

SINTESIS DAN KARAKTERISASI ANTIBAKTERI POLYACRYLAMIDE YANG DIFUNGSIONALISASI OLEH GRAPHENE OXIDE DENGAN METODE ADSORPSI FISIS

SYNTHESIS AND ANTIBACTERIAL CHARACTERIZATION OF POLYACRYLAMIDE FUNCTIONALIZED GRAPHENE OXIDE USING PHYSICAL ADSORPTION APPROACH

Fika Fauzi^{1,*}, Silvia Nur Fatmawati¹, Fitria Wulandari¹, Wipar Sunu Brams Dwandaru¹

¹Jurusan Pendidikan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Yogyakarta, Jalan Colombo No 1, Karangmalang, Yogyakarta, 55281, Indonesia

*email korespondensi: fika.fauzi@uny.ac.id

Abstrak

Inovasi dalam teknologi pelapis antibakteri sangat dibutuhkan untuk melawan kolonisasi bakteri pada permukaan peralatan fungsional seperti peralatan medis. Pelapis antibakteri tersebut selain memiliki efek antibakteri juga harus bersifat tidak beracun atau biokompatibel. *Polyacrylamide* (PAM) terkenal sebagai polimer yang biokompatibel namun tidak memiliki efek antibakteri dan *graphene oxide* (GO) merupakan salah satu material baru yang memiliki efek antibakteri. Dalam studi ini, komposit PAM/GO telah disintesis dengan pendekatan adsorpsi fisis antara molekul polimer dan lembaran GO melalui metode ultrasonik. Struktur dari komposit ini kemudian dianalisis dengan spektroskopi UV-Vis dan FTIR. Dari data spektroskopi tersebut diperoleh bahwa komposit PAM/GO berhasil disintesis melalui pendekatan interaksi adsorpsi fisis. Sementara itu, uji antibakteri pada bakteri *S. aureus* menunjukkan bahwa PAM/GO memiliki efek antibakteri yang signifikan meskipun dengan komposisi GO yang hanya 1,5% dari komposisi PAM. Hal ini dapat menjadi pembuka untuk memanfaatkan PAM/GO sebagai pelapis antibakteri yang biokompatibel.

Kata kunci: *Graphene oxide* (GO), *Polyacrylamide* (PAM), komposit, adsorpsi fisis, antibakteri

Abstract

Innovations in antibacterial coating technology are urgently needed to combat bacterial colonization on the surface of functional equipment such as medical equipment. Apart from having an antibacterial effect, the antibacterial coating must also be non-toxic or biocompatible. *Polyacrylamide* (PAM) is known as a biocompatible polymer but does not have an antibacterial effect and *graphene oxide* (GO) is a new material that has an antibacterial effect. In this study, PAM/GO composites have been synthesized using the physical adsorption approach between polymer molecules and GO sheets by means of ultrasonic methods. The structure of these composites was analyzed using UV-Vis and FTIR spectroscopy. From those UV-Vis and FTIR data, it was found that the PAM/GO composite was successfully synthesized through the physical adsorption interaction approach. In addition, the antibacterial test on *S. aureus* bacteria showed that PAM/GO had a significant antibacterial effect even though the GO composition was only 1.5% of the PAM composition. This could open the possibility to utilize PAM/GO as a biocompatible antibacterial coating.

Keywords: *Graphene oxide* (GO), *polyacrylamide* (PAM), composite, physical adsorption antibacterial

