

REVIEW: APLIKASI BAHAN KOMPOSIT BERBASIS REDUCED GRAPHENE OXIDE (rGO)

¹⁾Rosda Febriani Safitri, ²⁾Diah Hari Kusumawati

¹⁾Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: rosdasafitri16030224036@mhs.unesa.ac.id

²⁾Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: diahkusumawati@unesa.ac.id

Abstrak

Reduced graphene oxide (rGO) merupakan salah satu nanomaterial dengan diameter ukuran partikel dalam skala nano yang memiliki sifat mekanik, optoelektronik, atau konduktivitas yang menyempai seperti graphene. Hal ini dikarenakan rGO memiliki struktur heterogen yang terdiri dari bidang dasar seperti graphene yang memiliki cacat struktural karena penyisipan oksida ke dalam strukturnya. Material rGO banyak digunakan karena metode sintesisnya lebih mudah jika dibandingkan dengan sintesis graphene, namun rGO mempunyai struktur dan sifat yang menyerupai bahkan lebih baik jika dibandingkan graphene. Metode sintesis untuk memproduksi rGO adalah pengelupasan mikromekanik dari kristal grafit, penumbuhan epitaksial, *chemical vapor deposition* (CVD) dan sintesis kimia dengan cara mengoksidasi grafit. Dari hasil sintesis rGO memiliki sifat yang unggul yaitu konduktivitas listrik yang baik, luas permukaan yang besar, stabilitas kimia yang baik, dan rapat daya yang tinggi. Namun terdapat masalah dalam rGO sebelum di modifikasi dengan bahan lain, yaitu memiliki dispersibilitas rendah pada pelarut organik dan anorganik biasa. Maka dari itu artikel ini membahas mengenai pengembangan terbaru struktur, sifat dan kinerja dari rGO dan komposisinya yang disusun berdasarkan *review* dari berbagai artikel, sehingga dapat memperluas aplikasinya seperti baterai, superkapasitor, katalis, optoelektronik, bahan anti korosi, dan membran.

Kata Kunci: reduced graphene oxide, graphene, komposit

Abstract

Reduced graphene oxide (rGO) is a nanomaterial with a diameter of particle size in the nanoscale that has the same mechanical, optoelectronic, or conductive properties as graphene. This is because rGO has a heterogeneous structure consisting of a basic plane such as graphene which has a structural defect due to the insertion of oxide into its structure. rGO material is widely used because the synthesis method is easier when compared to graphene synthesis, but rGO has a structure and properties that resemble compared to graphene. Synthesis methods for producing rGO are micromechanical peels from graphite crystals, epitaxial growth, chemical vapor deposition (CVD) and chemical synthesis by oxidizing graphite. From the results of the synthesis of rGO has superior properties namely good electrical conductivity, large surface area, good chemical stability, and high power density. However, there are problems in rGO before being modified with other materials, which have low dispersibility in ordinary organic and inorganic solvents. Therefore this article discusses the latest development of the structure, properties and performance of rGO and its composites based on a review of various articles, so that it can expand its applications such as batteries, supercapacitors, catalysts, optoelectronics, anti-corrosion materials, and membranes.

Keywords: reduced graphene oxide, graphene, composite

PENDAHULUAN

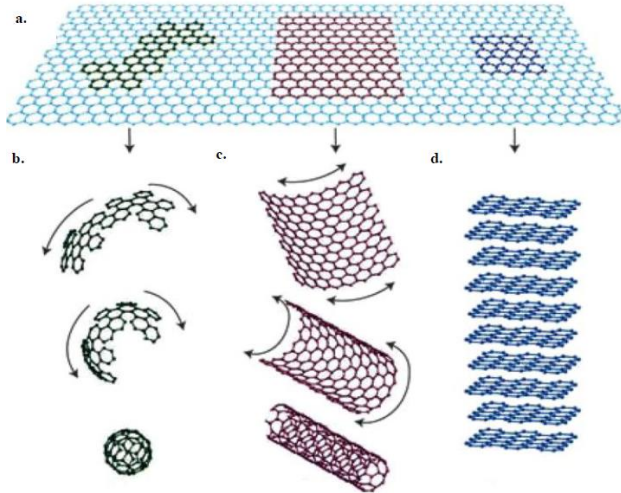
Pengembangan nanoteknologi dilakukan terus menerus oleh para peneliti dari dunia akademik maupun industri. Nanoteknologi adalah teknologi yang muncul dengan pengaplikasian pada beberapa bidang ilmiah dan penelitian, seperti teknologi informasi dan komunikasi, elektronik, energi, biologi, teknologi medis, dll (Khairurrijal, 2014). Pengembangan metode sintesis nanomaterial merupakan salah satu bidang yang menarik karena memiliki sifat yaitu berukuran nano (100 nm), sifat kimia dan fisika yang berbeda dari material sejenis

dalam ukuran besar (bulk), serta potensi untuk aplikasi industri, biomedis dan elektronik yang luas (Sze, 2013).

Perbedaan antara nanomaterial dengan material lain yaitu: (a) memiliki ukuran nano maka nilai perbandingan antara luas permukaan dan volume lebih besar dibandingkan dengan material dalam ukuran besar, sehingga bersifat lebih reaktif. Atom-atom di permukaan menentukan kereaktivitas dari material, karena bersentuhan langsung dengan material lain; (b) ketika partikel berukuran nanometer, maka hukum fisika yang berlaku yaitu fisika kuantum (Khairurrijal, 2014).

Salah satu nanomaterial yaitu karbon, merupakan material yang ideal yang dapat diaplikasikan secara luas

di bidang energi, *nanotechnology*, elektronik, pangan, lingkungan, *optic*, kesehatan, dan bioteknologi. Karbon merupakan material organik yang memiliki berbagai polimorf (gambar 1) dan diproduksi melalui pembakaran (karbonisasi) dan *pyrolysis*. Konfigurasi elektron dari karbon yaitu $1s^2 2s^2 2p_x^1 2p_y^1$ termasuk sebagai tetravalen (elektron valensi 4). Ketika karbon membentuk ikatan dengan material lain, maka elektron karbon pada orbital 2s mengalami hibridisasi sehingga mengisi orbital 2pz dan membentuk orbital sp^3 (Geim & Novoselov, 2007).

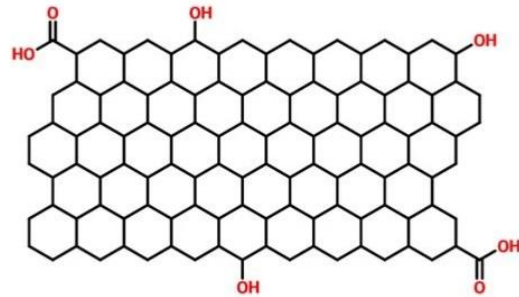


Gambar 1. Beberapa Polimorf Karbon (a) *Graphene*, (b) *Fullerenes*, (c) *Nanotubes*, dan (d) Grafit (Geim & Novoselov, 2007).

REDUCED GRAPHENE OXIDE (rGO)

Graphene merupakan lapisan beberapa atom karbon monolayer dua dimensi (2D) berstruktur heksagonal (*honeycomb*) yang memiliki ketebalan satu atom serta menjadi struktur dasar untuk pembuatan material berbasis karbon yang lain, seperti *graphite*, *carbon nanotube* dan *fullerence* (Geim & Novoselov, 2007). *Graphene* mempunyai 3 turunan yaitu grafit, GO, dan rGO. Grafit merupakan material dasar yang bersifat amorf dan memiliki karbon dan oksigen. GO merupakan hasil oksidasi dari grafit dengan penambahan oksigen dan beberapa ikatan *Van der Waals* terlepas, sehingga ketebalan dari sampel berkurang. Sedangkan rGO merupakan hasil reduksi oksigen dari GO, yang menghilangkan gugus fungsional yaitu oksigen pada bidang GO untuk meningkatkan konduktivitas listrik dari $340 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ hingga $550 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ (Geim & Novoselov, 2007). Meskipun struktur (gambar 2) dan sifat dari rGO menyerupai *graphene*, namun terdapat perbedaan dari

kedua material ini diantaranya rGO memiliki *defect* (cacat) yang disebabkan karena penyisipan oksida ke dalam struktur rGO, sedangkan pada *graphene* sudut-sudutnya terisi oleh atom karbon yang saling berikatan sehingga membentuk struktur heksagonal. Tiap struktur *graphene* saling berikatan kovalen dengan tiga atom karbon lainnya. Beberapa metode sintesis untuk memproduksi rGO adalah pengelupasan mikromekanik dari kristal grafit, penumbuhan epitaksial, *chemical vapor deposition (CVD)* dan sintesis kimia dengan cara mengoksidasi grafit (Cao & Zhang, 2015)



