

STUDI SIFAT OPTIK PADA MATERIAL HIBRID P3HT:NANOPARTIKEL ZnO MENGUNAKAN SPEKTROSKOPI UV-VIS

SUKMA JAN EDA¹, EUIS SITI NUR AZIZAH², ANNISA APRILIA², NORMAN SYAKIR², TOGAR SARAGI²,
RISDIANA², LUSI SAFRIANI^{2,*}

¹Program Studi Sarjana Fisika, FMIPA, Universitas Padjadjaran, Jl. Raya Jatinangor KM 21, Jatinangor,
Kabupaten Sumedang, 45363.

²Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Padjadjaran, Jl. Raya Jatinangor KM 21, Jatinangor,
Kabupaten Sumedang, 45363.

Abstrak. Poly(3-hexylthiophene) (P3HT) merupakan polimer konduktif yang memiliki sifat listrik dan optik yang baik sehingga diaplikasikan sebagai material aktif pada sel surya. Akan tetapi, mobilitas pembawa muatan pada P3HT masih rendah, sehingga dicampurkan dengan material lain yang memiliki mobilitas pembawa muatan lebih baik. Salah satu material yang memiliki mobilitas pembawa muatan yang baik adalah nanopartikel ZnO. Penambahan nanopartikel ZnO pada P3HT memunculkan adanya sistem *donor-acceptor* sehingga terdapat transfer elektron dalam material hibrid P3HT:nanopartikel ZnO yang berpengaruh terhadap sifat listrik dan optik material. Pada *paper* ini, nanopartikel ZnO disintesis dengan metode *sol-gel* dan dikarakterisasi TEM dan XRD untuk melihat ukuran partikel dan kristalinitasnya. Selanjutnya, sifat optik material hibrid P3HT:nanopartikel ZnO diuji dengan spektroskopi UV-Vis. Hasil pengukuran TEM dan XRD menunjukkan ukuran partikel dan kristalit nanopartikel ZnO masing-masing 8 nm dan 3,877 nm. Hasil spektroskopi UV-Vis menunjukkan rentang absorbansi nanopartikel ZnO berada di daerah UV, yaitu 330-400 nm. Pada P3HT dan P3HT:nanopartikel ZnO, absorbansi berada di daerah UV-Vis, yaitu 350-650 nm. Secara umum, penambahan nanopartikel ZnO tidak berpengaruh terhadap perubahan daerah absorbansi dan cenderung didominasi oleh P3HT yang dapat dikarenakan perbedaan rasio P3HT dan nanopartikel ZnO pada material P3HT:nanopartikel ZnO. Meskipun begitu, penambahan nanopartikel ZnO berpengaruh terhadap pergeseran panjang gelombang *cut-off* ke daerah UV sehingga meningkatkan energi *gap* material. Peningkatan energi *gap* pada material hibrid P3HT:nanopartikel ZnO dikarenakan adanya peningkatan mobilitas elektron pada material akibat penambahan nanopartikel ZnO pada P3HT.

Kata kunci: karakteristik optik, P3HT:nanopartikel ZnO, spektroskopi UV-Vis.

Abstract. Poly(3-hexylthiophene) (P3HT) is a conductive polymer with good electrical and optical properties so it is often applied as an active material in solar cells. However, the charge carrier mobility in P3HT is still low, so it is often blended with other materials with better charge carrier mobility. One of the materials that has good charge carrier mobility is ZnO nanoparticles. The addition of ZnO nanoparticles to P3HT led to the existence of a donor-acceptor system so that there is electron transfer in the hybrid material P3HT:ZnO nanoparticles. This electron transfer can increase the electron density in the material which can affect its electrical and optical properties of the material. In this paper, ZnO nanoparticles were synthesized using the sol-gel method and characterized by TEM and XRD to see the particle and crystallite size. The optical properties of ZnO nanoparticles, P3HT, and P3HT:ZnO nanoparticles were characterized using UV-Vis spectroscopy. The results of TEM and XRD measurements showed the particle and crystallite size of ZnO nanoparticles are 8 nm and 3.877 nm, respectively. The results of UV-Vis showed the absorbance range of ZnO nanoparticles in the UV region, which is 330-400 nm. In P3HT and P3HT:ZnO nanoparticles, the absorbance is in the UV-Vis region, which is 350-650 nm. In general, the addition of ZnO nanoparticles does not affect the changes in the absorbance area and tends to be dominated by P3HT which could be due to the ratio difference of P3HT and ZnO nanoparticles in the hybrid material P3HT:ZnO nanoparticles. However, the addition of ZnO nanoparticles affects the shifting of the cut-off wavelength to the UV region, thereby increasing the energy gap of the material. The increase of the gap energy in the hybrid material P3HT:ZnO nanoparticles was due to the increase of the electron mobility in the material due to the addition of the ZnO nanoparticles to P3HT.

