

MODIFIKASI KETEBALAN LAPISAN MoS₂ MENGGUNAKAN METODE EKSFOLIASI FASA CAIR

MODIFICATION OF MoS₂ LAYER THICKNESS USING LIQUID PHASE EXFOLIATION METHOD

Arif Rivaldi¹, Memoria Rosi², I. P. Handayani^{3*},

Program Studi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom^{1,2,3}

arifrivaldi@students.telkomuniversity.ac.id¹, memoriarosi@telkomuniversity.ac.id²

iphandayani@telkomuniversity.ac.id^{3*} (*Corresponding Author)

Abstrak

MoS₂ berpotensi diaplikasikan pada *flexible electronics* dan divais optoelektronik. Pada penelitian ini, serbuk MoS₂ dimodifikasi menggunakan metode eksfoliasi fasa cair berupa ultrasonikasi selama 60 jam di dalam NMP dan disentrifugasi selama 30 menit dengan kecepatan putar 2000 rpm. Selanjutnya penelitian ini mempelajari efek perubahan konsentrasi MoS₂ terhadap karakteristik *flakes* yang diperoleh. Selain itu, penelitian ini juga membandingkan efek penambahan NaOH. Karakterisasi ketebalan dilakukan dengan mendeposisikan *flakes* MoS₂ di atas kaca dan diukur serapan cahayanya menggunakan cahaya tampak. Hasil pengamatan menunjukkan ketebalan rata-rata lapisan MoS₂ berkisar antara 3 - 14 nm saat konsentrasi MoS₂ divariasikan 1 - 3 mg/ml tanpa NaOH. Penambahan NaOH dapat menurunkan ketebalan lapisan. Proses modifikasi 2 mg/ml MoS₂ dengan 1 mg/ml NaOH menghasilkan ketebalan rata-rata sekitar 7 nm. Nilai tersebut lebih kecil dibandingkan hasil modifikasi tanpa NaOH yang memiliki ketebalan rata-rata lapisan sekitar 10 nm. Untuk mempelajari sifat optoelektronik, *flakes* MoS₂ dideposisi di atas SiO₂. Pengukuran arus dilakukan saat tegangan divariasikan dari -3 V hingga 3 V dan intensitas cahaya divariasikan 0 - 1000 W/m². Hasil penelitian menunjukkan konduktivitas lapisan MoS₂ di atas SiO₂ dipengaruhi oleh konsentrasi serbuk MoS₂ yang dimodifikasi, konsentrasi NaOH yang digunakan, dan konduktivitas SiO₂. Peningkatan konsentrasi MoS₂ menyebabkan konduktivitas lapisan di atas SiO₂ semakin besar. Sebaliknya, peningkatan konsentrasi NaOH menyebabkan penurunan konduktivitas lapisan MoS₂. Adanya perbedaan konduktivitas SiO₂ yang digunakan menyebabkan konduktivitas lapisan MoS₂ yang dieksfoliasi dengan NaOH menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan proses eksfoliasi tanpa NaOH. Selain itu, efek cahaya mengakibatkan konduktivitas lapisan MoS₂ semakin tinggi.

Kata kunci: Serbuk, MoS₂, eksfoliasi fasa cair, *flakes*, lapisan, ketebalan, konduktivitas.

Abstract

MoS₂ has a potential to be applied in flexible electronics and optoelectronic devices. In this study, MoS₂ powder was modified using liquid phase exfoliation method in which the MoS₂ powder diluted in NMP solvent is ultrasonicated for 60 hours and centrifuged for 30 minutes with a 2000 rpm rotational speed. We studied the effect of MoS₂ and NaOH variation on the properties of the obtained flakes. The flakes thickness characterization is performed by depositing the MoS₂ flakes onto a glass substrate and measuring the transmission of visible light which passed through the deposited sample. The results showed that the average thickness of MoS₂ layers vary from 3 to 14 nm when the concentration of MoS₂ are varied from 1 - 3 mg/ml without NaOH. The addition of NaOH reduces the layer thickness. Modification process of 2 mg/ml MoS₂ with 1 mg/ml NaOH produces the average thickness of about 7 nm. This value is smaller compared to the one modified without NaOH which has an average layer thickness of about 10 nm. To study the optoelectronic properties, the MoS₂ flakes were deposited on SiO₂ substrate. The current was measured when the voltage was varied from -3 V to 3 V and light intensity is modified from 0 - 1000 W/m². It is found that the conductivity of MoS₂ layer on SiO₂ was affected by the concentration of MoS₂ powders, the concentration of NaOH, and SiO₂ substrate conductivity. The increasing of MoS₂ concentration increases the MoS₂ layer conductivity. Whereas, the increasing of NaOH concentration decreases the conductivity of MoS₂ layer. The difference of SiO₂ substrate conductivity used in this experiment causes incorrect result, in which the conductivity of MoS₂ exfoliated with NaOH has higher conductivity than the one exfoliated without NaOH. Furthermore, the increasing of light intensity increases the conductivity of MoS₂ layer.

Keywords: powder, MoS₂, liquid phase exfoliation, flakes, layer, thickness, conductivity.

1. Pendahuluan

Silikon merupakan material semikonduktor yang baik sebagai detektor cahaya, dan lazim digunakan pada divais elektronik dengan harga relatif murah. Tetapi silikon mudah pecah dan memiliki pita energi *indirect* sehingga tidak menghasilkan fotoluminesensi. Sedangkan MoS₂ (Molibdenum Disulfida) adalah semikonduktor jenis Metal Transisi Dikalkogenida dengan sifat mekanik lebih kuat dan fleksibel dibanding silikon. Kekuatan dan fleksibilitas MoS₂ ditunjukkan oleh *Tensile Strength* sebesar 23 GPa dalam bentuk *single layer*, sedangkan silikon memiliki