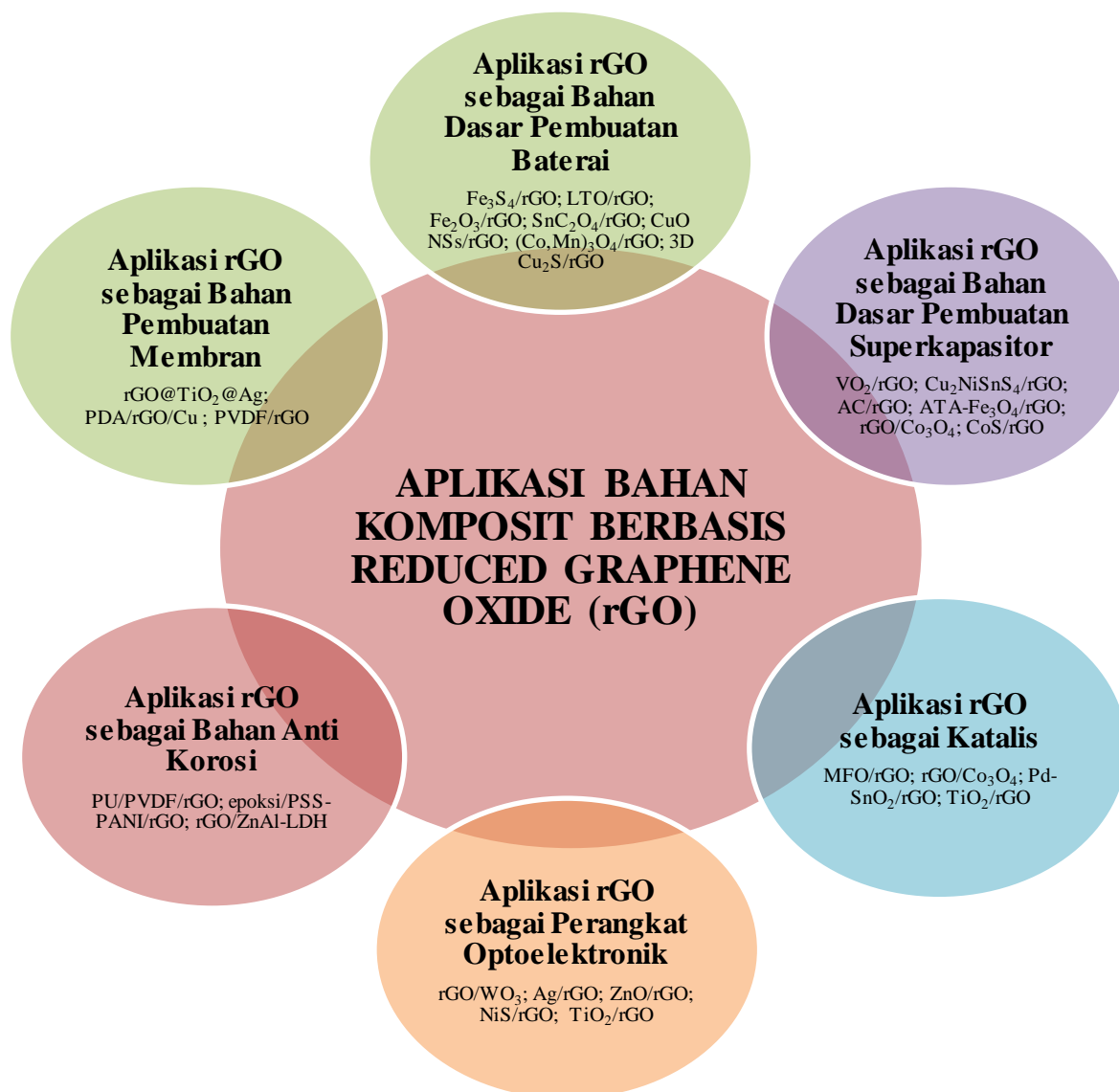
Gambar 2. Struktur rGO

(<https://www.ossila.com/products/reduced-graphene-oxide-powders>)

Reduced graphene oxide (rGO) merupakan semikonduktor yang memiliki sifat elektronik yang baik dengan gap terendah dan mobilitas elektron yang mencapai $15.000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ (Geim & Novoselov, 2007), serta memiliki konduktivitas yang menengah sebesar, rapat daya lebih tinggi, mempunyai luas permukaan besar dan sifat mekanik yang kuat (mendekati 1 TPa). Dari sifat-sifat dari rGO tersebut banyak sekali aplikasi yang dapat diterapkan, namun terdapat masalah dalam rGO sebelum di modifikasi dengan bahan lain. Karena rGO memiliki dispersibilitas rendah pada pelarut organik dan anorganik biasa (Itapu & Jayatissa, 2018). Maka dari itu perlu dilakukan modifikasi dari rGO dengan cara komposit menggabungkan dengan bahan lain sehingga dapat diperoleh struktur dan sifat yang baru dan dapat memperluas aplikasi dari rGO seperti baterai, superkapasitor, katalis, dan optoelektronik (H. Li & Bubeck, 2013).

APLIKASI KOMPOSIT DARI rGO

Artikel ini membahas mengenai pengembangan terbaru mengenai struktur, sifat dan kinerja dari rGO yang dikompositkan dengan bahan lain dalam berbagai aplikasi seperti baterai, superkapasitor, katalis, optoelektronik, bahan anti korosi, dan membran (gambar 3).



Gambar 3. Ilustrasi dari Aplikasi Bahan Komposit berbasis rGO

Reduced graphene oxide (rGO) berasal dari graphene oxide (GO) yang di proses dengan metode kimia, termal dan lainnya untuk mengurangi kandungan oksigen (Papageorgiou et al., 2015). Sifat-sifat rGO seperti termal, mekanik, dan elektronik yang luar biasa (Geim & Novoselov, 2007; Lu et al., 2016; Johra & Jung, 2015; N. Hu et al., 2014), membuat rGO menjadi kandidat bahan yang dapat digunakan dalam berbagai aplikasi dengan penambahan matriks sehingga dapat memperluas aplikasi (Potts et al., 2011). Pembuatan dari komposit rGO dengan pembebanan yang sangat rendah menunjukkan peningkatan struktur sehingga dapat meningkatkan fungsi dari rGO (Premkumar & Geckeler, 2012), dan membuat bahan memiliki sifat baru untuk berbagai aplikasi (Potts et al., 2011; Winey & Vaia, 2007). Seperti yang dinyatakan Kuilla et al., (2010), sifat fisikokimia dari rGO mampu meningkat dengan penambahan matriks kedalamnya, serta dapat memperkuat dan meningkatkan ikatan antar layer antara lapisan rGO dan matriks.

Penambahan matriks dapat mempengaruhi beberapa sifat dari rGO seperti penambahan oksida logam sebagai matriks kedalam komposit rGO dapat meningkatkan konduktivitas (Ishaq et al., 2019), dan penambahan dari matriks polimer terhadap rGO menjadi ringan, fleksibel permeabilitas air yang tinggi dan konduktor listrik yang sangat baik (Kuilla et al., 2010), serta penambahan dioksida kedalam rGO ditemukan memiliki efisiensi katalitik yang baik (Basheer, 2013). Kemungkinan penambahan matriks lain ke dalam rGO dapat membuat terbentuknya sifat baru sehingga komposit dapat digunakan secara meluas seperti perangkat optoelektronik contohnya, dioda, sel surya, fotodetektor, LED, dan lain-lain. Berikut merupakan beberapa aplikasi dari rGO komposit dengan bahan lain.

APLIKASI rGO SEBAGAI BAHAN DASAR PEMBUATAN BATERAI

Baterai merupakan sebuah sel listrik yang di dalamnya berlangsung proses elektrokimia yang

reversible (dapat kembali) dengan efisiensi yang tinggi (Chang, 2013). Proses reversibel adalah proses perubahan energi kimia menjadi energi listrik (proses pengosongan), dan sebaliknya dari energi listrik menjadi energi kimia (proses pengisian), pengisian kembali yaitu proses regenerasi dari elektroda yang digunakan, dengan melewatkan arus listrik dalam arah yang berlawanan di dalam sel.

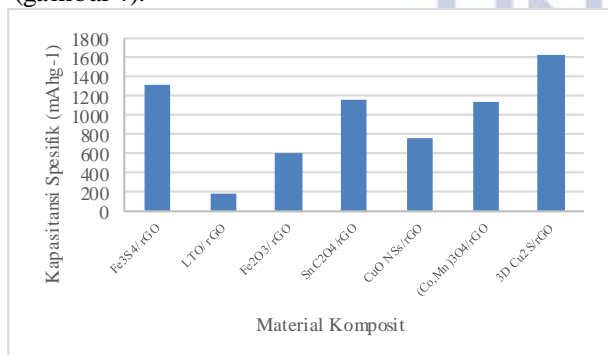
Terdapat beberapa teknologi untuk mewujudkan baterai yang memiliki efisiensi yang tinggi, teknologi baterai lithium-ion (LIB) adalah yang paling baik, karena masa pakai (siklus) panjang, rapat energi tinggi, tegangan kerja tinggi, dll. Dibandingkan dengan LIB konvensional,

sistem LIB yang baru yaitu ringan, dengan kapasitas tinggi, murah, dan aman. Oleh karena itu, perlu dilakukan perancangan dan pengembangan struktur baru untuk mewujudkan elektroda LIB tersebut. Salah satu bahan yang dapat digunakan LIB yaitu rGO, karena memiliki rapat daya menengah dan memiliki konduktivitas listrik yang dapat mencapai 97500 Sm^{-1} dalam film tebal mikrometer (Jeong et al., 2012). Potensi rGO meningkatkan konduktivitas dengan komposit bahan lain, sehingga meningkatkan kinerja baterai dan dapat berkurangnya volume dan berat baterai. Berikut beberapa penelitian komposit rGO pada baterai (tabel 1).

