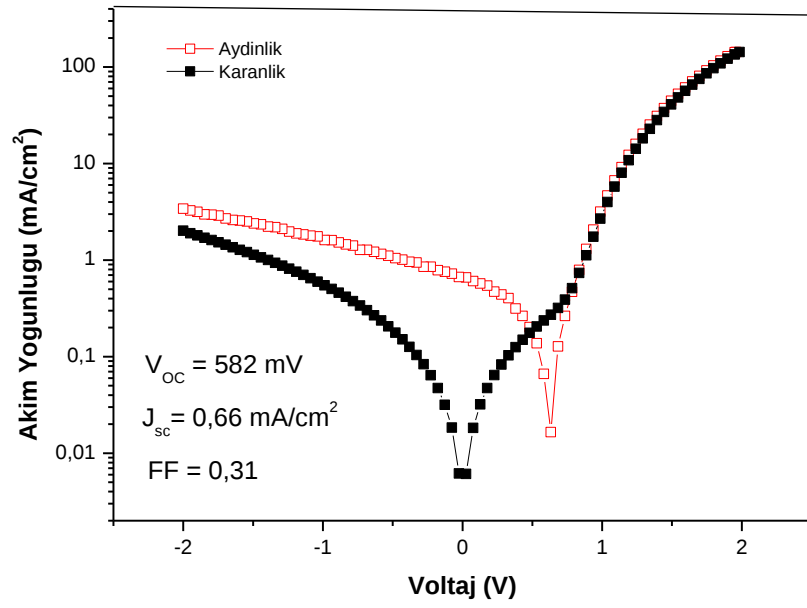


Şekil 3.15 Kloroformda hazırlanmış M3EH-PPV:PCBM filmlerin AFM resimleri (a) 1:1, (b) 1:3 karışım oranları

Şekil 3.15’de görüldüğü gibi, yükseklik skalası değerinden okunan büyüklüklere göre, M3EH-PPV:PCBM filmlerinin arasında (b) deki 1:3 oranında hazırlanmış film, (a) daki 1:1 oranında hazırlanmış filmden daha pürüzsüzdür. 1:3 oranında hazırlanan fotovoltaiik hücrenin performansı da, yüzey görüntüleriyle uyumlu olup daha yüksek güç dönüşüm verimine sahiptir.

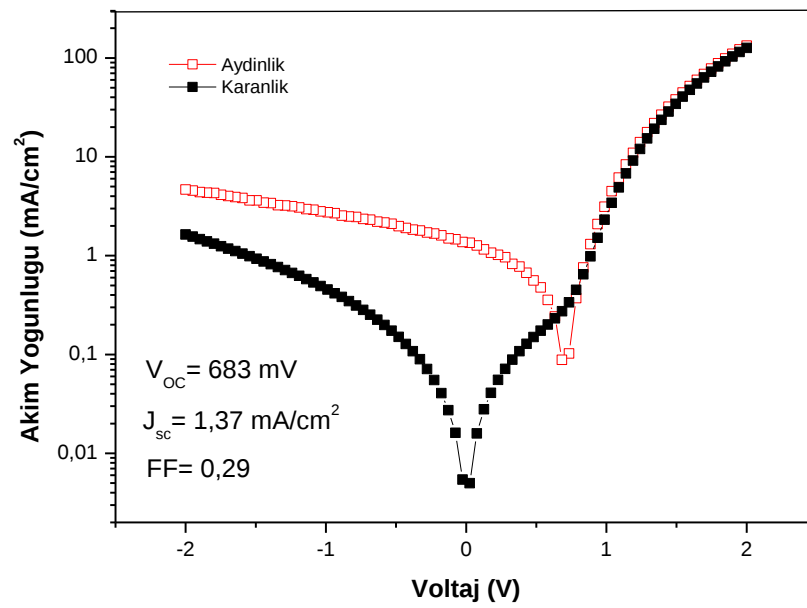
3.3.3.3 Işık Şiddeti Değişiminin Organik Fotovoltaiik Hücrenin Performansına Etkisi

ITO/PEDOT:PSS/M3EH-PPV:PCBM/Al konfigürasyonuna göre hazırlanan fotovoltaiik hücreler, kloroform çözücüsü içerisinde 1:3 oranında hazırlanmıştır. Bu hücreler üzerinde, gelen ışık şiddetinin değişiminin fotovoltaiik hücre performansına etkisi incelenmiştir. Önce 0,5 güneş ışığında (sun) fotovoltaiik hücreler karakterize edilmiştir. (Şekil 3.16). $J_{sc}=0,66 \text{ mA/cm}^2$, açık devre gerilimi $V_{oc}=582 \text{ mV}$ olarak ölçülmüş ve dolgu faktörü $FF=0,31$ olarak hesaplanmıştır.