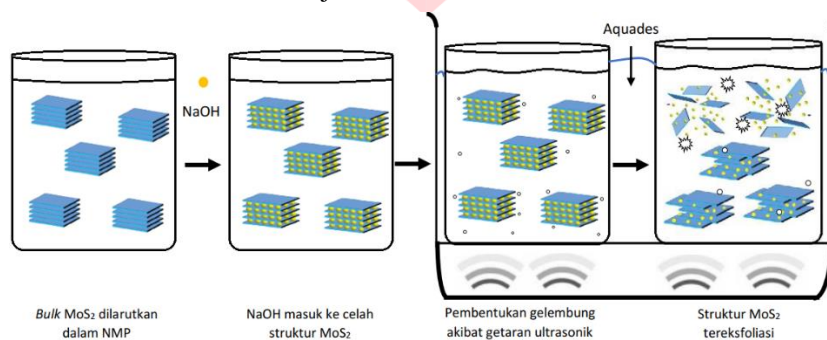
Tensile Strength sebesar 2,25 GPa dalam bentuk *thin film* [1,2]. Secara optoelektronik, *single layer* MoS₂ bersifat *direct-bandgap* dengan celah pita energi antara 1,8 - 3,1 eV [3].

Berdasarkan sifatnya, *single layer* MoS₂ memiliki potensi untuk diaplikasikan pada *flexible electronics* dan divais optoelektronik [3]. Namun tingkat keberhasilan untuk mendapatkan *single layer* MoS₂ yang luas dan homogen masih rendah. Faktor tersebut menjadi alasan untuk memodifikasi penelitian ini dengan alternatif membuat lapisan MoS₂ yang memiliki sifat optik dan listrik yang baik, sehingga dapat diterapkan pada divais elektronik. Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk mendapatkan lapisan MoS₂, seperti eksfoliasi fasa cair, pembelahan mikromekanik, dan pengendapan uap kimia [4]. Penelitian ini menggunakan metode eksfoliasi fasa cair untuk memodifikasi serbuk MoS₂. Metode tersebut dipilih karena dapat menghasilkan lapisan MoS₂ yang lebih luas dan homogen, serta biaya fabrikasinya lebih murah dibanding metode lainnya.

2. Eksperimen Dengan Metode Eksfoliasi Fasa Cair

Proses modifikasi dilakukan dengan ultrasonikator *Elmasonic S10* berfrekuensi 37 KHz untuk mengeksfoliasi serbuk MoS₂ berukuran mikro produksi *Sigma-Aldrich Chemistry* (Kode Produksi: 1002050566) yang dilarutkan dalam NMP (N-Metil-2-Pirolidon), dan ditambah interkalator NaOH (Natrium Hidroksida). Eksfoliasi *bulk* MoS₂ mudah terjadi karena struktur antar lapisan MoS₂ terikat lemah oleh ikatan *van der Waals* dan atom-atom penyusun tiap satu lapisan MoS₂ terikat kuat oleh ikatan kovalen [4,5]. Dengan sentrifugator, serbuk MoS₂ yang tereksfoliasi dapat dipisah menjadi substansi yang lebih berat (endapan) dan yang lebih ringan (*flakes*). *Flakes* yang didapat kemudian dideposisi ke bidang substrat dan menjadi lapisan tipis MoS₂. Ketebalan diukur dengan mengamati serapan cahaya lapisan MoS₂ pada kaca. Sedangkan sifat listrik diuji dengan mengamati kurva I-V lapisan MoS₂ yang terlapis di atas SiO₂.

Bulk MoS₂ yang akan dieksfoliasi dilarutkan dengan pelarut NMP dan ditambah interkalator NaOH untuk mempercepat proses eksfoliasi. Kemudian dilanjutkan dengan proses ultrasonikasi menggunakan ultrasonikator. Secara skematis, proses eksfoliasi fasa cair ditunjukkan oleh Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Ilustrasi eksfoliasi fasa cair dengan interkalator [7]

Efek dari getaran ultrasonik yang dihasilkan ultrasonikator dapat merusak ikatan antar lapisan MoS₂ dan jarak antar lapisan MoS₂ akan semakin lebar akibat dari pergerakan NaOH yang menyisip di celah antar lapisan MoS₂. Selain itu, getaran ultrasonik menghasilkan energi berupa kalor. Kalor yang terserap oleh NMP memicu timbulnya gelembung berukuran mikro [6]. Gelembung tersebut akan beresilasi mengikuti arah getaran ultrasonik. Interaksi terus-menerus antara gelembung dengan getaran ultrasonik menyebabkan ukuran gelembung semakin besar. Gelembung akan pecah ketika tekanan didalamnya lebih besar dari tekanan larutan dan menimbulkan efek gelombang kejut [6]. Dampak dari gelombang kejut dapat memecah antar lapisan MoS₂. Jika proses eksfoliasi dilakukan tanpa NaOH, maka efek gelombang kejut terhadap pecahnya struktur *bulk* MoS₂ tidak sekuat saat proses eksfoliasi dengan NaOH.

2.1. Karakterisasi Ketebalan Lapisan MoS₂

Ketebalan diukur dengan mengamati serapan cahaya lapisan MoS₂ pada kaca. Pengukuran ini dilakukan dengan menggunakan spektrofotometer *AvaSpec-ULS2048XL-EVO*. Parameter yang ingin diketahui yaitu ketebalan (d) lapisan MoS₂ akibat dari terserapnya cahaya datang (I_0) dan cahaya yang ditransmisikan (I_1) oleh lapisan MoS₂, sesuai dengan persamaan *Lambert-Beer* di bawah ini:

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot d} \quad (1)$$

α adalah koefisien serapan lapisan MoS₂ yang telah diketahui. Rasio intensitas cahaya yang ditransmisikan dengan intensitas cahaya datang dapat menjadi informasi untuk mendapatkan ketebalan lapisan MoS₂ [8].

