

**KARAKTERISASI RAMAN SPEKTROSKOPI PADA HETEROSTRUKTUR
MoS₂/WS₂
RAMAN SPECTROSCOPY CHARACTERIZATION OF MoS₂/WS₂
HETEROSTRUCTURES**

Fitria Dwi Puspitaningrum¹, I. P. Handayani^{2*}, M.M Rosiana³

Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Telkom University

¹fitriaduwi@student.telkomuniversity.ac.id, ^{2*}iphandayani@telkomuniversity.ac.id (*corresponding author), ³memoriarosi@telkomuniversity.ac.id.

Abstrak

Material 2D graphene menghasilkan banyak inovasi baru dibidang material antara lain sebagai superkapasitor, lithium baterai dan penyimpanan energi pada sel surya. Namun diantara sifat-sifat baik yang dimiliki graphene, ketidak adaan celah pita energi graphene membuat celah pita energi material tersebut tidak mudah dikontrol seperti semikonduktor. Material dichalcogenida yang memiliki sifat semikonduktor diusulkan menjadi pelengkap graphene dan biasanya dikombinasikan menjadi suatu heterostruktur. Selain itu heterostruktur dichalgonide juga banyak diteliti dan menghasilkan sifat menarik seperti sebagai fotodetektor. Pada tugas akhir ini penulis mempelajari heterostruktur MoS₂/WS₂ yang dibuat diatas substrat fleksibel PET dan dihasilkan dalam ruang terbuka dengan metode pengelupasan mekanik. Karakterisasi Raman spektroskopi dilakukan dengan menggunakan Xplora dan HR Horiba Raman Spektrometer, laser eksitasi berpanjang gelombang 532 nm dan range pengukuran 100-500 cm⁻¹. Mode-mode vibrasi MoS₂ dan WS₂ teramati dengan cukup jelas dan mencirikan perbedaan bahan monostruktur dan bahan heterostruktur. Pengembangan heterostruktur MoS₂/WS₂ multilayer ini diharapkan dapat menyajikan informasi mengenai karakteristik pada bahan yang digunakan untuk mempermudah analisis dalam peningkatan pengembangan perangkat elektronik berbasis *nanodevice* dimasa mendatang.

Kata kunci: heterostruktur MoS₂/WS₂, spektroskopi Raman, eksfoliasi mekanik.

Abstract

Graphene 2D material produces many new innovations in the field of materials such as supercapacitors, lithium batteries and energy storage in solar cells. But among the good properties that graphene has, the ins and no gaps in graphene energy bands make the gaps in the material's energy bands not easily controlled like semiconductors. Dichalcogenide material that has semiconductor properties is proposed to be a complement to graphene and is usually combined into a heterostructure. In addition, heterostructure dichalgonide is also widely researched and produces interesting properties such as photodetektor. In this Final Project the author studied the MoS₂/WS₂ heterostructure created on top of the PET flexible substrate and produced in an open space by mechanical exfoliation method. Characterization of Raman spectroscopy is done using Xplora and HR Horiba Raman Spectrometer, laser excitation with wavelength of 532 nm and measurement range of 100-500 cm⁻¹. MoS₂ and WS₂ vibration modes are observed quite clearly and characterize differences in monostructure materials and heterostructure materials. The development of the MoS₂/WS₂ multilayer heterostructure is expected to provide information on the characteristics for future nanodevice-based electronics.

Keywords: MoS₂/WS₂ multilayer heterostructure, Raman spectroscopy, mechanical exfoliation method

1. Pendahuluan

Penemuan material graphene memberi motivasi pada penelitian bahan 2D material lain seperti logam transisi dikalkogenida/*Transisi Metal Dichalcogenide* (TMDC) untuk menghasilkan semikonduktor. Berbeda dengan graphene nilai band gap TMDC bergantung pada jumlah lapisannya. Bulk logam TMDC memiliki *indirect band gap* berkisar antara 1,09-1,32 eV [1], sedangkan lapisan monolayer TMDC memiliki *direct band gap* berkisar 1,5-2,3 eV [1]. Perubahan band gap ini dapat mempengaruhi sifat listrik dan sifat optik TMDC. Sifat listrik WS₂ yang dibuat menjadi *field-effect transistor* memiliki mobilitas pembawa muatan 300 cm² V⁻¹ s⁻¹ pada suhu antara 83–220 K [2], dan MoS₂ menunjukkan mobilitas pembawa muatan pada suhu ruangan sebesar 200 cm² V⁻¹ s⁻¹ [3].

