

Original paper

PENGARUH SUHU KARBONISASI TERHADAP SIFAT FISIS DAN KIMIA KARBON AKTIF DAUN JERUK PURUT (*CYTRUS HYSTRIX DC*) UNTUK SEL SUPERKAPASITOR

Husain Ahmad Madani, Bidayatul Armynah^{*)}

Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin, Makassar

Email: arung-lolo@fmipa.unhas.ac.id

Received: 1 Desember 2024; revised: 10 Januari 2025; accepted: 15 Januari 2025

ABSTRAK

Superkapasitor atau *Electrochemical Double Layer Capacitor (EDLC)* adalah perangkat elektrokimia dengan rapat daya tinggi, siklus daya panjang, serta kemampuan pengisian dan pengosongan yang cepat. Penelitian ini berfokus pada pemanfaatan daun jeruk purut (*Citrus hystrix DC*) sebagai bahan karbon aktif untuk elektroda sel superkapasitor dengan kandungan lignoselulosa (hemiselulosa 28,40%, selulosa 25,60%, dan lignin 9,40%). Karbon aktif dihasilkan melalui aktivasi kimia menggunakan KOH 0,3M diikuti karbonisasi pada suhu 650°C, 700°C, dan 750°C dengan gas N₂, serta aktivasi fisika menggunakan gas CO₂ pada suhu 800°C. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa peningkatan suhu karbonisasi memengaruhi sifat fisis dan elektrokimia karbon aktif. Analisis FTIR menunjukkan degradasi gugus organik dan pembentukan struktur karbon berpori, sedangkan analisis XRD mengindikasikan transisi struktur kristalin menjadi amorf. Nilai massa jenis elektroda menurun seiring peningkatan suhu karbonisasi, memungkinkan terbentuknya pori-pori yang mendukung peningkatan kapasitansi. Hasil cyclic voltammetry menunjukkan kapasitansi spesifik tertinggi sebesar 107,75 F/g pada suhu karbonisasi 700°C, dibandingkan dengan 71,50 F/g dan 74,75 F/g masing-masing pada suhu 650°C dan 750°C. Penelitian ini membuktikan bahwa karbon aktif berbasis daun jeruk purut memiliki potensi tinggi sebagai elektroda sel superkapasitor, dengan suhu karbonisasi optimal pada 700°C.

Kata Kunci: Karbon Aktif, Biomassa, Kapasitansi, Daun Jeruk Purut, Superkapasitor.

PENDAHULUAN

Superkapasitor atau *Electrochemical Double Layer Capacitor (EDLC)* adalah perangkat elektrokimia yang mempunyai rapat daya yang besar dan siklus daya yang panjang. Penyimpanan energi superkapasitor lebih besar karena memiliki waktu hidup yang lebih lama serta tingkat pengisian dan pengosongan yang cepat, memiliki kekuatan spesifik dan kepadatan energi yang tinggi [1,2]. Kapasitas penyimpanan energi oleh superkapasitor bergantung pada elektroda dan elektrolit yang digunakan, proses penyimpanan energi dan daya dapat terjadi karena adanya interaksi elektron pada permukaan elektroda berpori, luas

permukaan spesifik dan ion yang dihasilkan elektrolit [3].

Biomassa memiliki senyawa lignoselulosa yang merupakan sumber karbon yang melimpah. Selain itu, selulosa juga bersifat hidrofilik sehingga menyederhanakan proses difusi ion kedalam pori [4]. Karbon aktif digunakan untuk membuat kapasitor jenis EDLC yang menyimpan energi lapisan ganda, karbon aktif berbasis limbah biomassa dijadikan karbon karena mempunyai beberapa keunggulan secara ekonomi, lingkungan dan sosial. Daun jeruk purut (*Citrus hystrix DC*) merupakan tanaman hortikultura yang umum