2.2. Karakterisasi Sifat Listrik Lapisan MoS₂

Sifat listrik diuji dengan mengamati kurva I-V lapisan MoS₂ yang terlapis di atas SiO₂ dengan pengukuran menggunakan *sourcemeter Keithley 2400*. Pengukuran dilakukan untuk menentukan karakteristik sifat listrik berupa arus. Arus yang dihasilkan oleh lapisan MoS₂ dapat dihitung melalui hukum Ohm:

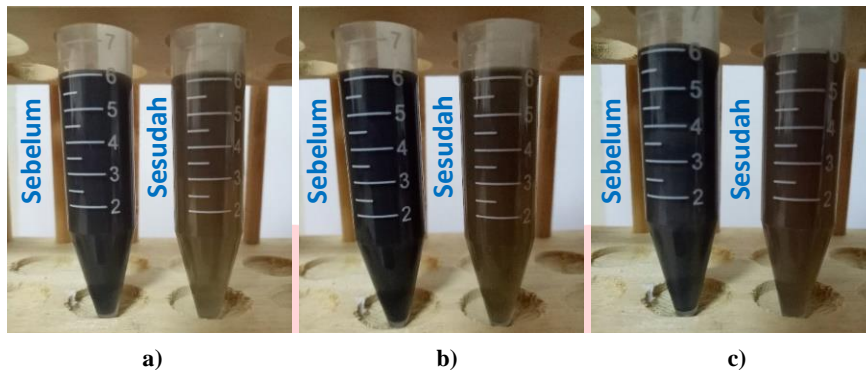
$$I = \frac{V}{R} \quad (2)$$

Dengan I , V , dan R masing-masing adalah arus (A), tegangan (V), dan resistansi (Ω).

3. Hasil dan Pembahasan

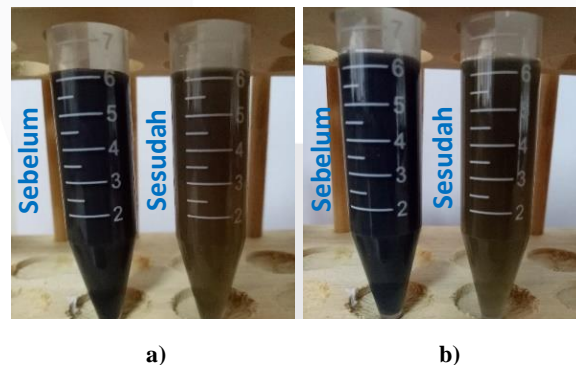
3.1. Hasil Modifikasi Lapisan MoS₂ Dengan Metode Eksfoliasi Fasa Cair

Konsentrasi serbuk MoS₂ yang dilarutkan dalam NMP divariasikan 1 - 3 mg/ml, diultrasonikasi selama 60 jam, dan dilanjutkan dengan sentrifugasi selama 30 menit dengan kecepatan putar 2000 rpm. Pengaruh kecepatan putar yang diberikan menimbulkan gaya sentrifugal, dan mengakibatkan substansi larutan yang memiliki massa lebih besar (endapan) dapat terpisah dengan yang lebih ringan (*flakes*). Perbandingan antara larutan serbuk MoS₂ sebelum dan sesudah dimodifikasi menjadi larutan *flakes* MoS₂ ditunjukkan oleh Gambar 3.1.



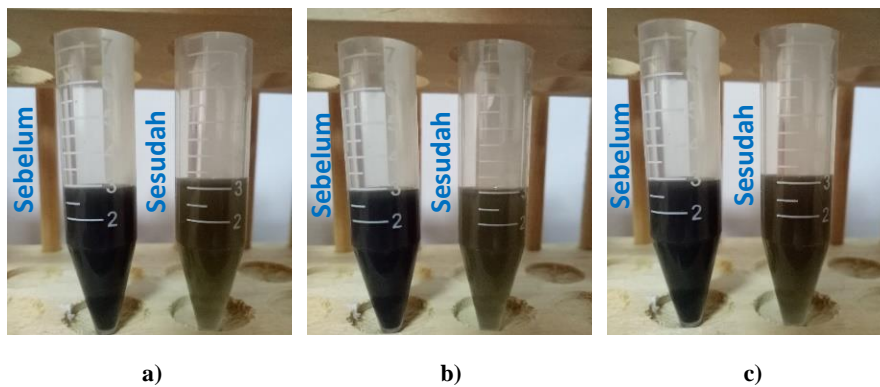
Gambar 3.1. Larutan MoS₂ sebelum dan sesudah dimodifikasi untuk variasi MoS₂ tanpa NaOH. a). 1 mg/ml MoS₂, b). 2 mg/ml MoS₂, dan c). 3 mg/ml MoS₂

Larutan serbuk MoS₂ dengan konsentrasi 1 mg/ml sebelum dimodifikasi pada Gambar 3.1.a terlihat berwarna hitam, sedangkan larutan yang telah dimodifikasi warnanya berubah menjadi hitam kehijauan. Perubahan tersebut menandakan adanya bagian dari struktur MoS₂ yang tereksfoliasi dan menyebabkan munculnya fotoluminesensi pada *flakes* MoS₂. Hal yang sama terjadi pada konsentrasi MoS₂ sebesar 2 mg/ml dan 3 mg/ml pada Gambar 3.1.b dan Gambar 3.1.c. Kenaikan konsentrasi MoS₂ terhadap NMP menyebabkan adanya perubahan warna larutan *flakes*. Konsentrasi 3 mg/ml MoS₂ memiliki warna yang lebih pekat dibandingkan 1 mg/ml MoS₂ dan 2 mg/ml MoS₂. Begitu pula dengan warna larutan *flakes* 2 mg/ml MoS₂ cenderung lebih pekat dari 1 mg/ml MoS₂. Untuk mengetahui efek ultrasonikasi terhadap ukuran *flakes* MoS₂, perlu pengamatan lebih lanjut dengan mikroskop yang hasilnya ditampilkan oleh Gambar 3.5.



Gambar 3.2. Larutan 2 mg/ml MoS₂ sebelum dan sesudah dimodifikasi. a). Tanpa NaOH dan b). Menggunakan 1 mg/ml NaOH

Efek penggunaan NaOH terhadap larutan *flakes* MoS₂ yang dihasilkan, ditampilkan oleh Gambar 3.2. Larutan *flakes* dengan 1 mg/ml NaOH terlihat memiliki warna hitam kehijauan yang mirip tanpa NaOH, sehingga sulit diamati perbedaannya. Maka dari itu, dilakukan pengamatan *flakes* lebih jelas dengan mikroskop yang hasilnya ditampilkan oleh Gambar 3.6.