Pendahuluan

Dewasa ini, riset di bidang pelapis antibakteri berbahan dasar komposit nano sedang gencar dikembangkan untuk menemukan cara yang efektif dan inovatif dalam melawan kolonisasi bakteri pada permukaan. Mikroorganisme yang menempel pada permukaan ini biasanya membentuk *biofilm* yang dapat menahan beberapa jenis antibiotik dan dapat berdampak negatif dan merugikan pada beberapa alat fungsional seperti pipa pada kilang minyak, paket makanan yang steril, lensa kontak dan terlebih lagi pada alat-alat kesehatan [1–3]. Selanjutnya, jika koloni dari

bakteri ini tidak dihilangkan maka dampak buruk dapat terjadi pada manusia yang bersentuhan langsung dengan permukaan dari alat-alat tersebut, sehingga inovasi dalam biomedis yang berfokus pada pengembangan pelapis antibakteri sangat dibutuhkan untuk melawan kolonisasi bakteri ataupun untuk memberikan efek disinfektan pada bakteri yang merugikan. Pelapis antibakteri ini memiliki kelebihan seperti efisiensi aktivitas mematikan bakteri yang tinggi, toksisitas rendah, biaya rendah, ramah lingkungan dan masa pakai yang lama, jika dibandingkan dengan antibiotik konvensional [4–6]. Pengembangan pelapis antibakteri ini secara umum dapat dilakukan

dengan menyintesis material hibrida atau komposit dengan cara mengombinasikan berbagai material yang memiliki efek antibakteri dengan material dengan fungsi pelapis [7,8]. Salah satu contoh material nano komposit yang akhir-akhir ini banyak dikembangkan adalah gabungan antara *graphene oxide* (GO) dan beberapa jenis polimer seperti *poly vinyl alcohol* (PVA) [9,10], kitosan [11,12], *poly lactid acid* (PLA) [13,14], dan *polyacrylamide* (PAM) [15,16].

Material *graphene* termasuk *graphene* murni, *graphene oxide* (GO), dan *reduced graphene oxide* (rGO) memiliki permukaan spesifik yang luas dan kedap terhadap hampir semua jenis molekul sehingga material ini diharapkan menjadi bahan pelapis seperti pelapis anti korosi dan pelapis antibakteri [6,17–19]. Adapun GO adalah salah satu material turunan dari *graphene* yang memiliki gugus fungsional seperti gugus asam karboksil, epoksi, dan gugus hidroksil pada bagian basal dan tepinya [20,21]. GO juga terkenal sebagai material prekursor untuk menghasilkan *graphene* dalam jumlah yang besar dengan cara mereduksi gugus fungsionalnya [21–23]. Material ini dapat disintesis melalui metode Hummers, yaitu mengoksidasi bubuk grafit dan mengelupasnya dengan metode getaran ultrasonik. GO yang dihasilkan memiliki tingkat dispersi yang baik dalam air dan tidak menggumpal kembali [21–23].

Selain itu, meskipun tidak sebagus *graphene* dalam hal konduktivitas, GO masih memiliki sifat yang luar biasa dalam hal luas permukaan spesifik dan kemudahan untuk mengadsorpsi molekul lain untuk membentuk komposit [9–16]. Secara umum ada dua cara untuk menggabungkan GO dengan molekul atau senyawa lain seperti polimer, yaitu cara kimiawi yang melibatkan ikatan kovalensi dan cara fisika yang melibatkan proses adsorpsi [16]. Cara terakhir ini memiliki keunggulan lebih mudah dan aman untuk disintesis daripada yang pertama sehingga lebih menjanjikan untuk produksi massal. Apalagi, GO memiliki luas permukaan spesifik yang besar untuk mengakomodasi proses pembentukan komposit dengan molekul lain seperti polimer.

Dalam hal kemampuan melawan bakteri, GO dianggap memiliki kemampuan yang lebih efektif dibandingkan *graphene* murni ataupun material turunan *graphene* yang lain (*reduced graphene oxide* atau rGO) [4–6]. GO juga dianggap sebagai material antibakteri yang *novel* dan menjanjikan karena memiliki tingkat toksisitas rendah, biokompatibel dan aktivitas antibakteri yang kuat [4–6]. Oleh karena itu, GO sangat tepat untuk dikembangkan menjadi pelapis antibakteri.