Untuk menghasilkan piranti elektronik seperti p-n junction atau transistor biasanya bahan TMDC dibuat bersama dalam satu perangkat menjadi heterostruktur [4]. Salah satu bentuk heterostruktur yang pernah diteliti adalah MoS₂/WS₂ multilayer yang membentuk p-n junction transistor melalui metode mekanikal eksfoliasi [5].

Heterostruktur MoS₂/WS₂ multilayer menunjukkan sifat transistor bipolar saat pemberian tegangan *forward-bias* (tegangan positif) dan *reverse-bias* (tegangan negative) pada kaki source-drainnya [5,7]. Perilaku sebagai transistor tipe n ditunjukkan saat diberikan tegangan *forward-bias* sebesar 5 V, sehingga adanya eksitasi elektron dari WS₂ ke MoS₂. Pada saat tegangan gate -10 V dan tegangan V_{sd} divariasikan dari 0 hingga -21 V, arus tetap menunjukkan nilai yang sangat kecil dibawah 10 nA [5] dan menghasilkan arus sangat kecil karena terbentuknya penghalang potensial sehingga pembawa minoritas menjauhi daerah p-n junction dan membuat elektron sulit berpindah. Hal ini menunjukkan adanya sifat bipolar selain proses rektifikasi pada p-n junction transistor berbasis heterostruktur MoS₂/WS₂.

Sejak penemuan efek Raman pada tahun 1982[18], spektroskopi Raman banyak digunakan sebagai alat karakterisasi vibrasi molekul suatu bahan. Potensi karakterisasi Raman Spektroskopi sebagai alat karakterisasi yang telah banyak digunakan untuk memperelajari struktur kristal monostruktur dan bahan heterostruktur. Selain hal tersebut, pengujian sampel menggunakan Raman spektroskopi termasuk dalam karakterisasi sifat optik dengan memanfaatkan interaksi cahaya dengan suatu material serta dapat menentukan ketebalan jumlah lapisan. Seperti yang dilakukan HongLi et al yang berhasil menyelidiki monolayer MoS₂ menggunakan Raman spektroskopi dengan mengamati jarak puncak E¹_{2g} dan A_{1g} pada mode vibrasi Raman untuk mengidentifikasi jumlah lapisan [1].

Pembuatan sampel heterostruktur dengan metode pengelupasan dapat dilakukan dengan eksfoliasi fasa cair dan eksfoliasi secara mekanik untuk dapat menghasilkan lapisan tipis. Heterostruktur yang dibuat menggunakan metode eksfoliasi fasa cair, dilakukan dengan menggunakan pelarut dengan sonikasi [2]. Meskipun air dapat digunakan untuk media pengelupasan ia memiliki keterbatasan dalam waktu proses yang lama dan membutuhkan suhu proses yang meningkat. Penelitian yang dilakukan Indera dengan menggunakan eksfoliasi cair membutuhkan proses sonikasi selama 120 jam yang menghasilkan lapisan tipis berkisar 4-5 lapisan dari jarak mode vibrasi E¹_{2g} dan A_{1g} pada Raman Spektroskopi [2]. Sedangkan pengelupasan dengan metode mekanik, tidak membutuhkan proses pembuatan sampel yang lama namun dapat menghasilkan ketebalan lapisan yang sama atau kemungkinan mendapat hasil yang lebih tipis. Metode pengelupasan mekanik yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode yang sama dalam pembuatan graphene dan menjadi salah satu teknik dalam hal pengelupasan dengan menghasilkan lapisan kristalin yang berkualitas tinggi. Kelemahan dari metode ini adalah lebar sampel yang kecil dalam orde mikrometer dan jumlah yang sedikit. Metode Chemical Vapour Deposition (CVD) dapat menghasilkan sampel dengan lebar sekitar 80 μm namun fasilitas tersebut tidak terdapat di Laboratorium Material Teknik Fisika Universitas Telkom.