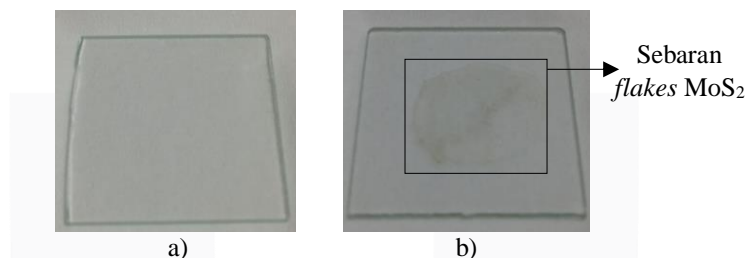


Gambar 3.3. Larutan 2 mg/ml MoS_2 sebelum dan sesudah dimodifikasi dengan variasi NaOH. a). 1 mg/ml NaOH, b). 2 mg/ml NaOH, dan c). 3 mg/ml NaOH

Perbedaan larutan *flakes* 2 mg/ml MoS_2 dengan NaOH sebesar 1 mg/ml, 2 mg/ml, dan 3 mg/ml dapat diamati pada Gambar 3.3. Dari pengamatan diketahui warna larutan *flakes* cenderung makin pekat seiring peningkatan konsentrasi NaOH yang digunakan. Fenomena tersebut mengindikasikan *flakes* MoS_2 yang diperoleh semakin banyak, akibat semakin banyak NaOH yang menyisip ke celah struktur MoS_2 saat proses eksfoliasi. Untuk mengkonfirmasi hal tersebut, diperlukan pengamatan menggunakan mikroskop yang hasilnya ditampilkan oleh Gambar 3.6.

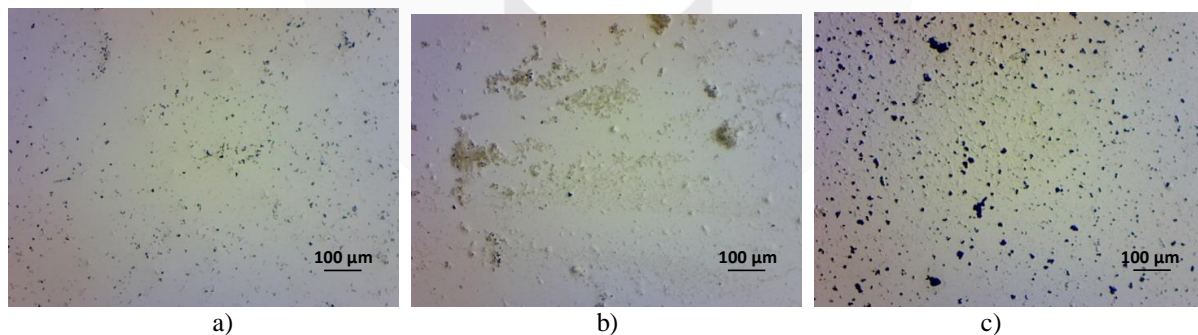
3.2. Hasil Deposisi *Flakes* MoS_2 Di Atas Kaca

Larutan *flakes* yang dihasilkan dideposisi di atas kaca untuk ditentukan ketebalannya. Pada Gambar 3.4, ditampilkan foto kaca sebelum dan sesudah dideposisi *flakes* MoS_2 .



Gambar 3.4. Substrat kaca. a). Sebelum deposisi dan b). Setelah deposisi

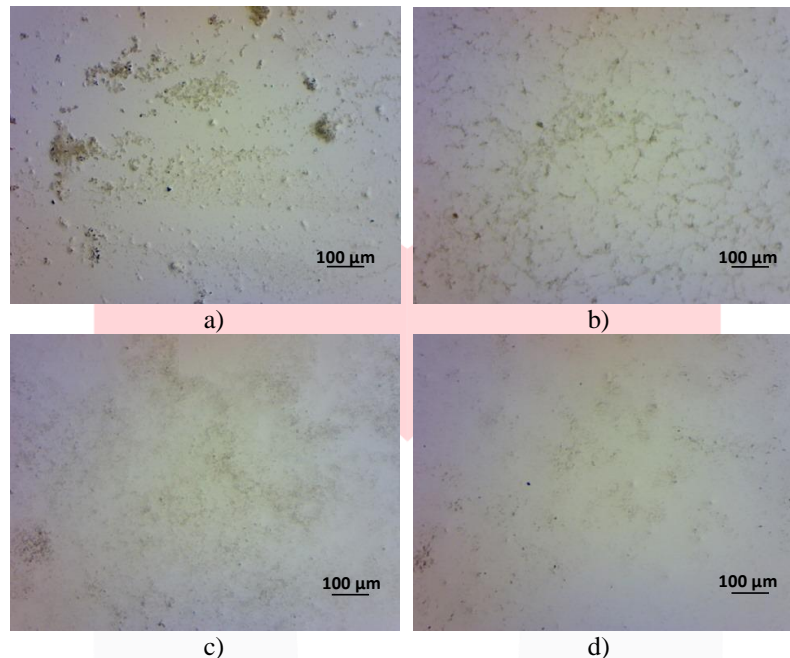
Flakes MoS_2 menyebar dan melekat setelah dipanaskan di atas *hotplate* dengan suhu 40 °C seperti pada Gambar 3.4.b. Untuk melihat lebih jelas penyebaran *flakes* MoS_2 di atas kaca, dilakukan pengamatan menggunakan mikroskop digital *Celestron* dengan perbesaran 10 kali.