Tabel 1. Beberapa Penelitian pada Baterai Berbasis rGO

Baterai	Material	Metode Sintesis	Kapasitas Retensi	Kapasitansi Spesifik	Referensi
LIB	Fe ₃ S ₄ /rGO	Thermal reduction	480 mAhg ⁻¹ setelah 500 siklus	1324 mAhg ⁻¹	(Y. J. Zhang et al., 2017)
LIB	LTO/rGO	Gas-foaming dispersion	95.4% setelah 100 siklus	176.6 mAhg ⁻¹	(Meng et al., 2017)
LIB	Fe ₂ O ₃ /rGO	Solvothermal anchoring	82% setelah 100 siklus	610 mAhg ⁻¹	(T. Li et al., 2017)
LIB	SnC ₂ O ₄ /rGO	Hydrothermal/self-assembly	53% setelah 200 siklus	1166 mAhg ⁻¹	(Park et al., 2017)
LIB	CuONSs/rGO	Thermal reduction	616.2 mAhg ⁻¹ setelah 200 siklus	753.3 mAhg ⁻¹	(G. Li et al., 2017)
LIB	(Co,Mn) ₃ O ₄ /rGO	hydrothermal method	98.8% .setelah 140 siklus	1130.6 mAhg ⁻¹	(Z. Li et al., 2016)
LIB	3DCu ₂ S/rGO	hydrothermal method	600 mAhg ⁻¹ setelah 200 siklus	1630 mAhg ⁻¹	(X. Zhang et al., 2020)

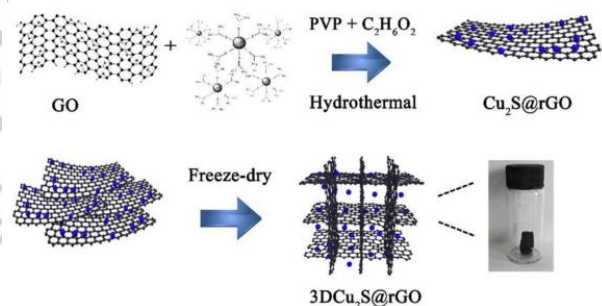
Berdasarkan tabel 1 beberapa penelitian pembuatan baterai berbasis komposit rGO dapat dilihat bahwa 3D Cu₂S/rGO merupakan salah satu komposit yang memiliki nilai kapasitansi spesifik tinggi yaitu sebesar 1630 mAhg⁻¹ (gambar 4).



Gambar 4. Beberapa penelitian material komposit berbasis rGO (Y. J. Zhang et al., 2017; Meng et al., 2017; T. Li et al., 2017; Park et al., 2017; G. Li et al., 2017; Z. Li et al., 2016; X. Zhang et al., 2020)

Penelitian yang dilakukan oleh X. Zhang et al (2020), dengan mencampurkan GO dan Cu₂S menggunakan metode hidrotermal (gambar 5) dipanaskan

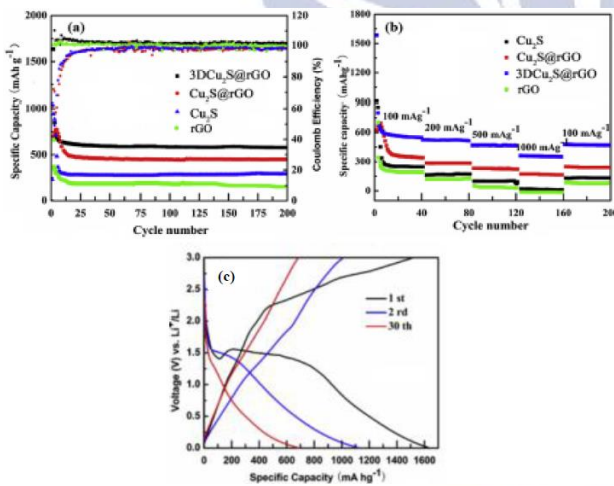
hingga 150°C selama 12 jam dengan penambahan PVP sebagai perekat. Selanjutnya pembuatan 3D Cu₂S/rGO yang ditempatkan dalam freezer vakum selama 24 jam.



Gambar 5. Metode preparasi Cu₂S/rGO (X. Zhang et al., 2020).

Hasil penelitian dari X. Zhang et al (2020) didapatkan hasil pada gambar 6a menunjukkan kinerja siklus dan efisiensi coulombic dari sampel yang berbeda pada kerapatan arus 100 mA g⁻¹. Pada sampel rGO menunjukkan kapasitas pengisian adalah 700 mAhg⁻¹ untuk siklus pertama, dan menurun hingga 152 mAhg⁻¹ setelah 200 siklus. Pada sampel Cu₂S kapasitas pengisian adalah 650 mAhg⁻¹ untuk siklus pertama, dan menurun

hingga 200 mAhg^{-1} setelah 200 siklus. Pada sampel $\text{Cu}_2\text{S}/\text{rGO}$ mempertahankan kapasitas sebesar 490 mAhg^{-1} setelah 200 siklus, sedangkan untuk sampel 3D $\text{Cu}_2\text{S}/\text{rGO}$ dengan kapasitas sebesar 600 mAhg^{-1} setelah 200 siklus. Maka efisiensi *coulombic* yang didapatkan oleh 3D $\text{Cu}_2\text{S}/\text{rGO}$ dan $\text{Cu}_2\text{S}/\text{rGO}$ keduanya sekitar 98%, hasil ini menunjukkan bahwa stabilitas siklik 3D $\text{Cu}_2\text{S}/\text{rGO}$ dan $\text{Cu}_2\text{S}/\text{rGO}$ jauh lebih baik daripada Cu_2S dan rGO. Hal ini dikarenakan komposit antara Cu_2S dan rGO dapat meningkatkan konduktivitas. Kinerja laju elektroda komposit ditunjukkan pada gambar 6b, kapasitas reversibel dari 3D $\text{Cu}_2\text{S}/\text{rGO}$ adalah 573, 556, 506 dan 404 mAhg^{-1} pada kerapatan arus masing-masing yaitu 100, 200, 500 dan 1000 mA g^{-1} . Di antara keempat bahan, kapasitas pengisian kembali dari 3D $\text{Cu}_2\text{S}/\text{rGO}$ setelah kerapatan arus berubah dari 1000 mA g^{-1} menjadi 100 mA g^{-1} menunjukkan stabilitas siklik dan kinerja laju yang baik, maka dari itu 3D $\text{Cu}_2\text{S}/\text{rGO}$ untuk proses pengisian/pengosongan pada kerapatan arus tinggi sangat baik. Pada gambar 6c kurva galvanostate charge/discharge dari 3D $\text{Cu}_2\text{S}/\text{rGO}$ didapatkan nilai kapasitas pengosongan sebesar 1630 mAhg^{-1} pada siklus pertama (gambar 5c).



Gambar 6. (a) Kinerja siklik dan efisiensi *coulombic* pada kerapatan arus 100 mA g^{-1} , (b) Kemampuan elektroda pada kerapatan arus yang berbeda, (c). Kurva galvanostate charge-discharge 3D $\text{Cu}_2\text{S}/\text{rGO}$ (X. Zhang et al., 2020)

APLIKASI rGO SEBAGAI BAHAN DASAR PEMBUATAN SUPERKAPASITOR

Superkapasitor merupakan piranti penyimpan energi efektif karena berdimensi kecil, ringan, dan menggunakan reaksi *non-faraday*. Dalam diagram *ragone* (*ragone plot diagram*) yang menyatakan superkapasitor berada di antara kapasitor konvensional dan baterai (Chen & Dai, 2013). Maka dari itu superkapasitor memiliki nilai kapasitansi spesifik melebihi kapasitor dan waktu pelepasan muatan berada di daerah menengah (tidak terlalu cepat maupun lambat), namun rapat energinya belum melebihi baterai dan *fuel cell* (Zheng et al., 2017).

Penyimpanan energi dari superkapasitor dilakukan dengan membuat lapisan ganda (*double layer*) yang terbentuk karena muatan yang berbeda jenis terkumpul pada antar layer elektroda/elektrolit dan muatan listrik terjadi penumpukan pada permukaan elektroda serta muatan ion yang berlawanan menumpuk di sisi elektrolit. Superkapasitor secara umum dikategorikan kedalam tiga jenis berdasarkan mekanisme penyimpanannya: EDLC, *Pseudocapacitor*, dan *hybrid capacitor* (Gomez-Romero, 2002). Masing-masing secara berurutan terjadi mekanisme *non-faradaic*, *faradaic*, atau kombinasi keduanya. Mekanisme *faradaic* terjadi pelepasan muatan antara elektroda dan elektrolit melalui reaksi oksidasi-reduksi. Sebaliknya, mekanisme *non-faradaic* tidak melibatkan proses pemutusan ikatan kimia melainkan melalui distribusi muatan pada permukaan elektroda.

