

Analisa Pengaruh Doping Boron Terhadap Sifat Kapasitif Material *Graphene* untuk Aplikasi Superkapasitor

Yurian Ariandi Andrameda, Diah Susanti, Haniffudin Nurdiansah

Departemen Teknik Material, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: santiche@mat-eng.its.ac.id

Abstrak—Media penyimpanan energi listrik merupakan salah satu material yang perlu dikembangkan di era ini. Salah satu media penyimpanan listrik adalah *electric double layer capacitor* (EDLC). *Graphene* adalah material karbon berlapis tunggal yang memiliki sifat-sifat unggul dalam aplikasi EDLC karena konduktifitas listrik dan luas permukaan aktif yang tinggi. Pendopongan *graphene* dengan boron diharapkan mampu meningkatkan konduktifitas listrik dengan mekanisme penambahan jumlah *hole*, sehingga penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pendopongan boron pada *graphene* terhadap sifat kelistrikkannya dan struktur *graphene*. Metode hummer yang dimodifikasi diikuti dengan proses *hydrothermal* digunakan untuk mensintesis *reduced graphene oxide* (rGO). Penelitian ini menggunakan larutan asam borik H_3BO_3 1M sebagai media pendoping atom boron dengan variasi penambahan 1 ml, 2 ml, 3 ml. Material yang disintesis dikarakterisasi dengan menggunakan XRD, SEM-EDX, FTIR, FPP, dan CV. Sifat kapasitif elektroda diukur dengan melakukan uji CV dengan rentang scan rate 5, 10, 50 dan 100 mV/s. Hasil Penelitian ini menunjukkan bahwa doping boron berhasil meningkatkan kapasitansi spesifik dari 164.2 F/g sebelum didoping menjadi 192.5 F/g setelah didoping boron 4.37 at% dengan larutan Na_2SO_4 1M pada scan rate 5 mV/s.

Kata Kunci—*Graphene*, rGO, Superkapasitor, EDLC, Doping, Boron, Kapasitansi.

I. PENDAHULUAN

PEMILIHAN material akan berdampak pada isu mengenai pemanfaatan energi yang lebih efisien, mulai dari sumber energi baru, terobosan energi alternatif, sampai pengembangan media penyimpanan energi. Media penyimpan energi yang dipakai pada alat elektronik sehari-hari adalah baterai dan kapasitor. Selama ini baterai memang dianggap efektif untuk menjadi sumber daya bagi alat yang membutuhkan voltase rendah. Namun, terdapat kelemahan jika sering dipakai maka baterai akan mengalami *voltage drop*. Adanya superkapasitor yang dipasang pada baterai akan meningkatkan performa dan umur pakai baterai.

Superkapasitor merupakan teknologi baru yang dikembangkan dari kapasitor konvensional. Kapasitor ini memanfaatkan permukaan elektroda yang luas dan konduktifitas listrik yang tinggi untuk mencapai nilai

kapasitansi yang jauh lebih besar daripada kapasitor konvensional. Hal ini dikarenakan kapasitas penyimpanan muatan yang sangat besar, proses charge-discharge yang cepat dan tahan lama diantara kapasitor biasa. Keunggulan ini membuat superkapasitor telah digunakan secara luas dalam berbagai bidang khususnya bidang teknologi digital, mesin listrik dan peralatan militer dan luar angkasa. Riyanto [1]

Graphene adalah material karbon dengan satu lapisan yang memiliki bentuk kisi heksagonal, struktur dua dimensi ini muncul akibat mengalami hibridasi sp^2 . *Graphene* memiliki keunggulan karena mempunyai konduktivitas listrik yang tinggi dan rendahnya gangguan, yang membuat *graphene* ini tidak mengalami perubahan dan kerusakan dalam aplikasinya. Selain itu *graphene* memiliki mobilitas pembawa intrinsik yang tinggi ($200.000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$), transmitansi optik besar (97,7%), Luas permukaan spesifik secara teoritis ($2630 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$), dan alasan kekuatan mekanik yang superior [2]. Hal ini mengakibatkan proses pengisian muatan yang cepat karena luasnya permukaan aktif sebagai pengisi elektroda saat proses charging-discharging [3].

