

## Penghasilan Karbon Aktif melalui Pengaktifan Wap Biojisim Serat Panjang Tandan Sawit Kosong

(Production of Activated Carbon via Steam Activation of Empty Fruit Bunch Long Fibre Biomass)

MUHAMMAD NUR HAKIMI ZABIDI & DARFIZZI DERAWI\*

*Kluster Teknologi Oleokimia, Jabatan Sains Kimia, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia*

*Diserahkan: 15 Julai 2023/Diterima: 25 Oktober 2023*

### ABSTRAK

Longgokan tandan sawit kosong (EFB) di Malaysia memerlukan perancangan yang lebih teliti dalam menukarkan sisa biojisim kepada produk bernilai tinggi. Penghasilan karbon aktif daripada biojisim EFB merupakan salah satu inisiatif yang sangat signifikan dalam menghasilkan produk bahan termaju ini. Serat panjang EFB ditukarkan kepada karbon aktif melalui kaedah pengaktifan stim. Pengaktifan stim secara suntikan wap air ini telah dijalankan pada suhu 700, 750, 800, 900 dan 1000 °C selama 60 minit. Serbuk EFB, bio-arang dan karbon aktif yang dihasilkan dalam kajian ini telah menjalani analisis pencirian menggunakan kaedah penjerapan fizikal. Karbon aktif terhasil pada suhu 800 °C memberikan luas permukaan (561.0 m<sup>2</sup>/g) dan isi padu liang (0.2800 cm<sup>3</sup>/g) tertinggi dan bersifat mesolintang (2.9 nm) berbanding karbon aktif yang terhasil pada suhu lain. Oleh itu, suhu 800 °C merupakan suhu optimum bagi penghasilan karbon aktif dalam kajian ini. Sehubungan itu, karbon aktif 800 °C dilakukan pencirian selanjutnya menggunakan XRD, FTIR dan FESEM. Struktur amorfus dapat dilihat berdasarkan pencirian XRD. Melalui analisis FTIR, karbon aktif ini mengandungi beberapa kumpulan berfungsi seperti alifatik-CH, C-O dan C=O. Kemunculan puncak penyerapan getaran kumpulan C=O pada karbon aktif ini selepas pengaktifan wap dapat dikaitkan dengan tindak balas pengoksidaan bio-arang yang mana wap air bertindak sebagai agen pengoksidaan. Tambahan pula, morfologi permukaannya oleh FESEM menunjukkan permukaan berliang berbentuk bulat dan susunannya kurang teratur. Justeru, kajian berkaitan penghasilan karbon aktif daripada biojisim tandan sawit kosong melalui pengaktifan wap telah dijalankan. Penukaran biojisim EFB kepada karbon aktif menyokong kepada usaha membangunkan teknologi hijau dan kitaran ekonomi mampan.

Kata kunci: Biojisim tandan sawit kosong; karbon aktif; pengaktifan wap

### ABSTRACT

The abundance of empty oil palm bunches (EFB) in Malaysia requires more careful planning in converting biomass waste into high-value products. The production of activated carbon from EFB biomass is one of the most significant initiatives in producing this advanced material product. EFB fibers are converted to activated carbon through a steam activation method. Steam activation by water vapor injection was carried out at temperatures of 700, 750, 800, 900 and 1000 °C for 60 min. Empty palm bunch powder, bio-charcoal and all the activated carbon produced in this study have undergone characterization analysis using the physical adsorption method. Activated carbon produced at a temperature of 800 °C exhibits the highest surface area (561.0 m<sup>2</sup>/g) and pore volume (0.2800 cm<sup>3</sup>/g) and is mesoporous (2.9 nm) compared to activated carbon produced at other temperatures. Therefore, 800 °C is the optimum temperature for producing activated carbon in this study. As such, activated carbon at 800 °C was further characterized using XRD, FTIR and FESEM. Amorphous structure can be seen based on XRD characterization. Through FTIR analysis, this activated carbon contains several functional groups such as aliphatic-CH, C-O, and C=O. The appearance of the peak of C=O group vibration absorption in this activated carbon after steam activation can be attributed to the oxidation reaction of bio-charcoal where steam acts as the oxidizing agent. Furthermore, its surface morphology by FESEM shows a porous surface that is round and less regular in arrangement. Therefore, a study related to the production of activated carbon from the biomass of empty palm bunches through steam activation was carried out. Conversion of EFB biomass to activated carbon supports efforts to develop green technologies and sustainable circular economic.