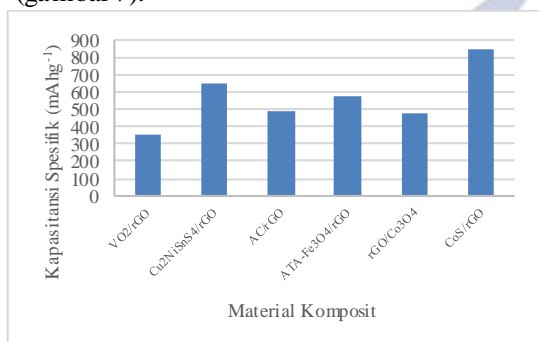
Kemampuan rapat energi dari superkapasitor disebabkan oleh luas permukaan aktif yang besar dari material pengisi elektroda (Gomez-Romero, 2002), luas permukaan aktif yang digunakan sebagai superkapasitor sekitar 10^2 hingga $2 \times 10^3 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$. Sedangkan kapasitansi dari superkapasitor bergantung kemampuan ion memenuhi pori-pori sehingga ukuran ion dan pori harus optimal. Berbagai jenis bahan yang digunakan bahan elektroda superkapasitor, termasuk resin turunan karbon, jaringan karbon, berpori karbon nanotube (Zhang et al., 2017), dan *graphene* (Purkait et al., 2018). Salah satu material yang dapat digunakan sebagai superkapasitor yaitu *graphene*, tetapi pembuatan dari *graphene* sangat sulit. Maka dari itu dapat menggunakan rGO yang memiliki struktur dan sifat dari rGO menyerupai *graphene*. Berikut beberapa penelitian komposit rGO sebagai elektroda pada superkapasitor (tabel 2)

Tabel 2. Beberapa Penelitian Superkapasitor Berbasis rGO

Super kapasitor	Material	Metoda Sintesis	Rapat Energi	Kapasitas Retensi	Kapasitansi Spesifik	Referensi
EDLC	VO_2/rGO	Solid state	3.13 Whkg^{-1}	78% setelah 10000 siklus	353 Fg^{-1}	(Lv et al., 2019)
EDLC	$\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4/\text{rGO}$	Hydrothermal reduction	5.68 mWhcm^{-3}	89.2% setelah 2000 siklus	655.1 Fg^{-1}	(Sarkar et al., 2017)
EDLC	AC/rGO	Thermalreduction &	16.2	85% setelah	486 Fg^{-1}	(Xu et al.,

Super kapasitor	Material	Metoda Sintesis	Rapat Energi	Kapasitas Retensi	Kapasitansi Spesifik	Referensi
		filtration	μWhcm^{-2}	10000 siklus		(2017)
EDLC	ATA- $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{rGO}$	Wett chemistry and sonication	75 Whkg^{-1}	86% setelah 5000 siklus	576 Fg^{-1}	(Bhattacharya et al., 2017)
EDLC	$\text{rGO}/\text{Co}_3\text{O}_4$	Hydrothermal process	39.0 Whkg^{-1}	95.6% setelah 1000 siklus	472 Fg^{-1}	(Xiang et al., 2013)
EDLC	CoS/rGO	Hydrothermal mothed		90.5% setelah 3000 siklus	849 Fg^{-1}	(Song et al., 2017)

Berdasarkan tabel 2 beberapa penelitian pembuatan superkapasitor berbasis komposit rGO dapat dilihat pada tabel 2 bahwa material CoS/rGO dengan metode hidrotomal merupakan salah satu komposit yang memiliki nilai kapasitansi spesifik tinggi yaitu sebesar 849 Fg^{-1} (gambar 7).

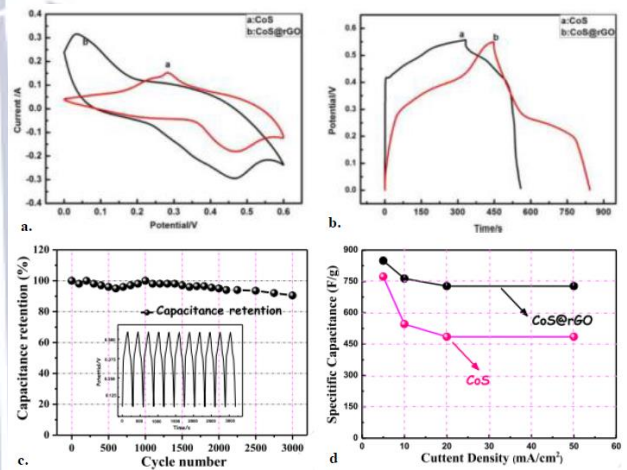


Gambar 7. Beberapa penelitian material komposit berbasis rGO (Lv et al., 2019; Sarkar et al., 2017; Xu et al., 2017; Bhattacharya et al., 2017; Xiang et al., 2013; Song et al., 2017)

Penelitian yang dilakukan oleh Song et al., (2017), yaitu membuat komposit CoS/rGO menggunakan metode hidrotomal. Pencampuran antara CoS dan GO dengan larutan etanol selama 1 jam, campuran larutan di autoklaf pada suhu 180°C selama 24 jam. Larutan kemudian dipisahkan dengan sentrifugasi, dibilas dengan etanol beberapa kali dan dikeringkan dalam 60°C selama 48 jam.

Hasil penelitian dari Song et al., (2017) didapatkan hasil yaitu pada gambar 8a menunjukkan kurva voltametri siklik yang diuji pada laju pemindaian konstan 20 mVs^{-1} , menunjukkan bahwa area dari CoS yang relatif lebih kecil daripada komposit CoS/rGO maka dapat disimpulkan bahwa elektroda komposit CoS/rGO lebih baik daripada elektroda CoS . Hasil dari pengujian pengujian galvanostate charge/discharge pada gambar 8b didapatkan waktu pengisian/pengosongan dari CoS/rGO sebesar 840 detik, yang menunjukkan kinerja elektrokimia komposit CoS/rGO lebih baik daripada CoS dalam proses pengisian/pengosongan. Pada gambar 8c menunjukkan stabilitas siklus dari CoS/rGO yaitu dapat mempertahankan kapasitansi spesifiknya sebesar 90,5% setelah 3000 siklus, hal ini karena reaksi redoks selama pengisian dan pemakaian dan situs aktif dalam bahan elektroda. Gambar 8d menunjukkan kapasitansi spesifik

dari elektroda CoS sebesar $772,7 \text{ Fg}^{-1}$ dan CoS/rGO sebesar 849 Fg^{-1} pada kerapatan arus dari 5 hingga 50 mAcm^{-2} , elektroda komposit CoS/rGO menunjukkan kapasitansi spesifik yang lebih besar daripada elektroda CoS .



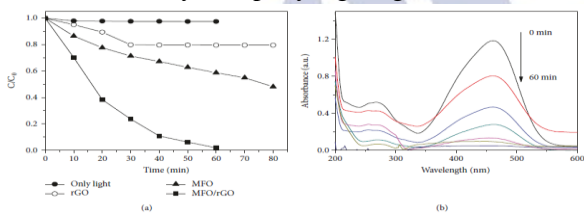
Gambar 8. (a) kurva voltametri siklik, (b) kurva galvanostate charge/discharge, (c) uji stabilitas siklus dan (d) kapasitansi spesifik pada arus yang berbeda (Song et al., 2017).

APLIKASI rGO SEBAGAI KATALIS

Katalis adalah suatu zat yang dapat meningkatkan laju reaksi tanpa terdegradasi dengan mengontrol energi pengaktifan suatu reaksi kimia, sehingga katalis terjadi kompleks dengan reaktan, kemudian terdesorpsi hingga kembali ke bentuk awal dan dapat terjadi secara homogen (fasa sama) ataupun secara heterogen (fasa berbeda) (Utomo & Laksono, 2007). Terdapat beberapa bahan komposit dan hibrida yang digunakan sebagai katalis efisien dalam berbagai reaksi, contohnya rGO merupakan bahan yang menarik dapat digunakan katalis karena sifat elektroniknya yang sangat baik (semikonduktor yang memiliki gap rendah sehingga pita konduksi dan pita valensi saling bersentuhan). Kemampuan yang baik dari rGO sebagai akseptor dan transportasi elektron, stabilitas kimia, dan luas permukaan yang besar dalam bahan tersebut sehingga dapat membantu meningkatkan sifat katalitiknya (Mu et al., 2012).

