

KARAKTERISASI SIFAT OPTIK DAN OPTOELEKTRONIK PADA *MULTILAYER* TUNGSTEN DISULFIDA (WS_2)

OPTICAL AND OPTOELECTRONIC CHARACTERIZATION OF MULTILAYER TUNGSTEN DISULFIDA (WS_2)

Dhika Marlia Subekti¹, I. P. Handayani^{2*}, Abrar Ismardi³

^{1,2,3} Universitas Telkom, Bandung

dhikamarlias@telkomuniversity.ac.id¹, iphandayani@telkomuniversity.ac.id²

abrarselah@telkomuniversity.ac.id³

Abstrak

Penelitian lapisan tipis telah banyak diminati pada bidang teknologi seperti elektronik, spintronik, optoelektronik dan penyimpanan energi. *Tungsten Disulfide* (WS_2) memiliki sifat optik dan optoelektronik yang menarik, sehingga menjanjikan dalam aplikasi perangkat optoelektronik seperti *photodetector*, perangkat pemancar cahaya (LED), dan laser. Karakterisasi sifat optik dan optoelektronik *multilayer* pada nanomaterial WS_2 masih perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui pengaruh intensitas cahaya pada sifat optik larutan WS_2 pada berbagai macam pelarut dan sifat optoelektronik *multilayer* WS_2 pada substrat fleksibel. Pada Tugas Akhir ini, penulis melakukan penelitian dengan menguji sifat optik larutan WS_2 pada pelarut IPA/air dan NMP, serta sifat optoelektronik WS_2 yang dideposisi di atas substrat PET dengan menggunakan metode *dropcasting*. Sifat optoelektronik diteliti dengan cara diamati perubahan arus saat material dipengaruhi tegangan tertentu serta saat diberi dan tanpa intensitas cahaya. Hasil karakteristik kurva I-V WS_2 menunjukkan sampel WS_2 cenderung bersifat insulator saat diberi variasi tegangan dari -5 V sampai 5 V dengan arus yang dihasilkan sebesar -4.6 nA sampai dengan 5.4 nA saat tanpa cahaya, dan -2.8 nA sampai dengan 3.7 nA saat diberi cahaya. Nilai arus menurun ketika diberi regangan mekanik sebesar 20%. Hasil *photoluminescence* (PL) saat dieksitasi oleh laser dengan panjang gelombang 532 nm berada pada 634 nm, 611 nm, dan 566 nm. Spektrum PL ditemukan bergantung pada panjang gelombang. Selain itu, pada penelitian ini dilakukan juga karakterisasi Uv-Vis, PSA, SEM, dan EDX. Hasil karakteristik Uv-Vis menunjukkan puncak eksiton A dan B berturut-turut di panjang gelombang 638 dan 529 nm saat WS_2 dieksfoliasi 3 jam. Puncak eksiton A dan B berturut-turut bergeser ke panjang gelombang 634.9 dan 533 nm saat WS_2 dieksfoliasi 8 jam. Ukuran rata-rata dari WS_2 yaitu 124.2 nm saat dikarakterisasi PSA.

Kata Kunci: WS_2 , optoelektronik, optik, photoluminescence, drop-casting, Uv-Vis, PSA, SEM, EDX

Abstract

Thin-film research has been of great interest in technology fields such as electronics, spintronics, optoelectronics, and energy storage. Tungsten Disulfide (WS_2) has attracted optic and optoelectronic properties, and it is promising for the applications of optoelectronic devices such as photodetectors, light-emitting devices (LEDs), and lasers. The characterization of optic and optoelectronic properties on multilayer WS_2 nanomaterials are still needed the further researches. This study investigates the effect of light intensity on the optic properties of WS_2 when it is exfoliated on different solvent, and also the optoelectronic properties multilayer WS_2 on the flexible substrat. This study used the WS_2 in the IPA/water and NMP solvent. For optoelectronic properties measurement, the WS_2 was deposited on PET substrates using drop-casting method. The optoelectronic properties are observed by measuring the current changes for various voltage with and without light illumination. The I-V curve characteristics shows that the WS_2 sample tends to be insulator when the voltage were varied from -5 V to 5 V. The current are in range of -4.6 nA to 5.4 nA, and -2.8 nA to 3.7 nA when the measurement was conducted without and with light irradiation, respectively. The current decreased when 20 % mechanical strain was applied. The photoluminescence spectra were observed at 634 nm, 611 nm, and 566 nm when the sample was excited by a laser with a wavelength of 532 nm. The photoluminescence spectra were found to wavelength dependent. In addition, this study also carried out the characterization of UV-Vis, PSA, SEM, dan EDX. Uv-Vis characteristics showed the peaks of exciton A and B at 638 nm and 529 nm, respectively, when WS_2 was exfoliated for 3 hours. The peaks of exciton A and B are shifted to 634.9 nm and 533 nm, respectively, when WS_2 was exfoliated for 8 hours. The average size of WS_2 was 124.2 nm when it was characterized by PSA.