Keywords: Activated carbon; biomass empty fruit bunches; steam activation

## PENGENALAN

Malaysia merupakan salah satu daripada pengeluar dan pengeksport terbesar minyak sawit di dunia selepas Indonesia (Rashidi & Yusup 2017). Keluasan tanaman kelapa sawit di Malaysia pada tahun 2020 dianggarkan seluas 5.87 juta hektar akibat peningkatan kawasan perkebunan (Mostapha et al. 2021). Berdasarkan Jabatan Perangkaan Malaysia pada tahun 2020, penanaman kelapa sawit telah menjadi industri terpenting bagi pertumbuhan ekonomi Malaysia yang menyumbang kepada hampir RM38 bilion pada tahun tersebut (Kannan et al. 2022). Sehubungan itu, sisa buangan biojisim terhasil juga meningkat kerana hanya 10% daripada buah kelapa sawit digunakan untuk menghasilkan minyak sawit dan selebihnya menjadi sisa buangan seperti gentian sawit yang ditekan daripada (mesokarp), tempurung inti sawit (endokarp) dan tandan sawit kosong (Rashidi & Yusup 2017). Misalnya, penghasilan minyak sawit telah meningkatkan sisa biojisim kelapa sawit sekitar 51.19 tan metrik (Mt) dan tandan sawit kosong (EFB) pula sekitar 20-23% daripada jumlah besar sisa biojisim, namun masih kurang digunakan atau diterokai (Hamzah et al. 2019; Rahayu, Wirjodirdjo & Hadi 2019). Oleh demikian, sisa buangan terhasil ini tidak boleh dibazirkan begitu sahaja dan masih boleh digunakan semula untuk menghasilkan produk berguna seperti karbon aktif. Hal ini penting agar sisa terhasil tidak dibuang dan dibakar lalu memberi impak negatif kepada alam sekitar seperti pencemaran udara. Tambahan pula, penggunaan bahan berasaskan biojisim untuk aplikasi seperti rawatan air sisa telah perlu diterokai kerana sifatnya yang terbiodegradasi, mesra alam, menjimatkan

kos serta penggunaan tenaga yang lebih rendah yang menjadi fokus utama dalam mempromosikan teknologi hijau (Ibrahim et al. 2017; Nur Sulihatimarsyila et al. 2017; Saad et al. 2020). Oleh itu, biojisim EFB dalam bentuk serat panjang (*long fibre*) seperti Rajah 1 dipilih dalam kajian ini bagi menghasilkan karbon aktif.

Karbon aktif merupakan sesuatu karbon berbentuk amorfus yang dihasilkan melalui proses pengaktifan dan mempunyai tahap keliangan tinggi dan luas permukaan antara zarah besar (Alam, Muyibi & Kamaldin 2008). Oleh itu, karbon aktif telah digunakan secara meluas dalam pelbagai aplikasi seperti pemisahan gas, pemulihan pelarut, penyimpanan gas, elektrod super kapasitor, sokongan mangkin dan penjerap bagi pencemar organik dan bukan organik dalam air minuman (Xu et al. 2014). Tambahan pula, karbon aktif ini mampu menyingkirkan bendasing seperti bahan kimia berbahaya di dalam cecair atau gas secara penjerapan. Karbon aktif ini mempunyai luas permukaan antara 500 ke 1500 m<sup>2</sup>/g dan struktur liang yang terbina dengan baik (Nur Sulihatimarsyila et al. 2017). Namun begitu, kos tinggi dalam pengeluaran karbon aktif menghalang aplikasinya dalam pelbagai teknologi (Rashid et al. 2018). Oleh hal yang demikian, ramai penyelidik telah melakukan usaha yang luas dalam mencari alternatif yang lebih murah untuk penghasilan karbon aktif daripada pelbagai bahan berkarbon, seperti bahan lignoselulosa, biopolimer, arang, karbon hitam dan kulit buah (Acosta et al. 2016; Gao et al. 2016; Jawad et al. 2017, 2016; Marrakchi et al. 2017). Sehubungan itu, karbon aktif juga boleh terhasil daripada biojisim tandan sawit kosong melalui beberapa langkah tertentu seperti pra-rawatan, pirolisis



RAJAH 1. Serat panjang EFB

dan pengaktifan karbon. Pengaktifan karbon terbahagi kepada dua, iaitu pengaktifan fizikal dan kimia. Dalam kajian ini, pengaktifan karbon secara fizikal dipilih berdasarkan beberapa faktor seperti kos rendah dan kecekapan tinggi (Rashidi & Yusup 2017). Pengaktifan karbon secara fizikal dalam kajian ini melibatkan stim dengan pengaktifan karbon dijalankan menggunakan wap air sebagai agen pengaktifan. Semasa pengaktifan stim dijalankan, liang-liang sempit yang dibangunkan pada permukaan bio-arang telah diperluaskan dan liang-liang baru dihasilkan, lalu keliangan dan luas permukaan struktur berliang bahan berkarbon tersebut dapat dipertingkatkan (Reza et al. 2020).

Penggunaan sisa pertanian seperti tandan sawit kosong adalah selari dengan Matlamat Pembangunan Mampan (SDGs) oleh Pertubuhan Bangsa-Bangsa Bersatu (PBB) yang ingin dicapai menjelang 2030. Kajian ini menyumbang kepada Matlamat ke-12 (Penggunaan dan Pengeluaran Bertanggungjawab) dengan mengurangkan penjanaian sisa melalui pencegahan, pengurangan, kitar semula dan penggunaan semula. Matlamat ke-13 (Tindakan terhadap Iklim) pula memerlukan integrasi langkah-langkah perubahan iklim ke dalam dasar dan perancangan, termasuk pengurangan pelepasan gas rumah hijau (UNDP 2017). Oleh itu, tindakan segera diperlukan untuk menangani perubahan iklim dengan mengawal pengeluaran gas rumah hijau dan mempromosikan tenaga boleh diperbaharui. Justeru, kajian ini telah dijalankan untuk menghasilkan karbon aktif daripada biojisim tandan sawit kosong melalui pengaktifan dan seterusnya mencirikan karbon