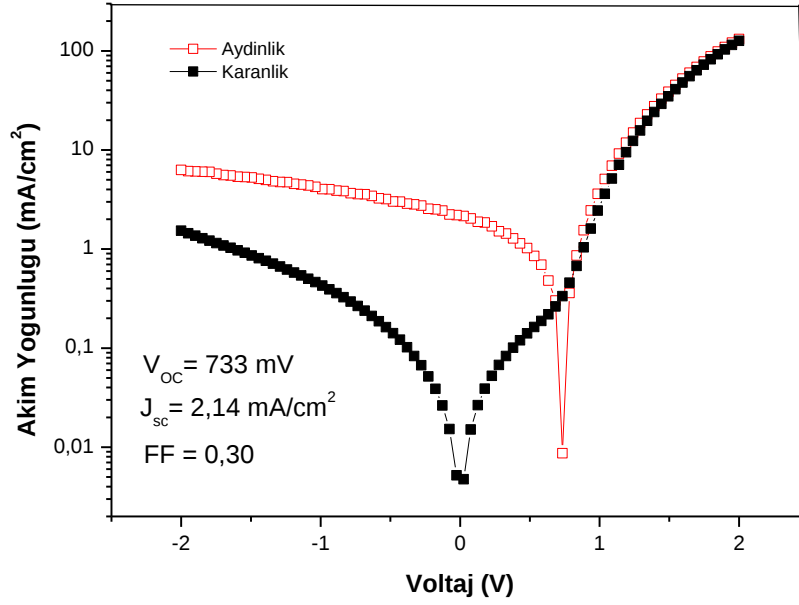
Şekil 3.16 0,5 güneş ışığında (sun) ölçülen M3EH-PPV:PCBM /CF fotovoltaik hücrelerin akım-gerilim eğrileri

Şekil 3.17’de gösterilen 1 güneş ışığı (sun) altında karakterize edilen fotovoltaik hücrelerde akım yoğunluğu $J_{sc}=1,37 \text{ mA/cm}^2$, açık devre gerilimi $V_{oc}=683 \text{ mV}$ olarak ölçülmüş ve dolgu faktörü $FF=0,29$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.17 1 güneş ışığında (sun) ölçülen M3EH-PPV:PCBM /CF fotovoltaik hücrelerin akım-gerilim eğrileri

Şekil 3.18’de gösterilen 1,5 güneş ışığı (sun) altında karakterize edilen fotovoltaiik hücrelerde akım yoğunluğu $J_{sc}=2,14 \text{ mA/cm}^2$, açık devre gerilimi $V_{oc}=733 \text{ mV}$ olarak ölçülmüş ve dolgu faktörü $FF=0,30$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.18 1,5 güneş ışığında (sun) ölçülen M3EH-PPV:PCBM /CF fotovoltaiik hücrelerin akım-gerilim eğrileri

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında PPV türevi M3EH-PPV konjuge polimerlerinin kloroform, klorobenzen ve toluende olmak üzere üç farklı çözücüdeki fotovoltaiik özellikleri incelenmiştir. Hacim heteroeklemi esas alınarak hazırlanan organik fotovoltaiik hücrelerde M3EH-PPV polimeri donor, fulleren türevi PCBM ise akseptör olarak kullanılmıştır. Hazırlanan organik fotovoltaiik hücreleri ITO/PEDOT:PSS/ M3EH-PPV:PCBM/Al konfigürasyonunda hazırlanmıştır.