Dalam penelitian ini, penulis melakukan pembuatan heterostruktur MoS₂/WS₂ pada substrat PET (Polietilena Tereftalat). Hal ini dilakukan untuk mengetahui potensi aplikasi pada substrat fleksible elektronik. Proses pembuatan heterostruktur MoS₂/WS₂ dilakukan dengan metode pengelupasan mekanik. Meskipun metode ini paling sederhana namun tidak dapat dikontrol dan luas permukaannya tidak terlalu besar. Pada saat difabrikasi di ruang terbuka (bukan cleaning room), tantangannya menjadi lebih besar karena faktor suhu dan kelembaban yang dapat mempengaruhi adhesitas sample ke substrat. Dengan segala keterbatasan yang ada saat ini, penelitian tetap dilanjutkan untuk mengamati ketebalan dan luas area heterostruktur di atas substrat fleksible PET yang difabrikasi di ruang terbuka (bukan cleaning room) serta Raman spektra yang dihasilkan.. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi dan peluang dikembangkannya heterostruktur diatas fleksibel substrat yang dikembangkan diruang terbuka.

2. Metode Penelitian

2.1 Fabrikasi Heterostruktur WS₂/MoS₂

Proses fabrikasi heterostruktur dilakukan dengan eksfoliasi mekanik menggunakan solasi (*scotch tape*) sebagai media untuk pengelupasan dan menempelkan material MoS₂ dan WS₂ yang dilakukan secara berulang-ulang. Fabrikasi ini akan dibuat pada substrat fleksibel PET. Proses pembersihan substrat PET akan dibersihkan menggunakan cairan etanol, alkohol dan aquadm secara bergantian yang disonikasi selama 1 menit pada alat sonikator, lalu diletakkan di atas kaca preparat. Eksfoliasi menggunakan dua solasi yang berbeda, dimana solasi pertama memiliki bahan MoS₂ atau WS₂. Kedua bahan yang telah menempel pada solasi masing-masing akan dikelupas lalu ditempelkan langsung secara berurutan pada substrat PET yang telah dibersihkan.

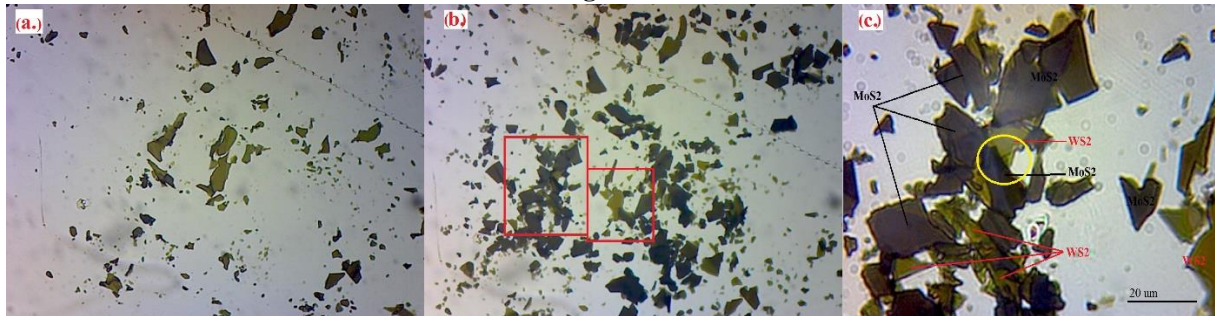
2.2 Karakterisasi Heterostruktur WS₂/MoS₂

Sampel heterostruktur yang telah dideposisi pada substrat PET kemudian diamati daerah sebarannya menggunakan mikroskop digital (Celestron Digital Microscope Imager 44421) pada perbesaran 4x, 10x, dan 40x. Untuk mengkonfirmasi terjadinya pembentukan heterostruktur pada sampel, dilakukan karakterisasi menggunakan spektroskopi Raman dan fotoluminesensi (XploRA dan HORIBA - The LabRAM HR Evolution Raman Microscopes). Saat karakterisasi spektrum Raman akan diblock agar spektrum yang dihasilkan

hanya memiliki spektrum fotoluminesensi. Sumber cahaya menggunakan berkas cahaya monokromatis berupa laser dengan panjang gelombang 532 nm dengan range pengukuran 100-500 cm^{-1} . Karakterisasi dilakukan pada bagian MoS_2 murni, WS_2 murni dan heterostruktur MoS_2/WS_2 untuk mengetahui spektrum karakteristik pada masing-masing bagian.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Fabrikasi Heterostruktur MoS_2/WS_2 dengan Metode Eksfoliasi Mekanik



Gambar 3. 1 Hasil pengamatan pada mikroskop digital pembesaran 10x. (a.) WS_2 (b.) WS_2 setelah penambahan material MoS_2 dan daerah persebaran heterostruktur (c.) identifikasi material MoS_2 dan WS_2 pada pembesaran 40x.

