

EFEK VARIASI SUBSTRAT TERHADAP SEBARAN DAN SIFAT LISTRIK BORON NITRIDA

EFFECT OF SUBSTRATE VARIATION ON DISTRIBUTION AND ELECTRICAL PROPERTIES OF BORON NITRIDE

Asep Wildan S¹, I.P. Handayani², Memoria Rossi^{3*}

Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹asepwildan@telkomuniversity.ac.id, ²iphandayani@telkomuniversity.ac.id,
³memoriarosi@telkomuniversity.ac.id (*corresponding author)

Abstrak

Tugas akhir ini mempelajari sebaran lapisan BN dan sifat listrik BN (Boron Nitrida) yang dideposisi di atas substrat *Polyethylene Terephthalate* (PET), *Indium Tin Oxide/Polyethylene Terephthalate* (ITO/PET), dan SiO₂. Lapisan BN dibuat dengan cara memodifikasi 1 mg/mL BN menggunakan metode eksfoliasi fasa cair yang ditambahkan interkalator 2 mg/mL NaOH dan diikuti dengan *drop casting* di atas substrat. Sebaran lapisan BN pada PET dan ITO/PET terlihat merata, sedangkan pada SiO₂ terlihat daerah tipis dan sebagian tebal. Perilaku semikonduktor terlihat pada BN/PET yang menghasilkan arus -315 nA sampai 154 nA saat tegangan divariasi dari -10 v sampai 10 v dengan $V_{th} = 2V$ dan memiliki resistivitas $0,29 \times 10^4 \Omega cm$. Perilaku yang sama ditunjukkan oleh BN/SiO₂ yang menghasilkan arus -0,7 mA sampai 0,1 mA saat tegangan divariasi dari -10V sampai 10V dengan $V_{th} = 4V$ dan mempunyai resistivitas 1,1 Ωcm . Hal ini berbeda pada BN pada ITO/PET yang menunjukkan perilaku gabungan insulator dan semikonduktor serta menghasilkan arus berkisar antara -4,3 mA sampai 3,14 mA saat tegangan divariasi dari -5V sampai 5V dan memiliki resistivitas 0,02 Ωcm . Dapat disimpulkan bahwa substrat mempengaruhi sebaran BN, ketebalan lapisan BN, dan sifat listrik BN. Namun tidak ada pengaruh substrat terhadap serapan dan emisi spektrum cahaya.

Kata Kunci: BN, PET, ITO, SiO₂, Eksfoliasi, Sifat Listrik

Abstract

This final project aims to understand the distribution of Boron Nitride (BN) layer and the electrical properties of BN deposited on Polyethylene Terephthalate (PET), Indium Tin Oxide/Polyethylene Terephthalate (ITO/PET), and SiO₂ substrate. The BN layer was created by modifying 1 mg/mL BN using liquid phase exfoliation method which was added by intercalator 2 mg/mL NaOH followed by drop casting deposition on top of the substrates. BN layers were distributed more uniform on PET and less uniform on ITO/PET, while BN layers on SiO₂ consisted of thick and thin layers. Electrical characterization was conducted by varying bias voltage and observing output current. Typical semiconductor characteristic I-V curve was observed on BN/PET. The current varies between -315 nA to 154 nA with bias voltage ranging from -10 v to 10 v and the $V_{th} = 2 v$. It has resistivity of $0,29 \times 10^4 \Omega cm$. The same characteristic is showed by BN/SiO₂ which produces currents -0.7 mA to 0.1 mA with bias voltage ranging from -10 to 10v and the $V_{th} = 4 v$. It has resistivity of 1.1 Ωcm . This is different with BN deposited on ITO/PET showing both insulators and semiconductors which produces currents ranging from -4.3 mA to 3.14 mA with bias voltage ranging from -5 v to 5 v. It has resistivity of 0.02 Ωcm . It can be concluded that substrates influence the BN layer distribution, BN layer thickness, and electrical properties. However, there is no effect on optical spectrum measurement.

Keywords: BN, PET, ITO, SiO₂, Exfoliation, Electrical Properties, Mechanical Properties.

1. Pendahuluan

Material dua dimensi (2D) merupakan kristal dengan lapisan tunggal atom dengan ketebalan dalam orde nanometer. Graphene adalah material 2D yang paling banyak diteliti karena aplikasinya dalam berbagai komponen elektronik. Penelitian kemudian perlahan mengarah terhadap Boron Nitrida (BN) yang struktur lapisannya menyerupai graphene sehingga sering disebut *white graphene* [1]. BN adalah senyawa 2D yang memiliki sifat elektronik dan mekanik yang menarik, antara lain konduktivitas listrik (10^{-8}) S/m [2], modulus elastisitas ($0,865 \pm 0,073$) TPa, serta *fracture strength* ($70,5 \pm 5,5$) GPa [3]. Selain itu, material ini mempunyai sifat optik, seperti celah energi sebesar 4,5 eV [4], serta dapat memancarkan cahaya pada spektrum gelombang ultraviolet pada panjang

gelombang 224-300 nm [5]. Material ini juga memiliki sifat termal, yaitu konduktivitas termal yang tinggi dengan besar 1700-2000 W/mK [6], serta stabil sampai 800°C di udara [3].