Menurut penelitian Wu et al (2018), membuat MFO/rGO disiapkan melalui metode solvothermal. Menunjukkan bahwa penggabungan rGO dapat meningkatkan aktivitas fotokatalitik untuk degradasi MO,

karena berkurangnya rekombinasi pasangan lubang elektron fotogenerasi dan peningkatan absorbansi cahaya tampak dengan rGO. Dapat dilihat pada gambar 9a menunjukkan komposit dari MFO/rGO memiliki efisiensi fotokatalitik cahaya tampak baik yang dapat menguraikan molekul MO dalam 60 menit, sementara itu MFO menunjukkan efisiensi degradasi yang buruk ~40% setelah iradiasi cahaya tampak selama 60 menit dan rGO juga menunjukkan efisiensi degradasi sekitar 20% karena kemampuan menyerapnya terhadap cahaya tampak (He et al., 2015). Pada gambar 9b menunjukkan spektrum absorbansi MO di bawah fotokatalis rGO, MFO, dan MFO/rGO pada waktu yang berbeda. Hasil dari spektra absorbansi yaitu peningkatan kinerja fotokatalitik karena terdapat pencegahan rekombinasi pasangan lubang elektron karena struktur tingkat energi bertahap dalam komposit dan peningkatan penyerapan cahaya karena terdapat rGO yang dapat menyerap cahaya tampak, sehingga komposit MFO/rGO menampilkan aktivitas fotokatalitik cahaya tampak yang sangat efisien.



Gambar 9. (a) Degradasi fotokatalitik MO di bawah iradiasi cahaya tampak dengan dan tanpa katalis, (b) spektra absorbansi dengan larutan MO (20 mg l^{-1}) (Wu et al., 2018).

Reduced graphene oxide (rGO) juga dapat digunakan sebagai katalis dalam mempercepat oksidasi dari CO_2 . Wang et al (2018), mensintesis katalis rGO/ Co_3O_4 dengan metode hidrotermal menunjukkan aktivitas katalitik dan stabilitas tinggi yang tinggi untuk oksidasi dari CO. Sifat katalitik dari komposit rGO/ Co_3O_4 sebagai katalis untuk oksidasi CO diuji melalui sistem *continuous-flow fixed-bed microreactor-gas chromatograph*. Didapatkan hasil yaitu komposit dengan penambahan rGO sebesar 30% dari fraksi massa menunjukkan aktivitas tertinggi untuk mengoksidasi CO pada 100°C (gambar 10), dan juga memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi sehingga dapat menunjang kinerja transmisi elektronik dan stabilitas tinggi. Terdapat stabilitas tinggi yang dihasilkan pada komposit karena dapat mencegah terjadinya agregasi partikel nano Co_3O_4 , sehingga menambah tingkat konversi CO semakin meningkat pada suhu rendah. Hal ini disebabkan rGO dapat melemahkan energi ikat dari Co-O dan membuat ekstraksi oksigen lebih mudah pada permukaan Co_3O_4 .

Selain itu rGO juga dapat digunakan sebagai katalis untuk oksidasi metanol dan degradasi rhodamin B (RhB).

Untuk mengoksidasi metanol, contohnya menurut penelitian dari Hu et al (2017) membuat komposit SnO_2 berbentuk prisma heksagonal dan rGO dengan bantuan dari co-reduksi PdCl_4^{2-} . Dengan membuat struktur pori dari SnO_2 berbentuk prisma heksagonal dapat membuat luas permukaan tinggi dan meningkatkan jumlah situs aktif, selain itu juga komposit prisma heksagonal SnO_2 dengan penambahan rGO dapat meningkatkan konduktivitas elektronik. Hasil dari komposit ini didapatkan aktivitas spesifik dan massa terhadap oksidasi metanol dari katalis Pd- SnO_2 /rGO meningkat lebih dari tiga kali dibandingkan dengan katalis Pd/rGO. Untuk aplikasi degradasi dari rhodamin B (RhB), W. Wang et al (2017) menggunakan rGO sebagai media kontak dan immobilisasi anatase TiO_2 pada beberapa film silia 3D yang digerakkan secara magnetis. Peningkatan efisiensi degradasi RhB yang signifikan ini diamati ketika film silia digerakkan secara optimal oleh medan magnet yang berputar, efisiensi degradasi rhodamin B (RhB) dapat ditingkatkan dengan peningkatan perpindahan massa dan efisiensi desorpsi produk. Dibandingkan pada saat keadaan statis, aktivitas fotokatalitik diperoleh meningkat tiga kali ketika kecepatan aktuasi medan magnet adalah 800 rpm. Aktivitas fotokatalitik dari komposit ini dipertahankan yaitu 83,1% setelah 15 reaksi sirkular yang menunjukkan stabilitas relatifnya, serta konduktivitas rGO dan resonansi plasma permukaan Au (SPR) dapat meningkatkan efisiensi dari degradasi RhB masing-masing sebesar 9,0% dan 8,8%.

APLIKASI rGO SEBAGAI PERANGKAT OPTOELEKTRONIK

Perangkat optoelektronik merupakan perangkat yang memiliki prinsip kerja yaitu konversi energi cahaya (opto) dan energi listrik (elektronik). Beberapa contoh perangkat optoelektronik adalah dioda, sel surya, fotodetektor, LED, dan lain-lain. Salah satu contoh pembuatan rGO sebagai perangkat optoelektronik yaitu pembuatan film tipis dan film rGO. Contohnya, menurut penelitian L. He & Tjong (2017) membuat komposit Ag/rGO dengan metode hidrotermal untuk film fleksibel transparan yang lebih besar dan lebih konduktif, dibandingkan dengan film rGO yang menunjukkan resistensi lembaran besar. Didapatkan hasil yaitu film Ag/rGO dapat mencapai resistensi lembaran sebesar $56 \Omega \text{sq}^{-1}$ pada transparansi 80%, lebih rendah daripada film rGO. Menurut Ahmed et al (2017) yaitu membuat komposit rGO/ WO_3 dengan metode hidrotermal memiliki konduktivitas lebih besar, dibandingkan dengan nanorod WO_3 . Pada frekuensi yang lebih rendah, komposit rGO/ WO_3 menunjukkan konstanta dielektrik lebih besar dibandingkan dengan nanorod WO_3 , yang dapat disebabkan oleh penghalang potensial yang dibentuk oleh kondisi yang timbul dari polarisasi antar layer.

Selain konduktivitas yang besar, rGO juga memiliki celah pita yang dapat diubah karena inert kimianya. Dalam mengubah celah pita rGO dan turunannya dengan doping, interkalasi oleh molekul organik bergantung aplikasi yang akan digunakan (Ossoon & Bélanger, 2017). Dengan demikian, rGO dapat dianggap sebagai bahan yang menarik untuk aplikasi optoelektronik, salah satunya yaitu dioda pemancar cahaya. Contohnya, menurut Pandey et al (2014) yaitu membuat film tipis ZnO/rGO dengan metode sol-gel untuk aplikasi dioda pemancar cahaya. Didapatkan hasil bahwa resistivitas sampel berkurang dengan peningkatan massa rGO dalam film komposit. Dari hasil detektor fotodioda ZnO/rGO memiliki nilai responsif yang tinggi, serta *resistance area product* dan detektivitas menunjukkan karakteristik detektor kecepatan tinggi. Hal ini disebabkan karena struktur komposit ZnO/rGO dapat digunakan untuk membuat fotodetektor yang baik di wilayah UV.

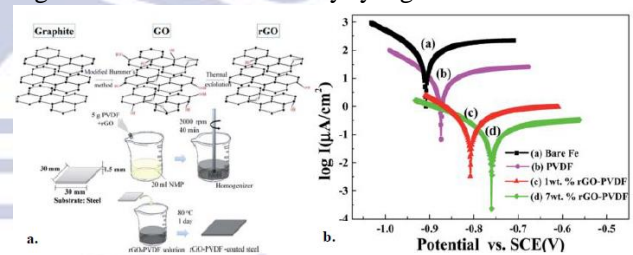
Selain dioda pemancar cahaya, rGO juga digunakan untuk membuat *dye-synthesis solar cell* (DSSC). Menurut penelitian dari Indhumathy & Prakasam (2020) membuat nanohybrid NiS/rGO menggunakan metode hidrotermal. Dari spektrum *photoluminescence* dapat mengetahui transfer dan rekombinasi dari pembawa muatan fotogenerasi, maka didapatkan hasil bahwa DSSC dengan komposit NiS/rGO menghasilkan efisiensi konversi daya sebesar 9,25%, yang lebih tinggi dari DSSC tanpa penambahan rGO sebesar 5,21%. Peningkatan efisiensi NiS/rGO karena pengurangan *triiodide* yang disebabkan oleh efek sinergis antara nanopartikel NiS yang sangat katalitik dan sifat konduktif listrik yang tinggi dari lembaran rGO. Menurut penelitian Tang et al (2017) menggabungkan rGO yang dimodifikasi bersama photoanodes TiO₂ sebagai DSSC. Didapatkan hasil bahwa dengan adanya penambahan rGO memberikan pengaruh untuk meningkatkan kinerja dari DSSC karena peningkatan transpor elektron pada bidang antar layer rGO, TiO₂ dan substrat konduktif, sehingga dapat mengoptimalkan fraksi massa dan tingkat reduksi. DSSC dengan komposit rGO/TiO₂ menunjukkan efisiensi konversi daya hampir 7,7%, dibandingkan menggunakan photoanode TiO₂ murni, serta kinerja fotovoltaiik termasuk *hort-circuit current density* (J_{sc}), *open-circuit voltage* (VOC) dan *fill factor* (FF) meningkat secara signifikan.