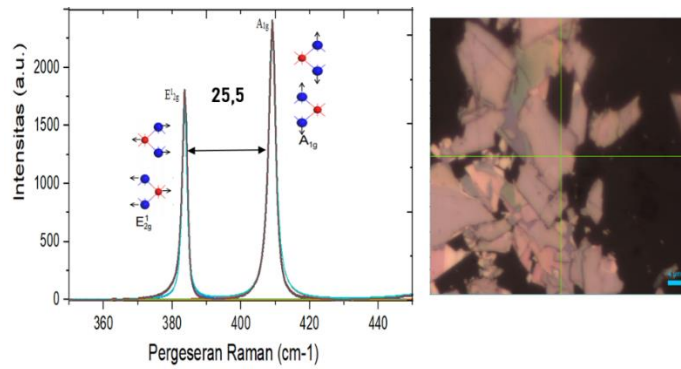
Eksfoliasi mekanik dilakukan untuk memisahkan lapisan antar lapisan material sehingga menjadi lapisan yang lebih tipis, hasil perbedaan lapisan diperlihatkan dengan adanya perbedaan warna hijau yang lebih gelap dan terang di pulau-pulau kecil WS_2 pada Gambar 3.1 (a.). Hasil Gambar 3.1 (b.) menunjukkan adanya perubahan sampel setelah dilakukan penumpukan material MoS_2 yang membuat sebarannya menjadi banyak. Namun, tidak semua bagian sampel menghasilkan heterostruktur MoS_2/WS_2 . Pemberian kotak merah pada gambar merupakan letak heterostruktur berada. Citra sampel heterostruktur MoS_2/WS_2 dapat lebih jelas teramati dengan pembesaran mikroskop 40x dan diperlihatkan pada Gambar 3.1 (c.).

3.2 Hasil Analisis Spektroskopi Raman

Karakterisasi optik merupakan metode karakterisasi yang biasa digunakan pada material, terutama material berbahan semikonduktor. Beberapa sifat optik yang berguna bisa didapatkan dari karakterisasi Raman spektroskopi dan juga sebagai penentu jumlah lapisan sampel. Analisis Spektroskopi Raman digunakan untuk mengkonfirmasi terbentuknya lapisan heterostruktur MoS_2/WS_2 , lapisan murni MoS_2 dan lapisan murni WS_2 dengan mengamati perbedaan mode vibrasi fononnya. Hasil Spektrum Raman menggunakan panjang gelombang laser 532 nm serta range pengukuran dari 100-500 cm^{-1} .