Namun, GO sendiri tidak begitu kuat untuk menempel pada permukaan yang akan dilapisi dan biasanya dicampur dengan polimer agar daya rekatnya bertambah [10,12]. Secara umum semua polimer dapat digunakan untuk menambah daya rekat dari GO, namun untuk keperluan antibakteri maka akan lebih bagus jika menggunakan polimer yang biokompatibel. Polimer *polyacrylamide* (PAM) adalah salah satu jenis polimer yang biokompatibel sekaligus *biodegradable* sehingga sangat potensial untuk digabungkan dengan GO untuk pelapis antibakteri [15,24].

Pada penelitian ini, komposit nano dari GO dan polimer *polyacrylamide* (PAM) telah disintesis untuk mendapatkan pelapis antibakteri berbasis GO dan biokompatibel. Penggabungan GO dan PAM dilakukan secara fisika dengan melibatkan proses adsorpsi molekul polimer PAM pada permukaan GO. Secara teknis penggabungan ini dilakukan dengan menggunakan metode ultrasonikasi. Selanjutnya, bahan komposit PAM/GO yang dihasilkan dikarakterisasi dengan spektroskopi UV-Vis dan FTIR untuk mengkonfirmasi keberhasilan pembuatan komposit PAM/GO. Selain itu, uji aktivitas antibakteri dari komposit PAM/GO juga dilakukan terhadap bakteri gram positif *S. Aureus*. Penelitian ini dapat membuka peluang untuk menghasilkan pelapis antibakteri berbahan material baru GO dengan proses sintesis yang efektif dan efisien.

Metode Penelitian

Sintesis Sampel GO

Graphene oxide (GO) yang digunakan dalam penelitian ini disintesis dengan menggunakan metode Hummers seperti yang telah dilaporkan oleh beberapa literatur [21–23]. Langkah pertama adalah mencampurkan 1,0 g serbuk grafit, 0,5 g NaNO_3 dan 23 mL H_2SO_4 (98 wt%) dalam gelas beker. Campuran tersebut kemudian dioksidasi dengan menggunakan 3,0 g KMnO_4 . Penambahan KMnO_4 harus dilakukan dengan perlahan untuk menghindari eksplosi ringan akibat proses oksidasi yang berlebihan. Proses pencampuran ini dilakukan di dalam *ice bath* dan suhu dijaga di bawah 20 °C. Selanjutnya, campuran tersebut kemudian diaduk selama 20 jam dengan menjaga suhu campuran sebesar 40 °C dalam *heat bath*. Kemudian, akuades sebanyak 200 mL ditambahkan ke dalam campuran secara perlahan dan diaduk selama 1 jam sampai larutan berwarna kecokelatan. Untuk membuang sisa KMnO_4 dalam campuran digunakan H_2O_2 (30%) sebanyak 5 mL

untuk mengikat sisa KMnO_4 . Setelah campuran berubah warna menjadi kuning keemasan sebagai tanda H_2O_2 sudah mengikat sisa-sisa KMnO_4 , campuran diendapkan dengan menggunakan *centrifuge* dan dibilas sampai pH-nya mendekati netral. Kemudian endapan dikeringkan dan diperoleh serbuk GO. Untuk mendapatkan larutan dispersi GO, serbuk GO dicampurkan dengan akuades dengan perbandingan 1 mg: 3 mL dan diultrasonikasi dengan gelombang ultrasonik dengan daya 130 W selama 30 menit.

Sintesis Sampel PAM/GO

Proses sintesis komposit PAM/GO dalam penelitian ini dimulai dengan mencampurkan 15 mg serbuk GO dan 1,0 g serbuk PAM ke dalam akuades sebanyak 100 mL. Campuran tersebut kemudian dimasukkan ke dalam gelas beker yang sudah ditempatkan pada alat ultrasonikasi. Selanjutnya, campuran diultrasonikasi selama 3 jam dan diaduk selama 1 jam pada suhu ruang.