Dilihat dari celah energinya [4], BN seharusnya memiliki sifat insulator, namun penelitian menunjukkan BN *nanosheets* memiliki karakteristik semikonduktor, sehingga diharapkan akan memperkaya aplikasinya dalam rancangan dan fabrikasi *electronic nanodevices* [7]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan tipis BN melalui eksfoliasi fasa cair dengan IPA yang dideposisi di atas substrat ITO/PET menghasilkan arus sebesar -300 sampai 300 nA dengan tegangan -50 sampai 50 volt, sedangkan dengan doping flourin didapatkan arus sebesar -15,854 sampai 13,663 uA [7]. Penelitian lain menyebutkan bahwa BN yang dideposisi di atas substrat SiO₂ dengan doping fluorin menghasilkan arus sebesar -0,8 sampai 0,8 nA saat diberi tegangan dalam -2 sampai 2 volt [8]. Selain menggunakan IPA sebagai pelarut, penelitian lain menggunakan PVOH untuk melarutkan BN melalui deposisi di atas substrat ITO/PET dengan hasil arus yang perlahan meningkat sampai tegangan yang diberikan mencapai nilai ambang (V_{th}) ~0,78 Volt dengan arus 10⁻⁴ nA. Lapisan tipis yang dihasilkan kemudian dibengkokkan dari diameter 500 mm ke 4 mm, dan tidak ada perubahan berarti. Saat uji mekanik diulang sebanyak 1500 kali dengan diameter lentur 15 mm, lapisan tipis tetap kuat dan masih elastis, sehingga cocok untuk komponen elektronik fleksibel [9]. Pada tugas akhir ini, penulis akan meneliti sifat listrik dari BN yang dideposisikan di atas substrat SiO₂, PET, dan ITO/PET. Berdasarkan penelitian [7,8,9], pemakaian substrat yang berbeda akan mempengaruhi sifat listrik dari BN terlihat dari perilaku karakteristik kurva I-V dan arus maksimum yang dapat mengalir pada bahan. Selain itu, substrat PET biasanya digunakan pada elektronik fleksibel yang geometrinya dapat diubah-ubah, ITO dapat berfungsi sebagai elektroda transparan pada panel surya, serta SiO₂ diterapkan pada divais elektronik.

Proses modifikasi lapisan tipis pada penelitian ini dilakukan melalui metode eksfoliasi fasa cair karena metode ini memungkinkan terbentuknya lapisan tipis [10]. Pelarut yang digunakan dalam eksfoliasi adalah NMP. Larutan tersebut bersifat polar sehingga gaya yang bekerja pada arah yang berlawanan menyebabkan proses pemilihan lapisan bekerja lebih bagus. [11]. Selanjutnya, hasil eksfoliasi akan dideposisi di atas SiO₂, PET, dan ITO/PET melalui *drop casting*, serta diamati sifat listriknya. Diharapkan penelitian ini dapat memberikan informasi sifat listrik lapisan BN di berbagai substrat, serta peluangnya yang diterapkan dalam piranti elektronik fleksibel yang bentuk geometrinya bisa diubah-ubah sesuai kebutuhan, misalnya sel surya yang bentuknya mengikuti lengkungan atap.

2. Tahap-Tahap Penelitian

2.1. Proses Eksfoliasi Serbuk BN

Pada metode ini serbuk BN dilarutkan menggunakan NMP dan NaOH sebagai interkalator dengan konsentrasi 1 mg/mL. Campuran larutan ini akan disonikasi menggunakan alat ultrasonikator selama kurang lebih 263 jam. Setelah larutan disonikasi, selanjutnya akan disentrifugasi selama 30 menit dengan kecepatan 2500 rpm. Sentrifugasi bertujuan untuk memisahkan endapan BN yang berat dengan endapan yang lebih ringan (*supernatant*). Kemudian *supernatant* BN akan dipisahkan lalu disonikasi kembali dan dilanjutkan dengan sentrifugasi dengan durasi dan kecepatan yang sama hingga mengendap. *Supernatant* dipisahkan dengan endapan residu kemudian diletakkan pada *centrifuge tube* yang baru.

2.2. Deposisi

Supernatant BN dideposisi dengan cara ditetaskan (*drop casting*) pada substrat PET, ITO/PET, dan SiO₂ melalui Micro Pipette M1000 dengan volume 1 µL. Setelah dideposisi, sampel kemudian dikeringkan pada oven dengan suhu 70°C selama 1 jam untuk PET, dan 2 jam untuk ITO/PET dan SiO₂.

2.3. Pengamatan sebaran sampel

BN setelah dideposisi dengan cara *drop casting* kemudian dilihat sebarannya dengan menggunakan mikroskop optik digital *Celestron Suite 2*.