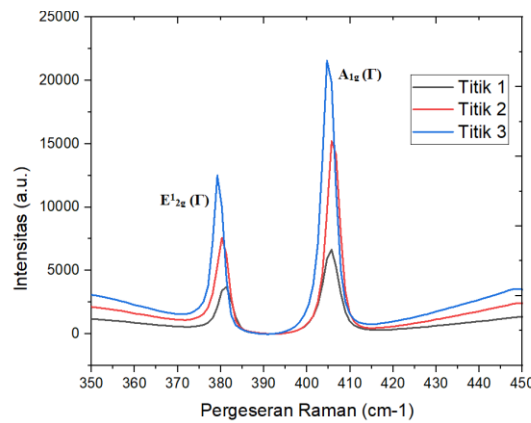
3.2.1 Spektrokopi Raman MoS_2

Spektrum pergeseran Raman MoS_2 dieperlihatkan pada Gambar 4.3 yang menunjukkan adanya mode $E_{2g}^1(\Gamma)$ pada 383.5 cm^{-1} yang menyatakan vibrasi atom Mo (Molybdenum) dan S(Sulfur) saling membelakangi dalam bidang ab ke arah inplane. Sedangkan mode $A_{1g}(\Gamma)$ berada di 409 cm^{-1} yang menunjukkan vibrasi atom S menuju arah interplane [8]. Vibrasi fonon adalah proses bergetar secara individual dari suatu pasangan atom yang saling berikatan, sehingga vibrasi atom yang terjadi secara kolektif. Pergeseran Raman adalah grafis (sumbu x) sebanding dengan frekuensi vibrasi/rotasi atom-atom yang ada di material, sedangkan intensitas (sumbu y) sebanding dengan jumlah atom-atom di material. Jika pada mode vibrasi E_{2g}^1 yang bergetar adalah atom W/Mo dan bergetar pula ayom S yang saling berikatan secara ikatan kovalen dan ikatan Vander Waals . Kedua mode $E_{2g}^1(\Gamma)$ dan $A_{1g}(\Gamma)$ memiliki jarak sebesar 25.5 cm^{-1} , yang menunjukkan lapisan merupakan multilayer.



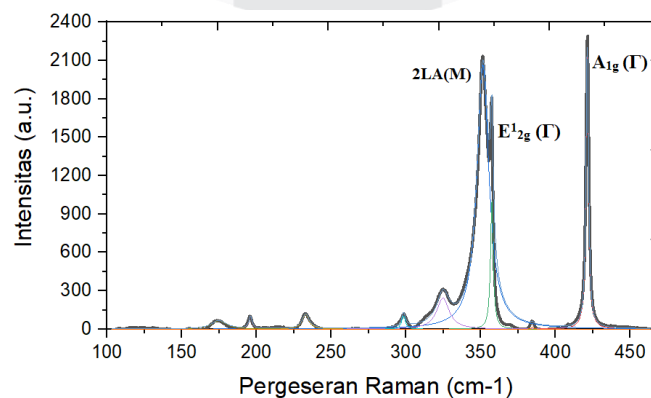
Gambar 3 2 Hasil spektrokopi Raman MoS2 murni

Pergeseran Raman MoS₂ tergantung pada ketebalan lapisannya (gambar lapisan pada lampiran).. Gambar 4.4. Dari spektrum Raman MoS₂ yang teramati bahwa MoS₂ bergantung pada ketebalan lapisan yang meningkat dari posisi titik penembakan sampel dengan mode vibrasi E¹_{2g} (Γ) mengalami pergeseran merah dari 381,3 cm⁻¹ ke 379 cm⁻¹. Mode vibrasi A_{1g} (Γ) juga mengalami pergeseran merah dari 405,7 cm⁻¹ ke 404,6 cm⁻¹. Perubahan mode vibrasi dengan pergeseran merah tersebut menunjukkan adanya peningkatan tekanan sampel saat di deposisi secara mekanik. Semakin berkurangnya jumlah lapisan, jarak antara mode E¹_{2g} (Γ) ke A_{1g} (Γ) akan semakin kecil menandakan lapisan menjadi lebih tipis. Dengan mengamati jarak anataran mode E¹_{2g} dan A_{1g}, dimana mode vibrasi E¹_{2g} yang merupakan mode bergetarnya atom Mo/W dan S yang searah dalam bidang satu lapisannya (ab). Serta dari mode vibrasi A_{1g} yang merupakan bergetarnya atom S searah keluar bidang arah pengelupasan pada axis c. jika semakin berkurangnya jumlah lapisan kedua mode akan mengalai pergeseran yang berlawanan arah, sehingga semakin menyempitnya kedua jarak tersebut mengindikasi ketebalan lapisan yang semakin berkurang juga.