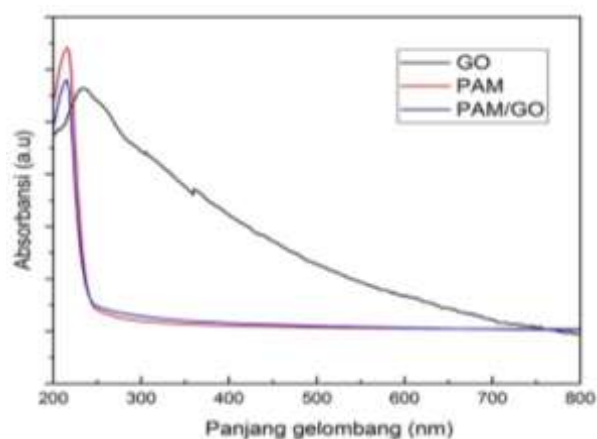
Karakterisasi dan Uji Antibakteri

Sampel GO dan komposit PAM/GO selanjutnya dikarakterisasi dengan menggunakan spektroskopi UV-Vis yang dilakukan dengan alat UV-Vis spektrometer Shimadzu UV-2450. Hal ini untuk melihat keberhasilan sintesis dan absorbansi dari sampel GO dan juga dari komposit PAM/GO. Dalam pengukuran ini, semua sampel dibuat dalam bentuk suspensi terdispersi. Karakterisasi yang kedua adalah karakterisasi FTIR menggunakan alat FTIR Thermo Nicolet Avatar 360. Hasil spektrum FTIR dari GO dan komposit PAM/GO dianalisis melalui penentuan gugus fungsional yang direpresentasikan oleh bentuk spektrum FTIR masing-masing.

Pengukuran aktivitas antibakteri dari sampel GO dan komposit PAM/GO dilakukan dengan metode difusi agar [21]. Dalam metode ini, aktivitas antibakteri diukur dengan cara mengukur diameter zona hambat sampel terhadap bakteri uji. Semakin lebar diameter zona hambat, maka sampel memiliki aktivitas antibakteri yang tinggi. Langkah pertama adalah menyiapkan media tanam bagi bakteri pada cawan. Kedua sampel GO dan PAM/GO disiapkan sebanyak 2 mL. Kemudian kertas *blank disk* berdiameter 5 mm direndam ke dalam sampel GO dan PAM/GO selama 15 menit. Selanjutnya *disk* yang sudah dilapisi GO dan PAM/GO diletakkan pada cawan berisi bakteri *S. aureus* dan diinkubasi selama 18 jam. Zona hambat kemudian diukur setelah inkubasi.

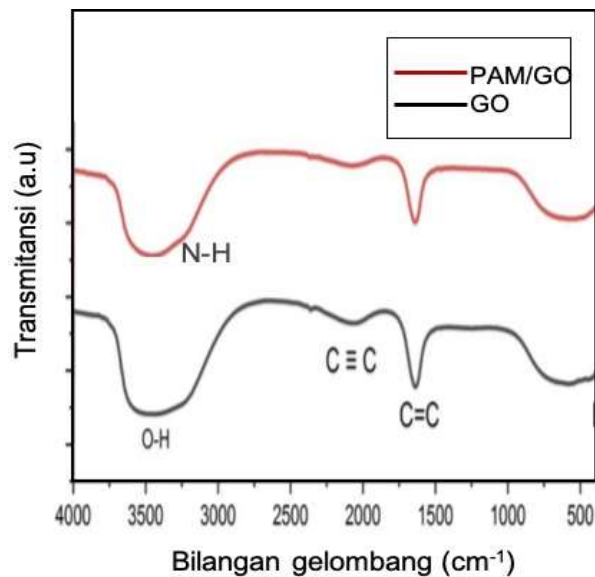
Hasil dan Pembahasan

Pengukuran spektrum UV-Vis dan FTIR digunakan untuk membuktikan keberhasilan proses sintesis dari komposit PAM/GO. Hasil karakterisasi UV-Vis GO yang disintesis dengan metode Hummers dapat dilihat pada Gambar 1. Pada sampel GO, ada puncak serapan pada panjang gelombang 233 nm dan bahu serapan pada panjang gelombang 300 nm. Dua serapan ini merupakan serapan karakteristik dari bahan GO yang menunjukkan adanya transisi elektron pada GO, untuk puncak 233 nm transisi dari tingkat energi orbital $\pi \rightarrow \pi^*$ dan bahu serapan pada 300 nm menunjukkan adanya transisi elektron dari orbital $n \rightarrow \pi^*$ [21,23]. Lebih jauh lagi, transisi elektron dari orbital $n \rightarrow \pi^*$ menunjukkan struktur sp^3 dari GO yang secara tidak langsung berhubungan dengan gugus-gugus oksigen fungsional pada basal dan tepian lembaran GO.