Pendopongan *heteroatoms* dalam material nanostruktur karbon dapat meningkatkan efektifitas dari media penyimpanan energi dalam superkapasitor. Dengan doping atom boron dalam *nanosheets* dapat meningkatkan hingga 100% sifat kapasitansi yang semula dari 53 F/g (1 A/g) pada *thermally reduced graphene nanostructure* menjadi 113 F/g (1 A/g) pada *boron doped graphene* [4]. Dari penelitian diatas maka perlunya penelitian lebih lanjut untuk pengembangan bahan *graphene* dengan doping boron guna meningkatkan sifat kapasitansinya untuk aplikasi superkapasitor dengan metode lain agar didapatkan hasil yang lebih signifikan dari *boron doped graphene*, sehingga penelitian ini memiliki manfaat menghasilkan material *graphene* dengan doping atom boron yang memiliki sifat kapasitif yang baik untuk aplikasi elektroda superkapasitor.

II. METODE PENELITIAN

A. Sintesis Grafit Oksida

GO disintesis dengan menggunakan modifikasi metode Hummer . 2 gr grafit direaksikan dengan 80 ml H_2SO_4 98% dan 4 gr NaNO_3 dengan pengadukan selama 4 jam pada kondisi temperatur dibawah 20°C sehingga harus menggunakan *ice*

bath. Setelah pengadukan berlangsung 2 jam 8 gr KMnO_4 ditambahkan secara bertahap. Reaksi asam kuat H_2SO_4 dengan KMnO_4 akan membentuk agen oksidator yang sangat reaktif, Mn_2O_7 .

Agar Oksidasi berlangsung sempurna maka pengadukan dilanjutkan hingga 24 jam pada temperatur 35°C . Kemudian dilakukan penambahan 200 ml aquades secara bertahap. Reaksi antara aquades dan H_2SO_4 merupakan reaksi endotermik sehingga akan terjadi kenaikan temperatur hingga 98°C . Untuk menghilangkan sisa KMnO_4 maka kedalam larutan ditambahkan 15 ml H_2O_2 30% sehingga larutan berubah warna dari coklat tua menjadi kuning cerah disertai gelembung-gelembung. Selanjutnya larutan disentrifuge untuk memisahkan fasa padat dan cair dan dilanjutkan dengan proses pencucian dengan aquades secara berulang dengan tujuan penetralan pH dan mereduksi sisa SO_4^{2-} . Selama proses pencucian terjadi eksfoliasi GO sehingga GO semakin mengental. Apabila pH sudah netral dan tidak terbentuk endapan putih BaSO_4 setelah titrasi dengan BaCl_2 1M maka GO siap didrying pada 110°C selama 12 jam. [5][6]

B. Sintesis Reduced Graphene Oxide (rGO) dan Boron rGO

Reduced graphene oxide disintesis dengan cara meng-*exfoliated* grafit oksida dengan proses ultrasonikasi menjadi *graphene oxide*, kemudian dilanjutkan dengan mereduksi *graphene oxide* menjadi *Reduced graphene oxide* (rGO). Grafit oksida direduksi untuk mendapatkan *graphene oxide* dengan cara stiring selama 1 jam yang sebelumnya 0,1 gram grafit oksida telah di larutkan dalam 100 ml aquades. Setelah itu grafit oksida yang sudah terlarut dalam aquades dilakukan proses ultrasonikasi selama 2 jam yang berfungsi untuk mengelupas (*exfoliate*) grafit oksida menjadi lembaran-lembaran kecil *graphene oxide*. Lalu endapan di *hydrothermal* selama 4 jam pada temperatur 200°C . Kemudian diultrasonikasi lagi selama 1 jam lalu dilakukan drying.

Dalam pembuatan boron doped *reduced graphene oxide* (B-rGO) memiliki proses yang sama dengan sintesis rGO tetapi dengan tambahan proses dimana dilakukan penambahan larutan *boric acid* (H_3BO_3) 1 M dengan variasi 1 ml, 2 ml dan 3 ml setelah proses ultrasonikasi. Selanjutnya, dilakukan proses stirring kecepatan sedang dengan temperatur 70°C agar proses reaksi berjalan sempurna dan cepat.

C. Pembuatan Elektroda

Dibuat larutan dengan perbandingan *reduced graphene oxide* (rGO) 1 mg dengan 1 ml aquades. Kemudian di stirring selama 1 jam agar larutan homogen. *Nickel foam* ukuran 5x1 cm yang berfungsi sebagai elektroda disiapkan. Penimbangan massa awal *nickel foam* dilakukan untuk mengetahui berapa banyak massa rGO yang nanti terdepositasi. *Nickel foam* yang telah ditimbang dicelupkan kedalam larutan rGO. Ultrasonikasi kemudian dilakukan selama 30 menit untuk mendepositasi rGO kedalam pori-pori *nickel foam*. Setelah itu dilakukan proses *drying* dengan cara memasukan *nickel foam* ke dalam *muffle furnace*, *drying* selama 12 jam dengan temperatur 120°C . Elektroda yang sudah siap dilakukan pengujian *Cyclic Voltummetry* (CV) dengan larutan elektrolit Na_2SO_4 1M.