Gambar 3.3 Pergeseran spektrokopi Raman pada MoS2 bergantung pada posisi tembak lapisan

3.2.2 Spektrokopi Raman WS₂



Gambar 3.4 Pergeseran Spektroskopi Raman WS₂ pada lapisan multilyaer

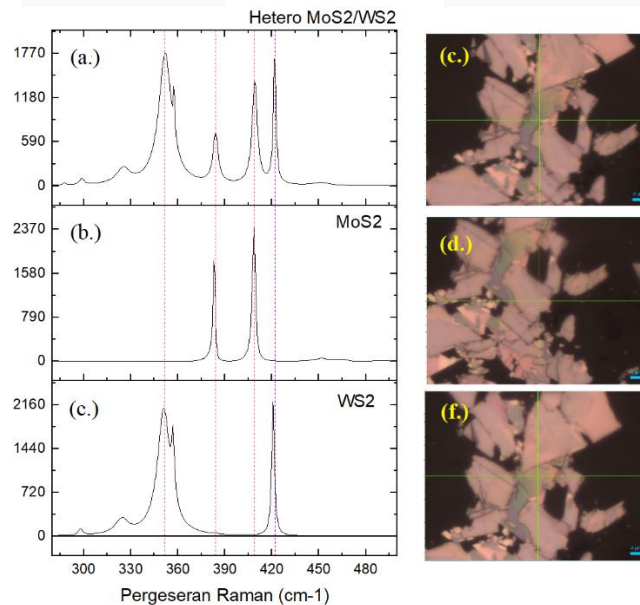
Pada gambar di atas adalah spektrum Raman menggunakan laser dengan panjang gelombang 532 nm yang di fitting menggunakan fungsi persamaan lorentzian. Pada spektrum tersebut teramati sinyal pergeseran Raman aktif sepanjang 150-470 cm^{-1} yang assignment mode-mode vibrasinya ditampilkan pada Table 3.1:

Tabel 3. 1 Pembagian puncak mode Raman WS_2

Frekuensi (cm^{-1})	Pembagian		Vibrasi atom
	First order (Γ)	Second order (M)	
174.15		LA (M)	
195.85		LA (K)	
232.91		$A_{1g} - LA$ (M)	
298.27		$2LA$ (M) - $2E_{2g}^2$ (M)	
324.64		E_{2g}^1 (M)	
351.41		$2LA$ (M)	
357.45	E_{2g}^1 (Γ)		
421.59	A_{1g} (Γ)		

Selain dari mode Raman aktif diatas, terdapat juga mode Raman inaktif yaitu dengan munculnya puncak pada frekuensi 384.09 yang teridentifikasi pada B_{2g} . Kemunculan mode puncak ini mengindikasikan lapisan berada pada keadaan multilayer. Mode Raman khas material WS_2 ditunjukkan adanya 2 puncak yang teramati pada 357.45 cm^{-1} dan 421.59 cm^{-1} sesuai dengan mode vibrasi phonon berturut-turut E_{2g}^1 (Γ) dan A_{1g} (Γ). Mode vibrasi E_{2g}^1 (Γ) bergeraknya atom S (sulfur) dan W (tungsten) yang berlawanan dalam satu bidang ab, sedangkan A_{1g} (Γ) adalah vibrasi atom S pada axis c. Bentuk dari adanya mode E_{2g}^1 (Γ) yang berhimpitan dan saling tumpang tindih dengan mode phonon $2LA(M)$ yang merupakan *second-order*, membuat mode puncak yang terpisah spasial dengan A_{1g} (Γ) yang akan menurun bersamaan penurunan jumlah lapisan.

3.2.3 Spektrokopi Raman Heterostruktur MoS_2/WS_2



Gambar 3 5a)-(c) Spektrum Raman pada range pengukuran 100-500 cm^{-1} dari lapisan (a.) heterostruktur MoS_2/WS_2 , (b.) MoS_2 murni, (c.) WS_2 murni. (d.)-(f) Citra confocal mikroskop pada titik tembak (c.) heterostruktur MoS_2/WS_2 , (d.) MoS_2 murni, (f.) WS_2 murni.

Spektra pergeseran Raman heterostruktur MoS_2/WS_2 menunjukkan penjumlahan puncak mode karakteristik dari masing-masing lapisan MoS_2 dan WS_2 . Pada Gambar 4.6 (a.)-(c.) ditampilkan perbandingan dari spektrum