Gambar 3.5. Hasil pengamatan *flakes* di atas kaca untuk variasi MoS_2 tanpa NaOH. a). 1 mg/ml MoS_2 , b). 2 mg/ml MoS_2 , dan c). 3 mg/ml MoS_2

Pada Gambar 3.5, dapat diamati perbandingan *flakes* yang melekat di atas kaca untuk konsentrasi MoS_2 sebesar 1 mg/ml, 2 mg/ml, dan 3 mg/ml tanpa NaOH. Terlihat *flakes* setiap konsentrasi MoS_2 yang melekat tidak seluruhnya homogen, terdapat penyebaran yang tidak merata, dan ada penumpukkan *flakes* pada bagian tertentu. Konsentrasi 2 mg/ml MoS_2 pada Gambar 3.5.b menunjukkan hasil deposisi yang lebih optimal dibanding konsentrasi lainnya jika diamati dari warna *flakes* yang melekat lebih pudar. Hal tersebut mengindikasikan *flakes* 2 mg/ml MoS_2 yang melekat pada kaca memiliki ketebalan lebih tipis dibanding konsentrasi 1 mg/ml MoS_2 pada Gambar 3.5.a dan 3 mg/ml MoS_2 pada Gambar 3.5.c. Sedangkan efek peningkatan konsentrasi MoS_2 menyebabkan lebar *flakes* MoS_2 yang terdapat pada lapisan secara rata-rata ikut membesar. Berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan, lebar rata-rata *flakes* untuk konsentrasi 1 mg/ml MoS_2 , 2 mg/ml MoS_2 , dan 3 mg/ml MoS_2 masing-masing sebesar 11 µm, 16 µm dan 19 µm.

Pada Gambar 3.6 dapat diamati perbandingan *flakes* yang melekat di atas kaca untuk konsentrasi 2 mg/ml MoS₂ a). tanpa NaOH dan dengan variasi NaOH sebesar b). 1 mg/ml, c). 2 mg/ml, dan d). 3 mg/ml. *Flakes* 2 mg/ml MoS₂ tanpa NaOH pada Gambar 3.6.a terlihat lebih besar dibanding *flakes* 2 mg/ml MoS₂ yang dimodifikasi dengan NaOH. Sedangkan *flakes* 2 mg/ml MoS₂ yang dimodifikasi dengan NaOH sebesar 3 mg/ml pada Gambar 3.6.d memiliki warna yang lebih pudar, hal tersebut mengindikasikan semakin tinggi konsentrasi NaOH semakin tipis *flakes* yang dihasilkan. Selain itu, peningkatan konsentrasi NaOH menyebabkan lebar rata-rata *flakes* semakin kecil. *Flakes* 2 mg/ml MoS₂ tanpa NaOH memiliki lebar rata-rata sebesar 16 μm , sedangkan lebar rata-rata *flakes* 2 mg/ml MoS₂ dengan 1 mg/ml NaOH, 2 mg/ml NaOH, dan 3 mg/ml NaOH masing-masing sebesar 15 μm , 14 μm , dan 13 μm .

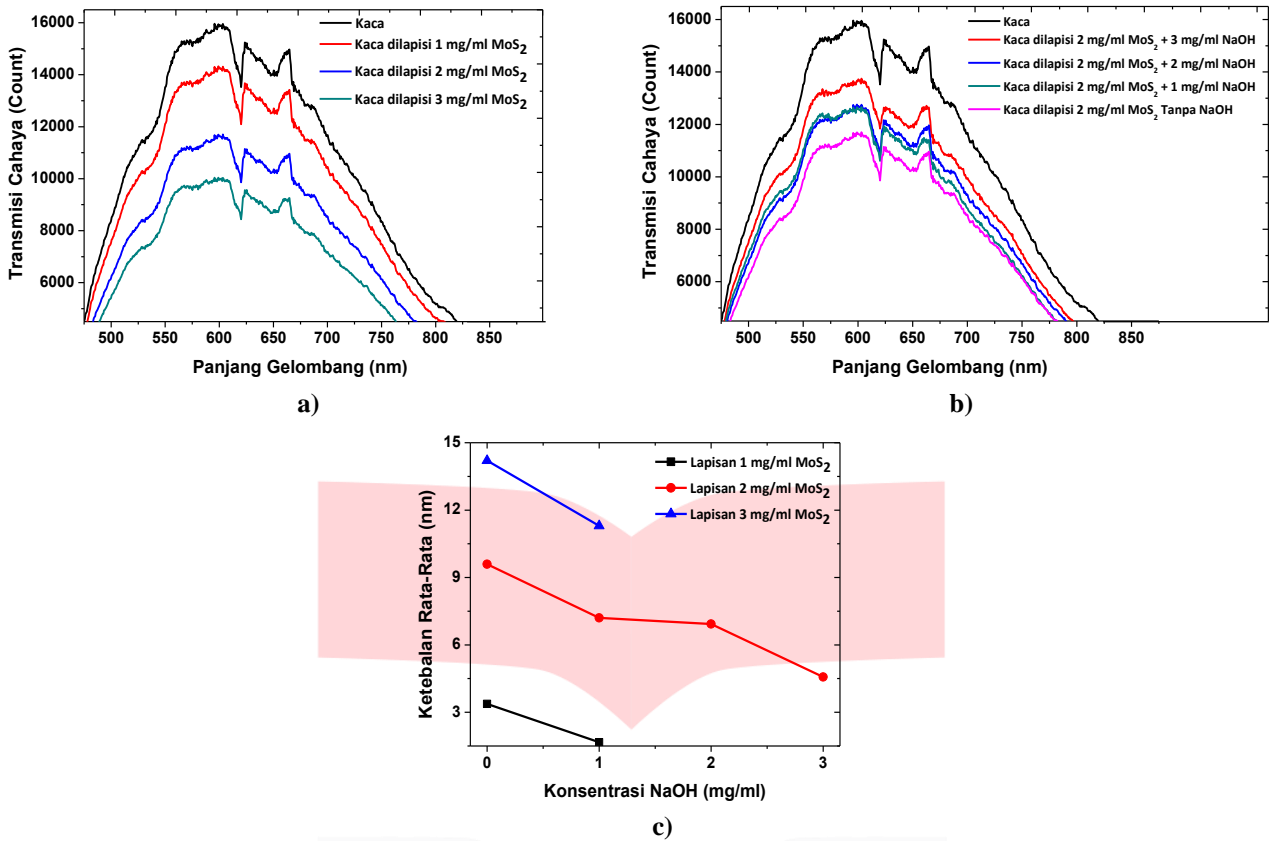


Gambar 3.6. Hasil pengamatan *flakes* di atas kaca untuk konsentrasi 2 mg/ml MoS₂ a). Tanpa NaOH dan dengan b). 1 mg/ml NaOH, c). 2 mg/ml NaOH, serta d). 3 mg/ml NaOH