Keywords: WS_2 , optoelectronic, optic, photoluminescence, drop-casting, Uv-Vis, PSA, SEM, EDX

1. Pendahuluan

Penelitian lapisan tipis telah banyak diminati pada bidang teknologi seperti elektronik, spintronik, optoelektronik dan penyimpanan energi [1]. Salah satu material yang digunakan dalam lapisan tipis berskala nanometer yaitu Logam Transisi Dichalcogenide atau *Transition Metal Dichalcogenide Compound* (TMDC) [2]. *Tungsten Disulfide* (WS_2) merupakan salah satu TMDC dengan sifat listrik dan optoelektroniknya yang menarik yaitu di antaranya adalah memiliki mobilitas pembawa muatan yang tinggi, dan emisi cahaya yang dapat terpolarisasi [3]. WS_2 memiliki *indirect band gap* sebesar 1.4 eV saat berbentuk *bulk* dan *direct band gap* sebesar 2.1 eV saat berbentuk lapisan tunggal [4]. Semikonduktor dengan *direct band gap* saat berbentuk lapisan tunggal memiliki *photoluminescence* yang kuat [5]. Mobilitas pembawa muatan WS_2 pada *Field Effect Transistor* (FET) yaitu $337\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ pada suhu 200 K [3]. Dengan karakteristik listrik dan optoelektronik yang baik maka WS_2 merupakan salah satu material yang paling menjanjikan dalam aplikasi optoelektronik [3]. Aplikasi perangkat optoelektronik pada WS_2 di antaranya adalah *photodetector*, perangkat pemancar cahaya (LED), dan laser [3]. *Photodetector* merupakan alat yang digunakan untuk melakukan proses fotodeteksi [6]. Fotodeteksi adalah proses mengubah sinyal cahaya menjadi sinyal listrik untuk mendeteksi intensitas cahaya [6]. Dikarenakan pada WS_2 memiliki sifat optoelektronik yang baik maka deteksi foto pada *photodetector* pun sangat sensitif [6].

Pada penelitian sebelumnya dilakukan pengujian Uv-Vis WS_2 yang dieksfoliasi dengan fasa cair menggunakan pelarut IPA dan NMP [7] serta pengujian PL menggunakan pelarut IPA/air dan NMP [8, 9]. Pada pengujian Uv-Vis menghasilkan puncak serapan eksiton A dan B yang masing-masing terjadi pada 631 nm dan 630 nm dengan pelarut IPA, sedangkan puncak serapan eksiton A dan B menggunakan pelarut NMP masing-masing terjadi pada 628 nm dan 528 nm [7]. Pada pengujian PL menggunakan pelarut 7/3 IPA/air menghasilkan puncak emisi cahaya pada 655 nm dan 610 nm [8], sedangkan dengan menggunakan pelarut NMP menghasilkan puncak utama emisi cahaya pada 640 nm, 690 nm, dan 675 nm [9]. Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan pengujian sifat optoelektronik material WS_2 pada *photodetector* dengan menghasilkan arus sebesar $1,5 \times 10^{-10}$ A saat diberi intensitas cahaya sebesar $150\text{mW}/\text{cm}^2$ [10]. Sedangkan pada *photodetector* saat tidak diberi pengaruh cahaya atau dalam keadaan gelap dengan tegangan 10 Volt maka *photocurrent* yang dihasilkan bernilai 0 A [10]. Sifat optoelektronik WS_2 yang dikarakterisasi dengan menggunakan *Agilent B1500A semiconductor parameter analyzer* mendapatkan arus sebesar $0,5 \times 10^{-11}$ A saat diberi tegangan 5 Volt dan intensitas cahaya sebesar $0,032\ \mu\text{W}$ [11]. Sedangkan jika digunakan tegangan yang sama dan tanpa diberi pengaruh cahaya maka *photocurrent* yang dihasilkan bernilai 0 A [11].

Pada penelitian ini dilakukan proses karakterisasi Uv-Vis, SEM, EDX, PSA, *Photoluminescence* (PL), dan Optoelektronik lapisan WS_2 . Karakterisasi uji mekanik pun dilakukan untuk mengetahui pengaruh gangguan mekanik terhadap hasil uji listrik pada sampel. Proses deposisi dilakukan dengan cara *drop casting* sampel cair WS_2 . Pengukuran sifat optoelektronik WS_2 menggunakan *Keithley 2400*. Pada proses ini sampel WS_2 dideposisikan di atas substrat PET untuk mengidentifikasi kurva arus terhadap tegangan (I-V) saat diberi pengaruh maupun tanpa cahaya. Substrat PET dipilih dikarenakan banyak digunakan dalam piranti elektronik seperti elektronik fleksibel, optoelektronik, dan fotovoltai (PV) [12]. Pada penelitian ini diharapkan mampu memberikan informasi tambahan mengenai sifat optoelektronik dari bahan nanomaterial WS_2 untuk mengembangkan teknologi yang lebih luas lagi.

2. Perancangan Penelitian

2.1 Proses Preparasi Sampel

Langkah pertama WS_2 yang berbentuk serbuk dilarutkan dengan menggunakan 7/3 V/V IPA/Aquadest sebagai pelarut hingga berbentuk larutan WS_2 5 mg/mL dan 5 mg/mL NaOH sebagai interkalator. Campuran antara serbuk dan larutan-larutan tersebut disonikasi menggunakan ultrasonikator probe sonik tip selama 3 dan 8 jam. Untuk memisahkan larutan dan endapan pada sampel maka setelah dilakukan sonikasi, larutan disentrifugasi selama 80 menit dengan kecepatan 3000 rpm. Proses ini bertujuan untuk memisahkan endapan WS_2 yang berat dan lebih ringan (*supernatant*) [13]. Sedangkan pada WS_2 dengan pelarut NMP, 10 mg serbuk WS_2 dicampurkan dengan 10 mL NMP yang berperan sebagai pelarut hingga berbentuk larutan WS_2 1 mg/mL dan 2 mg/mL NaOH sebagai interkalator. Proses pencampuran serbuk WS_2 dan pelarut tersebut dilakukan di dalam *centrifuge tube* dan disonikasi menggunakan ultrasonikator selama 60 jam. Setelah itu dilakukan sentrifugasi selama 30 menit dengan kecepatan 2500 rpm [14]. Selanjutnya pada kedua sampel tersebut dilakukan proses deposisi di atas substrat PET dengan menggunakan metode *drop casting*. Kemudian dilakukan proses pengeringan sampel dan diberi elektroda pasta perak agar dapat diamati sifat listriknya.