2.4. Penentuan ketebalan BN

Sampel BN yang sudah tersebar merata kemudian diukur ketebalan rata-ratanya yaitu dengan menggunakan metode transmisi optik. Dengan mengamati intensitas cahaya yang ditransmisikan melewati substrat (I_0), cahaya yang ditransmisikan setelah melewati sampel (I_1), mengetahui koefisien

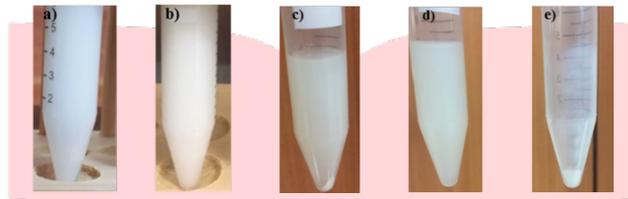
serapan BN (α) serta menggunakan Hukum Lambert-Beer, maka ketebalan lapisan BN pada substrat dapat ditentukan.

2.5. Pengukuran Sifat Listrik

Untuk mengetahui sifat listrik dari sampel, maka dilakukan pengamatan kurva karakteristik I-V dengan menggunakan Keithley 2400. Sebelum melakukan pengukuran terlebih dahulu membuat elektroda pasta perak konduktif. Kemudian sampel diletakkan di dalam sangkar faraday dan dihubungkan dengan *sourceter* Keitley 2400 menggunakan capit buaya. Kurva karakteristik I-V akan muncul pada *software* Kickstart pada PC yang dihubungkan *sourceter*, sehingga resistivitas dapat ditentukan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Modifikasi BN dengan Metode Eksfoliasi Fasa Cair

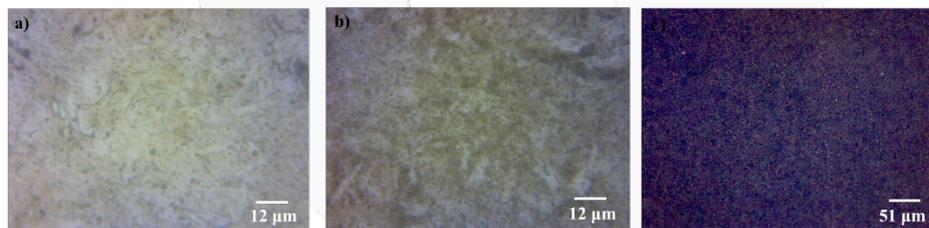


Gambar 3.1. Campuran 1 mg/mL BN dengan 2 mg/mL NaOH di dalam NMP (a) sebelum dimodifikasi, (b) setelah dimodifikasi, (c) setelah sentrifugasi, setelah dipisahkan antara (d) *supernatant* dan (e) endapan residu.

Gambar 3.1. menunjukkan adanya perubahan larutan BN sebelum dan sesudah dimodifikasi. Pada Gambar 3.1. (a), larutan BN sebelum dimodifikasi masih berwarna putih susu. Sedangkan Gambar 3.1. (b) merupakan larutan BN yang sudah dimodifikasi selama 263 jam dan menunjukkan berwarna putih tulang. Gambar 3.1. (c) menunjukkan larutan BN yang telah disentrifugasi. Terdapat endapan yang lebih berat terpisah dengan bagian yang lebih ringan (*supernatant*). Selanjutnya *supernatant* kemudian dipisahkan ke tabung yang lainnya seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.1. (d) dan endapan residu dibiarkan seperti pada Gambar 3.1. (e).

3.2. Hasil Deposisi BN di atas Substrat PET, ITO/PET, dan SiO₂

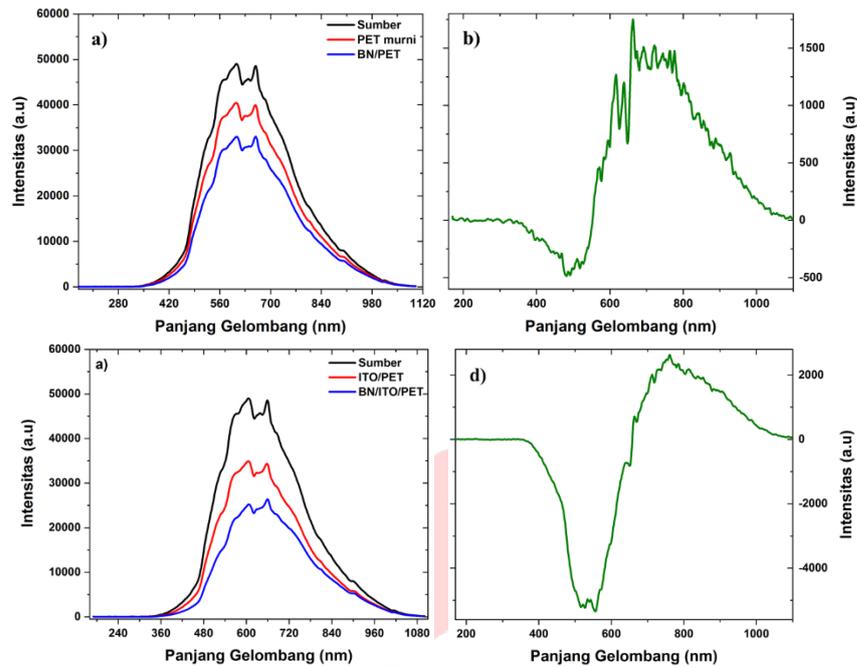
Deposisi MoS₂ pada substrat PET dilakukan dengan 2 cara, yaitu secara penetasan (*drop casting*).