3.3. Pengukuran Ketebalan Lapisan MoS₂

Untuk mengetahui efek konsentrasi terhadap ketebalan lapisan, dilakukan pengukuran serapan cahaya lapisan MoS₂ di atas kaca. Perbandingan transmisi cahaya yang melewati kaca dan transmisi cahaya yang melewati lapisan MoS₂ di atas kaca dapat digunakan untuk perhitungan ketebalan lapisan. Pada Gambar 3.7.a, transmisi cahaya tertinggi dimiliki kaca tanpa lapisan MoS₂. Deposisi lapisan MoS₂ pada kaca mengakibatkan turunnya transmisi cahaya. Peningkatan konsentrasi MoS₂ menyebabkan transmisi cahaya semakin rendah. Sedangkan efek penambahan NaOH terhadap transmisi cahaya lapisan MoS₂ pada kaca diperlihatkan oleh Gambar 3.7.b. Penambahan NaOH pada lapisan meningkatkan transmisi cahaya. Semakin besar konsentrasi NaOH yang digunakan menyebabkan transmisi cahaya semakin tinggi, hal tersebut mengindikasikan rata-rata *flakes* pada lapisan semakin tipis dibandingkan tanpa NaOH.

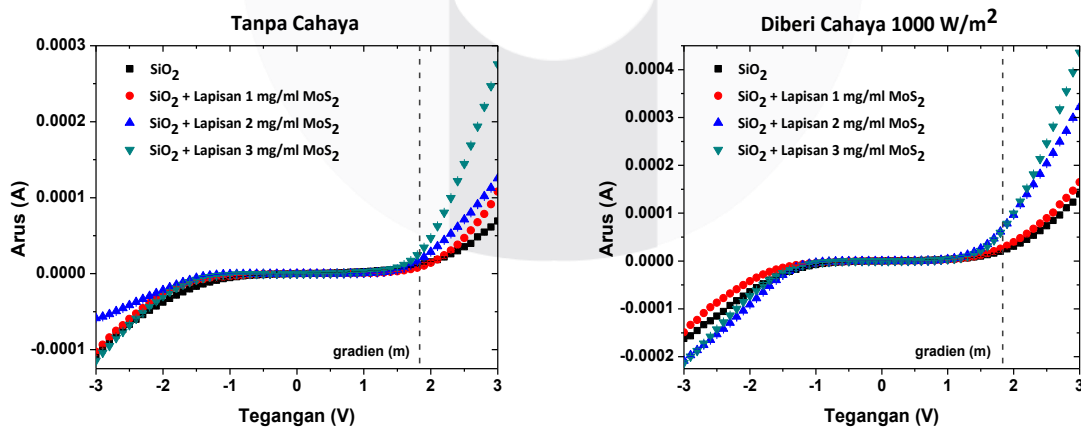
Berdasarkan transmisi cahaya dan koefisien serapan lapisan MoS₂ sebesar $3,26 \times 10^5$ /cm [9], ketebalan lapisan MoS₂ dapat diketahui dengan persamaan *Lambert-Beer* sesuai persamaan (1). Pada Gambar 3.7.c, lapisan yang paling tipis adalah saat konsentrasi 1 mg/ml MoS₂ dengan 1 mg/ml NaOH dengan ketebalan mencapai 2 nm, sedangkan yang paling tebal adalah lapisan dengan konsentrasi 3 mg/ml MoS₂ tanpa NaOH sebesar 14 nm. Ketebalan lapisan semakin tipis seiring penurunan konsentrasi MoS₂ dan peningkatan konsentrasi NaOH yang digunakan.



Gambar 3.7. a). Kurva transmisi cahaya kaca dan kaca yang dilapisi MoS₂ tanpa NaOH, b). Kurva transmisi cahaya kaca serta kaca yang dilapisi 2 mg/ml MoS₂ dengan variasi NaOH dan tanpa NaOH, dan c). Data ketebalan rata-rata lapisan MoS₂

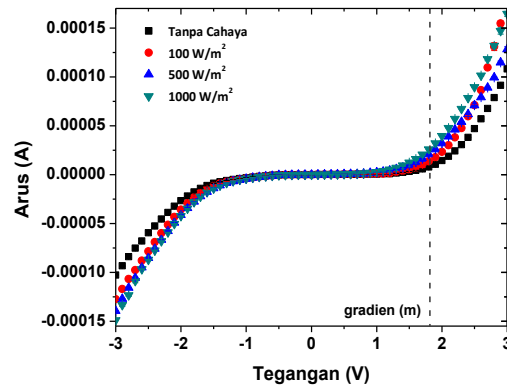
3.4. Hasil Pengukuran Kurva I-V

Karakterisasi sifat listrik lapisan MoS₂ dilakukan dengan mengukur kurva I-V saat tegangan divariasi dari -3 V hingga 3 V saat kondisi tanpa cahaya dan menggunakan cahaya. Gambar 3.8 menunjukkan respon arus listrik antara SiO₂ (hitam) dan SiO₂ yang dilapisi MoS₂ dengan konsentrasi sebesar 1 mg/ml (merah), 2 mg/ml (biru), dan 3 mg/ml (pink) tanpa NaOH dengan intensitas cahaya 0 W/m² dan 1000 W/m².