Keywords: optical characteristics, P3HT:ZnO nanoparticles, UV-Vis spectroscopy.

* Email: lusi.safriani@phys.unpad.ac.id

1. Pendahuluan

Polimer merupakan susunan unit-unit kecil (mers) yang membentuk molekul. Secara umum, polimer bersifat isolatif sebelum ditemukan polimer konduktif [1-2] yang memiliki sifat listrik dan optik unik seperti pada semikonduktor anorganik [3]. Polimer konduktif telah menarik banyak perhatian dan seringkali digunakan dalam berbagai aplikasi karena keberagaman sifat listrik dan optik [4]. Pada polimer konduktif, rantai karbon terkonjugasi terdiri dari ikatan tunggal dan rangkap yang bergantian dengan ikatan π yang sangat terdelokalisasi, terpolarisasi, dan elektronnya bertanggung jawab atas keberadaan sifat listrik dan optiknya [5]. Struktur ikatan inilah yang memunculkan mobilitas pembawa muatan di sepanjang rantai polimer [6].

Salah satu jenis polimer konduktif adalah politiofen yang memiliki konduktivitas tinggi dengan monomer C_4H_4S . Politiofen memiliki beberapa turunan, salah satunya adalah *poly(3-hexylthiophene)* atau P3HT yang memiliki kecenderungan kuat untuk mengkristal, sehingga mencerminkan karakter listrik dan optik yang efisien dalam transistor efek medan (FET) [7] dan sel surya [8-9]. P3HT seringkali digunakan sebagai material aktif pada sel surya organik yang akan menciptakan pasangan elektron dan *hole* yang dipengaruhi oleh konsentrasi P3HT ketika disinari cahaya [10]. Semakin tinggi konsentrasi P3HT, maka semakin banyak elektron yang dapat tereksitasi dari *Higher Occupied Molecular Organic* (HOMO) ke *Lower Unoccupied Molecular Organic* (LUMO) yang selanjutnya diinjeksi ke pita konduksi material metal oksida [11]. Secara optik, P3HT mampu mengabsorpsi cahaya pada rentang panjang gelombang 450-650 nm, yaitu sekitar 27% dari rentang panjang gelombang cahaya tampak dan memiliki energi gap sekitar 1,9 eV [12-13].

Secara umum, P3HT merupakan polimer semikonduktor tipe-p yang dapat digunakan sebagai material transport elektron [14-16]. Meskipun begitu, mobilitas pembawa muatan pada P3HT masih rendah, sehingga seringkali dicampurkan dengan material lain yang memiliki mobilitas pembawa muatan lebih baik. Salah satunya adalah dengan seng oksida (ZnO), sehingga menjadikannya sebagai material hibrid organik-anorganik [17].

ZnO merupakan senyawa kimia anorganik yang aktif secara kimia dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang. ZnO merupakan salah satu metal oksida yang memiliki mobilitas elektron tinggi, yaitu $200-300 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. ZnO mampu mengabsorpsi cahaya pada rentang panjang gelombang UV, yaitu 300-400 nm dengan *optical band gap* sebesar 3,10 – 3,37 eV dan energi eksiton sebesar 60 meV dalam suhu ruang [18-19]. Secara kristalografi, ZnO memiliki tiga jenis struktur kristal, yaitu *wurtzite*, *zincite*, dan *rocksalt* [20]. Dalam proses fabrikasinya, ZnO mudah membentuk endapan dalam larutan sehingga memiliki morfologi yang bervariasi, salah satunya dalam bentuk nanopartikel [21]. ZnO dalam bentuk nanopartikel telah digunakan sebagai material fotokatalis yang menunjukkan performa lebih baik [22-23]. Hal ini dikarenakan nanopartikel ZnO memiliki luas permukaan yang jauh lebih besar daripada *bulk* ZnO. Pada ukuran nanopartikel, terdapat pengurangan kuantum yang berpengaruh terhadap besar *band gap* ZnO. Salem dkk. (2022) menunjukkan hasil spektroskopi UV-Vis yang memperlihatkan adanya penurunan *band gap* karena peningkatan ukuran partikel, sehingga memudahkan eksitasi elektron yang berpengaruh terhadap konduktivitas nanopartikel ZnO [24].

Penambahan nanopartikel ZnO pada material P3HT akan memunculkan sistem *donor-acceptor* pada material yang memungkinkan adanya transfer elektron pada material sehingga meningkatkan mobilitas elektron dalam material yang dapat memberikan berpengaruh terhadap sifat optiknya.

