

DEVELOPMENT OF GREEN ENERGY STORAGE FROM BACTERIAL CELLULOSE, METHYL CELLULOSE AND POTATO STARCH

PEMBANGUNAN PENYIMPANAN TENAGA HIJAU DARIPADA SELULOSA BAKTERIA, SELULOSA METIL DAN KANJI KENTANG

M. H. Hamsan^{a*}, N. A. Halim^b, N. S. N. Sa'aya^c, N. S. Nazri^a, N. F. A. Salleh^a, S. Z. N. Demon^b, N. A. Shamsuri^d, M. F. Z. Kadir^{d,e}, M. F. Shukur^{f,g}, L. K. Keng^a, N. H. A. Jafry^a, A. A. Rahim^a

^aPusat Pengajian Citra Universiti, Jalan Temuan, 43600 Bangi, Universiti Kebangsaan Malaysia, Selangor, Malaysia

^bJabatan Fizik, Pusat Asasi Sains Pertahanan, Universiti Pertahanan Nasional Malaysia, Kem Sungai Besi, Kuala Lumpur 57000, Malaysia

^cFakulti Sains & Teknologi Pertahanan, Universiti Pertahanan Nasional Malaysia, Kem Sungai Besi, Kuala Lumpur 57000, Malaysia

^dJabatan Fizik, Fakulti Sains, Universiti Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia

^eUniversity Malaya Centre for Ionic Liquids (UMCiL), Universiti Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia

^fFundamental and Applied Sciences Department, Universiti Teknologi PETRONAS, 32610 Seri Iskandar, Perak, Malaysia

^gCentre of Innovative Nanostructure and Nanodevices (COINN), Universiti Teknologi PETRONAS, 32610 Seri Iskandar, Perak, Malaysia

Article history

Received

19 August 2023

Received in revised form

27 September 2023

Accepted

30 September 2023

Published Online

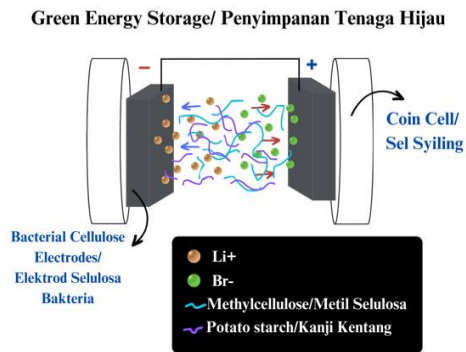
18 February 2024

*Corresponding author
hafizhamsan93@ukm.edu.my

Graphical abstract

Abstract

A natural polymer known as bacterial cellulose (BC), derived from a symbiotic culture of bacteria and yeast (SCOBY), is utilized as the electrodes for the electrochemical double-layer capacitors (EDLC). Bacterial cellulose which can be easily obtained from the local market, possesses an exceptional structure that allows for the elimination of non-biodegradable binders and the use of current collectors in the EDLC electrodes. A green polymer electrolyte system consisting of methylcellulose, potato starch and lithium bromide. This electrolyte demonstrates a conductivity of $(1.38 \pm 0.54) \times 10^{-4}$ S/cm, electrochemical stability of 1.3 V, and an ionic transference number of 0.98. The optimized electrolyte is used in the EDLC. Cyclic voltammetry analysis reveals that the fabricated EDLC has a capacitive behavior without any peaks indicating redox reactions. The EDLC undergo charging and discharging for



up to 5000 cycles, with specific capacitances of 26 F/g. The EDLC shows a maximum power density of 1730 W/kg, with energy density of 3.6 Wh/kg.

Keywords: Bacterial Cellulose; green technology; supercapacitor; polymer electrolyte; electrochemical double-layer capacitor

Abstrak

Satu polimer semulajadi yang dikenali sebagai selulosa bakteria (BC) diperoleh daripada kultur simbiotik bakteria dan yis, digunakan sebagai elektrod untuk super kapasitor dwilapisan elektrokimia (EDLC). BC yang boleh didapati dengan mudah daripada pasaran tempatan, mempunyai struktur yang luar biasa yang membenarkan penghapusan pengikat yang tidak boleh terurai dan penggunaan pengumpul arus elektrik dalam elektrod EDLC. Sistem elektrolit polimer hijau yang terdiri daripada metil selulosa, kanji kentang, dan litium bromida digunakan. Elektrolit ini menunjukkan kekonduksian sebanyak $(1.38 \pm 0.54) \times 10^{-4}$ S/cm, kestabilan elektrokimia sebanyak 1.3 V, dan nombor pemindahan ion sebanyak 0.87. Elektrolit yang dioptimumkan digunakan dalam EDLC. Analisis voltammetri siklik menunjukkan bahawa EDLC yang diperbuat memiliki kelakuan kapasitif tanpa sebarang puncak yang menunjukkan tindak balas redoks. EDLC mengalami proses mengecas dan nyahcas sehingga 5000 kitaran, dengan kapasitan spesifik 26 F/g. EDLC menunjukkan ketumpatan kuasa maksimum sebanyak 1730 W/kg, dengan ketumpatan tenaga 3.6 Wh/kg.

