

Modifikasi Karbon Berpori Eceng Gondok Doping Nitrogen Untuk Matrik Katoda Baterai Litium Sulfur Dengan Kapasitas TinggiOtong Nurhilal^{1*}, Sahrul Hidayat¹, Dadan Sumiarsa², Risdiana Risdiana¹¹Departemen Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran, Jl. Raya Bandung-Sumedang km 21, Jatinangor, 45363, Jawa Barat, Indonesia²Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran, Jl. Raya Bandung-Sumedang km 21, Jatinangor, 45363, Jawa Barat, Indonesia.

*Penulis korespondensi: otong.nurhilal@phys.unpad.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.24198/cna.v11.n2.46078>

Abstrak: Karbon berpori dari biomassa menjadi kandidat potensial untuk matrik katoda baterai litium sulfur. Karbon berpori harus memiliki konduktivitas listrik yang tinggi untuk meningkatkan kontak elektrik sulfur yang bersifat isolator. Modifikasi karbon berpori *doping* N diperlukan untuk meningkatkan kinerja baterai litium sulfur. Pada penelitian ini telah dibuat karbon berpori Eceng Gondok *doping* N, selanjutnya dikompositkan dengan sulfur dan diaplikasikan untuk katoda baterai litium sulfur. Hasil pengujian dengan FTIR menunjukkan adanya gugus C=N pada 1657 cm^{-1} . Hasil pengujian SEM-EDS terhadap komposit karbon berpori *doping* N/sulfur diperoleh kadar sulfur sebesar 66,95 wt% untuk rasio 1:2,5. Hasil pengujian dengan *four line probe* (FLP) diperoleh konduktivitas listrik karbon berpori *doping* N sebesar $17,16 \times 10^{-2}\text{ S/cm}$, komposit karbon berpori *doping* N/sulfur sebesar $14,61 \times 10^{-4}\text{ S/cm}$. Katoda baterai litium sulfur telah berhasil dibuat dari komposit KBEGN/S dengan ketebalan $200\text{ }\mu\text{m}$ dan kandungan sulfur sebesar $4,93\text{ mg/cm}^2$. Hasil pengukuran *charge-discharge* baterai diperoleh kapasitas pengosongan awal sebesar 584 mAh/g . Nilai kapasitas pengosongan awal yang diperoleh lebih besar dari baterai dengan karbon berpori tanpa *doping* N sebesar 312 mAh/g untuk kandungan sulfur $3,57\text{ mg/cm}^2$.

Kata kunci: baterai litium-sulfur, eceng gondok, karbon berpori, kapasitas, komposit

Abstract Porous carbon from biomass is a potential candidate for lithium sulfur battery cathode matrices. Porous carbon must have a high conductivity to increase the electrical contact of insulating sulfur. Modification of N doped porous carbon is required to improve the performance of lithium sulfur batteries. In this research, N-doped water hyacinth porous carbon was prepared, then composited with sulfur and applied to the cathode matrix of a lithium sulfur battery. The test results with FTIR obtained the C=N group at 1657 cm^{-1} . The test results with SEM-EDS of N/sulfur doped porous carbon composites obtained a sulfur content of 66.95 wt% for ratio 1:2.5. The test results with the four line probe (FLP) obtained the electrical conductivity of N-doped porous carbon of $17.16 \times 10^{-2}\text{ S/cm}$, the N/sulfur doped porous carbon composite of $14.61 \times 10^{-4}\text{ S/cm}$ for ratio 1:2.5. The cathode of a lithium sulfur battery has been successfully prepared from a composite with a thickness of $200\text{ }\mu\text{m}$ and a sulfur loading of 4.93 mg/cm^2 . The results of the battery charge-discharge measurements obtained an initial discharge capacity of 584 mAh/g . The value of the initial discharge capacity obtained is greater than the battery with non-doped porous carbon of 312 mAh/g for sulfur loading 3.57 mg/cm^2 .