digunakan sebagai perisa alami. Kandungan dari daun jeruk purut yaitu senyawa bioaktif seperti flavonoid, steroid, kumarin, fenolik, tannin, saponin, terpen dan minyak atsiri. Serta kandungan minyak pada daun jeruk purut seperti senyawa sitronelal, sitronelol, linalol dan geraniol [5]. Tanaman daun hijau yang memiliki kandungan hemiselulosa, selulosa dan lignin jika dipanaskan dengan suhu tinggi akan menghasilkan karbon aktif yang baik [6]. Oleh karena itu, daun jeruk purut mengandung hemiselulosa 28,40%, selulosa 25,60%, dan lignin 9,40%. Daun jeruk purut juga memiliki kadar air sebesar 57,1% serta kadar abu berkisar 4,0%. Berdasarkan pada data tersebut, daun jeruk purut berpotensi untuk dijadikan sebagai bahan karbon aktif dalam pembuatan elektroda sel superkapasitor.

Pada penelitian sebelumnya, penggunaan bahan limbah biomassa seperti daun sebagai bahan elektroda karbon telah banyak dilakukan seperti Panicker, dkk (2021) [7] melakukan penelitian menggunakan limbah jeruk bali sebagai bahan karbon aktif untuk superkapasitor menggunakan aktivator KOH 1M dan di karbonisasi pada suhu 2400°C dengan nilai kapasitansi spesifik sebesar 47,33 F/g [7]. Adapun penelitian yang dilakukan E. taer, dkk (2023) [8] yang menggunakan limbah daun jeruk nipis sebagai bahan karbon aktif untuk sel superkapasitor menggunakan aktivator $ZnCl_2$ dan di karbonisasi pada suhu 600°C. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini adalah 144,14 F/g dengan kandungan karbon sebesar 90,25% [3]. Penelitian yang berkaitan juga dilakukan oleh Devendran, dkk (2020) [9] yang menggunakan limbah jeruk manis sebagai bahan karbon aktif dengan aktivasi kimia H_2SO_4 dan di karbonisasi pada suhu 600°C dengan nilai kapasitansi spesifik terbaik 92 F/g.

Berdasarkan beberapa referensi tersebut, biomassa karbon aktif yang berbahan dasar daun dapat digunakan sebagai elektroda sel superkapasitor. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada pemanfaatan biomassa daun jeruk purut

sebagai bahan dasar karbon aktif untuk pembuatan elektroda sel superkapasitor dengan aktivasi kimia KOH dengan konsentrasi 0,3M dan akan di karbonisasi CO_2 dengan variasi suhu 650°C, 700°C dan 750°C dan diaktivasi fisika pada suhu 800°C dengan gas N_2 . Sampel dianalisis menggunakan analisis massa jenis, *X-Ray Diffraction* (XRD), *Fourier Transform Infrared* (FTIR) serta *Cyclic Voltammetry* (CV).

METODE

Bahan

Penelitian ini menggunakan aktivator Potassium Hydroxide (KOH), Hydrochloric Acid (HCL), Larutan H_2SO_4 , membran telur bebek dan akuades, daun jeruk purut kering yang diambil di Polewali Mandar, Sulawesi Barat.

Preparasi karbon aktif

Gambar 1 menampilkan proses preparasi sampel karbon aktif daun jeruk purut. Daun jeruk purut yang sudah kering dikumpulkan. Selanjutnya, daun-daun yang sudah ditimbang dengan massa yang sudah ditentukan tersebut dibersihkan dengan akuades secara bertahap pada proses pra-karbonisasi pada suhu 130°C selama 1 jam. Kemudian sampel dihaluskan menggunakan *ball milling* dan diayak menggunakan ayakan 200 dan 400 mesh. Setelah sampel menjadi bubuk, selanjutnya akan diaktivasi kimia menggunakan aktivator KOH dengan konsentrasi 0.3M dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* pada temperatur 80°C selama 1 jam dengan kecepatan 400 rpm. Selanjutnya, bubuk daun jeruk purut sebanyak 30 gram dicampurkan ke dalam larutan KOH, pengadukan dilanjutkan dengan suhu yang tetap selama 2 jam dengan kecepatan 800 rpm. Selanjutnya sampel yang telah diaktivasi dipelet menggunakan *hidrolis press* dengan massa 0.75 gr dan ditekanan sebesar 80.64016 kPa atau setara dengan massa 8 Ton dengan lama waktu

pencetakan 5 menit. Sampel yang telah dipelet diukur diameter, tebal, dan massanya. Pelet akan dikarbonisasi dan aktivasi fisika (Pirolisis). Proses karbonisasi dilakukan pada suhu 650°C, 700°C, dan 750°C dalam gas N₂ selama 1 jam. Kemudian proses aktivasi fisika menggunakan gas CO₂ pada temperatur 800°C selama 1 jam.