Kloroform kullanılarak hazırlanan fotovoltaiik hücreler arasında en iyi verim, 1:3 oranında hazırlanan hücrelerde elde edilmiştir. Bu hücrelerde kısa devre akım yoğunluğu $J_{sc}=3,46 \text{ mA/cm}^2$, açık devre gerilimi $V_{oc}=683 \text{ mV}$ ve dolgu faktörü $FF=0,34$ olarak elde edilmiştir. Verim, % 0,80 olarak hesaplanmıştır. Klorobenzen çözücüsü kullanılarak hazırlanan fotovoltaiik hücreler arasında en iyi verim, 1:4 oranında hazırlanan hücrelerde elde edilmiştir. Bu hücrelerde kısa devre akım yoğunluğu $J_{sc}=3,81 \text{ mA/cm}^2$, açık devre gerilimi $V_{oc}=734 \text{ mV}$ ve dolgu faktörü $FF=0,31$ olarak elde edilmiştir ve verim % 0,9 olarak hesaplanmıştır. Toluene kullanılarak hazırlanan fotovoltaiik hücreler arasında en iyi verim, 1:3 oranında hazırlanan hücrelerde elde edilmiştir. Bu hücrelerde kısa devre akım yoğunluğu $J_{sc}=2,53 \text{ mA/cm}^2$, açık devre gerilimi $V_{oc}=683 \text{ mV}$ ve dolgu faktörü $FF=0,28$ olarak elde edilmiş ve verim % 0,5 olarak hesaplanmıştır.

Bütün çözücüler göz önüne alındığında M3EH-PPV polimeri en iyi performansı, klorobenzen çözücüsü içerisinde %0,9 güç dönüşüm verimiyle göstermiştir. AFM görüntüleri incelendiğinde genellikle yüzey pürüzlülüğü ve faz ayrımı azaldıkça performansın arttığı gözlenmiştir.

Farklı ışık şiddetlerinde ölçülen fotovoltaiik hücreler arasında ise, en yüksek verim % 0,5 ile 1,5 güneş ışığında (sun) elde edilerek ışık şiddetinin artmasıyla performansın iyileştiği gözlenmiştir.

Fotovoltaiik hücreler karanlıkta bir diyot gibi davranır. İdeal bir diyot için akım yoğunluğu;

$$J = J_{sc} - J_0 \left(e^{\frac{qV}{n k_B T}} - 1 \right) \quad (4.1)$$

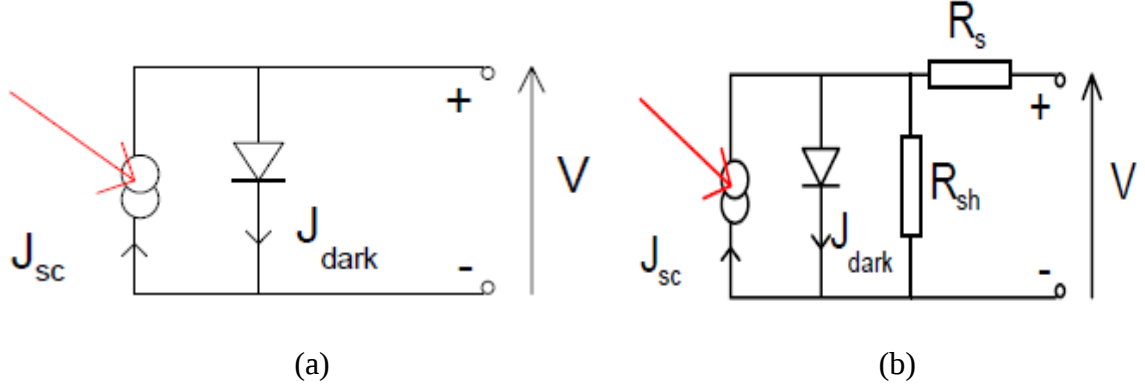
Burada J, toplam akım yoğunluğu, J_{sc} , kısa devre akım yoğunluğu, J_0 , diyotun doygunluk akımı, q, elektron yükü, V, diyot voltajı, k_B , Boltzman sabiti, T, sıcaklık ve n, idealite faktörüdür. İdealite faktörü; diyodun ideal özelliklerinden sapmasını gösteren boyutsuz bir parametredir. İdeal diyot için $n=1$ olarak verilir.

Gerçek fotovoltaiik hücrede; seri ve paralel dirençlerin varlığından dolayı, akım yoğunluğu

aşağıdaki hali alır.