Keywords: lithium-sulfur battery, water hyacinth, porous carbon, capacity, composite**PENDAHULUAN**

Sebagai sistem penyimpanan energi yang menarik, baterai lithium/sulfur (Li/S) telah mendapatkan perhatian yang serius dalam beberapa tahun terakhir karena memiliki kepadatan energi teoretisnya yang sangat tinggi (2600 Whkg^{-1}) dan kapasitas spesifik (1675 mAhg^{-1}), hampir beberapa kali lebih tinggi dari baterai lithium-ion komersial (Wu *et al.* 2016). Oleh karena itu, baterai Li/S telah dianggap sebagai salah satu kandidat paling menjanjikan untuk baterai isi ulang generasi

mendatang (Yin *et al.* 2017; Qu *et al.* 2015). Namun demikian, beberapa kelemahan yang menghambat penerapannya, antara lain sifat isolator sulfur ($5 \times 10^{-3}\text{ S/cm}$ pada $25\text{ }^{\circ}\text{C}$) dan kehadiran lithium polisulfida (Li_2S_x , $4 \leq x \leq 8$) yang mengambat proses elektrokimia selama proses pengisian dan pengosongan berlangsung (Hao *et al.* 2010).

Strategi yang digunakan untuk menyelesaikan masalah baterai Li-S pada umumnya adalah enkapsulasi dan impregnasi sulfur pada matrik karbon berpori (KB) (Jayaprakash *et al.* 2011).

Kandungan sulfur tinggi pada matrik KB diperlukan untuk memenuhi kerapatan energi dan kapasitas areal baterai. Namun, kandungan sulfur tinggi akan menyebabkan litium polisulfida (LPS) rantai panjang yang berdifusi melalui separator juga meningkat. Disisi lain matrik KB bersifat nonpolar sedangkan LPS bersifat polar sehingga energi ikat antara LPS dan matrik KB sangat lemah (0,1–0,7 eV). Selain itu, ukuran dan volume pori dengan *outlet* yang besar, sulit untuk mencegah LPS rantai panjang (2 nm) keluar dari katoda secara efektif. Terlebih lagi untuk ukuran meso-pori (2–50 nm) dan makro-pori (diatas 50 nm) akan mempermudah keluarnya LPS (Li *et al.* 2012). Dengan demikian diperlukan matrik KB yang mampu menampung sulfur tinggi tetapi juga mampu mengurangi difusi LPS rantai panjang.

Kandungan sulfur tinggi pada matrik KB dan pencegahan difusi LPS rantai panjang dapat dipenuhi dengan KB yang memiliki luas permukaan tinggi dan struktur pori dengan *outlet* yang kecil atau struktur pori bertingkat (Adelhelm *et al.* 2015). Modifikasi KB dengan struktur pori bertingkat telah banyak dikembangkan (Zheng *et al.* 2017, Liang *et al.* 2018). Selain modifikasi luas permukaan dan struktur pori secara fisika, modifikasi juga dapat dilakukan secara kimia yaitu untuk meningkatkan ikatan matrik terhadap LPS (Xu *et al.* 2018). Doping heteroatom (N, S, O, B, dan F) pada matrik menjadi salah satu solusi terhadap pengikatan LPS secara kimia untuk mendapatkan baterai Li-S dengan kandungan sulfur tinggi (Pang *et al.* 2016). Doping heteroatom akan mengubah lingkungan ikatan lokal dan distribusi elektron pada permukaan karbon, sehingga akan memperbaiki konduktivitas listrik dan reaktivitas elektrokimia (Wang *et al.* 2019). Heteroatom N mendapatkan perhatian yang tinggi karena memiliki kemampuan untuk menyerap sulfur secara kimia yang berguna untuk stabilitas siklus katoda (Yang *et al.* 2020). Kehadiran heteroatom N juga akan meningkatkan konduktivitas listrik matrik. Doping N pada KB umumnya dilakukan dengan ammonia (NH_3) karena radikal bebas dari NH_3 (NH_2^* , NH^* dan H^*) memiliki kemampuan lebih besar untuk masuk lebih dalam pada struktur mikro-pori (Li *et al.* 2019). Namun, proses doping N dengan NH_3 membutuhkan suhu tinggi. Oleh karena itu urea ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) dipilih sebagai pengganti NH_3 untuk doping N pada KB. Urea banyak digunakan sebagai sumber doping N karena mengandung nitrogen lebih banyak (Chen *et al.* 2015).