Gambar 1. Spektrum UV-Vis yang diambil dari sample GO (hitam), PAM (merah), dan PAM/GO (biru). Puncak karakteristik GO tertutup oleh PAM pada spektrum PAM/GO.

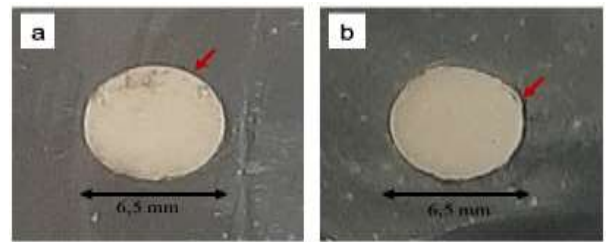
Gambar 1 menunjukkan spektrum dari bahan PAM dan komposit PAM/GO. Pada spektrum PAM, terdapat puncak serapan yang tinggi pada panjang gelombang 215 nm. Puncak absorbansi ini adalah puncak karakteristik dari polimer PAM yang juga bersesuaian dengan hasil UV Vis dari referensi [15]. Pada komposit PAM/GO ternyata puncak absorbansi berada pada panjang gelombang 215 nm juga seperti yang ada pada spektrum PAM. Hal ini menunjukkan bahwa proses pencampuran GO dan PAM berhasil. Lebih lanjut lagi, GO terdispersi sempurna bersama PAM dalam air. Karena jumlah GO sedikit, maka puncak karakteristik dari GO tertutup oleh puncak karakteristik PAM. Hal ini akan diperkuat pada data FTIR dari komposit PAM/GO.



Gambar 2. Spektrum FTIR yang diambil dari sample GO (hitam), PAM (merah), dan PAM/GO (merah).

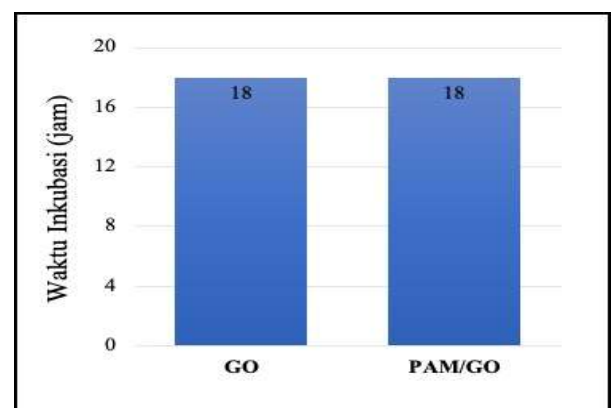
Hasil pengukuran spektrum FTIR dari sampel GO dan PAM/GO ditunjukkan oleh Gambar 2. Pada sampel GO, serapan pada bilangan gelombang 576 cm^{-1} berhubungan dengan adanya vibrasi gugus C-O-C sedangkan serapan pada bilangan gelombang $3200\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya vibrasi gugus -OH yang membuat GO bersifat hidrofilik dalam air. Terlebih lagi adanya serapan pada bilangan gelombang 1630 cm^{-1} menunjukkan vibrasi ikatan rangkap C=C yang secara langsung berhubungan dengan struktur sp^2 dari GO. Hasil ini bersesuaian dengan hasil dari referensi [15,23,25]. Hal tersebut menunjukkan bahwa proses sintesis GO berhasil. Selanjutnya pada komposit PAM/GO, serapannya tampak mirip dengan serapan yang ada pada GO, namun ada sedikit perbedaan dalam intensitas di bilangan gelombang 1630 cm^{-1} dan adanya bahu di sekitar 3160 cm^{-1} .