APLIKASI rGO SEBAGAI BAHAN ANTI KOROSI

Dalam kehidupan sehari-hari terdapat beberapa faktor yang menyebabkan kualitas mutu dari logam menurun, salah satu penyebab penurunan yaitu terjadinya korosi. Penurunan kualitas mutu dari material akibat reaksi elektrokimia dengan lingkungan sekitar dapat terjadi karena proses transfer elektron umumnya terjadi pada logam (dapat terjadi pada keramik dan polimer)

(Permana & Daminto, 2012) dan mendegradasi logam menjadi bentuknya yang teroksidasi ataupun terhidroksidasi. Oleh karena itu, pengendalian korosi sangat penting yang memerlukan strategi untuk memperlambat mekanisme korosi, karena dapat menurunkan nilai ekonomis dari material tersebut. Material yang dapat digunakan sebagai bahan anti korosi yaitu rGO digabungkan dengan polimer lainnya.

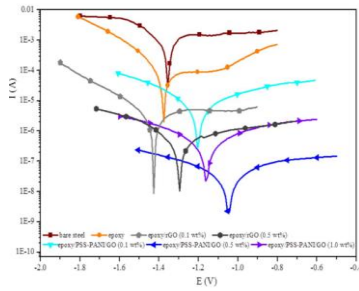
Contohnya menurut penelitian dari Xiao et al (2017) telah membuat rGO, polyvinylidene difluoride dan polyurethanes (rGO/PVDF/PU) untuk membuat komposit anti korosi yang memiliki struktur berbentuk *sandwich*. Metode yang digunakan untuk membuat komposit rGO/PVDF terlebih dahulu yaitu dengan metode wet mixing (gambar 10a), selanjutnya untuk membuat lapisan anti korosi dengan menggunakan metode *dip coating* yang berbentuk *sandwich*. Dengan lapisan pertama yaitu PU, setelah pengeringan pada suhu 60°C kemudian lapisan kedua yaitu PVDF, substrat kemudian dilapisi dengan rGO/PVDF. Dari lapisan anti korosi rGO/PVDF/PU menunjukkan hasil bahwa penambahan PU dan jumlah rGO secara signifikan meningkatkan kinerja anti korosi lapisan PVDF sangat baik dalam hal potensi dan efisiensi perlindungan korosi dapat dilihat dari kurva polarisasi katodik dan anodik untuk masing-masing proses korosi (gambar 10b). Efek peningkatan ini dikarenakan oleh sifat hidrofobik dan rasio penambahan dari rGO dalam matriks PVDF yang telah menghambat difusi molekul penghasil korosi sehingga menunjukkan efek anti korosi yang sangat baik untuk perlindungan logam karena sifat mekaniknya yang kuat.



Gambar 10. (a) Preparasi film komposit rGO/PVDF, (b) Kurva polarisasi lapisan rGO/PVDF/PU (Xiao et al., 2017).

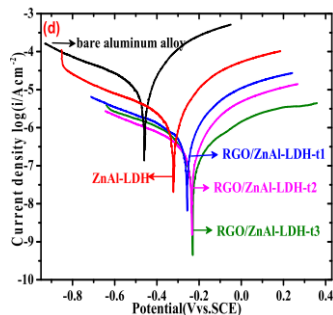
Lin et al (2019) telah membuat komposit polistirensulfonat-polianilin/reduced graphene oxide (PSS-PANI/rGO) dibuat melalui polimerisasi redoks *in situ* anilin pada permukaan rGO yang terdispersi PSS. Dalam kurva polarisasi potensiodinamik (gambar 11), penambahan rGO dalam lapisan epoksi/rGO dapat mengurangi kerapatan arus korosi dengan meningkatkan *tortuosity* difusi untuk gas dan ion, sedangkan baja karbon yang dilapisi dengan lapisan epoksi/PSS-PANI/rGO menunjukkan potensi anti korosi yang lebih tinggi dibandingkan dengan lapisan epoksi/rGO. Potensi anti korosi meningkat karena *tortuosity* yang lebih besar

dari difusi, peningkatan kekuatan antar layer antara epoksi dan pengisi, dan lapisan pasif yang dibentuk oleh adanya polianilin.



Gambar 11. Kurva polarisasi dari epoksi/PSS-PANI/rGO (Lin et al., 2019).

Luo et al (2017) telah membuat film rGO/ZnAl-LDH hybrid menggunakan metode hidrotermal yang memungkinkan untuk secara langsung menumbuhkan komposit pada permukaan substrat paduan Al. Dari kurva polarisasi potensiodinamik (gambar 12) menggunakan pengukuran elektrokimia telah mengungkapkan bahwa, dibandingkan dengan film ZnAl-LDH, film rGO/ZnAl-LDH secara signifikan meningkatkan perlindungan korosi. Karena rGO dapat membatasi difusi molekul seperti air atau oksigen dalam film rGO/ZnAl-LDH, komposit film ini dapat mempertahankan ketahanan korosi yang baik bahkan setelah 7 hari perendaman dalam larutan NaCl.



Gambar 12. Kurva polarisasi potensiodinamik dari film rGO/ZnAl-LDH (Luo et al., 2017).

APLIKASI rGO SEBAGAI BAHAN PEMBUATAN MEMBRAN

Membran adalah alat penyaringan yang digunakan untuk memisahkan berbagai komponen dalam berbagai macam aplikasi seperti osmosis, pemisahan oli dari air, desalinasi air, dll. Contoh membran *nanoparticles* rGO (NPs@rGO) disintesis oleh M. Zhang et al (2017) dengan metode *in situ*, dapat menunjukkan permeabilitas air setinggi $\sim 300 \text{ Lm}^{-2}\text{h}^{-1}\text{bar}^{-1}$ dan dapat menyaring pewarna organik seperti RhB atau ion logam berat seperti Cu^{2+} atau Cd^{2+} dalam air, serta memiliki stabilitas yang baik di bawah tekanan tinggi (hingga 15 bar) dan proses filtrasi *cross-flow*.

Bahan rGO dapat dikombinasikan dengan bahan lain karena kekuatan mekaniknya, ketebalan atom, luas permukaan yang besar dan ketahanan kimia, sehingga

dapat meningkatkan kinerja membran. Selain membentuk ikatan antar layer dengan matriks polimer, rGO dapat meningkatkan sifat fisikokimia polimer. Salah satu contohnya yaitu Abdel-Karim et al (2019) membuat membran hidrofobik rGO/PVDF dengan metode hidrotermal dan menggunakan DMF sebagai pelarut. Membran komposit dari rGO/PVDF menunjukkan peningkatan permeasi air dan penolakan terhadap garam, sehingga dapat digunakan sebagai membran desalinasi yang baik. Dari hasil membran dengan penambahan 0,5% massa rGO menunjukkan peningkatan kinerja sebagai membran desalinasi, dengan tingkat pengurangan optimal sebesar 58%. Komposit membran rGO/PVDF memiliki permeabilitas air sebesar $\sim 7,0 \text{ Lm}^{-2}\text{h}^{-1}\text{bar}^{-1}$, lebih besar dibandingkan dengan membran PVDF biasa, permeabilitas air dengan penambahan massa rGO mengalami peningkatan sebesar $\sim 169\%$. Menurut penelitian Zhu et al (2017) yang membuat membran nanofiltrasi fluks tinggi yang memiliki hidrofobisitas permukaan tinggi. Membran tersebut dapat dibuat dengan rGO/Cu, disintesis melalui reduksi *in situ* dengan polydopamine (PDA). Lapisan PDA/rGO/Cu yang menghasilkan permeabilitas air yang tinggi sebesar $22.8 \text{ Lm}^{-2}\text{h}^{-1}\text{bar}^{-1}$, dengan penambahan PDA dapat meningkatkan permeabilitas air. Hasil komposit ini mampu memberikan sifat pemisahan yang baik untuk pemurnian atau desalinasi zat warna dan juga sebagai membran antibakteri dengan pengurangan 97,9% dalam jumlah *Escherichia coli* (E. coli) hidup selama 3 jam kontak.

Selain komposit dengan polimer, rGO juga dapat dikompositkan dengan bahan lain sebagai aplikasi membran. Menurut penelitian dari Abadikhah et al (2019) membuat membran film tipis nanokomposit (MTFN), dengan menggabungkan struktur nanokomposit baru dari *reduced graphene oxide@TiO₂@Ag* (rGO@TiO₂@Ag) ke dalam lapisan aktif poliamida dengan metode *microwave-assisted irradiation process*. Membran MTFN menunjukkan peningkatan permeasi air, penolakan terhadap garam, dan sifat *antifouling*, serta membran memiliki aktivitas antimikroba yang sangat baik. Dari membran MTFN-3 dengan penambahan 0,4 wt% didapatkan hasil yaitu pengurangan bakteri *Escherichia coli* (E. coli) hidup sebesar 100% setelah 3 jam kontak.