Gambar 3.2.1 Citra Mikroskop perbesaran 40x lapisan BN di atas substrat (a) PET, (b) ITO/PET dan (c) SiO₂.

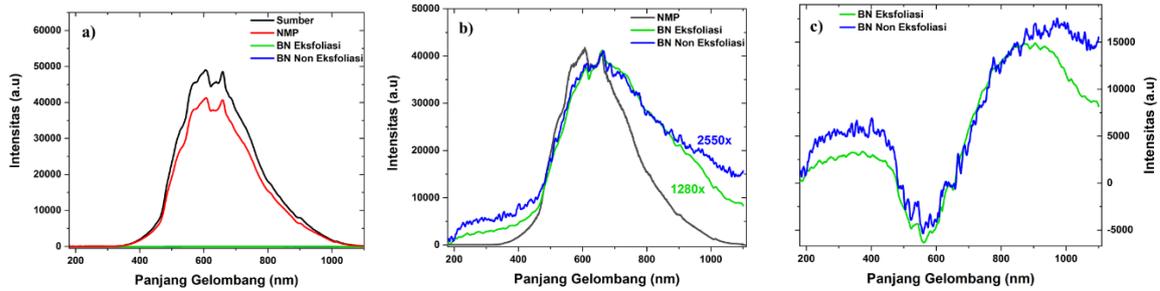
Berdasarkan Gambar 3.2.1 (a), BN yang dideposisi di atas substrat PET terdiri lapisan BN dengan diameter senilai $(46 \pm 18) \mu\text{m}$, sedangkan celah antar lapisan BN bernilai $(11 \pm 3) \mu\text{m}$. Gambar 3.2.1 (b) menunjukkan bahwa BN di atas ITO/PET terlihat lebih tebal yang terdiri dari lapisan BN dengan diameter senilai $(32 \pm 12) \mu\text{m}$, sedangkan celah antar lapisan BN senilai $(12 \pm 4) \mu\text{m}$. Pada Gambar 3.2.1 (c), BN yang dideposisi di atas SiO₂ mempunyai daerah tebal dan tipis dengan lapisan BN memiliki nilai sekitar $(35 \pm 13) \mu\text{m}$, sedangkan celah antar lapisan BN senilai $(9 \pm 2) \mu\text{m}$. Dengan demikian, ukuran celah kosong relatif lebih kecil dibandingkan ukuran lapisan BN pada substrat PET, ITO/PET, dan SiO₂.

3.3. Hasil Pengukuran Transmisi Cahaya dan Ketebalan BN pada substrat PET dan ITO/PET



Gambar 3.3.1. Grafik intensitas cahaya yang (a) ditransmisikan oleh BN/PET (b) diserap oleh BN/PET, (c) ditransmisikan oleh BN//ITO/PET, (d) diserap oleh BN//ITO/PET.

Gambar 3.3.1. (a) mengilustrasikan bahwa setelah melewati PET murni maupun BN/PET, sebagian cahaya dari sumber diserap oleh PET murni dan BN/PET. Hal ini terlihat dari turunnya intensitas transmisi cahaya yang terukur melewati PET murni maupun BN/PET. Meskipun demikian, untuk melihat apakah ada pengaruh serapan oleh PET murni maupun BN/PET, maka dari Gambar 3.3.1. (a) kurva warna merah dikalikan 1,2 dan kurva warna biru dikalikan 1,47. Setelah dikalikan, nilai intensitas kurva warna biru dikurangi kurva warna merah, dan hasilnya ditunjukkan oleh Gambar 3.3.1. (b) yang mengindikasikan bahwa pada panjang gelombang 400-600 nm BN/PET menyerap cahaya, serta pada 600-1000 nm BN/PET mengemisikan cahaya. Dengan menggunakan data pada Gambar 3.3.1. (a) (kurva warna biru dan merah) serta Hukum Lambert-Beer (persamaan 2.1), BN yang dimodifikasi dan dideposisi di atas substrat PET memiliki ketebalan rata-rata senilai 96 nm. Gambar 3.3.1. (c) menggambarkan bahwa setelah melewati ITO/PET maupun BN/ITO/PET, sebagian cahaya dari sumber diserap oleh ITO/PET dan BN/ITO/PET. Hal ini terlihat dari turunnya intensitas transmisi cahaya yang terukur melewati ITO/PET maupun BN/ITO/PET. Meskipun demikian, untuk melihat apakah ada pengaruh serapan oleh ITO/PET murni maupun BN/ITO/PET, maka dari Gambar 3.3.1. (c) kurva warna merah dikalikan 1,4 dan kurva warna biru dikalikan 1,83. Setelah dikalikan, kurva warna biru pada gambar 3.3.1.(c) dikurangi kurva warna merah dan hasilnya terlihat pada panjang gelombang 450-650 nm BN/ITO/PET menyerap cahaya, serta pada 700-1000 nm mengemisikan cahaya seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3.1 (d). Dengan menggunakan Hukum Lambert-Beer (persamaan 2.1) pada pengolahan grafik Gambar 3.3.1 (c), BN yang dimodifikasi dan dideposisi di atas substrat ITO/PET mempunyai ketebalan rata-rata senilai 148,6 nm. BN yang dideposisi pada substrat memiliki konsentrasi yang sangat sedikit sehingga efek eksfoliasi yang terlihat seringkali kecil, sehingga pengukuran sifat optik pada penelitian ini menyertakan bentuk larutan dengan konsentrasi BN yang lebih banyak sehingga diharapkan efek sifat optik BN lebih terlihat. Hasilnya ditunjukkan oleh Gambar 3.3.2.