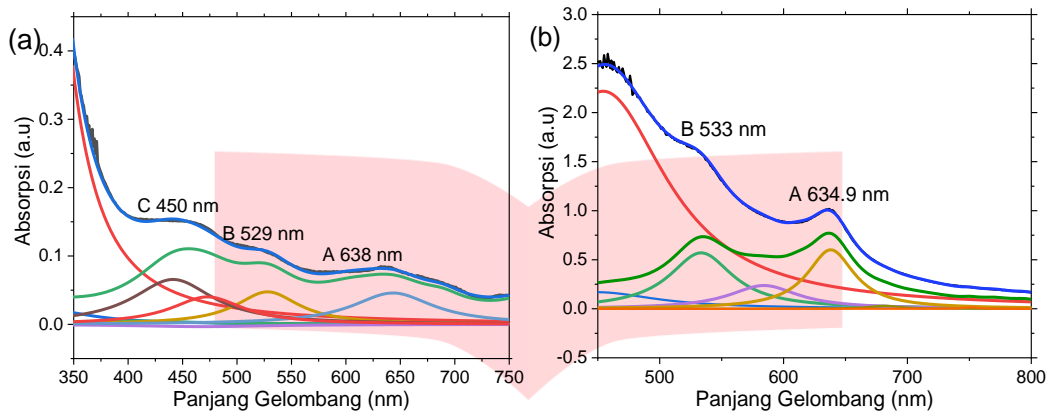
2.2 Karakterisasi WS_2

Pada penelitian ini sifat listrik diamati dengan menggunakan *Keithley 2400*, saat dan tanpa diberi intensitas cahaya. Sumber cahaya yang diberikan yaitu laser Thorlabs dengan panjang gelombang 633 nm. Sifat

listrik saat diberi gangguan mekanik juga diamati dengan menggunakan alat uji tarik dan *Microscope Cooling Tech*. Uv-Vis dikarakterisasi menggunakan Agilent Cary 60 Uv-Vis, sedangkan *Photoluminescence* dikarakterisasi menggunakan *Picosecond Laser TC SPC*. Morfologi permukaan WS₂ yang dideposisi di atas substrat ITO/PET dikarakterisasi menggunakan scanning electron microscopy (SEM SU3500) dengan perbesaran 30.000 kali yang dilengkapi dengan analisis energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) mapping. Ukuran distribusi partikel (PSA) dikarakterisasi menggunakan Horiba S-Z 100.