Oleh karena itu, pada *paper* ini akan dibahas sintesis nanopartikel ZnO dan sifat optik nanopartikel ZnO yang dicampurkan pada P3HT membentuk material hibrid P3HT:nanopartikel ZnO.

2. Bahan dan Metode

Blending material hibrid P3HT:nanopartikel ZnO dilakukan dengan rasio 4:1. P3HT yang digunakan merupakan P3HT dari Sigma Aldrich. Nanopartikel ZnO disintesis dengan prekursor zinc acetate dihydrate (ZnAc) dan pelarut methanol dari Merck.

Sintesis nanopartikel ZnO dilakukan dengan metode sol-gel dengan sistem refluks. 1 gram ZnAc dilarutkan ke dalam labu tiga leher dengan 42 ml methanol selama 10 menit pada suhu 65°C menggunakan magnetic stirrer. 0,28 gram NaOH dilarutkan ke dalam 23 ml methanol selama ± 15 menit pada suhu ruang menggunakan ultrasonic bath. Larutan NaOH kemudian ditambahkan ke dalam larutan ZnAc dan diaduk selama ± 150 menit hingga larutan berubah dari keruh putih menjadi bening kemudian putih susu. Setelah menjadi putih susu, larutan diendapkan selama 48 jam kemudian dicuci dengan methanol dan n-hexane dengan perbandingan 1:1 dan dilakukan proses centrifuge pada kecepatan 3600 rpm selama 10 menit dengan 3 kali pengulangan agar didapatkan ZnO dalam bentuk gel. Sebagian gel ZnO didiamkan dalam keadaan vacuum pada suhu ruang selama ± 12 jam kemudian dipanaskan dengan oven vacuum pada suhu 150°C selama 8 jam. ZnO hasil pemanasan ditumbuk sehingga didapatkan serbuk nanopartikel ZnO untuk pengukuran TEM dan XRD. Sebagian gel prekursor ZnO dibuat lapisan tipis untuk pengukuran UV-Vis dan dicampurkan dengan P3HT.

Gel ZnO dilarutkan ke dalam methanol dengan konsentrasi 0,5 mg/ml menggunakan ultrasonic bath selama ± 10 menit hingga diperoleh larutan homogen. P3HT dilarutkan ke dalam chlorobenzene dengan konsentrasi 0,4 mg/ml menggunakan magnetic stirrer selama ± 30 menit. P3HT dan larutan ZnO dicampurkan dengan perbandingan 4:1 dan diaduk menggunakan magnetic stirrer selama ± 30 menit. Pembuatan lapisan tipis dilakukan dengan metode spin coating. Masing-masing lapisan tipis diletakkan di atas hotplate kemudian dilakukan proses annealing dari 40°C hingga 150°C dengan kenaikan 5°C per 5 menit. Ketika hotplate mencapai suhu 150°C, proses annealing dilanjutkan selama ± 60 menit, kemudian didiamkan pada suhu ruang untuk pengukuran UV-Vis.

3. Hasil dan Pembahasan

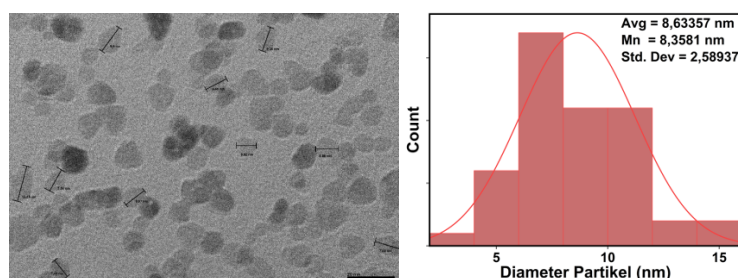
Hasil pengukuran TEM memperlihatkan ukuran partikel ZnO dalam skala nano. Gambar 1 menunjukkan hasil gambar TEM pada nanopartikel ZnO dengan perbesaran 300.000 kali pada skala 20 nm. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa ukuran partikel ZnO berada pada rentang 3–15 nm dengan rata-rata diameter 8,634 nm. Hasil gambar TEM mengonfirmasi bahwa sintesis menggunakan metode sol-gel dengan prekursor ZnAc terbukti dapat menghasilkan nanopartikel ZnO.