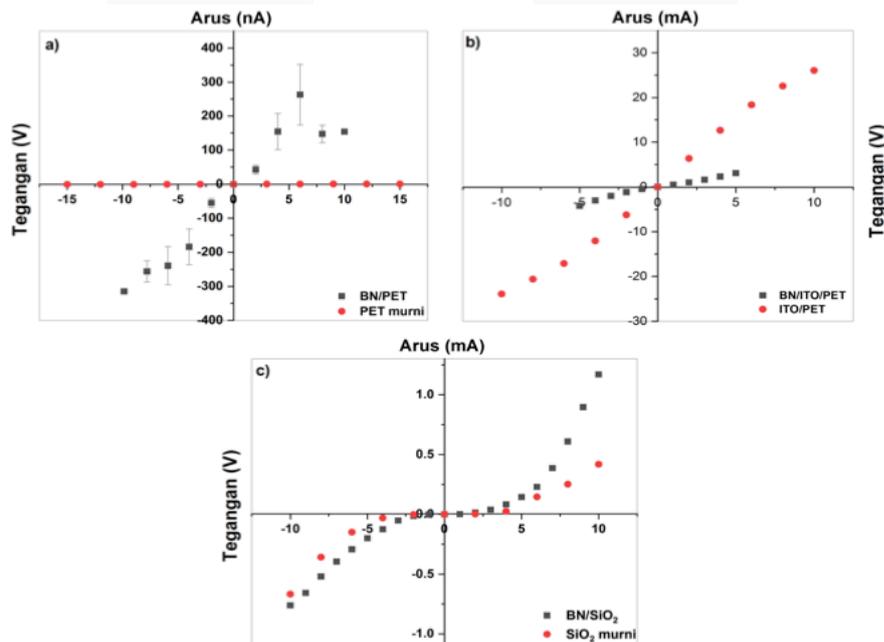


Gambar 3.3.2. Grafik intensitas cahaya yang (a) ditransmisikan oleh NMP, larutan BN Eksfoliasi, dan BN Non Eksfoliasi, (b) ditransmisikan oleh BN Eksfoliasi dan BN Non Eksfoliasi dengan dikalikan nilai tertentu, dan (c) diserap oleh BN Eksfoliasi dan BN Non Eksfoliasi.

Gambar 3.3.3. (a) mengilustrasikan bahwa setelah melewati NMP, BN Eksfoliasi, maupun BN Non Eksfoliasi, sebagian cahaya dari sumber telah diserap terutama oleh BN Eksfoliasi dan BN Non Eksfoliasi yang kurvanya hampir tidak terlihat akibat cahaya dari sumber yang ditransmisikan sangatlah kecil. Untuk melihat lebih jelas akan perbedaan transmisi BN Eksfoliasi dan BN Non Eksfoliasi, maka dengan acuan puncak tertinggi sebelah kanan, kurva warna hijau dikalikan 1280 dan kurva warna biru dikalikan 2550. Hasil dari perkalian kurva hijau dan biru tersebut (Gambar 3.3.3.(b)) kemudian diperjelas dengan membuat selisihnya seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3.3.(c). Terlihat bahwa terdapat perbedaan khusus pada perilaku BN yang direpresentasikan dengan adanya indikasi emisi cahaya (*photoluminescence*) pada panjang gelombang 200 sampai 400 nm (UV) pada suhu ruang. Indikasi tersebut juga terdapat pada penelitian yang dilakukan oleh Li Hua Li, dkk yang mengatakan bahwa BN *nanosheets* memancarkan cahaya UV pada rentang 224-300 nm [30]. Walaupun demikian, dengan keterbatasan pada penelitian ini, maka perlu konfirmasi lebih lanjut dengan kondisi dan alat yang lebih baik.