3. Hasil dan Pembahasan

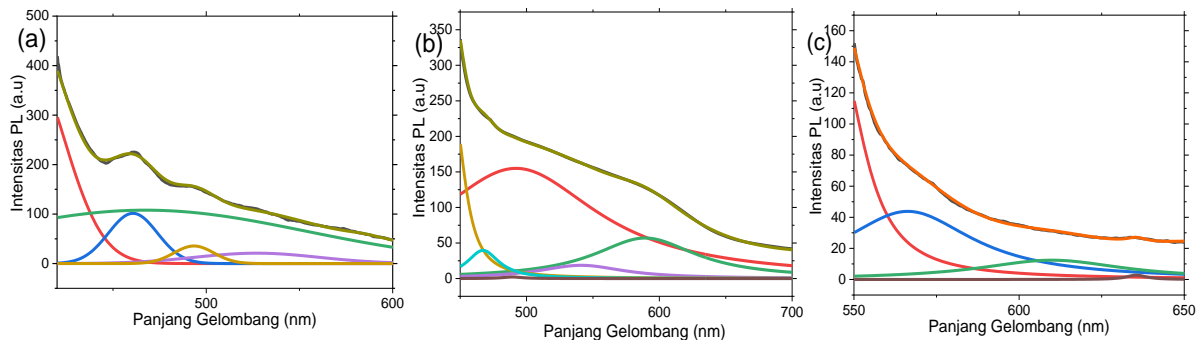
3.1 Hasil Karakterisasi Uv-Vis



Gambar 3.1 Hasil Karakteristik Uv-Vis WS₂ (a) 3 jam sonikasi (b) 8 jam sonikasi

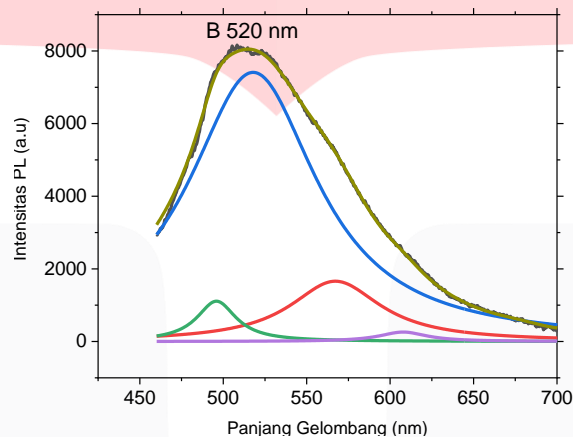
Gambar 3.1 (a) merupakan hasil karakterisasi Uv-Vis pada sampel WS₂ dengan pelarut IPA/air yang disonikasi selama 3 jam. Pada kurva (Gambar 3.1 (a)) tersebut dapat diketahui bahwa daerah spektrum serapan terjadi pada rentang 350 nm sampai 750 nm yang membentuk tiga puncak serapan eksiton. Puncak A pada 638 nm, puncak B pada 529 nm, dan puncak C pada 450 nm. Puncak A dan B merupakan puncak eksiton, masing-masing terjadi pada 1.943 eV dan 2.34 eV. Kedua puncak ini merupakan keadaan eksiton energi terendah. *Flakes* pada WS₂ berpengaruh pada penyerapan eksiton pada puncak A dan B. Puncak C terjadi pada 450 nm merupakan transisi optik antara kerapatan puncak di pita valensi dan pita konduksi [15, 16]. Terdapat puncak lainnya yaitu pada 643 nm (kurva biru muda), 529 nm (kurva kuning), dan 443 nm (kurva coklat). Puncak pada 643 nm (kurva biru muda) merupakan eksiton A, 529 nm (kurva kuning) merupakan eksiton B, dan 443 nm (kurva coklat) merupakan transisi optik antara kerapatan puncak di pita valensi dan pita konduksi [15]. Puncak hijau merupakan pengurangan antara puncak biru dan puncak merah (*exponential decay*). Gambar 3.1 (b) merupakan hasil karakterisasi Uv-Vis pada sampel WS₂ dengan pelarut IPA/air yang disonikasi selama 8 jam. Pada kurva (Gambar 3.1 (b)) tersebut dapat diketahui bahwa daerah spektrum serapan terjadi pada rentang 450 nm sampai 800 nm yang membentuk dua puncak serapan eksiton. Puncak A pada 634.9 nm, puncak B pada 533 nm merupakan puncak eksiton yang masing-masing terjadi pada 1.953 eV dan 2.326 eV. Terdapat puncak lainnya yaitu pada 643 nm (kurva biru muda), 529 nm (kurva kuning), dan 443 nm (kurva coklat). Puncak pada 643 nm (kurva biru muda) merupakan eksiton A, 529 nm (kurva kuning) merupakan eksiton B, dan 443 nm (kurva coklat) merupakan transisi optik antara kerapatan puncak di pita valensi dan pita konduksi [15]. Puncak hijau merupakan pengurangan antara puncak biru dan puncak merah (*exponential decay*). Intensitas serapan Uv-Vis WS₂ saat disonikasi selama 8 jam lebih tinggi dibandingkan 3 jam sonikasi karena semakin banyak jumlah WS₂ yang tereksfoliasi.

3.2 Hasil Pengukuran Photoluminescence Lapisan WS₂



Gambar 3.2 Hasil Karakteristik PL sampel A yang diesksitasi dengan laser pada panjang gelombang (a) 405 nm (b) 420 nm dan (c) 532 nm

Gambar 3.2 menunjukkan hasil karakterisasi spektrum *photoluminescence* pada larutan WS_2 dengan pelarut 7/3 IPA/air (sampel A) yang dieksitasi menggunakan laser dengan panjang gelombang yang berbeda dan di-*fitting* menggunakan fungsi distribusi Lorentzian. Gambar 3.2 (a) menunjukkan spektrum *photoluminescence* menggunakan laser dengan panjang gelombang 405 nm yang terjadi pada rentang 420 nm sampai dengan 600 nm. Pada rentang ini terdiri dari beberapa puncak yaitu 460 nm, 495 nm, dan 530 nm. Puncak 530 nm (kurva ungu) merupakan eksiton B [17]. Gambar 3.2 (b) menunjukkan spektrum *photoluminescence* menggunakan laser dengan panjang gelombang 420 nm yang terjadi pada rentang 450 nm sampai dengan 700 nm. Pada rentang ini terdiri dari beberapa puncak yaitu 467 nm, 496 nm, 544 nm dan 594 nm. Pada puncak 594 nm (kurva hijau) yang merupakan eksiton A [18], dan puncak 544 nm (kurva ungu) merupakan eksiton B [17]. Gambar 3.2 (c) menunjukkan spektrum *photoluminescence* menggunakan laser dengan panjang gelombang 532 nm yang terjadi pada rentang 550 nm sampai dengan 650 nm. Pada rentang ini terdiri dari beberapa puncak yaitu 634 nm, 611 nm, dan 566 nm. Puncak 634 nm (kurva ungu tua) mengindikasikan sebagai *direct PL* [19]. Puncak 611 nm (kurva hijau) merupakan eksiton A [18]. Sedangkan puncak 566 nm (kurva biru) merupakan eksiton yang timbul karena cacat pada permukaan dan cacat titik dalam bidang atom S yang hilang dari kisi heksagonal WS_2 [20]. Gambar 3.2 menunjukkan bahwa ketika suatu sampel dieksitasi menggunakan laser dengan panjang gelombang yang berbeda maka puncak yang dihasilkan akan berada pada panjang gelombang yang berbeda.