Raman lapisan MoS₂ murni, WS₂ murni, dan heterostruktur MoS₂/WS₂ dilengkapi juga dengan penggambaran confocal mikroskop letak penembakan titik saat dilakukan karakterisasi pada Gambar 4.6 (c.)-(f.). Pada gambar teramati spektrum MoS₂/WS₂ menghadirkan puncak mode E_{2g}¹ (Γ) dan A_{1g} (Γ) multilayer MoS₂ pada 383,5 cm⁻¹ dan 409 cm⁻¹. Pada spektrum MoS₂ mode vibrasi A_{1g} (Γ) mengalami pergeseran sebesar 0,59 cm⁻¹ dari titik 383,5 cm⁻¹ menuju ke 384,09 cm⁻¹ dengan berkurangnya konsentrasi dan intensitas MoS₂ dalam lapisan heterostruktur daripada lapisan WS₂. Pergeseran ini terjadi karena adanya perubahan kisi antar lapisan yang menyebabkan ketidakteraturan kisi bertambah besar. Jarak mode vibrasi E_{2g}¹ (Γ) dan A_{1g} (Γ) MoS₂ pada lapisan heterostruktur mengalami penyempitan dari sebelumnya, Sehingga menghasilkan pelebaran puncak dari lapisan multilayer MoS₂ ke lapisan heterostruktur MoS₂/WS₂. Hal ini menunjukkan adanya amorfus/kristalinitas yang berkurang pada MoS₂ saat terbentuknya heterostruktur dan tidakberaturannya vibrasi pada mode E_{2g}¹ saat bergetar secara inplane, sehingga kemudian dapat mempengaruhi sifat listrik jika sampel berubah menjadi lebih amorfus.

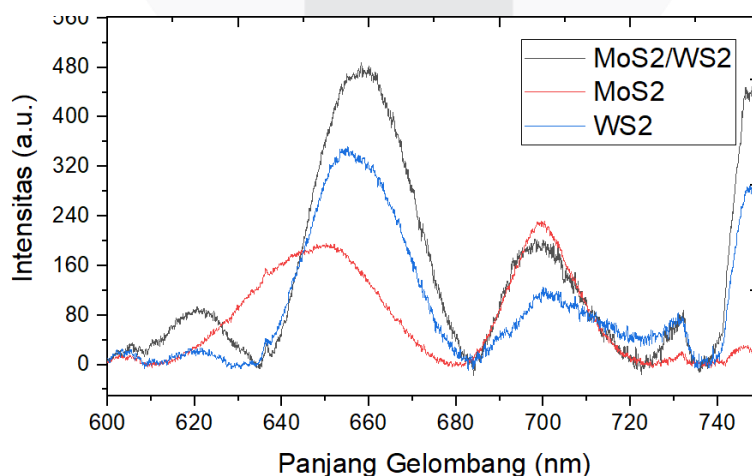
Tabel 2. Pergeseran posisi puncak dan lebar puncak pada MoS₂, WS₂, MoS₂/WS₂

Material	Puncak (cm ⁻¹)		Lebar (cm ⁻¹)		Material	Puncak(cm ⁻¹)		Lebar (cm ⁻¹)	
	E _{2g} ¹	A _{1g}	E _{2g} ¹	A _{1g}		E _{2g} ¹	A _{1g}	E _{2g} ¹	A _{1g}
MoS ₂	383.5	409.1	1.505	2.5	WS ₂	357.4	421.481	1	1.99
MoS ₂ /WS ₂									
MoS ₂	384.09	409.1	4.012	3.997	WS ₂	357.6	421.792	1.008	1.99
Δ (x)	0.59	0	2.507	1.497	Δ (x)	0.2	0.311	0.008	0

Dua puncak pergeseran Raman mode E_{2g}¹ (Γ) dan A_{1g} (Γ) pada multilayer WS₂ murni muncul di 357,4 cm⁻¹ dan 421,4 cm⁻¹. Kedua mode vibrasi WS₂ tersebut mengalami pergeseran biru diheterostruktur. Mode vibrasi E_{2g}¹ (Γ) WS₂ mengalami pergeseran frekuensi dari titik 357,6 cm⁻¹ ke titik 357,6 cm⁻¹ dan pergeseran lainnya terjadi di frekuensi 421,48 cm⁻¹ ke 421,79 cm⁻¹ untuk mode vibrasi A_{1g} (Γ) pada WS₂. Lebar puncak WS₂ tidak banyak mengalami perubahan seperti MoS₂, lebar puncak pada mode A_{1g} (Γ) WS₂ tidak mengalami perubahan pada saat heterostruktur terbentuk. Kedua puncak A_{1g} (Γ) dan E_{2g}¹ (Γ) juga terlihat mengalami pengurangan konsentrasi ditandai dengan menurunnya intensitas puncak WS₂.