Selanjutnya dilakukan karakterisasi XRD untuk melihat struktur kristal nanopartikel ZnO. Gambar 2a menunjukkan hasil pengukuran XRD nanopartikel ZnO yang bersesuaian dengan pola difraksi dari ICDD database ZnO No. 01-079-0207. Hal ini mengonfirmasi bahwa nanopartikel ZnO hasil sintesis merupakan kristal heksagonal dengan struktur wurtzite. Tabel 1 menunjukkan kesesuaian bidang hkl dan posisi puncak 2 θ nanopartikel ZnO hasil sintesis dengan database. Puncak dengan intensitas tertinggi dari nanopartikel ZnO bersesuaian dengan bidang hkl (0 1 1).

Ukuran kristalit nanopartikel ZnO dapat dihitung menggunakan persamaan Debye-Scherrer seperti pada Persamaan 1.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

dengan K adalah konstanta Scherrer ($\sim 0,9$), λ adalah panjang gelombang sinar-X, β adalah FWHM (*Full Width Half Maximum*), θ adalah sudut Bragg, dan D adalah ukuran kristalit.



Gambar 1. Hasil pengukuran TEM pada nanopartikel ZnO.

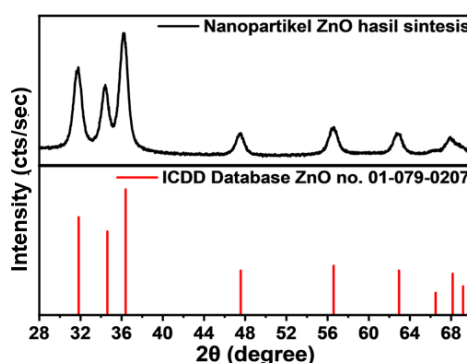
Dengan nilai parameter seperti yang tertera pada Tabel 1, ukuran rata-rata kristalit nanopartikel ZnO hasil sintesis adalah 3,924 nm. Selain itu, dari hasil perhitungan dengan menggunakan Persamaan 3, didapatkan parameter kisi kristal nanopartikel ZnO hasil sintesis adalah $a=b=3,159$ Å dan $c=5,067$ Å, sehingga rasio c/a pada nanopartikel ZnO hasil sintesis adalah 1,604 yang menunjukkan kestabilan pada struktur kristal hexagonal [25].

Tabel 1. Kesesuaian bidang hkl dengan posisi puncak nanopartikel ZnO dan hasil perhitungan diameter ukuran kristalit nanopartikel ZnO.

hkl	Posisi puncak (2 θ)	FWHM (θ)	B (rad)	D (nm)
010	31,722	2,2698	0,0396	3,639
002	34,418			3,664
011	36,339			3,684
012	47,978			3,831
110	57,391			3,99
013	63,871			4,124
020	67,558			4,211
112	69,172			4,251

Gambar 2b (atas) menunjukkan hasil pengukuran XRD pada serbuk P3HT yang memperlihatkan adanya dua puncak pada $5,5^\circ$ dan $23,0^\circ$ dengan masing-masing jarak bidang $16,1$ Å dan $3,9$ Å. Jarak pertama berkaitan dengan konstanta kisi sumbu a dan yang terakhir sesuai dengan konstanta kisi b atau sumbu c pada P3HT. Selain itu, pada Gambar 2b (bawah) juga memperlihatkan pola XRD dari lapisan tipis P3HT yang menunjukkan puncak pada $5,5^\circ$ dengan jarak kisi $16,0$ Å. Dua puncak lainnya terdeteksi pula pada 11° dan 16° . Dua puncak ini merupakan refleksi dari (2 0 0) dan (3 0 0) yang disebabkan oleh refleksi sinar-X dari film. Data XRD dari serbuk dan lapisan tipis P3HT menunjukkan bahwa rantai polimer P3HT kurang lebih sejajar dengan substrat dan bidang cincin tiofena yang normal terhadap substrat [26]. Hasil pengukuran XRD pada lapisan tipis P3HT yang dilakukan oleh Motaung dkk juga menunjukkan puncak di sekitar $5,3^\circ$ dengan

bidang hkl (1 1 0) [27]. Secara umum, kristal P3HT jauh dari kristal ideal. Akan tetapi, hal ini menunjukkan tingkat polikristalinitas yang tinggi pada P3HT dengan sejumlah besar butiran kristal dalam skala nanometer dengan ukuran yang sangat kecil. Kristalinitas maksimum pada P3HT dapat dicapai ketika massa molekul masing-masing rantai adalah sekitar 10.000 satuan massa atau setara dengan sekitar 60 satuan tiofen. Polikristalinitas dan batas butir kristal sangat berpengaruh terhadap transfer muatan pada P3HT *bulk* [28-29].