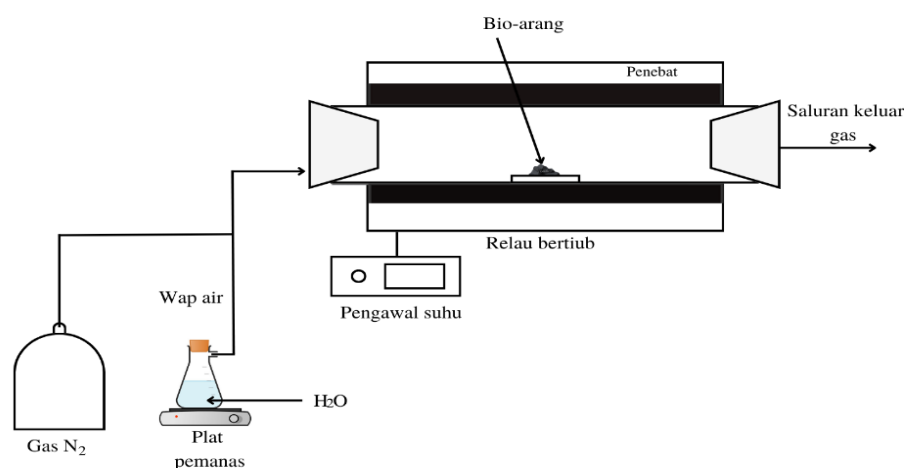
aktif terhasil dari segi ciri permukaan, fasa kehabluran, kandungan kumpulan berfungsi dan morfologi permukaan.

#### BAHAN DAN KAEDAH

Bahan kimia yang digunakan ialah batu didih. Manakala alat radas yang digunakan ialah bikar (100 mL), mangkuk pijar seramik (5 g & 30 g), kelalang kon dengan lengan sisi (1000 mL) dan spatula.

Serat panjang EFB (Rajah 1) telah diperoleh daripada Stable Wind Sdn. Bhd. Kemudian, serat panjang EFB telah dikisar menggunakan pengisar model Vision bagi menghasilkan serbuk yang bersaiz kecil iaitu, 0.5 hingga 1.0  $\mu\text{m}$ . Seterusnya, hasil kisanan serat panjang EFB (serbuk EFB) telah dikeringkan pada suhu 105 °C di dalam ketuhar universal model Memmert UM300 selama 24 jam. Akhir sekali, serbuk EFB tersebut telah dilabel sebagai sampel A dan disimpan di dalam kotak kering automatik model AD-45PG dan sebahagiannya dicirikan oleh penganalisis penjerapan fizikal, spektrometer transformasi Fourier infra merah (FTIR) dan mikroskopi elektron imbasan pancaran medan (FESEM).

Bagi proses pengkarbonan, sebanyak 60 g serbuk EFB telah diletakkan di dalam mangkuk pijar seramik pada 500 °C dengan gas nitrogen ( $\text{N}_2$ ) dibekalkan pada kadar aliran 500 mL/min selama 30 minit dalam reaktor relau kebuk makmal model VT Furnace/LCF-1000 untuk menghasilkan bio-arang (sampel B). Reaktor ini telah dipanaskan pada kadar pemanasan sekitar 10 °C/min. Selepas 30 minit, bio-arang yang dihasilkan akan



RAJAH 2. Rajah skematik bagi penghasilan karbon aktif melalui pengaktifan stim

disejukkan kepada suhu lebih rendah daripada 100 °C di dalam reaktor tersebut lalu disimpan di dalam kotak kering automatik model AD-45PG (Wei & Li 2021). Sebahagiannya juga telah dicirikan oleh penganalisis penjerapan fizikal, FTIR dan FESEM.

Bagi proses pengaktifan stim, reaktor relau tiub melintang telah dipanaskan terlebih dahulu pada suhu yang dikehendaki iaitu 700, 750, 800, 900 dan 1000 °C. Seterusnya, sebanyak 4 g bio-arang diletakkan di bahagian tengah reaktor tersebut. Kemudian, wap air dialirkan bersama-sama dengan gas nitrogen untuk dibekalkan ke dalam relau pada kadar aliran 500 mL/minut bagi tujuan pengaktifan untuk menghasilkan karbon aktif. Sehubungan itu, zarah kecil wap air meresap masuk ke dalam matriks karbon dan bertindak balas dengannya (May et al. 2019). Selepas masa pengaktifan yang dikehendaki tercapai iaitu 60 minit, penyaluran wap air telah dihentikan lalu karbon aktif yang terhasil telah disejukkan kepada suhu lebih rendah daripada 50 °C di bawah atmosfera N<sub>2</sub> (Wei & Li 2021). Justeru, lima sampel karbon aktif telah terhasil dan disimpan di dalam kotak kering automatik model AD-45PG lalu dilabel C, D, E, F dan G untuk prosedur seterusnya iaitu pencirian. Rajah skematik bagi proses penghasilan karbon aktif adalah seperti Rajah 2.

Sifat keporosan setiap sampel (A,B,C,D,E,F,G) seperti luas permukaan, jumlah isi padu liang, saiz purata liang telah diukur melalui teknik Brunauer-Emmett-Tellerr (BET) dan Barrett-Joyner-Halenda (BJH) menggunakan penganalisis penjerapan fizikal model ASAP 2020 berjenama Micrometrics dengan isoterma gas nitrogen, N<sub>2</sub> penjerapan-penyahjerapan pada suhu penyahgas 150 °C selama 2 jam (Elias, Hadibarata & Sathishkumar 2021). Melalui analisis ini, satu sampel karbon aktif paling optimum telah dipilih untuk analisis pembelauan sinar-X (XRD), FESEM dan FTIR.