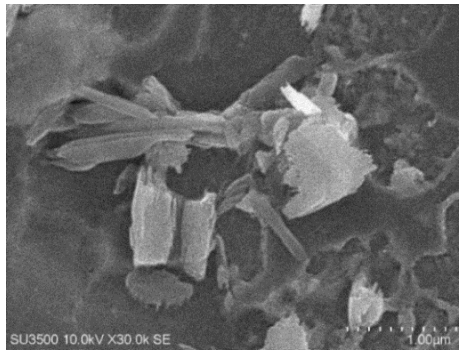


Gambar 3.3 Hasil Karakteristik PL sampel C

Gambar 3.3 menunjukkan hasil karakterisasi spektrum *photoluminescence* pada sampel WS_2 yang dideposisi di atas substrat PET dengan pelarut NMP (sampel C). Spektrum *photoluminescence* ini terjadi pada rentang 470-700 nm yang dieksitasi oleh laser dengan panjang gelombang 450 nm dan di-*fitting* menggunakan fungsi distribusi Lorentzian. Puncak utama PL terlihat pada panjang gelombang 520 nm (kurva biru) yang menurut referensi [17] merupakan eksiton B dan puncak PL pada 608 nm (kurva ungu) yang merupakan eksiton A [18]. Terdapat puncak lainnya yaitu pada 495 nm (kurva hijau) dan 566 nm (kurva merah). Kedua puncak ini merupakan eksiton yang timbul karena cacat pada permukaan dan cacat titik dalam bidang atom S yang hilang dari kisi heksagonal WS_2 [20]. Nilai intensitas dari *photoluminescence* bergantung pada jumlah lapisan dari WS_2 . Semakin sedikit jumlah lapisan maka akan menghasilkan semakin tinggi intensitas *photoluminescence* [19].

3.3 Hasil SEM dan EDX

Untuk menganalisa keadaan permukaan lapisan WS_2 maka dilakukan uji SEM seperti pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Permukaan lapisan WS_2 sampel A pada substrat ITO/PET dengan perbesaran 30.000 kali

Gambar 3.4 menampilkan hasil permukaan lapisan WS_2 yang dideposisikan pada substrat ITO/PET. Setelah diamati pada perbesaran 30.000 kali, lapisan WS_2 sudah mulai menunjukkan bentuk lembaran-lembaran dengan ukuran $1\ \mu m$ yang masih belum terdistribusi secara merata pada sampel. Namun pada permukaan lapisan terdapat permukaan yang padat dan tipis. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan ketebalan lapisan pada sampel. Untuk mengetahui kandungan unsur yang terdapat pada lapisan tersebut maka dilakukan uji EDX (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*) yang ditunjukkan pada Tabel 3.1.

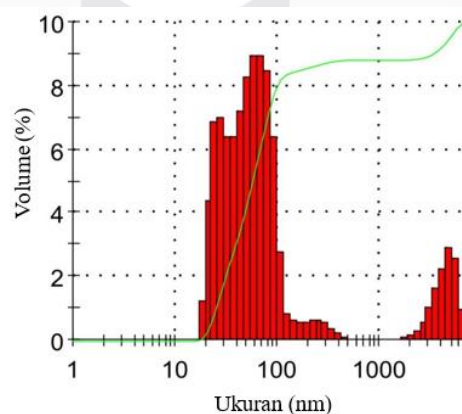
Tabel 3.1 Persentase kandungan unsur WS_2 di atas substrat ITO/PET

Unsur	% Berat	% Atom
C	27.32	45.71
O	33.86	42.52
Na	6.56	5.73
W	12.33	1.35
S	2.65	1.66
In	17.28	3.02

Tabel 3.1 memperlihatkan persentase kandungan unsur C, O, Na, W, S dan In. Dapat dilihat dari (Tabel 3.1) tersebut bahwa unsur yang mendominasi adalah C, O dan In. Ketiga unsur tersebut diperoleh dari IPA/air sebagai pelarut, NaOH sebagai interkalator dan ITO/PET sebagai substrat yang jumlahnya lebih banyak dibandingkan lapisan WS_2 .

3.4 Hasil Analisis PSA

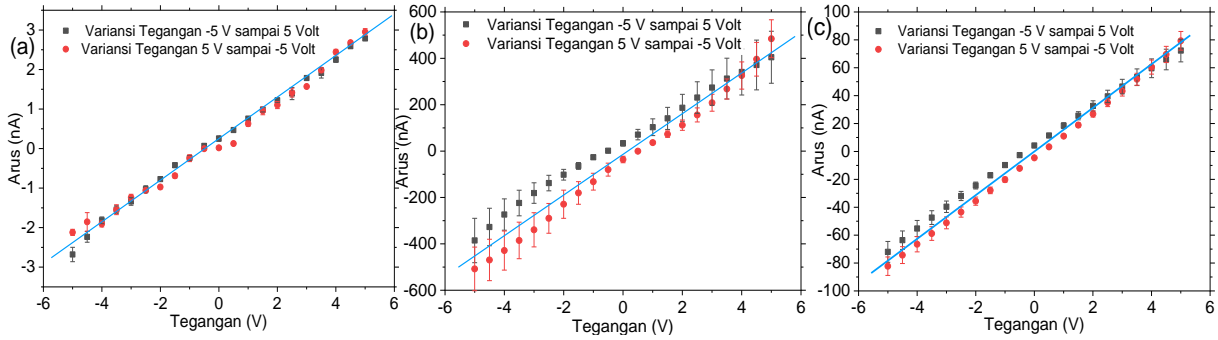
Untuk menganalisa ukuran partikel WS_2 maka dilakukan uji PSA (*Particle Size Analyzer*) seperti terlihat pada Gambar 3.5 berikut.