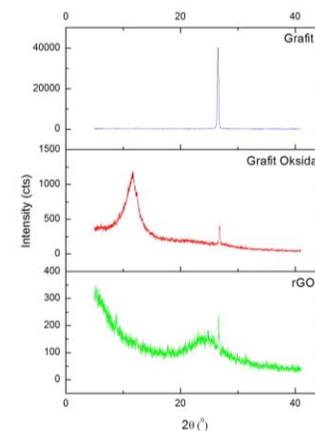
D. Pengujian dan Karakterisasi Penelitian

Pengamatan struktur grafit, grafit oksida, rGO dan B-rGO dilakukan menggunakan XRD. Pengamatan difraksi sinar-X dilakukan pada sudut $2\theta = 5^\circ - 90^\circ$ dengan λ Cu-K $\alpha = 1.54060$ Å. Pengamatan morfologi dilakukan menggunakan instrumen SEM *Inspect S5*. Dilakukan pengujian *Fourier-Transform Infrared* (FTIR) beruntuk untuk mengetahui gugus fungsi yang terbentuk selama proses sintesa. Pengujian ini menggunakan mesin Nicolet IS10 dengan *range* panjang gelombang sebesar $500-4000$ cm^{-1} . Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan pada sampel grafit, grafit oksida, rGO, B-rGO, dan elektroda *nickel foam - reduced graphene oxide* (Ni-rGO), serta Ni-B-rGO. Alat yang digunakan dalam pengujian SEM yaitu INSPECT S50. Sedangkan untuk menentukan konduktivitas listrik *Graphene* dilakukan pengujian Four Point Probe. Pengujian untuk mengetahui nilai kapasitansi juga dilakukan dengan menggunakan instrument *Cyclic Voltammetry* (CV) AUTOLAB PGSTAT 302 METHROM..

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Hasil Pengujian XRD

Perbandingan hasil uji XRD pada sampel grafit, grafit oksida, dan rGO ditunjukkan pada **Gambar 1**. Terlihat bahwa sampel grafit memiliki peak tertinggi (002) pada $2\theta = 26.53^\circ$ dan $d_{\text{spacing}} = 3.58$ Å. Peak grafit yang dihasilkan memiliki bentuk yang tajam dan intensitas tinggi, hal ini menunjukkan bahwa grafit yang digunakan memiliki struktur yang kristalin dan kemurnian yang baik. [7].



Gambar 1. Pola pengujian XRD pada sampel rGO dan B-rGO

Setelah proses oksidasi pada grafit maka grafit berubah menjadi grafit oksida. Puncak dari grafit (002) akan sepenuhnya berubah menjadi puncak (001) pada $2\theta = 11.74^\circ$ dan $d_{\text{spacing}} = 7.53$ Å. Perubahan posisi puncak, nilai d_{spacing} dan intensitas dipengaruhi oleh gugus fungsional oksigen (-OH) yang diakibatkan oleh proses oksidasi dalam grafit. Gugus-gugus fungsi ini juga akan mengakibatkan pelebaran struktur kristal pada grafit oksida sehingga memiliki d_{spacing} yang lebih lebar apabila dibandingkan dengan grafit murni [8]

Grafit oksida lalu direduksi sehingga didapatkan rGO yang memiliki puncak (002) pada $2\theta = 25.20^\circ$ dan $d_{\text{spacing}} = 3.53$ Å. Tidak ada lagi puncak grafit oksida (001) pada $2\theta = 11.74^\circ$.

Menurunnya intensitas pada rGO terjadi karena jumlah *layer* rGO yang semakin berkurang dan terjadinya penurunan nilai $d_{spacing}$ diakibatkan proses *chemical exfoliation* dan juga struktur kristal rGO yang cenderung memiliki struktur amorf.

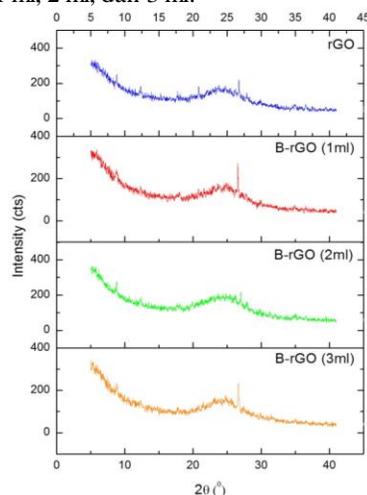
Hasil dari jarak antar *layer* dibandingkan dengan seluruh sampel grafit, grafit oksida, dan rGO ditunjukkan dalam **Tabel 1**.