Pembuatan separator superkapasitor

Tahap awal Kulit telur dibersihkan terlebih dahulu dari kotoran yang menempel dengan menggunakan akuades. Selanjutnya memisahkan membran yang melekat dari kulit telur. Kulit telur kemudian direndam di dalam 1M HCl, dengan tujuan melarutkan CaCO₃ pada kulit telur. Kemudian, membran tersebut dicuci dengan akuades hingga pH membran menjadi netral. Selanjutnya, membran telur direndam dalam 1M H₂SO₄ selama 2 x 24 jam dan separator siap digunakan.

Pembuatan sel superkapasitor

Stainless steel yang telah dibentuk sesuai dengan diameter elektroda kemudian dibersihkan dengan akuades lalu didiamkan hingga bersih dan diletakkan di atas cincin teflon. Elektroda karbon dicelupkan ke dalam H₂SO₄ 1M dan dibiarkan selama 2 x

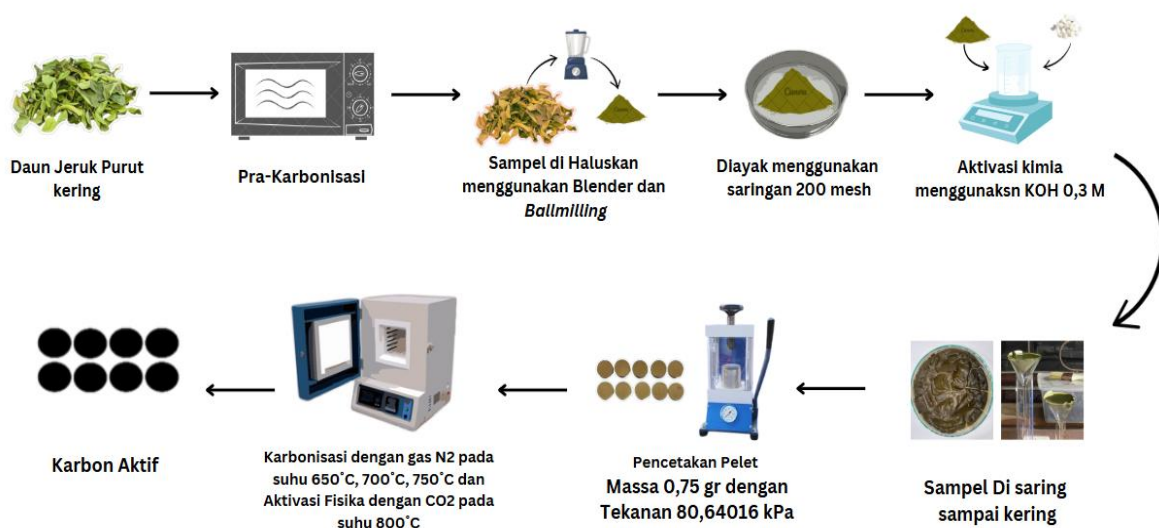
24 jam. Elektroda karbon diangkat menggunakan spatula lalu ditempatkan di atas *stainless steel* dengan hati-hati dan menempelkan separator di atas elektroda karbon.

Karakterisasi Sampel

Sampel dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk melihat struktur kristal yang terbentuk dari karbon aktif. Pengukuran densitas dilakukan dengan mengukur diameter dan tebal elektroda karbon. *Fourier Transform Infrared* (FTIR) untuk mengetahui gugus fungsi yang terbentuk pada karbon aktif. *Physics Cyclic Voltammetry* (CV) UR Rad-Er 5841 digunakan untuk mengetahui performa yang dihasilkan dari elektroda sel superkapasitor. Setiap suhu karbonisasi nilai C_{sp} mengalami kenaikan pada setiap kenaikan suhu (Suryadi et al., 2022). Nilai kapasitansi spesifik masing-masing elektroda sel superkapasitor dihitung dengan persamaan (1).

$$C_{sp} = \frac{I_c - I_d}{S \cdot m} \quad (1)$$

Dimana I_c adalah arus *charge* (A/cm²), I_d adalah arus *discharge* (A), S adalah laju *scan* (V/s) dan m adalah massa elektroda (gr) [4].