Gambar 3.8. Kurva I-V SiO₂ dan SiO₂ yang dilapisi MoS₂ tanpa NaOH saat intensitas cahaya: a). 0 W/m² dan b). 1000 W/m². Garis putus-putus menunjukkan tempat ditentukannya gradien kurva (m)

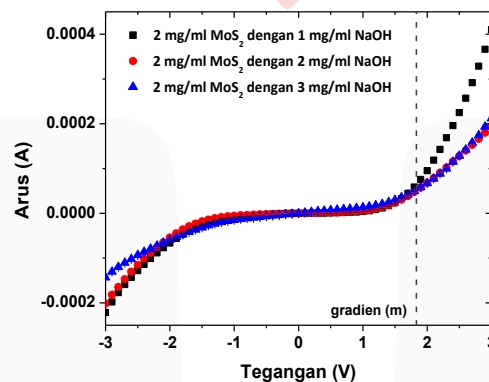
Kurva I-V setiap konsentrasi MoS₂ memiliki respon arus yang berbeda. Respon arus terkecil ditandai oleh SiO₂ yang tidak dilapisi MoS₂. Saat SiO₂ dideposisi lapisan 1 mg/ml MoS₂ arus mulai membesar. Seiring dengan meningkatnya konsentrasi MoS₂ pada lapisan, arus yang terbaca oleh *sourceter* semakin tinggi. Selain itu, peningkatan intensitas cahaya yang diberikan terhadap lapisan berdampak pada respon arus yang dihasilkan semakin besar. Gambar 3.9 menunjukkan perbedaan respon arus SiO₂ yang dilapisi 1 mg/ml MoS₂ tanpa NaOH saat diberi intensitas cahaya 0 W/m² (hitam), 100 W/m² (merah), 500 W/m² (biru), dan 1000 W/m² (pink) dengan proses pengukuran tanpa cahaya.



Gambar 3.9. Pengaruh cahaya terhadap kurva I-V SiO₂ yang dilapisi 1 mg/ml MoS₂ tanpa NaOH. Garis putus-putus menunjukkan tempat ditentukannya gradien kurva (*m*)

Terukur arus listrik sebesar 11 mA saat tegangan 3 V, sedangkan ketika diberi intensitas cahaya 1000 W/m² respon arus meningkat hingga 16 mA. Peningkatan intensitas cahaya yang diberikan mengakibatkan semakin banyak elektron pada lapisan yang tereksitasi ke pita konduksi. Sehingga arus foto yang dihasilkan semakin besar dan berefek pada meningkatnya respon arus listrik.

Selanjutnya, efek peningkatan konsentrasi NaOH terhadap kurva I-V lapisan 2 mg/ml MoS₂, ditampilkan oleh Gambar 3.10.



Gambar 3.10. Efek variasi konsentrasi NaOH terhadap kurva I-V lapisan 2 mg/ml MoS₂ di atas SiO₂. Garis putus-putus menunjukkan tempat ditentukannya gradien kurva (*m*)

Pengukuran ini dilakukan saat kondisi tanpa cahaya. SiO₂ yang dilapisi 2 mg/ml MoS₂ dengan 1 mg/ml NaOH, 2 mg/ml NaOH, dan 3 mg/ml NaOH masing-masing memiliki arus sebesar 41 mA, 19 mA, dan 21 mA saat tegangan 3 V. Penggunaan NaOH untuk mempercepat eksfoliasi serbuk MoS₂ memberi dampak berupa respon arus lapisan cenderung melemah, akibat elektron pada lapisan semakin sedikit yang tereksitasi ke pita konduksi.

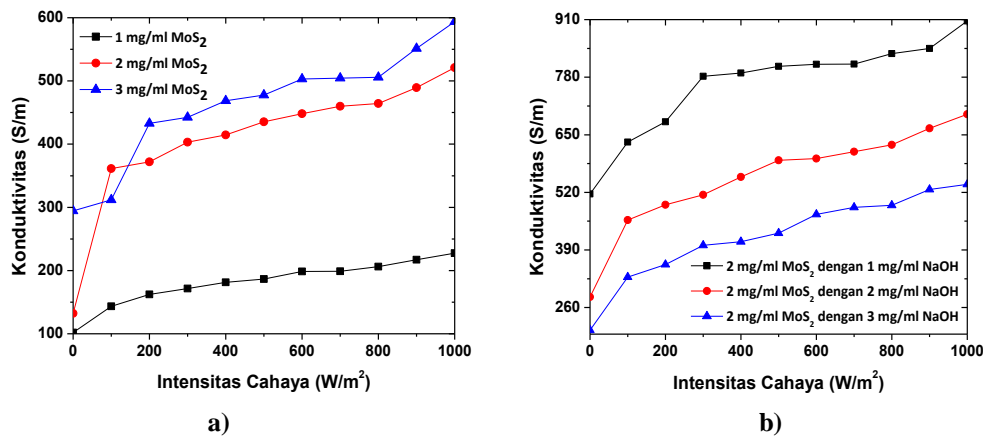
Setelah informasi arus didapat, konduktivitas lapisan MoS₂ dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{m}{A} L \quad (3)$$

Dengan ρ , L , A , m dan σ masing-masing adalah resistivitas, panjang lapisan MoS₂ di atas SiO₂, luas penampang lapisan MoS₂ yang mengenai sisi elektroda, gradien titik pengukuran, dan konduktivitas.

Efek peningkatan konsentrasi MoS₂ terhadap konduktivitas lapisan di atas SiO₂ ditampilkan pada Gambar 3.11.a. Saat kondisi tanpa cahaya, lapisan 1 mg/ml MoS₂, 2 mg/ml MoS₂, dan 3 mg/ml MoS₂ masing-masing memiliki konduktivitas sebesar 102 S/m, 132 S/m, dan 294 S/m. Ketika diberi cahaya dengan intensitas 1000 W/m², konduktivitas lapisan 1 mg/ml MoS₂, 2 mg/ml MoS₂, dan 3 mg/ml MoS₂ masing-masing meningkat hingga 228 S/m, 521 S/m, dan 594 S/m. Peningkatan konsentrasi MoS₂ pada lapisan menyebabkan konduktivitas semakin tinggi.

Sedangkan, efek peningkatan konsentrasi NaOH terhadap konduktivitas lapisan 2 mg/ml MoS₂ di atas SiO₂ ditampilkan oleh Gambar 3.11.b. Saat kondisi tanpa cahaya, lapisan 2 mg/ml MoS₂ dengan 1 mg/ml NaOH, 2 mg/ml NaOH, dan 3 mg/ml NaOH masing-masing memiliki konduktivitas sebesar 517 S/m, 284 S/m, dan 209 S/m. Ketika diberi cahaya dengan intensitas 1000 W/m², konduktivitas lapisan dengan 1 mg/ml NaOH, 2 mg/ml NaOH, dan 3 mg/ml NaOH masing-masing meningkat hingga 907 S/m, 696 S/m dan 538 S/m. Peningkatan konsentrasi NaOH pada lapisan menyebabkan konduktivitas semakin rendah.