Gambar 3.5 Hasil Karakterisasi *Particle Size Analyzer* (PSA)

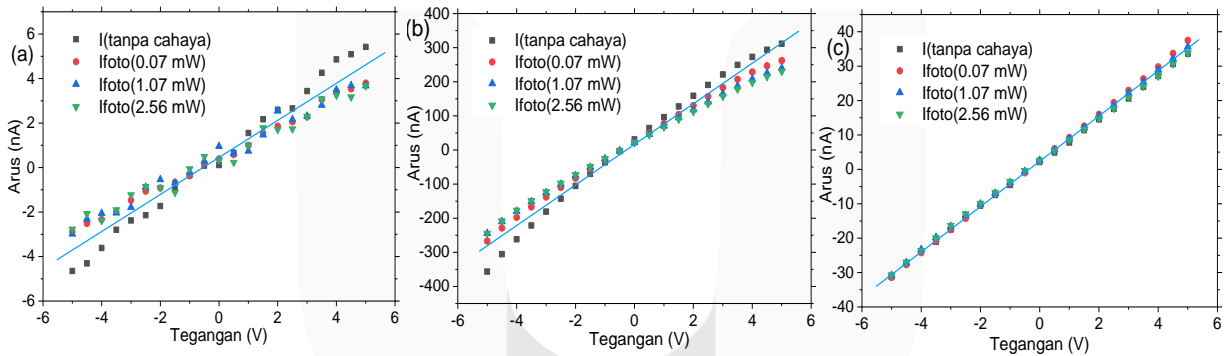
Gambar 3.5 merupakan hasil karakterisasi ukuran distribusi partikel WS_2 berupa grafik yang memiliki ukuran partikel dalam kisaran 18.17 nm sampai dengan 164.2 nm. Adapun partikel WS_2 yang ukurannya sangat besar yaitu dari kisaran 2000 nm sampai 5560 nm yang jumlahnya lebih sedikit. Puncak distribusi tertinggi pada ukuran partikel dalam kisaran 58.77 nm sampai 68.06 nm dengan volume rata-rata 8.9%. Hasil ukuran rata-rata partikel (*Z-Average*) dari WS_2 yaitu 124.2 nm.

3.5 Hasil Sifat Listrik



Gambar 3.6 Kurva karakterisasi I-V (a) sampel A, (b) sampel B, dan (c) sampel C.

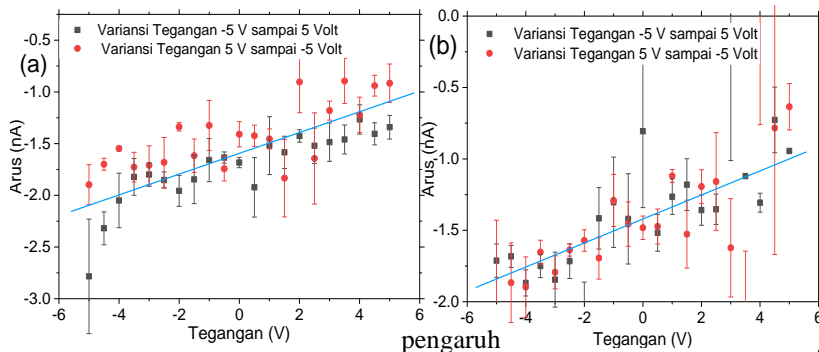
Gambar 3.6 (a-c) merupakan kurva I-V dari sampel A, B dan C. Sampel A merupakan WS₂ dengan IPA/air sebagai pelarutnya, sedangkan pada sampel B dan C merupakan WS₂ dengan NMP sebagai pelarutnya. Karakteristik kurva I-V pada sampel WS₂ dengan pelarut IPA/air cenderung berperilaku *ohmic* seperti pada ditunjukkan pada Gambar 3.6 (a) menunjukkan karakteristik kurva I-V milik sampel A yang cenderung insulator namun arus yang mengalir dari -2.68 nA sampai 2.78 nA sedikit mengalami fluktuasi. Pada sampel ini jarak antar elektroda sebesar 0.368 mm. Gambar 3.6 (b) menunjukkan perilaku kurva I-V milik sampel B yang berperilaku cenderung *ohmic* dengan arus yang mengalir dari -508 nA sampai 484.4 nA dan resistansinya sebesar 7.07 MΩ. Pada sampel ini jarak antar elektroda sebesar 0.291 mm. Gambar 3.6 (c) menunjukkan perilaku kurva I-V dari sampel C yang berperilaku *ohmic* dengan arus mengalir dari -82.27 nA sampai 79.32 nA dan resistansi sebesar 44 MΩ. Pada sampel ini jarak antar elektroda sebesar 0.347 mm. Arus yang dihasilkan sampel B dan C lebih tinggi bila dibandingkan sampel A, hal ini dikarenakan pada sampel B dan C menggunakan pelarut NMP yang dapat memecah lapisan lebih efektif dibandingkan pelarut IPA/air.



Gambar 3.7 Kurva Karakterisasi I-V WS2 saat diberi cahaya pada (a) sampel A, (b) sampel B, dan (c) sampel C