Gambar 1. Preparasi sampel karbon aktif daun jeruk purut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis densitas

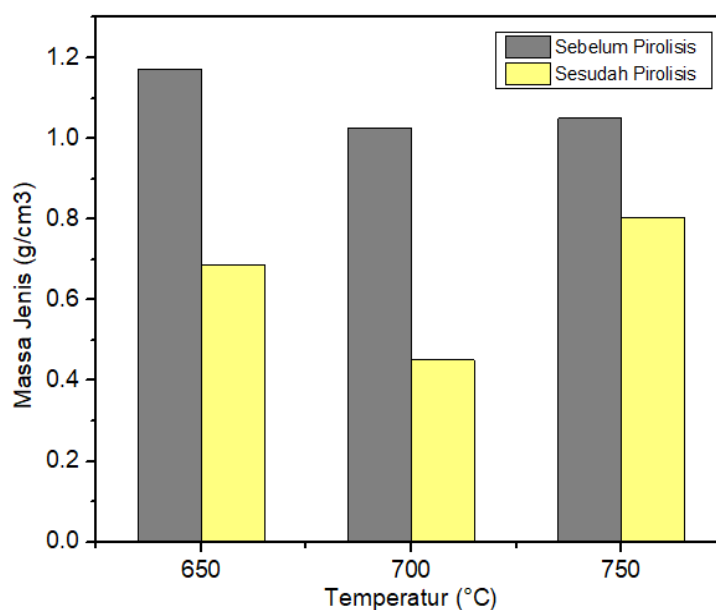
Analisis massa jenis elektroda digunakan untuk mengetahui sifat fisis dari karbon aktif sel superkapasitor. Nilai massa jenis yang rendah dapat menghasilkan porositas yang cukup tinggi, sehingga jumlah muatan yang terdapat pada karbon aktif dapat disimpan lebih banyak. Sebaliknya, semakin besar nilai massa jenis maka jumlah pori pada elektroda jauh lebih sedikit sehingga kemampuan untuk menyimpan muatannya akan semakin kecil [8]. Tabel 1 menjelaskan mengenai perbandingan nilai massa jenis sebelum dan setelah pirolisis, dimana nilai massa jenis yang di dapatkan pada masing-masing suhu 650°C, 700°C dan 750°C.

Gambar 2 menunjukkan nilai massa jenis pada masing-masing elektroda sel superkapasitor sebelum dan setelah pirolisis dengan suhu yang bervariasi yaitu, suhu

650°C, 700°C dan 750°C. Sebelum pirolisis, nilai massa jenis adalah 1,17 g/cm³, 1,03 g/cm³ dan 1,05 g/cm³, sementara nilai massa jenis setelah pirolisis yaitu 0,69 g/cm³, 0,45 g/cm³ dan 0,80 g/cm³. Penurunan massa jenis tertinggi yang terjadi pada elektroda sel superkapasitor terjadi pada suhu 700°C dengan persentase penyusutannya sebesar 57,4% sedangkan massa jenis dengan penyusutan terendah terjadi pada suhu 750°C dengan presentase penyusutannya 24,7%. Karbon dengan nilai massa jenis yang kecil memungkinkan terbentuknya pori-pori yang cukup banyak, dikarenakan pada saat proses karbonisasi, karbon akan membentuk banyak pori-pori yang menghasilkan nilai kapasitansi yang tinggi [4]. Berdasarkan nilai massa jenis yang diperoleh dari pelet karbon, elektroda yang kemungkinan memiliki nilai kapasitansi spesifik yang tinggi terdapat pada sampel dengan variasi suhu 700°.

Tabel 1. Perbandingan nilai massa jenis sebelum dan setelah pirolisis.