Gambar 3.11. a). Efek variasi konsentrasi MoS₂ terhadap perubahan konduktivitas lapisan 2 mg/ml MoS₂ di atas SiO₂ saat intensitas cahaya divariasi 0 - 1000 W/m² dan b). Efek variasi konsentrasi NaOH terhadap perubahan konduktivitas lapisan 2 mg/ml MoS₂ di atas SiO₂ saat intensitas cahaya divariasi 0 - 1000 W/m²

Konduktivitas lapisan MoS₂ di atas SiO₂ pada penelitian ini sangat dipengaruhi oleh konduktivitas SiO₂. Perbedaan konduktivitas SiO₂ yang digunakan menyebabkan konduktivitas MoS₂ yang dieksfoliasi dengan NaOH menjadi lebih tinggi dibanding tanpa NaOH.

4. Kesimpulan

Modifikasi serbuk MoS₂ dalam pelarut NMP selama 60 jam dapat menghasilkan *flakes* dengan ketebalan rata-rata bervariasi antara 3 - 14 nm untuk variasi konsentrasi MoS₂ dari 1 - 3 mg/ml tanpa NaOH. Penambahan NaOH dapat menurunkan ketebalan lapisan. Proses modifikasi serbuk 2 mg/ml MoS₂ ditambah 1 mg/ml NaOH menghasilkan ketebalan rata-rata sebesar 7 nm, nilai tersebut lebih kecil dibandingkan hasil modifikasi tanpa NaOH yang memiliki ketebalan rata-rata lapisan sebesar 10 nm. Penggunaan NaOH dapat mengeksfoliasi MoS₂ lebih baik dan menyebabkan *flakes* yang tersebar di atas substrat kaca lebih merata. Konduktivitas lapisan MoS₂ di atas SiO₂ dipengaruhi oleh konsentrasi serbuk MoS₂ yang dimodifikasi, konsentrasi NaOH yang digunakan, dan konduktivitas SiO₂. Peningkatan konsentrasi MoS₂ menyebabkan konduktivitas lapisan di atas SiO₂ semakin besar. Saat konsentrasi MoS₂ sebesar 1 mg/ml, 2 mg/ml, dan 3 mg/ml tanpa NaOH, lapisan memiliki konduktivitas masing-masing sebesar 102 S/m, 132 S/m, dan 294 S/m. Peningkatan konsentrasi NaOH menyebabkan penurunan nilai konduktivitas lapisan MoS₂. Lapisan 2 mg/ml MoS₂ dengan NaOH sebesar 1 mg/ml, 2 mg/ml, dan 3 mg/ml masing-masing memiliki konduktivitas sebesar 517 S/m, 284 S/m, dan 209 S/m. Adanya perbedaan konduktivitas SiO₂ yang digunakan menyebabkan konduktivitas lapisan MoS₂ yang dieksfoliasi dengan NaOH menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan proses eksfoliasi tanpa NaOH. Efek cahaya terhadap lapisan MoS₂ mengakibatkan konduktivitas lapisan semakin tinggi. Konduktivitas lapisan 2 mg/ml MoS₂ yang dimodifikasi dengan 1 mg/ml NaOH berubah menjadi 633 S/m, 805 S/m, dan 907 S/m ketika intensitas cahaya divariasi sebesar 100 W/m², 500 W/m², dan 1000 W/m².

5. Referensi

- [1] K. Liu and J. Wu, "Mechanical properties of two-dimensional materials and heterostructures", *Journal of Materials Research*. **31**(7), p. 832-844 (2015).
- [2] T. Tsuchiya, M. Hirata, N. Chiba, R. Udo, Y. Yoshitomi, T. Ando, K. Sato, K. Takashimasa, Y. Higo, Y. Saotome, H. Ogawa, and K. Ozaki, "Cross comparison of thin film tensile-testing methods examined with single-crystal silicon, polysilicon, nickel, and titanium films", *IEEE*. p. 666-669 (2003).
- [3] Q.H. Wang, K.K. Zadeh, A. Kis, J.N. Coleman, and M.S. Strano, "Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides", *Nature Nanotechnology*. **7**(11), p. 699-712 (2012).
- [4] O.L. Sanchez, D. Lembke, M. Kayci, A. Radenovic, and A. Kis, "Ultrasensitive Photodetectors Based on Monolayer MoS₂", *Nature Nanotechnology*. **8**(7), p. 497-501 (2013).
- [5] B. Radisavljevic, A. Radenovic, J. Brivio, V. Giacometti, and A. Kis, "Single-Layer MoS₂ Transistors", *Nature Nanotechnology*. **6**(3), p. 147-150 (2011).
- [6] T.Y. Wu, N. Guo, C.Y. The, and J.X.W. Hay, "Theory and Fundamentals of Ultrasound" - Part of the Advances in Ultrasound Technology for Environmental Remediation", Springer. p. 5-12 (2013).
- [7] V. Nicolosi, M. Chhowalla, M.G. Kanatzidis, M.S. Strano, and J.N. Coleman, "Liquid Exfoliation of Layered Materials", *Science*. **340**(6139), p. 1226419-1226419 (2013).
- [8] S. Fatimah, I. Haryati, and A. Jamaludin, "Pengaruh Uranium Terhadap Analisis Thorium Menggunakan Spektrofotometer Uv-Vis", Seminar Nasional V SDM Teknologi Nuklir, 2009, Yogyakarta. ISSN 1978-0176.
- [9] C. Yim, M. O'Brien, N. McEvoy, S. Winters, I. Mirza, J. G. Lunney, and G. S. Duesberg, "Investigation of the optical properties of MoS₂ thin films using spectroscopic ellipsometry", *Applied Physics Letters*. **104**(10) Chapter 2, p. 103114- (2014).