3.4. Sifat Listrik Bahan

Sebelum melakukan pengujian sifat listrik, maka BN pada substrat harus dibuatkan elektroda yang berfungsi sebagai perantara untuk memberikan tegangan dan mengalirkan arus pada pengujian sifat listrik.



Gambar 4.4.2. (a) menunjukkan BN yang dideposisi di atas substrat PET dengan variasi tegangan -15 sampai 15 v arus keluaran yang fluktuatif. Hal ini terlihat pada *error bar* yang didapat relatif besar dari percobaan yang dilakukan empat kali. Meskipun demikian, sifat listrik BN/PET menunjukkan kecenderungan semikonduktor. Arus yang dihasilkan berkisar dari -315 nA sampai 154 nA dengan $V_{th} = 2$ v. Dengan menggunakan Hukum Ohm (persamaan 2.2), nilai hambatan BN/PET pada suatu titik yang linear didapatkan $R = 47$ M Ω dan resistivitas senilai $0,29 \times 10^4$ Ω cm. Perilaku yang sama

ditunjukkan oleh BN yang dideposisi pada SiO₂ (Gambar 4.4.2 (c)) saat tegangan divariasi dari -10 sampai 10V menghasilkan nilai arus -0,7 sampai 0.1 mA dengan $V_{th} = 4V$. Resistansi yang diperoleh dari BN/SiO₂ bernilai 75 k Ω . Berdasarkan data BN pada substrat PET dan ITO/PET, ketebalan BN bernilai sekitar 100 nm sehingga resistivitas BN di atas SiO₂ diperkirakan memiliki nilai sekitar 1,1 Ω cm. Hal ini mengindikasikan bahwa BN/SiO₂ terdeteksi oleh alat ukur mengingat SiO₂ sendiri merupakan insulator, maka jika SiO₂ saja yang terdeteksi maka resistansi dan resistivitas haruslah sangat besar. Hal ini berbeda pada BN yang dideposisi di atas ITO/PET dengan variasi tegangan -5 sampai 5 v seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4.2 (b) yang memiliki karakteristik transisi antara insulator dengan semikonduktor dengan nilai arus -4,3 mA sampai 3,14 mA. Hambatan yang didapatkan senilai 2,13 k Ω serta resistansi senilai 0,02 Ω cm. Karena hambatan dan resistansi yang diperoleh tidak mewakili sifat elektronik BN secara umum serta hambatan dan resistansi tersebut seperti sifat konduktor, maka disimpulkan bahwa yang terdeteksi oleh alat ukur adalah masih ITO/PET, sehingga perlu langkah lain supaya BN lebih mudah terukur sifat listriknya pada substrat ITO/PET.

3.5 Pembahasan

Berdasarkan citra mikroskop optik digital, sebaran BN di atas PET, ITO/PET, dan SiO₂ sama-sama terlihat menyebar dengan cukup merata. Pada BN/PET, hal ini juga ditunjukkan dengan ukuran rata-rata lapisan BN lebih besar daripada ukuran rata-rata celah kosong antar BN dengan nilai 46 μ m berbanding 12 μ m. Lapisan BN pada ITO/PET memiliki ukuran rata-rata 32 μ m serta ukuran rata-rata celah kosong bernilai 12 μ m, sedangkan lapisan BN pada SiO₂ memiliki ukuran rata-rata 35 μ m dan ukuran rata-rata celah kosong 9 μ m. Meskipun demikian, lapisan BN pada substrat PET lebih tipis dibandingkan pada substrat ITO/PET. Hal tersebut dibuktikan dengan pengukuran transmisi cahaya dan menggunakan Hukum Lambert-Beer bahwa BN di atas PET memiliki ketebalan rata-rata senilai 96 nm dan BN di atas ITO/PET senilai 149 nm. Dengan demikian, lapisan BN yang dihasilkan belum bisa dikatakan lapisan tipis yang mempunyai ukuran kurang dari sama dengan 10 nm. Hal ini juga dapat dilihat pada karakteristik larutan BN bahwa meskipun terdapat perubahan warna dari putih susu menjadi putih tulang dari keadaan sebelum sonikasi, setelah sonikasi, hingga sentrifugasi, larutan tersebut masih cenderung pekat. Asumsi yang berkenaan dengan hal ini adalah larutan BN belum tereksfoliasi dengan baik. Hal ini dapat ditinjau dari parameter interkalator yang digunakan, dimana Na mempunyai jari-jari atom 0,372 nm sedangkan BN mempunyai jarak antar lapisan senilai 0,331 nm. Hal tersebut menyebabkan dugaan Na sulit atau membutuhkan waktu yang lama untuk masuk ke celah antar lapisan BN. Selain itu, sebagaimana telah disebutkan sebelumnya, NMP merupakan pelarut yang digunakan pada penelitian ini. Alasan menggunakan NMP sebagai pelarut adalah karena sifatnya polar dan menurut Coleman,dkk NMP mempunyai tegangan permukaan yang mendekati tegangan permukaan ideal untuk BN dan TMDC yaitu 40 mJ/m². Selain NMP, pelarut dengan tegangan permukaan ideal yang pernah digunakan pada penelitian ini yaitu IPA. Ternyata hasilnya IPA tidak sebagus NMP dalam mendispersikan BN dengan indikasi sering terjadi endapan setelah sonikasi. Coleman sendiri mengatakan sebenarnya tegangan permukaan yang ideal pada banyak pelarut mempunyai masalah yang justru menghasilkan *yield concentration* atau *dispersed concentration* yang rendah [8]. Penelitian Coleman,dkk kemudian dieksplorasi lebih lanjut oleh Bangwen Zhang,dkk yang menghasilkan temuan bahwa BN cocok menggunakan pelarut MEA dengan alasan *yield concentration* mencapai 33,7% [9]. Konsentrasi tersebut lebih tinggi dibandingkan NMP (9,5%) dan IPA (4,5%). Selain dari parameter interkalator dan pelarut, parameter yang lain seperti efek pemanasan, filtrasi, sonikator yang digunakan, perlu dieksplorasi lebih lanjut untuk mencapai keberhasilan eksfoliasi.