Temperatur (°C)	Massa Jenis (g/cm ³)	
	Sebelum pirolisis	Setelah pirolisis
650	1,17	0,69
700	1,03	0,45
750	1,05	0,80



Gambar 2. Perbandingan massa jenis sebelum dan sesudah pirolisis.

Analisis FTIR

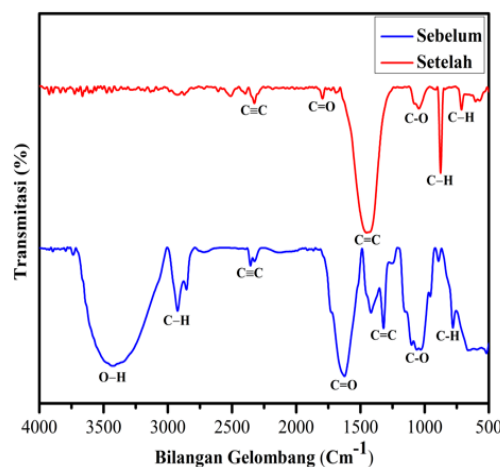
Analisis gugus fungsi dilakukan dengan menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dengan panjang gelombang 350-4000 cm^{-1} . Sampel yang dianalisis merupakan sampel yang telah diaktivasi kimia dan elektroda karbon yang setelah pirolisis. Berdasarkan spektrum *Fourier Transform Infrared* FTIR, gugus fungsi yang teridentifikasi dapat dilihat pada Gambar 3.

Gambar 3 menunjukkan bahwa grafik sebelum pirolisis terdapat berbagai fungsi organik yang menandakan adanya komponen selulosa, lignin, dan hemiselulosa pada daun jeruk purut. Puncak kuat terdapat pada 3431 cm^{-1} dihubungkan dengan vibrasi *stretching* O-H, yang menyatakan adanya gugus fungsi hidroksil dari senyawa fenolik atau air teradsorpsi. Puncak disekitar 2926 cm^{-1} menunjukkan vibrasi C-H alifatik yang merupakan karakteristik rantai panjang karbon. Selain itu, serapan pada 1629 cm^{-1} adanya gugus fungsi C=O yaitu karbonil yang lazim ditemukan dalam senyawa karbonil dan lignin. Pada area 1319 cm^{-1} dan 1024 cm^{-1} menunjukkan keberadaan ikatan C-O yang umum pada gugus eter atau alkohol. Grafik setelah pirolisis menunjukkan perubahan yang signifikan berkurangnya intensitas puncak menunjukkan degradasi gugus hidroksil dan C-H alifatik akibat pemanasan yang cukup

tinggi, hal tersebut mengarah pada pembentukan karbon yang terkarbonisasi. Terdapat beberapa puncak baru pada grafik setelah pirolisis yaitu 1453 cm^{-1} dan 1045 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus fungsi C=C dan gugus fungsi C-O yang menandakan terbentuknya struktur karbon berpori. Puncak di sekitar 711 cm^{-1} dan 874 cm^{-1} menunjukkan vibrasi C-H aromatic yang merupakan indikasi dari struktur grafitik dan aromatisasi. Perubahan ini mengonfirmasi peningkatan derajat karbonisasi, yang sesuai dalam meningkatkan sifat konduktivitas dan kapasitansi material elektroda sel superkapasitor [10]. Kelimpahan ikatan C pada gugus fungsi memperlihatkan kandungan karbon yang lebih tinggi dibandingkan dengan unsur lain, seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Analisis XRD