3.2 Hasil Analisis Fotoluminesensi pada Heterostruktur MoS₂/WS₂

Karakterisasi fotoluminesensi dilakukan pada lapisan heterostruktur MoS₂/WS₂, lapisan murni MoS₂ dan lapisan murni WS₂ dengan mengamati puncak yang terbentuk pada panjang gelombang yang mencirikan masing-masing lapisan. fotoluminesensi dilakukan dengan panjang gelombang laser 532 nm serta range pengukuran dari 600-750 nm.



Gambar 3.6 Hasil Spektrum Fotoluminesensi dari lapisan MoS₂, WS₂, dan heterostruktur MoS₂/WS₂

Spektrum fotoluminesensi menampilkan daerah MoS₂ dan heterostruktur berturut-turut ditampilkan sebagai kurva merah, biru dan hitam pada Gambar 3.5 dan hasil spektrum yang didapat tidak menunjukkan hasil yang bagus, karena terjadi osilasi pada kurva yang disebabkan interferensi cahaya refleksi oleh lapisan multilayer. Jumlah lapisan sangat mempengaruhi hasil spektrum yang didapatkan, karena pada jumlah lapisan yang lebih banyak akan cenderung mendapat banyak interferensi dari lapisan lain yang berada dibawahnya. Selain itu, pada lapisan multilayer material yang terbentuk cenderung memiliki *indirect band gap* dan fotoluminesensi tidak teramati.

4. Kesimpulan dan Saran

Penelitian ini telah berhasil membuat heterostruktur MoS₂/WS₂ multilayer pada substrat PET dengan panjang penampang lintang terbesar flake sebesar 18.3 μm yang terkonfirmasi dengan hasil karakterisasi Raman spektroskopi. Pengukuran optoelektronik dan karakterisasi lain belum dapat dilakukan karena terkendali pandemik.

Untuk penelitian selanjutnya dapat dilanjutkan dengan pembuatan heterostruktur mono atau bilayer dan dilengkapi dengan analisis lain seperti AFM, current sensing AFM, dan fotoluminesensi. Pengukuran sifat optoelektronik perlu peralatan pembuatan elektroda berukuran 5 mikrometer yang saat ini masih belum berhasil dilakukan.

Reference

- [1] H. Li *et al.*, "From bulk to monolayer MoS₂: Evolution of Raman scattering," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 22, no. 7, pp. 1385–1390, 2012.
- [2] Lucia Maria Aversa Villela, "No Title No Title," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [3] J. H. Hooijschuur, M. F. C. Verkaaik, G. R. Davies, and F. Ariese, "Will Raman meet bacteria on Mars? An overview of the optimal Raman spectroscopic techniques for carotenoid biomarkers detection on mineral backgrounds," *Geol. en Mijnbouw/Netherlands J. Geosci.*, vol. 95, no. 2, pp. 141–151, 2016.
- [4] Z. Xu *et al.*, "Topic review: Application of raman spectroscopy characterization in micro/nano-machining," *Micromachines*, vol. 9, no. 7, 2018.
- [5] R. Holze, "E. Smith and G. Dent (eds): Modern Raman spectroscopy—a practical approach, Wiley, Chichester, United Kingdom, 2005, 210 + XI p., 24.95 £; ISBN 0471497940," *J. Solid State Electrochem.*, vol. 11, no. 4, pp. 558–558, 2007.
- [6] M. P. Deshpande, S. V. Bhatt, V. Sathe, B. H. Soni, N. Garg, and S. H. Chaki, "Raman scattering in 2H-MoS₂ single crystal," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1512, pp. 808–809, 2013.
- [7] A. Berkdemir *et al.*, "Identification of individual and few layers of WS₂ using Raman Spectroscopy," *Sci. Rep.*, vol. 3, pp. 1–8, 2013.
- [8] F. Paquin, J. Rivnay, A. Salleo, N. Stingelin, and C. Silva, "Multi-phase semicrystalline microstructures drive exciton dissociation in neat plastic semiconductors," *J. Mater. Chem. C*, vol. 3, pp. 10715–10722, 2015.