Pada penelitian ini telah dimodifikasi karbon berpori dari Eceng Gondok (KBEG) sebagai matrik katoda baterai litium sulfur. Eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) adalah biomassa yang dianggap paling bermasalah di dunia disebabkan karena pertumbuhannya yang melimpah tidak terkendali di kolam terbuka, irigasi, dan penampung air lainnya. Eceng gondok (EG) mampu tumbuh dengan cepat hingga kepadatan sangat tinggi (lebih dari 60 kg/m²); ini berarti penyebaran seluruh

permukaan air dapat terjadi, yang menimbulkan efek tidak menguntungkan terhadap lingkungan, kesehatan manusia dan pembangunan ekonomi (Rezania *et al.* 2015). Pertumbuhan yang cepat dan melimpah dari EG ini telah memenuhi syarat untuk dijadikan sebagai sumber karbon berpori secara berkelanjutan. Selain itu, pemanfaatan sebagai karbon berpori untuk elektroda akan memberikan nilai tambah yang sangat tinggi bagi tanaman EG yang selama ini hanya dimanfaatkan secara tradisional. EG memiliki komponen bio-kimia yang terdiri dari 20,8% hemiselulosa, 30,5% selulosa dan 21,3% lignin (Rop *et al.* 2019). EG secara alami mengandung unsur alkali atau alkali tanah seperti Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} dan sekitar 30% protein (Zeng *et al.* 2017).

Tiga tahapan pada penelitian ini; pertama, pembuatan KBEG doping N melalui perlakuan karbonisasi, aktivasi dan kalsinasi. Kedua, pembuatan komposit karbon berpori doping N-sulfur (KBEGN/S). Ketiga, pembuatan elektroda baterai dengan kapasitas area yang memenuhi standar baterai dan pembuatan sel baterai dengan kapasitas tinggi.

BAHAN DAN METODE

Pembuatan Karbon Berpori Eceng Gondok Doping N

KBEG doping N dibuat dengan merendam eceng gondok kering (EGK) pada larutan urea 1 M selama 24 jam dengan rasio berat EGK dan urea sebesar 1:4. Hasil rendaman dikeringkan selama 24 jam pada suhu kamar. Sampel EGK urea dipanaskan pada suhu 400°C selama 2 jam dengan laju pemanasan 5°C/min dibawah gas Ar. Mencuci arang eceng gondok-urea dengan larutan HCl 1 M dan DI water.

Karbonisasi dilakukan dengan *muffle furnace* pada suhu 600°C selama 1 jam menghasilkan arang eceng gondok doping N (AEGN). AEGN selanjutnya dihaluskan dengan ukuran 200 mesh. Aktivasi arang dengan aktivator jenis ZnCl_2 30% dengan perbandingan berat arang dan aktivator 1:3 selama 24 jam. Produk kemudian di cuci dengan aquades hingga pH = 7,0, selanjutnya dikeringkan pada suhu 110°C selama 10 jam dan dikalsinasi di dalam *tube furnace* pada suhu 800°C selama 1 jam dengan suasana gas Ar menghasilkan karbon berpori eceng gondok doping N (KBEGN). Untuk mengetahui gugus N, kandungan N dan konduktivitas listrik KBEGN dilakukan pengujian FTIR, SEM-EDS dan Four Line Probe (FLP).

Pembuatan Komposit Karbon Berpori Eceng Gondok doping N/Sulfur (KBEGN/S)

Komposit dibuat dengan mencampurkan KBEGN dan sulfur dengan variasi rasio berat 1:2,5 di dalam *milling quartz mortar* selama 0,5 jam. Campuran kemudian dipanaskan pada suhu 155°C selama 15 jam untuk memasukkan sulfur pada pori-pori karbon. Sulfur memiliki viskositas paling rendah pada suhu 155°C. Komposit dipanaskan lagi pada suhu 300°C selama 0,5 jam dibawah aliran gas Ar. Pengujian

SEM-EDS dan FLP dilakukan untuk mengahui kandungan sulfur dan konduktivitas litsrik komposit.

Pembuatan Elektroda Sel Baterai

Pembuatan katoda baterai dilakukan dengan mencampur bahan komposit KBEGN/N, *black asethylene* (Super P, 10 wt %) dan *polyvinylidene fluoride* (PVDF, 10 wt%) dengan komposisi 8:1:1 dengan pelarut *N-methyl pyrrolidone* (NMP). Campuran kemudian diaduk selama 3 jam dengan pengaduk magnetic kemudian dilapiskan (coating) dengan *doctor blade* diatas alumunium foil yang dikeringkan pada suhu 60°C selama 24 jam di dalam oven vakum. Selanjutnya film dipotong benbentuk lingkaran diameter 14-15 mm sesuai dengan diameter koin. Sel koin tipe 2025 dirakit dengan menjadikan komposit KBEGN/S sebagai katoda, Li sebagai anoda, *Cel-gard* 2400 sebagai membran, dan direkatkan di dalam *glove box* yang berisi Ar. Elektrolit dibuat dari campuran larutan 1,0 M *lithium bis(trifluoro-methanesulfonyl)imide* (LiTFSi) dilarutkan pada 1,3-dioxolane (DOL) dan 1,2-dimethoxyethane (DME) (v/v, 1:1) yang mengandung 1 wt% LiNO₃ sebagai aditif. Penguji Galvanostatik pengisian dan pengosongan telah diset antara 1,6 - 3,4 V untuk menguji kapasitas pemakaian dan siklus isi baterai pada laju variasi (1C = 1675 mA/g) pada suhu ruang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian dengan FTIR ditampilkan pada Gambar 1. Gambar 1 menunjukkan perbedaan intensitas transmisi gugun C=N pada KBEGN yang didoping dengan amonia (NH₃) dan urea (CH₄N₂O) pada rentang bilangan gelombang 1000-2000 cm⁻¹. Selama annealing pada suhu 400°C, urea didekomposisi menjadi NH₃ dan CO₂ untuk menghasilkan struktur mesopori serta doping N ke dalam kisi karbon. (Xiao *et al.* 2020).