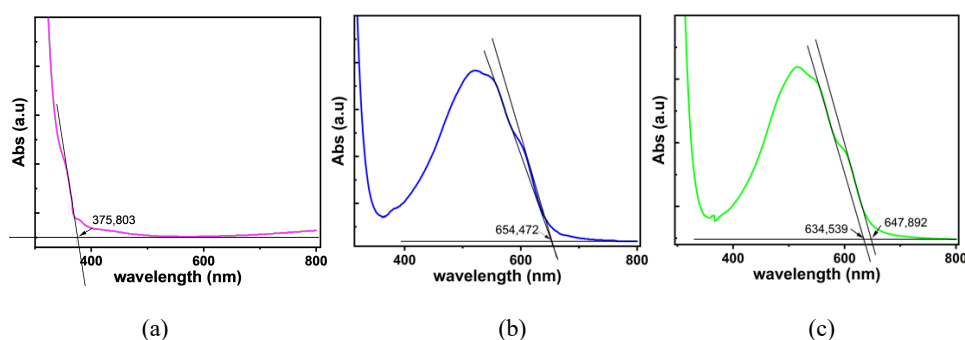
Gambar 2. Hasil karakterisasi XRD nanopartikel ZnO hasil sintesis dengan ICDD database nanopartikel ZnO No. 01-079-0207.

Gambar 2c memperlihatkan hasil pengukuran XRD pada material hibrid P3HT:nanopartikel ZnO yang *diblending* dengan menggunakan metode hidrotermal pada suhu 110° [30]. Pola XRD pada P3HT:nanopartikel ZnO dengan rasio massa berbeda memperlihatkan adanya pola difraksi material P3HT, yaitu puncak dengan bidang hkl (1 0 0), (2 0 0), dan (3 0 0). Secara umum, puncak difraksi pada material P3HT:nanopartikel ZnO dapat bertambah dengan meningkatkan suhu ketika melakukan *blending* material. Hasil XRD dari material P3HT:nanopartikel ZnO yang *deblending* pada suhu 150° menggunakan metode hidrotermal memperlihatkan adanya penambahan puncak difraksi sesuai dengan pola difraksi nanopartikel ZnO yang konsisten dengan bidang kristalografi (1 0 0), (0 0 2), (1 0 1), (1 0 2), dan (1 1 0). Pola difraksi ini bersesuaian dengan struktur kristal *wurtzite* pada nanopartikel ZnO. Hal ini mengindikasikan bahwa nanokristal ZnO berkumpul dan menyebar di sepanjang nanofiber kristal P3HT membentuk *hybrid nanowires* timbul pada 1-D, sehingga memunculkan adanya transfer elektron pada material P3HT:nanopartikel ZnO [30].

Spektroskopi UV-Vis dilakukan untuk melihat sifat optik suatu material pada rentang panjang gelombang 300-800 nm. Hasil spektroskopi UV-Vis pada nanopartikel ZnO ditunjukkan pada Gambar 3a. Spektrum absorbansi nanopartikel ZnO berada pada rentang *ultraviolet*, yaitu 330-400 nm. Hasil pengukuran ini sesuai dengan penelitian Yudasari dkk. [31] yang menunjukkan absorbansi nanopartikel ZnO berada pada rentang UV, yaitu 300-400 nm.

Gambar 3a menunjukkan besar λ_{co} dari nanopartikel ZnO adalah 375,8 nm. Dengan menggunakan Persamaan Planck, *optical band gap* dari nanopartikel ZnO adalah 3,30 eV. Besar *optical band gap* nanopartikel ZnO bersesuaian dengan hasil penelitian Davis dkk, yaitu berada di rentang 3,1 – 3,37 eV dalam suhu ruang [18]. Spektroskopi UV-Vis pada P3HT menunjukkan absorbansi P3HT berada pada rentang panjang gelombang *ultraviolet-visible*, yaitu 350-650 nm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3b. Hasil spektroskopi UV-Vis pada P3HT juga

menunjukkan adanya *shoulder thiophene* pada rentang ± 550 nm. *Shoulder thiophene* merupakan ciri khas material politiofen karena memiliki struktur elektronik kompleks sehingga memunculkan adanya transisi tambahan di panjang gelombang tertentu. Selain itu, Gambar 3b juga menunjukkan besar λ_{CO} pada P3HT, sehingga *optical band gap* pada P3HT adalah sebesar 1,894 eV. Besar *optical bandgap* pada P3HT ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Hrostea dkk. yang menyatakan bahwa P3HT memiliki *optical band gap* sekitar 1,9 eV [32].



Gambar 3. Hasil spektroskopi UV-Vis pada (a) nanopartikel ZnO, (b) P3HT, dan (c) P3HT:nanopartikel ZnO.