Tabel 1.

Hasil Perhitungan Nilai Dspacing Dari Sampel Grafit, Grafit Oksida, Dan rGO

No	Sampel	Sudut Difraksi 2θ (°)	$d_{spacing}$ (Å)
1	Grafit	26.53	3.36
2	Grafit Oksida	11.74	7.54
3	rGO	25.20	3.53

Selanjutnya, pada **Gambar 2** menunjukkan perbandingan antara sampel rGO dengan B-rGO dengan penambahan H_3BO_3 1M sebanyak 1 ml, 2 ml, dan 3 ml.



Gambar 2. Pola pengujian XRD pada sampel rGO dan Variasi B-rGO

Hasil XRD perbandingan antara sampel rGO dengan B-rGO hampir tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Tetapi jika diamati, sampel memiliki perbedaan pada $d_{spacing}$ dan *Crystallite Size* seperti yang ditunjukkan **Tabel 2**

Tabel 2.

Nilai $d_{spacing}$ dan Crystallite Size (D) rGO dan Variasi B-rGO

No	Sampel	2θ (°)	$d_{spacing}$ (Å)	FWHM (rad)	D(nm)
1	rGO	25.20	3.53	0.04393	32.30
2	B-rGO 1	25.06	3.55	0.04558	31.14
3	B-rGO 2	24.72	3.60	0.04619	30.75
4	B-rGO 3	24.54	3.63	0.04868	29.18

Pada grafik XRD rGO dan B-rGO juga terlihat adanya perubahan FWHM (broadening) akibat dari penambahan nilai doping. Hal ini dapat didapatkan dengan persamaan Scherrer pada **Persamaan 2**. [9]

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2)$$

Dimana : D = Ukuran Kristal

λ = Panjang gelombang Cu-Kα (1.54060 Å)

B = FWHM (rad)

K = konstanta Scherrer dengan nilai 0.9

Tabel 2, pada ke-empat peak secara umum terjadi pergeseran derajat ke yang lebih rendah saat terjadi nilai pendopingan. $D_{spacing}$ akan bertambah besar dikarenakan keberadaan atom-atom pendoping lain pada rGO memiliki jari-jari atom yang lebih besar dari karbon sehingga atom boron telah berhasil didoping pada rGO. Hal ini sesuai dengan teori dimana atom boron memiliki ukuran atom yang lebih besar [10]

Tabel 2 juga menunjukkan hasil perhitungan *crystallite size* dari sampel rGO dan B-rGO. pendopingan boron pada rGO akan menghasilkan *defect* sehingga mengecilkan *Crystallite Size* pada rGO. *Defect* ini akan mengakibatkan ketidakseragaman panjang ikatan pada rGO karena adanya atom-atom C yang hilang selama proses pendopingan dan kekosongan pada kristal yang tidak seluruhnya tertutup oleh atom boron. Sedangkan pada proses sintesis rGO tanpa pendopingan akan menghasilkan *defect* yang lebih sedikit karena tidak ada pengaruh pemaksaan masuknya atom boron pada rGO. [11]

B. Hasil Pengujian FTIR

Gambar 3 menunjukkan spectrum IR dari sampel grafit, grafit oksida dan *reduced graphene oxide* (rGO). Dari gambar menunjukkan bahwa grafit memiliki spectrum IR yang rapih dan hanya menunjukkan peak ikatan C-O (Strech Alkoxy) dengan panjang gelombang 1043 cm^{-1} .

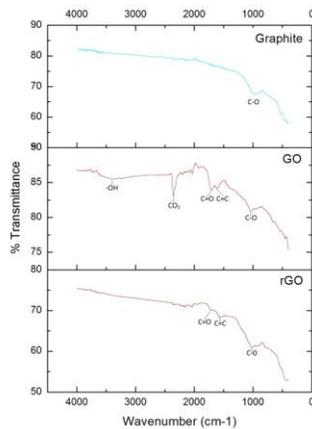
Grafit Oksida memunculkan beberapa peak gelombang yang diidentifikasi sebagai ikatan O-H dengan panjang gelombang 3552 cm^{-1} , ikatan C-O dengan panjang gelombang 1037 cm^{-1} , ikatan C=C (Aromatic) dengan panjang gelombang 1532 cm^{-1} , ikatan C=O (Carbonyl) dengan panjang gelombang 1694 cm^{-1} dan ikatan selain peak tersebut pada grafit oksida muncul peak pada panjang gelombang 2339 cm^{-1} yang dapat diidentifikasi sebagai gas CO_2 (O=C=O) yang berikatan diantara kisi grafit oksida. Gugus ini bukan merupakan komponen dari rGO, namun gas CO_2 dari lingkungan yang menempel pada permukaan graphene. [12]