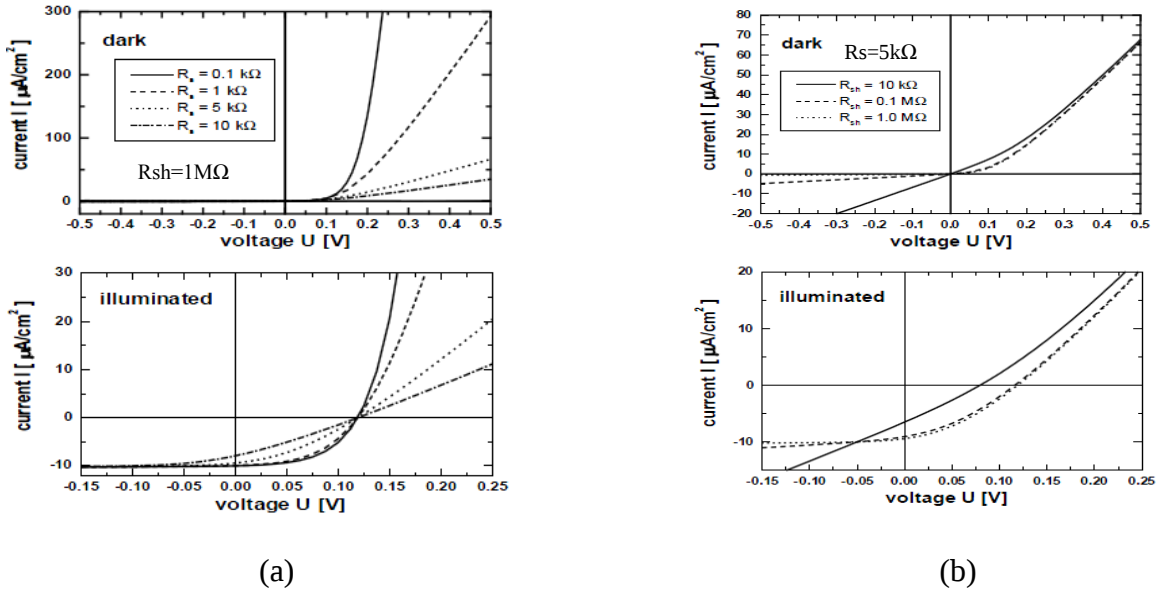
$$J = J_{sc} - J_0 \left(e^{\frac{q(V+JAR_S)}{nk_B T}} - 1 \right) - \frac{V+JAR_S}{R_{sh}} \quad (4.2)$$

Burada R_S , seri direnç, R_{sh} , paralel direnç ve A , fotovoltaiik hücre alanıdır.



Şekil 4.1 Fotovoltaiik hücre eşdeğer devre diyagramı (a) ideal durum (b) ideal olmayan durum (Würfel, 2005)

İdeal durumda seri direnç çok küçük, paralel direnç sonsuz olmalıdır. Şekil 4.2 ve 4.3 seri ve paralel direncin akım gerilim eğrilerindeki etkisini göstermektedir.



Şekil 4.2 (a) Seri direncin akım-gerilim eğrisine etkisi (b) paralel direncin akım-gerilim eğrisine etkisi (Winder, 2001)

Şekil 4.2'den de görüldüğü gibi seri direncin artması, akım gerilim eğrisinin ideal durumdan saparak eğrilerin düzleşmesine ve dolayısıyla kısa devre akımının azalmasına neden olmuştur. Bu tezde elde edilen akım gerilim karakteristikleri de seri direncin yüksek olabileceğinden

şekildeki gibi düzleşmiş haldedir.

Son olarak, bu tez çalışmasından şu sonuç çıkarılabilir: Tüm organik fotovoltaiik hücrelere uygulanabilecek genel geçer bir reçete yoktur. Yeni bir iletken polimer malzeme, organik fotovoltaiik hücrede kullanılırken tüm parametreler (sıcaklık, çözücü tipi, donör-akseptör konsantrasyonu vs) ayrı ayrı incelenmelidir.