Gambar 3c memperlihatkan hasil spektroskopi UV-Vis pada P3HT:nanopartikel ZnO menunjukkan spektrum absorpsi pada rentang UV-visible, yaitu 350-650 nm. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel ZnO pada P3HT tidak memberikan penambahan daerah absorpsi yang dapat dikarenakan rasio campuran P3HT jauh lebih besar dibandingkan nanopartikel ZnO sehingga karakteristik optik P3HT pada material hibrid P3HT:nanopartikel ZnO cenderung lebih dominan dibandingkan karakteristik optik nanopartikel ZnO. Akan tetapi, pengaruh nanopartikel ZnO dapat terlihat pada panjang gelombang *cut-off* yang bergeser ke daerah UV. Pergeseran panjang gelombang *cut-off* berpengaruh terhadap besar *optical band gap* material. Dengan menggunakan persamaan Planck, didapatkan bahwa besar *optical band gap* dari material hibrid P3HT:nanopartikel ZnO berada pada rentang 1,914–1,954 eV.

Tabel 2. Karakteristik optik nanopartikel ZnO, P3HT, dan P3HT:Nanopartikel ZnO.

Sampel	λ_{abs} (nm)	Optical Bandgap (eV)
Nanopartikel ZnO	330-400	3,299
P3HT	360-650	1,892
P3HT:nanopartikel ZnO	360-650	1,913

Tabel 2 memperlihatkan karakteristik optik dari nanopartikel ZnO, P3HT, dan P3HT:nanopartikel ZnO. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel ZnO pada P3HT dapat berpengaruh terhadap pergeseran rentang absorpsinya sehingga meningkatkan besar *optical band gap* pada material. Penambahan nanopartikel ZnO pada material P3HT juga memberikan adanya sistem *donor-acceptor* sehingga terdapat transfer elektron pada material yang berpengaruh terhadap kerapatan elektron dalam material. Peningkatan kerapatan elektron dalam material P3HT:nanopartikel ZnO bertanggung jawab terhadap peningkatan energi *gap* material, yaitu energi yang dibutuhkan elektron untuk dapat tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi [33].

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Y.P. Lee et.al, melalui karakterisasi *time-resolved photoluminescence* (TRPL) pada P3HT dan P3HT:nanopartikel ZnO, diketahui bahwa peluruhan PL pada material hibrid P3HT:nanopartikel ZnO relatif lebih cepat dibandingkan dengan P3HT yang dapat dikarenakan adanya sistem *donor-acceptor* pada material, sehingga terjadi peningkatan transfer elektron pada P3HT dan nanopartikel ZnO. Hasil dari spektroskopi PL memberikan bukti mengenai adanya interaksi antarmuka antara polimer konduktif tipe-p dengan nanokristal ZnO tipe-n pada material hibrid P3HT:nanopartikel ZnO. Hal ini berpengaruh terhadap transfer muatan efektif dari nanofiber P3HT ke nanopartikel ZnO melalui *nanowire*, sehingga mempengaruhi kerapatan elektron dalam material [30]. Perubahan kerapatan elektron dalam material ini yang dapat berpengaruh terhadap karakteristik optik pada material.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil TEM dan XRD, didapatkan bahwa rata-rata ukuran nanopartikel ZnO hasil sintesis adalah 8 nm dengan ukuran kristalit 3,88 nm dalam bentuk heksagonal. Hal ini menunjukkan bahwa sintesis nanopartikel ZnO dengan metode sol-gel telah berhasil, sehingga dapat dicampurkan dengan P3HT untuk melihat karakteristik optiknya. Hasil pengukuran UV-Vis menunjukkan rentang absorbansi pada nanopartikel ZnO berada pada daerah UV (330-400 nm), sedangkan P3HT dan P3HT:nanopartikel ZnO berada pada daerah UV-visible (350-650 nm). Penambahan nanopartikel ZnO pada P3HT tidak memberikan pengaruh terhadap penambahan daerah absorbansi yang dapat dikarenakan perbedaan rasio P3HT dan nanopartikel ZnO pada material hibrid P3HT:nanopartikel ZnO. Sifat optik P3HT cenderung dominan dibandingkan nanopartikel ZnO karena rasio blending P3HT lebih besar daripada nanopartikel ZnO. Meskipun begitu, penambahan nanopartikel ZnO berpengaruh terhadap besar λ_{CO} yang sedikit bergeser ke daerah UV sehingga mempengaruhi besar energi gap pada material.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Riset, Pengabdian Kepada Masyarakat, dan Inovasi (DRPMI) Universitas Padjadjaran yang telah memberikan dukungan dana penelitian dalam skema Hibah Riset Unpad (HRU)-RPLK (Riset Percepatan Lektor Kepala) tahun 2024 dengan No. 1642/UN6.3.1/PT.00/2024.