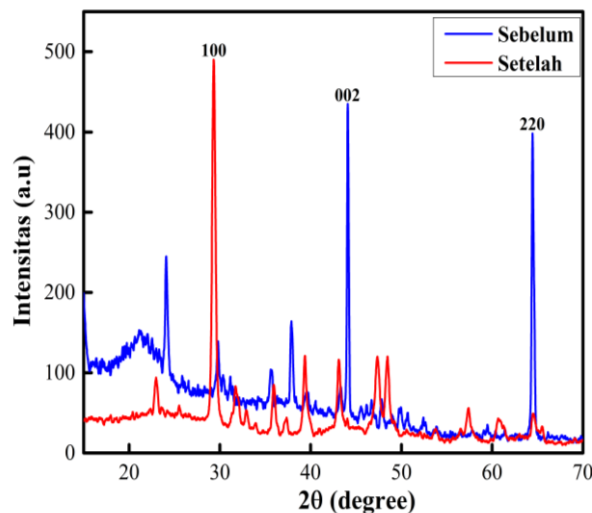
Analisis *X-Ray Diffraction* (XRD) bertujuan untuk mengetahui struktur yang terbentuk pada elektroda sel superkapasitor dari daun jeruk purut. Gambar 4 menunjukkan kurva hubungan intensitas sinar-X terhadap sudut hamburan (2θ). Analisis *X'pert HighScore Plus* digunakan untuk mengetahui fasa karbon yang terbentuk dengan cara mencocokkan database *Internasional Center for Diffraction Data* (ICDD).



Gambar 3. Spektrum FTIR daun jeruk purut sebelum dan setelah pirolisis

Tabel 2. Gugus fungsi karbon daun jeruk purut.

Gugus Fungsi	Bilangan Gelombang(cm^{-1})			Nomor Referensi
	Rentang Serapan	Sebelum Pirolisis	Sesudah Pirolisis	
C–H	700-900	779	711,874	[11]
C–O	1000-1350	1024,1319	1045	[12]
C=C	1450-1600	-	1453	[13]
C=O	1650-1800	1629	1793	[12]
C $\equiv$ C	2100-2260	2357	2324	
C–H	2850-3000	2926	-	[11]
O–H	3200-3600	3431	-	[13]



Gambar 4. Spektrum XRD sampel daun jeruk purut sebelum dan setelah pirolisis.

Gambar 4 menunjukkan sampel sebelum pirolisis dan sesudah pirolisis, yang mana kurva tidak beraturan menyebabkan pembentukan pori yang bervariasi [14]. Pola sinar-X pada kurva menunjukkan bahwa karakteristik sel superkapasitor berbahan dasar daun jeruk purut sebelum dan setelah pirolisis. Penurunan tersebut mengindikasikan adanya perubahan struktur kristalin menjadi lebih amorf yang baik sehingga dapat meningkatkan kinerja elektroda superkapasitor, ditandai dengan puncak yang lebar $15,25^{\circ}$ - $27,2^{\circ}$ serta spektrum yang dihasilkan tampak tidak beraturan. Spektrum sinar-X sebelum pirolisis menunjukkan adanya dua puncak

difraksi terlihat pada grafik $44,09^{\circ}$ pada bidang (002) dan pada puncak $64,44^{\circ}$ bidang (220) memiliki ICDD 00-049-1623. Sedangkan setelah pirolisis, intensitas memiliki beberapa puncak difraksi, tetapi hanya terdapat satu puncak yang maksimal yaitu pada puncak $29,29^{\circ}$ pada bidang (100) memiliki ICDD 01-075-1529 [15]. Beberapa puncak yang tajam dikarenakan kehadiran CaCO_3 sesudah pirolisis serta keberadaan senyawa ini diekstrak dari unsur biomassa daun jeruk purut.

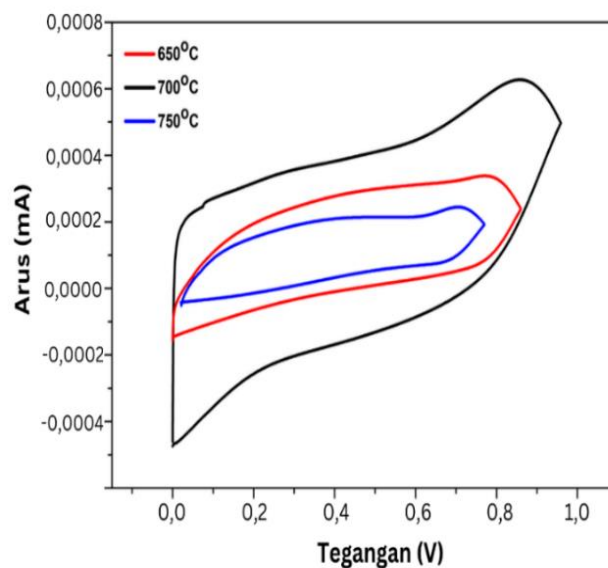
Analisis Cyclic Voltammetry

Analisis *cyclic voltammetry* (CV) bertujuan untuk menentukan nilai kapasitansi spesifik