KAYNAKLAR

- Barrau, S., Andersson, V. ve Zhang, F., (2009), "Nanomorphology of Bulk Heterojunction Organic Solar Cells in 2D and 3D Correlated to Photovoltaic Performance", *Macromolecules*, 42: 4646-4650.
- Blasse, G. ve Grabmaier, B.C., (1994), *Luminescent Materials*, Springer-Verlag, Santa Clara.
- Blom, B.W. M., Mihailetschi, V. D., Koster, L. J. A. ve Markov, D. E., (2007), "Device Physics of Polymer:Fullerene Bulk Heterojunction Solar Cells", *Adv. Mater.*, 19:1551–1566.
- Brabec, C. J. ve Sarıçiftci, N.S., (2001), "Recent Developments in Conjugated Polymer Based Plastic Solar Cells", *Monatshefte für Chemie*, 132:421-431.
- Brabec, C. J., Cravino, A., Meissner, D., Sarıçiftçi, N. S., Fromherz, T., Rispen, M. T., Sanchez, L. ve Hummelen, J. C., (2001), "Origin of the Open Circuit Voltage of Plastic Solar Cells", *Adv. Funct. Mater.*, 11:374–380.
- Brabec, C., Dyakonov, V. ve Scherf, U., (2008), *Organic Photovoltaics*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Bube, R. H., (1992), *Photoelectronic Properties of Semiconductors*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Chapin, D. M., Fuller, C. S. ve Pearson, G. L., (1954), "A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power", *Journal of Applied Physics*, 25: 676–677.
- Chasteen, D. V., Sholin, V., Carter, S. A. ve Rumbles, G., (2008), "Towards Optimization of Device Performance in Conjugated Polymer Photovoltaics: Charge Generation, Transfer and Transport in Poly(p-phenylene-vinylene) Polymer Heterojunctions", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92:651-659
- Coakley, K.M. ve McGehee, M.D., (2004), "Conjugated Polymer Photovoltaic Cells", *Chem. Mater.*, 16(23):4533-4542.
- Çıtıröğlu, A.R., (2000), *Güneş Enerjisinden Yararlanarak Elektrik Üretimi*.
- Dittmer, J.J., Lazzaroni, R., Leclerc, P., Moretti, P., Granstrom, M., Petritsch, K., Marseglia, E.A., Friend, R.H., Bredas, J.L., Rost, H. ve Holmes, A.B., (2000a), "Crystal Network Formation in Organic Solar Cells", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 61:53-61.
- Dittmer, J.J., Marseglia, E.A. ve Friend, R. H., (2000b), "Electron Trapping Indye/Polymer Blend Photovoltaic Cells", *Adv. Mater.*, 12:1270-1274.
- Erturan, S. ve Deniz, Ş., (2006), *Polimer Mühendisliği Esasları Ders Notları*, YTÜ Yayınları, İstanbul.
- Geens, W., Aernouts, T., Poortmans, J. ve Hadziioannou, G., (2002), "Organic Co-evaporated Films of a PPV-Pentamer and C₆₀: Model Systems for Donor/Acceptor Polymer Blends", *Thin Solid Films*, 403:438-443.
- Goetzberger, A. ve Hebling, C., (2000), "Photovoltaic Materials, Past, Present, Future", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 62: 1-19.
- Green, M., (2001), "Progress in Photovoltaics", 9: 123-135.
- Gunes, S., Neugebauer, N. ve Sarıçiftci, N.S., (2007), "Conjugated Polymer-Based Organic Solar Cells", *Chem. Rev.*, 107:1324-1338
- Halls, J.J.M., Walsh, C.A., Greenham, N.C., Marseglia, E.A., Friend, R.H., Moratti, S.C. ve Holmes, A.B., (1995), "Efficient Photodiodes From Interpenetrating Polymer Networks",

Nature, 376:498-500.

Hiramoto, M., Fujiwara, H., ve Yokoyama, (1991), "M., Three-Layered Organic Solar Cell with a Photoactive Interlayer of Codeposited Pigments", Appl. Phys. Lett., 58:1062-1064.

Hook J.R. ve Hall,H.E., (1999) Katihal Fiziği, Literatür Yayıncılık, İstanbul.

Hoppe, H. ve Sarıçiftçi N. S., (2004), "Organic Solar Cells", J. Mater. Res., 19(7): 1924–1945.

Hoppe, H., (2004), Nanomorphology – Efficiency Relationship in Organic Bulk Heterojunction Plastic Solar Cells, P.H.D Thesis, Johannes Kepler Universitat, Linz.

Hoppe H. ve Sarıçiftçi N.S., (2006), "Morphology of Polymer/Fullerene Bulk Heterojunction Solar Cells", J. Matter. Chem., 16: 45-61.

Kanatzidis, M. G., (1990), "Conductive Polymers", Chem. Eng. News, 68: 36-37.

Kietzke, T., Egbe, D. A. M., Hörhold, H. H. ve Neher, D., (2006), " Comparative Study of M3EH-PPV-Based Bilayer Photovoltaic Devices", Macromolecules, 39:4018-4022.

Kietzke, T.,(2007), "Recent Advances in Organic Solar Cells", Advances in Optoelectronics, 40:1-15

Koyuncu, S., (2008), Güneş Pillerinde Elektrolit Olarak Görev Yapacak İletken Polimerlerin Sentezi, Çanakkale.