Saat dilakukan proses reduksi dan juga *exfoliated* pada grafit oksida akan menghilangkan ikatan-ikatan O-H sehingga tidak terlihat lagi pada spectrum rGO. Selain itu Pada rGO tidak lagi menunjukkan absorbansi pada 2339 cm^{-1} yang merupakan gugus ikatan CO_2 (O=C=O), hal ini menunjukkan bahwa sintesis rGO telah berhasil menghilangkan ikatan O-H dan juga CO_2 yang terperangkap [13]

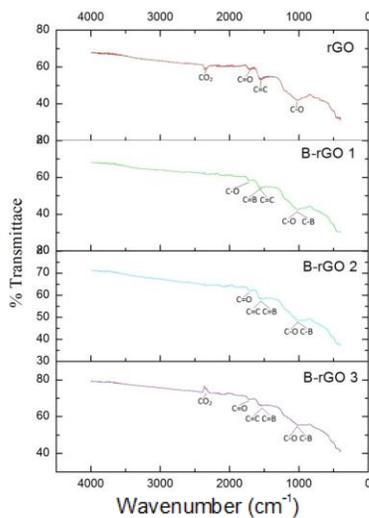
Gambar 4 menunjukkan hasil pengujian FTIR pada sampel rGO dan B-rGO. Terlihat pada seluruh sampel rGO dan B-rGO dengan penambahan H_3BO_3 1 ml, 2 ml dan 3 ml memiliki peak spectrum IR yang seragam di ikatan C-O, C=C dan C=O.

Pada seluruh B-rGO memiliki ikatan -B yang berada pada panjang gelombang ikatan C-B dengan panjang gelombang 1057 cm^{-1} , ikatan C=B (Aromatic) dengan panjang gelombang 1572 cm^{-1} . Peak -B akan memiliki kemiripan dengan peak -C pada rGO karena atom boron yang bersifat non-organik sehingga sulit untuk terbaca oleh spectrum IR. Boron yang telah terdoping akan mengikat atom karbon dan karena

jumlahnya yang sedikit maka ikatan boron akan sukar terlihat. [14]



Gambar 3. Pola Spektrum Grafrit, Grafrit Oksida, rGO

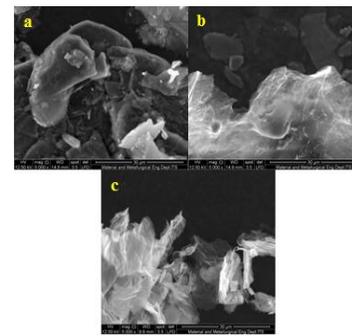


Gambar 4. Pola Spektrum FTIR rGO, B-rGO penambahan H₃BO₃ 1ml, 2ml, dan 3ml

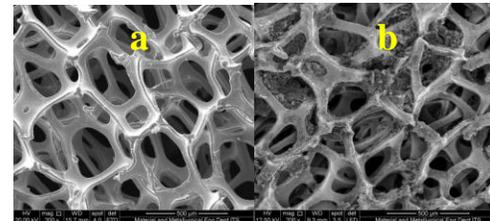
C. Pengujian SEM-EDX

Pada **Gambar 5** menunjukkan perbedaan permukaan morfologi dari sampel grafit, grafit oksida, dan rGO dengan perbesaran 5000x. Terlihat bahwa grafit memiliki morfologi dengan bentuk *flakes*. Grafit oksida memiliki morfologi berupa lembaran-lembaran berlapis sehingga terlihat tebal. Ketebalan dapat ditunjukkan dari gradasi warna yang terlihat. Kemudian rGO memiliki bentuk lembaran-lembaran lebih tipis namun bertumpuk. Gradasi warna yang menebal dikarenakan sampel rGO yang bertumpuk.

Gambar 6(a) merupakan hasil SEM dari *Nickel Foam* polos dengan bentuk seperti *network* sehingga memiliki bentuk berpori. Dengan bentuk sponge/berpori, *Nickel Foam* yang berfungsi sebagai pengumpul arus dan memberikan akses yang lebih mudah bagi elektrolit serta meningkatkan luas area kontak antara rGO dan elektrolit akibat strukturnya dengan ukuran diameter pori sekitar 250-500 mikron.