Sampel karbon aktif yang telah dipilih sebagai karbon aktif paling optimum telah dianalisis untuk mengenal pasti kumpulan berfungsi yang terdapat pada karbon aktif tersebut dengan menggunakan FTIR model Cary 500. Analisis FTIR ini juga telah melibatkan serbuk tandan sawit kosong dan bio-arang. Spektrum FTIR terhasil apabila ikatan kimia kumpulan berfungsi dalam struktur bahan menyerap pancaran elektromagnetik pada frekuensi yang tertentu pada julat bilangan gelombang 650-4000 cm<sup>-1</sup>. Kemudian, setiap hasil analisis ini telah dibandingkan dan dibincangkan. Sampel karbon aktif yang telah dipilih sebagai karbon aktif paling optimum juga telah dianalisis untuk penentuan fasa kehabluran menggunakan XRD model Bruker D8 Advance. Dalam

analisis ini, instrumen XRD merekodkan sudut belauan 2θ=5° hingga 90° dengan kadar imbasan 0.04° per saat.

Selain itu, sampel karbon aktif yang telah dipilih sebagai karbon aktif paling optimum juga telah dihantar untuk analisis pencirian morfologi permukaan menggunakan FESEM model Supra 55VP. Analisis ini juga telah melibatkan serbuk tandan sawit kosong dan bio-arang. Sehubungan itu, FESEM ini digunakan untuk menghasilkan imej beresolusi tinggi dengan kedalaman medan yang tinggi. Imej yang terhasil daripada FESEM ini menunjukkan struktur liang, struktur permukaan dan susunan liang pada magnifikasi 30000 kali. Kemudian, setiap hasil analisis ini telah dibandingkan dan dibincangkan.

#### KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Semasa proses pra-rawatan, serbuk EFB dikering di dalam ketuhar selama 24 jam pada suhu 105 °C. Pengurangan jisim serbuk EFB adalah sebanyak 7.27 % berbanding jisim asal. Perbezaan jisim ini berlaku disebabkan penyingkiran air dan bahan teruap daripada serbuk EFB tersebut semasa proses pengeringan dilakukan. Hal ini kerana tenaga haba yang disalurkan menyebabkan kelembapan dan bahan mudah meruap di dalam serbuk tandan sawit kosong menyejat dan bebas ke persekitaran (Ayinla et al. 2019). Oleh hal yang demikian, kelembapan dan bendasing yang mudah meruap dalam EFB disingkirkan bagi meningkatkan ketulenannya untuk proses berikutnya. Seterusnya, proses pengkarbonan atau pirolisis dilakukan di dalam relau dengan kehadiran gas nitrogen (N<sub>2</sub>) untuk menyingkirkan spesies bukan karbon seperti nitrogen, oksigen dan hidrogen serta meningkatkan kandungan karbon tetap untuk menghasilkan bio-arang (Reza et al. 2020). Hasil pengkarbonan serbuk EFB adalah bio-arang. Hanya 36.81% hasil bio-arang terhasil daripada 60.00 g serbuk tandan sawit kosong. Hal ini demikian kerana proses ini melibatkan penyingkiran bahan teruap dan sebahagian komposisi kimia daripada serbuk EFB pada suhu 500 °C (Radenahmad et al. 2020). Sehubungan itu, proses ini lazimnya melibatkan empat peringkat dalam menghasilkan bio-arang. Semasa proses penguraian gas, struktur liang EFB (bahan pemula) sempit mula berkembang yang membawa kepada pemendapan bahan bertar yang terbentuk apabila suhu meningkat (Alhinai et al. 2018). Bahan bertar merupakan campuran kompleks sebatian organik yang biasanya gelap, pekat dan melekit yang terbentuk sebagai hasil daripada penguraian bahan organik semasa proses pirolisis (Khor, Lim & Zainal 2009). Dalam sesetengah kes, pemendapan ini

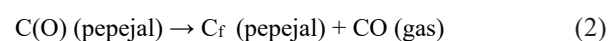
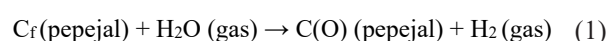
boleh menyebabkan keruntuhan dinding liang-liang, seterusnya mengakibatkan keretakan hidrokarbon dan pemendapan karbon (Odetoeye et al. 2018). Oleh itu, suhu pengkarbonan merupakan salah satu parameter terpenting yang perlu dikawal (Reza et al. 2020). Apabila suhu meningkat, lebih banyak bahan meruap seperti lignin dan hemiselulosa disingkirkan lalu peningkatan kandungan karbon tetap dan abu berlaku (González García 2018). Suhu pengkarbonan yang lebih tinggi bakal menghasilkan bio-arang berkualiti lebih baik (Reza et al. 2020). Kepentingan proses pengkarbonan ini adalah untuk menukarkan bahan pemula iaitu serbuk EFB kepada bio-arang dan membentuk luas permukaan antara zarah dan liang pada peringkat awal sebelum penghasilan karbon aktif (Ayinla et al. 2019).

Bio-arang yang terhasil semasa proses pengkarbonan mempunyai luas permukaan dan isi padu liang yang rendah (Reza et al. 2020). Sehubungan itu, proses pengaktifan diperlukan untuk menambah baik isi padu liang, saiz liang dan luas permukaan bagi menghasilkan karbon aktif. Jadual 1 menunjukkan peratus hasil dan peratus kehilangan jisim bagi setiap karbon aktif terhasil melalui pengaktifan stim pada suhu 700-1000 °C.