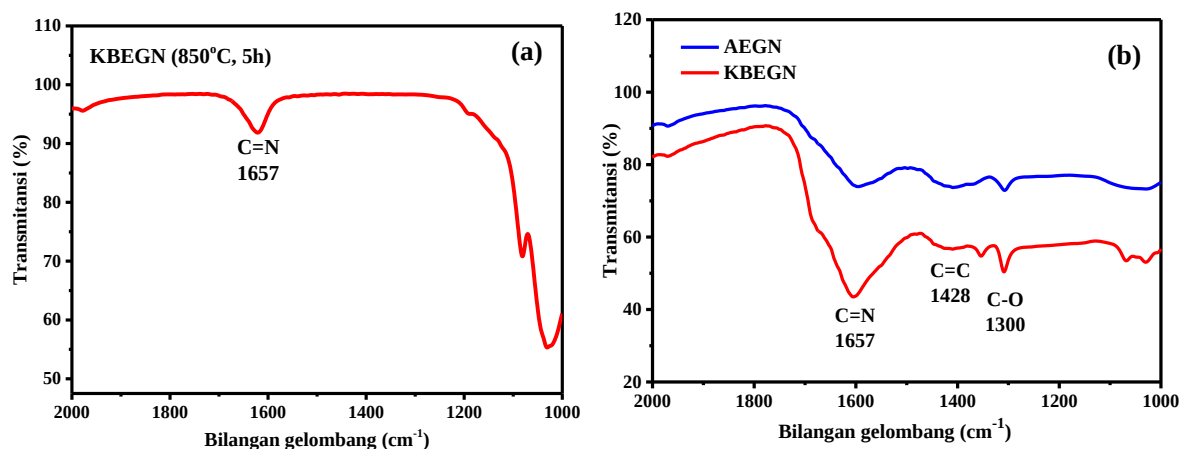
Untuk Gambar 1(a) hanya ada gugus C=N pada bilangan gelombang 1657 cm⁻¹ dengan transmitansi yang rendah. Pada Gambar 1(b) ada beberapa gugus fungsi yaitu C=N, C-O dan C=C. Intensitas gugus fungsi pada KBEGN doping dengan urea meningkat dibandingkan dengan AEGN. Peningkatan intensitas tersebut disebabkan oleh aktivator ZnCl₂ yang merupakan aktivator higroskopik. (El-Nemr *et al.* 2022). Untuk sampel KBEGN vibrasi regang C=N didapatkan pada bilangan gelombang 1657 cm⁻¹ dan C-O pada bilangan gelombang 1300 cm⁻¹. Puncak gugus C=C dan C=N meningkat tajam pada karbon berpori. Puncak bilangan gelombang 1428 cm⁻¹ menyatakan regangan C=C.

Gambar 2(a) menunjukkan struktur permukaan AEGN dengan ukuran pori yang besar. Permukaan tersebut berisi urea yang masih dominan. Setelah dilakukan aktivasi dan kalsinasi, ukuran pori pada permukaan menurun dengan jumlah pori yang meningkat. Proses kalsinasi telah menguapkan karbon dioksida dan ammonia serta meningkatkan pembentukan pori pada sampel (Manthiram *et al.* 2013). Penguapan ammonia menyebabkan penurunan kadar N pada KBEGN. Kondisi ini diperkuat dengan hasil pengujian SEM-EDS seperti yang ditampilkan pada Tabel 1.

