

***Biochar* sebagai Material Alam Penyimpan Energi Masa Depan**

Sri Kadarwati, Lutfia Damayanti, Rida Farida

Program Studi Kimia FMIPA Universitas Negeri Semarang
srika@mail.unnes.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.15294/ka.v5i1.597>

P-ISSN 2961-7448

Abstrak

Perangkat penyimpanan energi memiliki peranan vital dalam eksplorasi sumberdaya baru terbarukan akibat peningkatan kebutuhan energi setiap tahunnya. Penggunaan bahan karbon berbasis biomassa dalam perangkat penyimpanan energi khususnya superkapasitor sangat menarik untuk dikembangkan karena memiliki berbagai keuntungan dari segi ekonomi, sosial dan lingkungan. Superkapasitor banyak dilirik sebagai alternatif perangkat penyimpanan energi yang ramah lingkungan dan aman digunakan dibandingkan dengan perangkat penyimpanan yang sudah ada. Penggunaan *biochar* sebagai *starting material* elektroda superkapasitor memiliki potensi yang sangat menjanjikan sebagai perangkat penyimpanan energi masa depan. Dalam bab ini, potensi *biochar* yang disintesis dari pirolisis biomassa eceng gondok sebagai material elektroda superkapasitor diulas secara rinci. Selain itu, bagaimana karakteristik *biochar* mempengaruhi sifat dan kinerja elektroda superkapasitor yang dihasilkan juga akan diulas untuk memberikan pertimbangan-pertimbangan dalam pengembangan material superkapasitor berbasis *biochar*.

Kata kunci: superkapasitor, *biochar*, *starting material*, energi

PENDAHULUAN

Perangkat penyimpanan energi memiliki peran penting dalam upaya eksplorasi sumber energi baru terbarukan. Teknologi penyimpanan energi sangat penting dan menarik untuk dieksplorasi karena kemampuannya dalam menyimpan produksi energi berlebih untuk digunakan di masa mendatang. Selain itu, menyimpan energi berarti meningkatkan efisiensi dan menstabilkan sistem jaringan dan turut mengurangi emisi karbon dioksida (Revankar, 2019). Teknologi penyimpanan energi juga memungkinkan digunakannya energi yang tidak terbatas ruang dan waktu, dengan kebutuhan terus meningkat (diperkirakan akan naik menjadi tiga kali lipat pada tahun 2030) (Al Shaqsi et al., 2020).

Superkapasitor merupakan salah satu perangkat penyimpanan energi yang memiliki berbagai keunggulan (Winter & Brodd, 2004). Superkapasitor memiliki potensi besar sebagai perangkat penyimpanan energi yang dapat melengkapi atau bahkan menggantikan baterai di beberapa aplikasi (Shao et al., 2018). Beberapa kelebihan ditawarkan superkapasitor dibandingkan dengan perangkat penyimpanan energi lain seperti *power density* 1.000 kali lebih besar dibandingkan dengan baterai (Natalia & Taer, 2019), proses *charge-discharge* yang cepat (*fast charging*), tidak cepat panas (Sari et al., 2017), dan siklus hidup yang lebih lama (>100.000 siklus) (Shao et al., 2018). Selain itu, superkapasitor membutuhkan lebih sedikit perawatan, tidak memiliki efek memori, serta mudah dan aman dioperasikan (Raghavendra et al., 2020). Kunci kinerja superkapasitor yang optimal terdapat pada kinetika transpor ionik dan elektron yang efisien (Maier, 2005). Oleh karena itu, elektroda menjadi bagian yang penting bagi superkapasitor

karena berperan memfasilitasi transpor elektron dan absorpsi ion (Sari et al., 2017).

Penggunaan bahan karbon berbasis biomassa dalam perangkat penyimpanan energi khususnya superkapasitor telah menarik perhatian sangat menarik untuk dikembangkan karena memiliki berbagai keuntungan dari segi ekonomi, sosial dan lingkungan (Tetra, 2018). Desain dan pengembangan bahan karbon sebagai elektroda menjadi kunci yang mempengaruhi kinerja superkapasitor (Garnica et al., 2021). Elektroda karbon harus memenuhi beberapa kualifikasi untuk memiliki kinerja maksimal pada superkapasitor, seperti luas permukaan yang tinggi (Yang et al., 2019), porositas yang dapat di kontrol (Jia et al., 2020), konduktivitas tinggi (Pandolfo & Hollenkamp, 2006), dan stabilitas elektrokimia tinggi (Awasthi et al., 2019).

Perangkat elektroda superkapasitor saat ini hampir 80% diproduksi dari karbon yang teraktivasi karena menawarkan keunggulan berupa struktur pori yang dapat dikendalikan serta memiliki stabilitas kimia dan konduktivitas listrik yang tinggi (Liu et al., 2018). Berbagai macam biomassa telah diteliti penggunaannya sebagai elektroda superkapasitor seperti tongkol jagung (Wang et al., 2015), sekam padi (Wu et al., 2015), tempurung kelapa (Mi et al., 2012), kulit kacang (Purkait et al., 2017), ampas tebu (Rufford et al., 2010), kulit pisang (Lv et al., 2012), kulit semangka (Lin et al., 2019), kulit kenari (Xu et al., 2017), dan kulit bawang (Wang et al., 2016). Untuk memperoleh kapasitansi yang lebih optimal, pengontrolan pori perlu dilakukan pada material elektroda superkapasitor (Qie et al., 2013; Sun et al., 2014). Selain itu, *doping* heteroatom, seperti N, O, P, S dan B dapat menjadi alternatif modifikasi untuk meningkatkan densitas energi dan konduktivitas (Helen, 2019) serta kapasitansi sistem melalui reaksi Faradaik

permukaan yang dapat mengubah karakteristik akseptor-donor pada sistem (Ashritha & Hareesh, 2020). Selain itu, produksi dan karakteristik *biochar* melalui proses pirolisis biomassa serta modifikasi dan aplikasinya sebagai bahan baku pembuatan elektroda superkapasitor yang akan diulas dalam bab ini akan memberikan sudut pandang baru tentang potensi *biochar* pada bidang pengembangan sumber energi dan material penyimpan energi yang bersifat baru dan terbarukan.

PEMBAHASAN

BIOCHAR: SINTESIS DAN KARAKTERISTIKNYA

Biochar merupakan material padatan berkarbon dan berpori dengan derajat aromatisasi dan stabilitas yang tinggi (Rangabhashiyam & Balasubramanian 2019). *Biochar* dihasilkan dari proses dekomposisi termal biomassa pada suhu tinggi (300–900 °C) dengan sedikit atau tanpa oksigen seperti pirolisis, gasifikasi, torefaksi, dan karbonisasi hidrotermal (Nidheesh et al., 2021). *Biochar* merupakan produk padat yang dihasilkan dari proses pirolisis biomassa, selain produk cair (*bio-oil*) dan gas (*gaseous product*). Kondisi pirolisis dan jenis biomassa yang digunakan mempengaruhi *yield* dan karakteristik (fisika, kimia dan mekanik) *biochar* yang dihasilkan (Anand et al., 2023). Sebagai contoh, *biochar* yang berasal dari residu kayu-kayuan akan memiliki sifat mirip dengan batubara bitumen, sedangkan *biochar* yang berasal dari sekam padi akan memiliki sifat mirip dengan lignit.

Biomassa yang digunakan sebagai bahan pembuatan *biochar* dapat berupa biomassa lignoselulosa (seperti limbah pertanian, limbah kehutanan dan biomassa herba) dan nonlignoselulosa (seperti: pupuk kandang, lumpur limbah dan mikroalga) (Rashidi & Yusup, 2016). Berbagai teknik

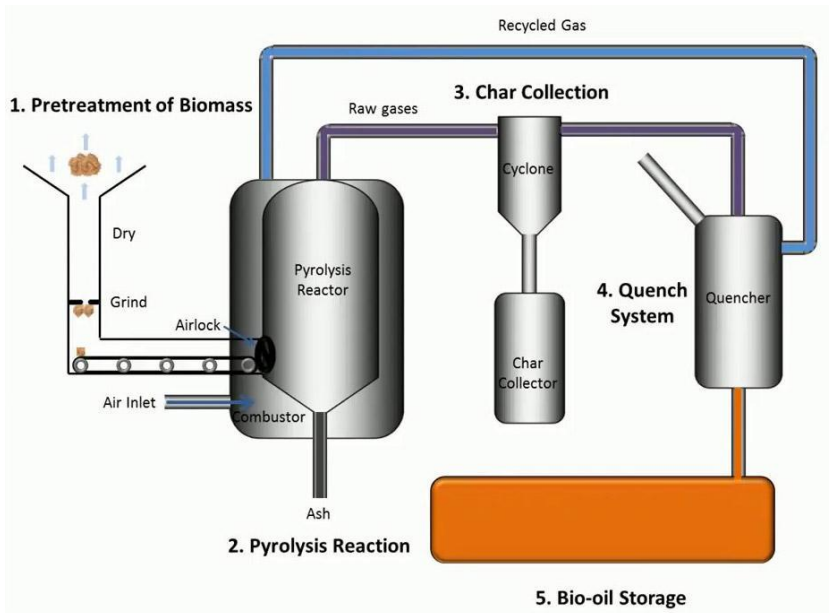
dapat digunakan untuk mengkonversi biomassa menjadi *biochar*, diantaranya metode pirolisis, torefaksi, karbonisasi hidrotermal dan gasifikasi (Bartoli et al., 2020). *Biochar* yang terbentuk mengalami degradasi termal akibat tidak adanya oksigen pada tahap konversinya. Selama konversi ini, produk gas seperti CO₂, CO, H₂, CH₄ dan uap air dapat dihasilkan (Amalina et al., 2022).

Tabel 1. Kondisi proses pirolisis dan distribusi produknya (Luque et al., 2012; Uddin et al., 2018)

Kondisi		Pirolisis lambat	Pirolisis cepat	Pirolisis kilat
Temperatur (°C)		300-700	550-1000	800-1100
Laju pemanasan (°C/s)		0,1-1	10-200	>1000
Waktu tinggal uap (s)		450-550	0,5-10	<0,5
Ukuran partikel (mm)		5-50	<1	<0,2
Yield (wt. %)	Biochar	35	20	12
	Bio-oil	30	50	75
	Syngas	35	30	13

Pirolisis merupakan proses konversi termal yang dilakukan tanpa melibatkan gas O₂ menghasilkan produk berupa padatan *biochar*, cairan terkondensasi (*bio-oil*), dan cairan yang tidak dapat terkondensasi (*syngas*) (Rashidi & Yusup, 2016) dengan persentase hasil berbeda tergantung tipe pirolisis yang digunakan (Tabel 1). Proses pirolisis secara umum diilustrasikan oleh Gambar 1 (Amalina et al., 2022).

Komponen-komponen berikut mengalami pirolisis pada suhu yang berbeda; (i) selulosa terurai antara 305-375°C; (ii) hemiselulosa terdekomposisi antara 200-350°C; dan (iii) lignin terurai antara 250-500°C (Hassan et al., 2020; Wei et al., 2021; Yaashikaa et al., 2019). *Biochar* dapat diperoleh sebagai produk utama maupun produk samping proses pirolisis, bergantung pada mode pirolisis yang digunakan. Pada pirolisis lambat, *biochar* merupakan produk utama, sedangkan pada pirolisis cepat, *biochar* merupakan produk samping dengan produk utama bio-oil. Selain *yield biochar*, mode pirolisis juga berpengaruh pada sifat pori dan fisikokimia *biochar*. Pirolisis cepat mampu menghasilkan *biochar* dengan struktur pori yang lebih berkembang serta dapat memfasilitasi pembentukan mikrokristalin dengan struktur kristal yang lebih unggul dibandingkan dengan pirolisis lambat.