SIMPULAN

Reduced graphene oxide (rGO) merupakan salah satu nanomaterial dengan diameter partikel berukuran nano yang memiliki sifat mekanik, optoelektronik, atau konduktif yang sama seperti graphene karena memiliki struktur heterogen yang terdiri dari bidang dasar seperti graphene yang diproses dengan metode kimia, termal dan

lainnya untuk mengurangi kandungan oksigen dan memiliki cacat struktural karena penyisipan oksida ke dalam struktur rGO. Maka dari itu rGO memiliki sifat-sifat yang hampir sama dengan sifat-sifat dari graphene yang baik, sehingga banyak aplikasi yang dapat diterapkan namun perlu modifikasi dengan bahan lain (komposit), karena rGO memiliki dispersibilitas rendah pada pelat organik dan anorganik biasa. Dari pengembangan terbaru mengenai struktur, sifat dan kinerja dari rGO yang dikompositkan maka dapat memperluas aplikasi seperti baterai, superkapasitor, katalis, optoelektronik, bahan anti korosi, dan membran.

DAFTAR PUSTAKA

- Abadikhah, H., Naderi Kalali, E., Khodi, S., Xu, X., & Agathopoulos, S. (2019). Multifunctional Thin-Film Nanofiltration Membrane Incorporated with Reduced Graphene Oxide@TiO₂@Ag Nanocomposites for High Desalination Performance, Dye Retention, and Antibacterial Properties [Research-article]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, *11*(26), 23535–23545. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b03557>
- Abdel-Karim, A., Luque-Alled, J. M., Leaper, S., Alberto, M., Fan, X., Vijayaraghavan, A., Gad-Allah, T. A., El-Kalliny, A. S., Szekely, G., Ahmed, S. I. A., Holmes, S. M., & Gorgojo, P. (2019). PVDF membranes containing reduced graphene oxide: Effect of degree of reduction on membrane distillation performance. *Desalination*, *452*(October 2018), 196–207. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.11.014>
- Ahmed, B., Ojha, A. K., Hirsch, F., Fischer, I., Patrice, D., & Matemy, A. (2017). Tailoring of enhanced interfacial polarization in WO₃ nanorods grown over reduced graphene oxide synthesized by a one-step hydrothermal method. *RSC Advances*, *7*(23), 13985–13996. <https://doi.org/10.1039/c7ra00730b>
- Basheer, C. (2013). Application of titanium dioxide-graphene composite material for photocatalytic degradation of alkylphenols. *Journal of Chemistry*, August 2012. <https://doi.org/10.1155/2013/456586>
- Bhattacharya, G., Kandasamy, G., Soin, N., Upadhyay, R. K., Deshmukh, S., Maity, D., McLaughlin, J., & Roy, S. S. (2017). Novel π -conjugated iron oxide/reduced graphene oxide nanocomposites for high performance electrochemical supercapacitors. *RSC Advances*, *7*(1), 327–335. <https://doi.org/10.1039/c6ra25630a>
- Cao, N., & Zhang, Y. (2015). Study of Reduced Graphene Oxide Preparation by Hummers' Method and Related Characterization. *Journal of Nanomaterials*, *2015*. <https://doi.org/10.1155/2015/168125>
- Chang, W.-Y. (2013). The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review. *ISRN Applied Mathematics*, *2013*(1), 1–7. <https://doi.org/10.1155/2013/953792>
- Chen, Q., Ren, M., Xu, H., Liu, W., Hei, J., Su, L., & Wang, L. (2018). Cu₂S@N, S Dual-Doped Carbon Matrix Hybrid as Superior Anode Materials for Lithium/Sodium ion Batteries. *ChemElectroChem*, *5*(15), 2135–2141. <https://doi.org/10.1002/celec.201800401>
- Cheng, J., Pan, Y., Zhu, J., Li, Z., Pan, J., & Ma, Z. (2014). Hybrid network CuS monolith cathode materials synthesized via facile in situ melt-diffusion for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, *257*, 192–197. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.124>
- Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene. *Nature Materials*, *6*(3), 183–191. <https://doi.org/10.1038/nmat1849>
- Gomez-Romero, P. (2002). New Trends in Intercalation Compounds for Energy Storage. *New Trends in Intercalation Compounds for Energy Storage*, January 2002. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0389-6>
- Han, F., Li, W. C., Li, D., & Lu, A. H. (2014). In Situ Electrochemical Generation of Mesoporous Cu₂S/C Composite for Enhanced Lithium Storage: Mechanism and Material Properties. *ChemElectroChem*, *1*(4), 733–740. <https://doi.org/10.1002/celec.201300182>
- He, L., & Tjong, S. C. (2017). Silver-decorated reduced graphene oxides as novel building blocks for transparent conductive films. *RSC Advances*, *7*(4), 2058–2065. <https://doi.org/10.1039/c6ra26348h>
- He, X., Tang, T., Liu, F., Tang, N., Li, X., & Du, Y. (2015). Photochemical doping of graphene oxide thin film with nitrogen for photoconductivity enhancement. *Carbon*, *94*, 1037–1043. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.07.089>
- Hu, N., Yang, Z., Wang, Y., Zhang, L., Wang, Y., Huang, X., Wei, H., Wei, L., & Zhang, Y. (2014). Ultrafast and sensitive room temperature NH₃ gas sensors based on chemically reduced graphene oxide. *Nanotechnology*, *25*(2). <https://doi.org/10.1088/0957-4484/25/2/025502>
- Hu, Y., Mei, T., Li, J., Wang, J., & Wang, X. (2017). Porous SnO₂ hexagonal prism-attached Pd/rGO with enhanced electrocatalytic activity for methanol oxidation. *RSC Advances*, *7*(47), 29909–29915. <https://doi.org/10.1039/c7ra03659k>
- Indhumathy, M., & Prakasam, A. (2020). Controllable Synthesis of NiS/rGO Hybrid Composite: An Excellent Counter Electrode for Dye Sensitized Solar Cell. *Journal of Cluster Science*, *31*(1), 91–98. <https://doi.org/10.1007/s10876-019-01620-w>
- Ishaq, S., Moussa, M., Kanwal, F., Ehsan, M., Saleem, M., Van, T. N., & Losic, D. (2019). Facile synthesis of ternary graphene nanocomposites with doped metal oxide and conductive polymers as electrode materials for high performance supercapacitors. *Scientific Reports*, *9*(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41939-y>
- Itapu, B., & Jayatissa, A. (2018). A Review in Graphene/Polymer Composites. *Chemical Science International Journal*, *23*(3), 1–16. <https://doi.org/10.9734/csji/2018/41031>