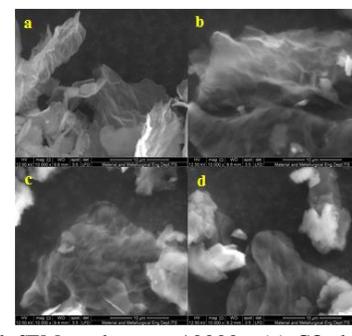
Gambar 5. Hasil SEM 5.000x (a)grafit, (b)grafit oksida, (c)rGO tanpa doping



Gambar 6 Hasil SEM perbesaran 200x (a) *nickel foam* (b) *nickel foam* terdeposit *graphene*

Pengujian SEM juga dilakukan terhadap elektroda *Ni-rGO* terlihat pada **Gambar 6(b)**. Nampak bahwa rGO telah berhasil didepositkan. Terlihat pula bahwa rGO yang berupa lembaran-lembaran tipis mengisi atau menutupi permukaan pori yang ada di *Nickel Foam*. Menunjukkan juga bahwa rGO menumpuk pada sebagian area. Walaupun telah terdeposit kedalam *nickel foam*, rGO tidak seluruhnya menutup permukaan dari *nickel foam*. Hal ini akan mengakibatkan menurunnya luas permukaan aktif dari elektroda.

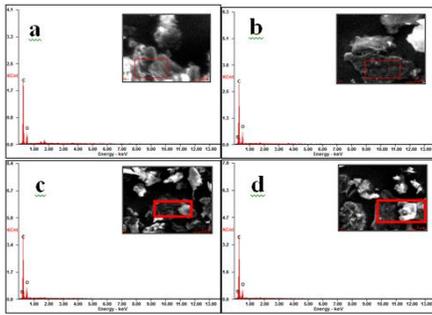
Gambar 7 menunjukkan morfologi rGO hasil doping boron dengan penambahan H₃BO₃ 1 ml, 2 ml dan 3 ml. Terlihat bahwa sampel rGO dan B-rGO mempunyai bentuk morfologi yang hampir sama. Pengamatan morfologi untuk rGO dengan *doping* terlihat sama dan sulit untuk dibedakan karena atom yang terdoping akan larut dan sedikit sehingga sulit merubah morfologi rGO [15].



Gambar 7. Hasil SEM perbesaran 10000x (a)rGO dan B-rGO dengan penambahan H₃BO₃ 1M (b)1ml (c)2ml (d)3ml

Dari hasil SEM-EDX pada **Gambar 8** dapat disimpulkan dengan penambahan H₃BO₃ 1M dapat menambahkan kadar atom boron pada material rGO. B-rGO dengan penambahan H₃BO₃ 1 ml mengandung atom boron sebanyak 3.59%, B-rGO

penambahan H₃BO₃ 2 ml dengan borob 4.37%, B-rGO penambahan H₃BO₃ 3 ml dengan borob 5.17%.



Gambar 8. Hasil EDS-EDX (a) rGO; B-rGO dengan penambahan H₃BO₃ b) 1 ml c) 2 ml d) 3 ml

D. Pengujian FPP

Berdasarkan **Table 3** terlihat trend peningkatan konduktifitas terhadap penambahan kadar boron. Peningkatan konduktifitas dikarenakan adanya penambahan *impurities hole* pada *band gap* rGO sehingga membuat elektron lebih mudah berpindah dan menyebrangi *band gap* dari *valance band* ke *conductivity band*.

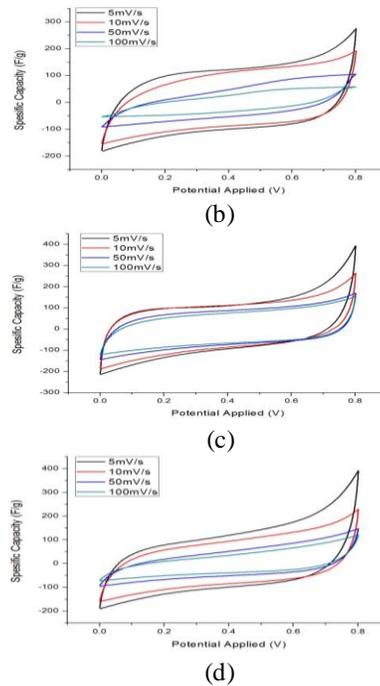
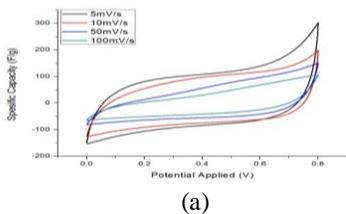
Tabel 3. Nilai Konduktifitas pada sampel rGO dan B-rGO

No	% B	Tebal (cm)	Hambatan (Ω)	Resistansi (Ω/cm)	Konduktifitas (S/m)
1	0 %		37.608	0.511	195.84
2	3.59 %		35.089	0.477	209.72
3	4.37 %	0.003	34.025	0.462	216.34
4	5.17 %		33.774	0.459	218.05