Kata kunci: Selulosa Bakteria; teknologi hijau; super kapasitor; elektrolit polimer; superkapasitor elektrokimia dwi-lapisan

© 2024 Penerbit UTM Press. All rights reserved

1.0 PENGENALAN

Permintaan terhadap sistem penyimpanan dan sistem sandaran kuasa telah meningkatkan penggunaan dan perkembangan peranti penyimpanan tenaga yang dapat mengumpulkan tenaga elektrik yang dihasilkan. Peranti penyimpanan tenaga yang paling popular dan biasa digunakan adalah bateri contohnya bateri ion-litium dan bateri asid plumbum [1]. Tiada keraguan bahawa bateri ion litium konvensional mempunyai prestasi yang luar biasa dan telah digunakan dalam pelbagai alat seperti komputer riba, tablet, telefon pintar dan kamera. Walau bagaimanapun, bateri ion litium mengandungi kobalt yang merupakan ancaman kepada alam sekitar. Selain itu, litium boleh menjadi bahan letupan [2]. Super kapasitor adalah salah satu alternatif kepada kelemahan ini disebabkan oleh kos rendah dan prosedur penyediaan yang selamat. Super kapasitor boleh dikategorikan kepada tiga jenis utama iaitu super kapasitor dwi lapisan elektrokimia (EDLC), pseudokapasitor dan kapasitor hibrida. Setiap kapasitor ini mempunyai mekanisme penyimpanan tenaga yang berbeza disebabkan oleh pilihan bahan elektrod yang berbeza [3].

Super kapasitor adalah komponen elektrik yang banyak digunakan untuk menyimpan tenaga, dan boleh didapati dalam pelbagai aplikasi seperti alat elektronik pengguna, pengangkutan, peralatan perubatan, dan sistem pertahanan. Antara kapasitor, EDLC telah mendapat perhatian kerana penggunaannya mengandungi bahan elektrolit yang

berbeza dan elektrod karbon. Ia bersaing dengan sumber kuasa lain, terutamanya bateri boleh dicas semula [4]. Semasa memilih EDLC, ia penting untuk mempertimbangkan faktor-faktor seperti tenaga/kuasa spesifik, hayat kitaran cas-pengecas, dan keselamatan. Prestasi EDLC boleh diperbaiki melalui pengubahsuaian elektrod atau elektrolit [5]. Penyelidikan terkini menunjukkan bahawa elektrolit polimer adalah pilihan yang sangat sesuai untuk digunakan dalam peranti elektrokimia kerana beberapa kelebihan berbanding elektrolit cecair komersil, seperti bebas pelarut, kalis kebocoran, telus, ringan, elastik, mudah dikendalikan, mampu membentuk filem nipis, mempunyai konduktiviti yang baik, dan mempunyai bukaan elektrokimia yang luas [6].

Bahan tipikal bagi EDLC memerlukan pengikat untuk mengikat semua bahan seperti bahan pengalir elektron dan karbon aktif. Pengikat yang paling kerap digunakan adalah poli (vinilidin florida), polimer buatan manusia yang tidak boleh terbiodegradasi [7]. Pelbagai biopolimer seperti gom guar, kanji gandum, kitosan, kanji kentang, selulosa, dan gelatin telah digunakan sebagai pengikat [8]. BC adalah polimer yang boleh terbiodegradasi yang mempunyai struktur rangkaian berbilang. Ciri-ciri ini dapat meningkatkan keanjalan elektrod serta meningkatkan kadar penguraian. BC mempunyai keupayaan membentuk nisbah aspek yang tinggi, kekuatan mekanikal yang cemerlang, fleksibel, dan boleh bertindak sebagai penghantar ion [9]. Kumpulan eter (-C-O-C-) dalam struktur BC hampir

sama seperti polioksida etilena iaitu polimer biasa yang digunakan dalam penyimpanan tenaga [10]. Struktur ini membolehkan polimer memegang bahan karbon aktif seperti karbon teraktif, tiub nano karbon, grafit, aerogel karbon, dan grafen.

Selain elektrod, elektrolit polimer juga memainkan peranan penting dalam peningkatan prestasi superkapasitor. Salah satu kaedah untuk menyediakan hos polimer yang cekap adalah pencampuran polimer. Penggabungan dua atau lebih polimer telah mendorong para penyelidik untuk meningkatkan ciri-ciri setiap polimer. Berdasarkan kajian lepas [11], filem campuran kanji kentang-metilselulosa lebih amorfus dalam strukturnya daripada filem metilselulosa tulen dan filem kanji kentang. Kawasan amorfus dalam elektrolit polimer bertanggungjawab untuk mengkonduksikan ion. Nisbahnya 60% berat metilselulosa dan 40% berat kanji kentang menunjukkan struktur amorfus yang paling banyak dan bermanfaat untuk mengkonduksikan ion. Sifat mekanikal atau kestabilan struktur bahan boleh dimanipulasi oleh kaedah penggabungan polimer. Komposit polimer bercampur menyediakan lebih banyak tapak untuk proses kompleksasi ion berlaku, yang menjadikan konduksi ion lebih cekap daripada polimer tunggal [12].

Litium bromida memainkan peranan penting dalam meningkatkan prestasi pelbagai peranti elektrokimia. Litium bromida digunakan untuk meningkatkan kekonduksian ionik polimer. Ini amat penting untuk kecekapan bateri dan super kapasitor [13]. Tambahan pula, lithium bromida menunjukkan keserasian yang baik dengan pelbagai jenis bahan polimer, memastikan kestabilan dan integriti struktur elektrolit dari semasa ke semasa. Selain itu, elektrolit yang menggunakan litium bromida menunjukkan kestabilan terma yang tinggi [14]. Keseluruhannya, penggabungan lithium bromida dalam elektrolit polimer menjanjikan jalan yang berpotensi untuk pembangunan sistem penyimpanan tenaga canggih dengan kecekapan yang tinggi.