(Csp) pada sel elektroda karbon superkapasitor dan untuk mengetahui sifat dari elektroda sel superkapasitor. Laju pemindaian yang digunakan untuk pengukuran sifat elektrokimia pada elektroda karbon sel superkapasitor juga dapat mempengaruhi besar atau kecilnya nilai Csp yang dihasilkan elektroda. Gambar 5 menunjukkan kurva *Cyclic Voltametry* (CV) pada variasi suhu 650°C, 700°C dan 750°C. Gambar 5 menunjukkan kurva *Cyclic Voltametry* (CV) berupa hubungan antara arus dan tegangan dengan laju scan 1 mV/s pada sampel dengan variasi suhu 650°C, 700°C dan 750°C.

Gambar 5 memperlihatkan kurva dengan garis berwarna hitam yaitu sampel dengan suhu 700°C memiliki luas kurva terbesar dengan nilai kapasitansi spesifik sebesar 107,75 F/g dan kurva dengan garis berwarna biru yaitu sampel dengan suhu

750°C memiliki luas kurva terkecil dengan nilai kapasitansi spesifik sebesar 74,75 F/g. Sedangkan kurva dengan garis berwarna merah yaitu sampel dengan suhu 650°C yang memiliki nilai kapasitansi spesifik sebesar 71,50 F/g. Hal ini menunjukkan bahwa semakin lebar kurva yang dihasilkan berarti arus yang didapatkan juga semakin tinggi karena banyaknya muatan ion-ion elektrolit yang ada pada permukaan elektroda. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin luas kurva yang terbentuk, semakin tinggi arus yang dihasilkan, yang menunjukkan banyaknya muatan ion elektrolit di permukaan elektroda [16]. Tabel 3 menunjukkan nilai kapasitansi spesifik masing-masing suhu. Suhu 700°C merupakan suhu dengan nilai kapasitansi spesifik tertinggi yaitu 107,75 F/g, sedangkan nilai kapasitansi terendah terdapat pada suhu 650°C yaitu 71,50 F/g.



Gambar 5. Kurva cyclic voltammetry elektroda sel superkapasitor

Tabel 3. Nilai kapasitansi spesifik sel superkapasitor dari daun jeruk purut.

Temperatur (°C)	S (V/s)	m (gr)	I _c (A)	I _d (A)	C _{sp} (F/g)
650	0,001	0,004	0,002107	-0,000256	71,50
700	0,001	0,004	0,001635	-0,000237	107,75
750	0,001	0,004	-0,000238	-0,000238	74,75