Turunnya intensitas tersebut dimungkinkan karena berkurangnya ikatan C=C dari GO karena interaksi dengan PAM sedangkan bahu serapan pada 3160 cm^{-1} berkaitan dengan adanya vibrasi dari gugus -NH dari polimer PAM [15,25]. Jika spektrum UV-Vis karakteristik GO seperti terpendam dalam spektrum PAM, sebaliknya pada spektrum FTIR, karakteristik PAM seolah terpendam dalam spektrum GO. Hal ini menunjukkan dari uji karakteristik yang saling melengkapi ini, proses sintesis PAM/GO dengan metode ultrasonikasi berhasil dilakukan. Terlebih lagi karena proses ini bersifat fisis, maka molekul PAM dimungkinkan teradsorpsi di permukaan GO untuk membentuk komposit PAM/GO.



Gambar 3. Cakram *blank disk* yang sudah dilapisi (a) sampel GO dan (b) sampel PAM/GO. Keduanya menunjukkan zona hambat bakteri yang ditandai dengan daerah bening di sekitarnya dengan diameter zona hambat sebesar 6,5 mm.

Sampel GO dan PAM/GO kemudian digunakan untuk melawan bakteri *S. aureus*. Mahdavi dkk. (2016) melaporkan hasil studinya bahwa untuk material PAM sendiri tidak memiliki efek antibakteri terhadap beberapa bakteri termasuk di antaranya bakteri *S. aureus* [15]. Oleh karena itu, bahan PAM tidak digunakan dalam uji antibakteri pada penelitian ini. Gambar 3 menunjukkan foto zona hambat dari sampel GO dan PAM/GO diindikasikan oleh panah berwarna merah. Diameter zona hambat GO dan PAM/GO kurang lebih 6,5 mm setelah masa inkubasi selama 18 jam (lihat Gambar 4). Hal ini menunjukkan GO dan PAM/GO mempunyai efek antibakteri terhadap *S. aureus*. Beberapa literatur mengatakan GO memiliki efek antibakteri yang bagus, namun tidak untuk PAM. Bahkan PAM tidak memiliki efek antibakteri meskipun polimer ini termasuk dalam kategori polimer yang *non-toxic* atau biokompatibel [15]. Dalam studi ini, dapat dilihat penambahan GO pada PAM dapat memunculkan sifat antibakteri meskipun dengan penambahan yang sedikit 15 mg dalam 1,0 g PAM atau hanya 1,5 % saja. Hal menarik lainnya, penambahan GO pada PAM ini tidak melalui proses ikatan kovalensi melainkan hanya proses adsorpsi fisis yang relatif mudah dan murah untuk dilakukan.



Gambar 4. Waktu inkubasi sampel GO dan PAM/GO dalam media agar

Mekanisme antibakteri dari komposit PAM/GO dapat dianalogikan dengan mekanisme yang terjadi pada sampel GO mengingat hanya GO yang memberikan efek antibakteri pada komposit ini. Dikarenakan interaksi antara GO dan PAM adalah interaksi fisis maka sifat GO dalam menghambat atau melawan bakteri dapat disamakan dengan sifat GO murni. GO menghambat laju pertumbuhan koloni bakteri melalui tiga tahapan. Pertama, koloni dari bakteri menempel pada permukaan GO. Kemudian GO yang memiliki pinggirannya yang tajam dapat merobek sel bakteri dan akhirnya bagian dalam dari sel bakteri rusak dan mati [26]. Kerusakan pada sel bakteri biasanya dikarenakan teroksidasi oleh bagian GO yang masuk pada membran sel bakteri tersebut. Efek mematikan GO terhadap sel bakteri inilah yang bertanggung jawab atas sifat antibakteri baik pada GO ataupun PAM/GO.