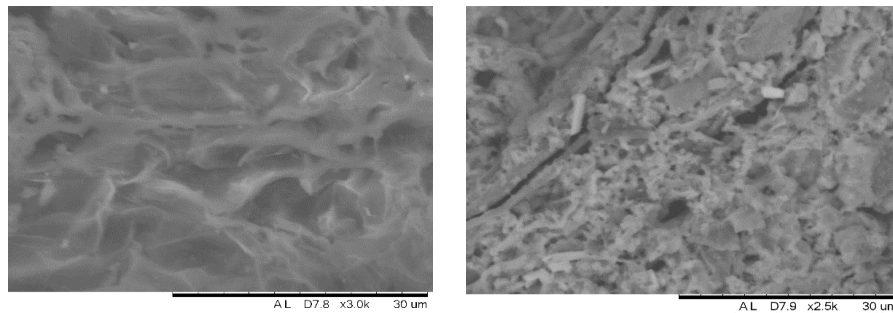
Hasil pengujian SEM untuk Komposit KBEGN/S ditampilkan pada Gambar 3. Gambar 3 menunjukkan permukaan komposit dengan struktur sulfur yang heterogen. Dengan rasio karbon aktif/sulfur 1:2,5, sulfur akan masuk ke dalam pori pada pemanasan 155 °C dan sebagian masih mendominasi diluar pori.

Hasil pengujian EDS untuk sampel komposit KBEGN/S dicantumkan pada Tabel 2. Dari Tabel 2 kadar N menurun dengan naiknya kadar sulfur pada komposit seiring dengan terbentuknya gugus C-S (Ferawati & Susanti 2021).

Hasil pengukuran konduktivitas listrik dengan metode *fou line probe* (FLP) untuk KBEGN dan komposit KBEGN/S dicantumkan pada Tabel 3.



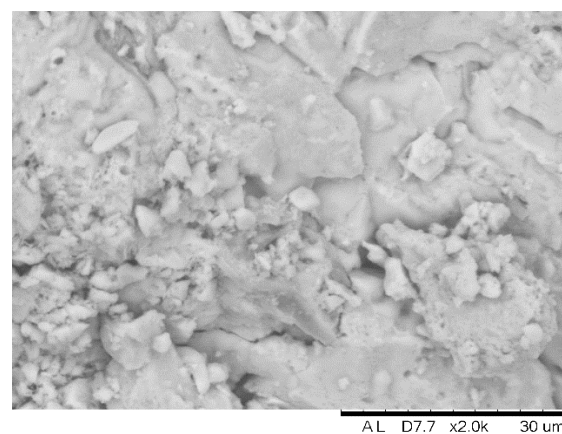
Gambar 1. Spektrum FTIR; (a) KBEGN doping NH₃, (b) AEGN dan KBEGN doping CH₄N₂O



Gambar 2. Morfologi; (a) AEGN, (b) KBEGN

Tabel 1. Unsur Utama Hasil EDS Sampel AEGN dan KBEGN

No	Unsur Utama	AEGN (%)	KBEGN (%)
1	C	44,06	22,11
2	O	20,72	18,49
3	N	35,22	5,16
4	Zn	-	25,62
5	Cl	-	28,62



AA/N/S (1:2,5)

Gambar 3. Morfologi Komposit KBEGN/S rasio 1:2,5

Tabel 2. Unsur Utama Hasil EDS Sampel KBEGN/S

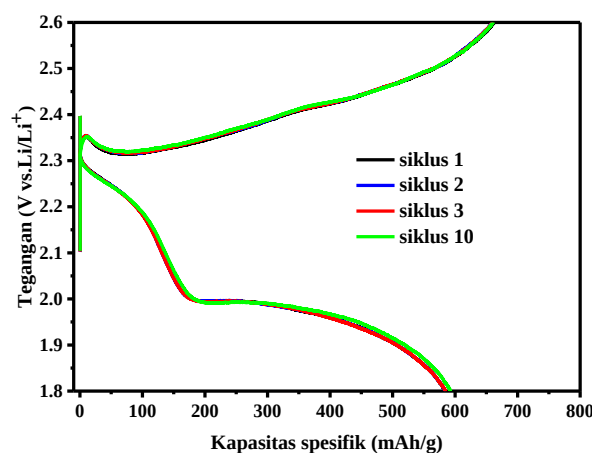
No	Unsur Utama	KBEGN/S (%)
1	C	19,1
2	O	9,07
3	N	4,48
4	S	66,95
5	Zn	4,68
6	Cl	4,48

Dari Tabel 3 nilai konduktivitas listrik KBEGN berada pada rentang bahan semikonduktor. Nilai konduktivitas tersebut masih lebih kecil dari grafit yang memiliki konduktivitas 3,6 S/cm. Untuk komposit KBEGN/S dengan kadar N sebesar 4,48% memiliki konduktivitas sebesar $14,61 \times 10^{-4}$ S/cm yang masih berada pada rentang konduktivitas semikonduktor (Yuningsih & Mulyadi 2016). Konduktivitas komposit KBEGN/S lebih kecil dari konduktivitas KBEGN disebabkan oleh pengaruh sulfur yang memiliki konduktivitas sangat rendah.