Berdasarkan kajian ini, dapat disimpulkan bahawa penambahan garam LiBr dalam filem kanji kentang-metilselulosa meningkatkan kekonduksian ion elektrolit polimer. Analisis penting untuk elektrolit polimer seperti kajian nombor pemindahan ion dan voltametri sapuan lurus telah dijalankan. Analisis ini penting untuk elektrolit polimer berguna dalam aplikasi EDLC. Elektrolit yang terbaik digunakan dan dikepit di antara dua elektrod selulosa bakteria dalam pembuatan EDLC. Voltametri siklik telah dilakukan untuk mengesahkan ciri kapasiti EDLC. Selain itu, analisis cas-nyahcas telah dijalankan pada EDLC.

2.0 METODOLOGI

2.1 Bahan Kimia

Bahan mentah BC telah dibeli dari sebuah kedai tempatan (Malaysia). Metil selulosa, kanji kentang, natrium dodekil, lithium bromide, dan tiub nano

karbon berbilang dinding berhidroksil (MWCNT-OH) telah dibeli daripada Sigma-Aldrich.

2.2 Penyediaan Elektrolit Polimer

Kanji kentang (0.4 g) dicampur dalam asid asetik 1% (100 ml) (SYSTEM) selama 20 minit pada suhu 80 °C. Metilselulosa (0.6 g) dituang ke dalam campuran dan diaduk sehingga larutan homogen tercapai; LiBr (30 wt%) ditambahkan ke dalam campuran kanji kentang-metilselulosa. Larutan akan dicurahkan ke dalam cawan petri dan dibiarkan kering di dalam almari pengering pada suhu bilik. Filem kemudian disimpan di dalam desikator yang diisi dengan gel silika selama beberapa hari untuk memastikan sampel kering dengan baik.

2.3 Pencirian Elektrolit Polimer

Ketebalan filem metil selulosa-kanji kentang-LiBr, d , yang diukur dengan menggunakan pengukur skru mikro Mitutoyo. HIOKI 3532-50 LCR digunakan untuk mengkaji kekonduksian. Frekuensi dalam kerja ini adalah dari 50 Hz hingga 5 MHz. Filem itu diapit di antara keluli tahan karat dan kekonduksian ionik, σ , filem itu dikira menggunakan persamaan yang diberikan:

$$\sigma = \frac{d}{AR_b} \quad (1)$$

A ialah luas permukaan sentuhan antara elektrod dan elektrolit, R_b adalah rintangan jisim elektrolit. Bekalan kuasa digital DC DP3003 instrumen V&A disambungkan ke multimeter dan sampel untuk mendapatkan nombor pemindahan (TNM). TNM kedua-dua spesies pembawa cas, ion (t_i) dan elektron (t_e) diperoleh pada voltan kerja 0.2 V dan menggunakan persamaan berikut:

$$t_i = \frac{I_i - I_{ss}}{I_i} \quad (2)$$

Pembukaan dan bacaan arus ditetapkan sebagai I_i dan I_{ss} , dan jumlah t_i dan t_e adalah sama dengan 1. Kestabilan potensi filem metil selulosa-kanji kentang LiBr dianalisis menggunakan pengukuran voltametri imbas linear (LSV). Dalam analisis ini, potensi diimbas secara linear dari 0 hingga 3 V. Analisis ini dilakukan dengan menggunakan potensiostat (Digi-IVY DY2300) pada kadar imbas perlahan 10 mV/s.

2.4 Penyediaan Super Kapasitor Dwilapisan Elektrokimia

Persediaan elektrod BC telah dilaporkan dalam kajian terdahulu. EDLC terbentuk dengan meletakkan elektrolit polimer konduktor tertinggi dengan dua elektrod BC yang serupa dan kemudiannya diletakkan di dalam sel syiling CR2032. EDLC (sel syiling CR2032) diletakkan dalam pemegang Teflon dengan elektrod keluli tahan karat untuk pencirian selanjutnya.

2.5 Pencirian Super Kapasitor Dwilapisan Elektrokimia

Pengukuran voltammetri siklik (CV) telah dijalankan untuk menentukan kehadiran sebarang tindak balas redoks dalam julat potensi kajian semasa. Potensiostat Digi-IVY DY2300 digunakan untuk analisis ini, dengan pelbagai kadar imbasan 20, 50, dan 100 mV/s. Kapasitansi (C_{cv}) EDLC yang difabrikasi diperoleh melalui analisis CV dengan menggunakan persamaan berikut:

$$C_{cv} = \int_{V_i}^{V_f} \frac{I(V)dV}{2(V_f - V_i)m_s} \quad (3)$$

$I(V) dV$ mewakili luas plot CV, s adalah kadar imbasan, dan m adalah jisim bahan aktif. Dalam kajian, ia adalah jisim MWCNT-OH. V_f dan V_i pula adalah voltan akhir dan awal. Analisis cas-nyahcas telah dijalankan menggunakan pengitar bateri NEWARE dengan ketumpatan arus 0.75 mA/cm². Parameter penting untuk EDLC, iaitu kapasitansi spesifik (C_{cd}), rintangan siri setara (ESR), ketumpatan kuasa (P_d), dan ketumpatan tenaga (E_d):

$$C_{cd} = \frac{i}{ym} \quad (4)$$

$$ESR = \frac{V_d}{i} \quad (5)$$

$$E_d = \frac{C_{cd}V^2}{2} \quad (6)$$

$$P_d = \frac{V^2}{4mESR} \quad (7)$$

$$X = \frac{t_d}{t_c} \times 100\% \quad (8)$$

di mana y mewakili cerun bahagian nyahcas, V_d mewakili penurunan potensi, dan i adalah arus kerja 1.5 mA. t_d dan t_c adalah masa untuk nyahcas dan cas. X adalah kecekapan EDLC.