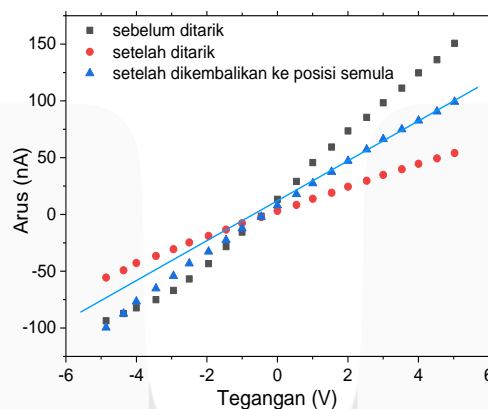
Gambar 3.7 (a) menunjukkan karakteristik kurva I-V pada sampel A saat disinari cahaya laser. Saat sebelum diberi cahaya arus yang mengalir sebesar -4.6 nA sampai 5.4 nA. Namun saat diberi cahaya sebesar 0.07 mW arus yang dihasilkan mengalami penurunan dengan arus yang mengalir dari -2.8 nA sampai 3.7 nA. Saat cahaya laser dinaikkan menjadi sebesar 1.07 mW arus yang mengalir sedikit mengalami penurunan arus serta fluktuasi dari -2.98 nA hingga 3.67 nA. Saat cahaya laser dinaikkan lagi sebesar 2.56 mW arus yang mengalir hampir sama dengan yang sebelumnya yaitu -2.7 nA sampai 3.67 nA namun tingkat fluktuasi cenderung sedikit lebih besar. Gambar 3.7 (b) menunjukkan karakteristik kurva I-V pada sampel B saat disinari cahaya laser. Saat sebelum diberi cahaya arus yang mengalir sebesar -356 nA sampai 311.5 nA. Namun saat diberi cahaya sebesar 0.07 mW arus yang dihasilkan mengalami penurunan dengan arus yang mengalir dari -267 nA sampai 262 nA. Saat cahaya laser dinaikkan menjadi sebesar 1.07 mW dan 2.56 mW arus sedikit mengalami penurunan yang masing-masing menjadi -244 nA sampai 239 nA dan -244 nA sampai 230 nA. Gambar 3.7 (c) menunjukkan karakteristik kurva I-V pada sampel C saat disinari cahaya laser. Saat sebelum diberi cahaya arus yang mengalir sebesar -31.2 nA sampai 33.64 nA. Saat diberi cahaya sebesar 0.07 mW arus yang dihasilkan mengalami sedikit kenaikan dengan arus yang mengalir dari -31.4

nA sampai 37.47 nA. Namun saat cahaya laser dinaikkan menjadi sebesar 1.07 mW dan 2.56 mW arus yang mengalir sedikit mengalami penurunan yang masing-masing menjadi -30.8 nA sampai 35.58 nA dan -30.7 nA sampai 33.8 nA. Penurunan arus saat intensitas cahaya meningkat diduga karena intensitas laser yang sangat besar sehingga menimbulkan efek *overheating* yang dapat merusak sampel.



Gambar 3. 8 Kurva Karakterisasi I-V WS₂ sampel A (a) saat sebelum diberi gangguan mekanik (b) setelah ditarik (c) setelah dikembalikan ke posisi semula

Gambar 3.8 menampilkan kurva karakteristik I-V WS₂ pada sampel A di atas substrat PET di bawah pengaruh gangguan mekanik ketika tegangan divariasikan dari -5 V hingga 5 V. Gambar 3.8 (a) menunjukkan kurva karakteristik I-V WS₂ pada sampel saat sebelum diberi gangguan mekanik yang menghasilkan arus mengalir dari -2.3 nA sampai dengan -1.34 nA secara fluktuatif dan cenderung bersifat insulator. Bila dibandingkan dengan Gambar 3.8 (b) dan (c) saat diberi gangguan mekanik, maka kurva karakteristik I-V WS₂ saat diberi gangguan mekanik dengan strain (ϵ_b) sebesar 11 % menghasilkan arus yang cenderung lebih fluktuatif, diduga karena terjadi retakan pada sampel WS₂ saat dilakukan tarikan. Arus yang dihasilkan sangat kecil diduga karena jarak elektroda *silver paste* yang digunakan saat pengujian uji listrik mekanik masih sangat lebar yaitu sebesar 0.8 mm bila dibandingkan dengan pengujian listrik biasa seperti pada (Gambar 3.6 a) dengan jarak elektroda sebesar 0.368 mm.



Gambar 3. 9 Kurva Karakterisasi I-V WS₂ sampel C saat diberi gangguan mekanik

Gambar 3.9 menampilkan kurva karakteristik I-V WS₂ pada sampel C di atas substrat PET di bawah pengaruh gangguan mekanik ketika tegangan divariasikan dari -5 V hingga 5 V. Kurva karakteristik I-V WS₂ pada sampel C saat sebelum diberi gangguan mekanik (kurva hitam) menghasilkan arus *ohmic* yang mengalir dari -93.6 nA sampai dengan -150.7 nA cenderung bersifat insulator. Namun saat sampel tersebut diberi gangguan mekanik berupa tarikan (kurva merah) dengan *strain* (ϵ_b) sebesar 20%, sampel tersebut mengalami penurunan arus menjadi -55.58 nA sampai 54 nA. Ketika sampel tersebut dikembalikan ke posisi semula (kurva biru) arus tidak dapat kembali seperti saat sampel sebelum ditarik. Arus yang mengalir ini yaitu dari -99.4 nA sampai 99.2 nA.

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Spektra hasil Uv-Vis supernatant WS₂ pada pelarut IPA/air berada pada 634.9 nm dan 533 nm.
2. Hasil *photoluminescence* sampel WS₂ dengan pelarut IPA/air pada eksitasi laser yang berbeda menghasilkan puncak *photoluminescence* yang berada pada panjang gelombang yang berbeda. Puncak utama *photoluminescence* sampel WS₂ dengan pelarut NMP pada eksitasi laser 450 nm berada pada 520 nm.
3. Karakterisasi sifat optoelektronik menunjukkan perilaku insulator dengan arus *ohmic* pada sampel WS₂ dengan pelarut IPA/air dan NMP, namun terjadi penurunan arus saat diberi cahaya dan gangguan mekanik. Sampel WS₂ dengan pelarut IPA/air menghasilkan arus yang lebih kecil dibandingkan dengan pelarut NMP.