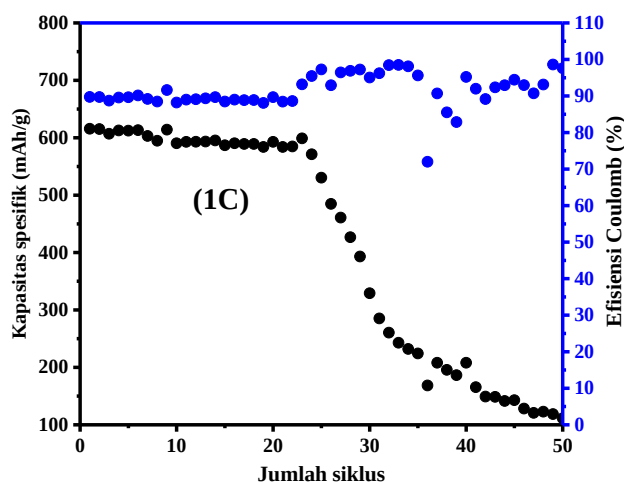
Tabel 3. Konduktivitas KBEGN dan KBEGN/S

No	Sampel	Konduktivitas (S/cm)
1	KBEGN	$17,16 \times 10^{-2}$
2	KBEGN/S	$14,61 \times 10^{-4}$

Pengujian pengisian dan pengosongan awal kapasitas baterai KBEGN/S ditampilkan pada Gambar 4. Matrik katoda memiliki kandungan sulfur 4,93 mg/cm² dengan ketebalan 200 μ m dengan rasio komposit 1:2,5. Dari Gambar 4, kapasitas pengisian dan pengosongan awal untuk *scan rate* 1C (1675 mAh/g) sebesar 662,9 mAh/g (0,79e⁻/atom S) dan 583,8 mAh/g (0,69e⁻/atom S). Hasil pengisian dan pengosongan kapasitas baterai *doping* N ini telah berhasil meningkatkan jumlah kandungan sulfur sebesar 1,36 mg/cm² (Yang *et al.* 2014; Li *et al.* 2013) dan meningkatkan kapasitas pengosongan sebesar 272 mAh/g dibandingkan dengan kapasitas baterai tanpa *doping* (Nurhilal *et al.* 2023). Dengan demikian terdapat peningkatan jumlah elektron yang terlibat dari atom sulfur sebesar 0,42e⁻/atom sulfur pada proses elektrokimia yang menunjukkan adanya pengaruh dari kenaikan konduktivitas listrik setelah *doping* N (Seh *et al.* 2013). Dari Gambar 4 terlihat



Gambar 4. Kurva pengisian dan pengosongan kapasitas pada laju muatan 1C dengan kandungan sulfur 4,93 mg/cm² untuk KBEGN/S



Gambar 5. Kurva stabilitas siklus dan efisiensi coulomb baterai laju muatan 1C

bahwa untuk siklus ke satu sampai siklus ke tiga nilai kapasitas pengosongannya hampir sama yaitu 584 mAh/g, 584 mAh/g dan 585 mAh/g. Hal ini menunjukkan bahwa karbon berpori *doping* N berhasil mencegah difusi LPS.

Hasil pengujian stabilitas siklus dan efisiensi coulomb baterai doping N ditampilkan pada Gambar 5. Dari Gambar 5, stabilitas siklus pengosongan terjadi pada siklus pertama hingga siklus 25 selanjutnya stabilitas siklus menurun secara drastis pada siklus diatas 25 hingga siklus 50. Kondisi ini kemungkinan disebabkan oleh kadar N yang sedikit (4,48%) pada komposit sehingga kemampuan N untuk mempertahankan matrik untuk mengikat PS tidak mampu bertahan lama. Sebagai perbandingan, doping N dengan urea pada karbon berpori *peony shell* dengan rasio 1:1 diperoleh kadar N sebesar 51,79% grafitik N (Yang *et al.* 2020). Efisiensi coulombic hampir stabil hingga siklus ke 25 dengan nilai 86%, namun pada siklus selanjutnya efisiensi coulombic berubah secara fluktuatif sejalan dengan penurunan nilai kapasitas pengosongan.