Proses pengaktifan bio-arang dimulai dengan penyingkiran bahan tar yang tersumbat pada liang bio-arang untuk membantu wap air yang bertindak sebagai agen pengaktifan bagi bertindak balas dengan bio-arang selepas itu. Hal ini bermaksud dengan penyingkiran bahan tar, liang pada bio-arang akan menjadi lebih terbuka, meningkatkan akses wap air ke permukaan bio-arang yang sebelum ini mungkin tersumbat oleh bahan tar. Wap air yang bertindak sebagai agen pengaktifan kemudian dapat bertindak balas dengan permukaan bio-arang yang lebih terdedah, meningkatkan pembentukan struktur liang dan kawasan permukaan yang lebih besar. Seterusnya, zarah-zarah karbon di dalam bio-arang dibakar lalu dioksidakan dengan wap air. Untuk pembentukan

struktur berliang, suhu dan masa pengaktifan merupakan parameter terpenting untuk dipertimbangkan dalam proses pengaktifan ini. Kedua-dua parameter ini dilaporkan berkadar terus dengan isi padu liang namun berkadar songsang dengan hasil karbon (Reza et al. 2020).

Semasa pengaktifan stim ini dijalankan, liang-liang sempit yang dibangunkan pada permukaan bio-arang telah diperluaskan dan liang-liang baharu dihasilkan lalu keliangan dan luas permukaan struktur berliang bahan berkarbon tersebut dapat dipertingkatkan. Hal ini demikian kerana wap air yang bertindak sebagai agen pengaktifan telah meresap ke dalam liang bio-arang dengan mudah kerana saiznya kecil lalu memberikan tindak balas yang cepat dengan karbon (Alvarez et al. 2015; Rafsanjani, Kamandari & Najjarzadeh 2013). Hal ini menunjukkan karbon aktif dengan luas permukaan besar dapat dihasilkan dalam tempoh masa singkat dengan memfokuskan perluasan mikroliang ke arah membangunkan mesoliang dan makroliang daripada permulaan proses pengaktifan pada kadar pemanasan piawai bagi memastikan penghasilan liang yang lebih luas pada karbon aktif (Reza et al. 2020; Wong et al. 2018). Menurut Rashidi dan Yusup (2017), wap air dilaporkan bertindak balas empat kali lebih cepat dengan karbon daripada gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) pada suhu pengaktifan yang hampir sama. Hal ini kerana saiz CO<sub>2</sub> yang lebih besar daripada wap air dan tindak balas antara karbon dan CO<sub>2</sub> lebih memfokuskan kepada pembangunan liang-liang baharu berbanding perluasan liang-liang yang sedia ada (Reza et al. 2020). Persamaan tindak balas antara wap air dan karbon (bio-arang) adalah seperti Persamaan (1) dan (2).



JADUAL 1. Peratus kehilangan jisim karbon aktif selepas pengaktifan stim

Suhu (°C)	Peratus hasil (%)	Peratus perbezaan jisim (%)
700	66.0	34.0
750	60.8	39.2
800	66.0	34.0
900	75.9	24.1
1000	9.2	90.8

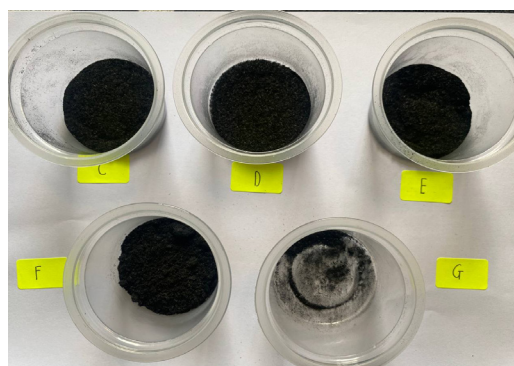
Pengaktifan stim merupakan proses penggasingan bio-arang. Berdasarkan Persamaan 1,  $C_f$  merupakan permukaan aktif bio-arang yang bergabung dengan molekul wap air untuk membentuk kompleks  $C(O)$  dan membebaskan gas hidrogen ( $H_2$ ). Kemudian, kompleks  $C(O)$  terurai untuk membentuk tapak aktif  $C_f$  yang baharu dan membebaskan gas monoksida ( $CO$ ) seperti Persamaan (2). Pada masa ini, liang-liang terbentuk pada permukaan atom karbon. Oleh itu, sebahagian atom telah digaskan dan bakinya membentuk karbon aktif pada kadar aliran stim dan suhu tindak balas optimum (Wei & Li 2021). Berdasarkan Jadual 1, sekitar 60-76% hasil diperoleh apabila pengaktifan stim dilakukan pada julat suhu 700-900 °C dengan pengurangan jisim sebanyak 24-34%. Manakala, pada suhu 1000 °C, karbon aktif merekodkan peratus hasil terendah iaitu sebanyak 9.2% dan pengurangan jisim sebanyak 90.8% berbanding jisim bio-arang asal. Keadaan pengaktifan stim pada suhu terlampau tinggi mengakibatkan hampir semua komponen kimia dalam bio-arang terurai. Hal ini kerana kemerosotan terma berlaku apabila suhu terlalu tinggi menyebabkan kemerosotan haba pada karbon di dalam bio-arang berlaku. Akibatnya, ikatan karbon boleh terurai lalu mengakibatkan kehilangan atom karbon dan pembentukan sebatian yang meruap. Kemerosotan ini mengurangkan kandungan karbon keseluruhan dan boleh menyebabkan penghasilan produk yang tidak diinginkan atau pemusnahan lengkap bio-arang (Mopoung & Dejang 2021).