Daftar Pustaka

- [1] H. Shirakawa, E. J. Louis, A. G. MacDiarmid, C. K. Chiang, dan A. J. Heeger, "Synthesis of electrically conducting organic polymers: halogen derivatives of polyacetylene, $(CH)_x$ ", *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, 16, pp. 578-580, 1997.
- [2] C. K. Chiang, C. R. Fincher, Jr., Y. W. Park, A. J. Heeger, H. Shirakawa, E. J. Louis, S. C. Gau, dan A. G. MacDiarmid, "Electrical Conductivity in Doped Polyacetylene", *Physical Review Letters*, 39, pp. 1098-1101, 1977.
- [3] T. Nezakati, A. Seifalian, A. Tan, A. M. Seifalian, "Conductive Polymers: Opportunities and Challenges in Biomedical Applications", *Chem Rev.*, 118(14), pp. 6766-6843, 2018.
- [4] T. A. Skotheim, R. L. Elsenbaumer, J. R. Reynolds, Eds. *Handbook of Conducting Polymers*, New York: Marcel Dekker, 2008.
- [5] T. H. Le, Y. Kim, H. Yoon, "Electrical and Electrochemical Properties of Conducting Polymers", *Polymers*, 9(4), p. 150, 2017.

- [6] A. K. Mishra, "Conducting Polymers: Concept and Applications," *Journal of Atomic, Molecular, Condensate & Nano Physics*, 5(2), pp. 159-193, 2018.
- [7] M. M. Arif, J. Liu, L. Zhai, S. I. Khondaker, "Poly(3-hexylthiophene) crystalline nanoribbon network for organic field effect transistors", *Applied Physics Letters*, 96(24), pp. 243304, 2010.
- [8] X. Xiao, Z. Wang, Z. Hu, T. He, "Single Crystals of Polythiophene with Different Molecular Conformations Obtained by Tetrahydrofuran Vapor Annealing and Controlling Solvent Evaporation", *The Journal of Physical Chemistry*, 114(22), pp. 7452-7460, 2010.
- [9] Y. Yuan, J. Zhang, J. Sun, J. Hu, T. Zhang, Y. Duan, "Polymorphism and Structural Transition around 54°C in Regioregular Poly(3-hexylthiophene) with High Crystallinity As Revealed by Infrared Spectroscopy" *Macromolecules*, 44(23), pp. 9341-9350, 2011.
- [10] Nurussaniah, A. Supriyanto, R. Suryana, Anita, Boisandi, "Studi Pengaruh Penggunaan Poly(3-hexylthiophene) P3HT dan Grafit terhadap Kinerja Sel Surya", *Jurnal Fisika*, 3(1), 2013.
- [11] A. Bahtiar, A. Aprilia, Fitrillawati, "Sel Surya Polimer: State of Art dan Progres Penelitiannya di Universitas Padjadjaran", *Jurnal Material dan Energi Indonesia*, 1(1), pp. 7-14, 2011.
- [12] R. Kroon, M. Lenes, J. C. Hummelen, P. W. M. Blom, D. B. Boer, "Small Bandgap Polymers for Organic Solar Cells (Polymer Material Development in the Last 5 Yeas)", *Polymer Reviews*, 48, pp. 531-582, 2008.
- [13] Rashmi, A. K. Kapoor, U. Kumar, V. R. Balakrishnan, P. K. Basu, "Degradation Process in Organic Thin Film Devices Fabricated using P3HT", *Journal of Physics*, 68(3), pp. 489-498, 2007.
- [14] S. Gunes, H. Neugebauer, N. S. Sariciftci, "Conjugated Polymer-Based Organic Solar Cells", *Chem. Rev.*, 107, pp. 1324-1338, 2007.
- [15] H. Hoppe and N. S. Sariciftci, "Organic Solar Cells: An Overview", *J. Mater Res.*, 19(7), pp. 1924-1945, 2004.
- [16] W. Z. Tsung, C. H. Chun, C. T. Yu, Y. T. Gue, Lee, Yih, Wang, F. S. Wei, "Correlating Interface Heterostructure Charge Recombination and Device Efficiency of Poly(3-hexylthiophene)/TiO₂ Nanorod Solar Cell", *American Chemical Society*, 27, pp. 15255-15260, 2011.
- [17] Y. Zhang, M. K. Ram, E. K. Stefanakos and D. Y. Goswami, "Synthesis, Characterization, and Application of ZnO Nanowires," *Journal of Nanomaterials*, 2012, p. 22, 2012.
- [18] K. Davis, R. Yarbrough, M. Froeschle, J. White, H. Rathnayake, "Band gap engineered zinc oxide nanostructures via a sol-gel synthesis of solvent driven shape-controlled crystal growth", *RSC Advances*, 9(26), pp. 14638-14648, 2019.
- [19] M. Vaseem, A. Umar, Y. B. Hahn, "ZnO Nanoparticles: Growth, Properties, and Applications", *Metal Oxide Nanostructures and Their Applications*, 5(4), pp. 1-36, 2010.
- [20] N. Aggarwal, A. Vasisht, B. Singh, B. Singh, "Investigation of room temperature ferromagnetic behaviour in dilute magnetic oxides", *Integrated Ferroelectrics*, 186(1), pp. 10-16, 2018.
- [21] M. A. Borysiewicz, "ZnO as a Functional Material, a Review," *Crystals*, 9, pp. 1-29, 2019.
- [22] R. J. Barnes, R. Molina, J. Xu, P. J. Dobson, dan I. P. Thompson, "Comparison of TiO₂ and ZnO nanoparticles for photocatalytic degradation of methylene blue and the correlated inactivation of gram-positive and gram-negative bacteria", *Journal of Nanoparticle Research*, 15(2), p. 1432, 2013.
- [23] O. S. Ayanda, B. O. Adeleke, O. H. Aremu, F. B. Ojobola, S. M. Nelana, "Photocatalytic