KESIMPULAN

Doping N dari urea telah berhasil dilakukan dengan perlakuan suhu pemanasan yang rendah dibandingkan dengan doping N dari ammonia. Kadar N pada sampel KBEGN telah berhasil meningkatkan konduktivitas listrik meskipun dengan kadar N masih dibawah 10%. Keberadaan N pada komposit telah memberikan pengaruh terhadap konduktivitas komposit dengan sulfur yang memiliki konduktivitas sangat rendah. Keberadaan N juga telah memberikan pengaruh terhadap pengikatan litium polisulfida yang terbentuk selama proses elektrokimia pada baterai. Hal ini ditunjukkan dengan nilai kapasitas pengisian dan pengosongan awal lebih tinggi dibandingkan dengan baterai dengan katoda tanpa doping N. Namun, karena kadar N yang masih rendah, katoda KBEGN/S tidak mampu mempertahankan stabilitas siklus yang tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Kemenristek-DIKTI Republik Indonesia atas dukungan dana penelitian pada skema Penelitian Disertasi Doktor (PDD) tahun 2022, No. kontrak: 1318/UN6.3.1/PT00/2022. Kami sampaikan juga terimakasih kepada Rektor Universitas Padjadjaran atas dukungan dana penelitian selalui skema Academic Leadership Grant (ALG) Universitas Padjadjaran tahun 2022, No. kontrak: 2203/UN6.3.1/PT.00/2022

DAFTAR PUSTAKA

Adelhelm, P., Hartmann, P., Bender, C. L., Busche, M., Eufinger, C. & Janek, J. (2015). From lithium to sodium: cell chemistry of room temperature sodium–air and sodium–sulfur

batteries. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. **6(1)**: 1016-1055.

Chen, J., Mao, Z., Zhang, L., Tang, Y., Wang, D., Bie, L. & Fahlman, B. D. (2018). Direct production of nitrogen-doped porous carbon from urea via magnesiothermic reduction. *Carbon*. **130**: 41-47.

El-Nemr, M. A., Hassaan, M. A. & Ashour, I. (2022). Fabrication of N-doping activated carbon (NDAC) from saw dust/ZnCl₂ for acid brown 14 dye removal from water. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 1-20.

Ferawati, Y. F. & Susanti, R. F. (2021). Peran N-doping terhadap karakteristik pori karbon aktif yang dihasilkan dari limbah destilasi akar wangi. *METALURGI Majalah Ilmu dan Teknologi*. **2**: 59-68.

Hao, G. P., Li, W. C., Qian, D. & Lu, A. H. (2010). Rapid synthesis of nitrogen-doped porous carbon monolith for CO₂ capture. *Advanced Materials*. **22(7)**: 853-857.

Jayaprakash, N., Shen, J., Moganty, S. S., Corona, A. & Archer, L. A. (2011). Porous hollow carbon@ sulfur composites for high-power lithium–sulfur batteries. *Angewandte Chemie*. **50**, 1-6.

Li, G. C., Hu, J. J., Li, G. R., Ye, S. H., & Gao, X. P. (2013). Sulfur/activated-conductive carbon black composites as cathode materials for lithium/sulfur battery. *Journal Of Power Sources*. **240**: 598-605.

Li, K., Chen, W., Yang, H., Chen, Y., Xia, S., Xia, M., Tu, X. & Chen, H. (2019). Mechanism of biomass activation and ammonia modification for nitrogen-doped porous carbon materials. *Bioresource Technology*. **280**, 260-268.

Li, N., Zheng, M., Lu, H., Hu, Z., Shen, C., Chang, X., Ji, G., Cao, J. & Shi, Y. (2012). High-rate lithium–sulfur batteries promoted by reduced graphene oxide coating. *Chemical Communications*. **48(34)**: 4106-4108.

Liang, J., Tang, D., Huang, L., Chen, Y., Ren, W. & Sun, J. (2018). High oxygen reduction reaction performance nitrogen-doped biochar cathode: A strategy for comprehensive utilizing nitrogen and carbon in water hyacinth. *Bioresource Technology*. **267**: 524-531.

Manthiram, A., Fu, Y. & Su, Y.S. (2013). Challenges and prospects of lithium–sulfur batteries. *Accounts of Chemical Research*. **46(5)**: 1125-1134.