3.0 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

3.1 Kajian Kekonduksian Ion Pada Suhu Bilik

Kekonduksian ionik merupakan satu kajian penting dalam elektrolit polimer. Ia amat penting bagi elektrolit mempunyai nilai σ yang tinggi, supaya ia berguna dalam aplikasi penyimpanan tenaga. Jadual 1 menunjukkan σ pada suhu bilik bagi sistem elektrolit polimer. Filem dengan metilselulosa dan kanji kentang mempunyai kekonduksian ionik yang sangat rendah iaitu $(2.84 \pm 1.35) \times 10^{-11}$ S/cm. Nilai σ yang rendah disebabkan oleh ketumpatan ionik yang

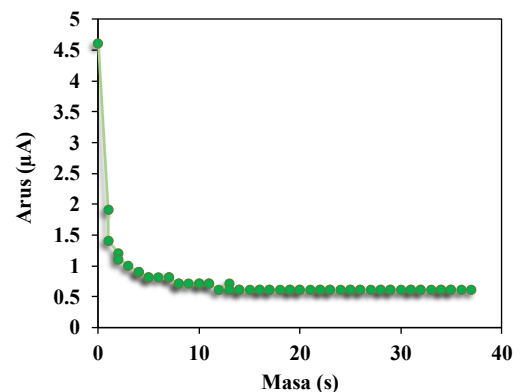
rendah dalam polimer tanpa kehadiran penyumbang ion. Penambahan 15% LiBr telah meningkatkan kekonduksian sehingga $(2.30 \pm 0.90) \times 10^{-5}$ S/cm. σ dioptimumkan pada $(1.38 \pm 0.54) \times 10^{-4}$ S/cm dengan kehadiran 30% LiBr. Kenaikan dalam kekonduksian boleh dikaitkan dengan peningkatan dalam kepadatan bilangan pembawa cas serta pelemahan interaksi rantai polimer antara metilselulosa dan kanji kentang dengan kehadiran garam [15].

Jadual 1 Kekonduksian Ion Pada Suhu bilik bagi setiap elektrolit

Elektrolit	Kekonduksian (S/cm)
Metil Selulosa-Kanji Kentang	$(2.84 \pm 1.35) \times 10^{-11}$
Metil Selulosa-Kanji Kentang- 15% LiBr	$(2.30 \pm 0.90) \times 10^{-5}$
Metil Selulosa-Kanji Kentang- 30% LiBr	$(1.38 \pm 0.54) \times 10^{-4}$

3.2 Kajian Nombor Pemindahan Ion

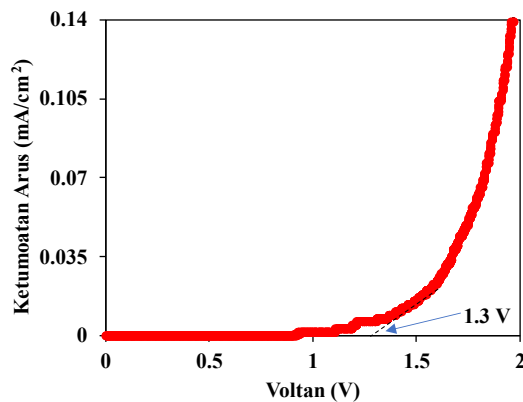
Peranti penyimpanan tenaga seperti superkapasitor dan bateri memerlukan ion untuk menyimpan tenaga. Untuk menentukan dominasi ion dalam elektrolit polimer, analisis TNM telah dijalankan pada voltan kerja 0.2 V. Rajah 1 menunjukkan tindak balas polarisasi elektrolit MC-PS-LiBr berkekonduksian tinggi. Hasil pemerhatian mendapati arus awal adalah 4.6 μ A. Kalaupun bagaimanapun, didapati arus menurun secara mendadak sebelum stabil pada 0.6 μ A. Hal ini adalah kesan penyekatan ion oleh elektrod keluli tahan karat. Apabila voltan kerja dikenakan ke atas sel, arus awal 4.6 μ A terhasil daripada pengaliran elektron-elektron dan ion-ion. Apabila cas-cas ini mengalir ke arah elektrod, hanya elektron-elektron mengalir melepasi elektrod manakala pengaliran ion-ion disekat. Ini menyebabkan hanya pengaliran elektron-elektron yang menghasilkan arus, membawa kepada penurunan mendadak arus iaitu 0.6 μ A. Nilai t_i dan t_e masing-masing adalah 0.87 dan 0.13, menandakan kekonduksian didominasi oleh ion-ion.



Rajah 1 Graf Analisis Nombor Pemindahan Pada Voltan Kerja 0.2 V

3.3 Kajian Voltammetri Sapuan Lurus

Sebilangan besar elektrolit berasaskan polimer semula jadi digunakan dalam aplikasi bervoltan rendah. Graf LSV untuk elektrolit MC-PS-LiBr dipaparkan dalam Rajah 2. Pada peringkat permulaan, tiada perubahan arus yang ketara diperhatikan apabila voltan meningkat daripada 0 hingga 1 V. Hal ini menunjukkan julat voltan 0 – 1 V adalah julat aplikasi voltan yang sesuai dan selamat tanpa menguraikan elektrolit. Walau bagaimanapun, elektrolit masih boleh digunakan sehingga 1.3 V, iaitu voltan ambang, kerana peningkatan arus masih dianggap tidak ketara. Apabila voltan yang dikenakan adalah lebih tinggi daripada voltan ambang, peningkatan arus secara mendadak dapat diperhatikan. Hal ini disebabkan oleh penguraian oksida atau pengoksidaan kumpulan berlaku dalam elektrolit polimer secara dominan lalu menghasilkan arus redoks yang tinggi. Pengoksidaan anion berlaku pada permukaan elektrod yang bersentuhan dengan elektrolit, mengakibatkan pelepasan elektron lalu meningkatkan arus secara mendadak. Hal ini menandakan penguraian elektrolit dan menunjukkan elektrolit MC-PS-LiBr tidak sesuai untuk diaplikasikan pada julat voltan yang lebih tinggi daripada 1.3 V.