E. Pengujian CV

Penggunaan elektrolit netral dari Na₂SO₄ pada potensial kerja 0-0.8 V tidak menghasilkan gundukan (hump) seperti yang terlihat pada **Gambar 9**. Adapun gundukan (hump) merupakan indikator terjadinya reaksi redoks atau efek pseudocapacitance. Adapun yang terjadi dalam pengujian yaitu pembentukan *double capacitor*. Hasil Perhitungan Gambar 9 ditunjukkan pada **table 4**

Terlihat trend peningkatan kapasitansi spesifik. Hal ini berarti atom boron akan meningkatkan nilai kapasitansi spesifik pada rGO. Adanya *defect* akibat keberadaan atom boron sehingga mengakibatkan melebarnya *interlayer* pada rGO sehingga memudahkan elektron mengalami *intercalation* [14]. Atom boron memiliki sifat dimana memiliki nilai keaktifan yang tinggi karena adanya *hole* yang terdoping dalam karbon, hal ini meningkatkan performa elektrokimianya karena menutupi hambatan bidang karbon yang tidak aktif dan memperbaiki sifat

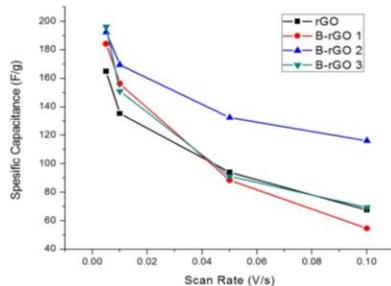


Gambar 9. Perbandingan hasil uji CV grafik C vs E sampel elektroda Ni-G dan Ni-B-rGO (a)rGO (b)B-rGO 1 (c)B-rGO 2 (d)B-rGO 3

Tabel 4. Perbandingan Nilai Kapasitansi Spesifik, Daya Spesifik, dan Energi Spesifik terhadap Scan Rate dan Jumlah Atom Boron

No	Elektroda	At %B	S.R (mV/s)	C (F/g)	W (Wh/kg)	P (W/kg)
1	rGO	0	5	164.8		
			10	4	14.60	164.20
			50	3	11.98	269.56
			100	184.2	8.34	938.27
2	B-rGO 1	3.59	5	156.1		
			10	1	16.34	183.82
			50	6	13.85	311.63
			100	88.47	7.75	871.95
3	B-rGO 2	4.37	5	192.5		
			10	2	17.02	191.46
			50	169.5		
			100	8	13.68	307.86
4	B-rGO 3	5.17	5	132.4		
			10	3	11.70	4
			50	116.1		
			100	9	10.27	2310.5
			5	196.1		
			10	6	17.37	195.37
			50	150.9		
			100	7	13.36	300.54
			50	91.27		
			8.08	908.47		
			1380.3			
			100	69.34	6.13	1

konduktifitas listriknya. Selain itu densitas elektron karena pengaruh defect boron mengalami perubahan karena pembentukan ikatan kovalen C-B yang dimana akan meningkatkan penyerapan *energy electronegative* pada rGO [16]. rGO dengan doping memiliki kapasitansi yang lebih besar dikarenakan doping menyebabkan mikro porous pada rGO meningkatkan *wettability* pada elektroda/elektrolit [17].



Gambar 10. Pengaruh *Scan Rate* terhadap nilai *Specific Capacitance* Material rGO dan B-rGO

Pada **Gambar 10** menunjukkan bahwa scan rate semakin tinggi maka nilai kapasitansinya menurun. Hal ini terjadi karena scan rate mempengaruhi laju aliran ion-ion dari elektrolit menuju ke dalam elektroda Ni-rGO. Dengan scan rate yang tinggi maka laju aliran tegangan menjadi cepat, akibatnya waktu yang lebih singkat bagi ion-ion elektrolit untuk berdifusi ke dalam Ni-rGO sehingga membentuk *double layer* sedikit. Sedangkan pada scan rate yang rendah, terjadi sebaliknya sehingga nilai kapasitansi Ni-rGO dipengaruhi oleh waktu difusi ion-ion elektrolit [18].

Peningkatan *scan rate* maka nilai dari spesifik energi akan menurun dan sebaliknya pada spesifik daya yang mengalami peningkatan berbanding dengan kenaikan *scan rate*. Dari hasil perhitungan pada **Tabel 4** nampak bahwa doping boron pada rGO memenuhi karakteristik sebagai superkapasitor karena *specific power* (W/Kg) berada pada rentang 10^1 hingga 10^6 sedangkan *specific energy* (Wh/Kg) berada pada rentang 5.10^{-2} hingga 3.10^1 .