Kesimpulan

Dalam studi ini, komposit PAM/GO telah disintesis dengan pendekatan adsorpsi fisis antara molekul polimer dan lembaran GO melalui metode ultrasonik. Keberhasilan pembuatan komposit PAM/GO ini dapat dibuktikan oleh data UV-Vis dan FTIR yang menunjukkan adanya kombinasi antara polimer PAM dan GO. Dari uji antibakteri diperoleh bahwa PAM/GO memiliki aktivitas antibakteri yang mirip dengan GO dengan diameter zona hambat sebesar 6,5 mm selama masa inkubasi 18 jam.

Ada beberapa hal menarik yang diperoleh dari studi ini. 1) Metode ultrasonik dapat digunakan untuk menyintesis komposit GO-polimer dalam hal ini PAM/GO melalui interaksi adsorpsi fisis antara molekul polimer dan lembaran GO secara efektif dan efisien. 2) Polimer PAM yang awalnya tidak memiliki efek antibakteri dapat menghambat bakteri jika dikombinasikan dengan GO meskipun dengan jumlah komposisi GO yang sangat sedikit, hanya 1,5% saja. 3) Karena PAM diketahui sebagai material yang biokompatibel maka komposit PAM/GO ini diharapkan dapat menjadi bahan yang praktis sebagai pelapis antibakteri pada berbagai peralatan terutama peralatan medis. Untuk selanjutnya perlu dilakukan studi lebih lanjut untuk mengetahui berapa batas minimal penambahan GO pada PAM dan berapa jumlah GO yang optimal untuk menghasilkan komposit PAM/GO dengan sifat antibakteri yang paling optimal.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Fakultas MIPA UNY atas pendanaan riset melalui skema pendanaan *Research Group* dengan nomor: B/189/UN34.13/PM.01.01/2020.

Daftar Pustaka

- [1] Chen, J. Y., Xie, P., & Zhang, Z. P. (2019). Reduced graphene oxide/polyacrylamide composite hydrogel scaffold as biocompatible anode for microbial fuel cell. *Chemical Engineering Journal*, 361(1), 615-624.
- [2] Karelse, A., Van Tongel, A., Van Isacker, T., Berghs, B., & De Wilde, L. (2016). Parameters influencing glenoid loosening. *Expert Review of Medical Devices*, 13(8), 773-784.
- [3] Variola, F., Brunski, J. B., Orsini, G., de Oliveira, P. T., Wazen, R., & Nanci, A. (2011). Nanoscale surface modifications of medically relevant metals: State-of-the art and perspectives. *Nanoscale*, 3(2), 335-353.
- [4] Huhndy, A. J., & Kwon, J. (2011). Nano antibiotics: A new paradigm for treating infectious diseases using nano materials in the antibiotic's resistant era. *Journal of Controlled Release*, 156(1), 128-145.
- [5] Musil, J. (2017). Flexible antibacterial coatings. *Molecules*, 22(5), 813-819.
- [6] Díez-Pascual, A. M. (2020). Antibacterial Action of Nanoparticle Loaded nanocomposites based on graphene and its derivatives: A mini-review. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(10), 3563-3567.
- [7] Dann, S. G., Selvaraj, A., & Thomas, G. (2007). mTOR Complex1-S6K1 signaling: at the crossroads of obesity, diabetes and cancer. *Trends in Molecular Medicine*, 13(6), 252-259.
- [8] Laxminarayan, R., Duse, A., Wattal, C., Zaidi, A. K., Wertheim, H. F., Sumpradit, N., & Cars, O. (2013). Antibiotic resistance the need for global solutions. *The Lancet Infectious Diseases*, 13(12), 1057-1098.
- [9] Sedghi, R., Shaabani, A., Mohammadi, Z., Samadi, F. Y., & Isaei, E. (2017). Biocompatible electrospinning chitosan nanofibers: a novel delivery system with superior local cancer therapy. *Carbohydrate Polymers*, 159(1), 1-10.
- [10] Pan, N., Li, Z., Ren, X., & Huang, T. S. (2019). Antibacterial films with enhanced