Rajah 2 Graf Analisis Nombor Pemindahan Pada Voltan Kerja 0.2 V

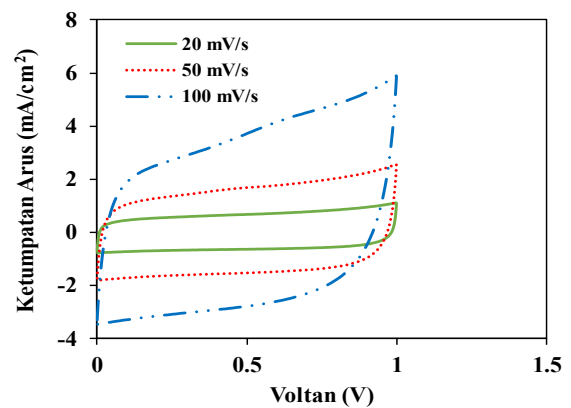
3.4 Kajian Voltammetri Siklik untuk EDLC

Kapasitor adalah peranti yang bergantung kepada kadar pengimbasan. Oleh itu, kadar pengimbasan yang berbeza digunakan pada EDLC daripada 20 hingga 100 mV/s. Bentuk plot voltammetri siklik dalam Rajah 3 berbeza antara bentuk segi empat dan berbentuk daun dengan ketiadaan puncak redoks. Menurut Noly et al. [16], puncak dalam voltammetri siklik menunjukkan kewujudan arus Faradaik yang berkaitan dengan mekanisme interkalasi dan deinterkalasi yang tidak berlaku dalam kapasitor lapisan dwilapis. Perhatikan bahawa bentuk plot voltammetri siklik pada kadar pengimbasan yang tinggi adalah berbentuk daun dan bukan bentuk segi empat yang sempurna. Hal ini disebabkan oleh rintangan dalaman serta porositi karbon yang

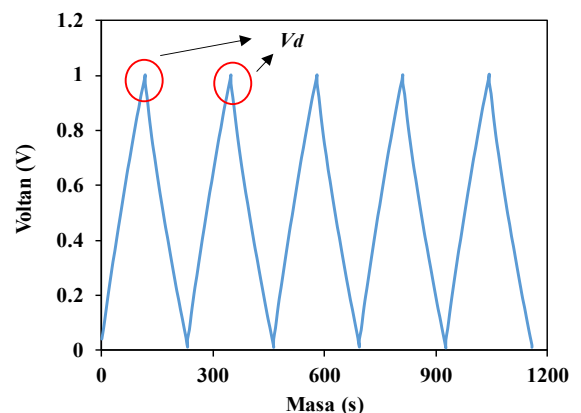
menyebabkan ketergantungan arus terhadap voltan. Pada kadar pengimbasan yang tinggi, pengaliran ion bergerak dengan kadar yang cepat menyebabkan penggabungan semula ion [17]. Semasa kadar pengimbasan yang perlahan, ion bebas bergerak pada kadar yang tetap dan ia membentuk pengumpulan ion di permukaan elektrod dengan rintangan ohmik yang rendah [18].

3.5 Kajian Mengecas Dan Nyahcas Untuk EDLC

Graf cas dan nyahcas EDLC digambarkan dalam Rajah 4. Ketumpatan arus adalah 0.75 mA/cm² dengan potensi daripada 0 hingga 1 V. Bentuknya hampir segitiga, dan bahagian nyahcas adalah hampir linear. Keputusan ini hampir sepadan dengan kapasitor ideal di mana plotnya mempunyai bentuk segitiga yang sempurna. C_d mengukur keupayaan bahan elektrod untuk menyimpan cas ionik di antara elektrod dan elektrolit. Hal ini boleh difahami dengan melihat Rajah 5 di mana C_d bagi EDLC adalah 26 F/g pada kitaran pertama dan jatuh ke 24 F/g pada kitaran ke-100. Kebolehan EDLC untuk menyimpan cas ionik dapat dilihat stabil sehingga kitaran ke-5000 dengan purata C_d sebanyak 21 F/g. Kapasitansi spesifik EDLC boleh dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti luas permukaan, porositi, dan komposisi elektrod serta sifat-sifat elektrolit yang digunakan [19].