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini telah berhasil mempersiapkan elektroda EDLC dari material *reduced graphene oxide* (rGO) yang didoping boron. Doping boron dengan penambahan H_3BO_3 menghasilkan komposisi atom boron di dalam rGO sebesar 3.59 at%, 4.37 at% dan 5.17 at%. Penambahan komposisi boron dengan H_3BO_3 mengakibatkan perubahan struktur terhadap rGO yaitu penurunan *crystallite size* serta $d_{spacing}$ yang meningkat seiring penambahan boron. Selain itu, adanya penambahan doping boron terbukti berhasil meningkatkan kapasitansi spesifik dari 164.2 F/g sebelum didoping menjadi 192.5 F/g setelah didoping boron 4.37 at% berdasarkan pengujian CV dengan Na_2SO_4 pada *scan rate* 5 mV/s.

V. UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini tidak bisa berjalan lancar tanpa adanya bantuan dari Ibu Diah Susanti dan Bapak Hanifudin Nurdiansah selaku

dosen pembimbing peneliti yang selalu memberi masukan bagi peneliti dalam menjalankan penelitiannya. Juga bantuan dana dari pemerintah khususnya Penelitian Lab Based Education Dana Non PNPB ITS Tahun 2017 No 818/PKS/ITS/2017 sehingga peneliti dapat menjalankan penelitian ini dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Riyanto, "Superkapasitor Sebagai Piranti Pentimpanan Energi Listrik Masa Depan," *Portalgaruda.org*.
- [2] F. Schedin, "Detection Of Individual Gas Molecules Adsorbed On Graphene," pp. 652–655, 2007.
- [3] D. Chaohe. Xu, "Graphene Electrodes for Electrochemical Energy Storage," *Energy Environ. Sci*, vol. 6, pp. 1388–1414, 2013.
- [4] B. S. Suresh, "High performance supercapacitor using N-doped graphene prepared via supercritical fluid processing with an oxime nitrogen source," *Electrochim. Acta*, pp. 37–45.
- [5] R. . Hummer, W.S., Offerman, "Preparation Of Graphitic Oxide," *J Am Chem Soc*, p. 1339, 1958.
- [6] D. Nurdiansah, H. Dan Susanti, "Pengaruh Variasi Temperatur Hidrotermal Dan Waktu Ultrasonikasi Terhadap Nilai Kapasitansi Elektroda Electric Double Layer Capacitor (EDLC) Dari Material Grafene," ITS, 2014.
- [7] N. M. Hye, M., Jayabal, S., Lim, H. N., Lee, H. W., & Huang, "Synthesis of nitrogen-doped reduced graphene oxide-multiwalled carbon nanotube composite on nickel foam as xxiv electrode for high-performance supercapacitor," in *Ceramics International*, 2017, pp. 20–27.
- [8] D. H. M. C. Pei, S., "The Reduction Of Graphene Oxide," pp. 3210–3228, 2012.
- [9] B. D. Cullity, *Elements of X Ray Diffraction*. USA: Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1956.
- [10] Y. F., "Nitrogen-doped graphene sheets grown by chemical vapor deposition: Synthesis and influence of nitrogen impurities on carrier transport," *ACS Nano*, pp. 6522–6532, 2013.
- [11] K. S. S. Panchakarla, "Synthesis, Structure and Properties of Boron and Nitrogen Doped Graphene," *Jawaharlal Nehru Cent. Adv. Sci. Res.*, 2009.
- [12] Tiannan Zhou et al, "A Simple And Efficient Methode To Prepare Graphene By Reduced Of Graphite Oxide With Sodium Hydrosulfite," *Nanotechnology*, 2011.
- [13] G. Socrates, *Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies*. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [14] X. Mu, "The effect of doped heteroatoms (nitrogen, boron, phosphorus) on inhibition thermal oxidation of reduced graphene oxide," 2016.
- [15] S. Geng, D., Yang, S., Zhang, Y., Yang, J., Liu, J., Li, R., & Knights, "Nitrogen dan boron doping effects on the structure of graphene," *Appl. Surf. Sci.*, pp. 9193–9198, 2011.
- [16] A. Stefano, "Doping Graphene With Boron: A Review Of Synthesis Methods, Physicochemical Characterization, And Emerging Applications," *R. Soc. Chem. 2016*, 2016.
- [17] C. Gong, Y., Li, D., Fu, Q., & Pan, "Influence of graphene microstructures on electrochemical performance for supercapacitors," *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.*, 2015.
- [18] B. . Conway, *Electrochemical Supercapacitors. Scientific Fundamentals and Technological Applications*. New York: Kluwer Academics/Plenum Publishers, 1999.