REFERENSI

- [1] Ravindra Jha, P. K. G. (2017). An effective liquid-phase exfoliation approach to fabricate tungsten disulfide into ultrathin two-dimensional semiconducting nanosheets. *Journal of Materials Science*, 52(12), 7256–7268
- [2] Ushma Ahuja, Alpa Dashora, Harpal Tiwari, Dushyant C. Kothari, K. V. (2014). Electronic and optical properties of MoS₂-WS₂ multi-layers: First principles study. *Computational Materials Science*, 92, 451–456.
- [3] Changyong Lan, Chun Li, Johnny C. Ho, and Y. L. (2020). 2D WS₂: From Vapor Phase Synthesis to Device Applications. *Advanced Electronic Materials*, 2000688, 1–36
- [4] Athalya Maida Utama, Memoria Rosi, I. P. H. (2019). EFEK VARIASI SUBSTRAT TERHADAP SIFAT LISTRIK TUNGSTEN DISULFIDA. *Journal of the Japan Welding Society*, 88(5), 427–4347
- [5] Qing Hua Wang, Kourosh Kalantar Zadeh, Andras Kis, Jonathan N. Coleman, Michael S, S. (2012). Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides. *Nature Nanotechnology*, 7(11), 699–7123
- [6] Xiao Congxin, L. J. (2016). Recent advances in optoelectronic properties and applications of two-dimensional metal chalcogenides. *Journal of Semiconductors*, 37(5)
- [7] Loeian, M. S., Ziolkowska, D. A., Khosravi, F., Jasinski, J. B., & Panchapakesan, B. (2017). Exfoliated WS₂-Nafion Composite based Electromechanical Actuators. *Scientific Reports*, 7(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14806-x>
- [8] Bernal, M. M., Álvarez, L., Giovanelli, E., Arnáiz, A., Ruiz-González, L., Casado, S., Granados, D., Pizarro, A. M., Castellanos-Gomez, A., & Pérez, E. M. (2016). Luminescent transition metal dichalcogenide nanosheets through one-step liquid phase exfoliation. *2D Materials*, 3(3). <https://doi.org/10.1088/2053-1583/3/3/035014>
- [9] Handayani, I. P., Utama, A. M., Rosi, M., Rafli, A. M., & Setiawan, A. (2021). Optical and electrical characterization of WS₂ multilayer on flexible PET substrate. *Materials Research Express*, 8(2). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abe54f>
- [10] Changyong Lan, Ziyao Zhou, Zhifei Zhou, Chun Li, Lifan Shen, Dapan Li, Ruoting Dong, SenPo Yip, J. C. H. (2018). Wafer-scale synthesis of monolayer WS₂ for high-performance flexible photodetectors by enhanced chemical vapor deposition. *Nano Research*, 11(6), 3371–3384
- [11] Huang Jing Wei Li, Kai Huang, Y. Z. (2018). Enhanced photoresponsivity of the GOQDs decorated WS₂ photodetector. *Nanotechnology*, 29(27).
- [12] Lukas Kinner, Martin Bauch, Rachmat Adhi Wibowo, Giovanni Ligorio, Emil J.W.List-Kratochvil, T. D. (2019). Polymer interlayers on flexible PET substrates enabling ultra-high performance, ITO-free dielectric/metal/dielectric transparent electrode. *Materials and Design*, 168(February), 107663
- [13] Rafli, A. M., Handayani, I. P., & Nasir, M. (2021). EKS FOLIASI FASE CAIR OPTOELECTRONIC PROPERTIES of WS₂ COMPOUND MODIFIED BY LIQUID PHASE EXFOLIATION METHOD. 8(1), 451–458.
- [14] Faraduan1, I., Fathona2, I. W., & I. P. Handayani3. (2004). KARAKTERISASI SIFAT LISTRIK HETEROSTRUKTUR WS₂ / MoS₂. Cv, 1–8.
- [15] Sharma1, S., Bhagat1, · Shubham, Singh1, · Jasvir, Ahmad2, · Manzoor, & Sharma1, · Sandeep. (2018). Temperature dependent photoluminescence from WS₂ nanostructures. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(23), 20064–20070.
- [16] Mishra, A. K., Lakshmi, K. V., & Huang, L. (2015). Eco-friendly synthesis of metal dichalcogenides nanosheets and their environmental remediation potential driven by visible light. *Scientific Reports*, 5(October).
- [17] Sharma, S., Bhagat, S., Singh, J., Singh, R. C., & Sharma, S. (2017). Excitation-dependent photoluminescence from WS₂ nanostructures synthesized via top-down approach. *Journal of Materials Science*, 52(19), 11326–11336. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1303-3>
- [18] Shi, W., Lin, M. L., Tan, Q. H., Qiao, X. F., Zhang, J., & Tan, P. H. (2016). Raman and photoluminescence spectra of two-dimensional nanocrystallites of monolayer WS₂ and WSe₂. *2D Materials*, 3(2). <https://doi.org/10.1088/2053-1583/3/2/025016>
- [19] Yu Zhang, Yanfeng Zhang, Qingqing Ji, Jing Ju, Hongtao Yuan, Jianping Shi, T. G., & Donglin Ma, Mengxi Liu, Yubin Chen, Xiuju Song, Harold Y. Hwang, Yi Cui, and Z. L. (2013). Controlled growth of high-quality monolayer WS₂ layers on sapphire and imaging its grain boundary. *ACS Nano*, 7(10), 8963–8971.
- [20] Bertalero, G., Addebito, P., Bancario, C. C., & Cliente, C. A. L. (2021). Understanding the excitation wavelength dependent spectral shift and large exciton binding energy of tungsten disulfide quantum dots and its interaction with single-walled carbon nanotubes. 1–2.