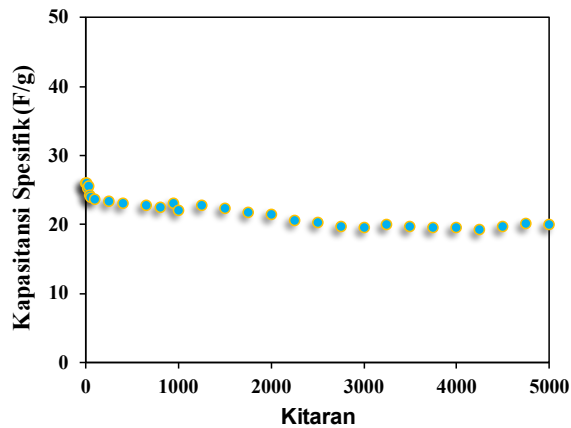


Rajah 3 Graf voltammetri siklik bagi EDLC

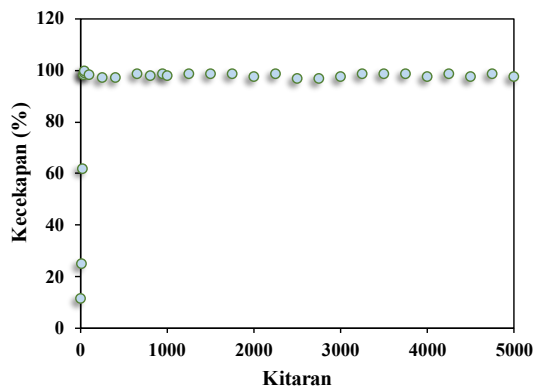


Rajah 4 Graf cas-nyahcas EDLC

Rajah 6 menunjukkan graf X EDLC sepanjang 5000 kitaran. Kecekapan yang tinggi bermakna masa yang diambil oleh EDLC untuk nyahcas adalah lebih atau sama dengan masa untuk cas. Kadar X pada kitaran pertama 11 % dan meningkat dengan ketara kepada 98 % pada kitaran ke-30. Masa pemuatan yang lebih lama semasa ion dan elektron membentuk lapisan cas ganda di permukaan elektrod karbon/elektrolit mungkin menyumbang kepada nilai X yang lebih rendah yang diperhatikan semasa kitaran awal. Nilai X kekal stabil pada purata 98.2 % sehingga kitaran ke-5000. Hal ini menggambarkan bahawa EDLC dalam kerja ini mempunyai keupayaan kitaran dan sentuhan elektrod dan elektrolit yang bagus [20]. EDLC yang bagus haruslah memiliki kecekapan lebih daripada 90%.



Rajah 5 Graf kapasitansi spesifik EDLC

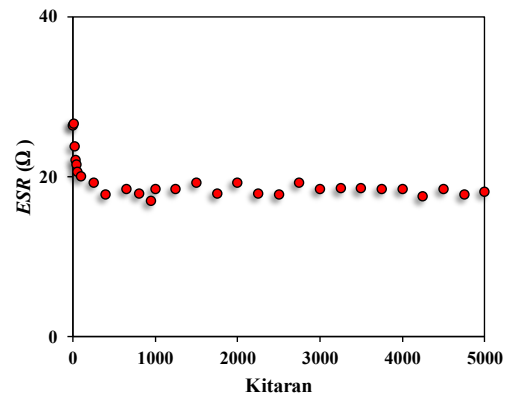


Rajah 6 Graf kecekapan EDLC

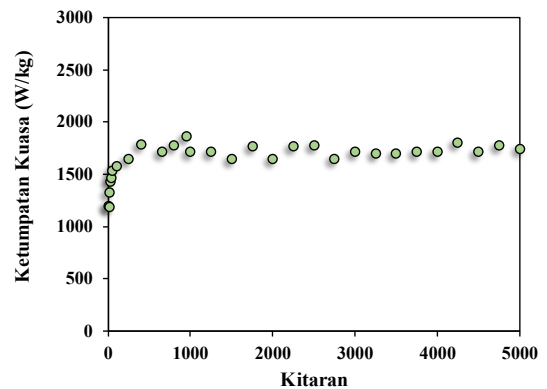
V_d dengan nilai kecil (0.025-0.040 V) pada Rajah 4 sepanjang 5000 kitaran dalam kajian ini menunjukkan bahawa jumlah tenaga yang kecil hilang dalam menghasilkan haba yang tidak diinginkan dalam mekanisme cas dan nyahcas [21]. ESR yang rendah adalah penting untuk EDLC. Seperti yang didokumentasikan oleh Arof *et al.* [22], keberadaan ESR dalam EDLC adalah disebabkan oleh rintangan pengumpul arus, elektrolit polimer, serta ruang antara elektrolit polimer dan pengumpul arus. ESR diperolehi melalui persamaan (5) dan diilustrasikan dalam Rajah 7. ESR yang rendah dengan purata 18Ω sepanjang 5000 kitaran menunjukkan bahawa elektrolit polimer

dan elektrod mempunyai sentuhan yang bagus. Keadaan ini dapat membantu pergerakan ion ke permukaan elektrod [23, 24].

Ketumpatan kuasa ialah berapa banyak tenaga yang boleh dikeluarkan oleh EDLC mengikut jisim bahan aktif. Bahan aktif dalam kajian ini adalah tiub nano karbon. Nilai P_d yang dikira menggunakan persamaan (8) untuk kajian ini dipamerkan dalam Rajah 8. Nilai P_d untuk kitaran pertama adalah 1200 W/kg dan EDLC mengalami peningkatan dalam nilai P_d ke 1650 W/kg pada kitaran ke-250. Selepas kitaran ke-250, corak P_d mula kekal dengan nilai purata 1730 W/kg. Penurunan ESR pada kitaran awal EDLC seperti dalam Rajah 7 selari dengan peningkatan P_d pada awal kitaran. Berdasarkan persamaan (8), ESR sangat berkait rapat dengan P_d .