KESIMPULAN

Berdasarkan data sifat fisis elektroda karbon sel superkapasitor daun jeruk purut, dapat disimpulkan bahwa variasi suhu karbonisasi menyebabkan perubahan terhadap nilai massa jenis, gugus-gugus fungsi yang terbentuk menunjukkan adanya ikatan C serta struktur menjadi lebih amorf. Hal tersebut mengindikasikan keberhasilan proses karbonisasi dalam pembuatan elektroda karbon sel superkapasitor. Sedangkan sifat elektrokimia dari karbon menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu karbonisasi maka proses difusi yang berlangsung semakin baik. Nilai kapasitansi spesifik elektroda karbon sel superkapasitor dari daun jeruk purut diperoleh sebesar 75,5 F/g, 107,75 F/g dan 74,75 F/g dengan variasi suhu masing-masing 650°C, 700°C dan 750°C. Hasil tersebut menunjukkan suhu terbaik dari daun jeruk purut yaitu suhu 700°C dengan nilai kapasitansi tertinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Farma R, Siagian WF, Tae E, Awitdrus. Preparation and Characterization Activated Carbon Based on Mesocarp of Bintaro Fruit as Electrode Materials Supercapacitor Cell Application. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1655:012157.
- [2] Suryadi HR, Amir I, Ruslan R, Afrianah N, Irsyad A, Jasruddin J, Haris A. The influence of activator types on the capacitance value of carbon electrodes from coconut shell. *Journal of Aceh Physics Society*. 2022;11(2):52–58.
- [3] Taer E, Riyani BM, Taslim R. Sintesis Karbon Berpori Berbasis Daun Jeruk Nipis (*Citrus Aurentifolia* S.) Sebagai Material Elektroda Untuk Aplikasi Supercapacitor. *Komunikasi Fisika Indonesia*. 2023;20(1):9-18.
- [4] Novitra R, Aziz H, Taer E. Supercapacitors based on active carbon from spent arabica coffee ground using NaOH activators. *Journal of Aceh Physics Society*. 2022;11(1):33–40.
- [5] Widiyastutik SI, Haslina, Putri AS. Ukuran Partikel Daun Jeruk Purut (*Citrus hystrix* DC) Terhadap Rendemen Oleoresin, Total Fenolik, Indeks Bias Dan Sitronelal (Powder). *Angewandte Chemie International Edition*. 2018;6(11):951–952.
- [6] Taer E, Apriwandi A, Nursyafni N, Taslim R. Avertroa bilimbi leaves-derived oxygen doped 3D-linked hierarchical porous carbon as high-quality electrode material for symmetric supercapacitor. *Journal of Energy Storage*. 2022;52(PB):104911.
- [7] Panicker NJ, Sahu PP. Green reduction of graphene oxide using phytochemicals extracted from Pomelo Grandis and Tamarindus indica and its supercapacitor applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2021;32(11):5265–15278.
- [8] Taer E, Sukmawati, Apriwandi A, Taslim R. 3D meso-macroporous carbon derived spruce leaf biomass for excellent electrochemical symmetrical supercapacitor. *Materials Today: Proceedings*. 2023;87:32–40.
- [9] Devendran M, Kandasamy SK, Palanisamy S, Selvaraj S, Vetrivel R, Selvarajan R, Govindasamy M, Kandasamy K. Preparation of chemically modified porous carbon networks derived from citrus sinensis flavados as electrode material for supercapacitor. *International Journal of Electrochemical Science*. 2020;15(5):4379–4387.
- [10] Perdani FP, Riyanto CA, Martono Y. Karakterisasi Karbon Aktif Kulit Singkong (*Manihot esculenta* Crantz) Berdasarkan Variasi Konsentrasi H₃PO₄ dan Lama Waktu Aktivasi. *IJCA Indonesian Journal of Chemical Analysis*. 2021;4(2):72–81.
- [11] Johnson JB, Walsh KB, Naiker M, Ameer K. The Use of Infrared Spectroscopy for the Quantification of Bioactive Compounds in Food: A Review. *Molecules*. 2023;28(7):3215.
- [12] Al-Kelani M, Buthelezi N.

- Advancements in medical research: Exploring Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy for tissue, cell, and hair sample analysis. *Skin Research and Technology*. 2024;30(6):1–13.
- [13] Song Z, Duan H, Li L, Zhu D, Cao T, Lv Y, Xiong W, Wang Z, Liu M, Gan L. High-energy flexible solid-state supercapacitors based on O, N, S-tridoped carbon electrodes and a 3.5 V gel-type electrolyte. *Chemical Engineering Journal*. 2019;372(January):1216–1225.
- [14] Taer E, Yusra AD, Amri A, Awitdrus, Taslim R, Apriwandi, Agustino, Putri A. The synthesis of activated carbon made from banana stem fibers as the supercapacitor electrodes. *Materials Today: Proceedings*. 2020;44:3346–3349.
- [15] Obodo RM, Nsude HE, Ezike SC, Ononogbo C, Ahmad I, Maaza M, Ezema FI. Exploring dual synergistic effects of CeO₂@ZnO mediated sarcophrynium brachystachys leaf extract nanoparticles for supercapacitor electrodes applications. *Hybrid Advances*. 2024;5(January):100143.
- [16] Taer E, Apriwandi A, Taslim R, Agustino A, Yusra DA. Conversion Syzygium oleana leaves biomass waste to porous activated carbon nanosheet for boosting supercapacitor performances. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(6):13332–13340.