Rajah 3 menunjukkan sampel karbon aktif yang terhasil dalam kajian ini. Berdasarkan peratus hasil karbon aktif yang diperoleh, boleh disimpulkan bahawa suhu pengaktifan memainkan peranan penting dalam penghasilan karbon aktif. Hal ini demikian kerana suhu

berkaitan rapat dengan tindak balas pembebasan bahan meruap oleh permukaan biojisim dan agen pengaktifan. Disebabkan oleh pelepasan bahan meruap yang lebih cepat dan kereaktifan yang lebih tinggi, suhu yang lebih tinggi dapat menggalakkan pembentukan struktur liang dalam bio-arang (karbon) diaktifkan. Sehubungan itu, biojisim mengandungi bahan meruap sekitar 75% hingga 85% berbanding hanya 20% hingga 35% dalam arang batu, hal tersebut menunjukkan bahawa suhu yang lebih tinggi yang dapat membantu pelepasan bahan meruap dengan lebih cepat adalah lebih kondusif untuk pembangunan struktur liang dalam karbon diaktifkan biojisim (Fu et al. 2020).

Kesemua sampel serbuk EFB, bio-arang dan karbon-karbon aktif yang terhasil telah dianalisis melalui teknik analisis isoterma jerapan-nyahjerapan  $N_2$  bagi menentukan sifat keporosan setiap sampel sebelum dan selepas proses pengaktifan stim dilakukan. Jadual 2 telah merekodkan sifat keporosan bagi kesemua sampel kajian (A,B,C,D,E,F,G).

Secara keseluruhan didapati luas permukaan dan isi padu liang karbon aktif akan meningkat dan purata saiz liang pula akan menurun apabila suhu pengaktifan stim meningkat. Peningkatan luas permukaan dan isi padu liang dipengaruhi oleh pertambahan keliangan sampel. Semua sampel karbon aktif mempunyai keliangan purata bersaiz mesoliang. Mesoliang mempunyai purata saiz liang berjulat 2-50 nm (Wei & Li 2021). Peningkatan keliangan pada sampel karbon aktif adalah berkaitan rapat dengan proses resapan molekul wap air ke bahagian dalam struktur bio-arang yang membentuk rangkaian liang lebih luas sewaktu proses pengaktifan stim dilakukan (Mopoung & Dejang 2021). Luas permukaan



RAJAH 3. Lima set karbon aktif yang terhasil dalam kajian ini

JADUAL 2. Hasil analisis ciri permukaan

Sampel	Jenis sampel	Luas permukaan BET (m <sup>2</sup> /g)	Jumlah isi padu liang BJH (cm <sup>3</sup> /g)	Purata saiz liang BJH (nm)	t-Plot mikroliang	
					Luas (m <sup>2</sup> /g)	Isi padu (cm <sup>3</sup> /g)
A	Serbuk tandan sawit kosong	0.9	0.0010	12.6	-	-
B	Bio-arang	2.2	0.0032	6.7	-	-
C	Karbon aktif (700 °C)	208.6	0.1117	4.0	161.5	0.0815
D	Karbon aktif (750 °C)	478.8	0.2386	3.2	424.7	0.2077
E	Karbon aktif (800 °C)	561.0	0.2800	2.9	497.4	0.2443
F	Karbon aktif (900 °C)	68.3	0.0356	7.1	60.6	0.0305
G	Karbon aktif (1000 °C)	0.3	0.0004	7.8	-	-

optimum direkodkan pada karbon aktif 800 °C iaitu sebanyak 561.0 m<sup>2</sup>/g. Sampel E juga merekodkan jumlah isi padu liang tertinggi, iaitu 0.2800 cm<sup>3</sup>/g dan purata saiz liang terendah, iaitu 2.9 nm. Hal ini kerana wap air yang bertindak sebagai agen pengaktifan mampu bertindak balas dengan karbon pada tahap paling optimum pada suhu ini. Pada suhu ini, molekul wap air menembusi liang-liang pada bio-arang lalu menyebabkan pelebaran liang berlaku. Tambahan pula, liang-liang dapat terhasil dengan penyingkiran lebih banyak bahan meruap pada suhu 800 °C berbanding suhu pengkarbonan (500 °C). Manakala suhu pengaktifan 900 °C hingga 1000 °C menunjukkan penyusutan ketara terhadap luas permukaan (68.3 m<sup>2</sup>/g, 0.3 m<sup>2</sup>/g) dan isi padu liang (0.0356 cm<sup>3</sup>/g, 0.0004 cm<sup>3</sup>/g). Ini kerana haba yang disalurkan terlampau tinggi dan berlebihan telah mengakibatkan berlakunya keruntuhan liang-liang dalaman pada karbon aktif (Jiang et al. 2020).