- physical properties based on poly (vinyl alcohol) and halogen aminated-graphene oxide. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(44), 48176-480.
- [11] Zong, P., Wang, S., Zhao, Y., Wang, H., Pan, H., & He, C. (2013). Synthesis and application of magnetic graphene/iron oxides composite for the removal of U (VI) from aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal*, 220(1), 45-52.
- [12] Wrońska, N., Anouar, A., El Achaby, M., Zawadzka, K., Kędzierska, M., Miłowska, K., & Lisowska, K. (2020). Chitosan-functionalized graphene nanocomposite films: interfacial interplay and biological activity. *Materials*, 13(4), 998-1004.
- [13] Liu, R., Liang, S., Tang, X. Z., Yan, D., Li, X., & Yu, Z. Z. (2012). Tough and highly stretchable graphene oxide/polyacrylamide nanocomposite hydrogels. *Journal of Materials Chemistry*, 22(28), 14160-14167.
- [14] Sun, Y., Zhang, K., Deng, R., Ren, X., Wu, C., & Li, J. (2018). Tunable stiffness of graphene oxide/polyacrylamide composite scaffolds regulates cytoskeleton assembly. *Chemical Science*, 9(31), 6516-6522.
- [15] Mahdavi, H., Rahmani, O., & Shahverdi, A. R. (2017). Polyacrylamide/reduced graphene oxide-Ag nanocomposite as highly efficient antibacterial transparent film. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 14(1), 37-46.
- [16] Cong, H. P., Wang, P., & Yu, S. H. (2014). Highly elastic and superstretchable graphene oxide/polyacrylamide hydrogels. *Small*, 10(3), 448-453.
- [17] Tsetseris, L., & Pantelides, S. T. (2014). Graphene: An impermeable or selectively permeable membrane for atomic species?. *Carbon*, 67(1), 58-63.
- [18] Nine, M. J., Cole, M. A., Tran, D. N., & Losic, D. (2015). Graphene: a multipurpose material for protective coatings. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(24), 12580-12602.
- [19] Fauzi, F., Suhendar, H., Kusumaatmaja, A., Nugroho, F., Triyana, K., Nugroho, A. A., & Santoso, I. (2018). A simple method to examine room-temperature corrosion of graphene-coated copper foil after stored for 2.5 years. *Materials Research Express*, 5(10), 105016.
- [20] Gao, W. (2015). The chemistry of graphene oxide. *Graphene Oxide*, 6(1), 61-95.
- [21] Saleem, H., Haneef, M., & Abbasi, H. Y. (2018). Synthesis route of reduced graphene oxide via thermal reduction of chemically exfoliated graphene oxide. *Materials Chemistry and Physics*, 204(1), 1-7.
- [22] Voiry, D., Yang, J., Kupferberg, J., Fullon, R., Lee, C., Jeong, H. Y., & Chhowalla, M. (2016). High-quality graphene via microwave reduction of solution-exfoliated graphene oxide. *Science*, 353(6306), 1413-1416.
- [23] Jahandideh, H., Ganjeh-Anzabi, P., Bryant, S. L., & Trifkovic, M. (2018). The significance of graphene oxide-polyacrylamide interactions on the stability and microstructure of oil-in-water emulsions. *Langmuir*, 34(43), 12870-12881.
- [24] Kadajji, V. G., & Betageri, G. V. (2011). Water soluble polymers for pharmaceutical applications. *Polymers*, 3(4), 1972-2009.
- [25] Evingür, G. A., & Pekcan, Ö. (2018). Mechanical properties of graphene oxide-polyacrylamide composites before and after swelling in water. *Polymer Bulletin*, 75(4), 1431-1439.
- [26] Liu, S., Zeng, T. H., Hofmann, M., Burcombe, E., Wei, J., Jiang, R., & Chen, Y. (2011). Antibacterial activity of graphite, graphite oxide, graphene oxide, and reduced graphene oxide: Membrane and oxidative stress. *ACS Nano*, 5(9), 6971-6980.