Gambar 1. Skematik proses pirolisis biomassa (Ruwan, 2022)

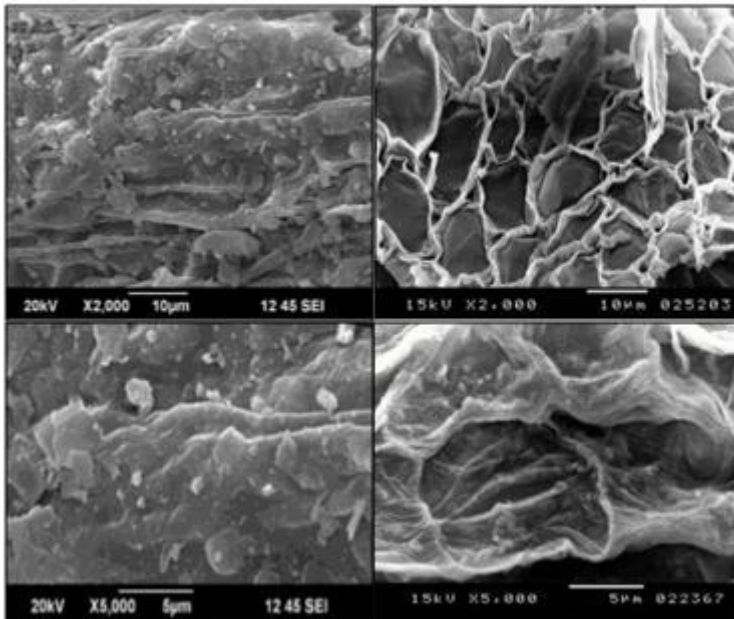
Torefaksi atau dikenal juga sebagai pirolisis ringan merupakan proses termokimia pada suhu 200-300 °C dengan laju pemanasan ≤ 50 °C/menit, dengan waktu tinggal 30 menit hingga 2 jam pada tekanan atmosfer dan atmosfer *inert* (Chen et al., 2018). Teknik ini dapat menghasilkan produk *biochar* yang tinggi (70-80%) namun kurang diminati karena produk yang dihasilkan masih mengandung sebagian besar komponen volatil dari bahan baku biomassa yang digunakan (Bamdad et al., 2018). Oleh karena itu, proses ini hanya diterapkan sebagai proses *pre-treatment* untuk menghilangkan kadar air, pemadatan biomassa, dan untuk meningkatkan sifat biomassa.

Karbonisasi hidrotermal disebut juga sebagai pirolisis basah karena dilakukan pada atmosfer basah, berbeda dengan pirolisis dan torefaksi yang dilakukan dalam atmosfer kering. Proses karbonisasi hidrotermal dilakukan dalam larutan biomassa-air pada suhu 180-250 °C pada tekanan tinggi (kondisi subkritis) selama beberapa jam (Rashidi & Yusup, 2016). Air di sini berperan sebagai pelarut, katalis, reaktan, serta sebagai media transfer massa dan energi (Krylova & Zaichenko, 2018) yang memfasilitasi hidrolisis, dekarboksilasi, dehidrasi dan depolimerisasi di dalamnya (Guiotoku et al., 2011). Air juga dinilai mampu mempercepat dekomposisi biomassa karena memiliki perilaku yang mirip dengan asam dan basa ringan pada suhu 200-280 °C (Krylova & Zaichenko, 2018).

Proses karbonisasi hidrotermal menghasilkan produk arang padatan yang disebut dengan *hydrochar* sebanyak 50-80%, campuran bio-oil dan air sebanyak 5-20% dan gas sintetis terutama CO₂ sebanyak 2-5%b/b (Saqib et al., 2019). Kondisi operasi pada atmosfer basah ini dinilai mampu menghasilkan *char* dengan jumlah gugus fungsi kimia yang

lebih banyak seperti gugus fungsi beroksigen dan memiliki kapasitas pertukaran kation yang tinggi (Wei et al., 2021). Namun, *char* yang dihasilkan dari proses ini memiliki luas permukaan yang lebih kecil, pori lebih sedikit dan stabilitas karbon yang lebih rendah dibandingkan dengan *biochar* (Amalina et al., 2022).

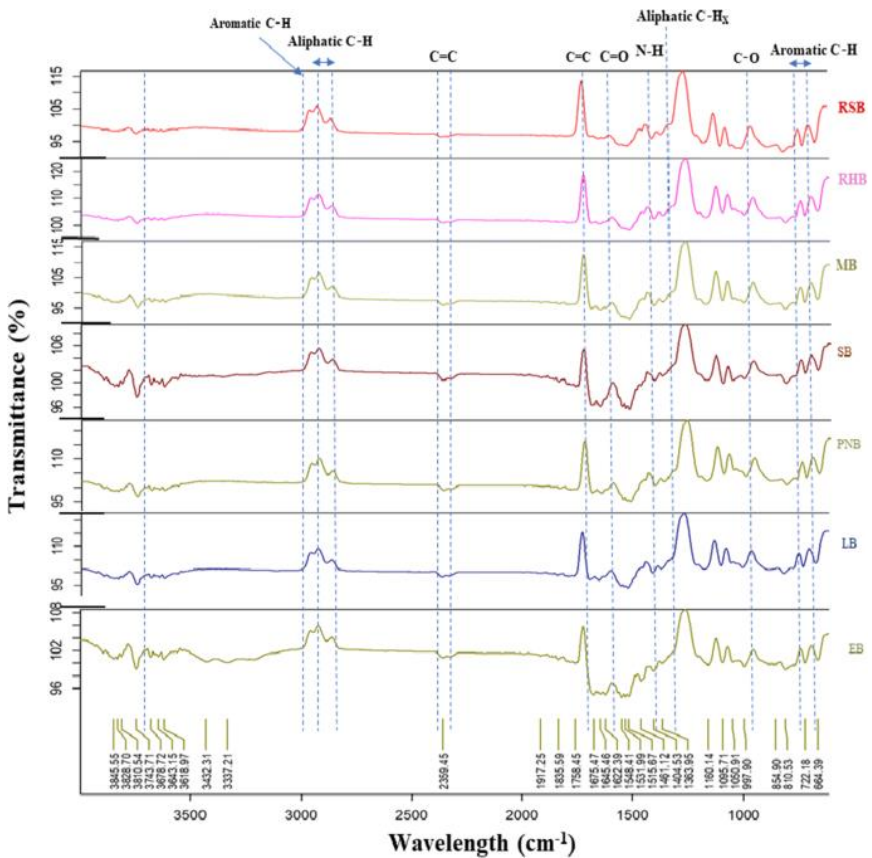
Teknik **Gasifikasi** dalam produksi *biochar* berbeda dengan pirolisis di mana proses ini melibatkan penggunaan O_2 (termasuk O_2 , udara, uap, CO_2 , atau campuran gas) sehingga lebih banyak menghasilkan *syngas* (yaitu CO , CO_2 , CH_4 , hidrogen) dibandingkan *biochar* (<10% berat) (Lee et al., 2019). Proses ini berlangsung pada temperatur 600-1200 °C, dengan laju pemansan 50-100 °C/menit dan waktu tinggal uap 10-20 detik (Rashidi & Yusup, 2016).



Gambar 2. Perbandingan morfologi permukaan (A) serbuk eceng gondok dan (B) *biochar* eceng gondok yang diamati

menggunakan *scanning electronic microscope* dengan perbesaran yang sama (El-Azeim et al., 2021)

Biochar menunjukkan karakteristik fisiko-kimia yang beraneka ragam, yang berdampak secara signifikan pada keanekaragaman penggunaannya (Amalina et al., 2022). Sifat fisiko-kimia *biochar* dari beberapa hasil penelitian dengan berbagai bahan baku dan konsisi pirolisis disajikan pada Tabel 2. *Biochar* juga dapat dikarakterisasi oleh beberapa sifat, seperti luas permukaan yang besar, gugus fungsi yang beraneka ragam dan porositas yang tinggi, kandungan karbon yang tinggi, dan tidak mudah terdegradasi. Gambar 2 menyajikan morfologi permukaan *biochar* yang terbuat dari biomassa eceng gondok yang dibandingkan dengan serbuk eceng gondok (biomassa sebelum proses pirolisis). Terlihat pada Gambar 2 bahwa *biochar* eceng gondok lebih *porous* jika dibandingkan dengan serbuk eceng gondok. Hal ini berarti *biochar* memiliki luas permukaan yang jauh lebih besar dibandingkan dengan biomassa eceng gondok dalam bentuk serbuk. Proses pirolisis dapat memicu terjadinya perubahan morfologi permukaan pada material padatan.



Gambar 3. Spektra FT-IR *biochar* yang diperoleh dari beberapa biomassa yaitu jerami padi (RSB), sekam padi (RHB), tebu (SCB), batang jagung (MSB), jarum pinus (PNB), lantana (LB), dan kayu putih (EB) (Chaturvedi et al., 2023)

Karakteristik *biochar* sangat dipengaruhi oleh jenis biomassa yang digunakan sebagai bahan baku. Gambar 3 menyajikan spektra FT-IR beberapa *biochar* yang diproduksi dari beberapa biomassa yaitu jerami padi, sekam padi, tebu, batang jagung, jarum pinus, lantana dan kayu putih (Chaturvedi et al., 2023). Vibrasi yang menonjol meliputi (a) amina primer yang diindikasikan oleh peregangan ikatan N-H pada bilangan gelombang 3400 dan $\sim 1462 \text{ cm}^{-1}$; (b)