Nurhilal, O., Hidayat, S., Sumiarsa, D. & Risdiana, R. (2023). Natural biomass-derived porous carbon from water hyacinth used as composite cathode for lithium sulfur batteries. *Sustainability*. **15(2)**: 1039.

Pang, Q., Liang, X., Kwok, C. Y. & Nazar, L. F. (2016). Advances in lithium–sulfur batteries based on multifunctional cathodes and electrolytes. *Nature Energy*. **1(9)**: 1-11.

- Qu, Y., Zhang, Z., Zhang, X., Ren, G., Lai, Y., Liu, Y. & Li, J. (2015). Highly ordered nitrogen-rich mesoporous carbon derived from biomass waste for high-performance lithium-sulfur batteries. *Carbon*. **84**: 399-408.
- Rezania, S., Ponraj, M., Din, M.F.M., Songip, A.R., Sairan, F.M. & Chelliapan, S. (2015). The diverse applications of water hyacinth with main focus on sustainable energy and production for new era: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **41**, 943-954.
- Rop, K., Mbui, D., Njomo, N., Karuku, G. N., Michira, I. & Ajayi, R. F. (2019). Biodegradable water hyacinth cellulose-graft-poly (ammonium acrylate-co-acrylic acid) polymer hydrogel for potential agricultural application. *Heliyon*. **5**(3): 1-29.
- Seh, Z.W., Li, W., Cha, J.J., Zheng, G., Yang, Y., McDowell, M.T., Hsu, P. & Cui, Y. (2013). Sulphur-TiO₂ yolk-shell nanoarchitecture with internal void space for long-cycle lithium-sulphur batteries. *Nature Communications*. **4**(1): 1331.
- Wang, S., Zou, K., Qian, Y., Deng, Y., Zhang, L. & Chen, G. (2019). Insight to the synergistic effect of N-doping level and pore structure on improving the electrochemical performance of sulfur/N-doped porous carbon cathode for Li-S batteries. *Carbon*. **144**: 745-755.
- Wu, H., Mou, J., Zhou, L., Zheng, Q., Jiang, N. & Lin, D. (2016). Cloud cap-like, hierarchically porous carbon derived from mushroom as an excellent host cathode for high performance lithium-sulfur batteries. *Electrochimica Acta*. **212**: 1021-1030.
- Xiao, Q., Li, G., Li, M., Liu, R., Li, H., Ren, P., Dong, Y, Feng M. & Chen, Z. (2020). Biomass-derived nitrogen-doped hierarchical porous carbon as efficient sulfur host for lithium-sulfur batteries. *Journal of Energy Chemistry*. **44**: 61-67.
- Xu, J., Lawson, T., Fan, H., Su, D., & Wang, G. (2018). Updated metal compounds (MOFs, -S, -OH, -N, -C) used as cathode materials for lithium-sulfur batteries. *Advanced Energy Materials*. **8**(10): 1702607.
- Yang, K., Gao, Q., Tan, Y., Tian, W., Zhu, L. & Yang, C. (2015). Microporous carbon derived from Apricot shell as cathode material for lithium-sulfur battery. *Microporous and Mesoporous Materials*. **204**: 235-241.
- Yang, K., Yan, J., He, R., Li, D., Li, Y., Li, T. & Ren, B. (2020). Nitrogen-doped porous carbon was prepared from peony shell for the cathode material of lithium-sulfur battery. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. **861**: 113922.
- Yin, F., Liu, X., Zhang, Y., Zhao, Y., Menbayeva, A., Bakenov, Z. & Wang, X. (2017). Well-dispersed sulfur anchored on interconnected polypyrrole nanofiber network as high performance cathode for lithium-sulfur batteries. *Solid State Sciences*. **66**: 44-49.
- Yuningsih, L.M., & Mulyadi, D. (2016). Pengaruh aktivasi karbon aktif dari tongkol jagung dan tempurung terhadap nilai konduktifitas. *SANTIKA Jurnal Ilmiah Sains dan Teknologi*. **6**(2), 531-536.
- Zeng, G., Zhou, B., Yi, L., Li, H., Hu, X. & Li, Y. (2018). Green and facile fabrication of hierarchical N-doped porous carbon from water hyacinths for high performance lithium/sodium ion batteries. *Sustainable Energy & Fuels*. **2**(4): 855-861.
- Zheng, K., Li, Y., Zhu, M., Yu, X., Zhang, M., Shi, L. & Cheng, J. (2017). The porous carbon derived from water hyacinth with well-designed hierarchical structure for supercapacitors. *Journal of Power Sources*. **366**: 270-277.