- Jeong, S. Y., Kim, S. H., Han, J. T., Jeong, H. J., Jeong, S. Y., & Lee, G. W. (2012). Highly concentrated and conductive reduced graphene oxide nanosheets by monovalent cation- π interaction: Toward printed electronics. *Advanced Functional Materials*, 22(15), 3307–3314. <https://doi.org/10.1002/adfm.201200242>
- Johra, F. T., & Jung, W. (2017). Hydrothermally reduced graphene oxide as a supercapacitor. *Applied Surface Science*, 357(December), 1911–1914. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.09.128>
- Khairurrijal, K. (2014). Sintesis Nanomaterial. *Jurnal Nanosains & Nanoteknologi*, 1(2), 33–57.
- Kuilla, T., Bhadra, S., Yao, D., Kim, N. H., Bose, S., & Lee, J. H. (2010). Recent advances in graphene based polymer composites. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 35(11), 1350–1375. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.07.005>
- Li, G., Jing, M., Chen, Z., He, B., Zhou, M., & Hou, Z. (2017). Self-assembly of porous CuO nanospheres decorated on reduced graphene oxide with enhanced lithium storage performance. *RSC Advances*, 7(17), 10376–10384. <https://doi.org/10.1039/c6ra28724g>
- Li, H., & Bubeck, C. (2013). Photoreduction processes of graphene oxide and related applications. *Macromolecular Research*, 21(3), 290–297. <https://doi.org/10.1007/s13233-013-1139-x>
- Li, T., Qin, A., Yang, L., Chen, J., Wang, Q., Zhang, D., & Yang, H. (2017). In Situ Grown Fe₂O₃ Single Crystallites on Reduced Graphene Oxide Nanosheets as High Performance Conversion Anode for Sodium-Ion Batteries. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(23), 19900–19907. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b04407>
- Li, Z., Cui, Y., Chen, J., Deng, L., & Wu, J. (2016). Fabrication of (Co,Mn)₃O₄/rGO composite for lithium ion battery anode by a one-step hydrothermal process with H₂O₂ as additive. *PLoS ONE*, 11(10), 1–11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164657>
- Lin, Y. T., Don, T. M., Wong, C. J., Meng, F. C., Lin, Y. J., Lee, S. Y., Lee, C. F., & Chiu, W. Y. (2019). Improvement of mechanical properties and anticorrosion performance of epoxy coatings by the introduction of polyaniline/graphene composite. *Surface and Coatings Technology*, 374 (November 2017), 1128–1138. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.01.050>
- Lu, C., Huang, P. J. J., Liu, B., Ying, Y., & Liu, J. (2016). Comparison of Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide for DNA Adsorption and Sensing. *Langmuir*, 32(41), 10776–10783. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b03032>
- Luo, X., Yuan, S., Pan, X., Zhang, C., Du, S., & Liu, Y. (2017). Synthesis and Enhanced Corrosion Protection Performance of Reduced Graphene Oxide Nanosheet/ZnAl Layered Double Hydroxide Composite Films by Hydrothermal Continuous Flow Method. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(21), 18263–18275. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b02580>
- Lv, W., Yang, C., Meng, G., Zhao, R., Han, A., Wang, R., & Liu, J. (2019). VO₂(B) nanobelts/reduced graphene oxide composites for high-performance flexible all-solid-state supercapacitors. *Scientific Reports*, 9(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47266-6>
- Meng, T., Yi, F., Cheng, H., Hao, J., Shu, D., Zhao, S., He, C., Song, X., & Zhang, F. (2017). Preparation of Lithium Titanate/Reduced Graphene Oxide Composites with Three-Dimensional “Fishnet-Like” Conductive Structure via a Gas-Foaming Method for High-Rate Lithium-Ion Batteries. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(49), 42883–42892. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b15525>
- Mu, J., Chen, B., Zhang, M., Guo, Z., Zhang, P., Zhang, Z., Sun, Y., Shao, C., & Liu, Y. (2012). Enhancement of the visible-light photocatalytic activity of In₂O₃-TiO₂ nanofiber heteroarchitectures. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 4(1), 424–430. <https://doi.org/10.1021/am201499r>
- Ossonon, B. D., & Bélanger, D. (2017). Synthesis and characterization of sulfophenyl-functionalized reduced graphene oxide sheets. *RSC Advances*, 7(44), 27224–27234. <https://doi.org/10.1039/c6ra28311j>
- Pandey, A., Saha, S., & Srivastava, S. K. (2014). Fabrication and characterization of ZnO-rGO nanocomposite based schottky diode for UV detection. *Proceedings 12th International Conference on Fiber Optics and Photonics, Photonics 2014*, 5–7. <https://doi.org/10.1364/photonics.2014.s5a.67>
- Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A., & Young, R. J. (2015). Graphene/elastomer nanocomposites. *Carbon*, 95, 460–484. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.08.055>
- Park, J. S., Jo, J. H., Yashiro, H., Kim, S. S., Kim, S. J., Sun, Y. K., & Myung, S. T. (2017). Synthesis and Electrochemical Reaction of Tin Oxalate-Reduced Graphene Oxide Composite Anode for Rechargeable Lithium Batteries. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(31), 25941–25951. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b03325>
- Pemana, A., & Daminto, D. (2012). Fabrikasi Polianilin-TiO₂ dan Aplikasinya sebagai Pelindung Anti Korosi pada Lingkungan Statis, Dinamis dan Atmosferik. *Jurnal Fisika Dan Aplikasinya*, 8(1), 120106. <https://doi.org/10.12962/j24604682.v8i1.861>
- Potts, J. R., Dreyer, D. R., Bielawski, C. W., & Ruoff, R. S. (2011). Graphene-based polymer nanocomposites. *Polymer*, 52(1), 5–25. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2010.11.042>
- Premkumar, T., & Geckeler, K. E. (2012). Graphene-DNA hybrid materials: Assembly, applications, and prospects. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 37(4), 515–529. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.08.003>
- Purkait, T., Singh, G., Kumar, D., Singh, M., & Dey, R. S. (2018). High-performance flexible supercapacitors based on electrochemically tailored three-dimensional reduced graphene oxide networks. *Scientific Reports, November 2017*, 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18593->

- Sarkar, S., Howli, P., Das, B., Das, N. S., Samanta, M., Das, G. C., & Chattopadhyay, K. K. (2017). Novel Quaternary Chalcogenide/Reduced Graphene Oxide-Based Asymmetric Supercapacitor with High Energy Density. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(27), 22652–22664. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b00437>
- Song, X., Tan, L., Wang, X., Zhu, L., Yi, X., & Dong, Q. (2017). Synthesis of CoS@rGO composites with excellent electrochemical performance for supercapacitors. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 794, 132–138. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.04.014>
- Sze, B. C. Y. (2013). *Synthesis and Characterization of Reduced Graphene Oxide / Tio 2 Nanocomposites As High Performance Photocatalyst. Dissertation Submitted in Fulfillment of the Requirement for the Degree of Master of Science. Department of Physics Faculty of Science, Univ.*
- Tang, B., Ji, G., Wang, Z., Chen, H., Li, X., Yu, H., Li, S., & Liu, H. (2017). Three-dimensional graphene networks and reduced graphene oxide nanosheets co-modified dye-sensitized solar cells. *RSC Advances*, 7(72), 45280–45286. <https://doi.org/10.1039/c7ra09135d>
- Utomo, M. P., & Laksono, E. W. (2007). Tinjauan Umum (M Panjoto U & Endang W.L). *Prosiding Seminar Nasional MIPA*, 110–115.
- Wang, W., Huang, X., Lai, M., & Lu, C. (2017). RGO/TiO₂ nanosheets immobilized on magnetically actuated artificial cilia film: a new mode for efficient photocatalytic reaction. *RSC Advances*, 7(17), 10517–10523. <https://doi.org/10.1039/c6ra26306b>
- Wang, Y., Chen, Z. Hua, Huang, J., Li, G. Jie, Cao, J. Liang, Zhang, B., Chen, X. Ying, Zhang, H. Li, & Jia, L. (2018). Preparation and catalytic behavior of reduced graphene oxide supported cobalt oxide hybrid nanocatalysts for CO oxidation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 28(11), 2265–2273. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(18\)64871-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64871-X)
- Winey, K. I., & Vaia, R. A. (2007). *Polymer. Most*, 32(April), 314–322.
- Wu, F., Duan, W., Li, M., & Xu, H. (2018). Synthesis of MgFe₂O₄/Reduced graphene oxide composite and its visible-light photocatalytic performance for organic pollution. *International Journal of Photoenergy*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/7082785>
- Xiao, Y. K., Ji, W. F., Chang, K. Sen, Hsu, K. T., Yeh, J. M., & Liu, W. R. (2017). Sandwich-structured rGO/PVDF/PU multilayer coatings for anti-corrosion application. *RSC Advances*, 7(54), 33829–33836. <https://doi.org/10.1039/c7ra05674e>
- Xu, L., Li, Y., Jia, M., Zhao, Q., Jin, X., & Yao, C. (2017). Synthesis and characterization of free-standing activated carbon/reduced graphene oxide film electrodes for flexible supercapacitors. *RSC Advances*, 7(71), 45066–45074. <https://doi.org/10.1039/c7ra07459j>
- Yang, S., Ran, Y., Wu, H., & Wang, S. (2018). *iMedPub Journals Hydrothermal Synthesis of Copper Sulfide Flowers and Nanorods for Lithium-Ion Battery Applications Abstract. Ii*, 1–9.
- Zhang, M., Guan, K., Shen, J., Liu, G., Fan, Y., & Jin, W. (2017). Nanoparticles@rGO membrane enabling highly enhanced water permeability and structural stability with preserved selectivity. *AIChE Journal*, 63(11), 5054–5063. <https://doi.org/10.1002/aic.15939>
- Zhang, X., Duan, L., Zhang, X., Li, X., & Lü, W. (2020). Preparation of Cu₂S@rGO hybrid composites as anode materials for enhanced electrochemical properties of lithium ion battery. *Journal of Alloys and Compounds*, 816(xxxx), 152539. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152539>
- Zhang, Y. J., Qu, J., Hao, S. M., Chang, W., Ji, Q. Y., & Yu, Z. Z. (2017). High Lithium Storage Capacity and Long Cycling Life Fe₃S₄ Anodes with Reversible Solid Electrolyte Interface Films and Sandwiched Reduced Graphene Oxide Shells. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(48), 41878–41886. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b13558>
- Zhao, J., Li, Y., Wang, Y., Mao, J., He, Y., & Luo, J. (2017). Mild thermal reduction of graphene oxide as a lubrication additive for friction and wear reduction. *RSC Advances*, 7(3), 1766–1770. <https://doi.org/10.1039/c6ra26488c>
- Zhu, J., Wang, J., Uliana, A. A., Tian, M., Zhang, Y., Zhang, Y., Volodin, A., Simoons, K., Yuan, S., Li, J., Lin, J., Bernaerts, K., & Van Der Bruggen, B. (2017). Mussel-Inspired Architecture of High-Flux Loose Nanofiltration Membrane Functionalized with Antibacterial Reduced Graphene Oxide-Copper Nanocomposites. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(34), 28990–29001. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b05>
- Zheng, S., Wu, Z. S., Wang, S., Xiao, H., Zhou, F., Sun, C., Bao, X., & Cheng, H. M. (2017). Graphene-based materials for high-voltage and high-energy asymmetric supercapacitors. *Energy Storage Materials*, 6, 70–97. <https://doi.org/10.1016/j.jensm.2016.10.00>