- Degradation of Metronidazole Using Zinc Oxide Nanoparticles Supported on Acha Waste”, Indonesian Journal of Chemistry, 23(1), pp. 158-169, 2023.
- [24] S. Saleem, M. H. Jameel, A. Rehman, M. B. Tahir, M. M. Hessien, “Evaluation of structural, morphological, optical, and electrical properties of zinc oxide semiconductor nanoparticles with microwave plasma treatment for electronic device applications”, Journal of Materials Research and Technology, 19, pp. 2126-2134, 2022.
- [25] S. Sawyer, L. Qin, C. Shing, “Zinc Oxide Nanoparticles for Ultra Violet Photodetection”, International Journal of High-Speed Electronics and Systems, 20(1), pp. 183-194, 2011.
- [26] K. Sugiyama, T. Kojima, H. Fukuda, H. Yashiro, T. Matsuura, Y. Shimoyama, “ESR and X-ray diffraction studies on thin films of poly-3-hexylthiophene: Molecular orientation and magnetic interactions”, The Solid Films, 516(9), pp. 2691-2694, 2008.
- [27] D. E. Motaung, G. F. Malgas, C. J. Arendse, dan T. Malwela, “Investigation on the effects of substrate annealing on the properties of polymer blends”, Materials Chemistry and Physics, 124, pp. 208-216, 2010.
- [28] Z. Hu, J. Jakowski, C. Zheng, J. Strzalka, B. G. Sumpter, R. Verduzco, “An experimental and computational study of donor-linker-acceptor block copolymers for organic photovoltaics”, Journal of Polymer Science B: Polymer Physics, 56, pp. 1135-1143, 2018.
- [29] J. Jakowski, J. Huang, S. Garashchuk, Y. Luo, K. Hong, J. Keum, dan B. G. Sumpter, “Deuteration as a Means to Tune Crystallinity of Conducting Polymers”, The Journal of Physical Chemistry Letters, 8(18), pp. 4333-4340, 2017.
- [30] Y. P. Lee, C. J. Chiang, P. C. Jen, B. T. Chou, L. Wang, Y. Y. Cheng, Y. H. Lee, Y. F. Chen, C. C. Hsieh, dan C-A. Dai, “Synergistic In Situ Hybrid Synthesis of Highly Crystalline P3HT/ZnO Nanowires at Elevated Pressures”, ACS Applied Energy Materials, 1(5), pp. 1930-1941, 2018.
- [31] N. Yudasari, R. Anugrahwidya, D. Tahir, M. M. Suliyanti, Y. Herbani, C. Imawan, M. Khalil, D. Djuhana, “Enhanced photocatalytic degradation of rhodamine 6G (R6G) using ZnO–Ag nanoparticles synthesized by pulsed laser ablation in liquid (PLAL),” Journal of Alloys and Compounds, 886, p. 161291, 2021.
- [32] L. Hrostea, M. Girtan, R. Mallet, L. Leontie, “Optical and Morphological Properties of P3HT and P3HT:PCBM Thin Films Used in Photovoltaic Applications”, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 374, pp. 1-6, 2018.
- [33] A. S. Afrozi dan S. Sudaryanto, ”Penambahan N pada TiO₂ dan Pengaruhnya pada Energi Band Gap TiO₂ sebagai Bahan Pengolah Limbah”, BATAN, pp. 59-64, 2016