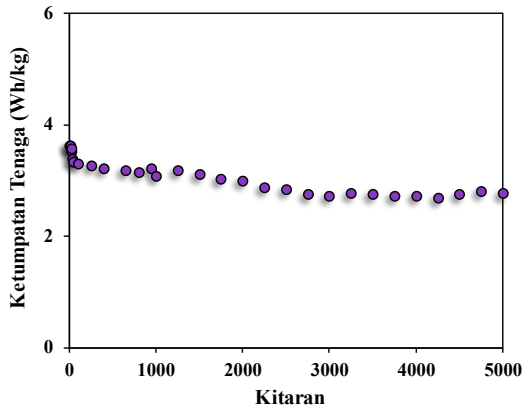


Rajah 7 Graf rintangan siri setara EDLC



Rajah 8 Graf ketumpatan kuasa EDLC

Daripada Rajah 9, dapat dilihat bahawa nilai E_d dengan menggunakan persamaan (6) bagi kitaran pertama adalah 3.6 Wh/kg. Nilai E_d menunjukkan sedikit penurunan dan kekal dengan purata 3 Wh/kg sehingga kitaran yang ke-5000. EDLC mengalami penurunan E_d sekitar 16.7% selepas 5000 kitaran. Hal ini bermakna halangan tenaga dilalui oleh ion-ion semasa bergerak ke permukaan elektrod karbon untuk proses cas dan nyahcas adalah sama [25, 26].



Rajah 9 Graf ketumpatan tenaga EDLC

4.0 KESIMPULAN

Dalam kajian ini, penyelidik menggunakan selulosa bakteria (BC), polimer semulajadi yang diperoleh daripada kultur simbiotik bakteria dan yis, sebagai elektrod untuk superkapasitor dwilapisan elektrokimia (EDLC). BC yang mudah didapati di pasaran tempatan mempunyai struktur unik yang membolehkan penghapusan pengikat yang tidak terurai dan penggunaan pengumpul arus elektrik dalam elektrod EDLC. Pengkaji juga menggunakan sistem elektrolit polimer hijau yang terdiri daripada metil selulosa, kanji kentang, dan litium bromida. Elektrolit ini menunjukkan kekonduksian sebanyak $(1.38 \pm 0.54) \times 10^{-4}$ S/cm, kestabilan elektrokimia sebanyak 1.3 V, dan nombor pemindahan ion sebanyak 0.87. Setelah dioptimumkan, elektrolit ini digunakan dalam EDLC. Analisis voltametri siklik menunjukkan bahawa EDLC yang pengkaji hasilkan mendapati kelakuan kapasitif tanpa sebarang puncak yang dihasilkan jika wujudnya tindak balas redoks. EDLC yang dibuat melalui kajian ini mampu mengalami proses cas dan nyahcas sebanyak 5000 kitaran dengan kapasitan spesifik sebanyak 26 F/g. Pengkaji juga mencatatkan ketumpatan kuasa maksimum sebanyak 1730 W/kg, dengan ketumpatan tenaga sebanyak 3.0 Wh/kg. Oleh yang demikian demikian, pengkaji menyimpulkan bahawa penggunaan BC sebagai elektrod dan pengoptimuman elektrolit polimer hijau dalam EDLC dapat menghasilkan peranti dengan prestasi yang baik, menunjukkan potensi bagi aplikasi kapasitor tenaga yang berkesan dan mampan.

Penghargaan

Pengarang dan penyelidik dengan ikhlas mengucapkan terima kasih kepada Bahagian Penyelidikan dan Inovasi (BPI), Universiti Pertahanan Nasional Malaysia (UPNM) atas peruntukan (PPPI - A0014) dan Pusat Asasi Pertahanan UPNM dan Universiti Malaya atas fasiliti yang disediakan.