Kraabel, B., McBranch, D., Sariciftci, N. S., Moses, D. ve Heeger, A. J., (1994), "Ultrafast Spectroscopic Studies of Photoinduced Electron Transfer from Semiconducting Polymers to C₆₀", Phys. Rev. B, 50:18543–18552.

Liang, Y., Xu, Z., Xia, J., S.T., Tsai, S.T., Wu, Y., Li, G., Ray, C. ve Yu,L., (2010), "For the Bright Future-Bulk Heterojunction Polymer Solar Cells with Power Conversion Efficiency of 7.4%", Adv. Mater., 22:135-138.

Liu, J., Shi, Y. ve Yang, Y., (2001), "Solvation Induced Morphology Effects on the Performance of Polymer-Based Photovoltaic Devices", Adv. Func.Mat., 11:420-424.

MacDiarmid, A. G. ve Heeger, A. J., (1979), "Organic Metals And Semiconductors – The Chemistry of Polyacetylene, (CH)_x and Its Derivatives", Synthetic Metals, 1: 101-118.

Mende, L.S.,Fechtenkötter, A.,Müllen, K., Moons, E., Friend, R. H. ve MacKenzie, J.D., (2001), "Self-Organized Discotic Liquid Crystals for High-Efficiency Organic Photovoltaics", Science, 293:1119-1122.

Miranda, P. B., Moses, D. ve Heeger, A. J., (2001), "Ultrafast Photogeneration of Charged Polarons in Conjugated Polymers", Phys. ReV. B, 64:81201.

Nunzi, J. M.,(2002), "Organic Photovoltaic Materials and Devices", C. R. Physique, 3:523-542.

Ocañoğlu, K., (2006), Organometalik Fotosensörlerin Sentezi ve Foto-Organik Kimyasal Çalışmalar, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Park, S.H., Roy, A., Beaupre, S., Cho, S., Coates, N., Moon, J.S., Moses, D., Leclerc, M., Lee, K. Ve Heeger, A.J., (2009), " Bulk Heterojunction Solar Cells with Internal Quantum Efficiency Approaching 100%", Nature Photonics, 3:297-303.

Petritsch, K., (2000), Organic Solar Cell Architectures, P.H.D Thesis, Cambridge and Graz.

Petritsch, K., Dittmer, J.J., Marseglia, E.A., Friend, R.H., Lux, A.,Rozenberg, G.G., Moratti, S.C. ve Holmes, A.B., (2000), "Dye-Based Donor/ Acceptor Solar Cells ", Sol. Energy Mater.

Sol. Cells, 61:63-72.

Pettersson, L.A.A., Roman, L.S. ve Inganas, O., (1999), "Modeling Photocurrent Action Spectra of Photovoltaic Devices Based on Organic Thin Films", J. Appl. Phys., 86(1):487-496.

Peumans, P., Yakimov, A. ve Forrest S.R., (2003a), "Small Molecular Weight Organic Thin-Film Photodetectors and Solar Cells", J. Appl. Phys., 93:3693-3723.

Peumans, P., Uchida, S. ve Forrest S. R., (2003b), "Efficient Bulk Heterojunction Photovoltaic Cells Using Small-Molecular-Weight Organic Thin Films, Nature, 425:158-162.

Pfeiffer, S. ve Horhold, H. H., (1999), "Investigation of Poly(arylene viylene)s, 41a Synthesis of Soluble Dialkoxy-Substituted Poly(Phenylene Alkenylidene)s by Applying the Horner-Reaction for Condensation Polymerization", Macromol. Chem. Phys., 200:1870-1878.

Rohatgi M., (1978), Fundamentals of Photochemsitry, Willey, New York.

Rostalski, J. ve Meissner, D., (2000), "Photocurrent Spectroscopy for the Investigation of Charge Carrier Generation and Transport Mechanisms in Organic p/n-Junction Solar Cells", Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 63:37-47.

Sarıcıftci, N. S., Smilowitz, L., Heeger, A. J. ve Wudl, F., (1992), "Photoinduced Elektron Transfer from a Conducting Polymer to Buckminsterfullerene", Science, 1992, 258:1474-1476.

Savenije, T.J., Warman, J.M. ve Goossens, A., (1998), "Visible Light Sensitisation of Titanium Dioxide Using a Phenylene Vinylene Polymer", Chem. Phys. Lett., 287 :148.