Pada pengukuran sifat optik dengan cahaya halogen HL-2000-FHSA sebagai cahaya sumber, lapisan BN baik pada substrat PET maupun PET/ITO menyerap cahaya pada rentang 400-600 nm serta mengemisikan cahaya pada rentang 600-1000 nm. Karena lapisan tipis mempunyai konsentrasi material yang kecil, seringkali sifat optik spesifik material sulit untuk terlihat. Dengan demikian, dilakukan pengukuran sifat optik pada larutan BN sebelum eksfoliasi dan sesudah eksfoliasi. Hasilnya terdapat sifat spesifik pada BN yang memancarkan cahaya (*photoluminescence*) dalam rentang panjang gelombang 200 sampai 400 nm (UV) pada suhu ruang. Pada penelitian yang dilakukan oleh Li Hua Li,dkk menunjukkan bahwa BN *nanosheets* memancarkan cahaya UV dalam rentang 224-300 nm pada suhu ruang [2]. Tetapi dengan keterbatasan pada penelitian ini, maka perlu konfirmasi lebih lanjut dengan kondisi dan alat yang lebih baik.

Untuk melakukan karakterisasi sifat listrik, BN pada substrat PET, ITO/PET, dan SiO₂ dibuatkan elektroda pasta perak sebagai perantara untuk memberikan tegangan dan mengalirkan arus. Selanjutnya sifat listrik diukur menggunakan Keithley 2400 yang menunjukkan BN/PET dengan tegangan bias -15 sampai 15 v menghasilkan arus -315 nA sampai 154 nA. Dengan percobaan beberapa kali, arus tersebut mengalami fluktuasi. Walaupun demikian, perilaku yang ditunjukkan oleh sifat listrik BN/PET

menunjukkan kecenderungan semikonduktor dengan $V_{th} = 2$ v. BN di atas PET memiliki resistansi senilai 47 M Ω dan resistivitas senilai $0,29 \times 10^4$ Ω cm, sedangkan menurut suatu literatur resistivitas BN memiliki nilai 10^8 Ω cm [30]. Penelitian yang dilakukan oleh Ning Guo, dkk terkait dengan BN yang mempunyai ketebalan 18 nm di atas PET juga menunjukkan perilaku semikonduktor yang menghasilkan arus -1,5 sampai 1,5 nA dengan tegangan -12 sampai 12 Volt [17]. Sifat listrik pada BN di atas substrat ITO/PET memiliki perilaku antara insulator dan semikonduktor dengan arus keluaran -4,3 mA sampai 3,14 mA pada tegangan -5 sampai 5 v. Resistansi BN di atas substrat ITO/PET memiliki nilai 2,13 k Ω serta resistivitas senilai 0,02 Ω cm. Penelitian yang dilakukan Yavang Xue, dkk terkait dengan BN yang dideposisi di atas ITO/PET menghasilkan arus dari -300 sampai 300 nA dengan tegangan -40 sampai 40 v. Hasil karakterisasi sifat listrik penelitian tersebut menunjukkan perilaku semikonduktor [4]. BN yang dideposisi di atas SiO₂ menunjukkan sifat listrik semikonduktor dengan variasi tegangan -10 sampai 10 v menghasilkan nilai arus -0,7 sampai 0,1 mA dengan $V_{th} = 4$ v. Resistansi yang diperoleh dari BN/SiO₂ bernilai 75 k Ω . Berdasarkan data BN pada substrat PET dan ITO/PET, ketebalan BN bernilai sekitar 100 nm sehingga resistivitas BN di atas SiO₂ diperkirakan memiliki nilai sekitar 1,1 Ω cm. Penelitian menyebutkan bahwa BN yang dideposisi di atas substrat SiO₂ dengan doping fluorin menghasilkan arus sebesar -0,8 sampai 0,8 nA saat diberi tegangan dalam -2 sampai 2 volt [5]. Dengan demikian, sifat listrik lapisan BN dipengaruhi oleh substrat. Urutan resistivitas dari yang terbesar hingga yang terkecil berturut turut adalah BN/PET, BN/SiO₂, dan BN/ITO/PET.

4. Simpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan :

1. BN yang dideposisi di atas substrat PET dan ITO/PET terlihat menyebar dan merata dengan rata-rata ketebalan masing-masing bernilai 96 nm dan 149 nm. Meskipun demikian, pada citra dengan perbesaran 40x terlihat beberapa celah kosong antar lapisan BN pada substrat PET, ITO/PET, dan SiO₂. Pada substrat PET, daerah tertutup lapisan BN memiliki jarak rata-rata (46 ± 18) μ m, sedangkan celah antar lapisan BN bernilai (11 ± 3) μ m. Pada substrat ITO/PET, daerah yang tertutup lapisan BN memiliki jarak rata-rata (32 ± 12) μ m, sedangkan celah antar lapisan BN memiliki nilai sekitar (12 ± 4) μ m. Pada substrat SiO₂, daerah yang tertutup lapisan BN memiliki nilai sekitar (35 ± 13) μ m, sedangkan celah antar lapisan BN memiliki nilai sekitar (9 ± 2) μ m. Dengan demikian, daerah yang tertutup lapisan BN mempunyai jarak rata-rata relatif lebih besar dari jarak rata-rata celah kosong.
2. BN yang dideposisi di atas substrat PET dan SiO₂ menunjukkan perilaku semikonduktor, sedangkan BN yang dideposisi pada substrat ITO/PET menunjukkan perilaku gabungan insulator dengan semikonduktor. Nilai resistivitas hasil perhitungan resistivitas BN/PET, BN/ITO/PET, dan BN/SiO₂ berturut-turut $0,29 \times 10^4$ Ω cm, 0,02 Ω cm, dan 1,1 Ω cm.

5. Saran

Diharapkan adanya penelitian dan pengembangan lebih lanjut untuk memperbaiki kekurangan Tugas Akhir ini. Adapun saran yang dianjurkan adalah sebagai berikut:

1. Perlu mengeksplorasi preparasi untuk memodifikasi BN supaya dapat tereksfoliasi dengan baik.
2. Berkaitan dengan karakterisasi sifat listrik, perlu dieksplorasi agar BN pada substrat ITO/PET dapat terukur.
3. Konfigurasi dalam pengujian sifat listrik perlu ditingkatkan dalam hal sambungan *probe*, kabel *sourcemeater*, caput buaya, serta sangkar faraday.

Daftar Pustaka

- [1] Vargas, Raphael., Bernal. (2016). Graphene against Other Two-Dimensional Materials: A Comparative Study on the Basis of Electronic Applications. *Intech Open Science*. 103-106
- [2] K, Nose., H, Oba., (2006). Electric Conductivity of Boron Nitride Thin Films Enhanced By In-Situ Doping Of Zinc. *Applied Physics Letters*. 1.
- [3] Aleksey, Falin., Cai, Qiran., dkk. (2017). Mechanical properties of atomically thin boron nitride and the role of interlayer interactions. *Nature Communications*.
- [4] Glavin, Jespersen, dkk. (2016) Amorphous Boron Nitride: A Universal, Ultrathin Dielectric For 2d Nanoelectronics (Postprint). *Advanced Functional Materials*. 2640
- [5] Hua, Li., Chen, Ying., & dkk. (2012). Photoluminescence of Boron Nitride Nanosheets Exfoliated by Ball Milling. *Applied Physics Later*, 1-4.

- [6] Wang, M., Jiao, Z., Chen, Y., & dkk. (2018). Enhanced thermal conductivity of poly(vinylidene fluoride)/boron nitride nanosheet composites at low filler content. *Composites Part A*, 321-329.
- [7] Xue, Y., Liu, Q., He, G., & dkk. (2013). Excellent electrical conductivity of the exfoliated and fluorinated hexagonal boron nitride nanosheets. *Nanoscale Research Letters*, 7.
- [8] Radhakrishnan, S., Das, D., Samanta, A., & dkk. (2017). Fluorinated h-BN as a magnetic semiconductor. *Science Advances*, 1-8.
- [9] Siddiqui, G. U., Rehman, M. M., Yang, Y. J., & Choi, K. H. (2016). A two-dimensional hexagonal boron nitride/polymer nanocomposite for flexible resistive switching devices. *Journal of Materials Chemistry C*, 1-10.
- [10] Nicolosi, V., Chhowalla, M., Kanatzidis, M. G., & dkk. (2013). Liquid Exfoliation of Layered Materials. *Science*, 1420-1439.
- [11] Coleman, J. N., Lotya, M., O'Neill, A., & dkk. (2011). Two-Dimensional Nanosheets Produced by Liquid Exfoliation of Layered Materials. *Science* 331, 568-571.