Rujukan

- [1] Badi, N., Theodore, A. M., Alghamdi, S. A., Al-Aoh, H. A., Lakhout, A. and Singh, P. K. 2022. The Impact of Polymer Electrolyte Properties on Lithium-ion Batteries. *Polymers*. 14(15): 3101.
- [2] Wang, G., Wu, J., Zheng, Z., Niu, L., Pan, L. and Wang, B. 2022. Effect of Deformation on Safety and Capacity of Lithium Batteries. *Batteries*. 8(11): 235.
- [3] Sirimanne, D. C. U., Kularatna, N. and Arawawala, N. 2023. Electrical Performance of Current Commercial Supercapacitors and Their Future Applications. *Electronics*. 12(11): 2465.
- [4] Tshiani, Tumba, C. and Umenne, P. 2022. The Impact of the Electric Double-layer Capacitor (EDLC) in Reducing Stress and Improving Battery Lifespan in a Hybrid Energy Storage System (HESS) System. *Energies*. 15(22): 8680.
- [5] Adam, A. A., Soleimani, H., Dennis, J. O., Aldaghri, O. A., Alsadig, A., Ibaouf, K.H., Abubakar Abdulkadir, B., et al. 2023. Insight into the Effect of Glycerol on Dielectric Relaxation and Transport Properties of Potassium-Ion-Conducting Solid Biopolymer Electrolytes for Application in Solid-State Electrochemical Double-layer Capacitor. *Molecules*. 28(8): 3461.
- [6] Alsulaim, G. M., Elamin and Ayman. A. 2023. Two Promising Methodologies for Dealing with Changes in Optical and Electrical Properties of Polymer Electrolytes (SPEs). *Journal of Composites Science*. 7(6): 221.
- [7] Xie, X., Li, X., Xu, J. and Dong, L. 2023. Investigation and Improvement of Test Methods for Capacitance and DCESR of EDLC Cells. *Sensors*. 23(10): 4717.
- [8] Landi, G., La Notte, L., Palma, A. L. and Puglisi, G. 2022. Electrochemical Performance of Biopolymer-based Hydrogel Electrolyte for Supercapacitors with Eco-friendly Binders. *Polymers*. 14(20): 4445.
- [9] Kamal, T., Ul-Islam, M., Fatima, A., Ullah, M. W. and Manan, S. 2022. Cost-effective Synthesis of Bacterial Cellulose and Its Applications in the Food and Environmental Sectors. *Gels*. 8(9): 552.
- [10] de Souza, T. C., Amorim, J. D. P. de, Silva Junior, C. J. G. da, de Medeiros, et al. 2023. Magnetic Bacterial Cellulose Biopolymers: Production and Potential Applications in the Electronics Sector. *Polymers*. 15(4): 853.
- [11] Hamsan, M. H., Shukur, M. F. and Kadir, M. F. Z. 2017. The Effect of NH_4NO_3 Towards the Conductivity Enhancement and Electrical Behavior in Methyl Cellulose-starch Blend based Ionic Conductors. *Ionics*. 23: 1137-1154.
- [12] Jordá-Reolid, M., Ibáñez-García, A. Catani, L., and Martínez-García, A. 2022. Development of Blends to Improve Flexibility of Biodegradable Polymers. *Polymers*. 14(23): 5223.
- [13] Song, Z., Chen, F., Martínez-Ibañez, M. et al. 2023. A Reflection on Polymer Electrolytes for Solid-state Lithium Metal Batteries. *Nature Communication*. 14: 4884.
- [14] Fuzlin, A. F. A., Sahraoui, B., Samsudin, A. S. 2020. Influence of Lithium Bromide on Electrical Properties in Bio-based Polymer Electrolytes. *Makara Journal of Technology*. 24: 106.
- [15] Dipu Ahmed, Md. and Madina Maraz, K. 2023. Polymer Electrolyte Design Strategies for High-performance and Safe Lithium-ion Batteries: Recent Developments and Future Prospects. *Materials Engineering Research*. 5(1): 245.
- [16] Nolly, C., Ikpo, C. O., Ndingwi, M. N., Ekwere, P. and Iwuoha, E. I. 2022. Pseudocapacitive Effects of Multi-walled Carbon Nanotubes-functionalised Spinel Copper Manganese Oxide. *Nanomaterials*. 12(19): 3514.
- [17] Xue, X., Wan, L., Li, W., Tan, X., Du, X. and Tong, Y. 2023. A Self-healing Gel Polymer Electrolyte, based on a Macromolecule Cross-linked Chitosan for Flexible Supercapacitors. *Gels*. 9: 8.
- [18] Wu, J. T., Xia, G. J., Li, S. B., Wang, L. P. and Ma, J. 2020. Flexible and Self-healable Gelled Polymer Electrolyte based on a Dynamically Cross-linked PVA Ionogel for

- High-performance Supercapacitors. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 59: 22509.
- [19] Shujahadeen B. Aziz, Abdulwahid, R. T., Sadiq, N. M., Abdullah, R. M., Tahir, D. A., Jameel, D. A., et al. 2023. Design of Biodegradable Polymer Blend Electrolytes with Decoupled Ion Motion for EDLC Device Application: Electrical and Electrochemical Properties. *Results in Physics*. 51: 106692.
- [20] Sera, J. P., Salado, M., Correia, D. M., Goncalves, R., Campo, F. J., Mendez, S. et al. 2023. High-performance Sustainable Electrochromic Devices based on Carrageenan Solid Polymer Electrolytes with Ionic Liquid. *ACS Applied Engineering Materials*. 1(5): 1416.
- [21] Rani, J. R., Das, N. C., Kim, M., Thangavel, R., Kim, S. T., Lee, Y. S. et al. 2023. Realizing High Energy Density Supercapacitors Assisted by Light-induced Charging. *Journal of Power Sources*. 576: 233197.
- [22] Arof, A. K., Kufian, M. Z., Syukur, M. F., Aziz, M. F., Abdelrahman, A. E. and Majid, S. R. 2012. Electrical Double Layer Capacitor using Poly(methyl methacrylate)-C₄BO₈Li Gel Polymer Electrolyte and Carbonaceous Material from Shells of Mata Kucing (Dimocarpuslongan) Fruit. *Electrochimica Acta*. 74: 39.
- [23] Aziz, S. B., Abdulwahid, R. T., Sadiq N. M., Abdullah, R. M., Tahir, D. A., Jameel, D. A., et al. 2023. Design of Biodegradable Polymer Blend Electrolytes with Decoupled Ion Motion for EDLC Device Application: Electrical and Electrochemical Properties. *Results in Physics*. 51:106692.
- [24] Markoulidis, F., Dawe, A., and Lekakou, C. 2021. Electrochemical Double-layer Capacitors with Lithium-ion Electrolyte and Electrode Coatings with PEDOT:PSS Binder. *Journal of Applied Electrochemistry*. 51: 373-385.
- [25] Zhang, Z., Lu, S., Li, Y., Song, J., Han, E., Wang, H. and He, Y. 2023. Promoting Hierarchical Porous Carbon Derived from Bamboo via Copper Doping for High-performance Supercapacitors. *Industrial Crops and Products*. 203: 117155.
- [26] Qin, G., Wang, M., Fan, L., Fang, X., Zhang, D., Liu, J. et al. 2020. Multifunctional Supramolecular Gel Polymer Electrolyte for Self-healable and Cold-resistant supercapacitor. *Journal of Power Sources*. 474: 228602.