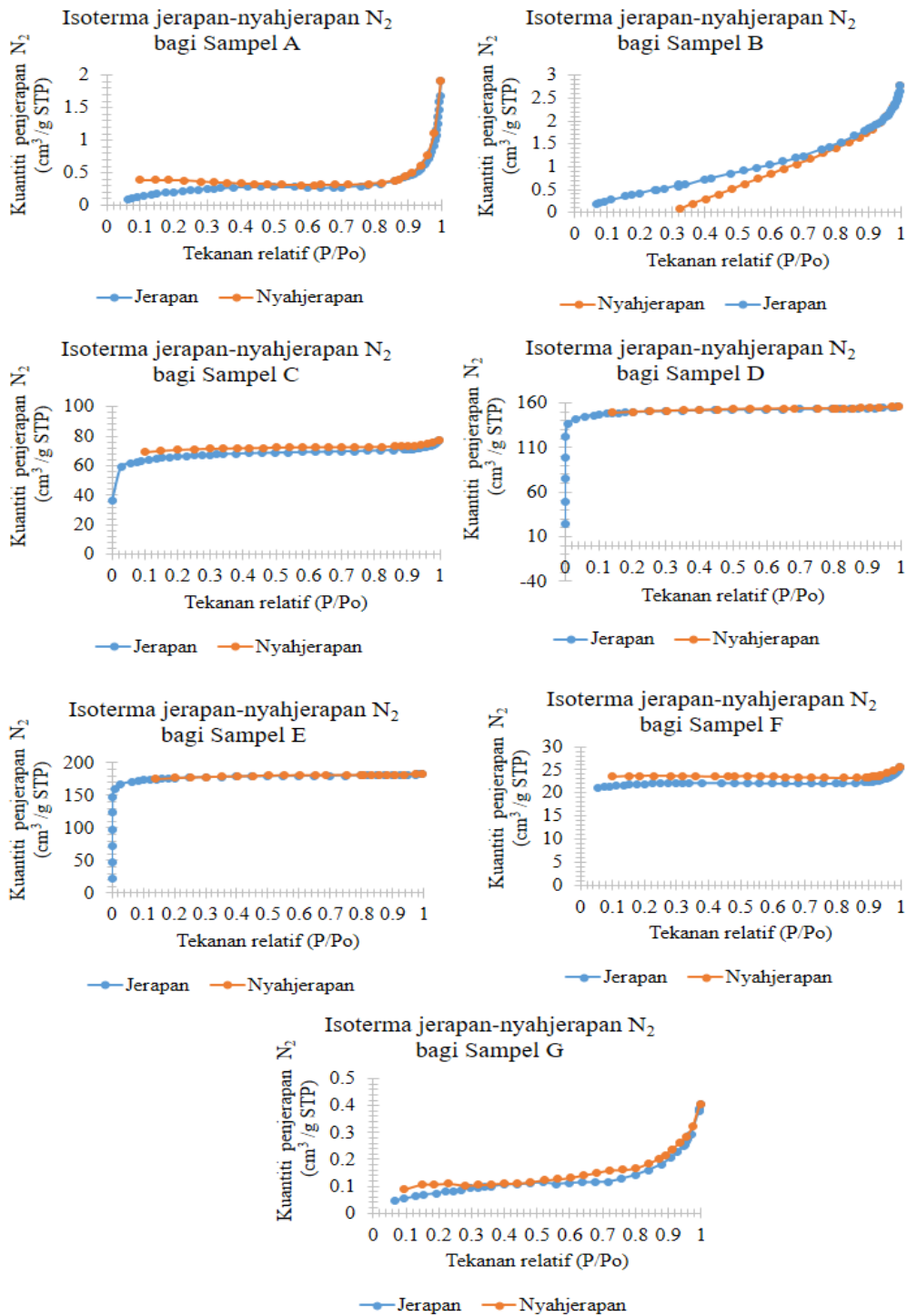
Intarachandra, Siriworakon dan Sangmanee (2019) telah menjalankan kajian berkaitan penghasilan karbon aktif berasaskan EFB. Mereka mengkarbonkan EFB kering pada suhu 500 °C selama 30 minit dan diaktifkan dengan menggunakan asid fosforik (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) yang bertindak sebagai sebagai agen pengaktifan. Hasilnya,

karbon aktif yang dihasilkan mempunyai luas permukaan 362.5 m<sup>2</sup>/g dan saiz liang purata 2.94 nm. Sehubungan itu, saiz luas permukaan karbon aktif yang dihasilkan dalam kajian ini adalah lebih tinggi berbanding karbon aktif yang mereka hasilkan manakala saiz liang adalah hampir sama. Hal ini menunjukkan pengaktifan stim adalah lebih baik daripada pengaktifan kimia kerana pengaktifan stim yang menggunakan wap air sebagai agen pengaktifan dapat membentuk liang dengan lebih banyak lalu menyebabkan luas permukaan menjadi besar. Hal ini disebabkan molekul wap air adalah kecil yang memudahkan ia meresap dan bertindak balas dengan karbon. Tambahan pula, pengaktifan kimia boleh mengakibatkan pencemaran air kerana langkah pembasuhan diperlukan untuk membasmi agen pengaktifan sepenuhnya pada karbon (Rashidi & Yusup 2017).

Berdasarkan Rajah 4, sampel A dan B menunjukkan isoterma jenis III mengikut piawaian IUPAC (Kumar et al. 2019). Bahagian curam pertama pada isoterma jenis III menunjukkan kapasiti tepu penjerapan monolapisan penjerap yang mencadangkan bahawa interaksi antara N<sub>2</sub> dan sampel adalah lemah (Wang et al. 2020). Jika dibandingkan dengan jumlah isi padu liang bagi sampel

A dan B (Jadual 2), ini menunjukkan kedua-dua sampel sebelum proses pengkarbonan adalah tidak berliang. Manakala, sampel C, D, E dan F pula menunjukkan isoterma jenis I (mikroliang). Berdasarkan data analisis t-plot pada Jadual 2, sebahagian besar luas permukaan dan isi padu liang kesemua sampel C, D, E dan F merupakan bersaiz mikro berbanding meso. Pemerhatian ini adalah

sama dengan hasil kajian yang telah dijalankan oleh Noor et al. (2014) yang mana karbon aktif EFB yang terhasil menunjukkan isoterma jenis I akibat kehadiran mikroliang. Manakala sampel G menunjukkan isoterma jenis IV. Isoterma jenis IV adalah isoterma yang menunjukkan penjerapan mesoliang pada permukaan sampel G (Saad et al. 2020). Walau bagaimanapun,



RAJAH 4. Isoterma jerapan-nyahjerapan bagi sampel A, B, C, D, E, F dan G



berdasarkan data luas permukaan dan isi padu liang pada Jadual 2, kehadiran mesoliant bagi sampel G adalah sangat minimum dan menunjukkan liang-liang karbon aktif telah musnah akibat keruntuhan dinding-dinding karbon apabila suhu pengaktifan yang sangat tinggi digunakan.