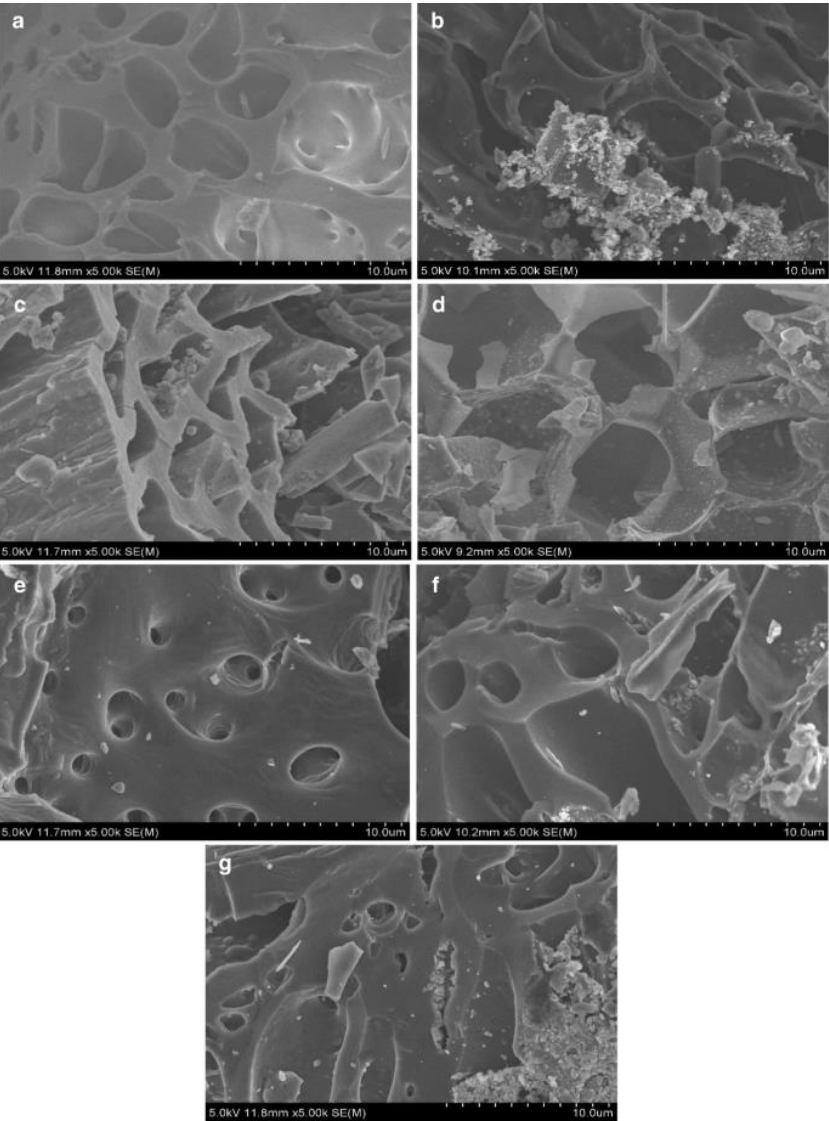
peregangan pada bilangan gelombang 3400–3500 cm^{-1} yang menunjukkan adanya kemungkinan tumpang tindih gugus O–H dengan gugus N–H; (c) peregangan C–H aromatic pada bilangan gelombang 815 cm^{-1} ; (d) peregangan C–O–C alifatik dan O–H pada bilangan gelombang 1160–1030 cm^{-1} ; (e) peregangan C=C aromatik dan C=O pada bilangan gelombang 1600 cm^{-1} ; (f) peregangan C=O karbonil/karboksil aromatik pada bilangan gelombang $\sim 1700 \text{ cm}^{-1}$; dan (g) peregangan gugus C–H metilen dan metil pada bilangan gelombang $\sim 2860 \text{ cm}^{-1}$, $\sim 1590 \text{ cm}^{-1}$, dan $\sim 2930 \text{ cm}^{-1}$ (Sun et al., 2011; Yap et al., 2017). Semua puncak-puncak tersebut ada dalam semua *biochar* yang berasal dari berbagai jenis biomassa. Keberadaan gugus-gugus karboksilat dan amina (Hairuddin et al., 2019; Yang et al., 2014) dan gugus fungsi bernitrogen (Liu et al., 2019) juga telah dilaporkan ada dalam *biochar*.

Morfologi *biochar* secara umum ditentukan oleh komposisi selulosa, hemiselulosa dan lignin dalam bahan baku biomasanya (Van Zwieten et al., 2010). *Biochar* yang diperoleh dari batang jagung, sekam padi, jerami padi, tebu dan jarum pinus (a–e) menunjukkan struktur mikropori dengan dengan bidang halus dan tubular (Gambar 4); berbeda dengan *biochar* yang berasal dari biomassa lantana dan kayu putih (Chaturvedi et al., 2023). Potensi penyimpanan dan retensi nutrisi, mikroorganisme tanah, dan cadangan air dalam *biochar* didukung oleh morfologi mikropori dan tubularnya.

MATERIAL PENYIMPAN ENERGI

Perangkat penyimpanan energi merupakan salah satu komponen yang krusial dalam eksplorasi sumber energi baru terbarukan. Pengembangan perangkat penyimpanan energi akan mendorong pengembangan teknologi penyimpanan

energi dengan performa yang tinggi dan efisien (Raghavendra et al, 2020).



Gambar 4. Mikrograf FE-SEM-EDS dari (a) sekam padi, (b) jerami padi, (c) batang jagung, (d) tebu, (e) jarum pinus, (f) lantana, dan (g) kayu putih yang menunjukkan morfologi

permukaan dan berat atom unsur-unsurnya (Chaturvedi et al., 2023)

Tabel 2. Sifat-sifat *biochar* yang dihasilkan dari berbagai proses dan jenis biomassa (Verma et al., 2012)

Penelitian	Sumber biomassa	Kandungan moisture (%)	C	H	N	O	Kadar abu (%)	Nilai kalor (MJ/kg)	Suhu pirolisis (°C)	Yield (%)
Boateng et al	Rumput <i>switchgrass</i>	3,78	60,71	3,99	0,75	8,7	25,85	19,37	500	12,9
Mullen et al	Jerami gandum	-	71,10	2,99	0,29	25,62	-	28,05	500	35-40
Abdullah & Wu	Kayu mallee	4,6	60,3	5,3	0,18	34,14	0,70	22	300	56
Acikgoz et al	Biji rami	-	61,63	2,57	4,08	31,73	-	24,12	550	15-20
Cao & Harris	Kotoran sapi	-	25,2	-	2,22	-	55	-	350	20-35
Mohan et al	Kayu ek kayu pinus pelepah ek pelepah pinus	3,17	82,	2,7	0,3	8,0	2,92	31,03	400 450	17-27
		2,69	83	0	1	5	2,3-	31,68		
		1,56	83,	2,9	0,2	8,2	11,09	25,75		
		2,31	47	9	7	5	15,75	25,25		
			71,25	2,63	0,46	12,99				

			68, 25	2,5 1	0,3 4	10, 80				
Mullen et al; Mullen et al.	Tongkol jagung batang jagung	- -	77, 60 57, 26	3,0 5 2,8 6	0,8 5 1,4 7	5,1 1 5,4 5	13,34 32,78	30,0 21,0	500	18,9 17,0
Mulligan et al	Jerami gandum Kayu mallee	4,6 4,6	73, 6 78, 7	2,3 4 2,4 8	2,5 8 1,1 8	8,0 8,7	13,3 8,9	28,1 29,9	500	32 36
Salehi et al	Serbuk gergaji campuran	-	83, 11	3,6 9	0,1 8	13, 02	-	30,77	500	20-27
Uzun et al	Residu minyak zaitun	- - - -	54, 98 56, 21 59, 01 61, 16	2,7 6 2,1 6 1,6 1 1,0 3	0,5 3 0,3 2 - - -	41, 73 41, 31 39, 38 37, 81	13,81 16,77 20,17 21,60	15,06 14,27 15,18 15,36	400 500 550 700	- - - -

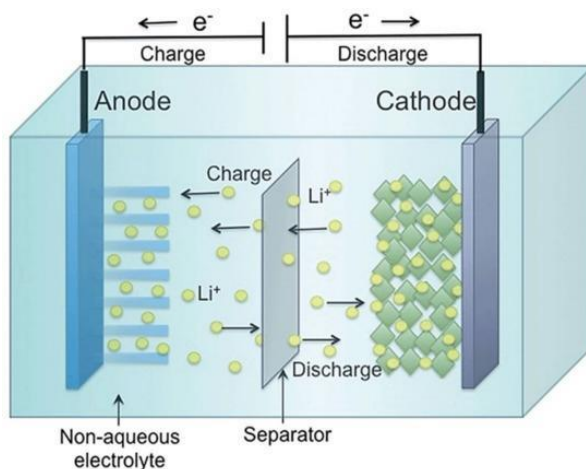
Yang et al	Limbah minyak sawit	-	76,81	1,46	2,32	11,47		-	600	28,57
------------	---------------------	---	-------	------	------	-------	--	---	-----	-------

Teknologi penyimpanan energi menjadi penting dan menarik untuk dieksplorasi karena urgensinya sebagai komponen yang menampung produksi energi yang melebihi permintaan untuk digunakan di masa mendatang (Al Shaqsi et al., 2020). Selain itu, penyimpanan energi dapat meningkatkan efisiensi dan menstabilkan sistem jaringan, mengurangi emisi karbon dioksida, meningkatkan keamanan dan nilai ekonomi energi itu sendiri (Revankar, 2019). Teknologi penyimpanan juga diperlukan untuk memenuhi kebutuhan bentuk portabel suatu energi untuk diaplikasikan pada banyak bidang seperti transportasi dan komunikasi. Kebutuhan akan perangkat penyimpanan energi diperkirakan akan naik menjadi tiga kali lipat pada tahun 2030 dibandingkan saat ini (Al Shaqsi et al., 2020).

Baterai dan superkapasitor merupakan dua dari berbagai perangkat penyimpanan energi yang dinilai paling unggul (Winter & Brodd, 2004), seperti halnya *lithium-ion battery* (LIB) yang banyak dipakai dalam peralatan elektronik di pasaran akibat *energy density*-nya yang tinggi (Shao et al., 2018). Namun, LIB membutuhkan biaya produksi yang tinggi, memiliki siklus hidup yang pendek (Choi et al., 2012), kerugian resistif dari transportasi elektron dan ion yang lamban, serta timbulnya efek panas dan pembentukan dendrit ketika dioperasikan pada daya tinggi yang dapat menyebabkan masalah keamanan yang serius (Shao et al., 2018). Kebakaran *laptop*, telepon seluler, kecelakaan kendaraan listrik yang fatal merupakan beberapa insiden akibat penggunaan LIB yang sering muncul dalam dekade terakhir (Hu & Xu, 2014).

Sel baterai ion litium terdiri atas katoda, anoda, pemisah dan elektrolit. Material anoda dan katoda masing-masing didepositkan pada pengumpul arus tembaga dan *aluminium foil*. Li adalah unsur paling elektropositif dalam

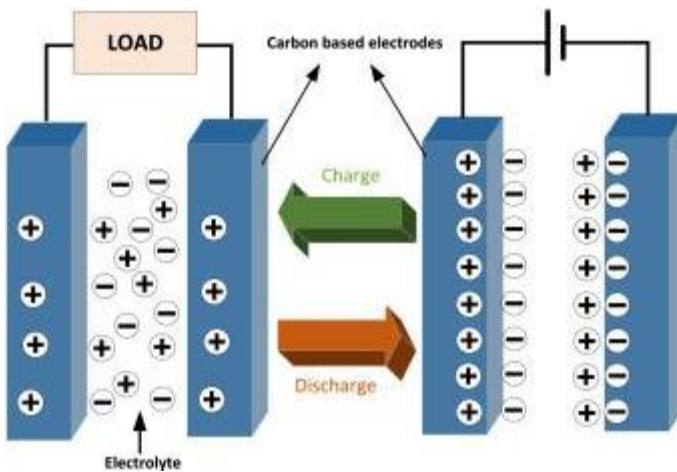
tabel periodik dan memiliki kapasitas spesifik yang tinggi, sekitar 3860 mAh g, sehingga unsur Li dianggap sebagai material anoda terbaik (Nagde & Dhoble, 2021). Elektrolit memungkinkan pergerakan ion-ion litium antara dua elektroda, sementara pemisah ditempatkan di antara anoda dan katoda sehingga dapat mencegah gangguan di kedua elektroda namun tetap memungkinkan terjadinya transfer ion. Selama penggunaan, ion litium bergerak dari anoda dan masuk ke dalam ruang kosong antara lapisan kristal katoda (interkalasi). Selama pengisian daya, ion-ion litium bergerak dari katoda pada kutub positif baterai dan masuk ke anoda. Komponen dan proses yang terjadi pada LIB diilustrasikan pada Gambar 5. Selama pengisian daya awal, ion-ion litium yang terinterkalasi langsung bereaksi dengan pelarut larutan elektrolit dan membentuk lapisan pasivasi pada anoda, yaitu antarfase padatan-elektrolit, yang bersifat *permeable* terhadap ion litium tapi tidak bagi larutan elektrolit (Tarascon & Armand 2001). Stabilitas antarfase padatan-elektrolit merupakan faktor yang menentukan keamanan dan masa hidup LIB.



Gambar 5. Prinsip dasar *lithium-ion battery* (LiB) yang menunjukkan interkalasi ion litium (bola-bola kuning) ke dalam matriks anoda dan katoda selama proses *charge-discharge* (Roy & Srivastava, 2015)

Evolusi industri global telah memacu permintaan perangkat penyimpanan energi elektrokimia yang efisien, praktis dan reliabel di tengah perkembangan teknologi baru yang cenderung konstan. Superkapasitor telah muncul sebagai solusi penyimpanan energi mutakhir, menawarkan kinerja luar biasa dan berkontribusi signifikan terhadap industri global. Superkapasitor siap untuk memimpin generasi berikutnya dari sistem konversi energi, melampaui perangkat penyimpanan energi konvensional seperti baterai, sel bahan bakar dan kapasitor karena kemampuan pengisian ulang yang cepat, kepadatan daya yang tinggi, umur yang lebih panjang, persyaratan perawatan yang minimal, kemasan yang dapat disesuaikan dan karakteristik yang ramah lingkungan.

Superkapasitor bekerja dengan menyimpan energi secara fisik melalui akumulasi ion dalam lapisan ganda elektrik di permukaan elektroda berpori, alih-alih melalui reaksi kimia seperti baterai. Ketika tegangan diberikan, ion dari elektrolit bermigrasi ke elektroda yang bermuatan berlawanan, membentuk lapisan muatan yang sangat tipis. Metode ini memungkinkan superkapasitor untuk mengisi dan mengosongkan muatan dengan sangat cepat dan memiliki siklus hidup yang jauh lebih lama daripada baterai, tetapi umumnya menyimpan lebih sedikit energi secara keseluruhan.



Gambar 6. Proses *charge-discharge* dalam superkapasitor (Gupta et al., 2021)

Superkapasitor merupakan perangkat penyimpanan energi berdurasi pendek sehingga cocok untuk aplikasi berdaya rendah. Superkapasitor dapat dianggap sebagai hibrida antara kapasitor dan baterai. Superkapasitor terdiri atas elektrolit di antara dua pelat elektroda. Selama proses pengisian (*charging*), energi listrik disimpan dalam bentuk energi potensial dalam medan listrik yang terbentuk antara ion dan elektron ketika potensial diterapkan melintasi elektroda. Proses pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*) ditunjukkan pada Gambar 6 (Gupta et al., 2021).

Pemilihan material elektroda aktif dalam superkapasitor sangat memengaruhi kinerja elektrokimia dan kapasitas penyimpanan energinya, sehingga pencarian material elektroda baru menjadi aspek krusial dalam pengembangan superkapasitor. Dalam konteks pemilihan material elektroda yang tepat untuk superkapasitor, pertimbangannya meliputi karakteristik penting seperti: morfologi permukaan, porositas, luas permukaan dan konduktivitas listrik (Hillier et al., 2020). Tiga kategori utama bahan elektroda yang umum digunakan dalam aplikasi

superkapasitor: oksida logam seperti oksida mangan dan rutenium, bahan berbasis karbon seperti karbon aktif dan grafena, dan polimer konduktif (Riaz et al., 2022; Kumar et al., 2022). Bahan-bahan ini memiliki sifat listrik, kimia dan struktural berbeda yang memengaruhi kinerja keseluruhan dan umur superkapasitor. Pemilihan material bergantung pada karakteristik yang diinginkan; material karbon unggul dalam hal densitas daya berkat luas permukaan dan konduktivitas yang tinggi, sementara oksida logam dan polimer konduktor dapat menawarkan densitas energi yang lebih tinggi.

BIOCHAR SEBAGAI MATERIAL PENYIMPAN ENERGI YANG POTENSIAL

Biochar dapat diperoleh sebagai produk utama maupun produk samping proses pirolisis, bergantung pada mode pirolisis yang digunakan. Pada pirolisis lambat, *biochar* merupakan produk utama, sedangkan pada pirolisis cepat, *biochar* merupakan produk samping dengan produk utama bio-oil. Selain *yield biochar*, mode pirolisis juga berpengaruh pada sifat pori dan fisikokimia *biochar*. Pirolisis cepat mampu menghasilkan *biochar* dengan struktur pori yang lebih berkembang serta dapat memfasilitasi pembentukan mikrokristalin dengan struktur kristal yang lebih unggul dibandingkan dengan pirolisis lambat. Peningkatan kristalinitas mampu meningkatkan konduktivitas material berbasis karbon karena dapat memfasilitasi transpor elektron dengan cepat selama proses elektrokimia (Sun et al., 2014).

Material karbon yang dihasilkan melalui pirolisis biomassa, seperti *biochar*, baru-baru ini menarik perhatian sebagai material berkelanjutan yang berpotensi digunakan dalam teknologi penyimpanan energi elektrokimia. *Biochar*

merupakan pilihan yang menarik untuk material elektroda dalam superkapasitor, baterai dan perangkat penyimpanan hidrogen karena ketersediaannya yang melimpah dan karakteristik fisikokimianya yang unik, yang meliputi konduktivitas listrik yang sangat baik, gugus fungsi permukaan yang dapat disetel, struktur berpori yang padat, luas permukaan yang tinggi, porositas, stabilitas kimia, dan volume pori (Prabakar et al., 2024). Dengan karakterisasi *biochar* yang memadai, seperti: perubahan permukaan, intrinsik dan eksternal, *biochar* berpotensi menjadi perangkat penyimpanan energi listrik yang luar biasa.

Untuk memahami manfaat *biochar* untuk penyimpanan energi, beberapa sifat penting harus dipertimbangkan, termasuk kepadatan energi, kepadatan daya, skalabilitas, umur/siklus, biaya, porositas dan luas permukaan. Kepadatan energi adalah jumlah energi yang dapat disimpan dalam ruang tertentu tergantung pada volume atau massanya, sedangkan kepadatan daya adalah kemampuan sistem untuk mengirimkan atau menyerap energi dengan cepat (Al Shaqsi et al., 2020). Meskipun *biochar* saat ini mungkin belum menyamai kepadatan energi beberapa teknologi penyimpanan energi konvensional, potensinya terletak pada kelimpahannya, biaya produksi yang rendah dan potensi manfaat penyerapan karbon.

Pada baterai, *biochar* berfungsi sebagai material anoda, dan akan meningkatkan interkalasi dan deinterkalasi ion litium selama siklus pengisian dan pengosongan pada LIB (Norouzi et al., 2019). Pada superkapasitor, pendekatan penyimpanan muatan kapasitif bergantung pada adsorpsi elektrostatik ion pada permukaan *biochar*, yang diatur oleh struktur berpori hierarkisnya. Berdasarkan struktur pori, jaringan pori 3D yang terhubung dalam *biochar* meningkatkan transportasi ion, meminimalkan resistensi dan

meningkatkan laju pengisian dan pengosongan (Cuong et al., 2021). Gugus fungsi memberikan dampak penting pada pengikatan ion dan aktivitas elektrokimia, serta meningkatkan kapasitas penyimpanan energi (Liu et al., 2019).

Material elektroda berbasis *biochar* telah digunakan sebagai alternatif yang menjanjikan untuk LIB dan SIB karena sifatnya yang unik dan keberlanjutannya. Material ini tidak hanya menawarkan pilihan yang terjangkau dan ramah lingkungan, tetapi juga menunjukkan kinerja elektrokimia yang baik, serta konduktivitas dan porositas yang tinggi. Karakteristik inheren *biochar* dapat disesuaikan melalui pemilihan bahan baku dan metode produksi, sekaligus meningkatkan kemampuannya dalam menyimpan dan melepaskan energi secara efisien.

Material elektroda berbasis *biochar* untuk LIB merupakan pendekatan inovatif yang memadukan energi terbarukan dan ilmu material berkelanjutan. *Biochar* menawarkan keunggulan yang menarik untuk aplikasi baterai. Strukturnya yang berpori dan luas permukaannya yang tinggi meningkatkan interaksi dengan elektrolit sekaligus memungkinkan penyimpanan ion yang efisien. Komposisi *biochar* yang kaya karbon memastikan konduktivitas listrik yang baik, yang krusial untuk memfasilitasi transpor elektron yang cepat di dalam elektroda baterai (Ehsani & Parsimehr, 2020). Selain itu, stabilitas kimia *biochar* terhadap elektrolit dan kekokohan mekanisnya dalam kondisi siklus berkontribusi pada masa pakai baterai yang lebih lama.

Pada baterai SIB, *biochar* tidak hanya menawarkan solusi ramah lingkungan tetapi juga menunjukkan karakteristik luar biasa seperti luas permukaan yang tinggi, porositas yang dapat diatur, dan konduktivitas yang sangat

baik. Ikatan *biochar* yang unik dan tepat memungkinkan interkalasi dan deinterkalasi Na^+ yang efisien, yang krusial untuk meningkatkan kapasitas baterai dan stabilitas siklus. Selain itu, kemampuan untuk menyesuaikan struktur *biochar* melalui berbagai teknik pemrosesan memungkinkan optimalisasi sifat elektrokimianya, menjadikannya sangat serbaguna untuk berbagai aplikasi (Bartoli et al., 2024). Struktur karbon *biochar* meningkatkan konduktivitas dan stabilitas bahan elektroda, sementara sifatnya yang berpori memberikan ruang yang cukup untuk ekstraksi Na^+ (Li et al., 2021).

Pemanfaatan material biomassa yang mengandung gugus fungsi karbon–oksigen/nitrogen yang melimpah sebagai prekursor untuk sintesis material karbon menghadirkan pendekatan yang menjanjikan untuk aplikasi penyimpanan dan konversi energi. Material karbon berpori yang berasal dari biomassa umumnya digunakan sebagai kapasitor listrik lapis ganda dalam elektrolit berair. *Biochar* merupakan kandidat kuat untuk digunakan dalam superkapasitor karena struktur berpori hierarkis dan gugus fungsi permukaan heteroatomnya (Rawat et al., 2023). Mikropori yang berukuran kecil merupakan kontributor utama SSA. Ion elektrolit berdiameter besar tidak dapat menembus mikropori karena ukurannya. Banyak penelitian telah menunjukkan bahwa material dengan persentase mikropori yang tinggi tidak memiliki kinerja elektrokimia yang sempurna. Hal ini disebabkan oleh mikropori yang tidak mendorong pergerakan ion antar material elektroda, terutama ion elektrolit organik. Agar *biochar* dapat menyimpan hidrogen secara efektif, material tersebut harus memiliki luas permukaan yang besar, struktur yang didominasi oleh mikropori, dan gugus fungsi yang kaya oksigen (Rawat et al., 2023). Mikropori yang memiliki ukuran

pori kecil merupakan penyebab utama terjadinya SSA, sedangkan ion elektrolit yang berdiameter besar tidak dapat masuk ke dalam mikropori dengan ukuran pori kecil (Li et al., 2021).

Material elektroda karbon biomassa terdoping N, O dengan menggunakan pati kentang sebagai prekursor dan urea sebagai sumber nitrogen telah dilaporkan oleh Ma et al. (2024). Elektroda ini menunjukkan kapasitansi spesifik yang tinggi (yaitu, 460,99 F g⁻¹ dalam KOH 1 M dan 727,6 F g⁻¹ dalam elektrolit H₂SO₄ 0,5 M pada 0,5 A g⁻¹) dan stabilitas umur panjang yang luar biasa, yaitu 50.000 siklus, dengan retensi kapasitansi sebesar 100% dalam KOH 1 M dan 92,1% dalam elektrolit H₂SO₄ 0,5 M. Adanya mekanisme penyimpanan muatan bahan elektroda karbon biomassa di bawah dua elektrolit berair (yaitu, 1 M KOH dan 0,5 M H₂SO₄) telah berhasil dikonfirmasi. Proses redoks gugus karbonil atau quinoid yang terjadi memberikan pseudokapasitas dalam elektrolit alkali. Dalam elektrolit asam, tidak hanya terjadi reaksi elektrokimia reversibel antara gugus H-C-O, gugus C=O dan gugus -C-OH, tetapi juga proses reversibel pemutusan dan pembentukan ikatan C-O-C dan ikatan C-H. Selain itu, atom hidrogen yang teradsorpsi pada permukaan bahan karbon dapat mengalami reaksi redoks, memberikan pseudokapasitas tambahan.

Hasil penelitian lain oleh Ding, et al. (2022) menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi elektrolit mengubah morfologi permukaan *biochar*; dari struktur halus dan tidak berpori menjadi struktur sarang lebah berpori. Nilai kapasitansi spesifik (Cs) elektroda superkapasitor berbasis karbon yang disintesis mencapai 216 F g⁻¹ pada 0,5 A g⁻¹ dan masih dapat mencapai kapasitas sebesar 189 F g⁻¹ pada 20 A g⁻¹. Sementara itu, superkapasitor yang dirakit menunjukkan tingkat retensi kapasitas tinggi sebesar 99,5%

setelah 10.000 siklus pengisian dan pengosongan pada 5 A g^{-1} dan kepadatan energi tinggi sebesar $7,48 \text{ W h kg}^{-1}$ pada kepadatan daya 125 W kg^{-1} .

Beberapa hasil penelitian lain terkait penggunaan *biochar* sebagai material penyimpan energi berupa kapasitor dan superkapasitor telah dilaporkan. *Biochar* yang berasal dari daun teratai dan dipirolisis pada suhu 700°C menunjukkan kinerja elektrokimia yang sangat baik (Lu et al., 2020). Selain itu, *biochar* yang diproduksi pada suhu 800°C menunjukkan kemampuan laju sebesar $84,1\%$ dan kapasitansi spesifik sebesar 228 Fg^{-1} pada 1 Ag^{-1} dalam $1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ ketika rapat arus ditingkatkan menjadi 5 Ag^{-1} , yaitu $191,9 \text{ Fg}^{-1}$. Densitas energi yang luar biasa tinggi sebesar $7,91 \text{ Wh kg}^{-1}$ dalam elektrolit $1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ dan stabilitas siklus yang baik dari *biochar*-800 dibuktikan oleh retensi kapasitansi *biochar*-800 sebesar 88% selama masa pakai 5.000 siklus pada rapat arus tinggi sebesar 10 Ag^{-1} (Husain et al., 2022). Peneliti lain menciptakan *biochar* fungsional dari rumput *Desmostachya bipinnate* untuk menghasilkan elektroda superkapasitor. Mereka menunjukkan bahwa elektroda *biochar* memiliki kapasitansi, densitas daya dan densitas energi yang sangat baik. Mereka mengaitkan kinerja elektroda *biochar* yang lebih baik dengan peningkatan luas permukaan, porositas dan doping heteroatom (Mehrotra et al., 2024).

SUPERKAPASITOR BERBASIS BIOCHAR ECENG GONDOK

Eceng gondok (*Eichornia crassipes*) merupakan tanaman yang tumbuh mengapung di permukaan air dan dikategorikan sebagai gulma. Eceng gondok banyak ditemukan tumbuh di negara subtropis dan tropis termasuk Indonesia. Eceng gondok memiliki struktur tiga tingkat yang unik yang menjadikannya sebagai salah satu biomassa

potensial sebagai prekursor elektroda superkapasitor (Zheng et al., 2017). Meskipun eceng gondok dikategorikan sebagai gulma dan tumbuhan invasif yang berbahaya, kemampuan mengapung tanaman ini menarik perhatian untuk dilihat sisi benefitnya. Zheng et al., (2017) melakukan observasi dengan mengupas epidermis batang eceng gondok dan ditemukan struktur tiga tingkat terdiri dari sel-sel dengan ketebalan tingkat milimeter dan berongga di dalamnya. Struktur dengan ketebalan tingkat mikrometer ditemukan pada struktur tingkat milimeter dan kemudian ditemukan struktur tingkat nanometer pada struktur tingkat mikrometer eceng gondok tersebut. Struktur tiga tingkat yang tersusun sangat baik inilah yang menyebabkan eceng gondok memiliki kemampuan mengapung di perairan.

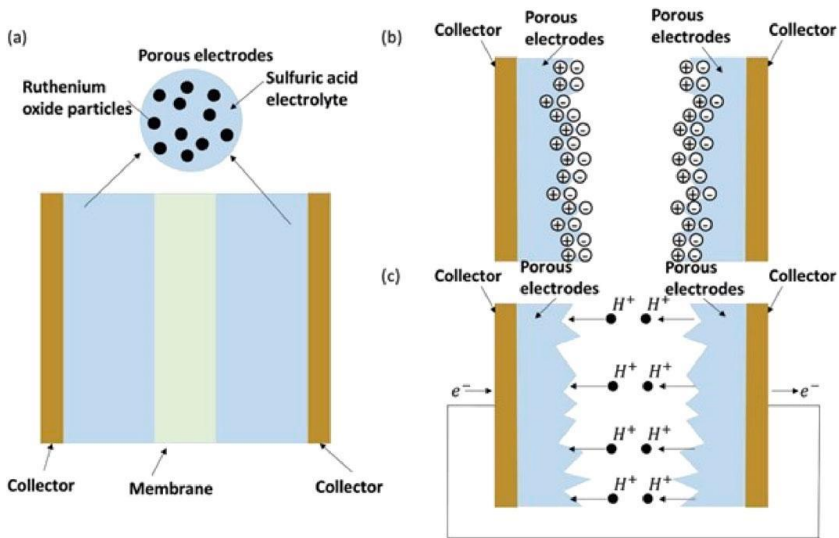
Eceng gondok belum banyak dilirik untuk dijadikan sebagai elektroda, padahal eceng gondok memiliki kandungan selulosa 60%, hemiselulosa 8% dan lignin 17% (Fattah & Naby, 2012) dengan kandungan karbon mencapai 46,5 % (Hu et al., 2015) yang menjadikannya sangat potensial menjadi prekursor pembuatan *biochar* untuk selanjutnya dijadikan sebagai *starting material* pembuatan elektroda superkapasitor. Selain itu, jumlah biomassa eceng gondok yang tinggi (100-120 ton/ha/tahun) (Masto et al., 2013) menjadikan eceng gondok sangat potensial untuk dikonversi menjadi *biochar* melalui teknik konversi termokimia sehingga diperoleh material baru dengan luas permukaan yang tinggi dan sifat permukaan yang unggul (Fanghua Li et al., 2021).

Pirolisis cepat eceng gondok berdasarkan penelitian Najmudeen et al., (2019) menghasilkan *biochar* dengan karakteristik yang menarik dari hasil citra *Structural Equation Modelling* (SEM) di mana peningkatan luas permukaan dan porositas dapat teramati. Hal ini dipengaruhi

oleh pelepasan *volatile matters* dari biomassa membentuk pori mikro di permukaan *biochar* sedangkan *volatile matters* yang masih terperangkap di dalam biomassa memperluas struktur mikro *biochar*. Spektra *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) dari penelitian Najmudeen et al., (2019) juga menunjukkan bahwa *biochar* cenderung membentuk gugus aromatik yang ditandai peningkatan intensitas puncak pada 1600 cm^{-1} . Li et al., (2016) juga melakukan observasi karakteristik *biochar* eceng gondok dari pirolisis cepat dengan variasi suhu $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ yang menunjukkan penurunan *yield* yang dihasilkan seiring dengan kenaikan suhu yang digunakan sedangkan luas permukaan meningkat seiring dengan peningkatan suhu, yakni $3,52\text{ m}^2\text{g}^{-1}$ pada $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $6,71\text{ m}^2\text{g}^{-1}$ pada $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan melonjak drastis menjadi $175,46\text{ m}^2\text{g}^{-1}$ pada $700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Karakteristik *biochar* berbasis eceng gondok yang memiliki luas permukaan besar, gugus fungsi yang aktif dan kristalinitas yang baik menjadikannya sangat potensial untuk dijadikan sebagai material elektroda superkapasitor. Struktur mikropori yang banyak ditemukan dan sejumlah kecil mesopori serta makropori dari *biochar* eceng gondok hasil penelitian Zheng et al., (2017) menguatkan potensinya sebagai material elektroda superkapasitor. Makropori dan mesopori menawarkan jalur transportasi ion yang baik, sementara mikropori menyediakan ruang untuk penyimpanan energi. Tidak hanya itu, struktur tiga tingkat yang ditemukan pada *biochar* eceng gondok juga mendukung eksplorasi material elektroda dengan luas permukaan spesifik yang tinggi dan konduktivitas listrik yang baik didukung dengan aktivasi KOH yang mampu menciptakan banyak makropori, mesopori dan mikropori (Zheng et al., 2017). Di sisi lain, banyak penelitian membuktikan bahwa struktur material tiga dimensi (3D) berpori hierarkis dengan

luas permukaan spesifik yang tinggi sangat cocok untuk diaplikasikan pada superkapasitor (Yang et al., 2017; An et al., 2017; Wang et al., 2017; Zhu et al., 2017).



Gambar 7. Ilustrasi skematik (a) struktur superkapasitor, (b) efek lapisan ganda Listrik, (c) proses Faraday (Dai et al., 2016)

Supercapasitor yang juga dikenal sebagai kapasitor elektrokimia atau ultrakapasitor merupakan sistem penyimpanan energi yang memungkinkan tingkat pelepasan yang tinggi melalui elektrosorpsi ion atau proses redoks yang cepat (Reis et al., 2020). Komponen superkapasitor (Gambar 7) terdiri atas elektroda, elektrolit dan separator yang memisahkan dua elektroda secara elektrik serta *current collector*. Kunci kinerja superkapasitor yang optimal terdapat pada kinetika transpor ionik dan elektron yang efisien (Maier, 2005). Oleh karena itu elektroda menjadi bagian yang penting bagi superkapasitor karena berperan memfasilitasi transpor elektron dan absorpsi ion (Sari et al., 2017).

Elektroda memiliki peranan vital sebagai penyimpan energi melalui mekanisme interaksi ion dengan material elektroda pada antarmuka elektroda-elektrolit yang kemudian disimpan di situs aktif elektroda tersebut. Porositas, luas permukaan dan konduktivitas merupakan tiga parameter penting yang harus diperhatikan pada elektroda. Apabila ketiga parameter ini dioptimalkan maka superkapasitor yang dihasilkan dapat memiliki kinerja yang optimal (Yaseen et al., 2021). Kinerja superkapasitor umumnya dinilai menggunakan satuan Farad per gram (F/g) yang disebut dengan kapasitansi spesifik, yakni kemampuan penyimpanan muatan suatu elektroda pada potensial tertentu tiap satuan massa elektroda tersebut. Semakin luas suatu permukaan elektroda, semakin banyak jumlah energi yang dapat tersimpan di dalamnya. Baru-baru ini, karbon aktif yang diperoleh dari *biochar* mulai menarik perhatian untuk diaplikasikan sebagai penyimpan energi (Pontiroli et al., 2019). *Biochar* yang dihasilkan dari konversi termal biomassa melalui proses pirolisis dapat diaktivasi dan mampu menghasilkan karbon berpori dengan karakteristik yang menjanjikan untuk diterapkan sebagai elektroda superkapasitor (Xu et al., 2017). Elektroda berbasis *biochar* memiliki keunggulan stabilitas kimia dan elektrokimia yang sangat baik, konduktivitas tinggi, luas permukaan tinggi dan murah (Pontiroli et al., 2019).

Elektroda *biochar* merupakan elektroda alternatif berbiaya rendah untuk pembangkitan listrik dan pengolahan air limbah dengan sel bahan bakar mikroba atau *microbial fuel cell* (MFC). Dalam penelitian Chaijak & Michu (2022), *biochar* eceng gondok diproduksi melalui pirolisis pada suhu 350 °C dan diaktivasi dengan perendaman kimia. *Biochar* eceng gondok yang telah diaktivasi diintegrasikan dengan separator keramik atau ceramic-separator MFC (CMFC) dan

digunakan untuk pengolahan air limbah farmasi (mengandung penisilin 100 $\mu\text{g/mL}$) dan pembangkitan listrik. Daya keluaran maksimum dan penyisihan penisilin masing-masing mencapai $0,032 \pm 0,001 \text{ W/m}^2$ dan $65,12 \pm 0,02\%$.

Penelitian Kurniawan et al. (2015) memproduksi *biochar* dari eceng gondok yang dihidrolisis menjadi gula dengan asam sulfat encer (0,25 M) pada kondisi air subkritis ($P = 20 \text{ bar}$, $T = 130 \text{ }^\circ\text{C}$) selama 2 jam. Larutan gula kemudian dikarbonisasi pada kondisi subkritis untuk menghasilkan karbon mikrosfer. Karbonisasi air subkritis dilakukan pada tekanan 40 bar dan berbagai suhu (160–200 $^\circ\text{C}$) serta waktu (6–10 jam). Rendemen karbon mikrosfer tertinggi adalah 0,1019 g/g eceng gondok kering pada suhu 200 $^\circ\text{C}$ selama 10 jam. Karbon mikrosfer diaktifkan menggunakan kombinasi perlakuan kimia (larutan KOH) dan fisika (gelombang mikro) untuk meningkatkan luas permukaan spesifik dan porositas karbon mikrosfer. Studi elektrokapasitif pada mikrosfer karbon menunjukkan bahwa mikrosfer karbon yang diaktivasi pada rasio impregnasi 1:1 dan daya gelombang mikro 630 W memiliki kapasitansi spesifik tertinggi dan stabilitas elektrokimia yang sangat baik (Kurniawan et al., 2015).

Penelitian Dey et al. (2025) melaporkan bahwa faktor optimalisasi seperti waktu penahanan aktivasi merupakan kunci untuk mencapai karbon aktif dengan luas permukaan yang tinggi dan pori-pori yang hierarkis. Karbon aktif dari eceng gondok, *biowaste* yang umum, dibuat menggunakan proses aktivasi KOH, dengan waktu yang bervariasi (~0,5, 1,5, dan 2,5 jam) untuk mempelajari dampaknya terhadap luas permukaan dan kapasitansi spesifik. HAC_2 (waktu penahanan aktivasi 1,5 jam) menunjukkan luas permukaan yang tinggi, yaitu $\sim 540 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$. Elektroda HAC_2 yang optimal

menghasilkan kapasitansi spesifik yang tinggi, yaitu $\sim 323 \text{ F g}^{-1}$ pada 1 A g^{-1} . Dari perspektif kepraktisan, HAC_2 digunakan sebagai material elektroda dalam perangkat superkapasitor simetris berbasis air dan organik, menghasilkan kapasitansi spesifik sekitar 173 dan 34 F g^{-1} pada $0,5 \text{ A g}^{-1}$. Untuk mencapai kapasitansi spesifik dan jendela potensial yang tinggi, perangkat $\text{MoO}_3//\text{HAC}_2$ dirakit. Perangkat ini mencapai kapasitansi spesifik yang tinggi sekitar 104 F g^{-1} pada $0,5 \text{ A g}^{-1}$ dengan densitas energi yang luar biasa sebesar $28,58 \text{ W h kg}^{-1}$ pada densitas daya 351 W kg^{-1} dan retensi kapasitas sekitar 86% setelah 10.000 siklus. Perangkat yang dikembangkan ini dapat menyalakan jam digital dan LED, yang menunjukkan bahwa perangkat ini berpotensi digunakan sebagai perangkat penyimpanan energi.

Weerasuk et al. (2024) melaporkan studi pengaruh *pre-treatment* iradiasi gamma pada bubuk eceng gondok untuk produksi karbon aktif terhadap peningkatan sifat elektrokimia untuk aplikasi superkapasitor. Perubahan struktur dan morfologi pasca-iradiasi dianalisis secara cermat menggunakan *scanning electron microscope* (SEM), spektroskopi Raman, spektroskopi Fourier *transform infrared* (FT-IR), analisis Brunauer–Emmett–Teller (BET), dan *X-ray photoelectron spectroscopy* (XPS). *Pre-treatment* secara signifikan memodifikasi struktur pori dan mengurangi ukuran partikel karbon aktif yang dihasilkan. Isoterm adsorpsi-desorpsi nitrogen menunjukkan peningkatan volume mikropori yang substansial seiring dengan peningkatan dosis iradiasi gamma. Secara elektrokimia, karbon aktif yang dihasilkan dari karbon aktif yang telah diolah terlebih dahulu pada 100 kGy menunjukkan peningkatan kapasitansi spesifik yang signifikan, mencapai $257,82 \text{ F g}^{-1}$, sebuah peningkatan yang signifikan dibandingkan $95,35 \text{ F g}^{-1}$ dari karbon aktif tanpa pengolahan,

dengan tetap mempertahankan kapasitansi 99,40% setelah 7000 siklus. Temuan ini menunjukkan bahwa biomassa dengan *pre-treatment* iradiasi gamma merupakan prekursor yang menjanjikan untuk fabrikasi elektroda superkapasitor berkinerja tinggi, menawarkan alternatif yang layak dan ramah lingkungan untuk pengembangan teknologi penyimpanan energi.

Proliferasi berlebihan *Eichhornia crassipes* (eceng gondok) menimbulkan tantangan lingkungan yang signifikan. Namun, biomasanya yang melimpah menawarkan solusi berkelanjutan untuk aplikasi penyimpanan energi. Simon et al. (2025) melaporkan pendekatan ramah lingkungan untuk fabrikasi elektroda superkapasitor berkinerja tinggi menggunakan karbon aktif yang berasal dari eceng gondok (EG), polipirol (PPy), dan titanium dioksida (TiO_2). Elektroda hibrida EG- TiO_2 /PPy disintesis melalui perlakuan hidrotermal dan polimerisasi antarmuka, memastikan proses yang hemat sumber daya dan ramah lingkungan. Komposit ini menunjukkan kapasitansi gravimetrik tinggi sebesar 610 F g^{-1} pada $0,5 \text{ A g}^{-1}$ dalam KOH 3 M, dengan stabilitas siklus yang sangat baik (retensi 94% setelah 5000 siklus). Sebuah superkapasitor asimetris dengan EG- TiO_2 /PPy sebagai elektroda positif dan karbon aktif sebagai elektroda negatif menghasilkan kerapatan energi sebesar $98 \text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$ dan kerapatan daya sebesar $5606 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$. Studi ini menyoroti dan menekankan pada potensi transformasi biomassa invasif menjadi material penyimpan energi berkinerja tinggi yang hemat biaya, memajukan prinsip-prinsip kimia hijau melalui pemanfaatan limbah dan desain material berkelanjutan.

PENUTUP

Biochar mampu menjadi alternatif *starting material* perangkat penyimpanan energi yang optimal namun tetap

murah, mudah ditemukan dan aman bagi lingkungan. Pemanfaatan material biomassa yang mengandung gugus fungsi karbon-oksigen/nitrogen yang melimpah sebagai prekursor untuk sintesis material karbon menghadirkan pendekatan yang menjanjikan untuk aplikasi penyimpanan dan konversi energi.

Pada baterai, *biochar* berfungsi sebagai material anoda, dan akan meningkatkan interkalasi dan deinterkalasi ion litium selama siklus pengisian dan pengosongan (*charging* dan *discharging*). Pada superkapasitor, pendekatan penyimpanan muatan kapasitif bergantung pada adsorpsi elektrostatis ion pada permukaan *biochar*, yang diatur oleh struktur berpori hierarkisnya. Berdasarkan struktur pori, jaringan pori 3D yang terhubung dalam *biochar* meningkatkan transportasi ion, meminimalkan resistensi dan meningkatkan laju pengisian dan pengosongan. Elektroda *biochar* memiliki kapasitansi, densitas daya dan densitas energi yang sangat baik, yang berkaitan dengan peningkatan luas permukaan, porositas dan *doping* heteroatom.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, H. & Wu, H. (2009). Biochar as a Fuel: 1. Properties and grindability of biochars produced from the pyrolysis of mallee wood under slow-heating conditions. *Energy & Fuels*, 23 (8), 4174–4181. <https://doi.org/10.1021/ef900494t>.
- Acikgoz, C., Onay, O. & Kockar, O.M. (2004). Fast pyrolysis of linseed: product yields and compositions, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 71 (2), 417-429. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(03\)00124-4](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(03)00124-4).
- Al Shaqsi, A. Z., Sopian, K., & Al-Hinai, A. (2020). Review of energy storage services, applications, limitations, and benefits. *Energy Reports*, 6, 288–306.

- <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.07.028>.
- Amalina, F., Syukor Abd Razak, A., Krishnan, S., Sulaiman, H., Zularisam, A. W., & Nasrullah, M. (2022). Advanced techniques in the production of biochar from lignocellulosic biomass and environmental applications. *Cleaner Materials*, 6 (August), 100137. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100137>
- An, Y., Yang, Y., Hu, Z., Guo, B., Wang, X., Yang, X., Zhang, Q. & Wu, H. (2017). High-performance symmetric supercapacitors based on carbon nanosheets framework with graphene hydrogel architecture derived from cellulose acetate. *Journal of Power Sources*, 337, 45–53. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.10.112>
- Anand, A., Gautam, S., & Ram, L.C. (2023). Feedstock and pyrolysis conditions affect suitability of biochar for various sustainable energy and environmental applications, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 170, 105881. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105881>.
- Bamdad, H., Hawboldt, K., & MacQuarrie, S. (2018). A review on common adsorbents for acid gases removal: Focus on biochar. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1705–1720. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.261>
- Bartoli, M., Giorcelli, M., Jagdale, P., Rovere, M., & Tagliaferro, A. (2020). A review of non-soil biochar applications. *Materials*, 13, 261. <https://doi.org/10.3390/ma13020261>
- Bartoli, M., Piovano, A., Elia, G.A., Meligrana, G., Pedraza, R., Pianta, N., Tealdi, C., Pagot, G., Negro, E., Triolo, C., Gomez, L.V., Comisso, N., Tagliaferro, A., Santangelo, S., Quartarone, E., Di Noto, V., Mustarelli, P., Ruffo, R. & Gerbaldi, C. (2024). Pristine and engineered biochar as Na-ion batteries anode material: A comprehensive overview, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 194 (2024) 114304. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114304>.

- Cao, X. & Harris, W. (2010). Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation, *Bioresource Technology*, 101 (14), 5222-5228. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.052>.
- Chaijak, P. & Michu, P. (2022). Modified water hyacinth biochar as a low-cost supercapacitor electrode for electricity generation from pharmaceutical wastewater. *Polish Journal of Environmental Studies*, 31 (6), 5471-5475. <https://doi.org/10.15244/pjoes/150463>
- Chaturvedi, S., Singh, S.V., Dhyani, V.C., Govindaraju, K., Vinu, R. & Mandal, S. (2023). Characterization, bioenergy value, and thermal stability of biochars derived from diverse agriculture and forestry lignocellulosic wastes. *Biomass Conv. Bioref.* 13, 879-892. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01239-2>
- Chen, Z., Wang, M., Ren, Y., Jiang, E., Jiang, Y., & Li, W. (2018). Biomass torrefaction: A promising pretreatment technology for biomass utilization. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (113). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/113/1/012201>
- Choi, N. S., Chen, Z., Freunberger, S. A., Ji, X., Sun, Y. K., Amine, K., Yushin, G., Nazar, L.F., Cho, J. & Bruce, P. G. (2012). Challenges facing lithium batteries and electrical double-layer capacitors. *Angewandte Chemie-International Edition*, 51 (40), 9994-10024. <https://doi.org/10.1002/anie.201201429>
- Cuong, D. V., Matsagar, B. M., Lee, M., Hossain, Md. S. A., Yamauchi, Y., Vithanage, M., Sarkar, B., Ok, Y.S., Wu, K.C.-W., Hou, C.-H. (2021). A critical review on biochar-based engineered hierarchical porous carbon for capacitive charge storage. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 145, 111029. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111029>
- Dai, K., Wang, X., Yin, Y., Hao, C., & You, Z. (2016). Voltage fluctuation in a supercapacitor during a high-g impact. *Sci. Rep.* 6, 38794. <https://doi.org/10.1038/srep38794>
- Dey, S., Chakraborty, A., Raja, M.W., Das, L.G., Murmu, N.C. & Kuila, T. (2025). Water hyacinth-derived hierarchical porous activated carbon as a supreme electrode material

- toward the stellar performance in supercapacitor applications. *ACS Sustainable Resource Management*, 2 (5), 796-806.
<https://doi.org/10.1021/acssusresmgt.5c00039>
- Ding, M., Ma, Z., Su, H., Li, Y., Yang, K., Dang, L., Li F. & Xue, B. (2022). Preparation of porous biochar and its application in supercapacitors. *New Journal of Chemistry*. 46, 21788-21797.
<https://doi.org/10.1039/D2NJ03455G>
- Ehsani, A. & Parsimehr, H. (2020). Electrochemical energy storage electrodes from fruit biochar, *Adv. Colloid Interf. Sci* 284 (2020) 102263, <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102263>.
- El-Azeim, A.M., Salah, Z., Hammam, A. (2021). Assessment of water hyacinth biochar as a soil amendment for sandy soils. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 12 (6), 431-444.
<https://doi.org/10.21608/jssae.2021.182662>
- Fattah, A. F. A., & Naby, M. A. A. (2012). Pretreatment and enzymic saccharification of water hyacinth cellulose. *Carbohydrate Polymers*, 87 (3), 2109–2113.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.10.033>
- Guiotoku, M., Rambo, C., Maia, C., & Hotza, D. (2011). Synthesis of carbon-based materials by microwave-assisted hydrothermal process (U. Chandra, Ed.).
<https://doi.org/10.5772/20089>
- Gupta, N., Kaur, N., Jain, S.K. & Joshal, K.S. (2021). Chapter 3 - Smart grid power system, Editor(s): Anuradha Tomar, Ritu Kandari, *Advances in Smart Grid Power System*, Academic Press, 47-71, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824337-4.00003-5>.
- Hairuddin, M.N., Mubarak, N.M., Khalid, M., Abdullah, E.C., Walvekar, R. & Karri, R.R. (2019) Magnetic palm kernel biochar potential route for phenol removal from wastewater. *Environ Sci Pollut Res* 26, 35183–35197.
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-06524-w>.
- Hassan, M., Liu, Y., Naidu, R., Parikh, S. J., Du, J., Qi, F., & Willett, I. R. (2020). Influences of feedstock sources and

- pyrolysis temperature on the properties of biochar and functionality as adsorbents: A meta-analysis. *The Science of the Total Environment*, 744, 140714. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140714>
- Hillier, N., Yong, S. & Beeby, S. (2020). The good, the bad and the porous: a review of carbonaceous materials for flexible supercapacitor applications. *Energy Rep.* 6, 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.03.019>.
- Hu, L., & Xu, K. (2014). Nonflammable electrolyte enhances battery safety. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111 (9), 3205–3206. <https://doi.org/10.1073/pnas.1401033111>
- Hu, Z., Ma, X., & Li, L. (2015). Optimal conditions for the catalytic and non-catalytic pyrolysis of water hyacinth. *Energy Conversion and Management*, 94, 337–344. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.087>
- Husain, Z., Shakeelur Raheman, A. R., Ansari, K. B., Pandit, A. B., Khan, M. S., Qyyum, M. A., & Lam, S.S. (2022). Nano-sized mesoporous biochar derived from biomass pyrolysis as electrochemical energy storage supercapacitor. *Mater Sci. Energy Technol.* 5, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2021.12.003>
- Krylova, A., & Zaichenko, V. (2018). Hydrothermal carbonization of biomass: a review. *Solid Fuel Chemistry*, 52, 91–103. <https://doi.org/10.3103/S0361521918020076>
- Kumar, D.R., Nagarani, S., Sethuraman, V., Andra, S. & Dhinakaran, V. (2022). Investigations of conducting polymers, carbon materials, oxide and sulfide materials for supercapacitor applications: a review. *Chem. Pap.* 76, 3371–3385. <https://doi.org/10.1007/s11696-022-02124-0>.
- Kurniawan, F., Wongso, M., Ayucitra, A., Soetaredjo, F.E., Angkawijaya, A.E., Ju, Y.-H. & Ismadji, S. (2015). Carbon microsphere from water hyacinth for supercapacitor electrode, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 47, 197–201. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2014.10.002>.

- Lee, J., Sarmah, A. K., & Kwon, E. E. (2019). Chapter 1 - Production and Formation of Biochar (Y. S. Ok, D.C.W. Tsang, N. Bolan, & J.M.B. T.-B. from B. & W. Novak, Eds.). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811729-3.00001-7>
- Li, Fanghua, He, X., Srishti, A., Song, S., Tan, H. T. W., Sweeney, D. J., Gosh, S. & Wang, C.H. (2021). Water hyacinth for energy and environmental applications: A review. *Bioresource Technology*, 327 (January), 124809. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124809>
- Li, T., Kirk, D.W. & Jia, C.Q. (2021). Monolithic wood biochar as functional material for sustainability, *Can. J. Chem. Eng.* 99 (2021), 640–656. <https://doi.org/10.1002/cjce.23944>.
- Li, X., Zhang, J., Liu, B., & Su, Z. (2021). A critical review on the application and recent developments of post-modified biochar in supercapacitors. *J. Clean. Prod.* 310, 127428. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127428>
- Lin, X.-Q., Yang, N., Lü, Q.-F., & Liu, R. (2019). Self-nitrogen-doped porous biocarbon from watermelon rind: a high-performance supercapacitor electrode and its improved electrochemical performance using redox additive electrolyte. *Energy Technology*, 7 (3), 1800628. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ente.201800628>
- Liu, W. J., Jiang, H., & Yu, H. Q. (2019). Emerging applications of biochar-based materials for energy storage and conversion. *Energy Environ. Sci.* 12, 1751–1779. <https://doi.org/10.1039/c9ee00206e>
- Liu, X., Liao, J., Song, H., Yang, Y., Guan, G. & Zhang, Z. (2019) A biochar-based route for environmentally friendly controlled release of nitrogen: urea-loaded biochar and bentonite composite. *Sci Rep* 9, 9548–9558. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46065-3>.
- Liu, Z., Zhu, Z., Dai, J., & Yan, Y. (2018). Waste biomass based-activated carbons derived from soybean pods as electrode materials for high-performance supercapacitors. *Chemistry Select*, 3 (21), 5726–5732.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/slct.201800609>
- Lu, Q., Zhou, S., Li, B., Wei, H., Zhang, D., Hu, J., Zhang, L., Zhang, J. & Liu, Q. (2020). Mesopore-rich carbon flakes derived from lotus leaves and it's ultrahigh performance for supercapacitors. *Electrochim Acta* 333, 135481. <https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2019.135481>
- Luque, R., Menéndez, J. A., Arenillas, A., & Cot, J. (2012). Microwave-assisted pyrolysis of biomass feedstocks: the way forward? *Energy & Environmental Science*, 5 (2), 5481–5488. <https://doi.org/10.1039/C1EE02450G>
- Lv, Y., Gan, L., Liu, M., Xiong, W., Xu, Z., Zhu, D., & Wright, D. S. (2012). A self-template synthesis of hierarchical porous carbon foams based on banana peel for supercapacitor electrodes. *Journal of Power Sources*, 209, 152–157. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.089>
- Ma, C., Tang, L., Cheng, H., Li, Z., Li, W. & He, G. (2024). Biochar for supercapacitor electrodes: Mechanisms in aqueous electrolytes. *Battery Energy*, 3(4), 20230058. <https://doi.org/10.1002/bte2.20230058>
- Maier, J. (2005). Nanoionics: ion transport and electrochemical storage in confined systems. *Nature Materials*, 4 (11), 805–815. <https://doi.org/10.1038/nmat1513>
- Masto, R. E., Kumar, S., Rout, T. K., Sarkar, P., George, J., & Ram, L. C. (2013). Biochar from water hyacinth (*Eichornia crassipes*) and its impact on soil biological activity. *Catena*, 111, 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.06.025>
- Mehrotra, S., Gupta, M., Dujearic-Stephane, K., Kumar, A., Singh, P., Bharti, B., Mathuriya, A.S., Bocchetta, P. & Kumar, Y. (2024). Functional biochar derived from *Desmostachya bipinnata* for the application in energy storage/conversion devices. *Biomass Convers. Biorefin* 14, 17263–17275. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-03991-7>
- Mi, J., Wang, X.-R., Fan, R.-J., Qu, W.-H., & Li, W.-C. (2012).

- Coconut-shell-based porous carbons with a tunable micro/mesopore ratio for high-performance supercapacitors. *Energy & Fuels*, 26 (8), 5321–5329. <https://doi.org/10.1021/ef3009234>.
- Mohan, D., Pittman, C.U., Bricka, M., Smith, F., Yancey, B., Mohammad, J., Steele, P.H., Alexandre-Franco, M.F., Gómez-Serrano, V. & Gong, H. (2007). Sorption of arsenic, cadmium, and lead by chars produced from fast pyrolysis of wood and bark during bio-oil production, *Journal of Colloid and Interface Science*, 310 (1), 57-73, <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.01.020>.
- Mullen, C.A., Boateng, A.A., Goldberg, N.M., Lima, I.M., Laird, D.A. & Hicks, K.B. (2010). Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis, *Biomass and Bioenergy*, 34 (1), 67-74, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.09.012>.
- Mullen, C.A., Boateng, A.A., Hicks, K.B., Goldberg, N.M., & Moreau, R.A. (2010). Analysis and Comparison of bio-oil produced by fast pyrolysis from three barley biomass/byproduct streams. *Energy & Fuels*, 24 (1), 699–706. <https://doi.org/10.1021/ef900912s>
- Mulligan, C.J., Strezov, L. & Strezov, V. (2010). Thermal decomposition of wheat straw and mallee residue under pyrolysis conditions. *Energy Fuels*, 24 (1), 46–52. <https://doi.org/10.1021/ef9004797>.
- Nagde, K.R. & Dhoble, S.J. (2021). Chapter 12 - Li-S ion batteries: a substitute for Li-ion storage batteries, Editor(s): S.J. Dhoble, N.Thejo Kalyani, B. Vengadaesvaran, Abdul Kariem Arof, *Energy Materials*, Elsevier, 335-371, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823710-6.00008-X>.
- Najmudeen, T. M., Febna, M. A. A., Rojith, G., & Zacharia, P. U. (2019). Characterisation of biochar from water hyacinth eichhornia crassipes and the effects of biochar on the growth of fish and paddy in integrated culture systems. *Journal of Coastal Research*, 86 (sp1), 225–234. <https://doi.org/10.2112/SI86-033.1>
- Nidheesh, P.V., Gopinath, A., Ranjith, N., Praveen Akre, A.,

- Sreedharan, V., Suresh Kumar, M. (2021). Potential role of biochar in advanced oxidation processes: a sustainable approach. *Chem. Eng. J.* 405, 126582. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126582>, August 2020.
- Norouzi, O., Salimi, P., Di Maria, F., Pourhosseini, S. E. M., & Safari, F. (2019). Synthesis and design of engineered biochars as electrode materials in energy storage systems. *Prod. Mater. Sustain. Biomass Resour.* 233–265. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3768-0_8
- Pontiroli, D., Scaravonati, S., Magnani, G., Fornasini, L., Bersani, D., Bertoni, G., Milanese, C., Girella, A., Ridi, F., Verucchi, R., Mantovani, L., Malcevski, A. & Ricco, M. (2019). Super-activated biochar from poultry litter for high-performance supercapacitors. *Microporous and Mesoporous Materials*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.05.002>
- Prabakar, P., Mert, M.K., Muruganandam, L. & Sivagami, K. (2024) A comprehensive review on biochar for electrochemical energy storage applications: an emerging sustainable technology. *Front. Energy Res.* 12, 1448520. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1448520>
- Purkait, T., Singh, G., Singh, M., Kumar, D., & Dey, R. S. (2017). Large area few-layer graphene with scalable preparation from waste biomass for high-performance supercapacitor. *Scientific Reports*, 7 (1), 15239. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15463-w>
- Raghavendra, K. V. G., Vinoth, R., Zeb, K., Muralee Gopi, C. V. V., Sambasivam, S., Kummara, M. R., Obaidat, I.M. & Kim, H. J. (2020). An intuitive review of supercapacitors with recent progress and novel device applications. *Journal of Energy Storage*, 31 (April), 101652. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101652>
- Rangabhashiyam, S. & Balasubramanian, P. (2019). The potential of lignocellulosic biomass precursors for biochar production: performance, mechanism and wastewater application — a review. *Ind. Crops Products* 128, 405–423.

- <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.11.041>.
- Rashidi, N. A., & Yusup, S. (2016). A mini review of biochar synthesis, characterization, and related standardization and legislation. *Intech*, 11(tourism), 13. Retrieved from <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>
- Rawat, S., Boobalan, T., Sathish, M., Hotha, S., & Thallada, B. (2023). Utilization of CO₂ activated litchi seed biochar for the fabrication of supercapacitor electrodes. *Biomass Bioenergy* 171, 106747. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106747>
- Reis, G. S. Dos, Larsson, S. H., Oliveira, H. P. de, Thyrel, M., & Lima, E. C. (2020). Sustainable biomass activated carbons as electrodes for battery and supercapacitors—a mini-review. *Nanomaterials*, 10 (7), 1–22. <https://doi.org/10.3390/nano10071398>
- Revankar, S. T. (2019). Chapter Six - Chemical Energy Storage (H. Bindra & S. B. T.-S. and H. of N. E. Revankar, Eds.). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813975-2.00006-5>
- Riaz, S., Aman, Y., Nasir, M. & Hayat, A. & Hasnain Nawaz, M. (2022). 3 - Electrical conductivity of metal oxide–carbon composites. in *Metal Oxides* (eds. Chaudhry, M. A., Hussain, R. & Butt, F. K. B. T.-M. O.-C. H. M.) Elsevier, 61–74. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822694-0.00018-1>
- Roy, P. & Srivastava, S.K. (2015). Nanostructured anode materials for lithium-ion batteries. *J. Mater. Chem. A*, 3, 2454–2484. <https://doi.org/10.1039/C4TA04980B>
- Rufford, T. E., Hulicova-Jurcakova, D., Khosla, K., Zhu, Z., & Lu, G. Q. (2010). Microstructure and electrochemical double-layer capacitance of carbon electrodes prepared by zinc chloride activation of sugar cane bagasse. *Journal of Power Sources*, 195 (3), 912–918. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.08.048>
- Ruwan, A. (2022). Types of Pyrolysis. in

- <https://www.arhse.com/types-of-pyrolysis/>. diunduh 17 Juli 2025.
- Salehi, E., Abedi, J. & Harding, T. (2009). Bio-oil from sawdust: pyrolysis of sawdust in a fixed-bed system. *Energy & Fuels* 23 (7), 3767–3772. <https://doi.org/10.1021/ef900112b>.
- Saqib, N. U., Sharma, H. B., Baroutian, S., Dubey, B., & Sarmah, A. K. (2019). Valorisation of food waste via hydrothermal carbonisation and techno-economic feasibility assessment. *The Science of the Total Environment*, 690, 261–276. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.484>
- Sari, N., Sonief, A., & Ching, Y. S. (2017). Boron doped graphene 3-dimensi untuk superkapasitor kapasitas tinggi. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 8 (2), 53–57. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2017.008.02.1>
- Shao, Y., El-Kady, M. F., Sun, J., Li, Y., Zhang, Q., Zhu, M., ... Kaner, R. B. (2018). Design and mechanisms of asymmetric supercapacitors. *Chemical Reviews*, 118(18), 9233–9280. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00252>
- Simon, S., Cherian, A.R. & Sreeja, P.B. (2025). Transforming invasive weeds into energy solutions: water hyacinth-based hybrid electrodes for green supercapacitors. *RSC Adv.*, 15, 17302–17316. <https://doi.org/10.1039/D5RA02140E>
- Sun, K., Ro, K., Guo, M.X., Novak, J., Mashayekhi, H. & Xing, B. (2011). Sorption of bisphenol A, 17a ethinyl estradiol and phenanthrene on thermally and hydrothermally produced biochars. *Bioresour Technol* 102, 5757–5763. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.038>.
- Tarascon, J.-M.; Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 414, 359–367. <https://doi.org/10.1038/35104644>.
- Uddin, M. N., Techato, K., Taweeekun, J., Rahman, M. M., Rasul, M., Mahlia, T. M. I., & Rahman, S. M. A. (2018). An overview of recent developments in biomass pyrolysis technologies. *Energies*, 11, 3115.

- <https://doi.org/10.3390/en1113115>
- Uzun, B.B., Pütün, A.E. & Pütün, E. (2007). Composition of products obtained via fast pyrolysis of olive-oil residue: Effect of pyrolysis temperature, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 79 (1–2), 147–153, <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2006.12.005>.
- Verma, M., Godbout, S., Brar, S. K., Solomatnikova, O., Lemay, S. P., Larouche, J. P., Biofuels Production from Biomass by Thermochemical Conversion Technologies, *International Journal of Chemical Engineering*, 2012, 542426, 18 pages, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/542426>
- Wang, C., Feng, Y., Sun, X., Sun, H., Peng, T., Lu, Y., Xu, J., Luo, Y. & Yu, B. (2017). Fabrication and activation of carbon nanotube foam and its application in energy storage. *Electrochimica Acta*, 236, 343–350. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.03.173>
- Wang, Dabin, Geng, Z., Li, B., & Zhang, C. (2015). High performance electrode materials for electric double-layer capacitors based on biomass-derived activated carbons. *Electrochimica Acta*, 173, 377–384. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.05.080>
- Wang, Dewei, Liu, S., Fang, G., Geng, G., & Ma, J. (2016). From trash to treasure: direct transformation of onion husks into three-dimensional interconnected porous carbon frameworks for high-performance supercapacitors in organic electrolyte. *Electrochimica Acta*, 216, 405–411. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.09.053>
- Weerasuk, B., Chutimasakul, T., Prigyai, N., Nilgumhang, K., Kaeopookum, P., & Sangtawesin, T. (2024). Structural and electrochemical evolution of water hyacinth-derived activated carbon with gamma pretreatment for supercapacitor applications. *Materials*, 17 (13), 3233. <https://doi.org/10.3390/ma17133233>.
- Wei, Y., Chen, W., Liu, C., & Wang, H. (2021). Facial synthesis of adsorbent from hemicelluloses for Cr(VI) adsorption.

- Molecules*, 26 (5).
<https://doi.org/10.3390/molecules26051443>
- Winter, M., & Brodd, R. J. (2004). What are batteries, fuel cells, and supercapacitors? *Chemical Reviews*, 104 (10), 4245–4269. <https://doi.org/10.1021/cr020730k>
- Wu, M., Li, L., Liu, J., Li, Y., Ai, P., Wu, W., & Zheng, J. (2015). Template-free preparation of mesoporous carbon from rice husks for use in supercapacitors. *New Carbon Materials*, 30 (5), 471–475. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(15\)60201-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1872-5805(15)60201-3).
- Xu, L., Yao, Q., Zhang, Y., & Fu, Y. (2017). Integrated production of aromatic amines and n-doped carbon from lignin via ex situ catalytic fast pyrolysis in the presence of ammonia over zeolites. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5 (4), 2960–2969. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b02542>
- Xu, X., Gao, J., Tian, Q., Zhai, X., & Liu, Y. (2017). Walnut shell derived porous carbon for a symmetric all-solid-state supercapacitor. *Applied Surface Science*, 411, 170–176. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.03.124>
- Yaashikaa, P. R., Senthil Kumar, P., Varjani, S. J., & Saravanan, A. (2019). Advances in production and application of biochar from lignocellulosic feedstocks for remediation of environmental pollutants. *Bioresource Technology*, 292, 122030. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122030>
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D.H., Liang, D.T., Zheng, C. (2006). Mechanism of palm oil waste pyrolysis in a packed bed. *Energy Fuels*, 20 (3), 1321–1328. <https://doi.org/10.1021/ef0600311>.
- Yang, X., Zhao, L., & Lian, J. (2017). Arrays of hierarchical nickel sulfides/MoS₂ nanosheets supported on carbon nanotubes backbone as advanced anode materials for asymmetric supercapacitor. *Journal of Power Sources*, 343, 373–382.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.01.078>
- Yang, Z., Xu, M., Liu, Y., He, F., Gao, F., Su, Y., Wei, H. & Zhang, Y. (2014) Nitrogen-doped, carbon-rich, highly photoluminescent carbon dots from ammonium citrate. *Nanoscale* 6, 1890–1895. DOI <https://doi.org/10.1039/C3NR05380F>.
- Yap, M.W., Mubarak, N.M., Sahu, J.N. & Abdullah, E.C. (2017) Microwave induced synthesis of magnetic biochar from agricultural biomass for removal of lead and cadmium from wastewater. *J Ind Eng Chem* 45, 287–295. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.09.036>.
- Yaseen, M., Khattak, M. A. K., Humayun, M., Usman, M., Shah, S. S., Bibi, S., Ul Hasnain, B.S., Ahmad, S.M., Khan, A., Shah, N., Tahir, A.A. & Ullah, H. (2021). A review of supercapacitors: Materials design, modification, and applications. *Energies*, 14 (22), 1–40. <https://doi.org/10.3390/en14227779>.
- 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.09.034>
- Zhu, C., Hu, D., & Liu, Z. (2017). Interconnected three-dimensionally hierarchical heterostructures with homogeneously-dispersed V₂O₅ nanocrystals and carbon for high performance supercapacitor electrodes. *Electrochimica Acta*, 229, 155–165. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.01.144>