Scharber, M. C., Muhlbacher, D., Koppe, M., Denk, P., Waldauf, C., Heeger, A. J. ve Brabec, C. J., (2006), "Design Rules for Donors in Bulk Heterojunction Solar Cells-Towards 10% Energy-Conversion Efficiency", Adv. Mater., 18:789-794.

Sze, S.M., (1981), Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, New York.

Şenol, R., Üçgöl, İ. ve Acar, M., (2008), "Güneş Gözesi Üretiminde Yaşanan Sıkıntılar ve Dünya Geneline Göze Üretim Durumları", Mühendis ve Makine, 49(581):10-18.

Tada, K., Hosada, K., Hirohata, M., Hidayat, R., Kawai, T., Onoda, M., Teraguchi, M., Masuda, T., Zakhidov, A. A. ve Yoshino, K., (1997), "Donor Polymer (PAT6) - Acceptor Polymer (CNPPV) Fractal Network Photocells, Synth. Met., 85:1305-1306.

Tang, C. W., (1986), "Two Layer Organik Photovoltaic Cell", App.Phys. Lett., 43:183-186.

VanBavel, S. S., Sourty, E. ve DeWith, G., (2009), "Three Dimensional Nanoscale Organization of Bulk Heterojunction Polymer Solar Cells", Nano Letters, 9:507-513.

VanDuren, J.K.J., Yang, X.N. ve Loos, J., (2004), "Relating the Morphology of Poly(p-phenylene vinylene)/Methanofullerene Blends to Solar-Cell Performance", Adv. Func. Mat., 14: 425-434.

Veenstra, S. C., Malliaras, G. G., Brouwer, H. J., Esselink, F. J., Krasnikov, V. V., Hutten, P. F., Wildeman, J., Jonkman, H. T., Sawatzky, G. A. ve Hadziioannou, G., (1997), "Sexithiophene-C₆₀ Blends as Model Systems For Photovoltaic Devices", Synth. Met., 84:971-972.

Wallace, G. G., Dastoor, P. C., Officer, D. L. ve Too, C. O., (2000), "Conjugated Polymers: New Materials for Photovoltaics", Chemical Innovation, 30(1):14-22.

Winder, C., (2001), Sensitization of Low Bandgap Polymer Bulk Heterojunction Solar Cells,

P.H.D. Thesis, Johannes Kepler Universitat, Linz.

Winder, C. ve Sariçiftçi, N. S., (2004), “Low Bandgap Polymers for Photon Harvesting in Bulk Heterojunction Solar Cells” , J. Mater. Chem., 14:1077-1086.

Würfel, P., (2005) Physics of Solar Cells, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

Yang, C. Y. ve Heeger, A. J., (1996), “Morphology of Composites of Semiconducting Polymers Mixed with C₆₀, Synth. Met., 83:85-88.

Yokoyama, H., Kramer, E. J., Rafailovich, M. H., Sokolov, J. ve Schwarz, S. A., (1998), “Structure and Diffusion of Asymmetric Diblock Copolymers in Thin Films: A Dynamic Secondary Ion Mass Spectrometry Study” , Macromolecules, 31:8826-8830.

Yu, G. ve Heeger, A. J., (1995), “Charge Separation and Photovoltaic Conversion in Polymer Composites with Internal Donor/Acceptor Heterojunctions” , J. Appl. Phys., 78:4510-4516.

Yu, G., Gao, J., Hummelen, J. C., Wudl, F. ve Heeger, A. J., (1995), “Polymer Photovoltaic Cells: Enhanced Efficiencies via a Network of Internal Donor–Acceptor Heterojunctions”, Science, 270:1789-1791.

İNTERNET KAYNAKLARI

[1] www.kimyamuhendisi.com

[2] <http://www.eie.gov.tr>

[3] <http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/gunes/tgunes.html>

[4] <http://www.srenerji.com.tr/>

[5] <http://www.epia.org>

[6] <http://www.suntexas.com>

[7] <http://www.ecn.nl>

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 31.07.1983

Doğum yeri İstanbul

Lise 1997-2001 Plevne Süper Lisesi

Lisans 2001-2006 Marmara Üniversitesi Atatürk Eğitim Fakültesi
Fizik Öğretmenliği Bölümü

Yüksek Lisans 2008-2010 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı, Fizik Programı

Çalıştığı kurum

2010-Devam ediyor SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi