

BIOMASSA SEBAGAI MATERIAL ELEKTRODA SUPERKAPASITOR

(*A Literature Review of Biomass Activated Carbon Characteristics for Supercapacitor Electrode Material*)

Nur Adi Saputra^{1,2,*}, Wasrin Syafii², Gustan Pari¹, Deded Sarip Nawawi², & Akhiruddin Maddu³

¹Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jl. Raya Jakarta-Bogor Km.46, Bogor 16911

²Departemen Hasil Hutan IPB, Kampus Dramaga, Bogor 16680

³Departemen Fisika IPB, Kampus Dramaga, Bogor 16680

Email: wasrinsy@apps.ipb.ac.id

Diterima 11 Juni 2022, direvisi 21 Oktober 2022, disetujui 24 Oktober 2022

ABSTRACT

Electrical storage and distribution devices become important in next generation to help integrate more renewable energy into the electricity grid. Supercapacitor technology is considered the most promising alternative to Li-ion batteries, which have limited Lithium material. However, the low energy density is a weakness of supercapacitors, even though they have a high-power density. Activated carbon-based supercapacitor electrodes have ideal potential for development. The inherent attributes of activated carbon, pore properties, and functional groups, are responsible for improving the performance of supercapacitors. The main challenge for the researchers is the pore size distribution, micro (<2nm), meso (2–50 nm), and macro (>50 nm), which varied in activated carbon. Micro pores have an impact on increasing the value of specific capacitance values which will encourage an increase in energy density. Meso pores have an impact on the overall accessibility of the electrode surface by electrolyte ions. Future studies will emphasize on carbonization and activated carbon activation techniques to improve the surface quality of activated carbon.

Keywords: Activated carbon, pore size, supercapacitor, electrical storage, renewable

ABSTRAK

Piranti penyimpanan dan distribusi listrik akan menjadi sangat penting di masa depan untuk mengintegrasikan energi terbarukan ke dalam jaringan listrik. Teknologi superkapasitor dianggap sebagai alternatif yang paling menjanjikan untuk baterai Li-ion, yang memiliki bahan Lithium terbatas.. Namun, sifat kerapatan energi yang masih rendah menjadi kelemahan superkapasitor, walaupun memiliki kepadatan daya yang tinggi. Elektroda superkapasitor berbasis karbon aktif memiliki potensi ideal untuk dikembangkan. Atribut inheren karbon aktif, sifat pori dan gugus fungsi, bertanggung jawab dalam peningkatan kinerja superkapasitor. Tantangan utama para peneliti adalah distribusi ukuran pori, mikro (<2nm), meso (2 – 50 nm) dan makro (>50 nm), yang beragam pada karbon aktif. Pori mikro berdampak terhadap peningkatan nilai kapasitansi spesifik yang akan mendorong peningkatan kepadatan energi. Pori meso berdampak terhadap aksesibilitas permukaan elektroda secara keseluruhan oleh ion elektrolit. Penelitian-penelitian ke depan akan lebih memperhatikan teknik karbonisasi dan aktivasi karbon aktif untuk meningkatkan kualitas permukaan karbon aktif.

Kata kunci: Karbon aktif, ukuran pori, superkapasitor, penyimpanan energi, material terbarukan

I. PENDAHULUAN

Listrik yang berasal dari sumber energi terbarukan diperkirakan akan menyaingi bahan bakar fosil terkait emisi karbon yang rendah dan elektrifikasi panas (Green & Staffell, 2016). Namun, tantangan berikutnya adalah dalam hal pembangkitan listrik dan distribusinya yang efektif. Penggunaan batubara sebagai salah satu sumberdaya pembangkit listrik yang murah namun dinilai tidak ramah lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan peralihan bahan bakar fosil ke energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan.

Distribusi listrik yang efektif, sama pentingnya dengan pembangkitannya, itulah sebabnya penyimpan/pembawa energi listrik memainkan peran penting dalam menciptakan sistem jaringan listrik yang efektif. Karena permintaan energi listrik diperkirakan akan meningkat tahun demi tahun, sehingga kebijakan global untuk mempromosikan energi listrik dari sumber energi terbarukan adalah kebutuhan mendesak (IEA, 2018). Perkembangan paling menggembirakan di bidang alat penyimpanan energi listrik adalah melalui teknologi baterai, dan sudah menjadi bagian integral dari sistem

jaringan/cadangan daya rendah sejak beberapa dekade. Lebih jauh lagi, teknologi Li-ion telah memberi dorongan yang signifikan pada konsumen elektronik, terutama perangkat portabel karena sifat Li yang ringan. Sejak beberapa tahun, sejumlah besar pabrikan mobil telah menerapkan teknologi Li-ion untuk menggerakkan kendaraan listrik/hibrida untuk menurunkan emisi berlebihan dan meningkatkan efisiensi serta masa pakai kendaraan. Meskipun baterai isi ulang generasi mendatang ini memiliki kepadatan energi yang tinggi, namun kekurangannya adalah dalam nilai kepadatan daya rendah. Karena keinginan akan daya secara bertahap mengambil alih kepadatan energi, teknologi baterai saja tidak akan cukup untuk memberikan solusi untuk jangka panjang.

Perlu dijadikan perhatian bahwa efektivitas biaya teknologi Li-ion tidak menjanjikan di masa depan mengingat terbatasnya cadangan Lithium di alam yang terbatas. Superkapasitor, sebaliknya, menggunakan bahan yang melimpah dan tidak beracun, yang sebagian besar dibuat dari bahan awal material berlignuselulosa. Perangkat ini tidak berbahaya (tidak terpengaruh oleh penyimpangan termal dan dapat beroperasi dalam berbagai suhu, biasanya antara -40 dan 85°C), dan memiliki kepadatan daya setidaknya $10\text{--}100$ kali lipat daripada sistem baterai. Pengembangan ekstensif telah dilakukan oleh perusahaan-perusahaan besar seperti seperti Tesla Inc. (AS), dan Mazda (Jepang) termasuk pabrikan inti seperti Maxwell, Nippon, Skeleton Technology, dan Yunasko. Proyek besar ini bertujuan untuk mengganti teknologi baterai dengan teknologi superkapasitor pada kendaraan listrik (Miller, Miller, & Smith, 2016; Pikkarainen, 2016). Meskipun teknologi superkapasitor saat ini sebagian besar digunakan untuk menyediakan dukungan penyimpanan untuk rangkaian baterai, namun kampanye perangkat penyimpanan yang ramah lingkungan dan efektif telah dimulai.

Penyimpanan energi listrik pada superkapasitor melalui mekanisme kapasitif mengikuti proses adsorpsi muatan elektrostatik dan tidak melibatkan reaksi kimia kompleks seperti yang terjadi pada baterai. Ini tidak hanya menjadikan superkapasitor memiliki kecepatan pengisian yang cepat (kepadatan daya tinggi), tetapi juga mencegah bahaya seperti terbakar atau meledak. Namun demikian, ada pertukaran antara daya dan energi, yang ditentukan oleh parameter waktu. Densitas power/daya superkapasitor yang tinggi membuat mereka memiliki nilai kepadatan energi yang lebih kecil. Superkapasitor berdasarkan bahan yang berasal dari karbon atau turunannya (seperti karbon aktif, grafena/oksida

grafena tereduksi) bersifat elektrostatis alami. Sifat elektrostatis melingkupi formasi lapisan ganda Helmholtz melalui adsorpsi dan interaksi *coulombik* (kebanyakan dikenal sebagai mekanisme lapisan ganda listrik) untuk akumulasi muatan pada permukaan elektroda. Hanya sedikit yang dapat dilakukan untuk mencapai kepadatan energi yang lebih tinggi dalam superkapasitor berbasis karbon ini dan memerlukan perancangan material yang ekstensif untuk mencapai kepadatan energi yang lebih baik. Demikian, upaya terus menerus telah dilakukan untuk menyusun kembali sistem baterai yang akan secepat superkapasitor, atau meningkatkan kinerja superkapasitor. Dalam konteks ini, bahan yang memiliki sifat reduksi-oksidasi sangat penting, terutama yang memiliki morfologi yang unggul seperti graphene/oksida graphene tereduksi (Yu & Chen, 2016). Kemudian, konsep *pseudocapacitance* telah muncul sehingga memungkinkan teknologi superkapasitor untuk mencapai kepadatan energi yang ditingkatkan tanpa mengorbankan kepadatan daya. Selain itu, ada sejumlah besar laporan tentang bahan yang murni bersifat faradik, tetapi diklaim ideal untuk elektroda superkapasitor (Ghosh, Giri, Mandal, & Das, 2014; Jiang et al., 2016; Lakshmi, Ranjusha, Vineeth, Nair, & Balakrishnan, 2014; Meher & Rao, 2011).

Seperti yang telah dibahas di atas, superkapasitor seharusnya bekerja dengan metode yang cukup mudah (adsorpsi elektrostatik pada permukaan elektroda) yang memungkinkan sebagian besar bahan elektroda memiliki luas permukaan yang tinggi sehingga mampu menampung muatan listrik dalam skala besar. Oleh karena itu, para peneliti menggunakan berbagai metode fabrikasi yang akan menghasilkan lapisan tipis bahan elektroda pada berbagai kolektor arus. Preferensi diberikan untuk bahan elektroda yang memiliki struktur dua dimensi atau struktur berlapis, dengan lapisan yang ditumpuk melalui gaya tarik *Van der Waals* yang lemah. Baterai, sebaliknya, menggunakan elektroda massal yang membuat seluruh proses pengisian/pemakaian cukup rumit untuk menghasilkan kepadatan energi yang tinggi. Metode fabrikasi elektroda yang tipis pada berbagai kolektor arus dan sifat elektrokimia menjadi perhatian khusus para peneliti.

Tinjauan Pustaka ini bertujuan untuk menyediakan informasi ilmiah tentang aplikasi karbon aktif sebagai material elektroda superkapasitor. Topik-topik yang akan dibahas meliputi sintesis karbon aktif, karakteristik parameter kunci dan pengaruh karakteristik karbon aktif terhadap kinerja penyimpanan energi superkapasitor. Bagian sintesis karbon aktif mencakup preparasi bahan baku, jalur

pirolisis, dan prosedur aktivasi (fisik, kimia). Topik karakteristik parameter kunci karbon aktif membahas tentang ukuran pori dan distribusi pori, luas area permukaan, dan sifat konduktivitas. Sementara karakteristik elektroda berbasis karbon aktif di bahas secara detail pada bagian khusus.

II. SINTESIS KARBON AKTIF

Bahan berbasis karbon adalah kandidat yang sangat baik untuk superkapasitor tipe EDLC, terutama karena sifat permukaan, gugus fungsi dan konduktivitas listriknya. Material karbon dengan luas permukaan tinggi, seperti karbon aktif/karbon berpori, karbon yang digabungkan dengan heteroatom untuk *pseudocapacitance* dan *graphene* saat ini menjadi topik penelitian yang menarik. Pada makalah ini, bahan karbon aktif menjadi pilihan sebagai topik utama.

Karbon aktif dihasilkan melalui aktivasi fisik atau kimiawi dari berbagai material berlignoselulosa. Aktivasi fisik terutama menggunakan perlakuan panas (dari 700 hingga 1200°C) dengan atau tanpa bantuan gas pengoksidasi untuk menghasilkan struktur berpori (Zhang & Zhao, 2009). Aktivasi kimiawi dilakukan pada suhu yang lebih rendah (dari 400 hingga 700°C) dengan menggunakan beberapa asam kuat (misalnya H₃PO₄), basa (misalnya KOH), atau garam korosif seperti ZnCl₂ (Barbieri, Hahn, Herzog, & Kötz, 2005; Raymundo-Piñero et al., 2002). Tingkat aktivasi dapat dikontrol untuk mendapatkan karbon aktif dengan tingkat porositas dan luas permukaan yang bervariasi. Luas permukaan dapat ditingkatkan hingga 3000 m²/g. Kelemahan karbon aktif untuk aplikasi superkapasitor adalah distribusi ukuran pori beragam, terdiri dari pori mikro (<2 nm), mesopori (2–50 nm) dan pori makro (>50 nm). Karena tidak semua pori-pori ini dinyatakan efektif untuk penyimpanan energi superkapasitor, pori-pori yang berlebihan ini tidak hanya meningkatkan volume bahan elektroda, tetapi juga menghambat konduktivitas listrik (Zhang & Zhao, 2009). Sebagian besar ion elektrolit berair dapat mengakses pori mikro sekitar 1 nm, sedangkan elektrolit organik tidak dapat mengakses, karena ukuran ion elektrolit organik yang lebih besar dari 1 nm. Oleh karena itu, ketika elektroda superkapasitor berbasis karbon aktif diuji dalam elektrolit berair (100–300 F/g), kapasitansi spesifik lebih tinggi daripada yang diuji dalam elektrolit organik yang memiliki nilai kapasitansi 150 F/g) (Salitra, Soffer, Eliad, Cohen, & Aurbach, 2000). Namun, sebagian besar superkapasitor komersial menggunakan elektrolit organik untuk tegangan operasi yang lebih tinggi. Dengan demikian,

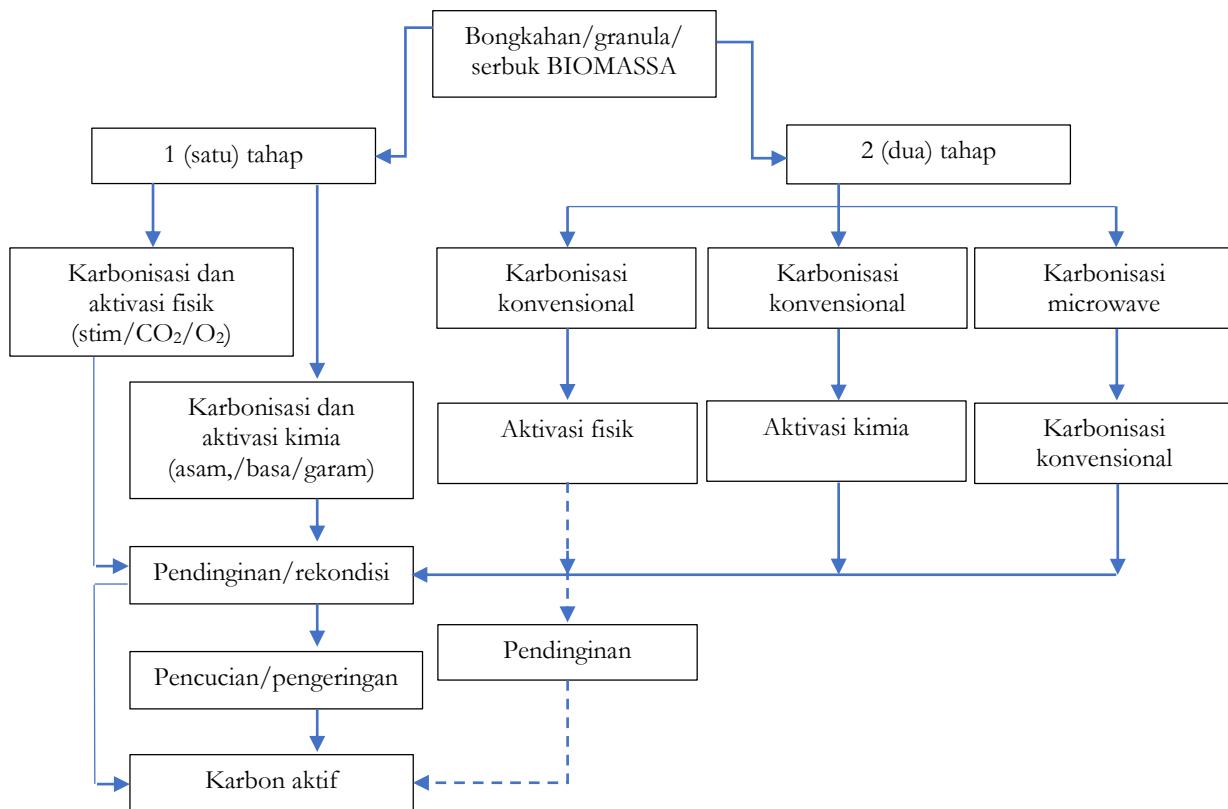
tantangan utama penggunaan karbon aktif sebagai elektroda superkapasitor adalah mempersempit distribusi ukuran pori dan mengurangi pori meso dan makro.

Para peneliti berusaha mempersempit distribusi pori yang dimiliki arang aktif dengan berbagai metode dimulai tahapan persiapan bahan baku, perlakuan karbonisasi dan tahapan aktivasi. Bahkan kombinasi sdari lebih 1 (satu) perlakuan dilakukan dalam upaya pencarian karakteristik karbon aktif unggul (Darmawan, 2014). Pada bagian ini akan dibahas fabrikasi karbon aktif secara lebih mendalam berdasarkan bahan baku dan perlakuan yang pernah dilakukan. Secara umum, skema fabrikasi karbon aktif dijelaskan oleh Gambar 1.

Aktivasi fisik dapat dilakukan 1 langkah atau 2 tahap: karbonisasi/pirolisis dan aktivasi menggunakan CO₂, uap air atau gas pengoksidasi lainnya. Aktivasi kimiawi dapat dilakukan 1 langkah atau 2 tahap: bahan prekursor diresapi dengan larutan kimia dan dipanaskan dalam atmosfer gas inert atau oksidasi. Uap biasanya lebih disukai karena molekul yang lebih kecil dan laju difusi yang lebih besar. Larutan aktivasi utama adalah logam alkali (misalnya KOH, K₂CO₃, NaOH, dan Na₂CO₃), logam alkali tanah (misalnya AlCl₃, FeCl₃, dan ZnCl₂) dan beberapa asam (misalnya H₃PO₄ dan H₂SO₄). Sementara kombinasi aktivasi fisik dan kimiawi (fisikokimia): 1) karbonisasi dengan impregnasi kimiawi ke prekursor mentah diikuti dengan aktivasi fisik; 2) karbonisasi dan aktivasi arang yang terimpregnasi dalam gas pengoksidasi atau atmosfer gas inert.

A. Material Biomassa untuk Karbon/Karbon Aktif

Biomassa kayu dapat diproduksi dalam rotasi pendek, dan bisa juga digunakan sebagai prekursor berkelanjutan untuk produksi karbon aktif. Konversi biomassa kayu menjadi karbon aktif tidak hanya menjadikannya bahan yang lebih serbaguna untuk aplikasi masal tetapi juga mengekang pembentukan CO₂ dan CH₄ sebagai sumber gas rumah kaca utama. Bahan kimia lignoselulosa adalah penyusun utama biomassa kayu. Konstituen serat kayu memiliki kontribusi yang signifikan dalam pembuatan karbon aktif granular. Selulosa mengandung sebagian unit polisakarida linier yang memiliki sekitar 3000-unit glukosa dalam satu rantai. Unit selulosa dan hemiselulosa sangat mirip satu sama lain, yang berbeda dalam jumlah unit sakarida. Hemiselulosa terdiri dari sejumlah kecil unit sakarida dibandingkan dengan selulosa. Persentase unsur rata-rata dalam



Gambar 1. Skema sintesis karbon aktif dari biomassa berlignuselulosa
Figure 1. Schematic of the synthesis of activated carbon from lignocellulose biomass

hemiselulosa adalah: karbon 44,4%, oksigen 49,4%, dan hidrogen 6,2% berat. Bagian lignin dari biomassa kayu memiliki susunan molekul yang sangat kompleks. Susunan polimer 3-D unit fenilpropana dalam lignin dihubungkan bersama oleh ikatan C–O–C atau C–C. Jenis ikatan kimia dalam lignin ini menghasilkan persen karbon yang lebih tinggi (62% berat) dan persen oksigen lebih rendah (32% berat) dalam molekul. Ikatan C–O–C dan C–C tidak hanya terhubung ke unit fenilpropana tetapi juga terkait dengan unit hemiselulosa dan selulosa. Dengan demikian, satuan lignin kayu berfungsi sebagai bahan pengikat struktur lignoselulosa (Jibril, Houache, Al-Maamari, & Al-Rashidi, 2008). Unsur kimia utama biomassa kayu adalah hemiselulosa, selulosa, dan lignin; dan komponen kimia minor adalah protein dan minyak. Secara rata-rata, proporsi kuantitatif hemiselulosa, selulosa, dan lignin dalam biomassa kayu pada kisaran (20–35%, 40–50%, dan 15–35%). Selama pirolisis biomassa, dekomposisi hemiselulosa dilaporkan pada kisaran suhu 200–260 °C, diikuti oleh dekomposisi selulosa pada kisaran suhu 240–350°C, dan lignin terdegradasi pada kisaran suhu 280–500°C. Hilangnya massa dalam kisaran suhu 240–400°C terutama disebabkan oleh pemotongan rantai dan mineralisasi lignin dan unit selulosa dengan memutus

ikatan C–C dan C–O dalam cincin glikopiranosa dengan penguapan molekul air, CO, dan CO₂ (Macedo et al., 2008). Konstituen kimiawi dari berbagai spesies kayu disajikan pada Tabel 1.

B. Preparasi Material Karbon Aktif: Karbonisasi/Pirolisis

Karbonisasi atau pirolisis adalah dekomposisi termal bahan mentah dalam tungku di dalam atmosfer inert untuk menghilangkan spesies non-karbon yang mudah menguap seperti nitrogen, oksigen, dan hidrogen dan untuk meningkatkan kandungan karbon tetap untuk menghasilkan biochar (Radenahmad et al., 2020). Selama proses devolatilisasi, struktur pori prekursor yang asalnya sempit mulai berkembang yang mengarah pada pengendapan zat saat suhu naik (Alhinaid, Azad, Bakar, & Phusunti, 2018). Pengendapan ini dapat menyebabkan runtuhnya dinding pori-pori yang dapat mengakibatkan perombakan ikatan air dan pengendapan karbon murni. Suhu karbonisasi adalah yang paling penting karena memiliki pengaruh signifikan pada proses, diikuti oleh laju reaksi pemanasan, jumlah gas inert dan laju alirnya dan waktu penahanan/retensi. Umumnya, ketika suhu dinaikkan, spesies yang

Tabel 1. Komposisi kimia beberapa biomassa untuk material karbon aktif
Table 1. Chemical composition of biomasses for activated carbon material

Peneliti (Researcher)	Bahan (Material)	Hemiselulosa (Hemicellulose, %)	Selulosa (Cellulose, %)	Lignin (Lignin, %)
(Nawawi et al., 2018)	Mindi	36,53		24,33
	Sengon	32,03		24,34
	Pinus	25,05		27,28
	Mangium	36,25		32,68
	Jati	31,07		28,23
	Bambu	24,2–36,18		23,55–27,14
(Yuniarti, 2011)	Jengkol		44,73	32,14
	Madang		45,02	31,69
	bangkinang		45,76	20,90
(Daud, Makassar, Syafii, & Syamsu, 2012)	Sengon	15,52	41,30	26,90
(Amin, Syafii, Wistara, & Prasetya, 2014)	Jabon	29,96		25,20
(Daud, Syafii, & Syamsu, 2012)	Pulp pinus - delignifikasi	10,84	85,74	3,21
	Pulp sengon - delignifikasi	11,18	85,00	2,23
	Pulp gmelina - delignifikasi	8,96	85,96	2,7
(Syafii & Siregar, 2006)	Mangium	23,26	60,29	21,98

mudah menguap dilepaskan seiring dengan peningkatan kandungan karbon tetap serta kandungan abu. Namun, hal ini mengurangi rendemen karbon yang dihasilkan. Penurunan rendemen tersebut diduga disebabkan oleh dekomposisi primer (devolatilisasi) biomassa pada temperatur tinggi dan dekomposisi sekunder (*cracking*) residi biochar. Akibatnya, suhu yang lebih tinggi menghasilkan produk karbon dengan kualitas yang lebih baik, namun rendemen yang kecil (Reza et al., 2020).

Proses karbonisasi/pirolisis merupakan fase untuk memperkaya kandungan karbon dalam bahan berkarbon dengan cara menghilangkan spesies non karbon menggunakan dekomposisi termal. Porositas awal produk karbonisasi/pirolisis walaupun masih tergolong rendah, dapat dikembangkan oleh proses aktivasi. Dalam proses ini, temperatur karbonisasi memiliki pengaruh signifikan, diikuti oleh laju pemanasan, laju aliran nitrogen, dan terakhir waktu ditahannya proses karbonisasi/pirolisis (Cagnon, Py, Guillot, Stoeckli, & Chambat, 2009; Ioannidou & Zabaniotou, 2007; Suhas, Carrott, & Ribeiro Carrott, 2007). Biasanya, suhu karbonisasi yang lebih tinggi

(600–700°C) menghasilkan penurunan hasil karbon/arang sekaligus meningkatkan laju pelepasan cairan dan gas (Ioannidou & Zabaniotou, 2007). Untuk mendapatkan volatilisasi yang rendah dan hasil arang yang tinggi, laju pemanasan yang rendah (10–15 °C/menit) harus digunakan. Produk karbonisasi memiliki kandungan karbon tetap yang tinggi untuk menghasilkan karbon aktif. Laju pemanasan yang lebih rendah akan meningkatkan dehidrasi dan meningkatkan stabilisasi komponen polimer (Ioannidou & Zabaniotou, 2007; Suhas et al., 2007). Namun, mikroporositas arang tidak tergantung pada komposisi prekursor dan laju pemanasan karbonisasi (Suhas et al., 2007). Parameter karbonisasi memberikan kontribusi yang tinggi dalam pengembangan struktur awal pori pada arang, terutama melalui pelepasan senyawa volatil dari matriks karbon. Karena perkembangan pori pada arang memiliki pengaruh yang besar pada karakteristik pori karbon aktif yang dihasilkan selanjutnya, parameter karbonisasi harus diperhitungkan secara detail sebelum proses aktivasi.

C. Aktivasi fisik

Karbon aktif terdiri dari gugus fungsi yang terikat pada cincin aromatik, yang diharapkan memiliki sifat kimia yang mirip dengan yang ada pada hidrokarbon aromatik. Gugus fungsi permukaan pada matriks karbon dapat dimanipulasi dan disesuaikan dengan perlakuan termal, hidro-termal atau kimiawi untuk fungsi tertentu. Aktivasi fisik dan kimia adalah teknik umum untuk aktivasi karbon aktif. Aktivasi kimia biasanya lebih disukai karena kesederhanaan, waktu aktivasi yang lebih pendek, rendemen lebih tinggi, suhu yang lebih rendah dan perkembangan struktur berpori yang lebih baik. Suhu, waktu reaksi dan rasio impregnasi adalah variabel penting untuk tingkat reaksi karbonisasi, dan sifat karbon aktif yang dihasilkan. Belakangan ini, pengaktifan gelombang mikro (MW) menjadi alternatif untuk metode konvensional dalam persiapan karbon aktif, terutama karena karakteristik uniknya seperti pemanasan cepat, selektif, seragam dan volumetrik, kontrol instan dan akurat, kontak tidak langsung antara sumber pemanas dan bahan yang dipanaskan.

Aktivasi fisik biasanya dilakukan dalam dua langkah. Langkah pertama adalah karbonisasi, dengan tujuan untuk menghilangkan zat-zat yang mudah menguap pada suhu rendah. Sedangkan pada langkah kedua, aktivasi zat berkarbonisasi yang dilakukan pada suhu yang lebih tinggi. Penggunaan gas inert selama proses karbonisasi dan aktivasi bersifat opsional. Pembakaran biomassa karbon berserat dapat dicegah dengan adanya gas, seperti uap, N₂, CO₂, Argon, atau campuran diantaranya. Biasanya N₂ paling sering digunakan sebagai gas atmosfir selama proses aktivasi, karena dapat mengeluarkan gas oksigen dari ruang pirolysis. Akibatnya, pembakaran biomassa dapat dibatasi. Gas nitrogen bersifat bersih, mudah ditangani, dan tersedia dengan biaya rendah. Gas N₂ membantu untuk mengontrol ruang pirolysis pada proses aktivasi. Selama karbonisasi, prekursor kayu dipirolysis pada suhu yang relatif rendah untuk menghilangkan zat berberat molekul rendah dan residu organik yang mudah menguap. Pada langkah selanjutnya, aktivasi berlangsung pada rentang temperatur dari 700°C hingga 1100°C dengan adanya gas pendukung yang dapat mencegah pembentukan CO₂ dan menghasilkan pori-pori dengan ukuran yang beragam pada karbon aktif selama proses aktivasi (Maciá-Agulló, Moore, Cazorla-Amorós, & Linares-Solano, 2004). Parameter yang digunakan selama proses aktivasi adalah waktu karbonisasi, temperatur aktivasi, dan laju alir gas (*steam*, CO₂, N₂), yang akan menentukan kualitas karbon aktif. Parameter yang sama diterapkan juga untuk aktivasi produk karbonisasi menjadi karbon aktif.

Waktu aktivasi dan suhu memiliki efek yang luar biasa pada morfologi muka, luas permukaan, dan ukuran pori. Tseng, Wu, and Juang (2003) melaporkan pengaruh waktu aktivasi pada luas permukaan dan diameter pori karbon aktif kayu pinus. Diameter pori meningkat dari 28,3 menjadi 33,3 Å, dan luas permukaan meningkat hampir dua kali lipat (426 m²/g menjadi 902 m²/g) dengan kenaikan waktu aktivasi dari 0,5 menjadi 4,0 jam pada suhu aktivasi 900°C. Studi ini menunjukkan bahwa waktu aktivasi memiliki kontribusi yang signifikan dalam menghilangkan sejumlah besar zat untuk membuka pori-pori. Akibatnya, terjadi peningkatan luas permukaan dan pembesaran diameter pori. Cuerda-Correa et al. (2006) melaporkan pengaruh waktu dan suhu pada ukuran pori dan luas permukaan karbon aktif kayu cedar. Dengan adanya laju aliran nitrogen pada 100 mL/min pada suhu karbonisasi 600°C, 700°C dan 800°C. Kemudian sampel yang dikarbonisasi dengan adanya CO₂ dengan laju alir 100 mL/min diaktifkan pada temperatur 600, 700, dan 800 °C selama 2 dan 4 jam. Penulis membandingkan luas permukaan sampel kayu cedar karbon aktif dan kayu cedar berkarbonisasi. Aktivasi kayu cedar menjadi karbon aktif dengan adanya gas CO₂, zat pengaktif, dan atom karbon berbentuk gas dimulai dengan pembentukan kompleks permukaan. Kompleks permukaan yang terbentuk menunjukkan stabilitas yang cukup hingga 800°C, tetapi mulai degradasi kompleks pada 900°C, dalam bentuk karbon monoksida.

Ada kecenderungan bahwa waktu aktivasi yang lebih lama akan memberikan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi pada karbon aktif, begitu pula sebaliknya. Ternyata menunjukkan bahwa waktu aktivasi tidak mempengaruhi karakteristik permukaan karbon aktif kayu ek pada suhu 700°C secara substansial. Sedangkan pada temperatur aktivasi 800°C selama 1 jam dan waktu aktivasi 2 jam memiliki perbedaan yang signifikan pada diameter pori, volume pori total, dan luas permukaan. Karbon aktif yang diperoleh dari 1 jam waktu aktivasi ternyata memiliki diameter pori, volume pori total, dan luas permukaan yang jauh lebih sedikit dibandingkan dengan waktu aktivasi 2 jam. Terlihat dari penelitian bahwa struktur pori dan luas permukaan karbon aktif kayu ek berubah secara signifikan selama perubahan waktu aktivasi pada suhu penggerak 800°C. Hasil percobaan mengungkapkan bahwa asal yang berbeda dari bahan prekursor (pinus dan ek) berperilaku berbeda di bawah kondisi ini (Cuerda-Correa et al., 2006; Tseng et al., 2003).

D. Aktivasi Kimia

Metode aktivasi kimiawi melibatkan impregnasi antara material oleh bahan kimia dehidrasi sebelum atau sesudah langkah karbonisasi. Tujuan aktivasi kimia secara umum adalah mengeringkan prekursor dan menghilangkan tar dari bahan biomassa. Berbagai bahan pengaktif kimiawi seperti asam sulfat, asam nitrat, asam fosfat, seng klorida, kalium hidroksida, natrium hidroksida atau kalsium karbonat dapat digunakan. Agen kimia memfasilitasi untuk membentuk dan mengembangkan pori-pori karbon aktif menggunakan degradasi, dehidrasi, dan kompleksasi dengan molekul karbon organik bahan prekursor. Aktivasi kimiawi dilakukan pada suhu yang lebih rendah dibandingkan dengan aktivasi fisik. Hal ini terjadi karena ada interaksi kimia antara residu kimia prekursor dan zat pengaktif. Aktivasi kimiawi memiliki banyak manfaat dibandingkan dengan aktivasi fisik.

Dalam aktivasi kimiawi, proses karbonisasi dan aktivasi digabungkan dalam satu langkah yang menghemat energi panas. Selain itu, aktivasi kimiawi dilakukan pada suhu yang lebih rendah dibandingkan dengan aktivasi fisik; dengan demikian, ini juga menghemat energi. Manfaat utama lainnya adalah hasil yang lebih tinggi, waktu aktivasi yang lebih sedikit, penggabungan gugus fungsi yang sesuai, dan luas permukaan karbon aktif yang lebih besar. Kelemahan utama dari proses aktivasi kimiawi adalah biaya bahan kimia, dan diperlukan langkah tambahan untuk mencuci karbon aktif dengan air panas dan dingin untuk menghilangkan kelebihan bahan kimia yang tidak bereaksi dan limbah kimia (Oh & Park, 2002). Yang harus menjadi perhatian khusus pada proses aktivasi kimia adalah penanganan limbah kimia, dan ini menjadi isu lingkungan.

Aktivasi kimia dapat dilakukan pada produk karbonisasi berbentuk granular atau bubuk halus (*powder*). Prekursor bentuk bubuk memastikan homogenitas antara zat pengaktif dan campuran prekursor kayu. Untuk prekursor tipe granular, tahap pencemaran harus dilakukan dengan perhatian khusus untuk memastikan pencampuran prekursor dan reagen secara sempurna. Pemilihan zat pengaktif lebih penting untuk menghasilkan karbon aktif granular, karena spesies kayu prekursor menggumpal dengan adanya zat pengaktif kimiawi tertentu. Misalnya, kayu *Acacia mangium* yang diaktifkan dengan KOH membentuk serpihan karbon yang sangat rapuh dan dengan mudah diubah menjadi bubuk halus. Kondisi ini tidak terjadi ketika asam fosfat dipilih sebagai aktivator kimia. Kayu yang sama dengan ukuran partikel yang sama yang diaktivasi dengan asam fosfat menghasilkan karbon aktif

granular dengan bentuk dan ukuran partikel kayu prekursor yang hampir sama (M. Danish, Hashim, Ibrahim, & Sulaiman, 2013; Mohammed Danish et al., 2011). Agen kimia dehidrasi yang umum digunakan adalah H_3PO_4 , $ZnCl_2$, KOH, NaOH, atau H_2SO_4 . Asam fosfat paling ideal untuk biomassa kayu, karena sangat efektif dalam pengaktifan kayu, ekonomis, dan aman lingkungan (Yahya, Al-Qodah, & Ngah, 2015).

Penggunaan H_3PO_4 selama proses aktivasi meningkatkan depolimerisasi, dehidrasi, dan redistribusi biopolimer penyusun. Aktivator H_3PO_4 juga mendukung konversi alifatik menjadi senyawa aromatik, sehingga meningkatkan hasil karbon aktif. H_3PO_4 memiliki dua fungsi penting: (i) meningkatkan dekomposisi pirolitik dari bahan awal dan (ii) mendorong pembentukan struktur ikatan silang (Budinova et al., 2006). Karakter H_3PO_4 membantu dalam pembentukan mikro dan mesopori dalam karbon aktif. Heidari, Younesi, Rashidi, & Ghoreyshi (2014) melaporkan metode aktivasi kimia untuk persiapan karbon aktif dari kayu *Eucalyptus camaldulensis* menggunakan $ZnCl_2$, H_3PO_4 , dan KOH. Dari pengamatan diketahui bahwa jenis zat pengaktif dan konsentrasi mengatur luas permukaan dan volume pori pada karbon aktif kayu ekaliptus. Luas permukaan dan porositas Brunauer-Emmitt-Teller (BET) meningkat dalam urutan sebagai berikut: KOH > H_3PO_4 > $ZnCl_2$. Berdasarkan hasil tersebut, agen KOH menghasilkan luas permukaan BET yang besar dan persentase volume mikropori yang tinggi. Porositas dibuat oleh senyawa kimia yang tersisa di dalam struktur internal bahan lignoselulosa, yang menyebabkan penyusutannya. Dalam kasus aktivasi H_3PO_4 , asam dan turunannya (asam polifosfat) berinteraksi dengan komponen organik fungsional kayu. Membentuk keterkaitan fosfat seperti ester fosfat dan polifosfat yang menghubungkan dan mengait silang pada biopolimer. Pori-pori terbentuk karena pembentukan keterkaitan ini yang memperluas struktur biomassa. Senyawa polifosfat lebih besar dibandingkan dengan $ZnCl_2$, yang mengisi berbagai ukuran pori dan mengarah pada pembuatan mesopori berukuran lebih besar. Namun, $ZnCl_2$ dan hidratnya sebagian besar menyebabkan ukuran mikropori yang kecil dan seragam. Luas permukaan BET maksimum yang diperoleh dikaitkan dengan penurunan kandungan O_2 , H_2 , dan N_2 dari biomassa selama setiap fase aktivasi, membentuk adsorben karbon berpori nano dengan luas permukaan yang besar dan porositas tinggi untuk adsorpsi fase gas. Konsentrasi H_3PO_4 yang sesuai berfungsi sebagai agen dehidrasi yang efektif, yang dapat menembus dan memperbesar struktur serat kayu. Pada saat yang bersamaan mengeluarkan molekul organik seperti flavanol dan

fenol dari kayu. Oleh karena itu, karbon aktif memiliki luas permukaan yang besar dengan kepadatan mesopori yang tinggi.

E. Aktivasi hidrotermal

Selama karbonisasi hidrotermal, air bertindak sebagai pelarut dan juga sebagai katalis yang memfasilitasi hidrolisis dan pembelahan biomassa lignoselulosa (Bolleter, 1994; Hatcher & Clifford, 1997). Sifat ini berasal dari konstanta ionisasi air yang tinggi pada suhu tinggi dan berperan dalam hidrolisis organik yang selanjutnya dapat dikatalisis oleh asam atau basa (Bolleter, 1994; Libra et al., 2011; Maria M. Titirici, Thomas, Yu, Müller, & Antonietti, 2007; Maria Magdalena Titirici, White, Falco, & Sevilla, 2012). Penurunan pH selama karbonisasi hidrotermal biomassa biasanya disebabkan oleh pembentukan berbagai asam organik seperti asam asetat, levulinat, format dan laktat. Kehadiran asam organik ini selanjutnya mendorong hidrolisis dan dekomposisi oligomer dan monomer menjadi fragmen yang lebih kecil (Demir-Cakan, Baccile, Antonietti, & Titirici, 2009; Maria M. Titirici et al., 2007; Ziegler, 2009). Secara umum, suhu yang lebih tinggi akan menghasilkan laju reaksi yang tinggi dan menghasilkan produk gas, sementara penurunan suhu akan menurunkan laju reaksi dan menghasilkan produk padat. Hidrolisis dapat menyebabkan disintensi lengkap dari struktur fisik biomassa dan mengakibatkan terjadinya peningkatan jumlah partikel karbon koloid. Dengan peningkatan suhu proses hingga 220°C dan tekanan yang sesuai hingga sekitar 20 bar, sekitar 1–5% gas biasanya dihasilkan, dan sebagian besar bahan organik dalam bahan baku biomassa diubah menjadi padatan. Konversi limbah biomassa dalam kondisi ringan (200°C selama 16 jam), menjadi karbon hidro yang secara kimia dan spektroskopi mirip dengan gambut atau lignit, tergantung pada waktu dan suhu (Maria M. Titirici et al., 2007). Hal ini menunjukkan bahwa karbonisasi hidrotermal adalah teknik konversi limbah yang menjanjikan, yang pada akhirnya mengubah bahan biomassa/limbah lignoselulosa menjadi produk yang memiliki nilai tambah.

Setelah karbonisasi hidrotermal, ion hidronium dihasilkan untuk hidrolisis karbohidrat, ion hidronium juga berperan dalam penentuan pH. Sevilla and Fuertes (2009) telah menyelidiki secara ekstensif pembentukan partikel hidrokar yang berasal dari sukrosa dan pati. Sukrosa mengalami hidrolisis dan mengarah pada pembentukan glukosa dan fruktosa sedangkan pati membentuk maltosa (oligosakarida), glukosa dan fruktosa (dari isomerisasi glukosa) (Ziegler, 2009). Pada saat yang sama,

dekomposisi glukosa dan fruktosa mengarah pada pembentukan asam organik (misalnya, asam asetat, laktat, propenoat, levulinat, dan format) (Amarasekara & Ebede, 2009; Antal, Mok, & Richards, 1990; Girisuta, Janssen, & Heeres, 2006; Titirici et al., 2012). Penurunan pH karena pelepasan asam organik mengkatalisis hidrolisis (Titirici et al., 2012; Ziegler, 2009) oligosakarida menjadi monosakarida yang selanjutnya mengalami dehidrasi dan fragmentasi (pembukaan cincin dan pemutusan ikatan C–C) menghasilkan produk yang dapat larut.

III. DAMPAK SIFAT KARBON AKTIF TERHADAP KINERJA SUPERKAPASITOR

A. Ukuran Pori dan Distribusi Pori

Kapasitansi lapisan ganda listrik sangat bergantung pada distribusi pori dan ukuran pori bahan karbon. Karbon umumnya dirancang untuk menggabungkan kedua pori mesopori (2–50 nm) dan mikropori (<2 nm) yang dianggap penting dalam pengembangan penyimpanan energi, dan menghasilkan kinerja daya elektroda (Chmiola, Yushin, Dash, & Gogotsi, 2006). Sementara kapasitansi secara teoritis proporsional dengan luas permukaan elektroda, penelitian telah menunjukkan sebagian besar hasil kapasitansi tinggi yang diperoleh dari elektroda karbon berpori karena adanya mikropori. Mesopori tetap diperlukan dalam mempertahankan mobilitas elektrolit yang tinggi di seluruh material untuk mengakses mikropori. Hal ini diperlukan untuk mengurangi resistansi yang menghalangi memenuhi kebutuhan daya tinggi dalam interval waktu yang singkat. Kapasitansi maksimum dan kinerja daya yang diawetkan untuk EDLCs membutuhkan porositas material yang optimal (Frackowiak, 2007). Perilaku interaksi ion elektrolit terhadap pori mikro dan meso pada nilai kapasitansi silinder ganda listrik (EDCC) dan kapasitansi kawat-dalam-silinder listrik (EWCC) telah dijelaskan secara detail oleh Huang, Sumpster, & Meunier (2008b, 2008a).

B. Luas Area Permukaan

Paradigma awal terhadap konsep luas permukaan adalah bahwa luas permukaan spesifik yang besar secara langsung menghasilkan kapasitansi yang lebih tinggi. Pori mikro (<2nm), berkorelasi dengan luas permukaan tinggi, berkontribusi terhadap nilai kapasitansi secara langsung (Chmiola, Yushin, Gogotsi, et al., 2006). Namun tekstur dan kimia permukaan adalah faktor kembar yang menentukan kinerja elektrokimia bahan karbon. Tekstur permukaan karbon aktif dapat disesuaikan untuk

aplikasi tertentu melalui kondisi aktivasi sehingga menghasilkan proporsi mikro, meso dan pori makro yang bervariasi; gugus fungsional permukaan dapat dimodifikasi dengan perlakuan termal dan kimia (El-Sayed & Bandosz, 2004). Perlakuan termal dilakukan dengan menggunakan metode pemanasan konvensional atau pemanasan gelombang mikro. Perlakuan termal yang digunakan biasanya pada suhu tinggi (700–1000°C) di bawah hidrogen atau atmosfer inert (nitrogen atau helium) yang menghasilkan pembuangan selektif beberapa asam permukaan (Figueiredo, Pereira, Freitas, & Órfão, 1999).

Modifikasi gugus fungsi permukaan bahan karbon biasanya menyebabkan perubahan pada sifat lapisan ganda seperti keterbasahan, kapasitansi, konduktivitas listrik, titik muatan nol dan karakteristik pemecahan ikatan karbon (Pandolfo & Hollenkamp, 2006). Heterogenitas kimia permukaan yang terkait dengan keberadaan heteroatom menentukan sifat kimiawi karbon aktif. Contoh heteroatom yang biasa diterapkan pada karbon aktif adalah oksigen, hidrogen, nitrogen, sulfur, halogen, dan fosfor. Heteroatom ini dapat berasal dari bahan awal dan menjadi bagian dari struktur kimia karena karbonisasi yang tidak lengkap atau diimpregnasi pada proses aktivasi (El-Sayed & Bandosz, 2004; Pandolfo & Hollenkamp, 2006; Shafeeyan, Daud, Houshmand, & Shamiri, 2010). Gugus fungsi oksigen permukaan terutama gugus karboksilat, lakton, fenol, karbonil, pirones, chromene, kuinon dan eter dapat diklasifikasikan menjadi asam, basa dan netral tergantung pada sifat kimianya. Pembentukan oksida permukaan ini tidak hanya bergantung pada metode pembuatan karbon tetapi juga pada suhu saat karbonisasi (Pandolfo & Hollenkamp, 2006). Gugus permukaan asam seperti karboksilat, laktonik, dan fungsi fenolik yang dianggap tidak stabil biasanya dibentuk baik dengan mengekspos karbon ke oksigen pada suhu antara 200°C dan 700°C atau ketika karbon bereaksi dengan larutan pengoksidasi pada suhu kamar (Pandolfo & Hollenkamp, 2006). Di sisi lain, pembentukan oksida permukaan basa dan netral yang dianggap lebih stabil terjadi pada temperatur rendah ketika permukaan karbon yang bebas dari semua senyawa permukaan akibat perlakuan panas kontak dengan oksigen (Pandolfo & Hollenkamp, 2006).

C. Konduktivitas Listrik

Konduktivitas bahan karbon sangat dipengaruhi oleh dua faktor utama: struktur dan fungsi bahan intrinsik. Dengan meningkatkan urutan grafitisasi bahan karbon melalui peningkatan suhu pirolisis, peningkatan dalam hal konduktivitas listrik dapat dicapai dengan baik (Pandolfo & Hollenkamp, 2006).

Namun, hal ini memerlukan penyelidikan lebih lanjut tentang peningkatan konduktivitas ketika material mengalami kehilangan area aktif. Konduktivitas listrik juga dapat dipengaruhi secara negatif oleh penggabungan gugus fungsi (oksigen, nitrogen, boron) yang secara statistik memiliki laju pengikatan yang lebih tinggi pada bidang tepi. Sehingga bagian ini dapat menghambat perpindahan elektron di antara struktur kristal dari material dimaksud. Berlawanan dengan hilangnya konduktivitas listrik, gugus fungsi dapat meningkatkan konduktivitas ionik atau mobilitas ion elektrolit melalui bahan berpori, meningkatkan aksesibilitasnya ke area permukaan aktif dan mengurangi penurunan ohmik elektrolit selama pengisian/pelepasan (Pan, Li, & Feng, 2010).

IV. SUPERKAPASITOR TIPE ELECTROCHEMICAL DOUBLE LAYER CAPACITOR (EDLC) BERBASIS KARBON AKTIF

Material berkarbon memiliki variasi dalam struktur dan sifatnya, dari mulai karbon aktif sampai grafit. Namun keunggulan karbon aktif, seperti yang disebutkan di bagian sebelumnya, bahwa biaya lebih murah dibanding material karbon lainnya. Karbon aktif umumnya memiliki porositas yang menggabungkan ketiga jenis ukuran pori: mikro, meso dan makro (> 50 nm). Pori mikro dan meso memberikan kontribusi signifikan terhadap nilai kapasitansi superkapasitor, sementara kandungan pori meso disarankan antara 20% dan 50% untuk EDLC yang optimal (Gryglewicz, Machnikowski, Lorenc-Grabowska, Lota, & Frackowiak, 2005). Sementara luas permukaan karbon aktif yang tinggi (1150-2570 m²/g) akan menghasilkan kapasitansi non-linear terhadap permukaan total (Shi, 1996). Fenomena ini menjadikan para peneliti melakukan riset ekstensif dalam mengevaluasi luas permukaan pori mikro dan meso dalam mengamati perubahan nilai kapasitansi dan kepadatan daya. Dengan penggunaan elektrolit berair dan organik, nilai kapasitansi yang dihasilkan dapat diperoleh mulai dari 150 hingga 300 F/g (Zhang & Zhao, 2009). Perbedaan kapasitansi yang diamati melalui penggunaan elektrolit yang berbeda, di mana elektrolit organik lebih besar dari elektrolit berair, sehingga tidak dapat menembus volume pori. Distribusi pori mikro, meso dan makro ini terus menjadi perhatian terutama dalam proses aktivasi, namun sifat elektrokimia yang unggul dari karbon aktif menjadi hal yang lumrah bagi para peneliti.

Superkapasitor tipe EDLC yang didasarkan pada elektroda karbon aktif dapat menunjukkan kinerja elektrokimia yang unggul. Hal ini karena sifat inheren

luas permukaan dan sifat oksidanya. Bahan karbon pengoksidasi pada umumnya menghasilkan penggabungan atau interkalasi yang kuat dari pita D dan G pita Raman yang mempengaruhi kepadatan fonon. Ini juga menyebabkan pergeseran warna merah yang jelas di baris Raman. Perilaku tersebut dapat dijelaskan dengan pengontrolan ukuran pori yang ekstensif, dan ikatan C-C. Keunggulan karbon aktif adalah biaya fabrikasi yang rendah bila dibandingkan terhadap graphene. Selain itu, karbon aktif memungkinkan kontrol luas dari ukuran pori mulai dari di bawah 5 nm hingga lebih dari 50 nm. Mungkin yang menjadi kelemahan utama dari elektroda karbon aktif adalah struktur berpori yang berbeda, yang tidak selalu berkontribusi pada nilai kapasitansi yang tinggi. Kondisi ini karena ketidakcocokan antara ukuran pori dan ukuran ion elektrolit. Faktanya, ukuran pori dan ukuran ion elektrolit berkorelasi langsung satu sama lain dan sinergi antara kedua parameter ini memberikan kinerja elektrokimia yang optimal dalam sebuah kapasitor. Demikian, untuk menghindari penyimpanan dari kapasitas pengisian, pencocokan antara ukuran ion elektrolit dan ukuran pori harus diperhatikan (Halper & Ellenbogen, 2006; Masarapu, Wang, Li, Liu, Lu, & Cheng, 2012).

Akumulasi dan pelepasan muatan elektrostatik di Superkapasitor EDLC terjadi melalui penarikan atau pengendapan elektron baik di katoda atau anoda, yang pada gilirannya diinduksi oleh potensi yang diterapkan di seluruh perangkat. Permukaan bermuatan positif atau negatif disandingkan dengan akumulasi ion elektrolit yang membentuk lapisan ganda muatan positif-negatif (atau sebaliknya), yang idealnya bersifat elektrostatis. Potensi yang diterapkan untuk pengisian kapasitif pada dasarnya dibatasi oleh stabilitas termodinamika elektrolit, di mana fungsi elektrolit untuk penyimpanan energi. Aspek utama yang perlu dipertimbangkan mengenai atribut fisik material elektroda yang berkontribusi pada sifat EDLC meliputi:

- Permukaan area aktif besar yang bersentuhan dengan elektrolit untuk pengisian kapasitif
- Konduktivitas listrik yang baik untuk mengurangi hilangnya daya dari hambatan internal
- Manipulasi distribusi ukuran pori untuk adsorpsi ukuran ion elektrolit
- Pori-pori yang saling berhubungan untuk mobilitas ion, aksesibilitas dan pengurangan panjang jalur difusi
- Keterbasahan permukaan untuk meningkatkan ukuran pori, meningkatkan luas permukaan

spesifik yang digunakan (Pandolfo & Hollenkamp, 2006).

Semua superkapasitor komersial saat ini menggunakan karbon untuk pengisian dan pengosongan lapisan ganda listrik yang serupa dengan kapasitor dielektrik. Kapasitansi perangkat ini berkembang dari pengisian listrik dari antarmuka elektroda/elektrolit. Karbon aktif saat ini tetap menjadi bahan karbon yang paling banyak digunakan karena biaya rendah, ketersediaan dan variasi bahan prekursor (Pandolfo & Hollenkamp, 2006) untuk mencapai 200 F/g pada elektrolit berair dan setengahnya dalam elektrolit organik (Zhang & Zhao, 2009). Di masa depan, desain material baru untuk meningkatkan sifat pengiriman daya dan penyimpanan energi EDLC dengan memanfaatkan material berstruktur nano menjadi hal yang penting (Wang, Li, Liu, Lu, & Cheng, 2008).

V. PENUTUP

Elektroda superkapasitor komersial didasarkan pada bahan karbon aktif berpori karena ketersedianya dan biaya yang lebih rendah. Kelemahan superkapasitor berbasis karbon aktif adalah kepadatan energi yang lebih rendah, walaupun kepadatan daya masih unggul dibanding baterai. Kepadatan energi yang lebih tinggi adalah upaya untuk meningkatkan kinerja kapasitor melalui peningkatan nilai kapasitansi spesifik. Nilai kapasitansi spesifik hingga 300 F/g untuk elektroda berbasis karbon aktif, dalam super kapasitor simetris dengan elektrolit berair telah dilaporkan. Meskipun demikian, nilai 300 F/g tidak mudah diperoleh dalam praktiknya. Hubungan linear kapasitansi dengan luas permukaan karbon aktif ($\sim 3000 \text{ m}^2/\text{g}$) sulit diaplikasikan dalam praktek, masih dalam taraf laboratorium. Mikropori dengan diameter orde 1 nm memiliki kontribusi yang signifikan terhadap luas permukaan spesifik yang tinggi, tetapi akses ion elektrolit dalam pori-pori tersebut mungkin akan sulit. Distribusi ukuran pori yang sesuai dari pori mikro ($<2 \text{ nm}$) hingga mesopori (2–50 nm) untuk luas permukaan tertentu dapat memberikan nilai kapasitansi yang tinggi. Optimalisasi lebih lanjut dari karbon aktif diperlukan untuk mendapatkan kapasitansi spesifik semaksimal mungkin.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan referensi dari Institut Pertanian Bogor dan Pusat Standardisasi Instrumen Pengelolaan Hutan Berkelanjutan (PUSTARHUT). Sumber dana penelitian berasal dari Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset dan Teknologi-

Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi Republik Indonesia, nomor hibah 3824/IT3.L1/PT.01.03/P/B/2022.

KONTRIBUSI PENULIS

Ide dan desain dilakukan oleh GP dan WS; materi dan persiapan naskah DS dan AM; pengumpulan data dan penulisan manuskrip oleh NAS; perbaikan dan finalisasi naskah oleh WS, GP, DS, AM, dan NAS.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahlinai, M., Azad, A. K., Bakar, M. S. A., & Phusunti, N. (2018). Characterisation and thermochemical conversion of rice husk for biochar production. *International Journal of Renewable Energy Research*, 8(3), 1648–1656.
- Amarasekara, A. S., & Ebede, C. C. (2009). Zinc chloride mediated degradation of cellulose at 200 °C and identification of the products. *Bioresource Technology*, 100(21), 5301–5304. doi: 10.1016/j.biortech.2008.12.066.
- Amin, Y., Syafii, W., Wistara, N. J., & Prasetya, B. (2014). Peningkatan rendemen gula pereduksi dari kayu jabon dengan perlakuan air kapur (Ca(OH)2). *Ilmu Teknologi Kayu Tropis*, 12(2), 196–206.
- Antal, M. J., Mok, W. S. L., & Richards, G. N. (1990). Mechanism of formation of 5-(hydroxymethyl)-2-furaldehyde from d-fructose and sucrose. *Carbohydrate Research*, 199(1), 91–109. doi: 10.1016/0008-6215(90)84096-D.
- Barbieri, O., Hahn, M., Herzog, A., & Kötz, R. (2005). Capacitance limits of high surface area activated carbons for double layer capacitors. *Carbon*, 43(6), 1303–1310. doi: 10.1016/j.carbon.2005.01.001.
- Bobleter, O. (1994). Hydrothermal degradation of polymers derived from plants. *Progress in Polymer Science*, 19(5), 797–841. doi: 10.1016/0079-6700(94)90033-7.
- Budinova, T., Ekinci, E., Yardim, F., Grimm, A., Björnbom, E., Minkova, V., & Goranova, M. (2006). Characterization and application of activated carbon produced by H₃PO₄ and water vapor activation. *Fuel Processing Technology*, 87(10), 899–905. doi: 10.1016/j.fuproc.2006.06.005.
- Cagnon, B., Py, X., Guillot, A., Stoeckli, F., & Chambat, G. (2009). Contributions of hemicellulose, cellulose and lignin to the mass and the porous properties of chars and steam activated carbons from various lignocellulosic precursors. *Bioresource Technology*, 100(1), 292–298. doi: 10.1016/j.biortech.2008.06.009.
- Chmiola, J., Yushin, G., Dash, R., & Gogotsi, Y. (2006). Effect of pore size and surface area of carbide derived carbons on specific capacitance. *Journal of Power Sources*, 158(1), 765–772. doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.09.008.
- Chmiola, J., Yushin, G., Gogotsi, Y., Portet, C., Simon, P., & Taberna, P. L. (2006). Anomalous increase in carbon at pore sizes less than 1 nanometer. *Science*, 313(5794), 1760–1763. doi: 10.1126/science.1132195.
- Cuerda-Correa, E. M., Díaz-Díez, M. A., Macías-García, A., & Gañán-Gómez, J. (2006). Preparation of activated carbons previously treated with sulfuric acid. *Applied Surface Science*, 252(17), 6042–6045. doi: 10.1016/j.apsusc.2005.11.013.
- Danish, M., Hashim, R., Ibrahim, M. N. M., & Sulaiman, O. (2013). Effect of acidic activating agents on surface area and surface functional groups of activated carbons produced from Acacia mangium wood. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 104, 418–425. doi: 10.1016/j.jaap.2013.06.003.
- Danish, Mohammed, Hashim, R., Ibrahim, M. N. M., Rafatullah, M., Ahmad, T., & Sulaiman, O. (2011). Characterization of Acacia mangium wood based activated carbons prepared in the presence of basic activating agents. *BioResources*, 6(3), 3019–3033. doi: 10.15376/biores.6.3.3019-3033.
- Darmawan, S. (2014). *Karbon nanoporous dari biomasa hutan melalui proses karbonisasi bertingkat: pirolisis, hidrotermal dan aktivasi*. IPB University.
- Daud, M., Makassar, U. M., Syafii, W., & Syamsu, K. (2012). Produktivitas Bioetanol dari Kayu Sengon (*Paraserianthes falcataria*) dengan Perlakuan Enzimatis. Seminar Nasional Masyarakat Peneliti Kayu Indonesia XV, (12 November), 1–15.
- Daud, M., Syafii, W., & Syamsu, K. (2012). Bioethanol Production from Several Tropical Wood Species using Simultaneous Saccharification and Fermentation Processes. *Wood Research Journal*, 3(2), 106–116.
- Demir-Cakan, R., Baccile, N., Antonietti, M., & Titirici, M. M. (2009). Carboxylate-rich carbonaceous materials via one-step hydrothermal carbonization of glucose in the presence of acrylic acid. *Chemistry of Materials*, 21(3), 484–490. doi.org/10.1021/cm802141h.
- El-Sayed, Y., & Bandosz, T. J. (2004). Adsorption of valeric acid from aqueous solution onto activated carbons: Role of surface basic sites.

- Journal of Colloid and Interface Science*, 273(1), 64–
doi: 10.1016/j.jcis.2003.10.006.
- Figueiredo, J. L., Pereira, M. F. R., Freitas, M. M. A., & Órfão, J. J. M. (1999). Modification of the surface chemistry of activated carbons. *Carbon*, 37(9), 1379–1389. doi: 10.1016/S0008-6223(98)00333-9.
- Frackowiak, E. (2007). Carbon materials for supercapacitor application. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 9(15), 1774–1785. doi: 10.1039/b618139m.
- Ghosh, D., Giri, S., Mandal, M., & Das, C. K. (2014). High performance supercapacitor electrode material based on vertically aligned PANI grown on reduced graphene oxide/Ni(OH)₂ hybrid composite. *RSC Advances*, 4(50), 26094–26101. doi: 10.1039/c4ra02653e.
- Girisuta, B., Janssen, L. P. B. M., & Heeres, H. J. (2006). Green chemicals: A kinetic study on the conversion of glucose to levulinic acid. *Chemical Engineering Research and Design*, 84(5 A), 339–349. doi: 10.1205/cherd05038.
- Green, R., & Staffell, I. (2016). Electricity in Europe: Exiting fossil fuels? *Oxford Review of Economic Policy*, 32(2), 282–303. doi: 10.1093/oxrep/grw003.
- Gryglewicz, G., Machnikowski, J., Lorenc-Grabowska, E., Lota, G., & Frackowiak, E. (2005). Effect of pore size distribution of coal-based activated carbons on double layer capacitance. *Electrochimica Acta*, 50(5), 1197–1206. doi: 10.1016/j.electacta.2004.07.045
- Halper, M. S., & Ellenbogen, J. C. (2006). *Supercapacitors: A Brief Overview*.
- Hatcher, P. G., & Clifford, D. J. (1997). The organic geochemistry of coal: From plant materials to coal. *Organic Geochemistry*, 27(5–6), 251–257. doi: 10.1016/S0146-6380(97)00051-X.
- Heidari, A., Younesi, H., Rashidi, A., & Ghoreyshi, A. A. (2014). Adsorptive removal of CO₂ on highly microporous activated carbons prepared from *Eucalyptus camaldulensis* wood: Effect of chemical activation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45(2), 579–588. doi: 10.1016/j.jtice.2013.06.007.
- Huang, J., Sumpter, B. G., & Meunier, V. (2008a). A universal model for nanoporous carbon supercapacitors applicable to diverse pore regimes, carbon materials, and electrolytes. *Chemistry - A European Journal*, 14(22), 6614–6626. doi: 10.1002/chem.200800639.
- Huang, J., Sumpter, B. G., & Meunier, V. (2008b). Theoretical model for nanoporous carbon supercapacitors. *Angewandte Chemie - International Edition*, 47(3), 520–524. doi: 10.1002/anie.200703864.
- IEA. (2018). Global Energy & CO₂ Status Report. In *International energy Agency*. Retrieved from www.iea.org/t&c/.
- Ioannidou, O., & Zabaniotou, A. (2007). Agricultural residues as precursors for activated carbon production-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 1966–2005. doi: 10.1016/j.rser.2006.03.013.
- Jiang, H., Ma, H., Jin, Y., Wang, L., Gao, F., & Lu, Q. (2016). Hybrid α-Fe₂O₃@Ni(OH)₂ nanosheet composite for high-rate-performance supercapacitor electrode. *Scientific Reports*, 6(July), 1–7. doi: 10.1038/srep31751
- Jibril, B., Houache, O., Al-Maamari, R., & Al-Rashidi, B. (2008). Effects of H₃PO₄ and KOH in carbonization of lignocellulosic material. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 83(2), 151–156. doi: 10.1016/j.jaap.2008.07.003.
- Lakshmi, V., Ranjusha, R., Vineeth, S., Nair, S. V., & Balakrishnan, A. (2014). Supercapacitors based on microporous β-Ni(OH)₂ nanorods. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 457(1), 462–468. doi: 10.1016/j.colsurfa.2014.06.016.
- Libra, J. A., Ro, K. S., Kammann, C., Funke, A., Berge, N. D., Neubauer, Y., ... Emmerich, K. H. (2011). Hydrothermal carbonization of biomass residuals: A comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*, 2(1), 71–106. doi: 10.4155/bfs.10.81.
- Macedo, J. S., Otubo, L., Ferreira, O. P., Gimenez, I. de F., Mazali, I. O., & Barreto, L. S. (2008). Biomorphic activated porous carbons with complex microstructures from lignocellulosic residues. *Microporous and Mesoporous Materials*, 107(3), 276–285. doi: 10.1016/j.micromeso.2007.03.020.
- Maciá-Agulló, J. A., Moore, B. C., Cazorla-Amorós, D., & Linares-Solano, A. (2004). Activation of coal tar pitch carbon fibres: Physical activation vs. chemical activation. *Carbon*, 42(7), 1367–1370. doi: 10.1016/j.carbon.2004.01.013.
- Masarapu, C., Wang, L. P., Li, X., & Wei, B. (2012). Tailoring electrode/electrolyte interfacial properties in flexible supercapacitors by applying pressure. *Advanced Energy Materials*, 2(5), 546–552. doi: 10.1002/aenm.201100529.
- Meher, S. K., & Rao, G. R. (2011). Ultralayered Co₃O₄ for high-performance supercapacitor applications. *Journal of Physical Chemistry C*, 115(31), 15646–15654. doi: 10.1021/jp201200e.

- Miller, J. M., Miller, J., & Smith, R. (2016). *White Paper Ultracapacitor Assisted Electric Drives for*.
- Nawawi, D. S., Carolina, A., Saskia, T., Darmawan, D., Gusvina, S. L., Wistara, N. J., ... Syafii, W. (2018). Karakteristik kimia biomassa untuk energi. *Ilmu Teknologi Kayu Tropis*, 16(1), 45–51.
- Oh, G. H., & Park, C. R. (2002). Preparation and characteristics of rice-straw-based porous carbons with high adsorption capacity. *Fuel*, 81(3), 327–336. doi: 10.1016/S0016-2361(01)00171-5.
- Pan, H., Li, J., & Feng, Y. P. (2010). Carbon nanotubes for supercapacitor. *Nanoscale Research Letters*, 5(3), 654–668. doi: 10.1007/s11671-009-9508-2.
- Pandolfo, A. G., & Hollenkamp, A. F. (2006). Carbon properties and their role in supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 157(1), 11–27. doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.02.065.
- Pikkarainen, J. (2016). Infographic: Fuel Savings of up to 10% Possible with Start-Stop Systems. Retrieved from Skeleton Technologies website: <https://www.skeletontech.com/skeleton-blog/fuel-savings-of-up-to-10-possible-with-start-stop-systems>.
- Radenahmad, N., Azad, A. T., Saghir, M., Taweekun, J., Bakar, M. S. A., Reza, M. S., & Azad, A. K. (2020). A review on biomass derived syngas for SOFC based combined heat and power application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119(November), 109560. doi: 10.1016/j.rser.2019.109560.
- Raymundo-Piñero, E., Cazorla-Amorós, D., Linares-Solano, A., Delpoux, S., Frackowiak, E., Szostak, K., & Béguin, F. (2002). High surface area carbon nanotubes prepared by chemical activation. *Carbon*, 40(9), 1614–1617. doi: 10.1016/S0008-6223(02)00134-3.
- Reza, M. S., Islam, S. N., Afrose, S., Abu Bakar, M. S., Sukri, R. S., Rahman, S., & Azad, A. K. (2020). Evaluation of the bioenergy potential of invasive *Pennisetum purpureum* through pyrolysis and thermogravimetric analysis. *Energy, Ecology and Environment*, 5(2), 118–133. doi: 10.1007/s40974-019-00139-0.
- Salitra, G., Soffer, A., Eliad, L., Cohen, Y., & Aurbach, D. (2000). Carbon electrodes for double-layer capacitors: relations between ion and pore dimensions. *Journal of The Electrochemical Society*, 147(7), 2486. <https://doi.org/10.1149/1.1393557>.
- Sevilla, M., & Fuertes, A. B. (2009). Chemical and structural properties of carbonaceous products obtained by hydrothermal carbonization of saccharides. *Chemistry - A European Journal*, 15(16), 4195–4203. doi: 10.1002/chem.200802097.
- Shafeeyan, M. S., Daud, W. M. A. W., Houshmand, A., & Shamiri, A. (2010). A review on surface modification of activated carbon for carbon dioxide adsorption. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 89(2), 143–151. doi: 10.1016/j.jaat.2010.07.006.
- Shi, H. (1996). Activated carbons and double layer capacitance. *Electrochimica Acta*, 41(10), 1633–1639. doi: 10.1016/0013-4686(95)00416-5
- Suhas, Carrott, P. J. M., & Ribeiro Carrott, M. M. L. (2007). Lignin - from natural adsorbent to activated carbon: A review. *Bioresource Technology*, 98(12), 2301–2312. doi: 10.1016/j.biortech.2006.08.008.
- Syafii, W., & Siregar, Z. (2006). Sifat Kimia dan Dimensi Serat Kayu Mangium (Acacia mangium Willd.) dari Tiga Provenans. *Journal Tropical Wood Science & Technology*, 4(1), 28–32.
- Titirici, Maria M., Thomas, A., Yu, S. H., Müller, J. O., & Antonietti, M. (2007). A direct synthesis of mesoporous carbons with bicontinuous pore morphology from crude plant material by hydrothermal carbonization. *Chemistry of Materials*, 19(17), 4205–4212. doi: 10.1021/cm0707408.
- Titirici, Maria Magdalena, White, R. J., Falco, C., & Sevilla, M. (2012). Black perspectives for a green future: Hydrothermal carbons for environment protection and energy storage. *Energy and Environmental Science*, 5(5), 6796–6822. doi: 10.1039/c2ee21166a.
- Tseng, R. L., Wu, F. C., & Juang, R. S. (2003). Liquid-phase adsorption of dyes and phenols using pinewood-based activated carbons. *Carbon*, 41(3), 487–495. doi: 10.1016/S0008-6223(02)00367-6.
- Wang, D. W., Li, F., Liu, M., Lu, G. Q., & Cheng, H. M. (2008). 3D aperiodic hierarchical porous graphitic carbon material for high-rate electrochemical capacitive energy storage. *Angewandte Chemie - International Edition*, 47(2), 373–376. doi: 10.1002/anie.200702721.
- Yahya, M. A., Al-Qodah, Z., & Ngah, C. W. Z. (2015). Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46, 218–235. doi: 10.1016/j.rser.2015.02.051.
- Yu, L., & Chen, G. Z. (2016). Redox electrode materials for supercapacitors. *Journal of Power*

- Sources, 326, 604–612. doi: 10.1016/j.jpow sour. 2016.04.095.
- Yuniarti. (2011). Sifat Kimia Tiga Jenis Kayu Rakyat (Chemical Components of Three Kinds of Social Forestry Timber). *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*, 3(1), 24–28.
- Zhang, L., & Zhao, X. S. (2009). Carbon-based materials as supercapacitor electrodes. *Chemical Society Reviews*, 38(9), 2520–2531. doi:10.1039/b813846j.
- Ziegler, A. F. and F. (2009). Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4(10), 160–177. doi: 10.1002/bbb.