Berdasarkan sifat keporosan sampel karbon aktif yang telah dibincangkan, dapatlah dikatakan bahawa suhu pengaktifan 800 °C merupakan suhu yang paling optimum untuk menghasilkan karbon aktif berdasarkan kajian ini kerana pada suhu ini, karbon aktif yang terhasil mempunyai luas permukaan dan jumlah isi padu liang tertinggi serta purata saiz liang terendah serta isi padu dan luas mikroliang tertinggi. Justeru, karbon aktif dengan suhu pengaktifan 800 °C telah dipilih untuk menjalani analisis FTIR, XRD dan FESEM.

Analisis FTIR ini telah dijalankan untuk mengenal pasti kumpulan berfungsi yang terdapat pada serbuk EFB (sampel A), bio-arang (sampel B) dan karbon aktif 800 °C (sampel E). Jadual 3 menyatakan ringkasan bagi kumpulan berfungsi yang dapat diperhatikan dalam analisis FTIR ini bagi sampel-sampel ini. Spektrum FTIR sampel A menunjukkan kehadiran puncak getaran regangan mewakili kumpulan berfungsi -OH berbanding spektrum sampel B dan E. Ini kerana proses pengkarbonan dan pengaktifan telah menyingkirkan bahan meruap dan kelembapan pada suhu yang tinggi iaitu 500 °C dan 800 °C (Zainol, Amin & Asmadi 2017). Sehubungan itu,

hal ini adalah hampir sama dengan hasil kajian yang dijalankan oleh Noor et al. (2014) yang menunjukkan puncak penyerapan getaran kumpulan -OH pada EFB mentah boleh hilang selepas menjalani pengaktifan stim. Kedua, sampel E juga menunjukkan kehilangan puncak penyerapan getaran kumpulan C=C bagi sebatian aromatik. Hal ini membuktikan struktur aromatik lignin telah dimusnahkan akibat degradasi haba semasa proses pengaktifan stim (Mopoung & Dejang 2021). Ketiga, puncak penyerapan getaran C=O hanya pada sampel E menunjukkan proses pengaktifan stim menyebabkan kerosakan struktur bio-arang lalu menghasilkan kumpulan berfungsi baharu. Hal ini kerana wap air bukan sahaja bertindak sebagai agen dehidrasi malah sebagai agen pengoksidaan semasa proses pengaktifan (Yin et al. 2022). Akhir sekali, ketiga-tiga sampel ini juga menunjukkan kehadiran puncak penyerapan getaran kumpulan C-O yang bermaksud terdapat kumpulan eter pada EFB, bio-arang dan karbon aktif terhasil disebabkan kehadiran lignoselulosa (Zainol, Amin & Asmadi 2017). Hal ini dapat dikaitkan dengan komposisi serabut biojisim ini yang mempunyai kandungan selulosa sebanyak 23.70%, 21.60% hemiselulosa, 29.20% lignin dilihat sebagai langkah yang mampan dan hijau (Naher et al. 2022; Samiran et al. 2015). Justeru, dapat diperhatikan bahawa beberapa puncak penyerapan getaran dapat muncul dan hilang selepas proses pengaktifan stim.

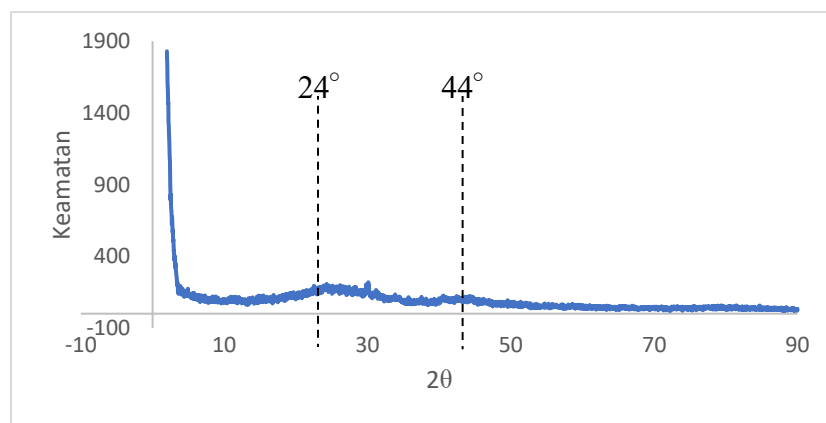
JADUAL 3. Ringkasan data cerapan FTIR bagi sampel A, B dan E

Sampel	Nombor gelombang (cm <sup>-1</sup> )	Puncak getaran
A	3385	Regangan -OH
	2971	Regangan -CH
	1600	Regangan C=C bagi sebatian aromatik
	1293	Regangan C-O
B	1682	Regangan C=C bagi sebatian aromatik
	1200	Regangan C-O
	2727	Regangan alifatik -CH
E	1795	Regangan C=O
	1259	Regangan C-O

Analisis XRD ini telah dijalankan bagi melihat sifat dan peratusan kehabluran bagi karbon aktif yang telah dihasilkan. Dalam analisis ini, karbon aktif dengan suhu pengaktifan 800 °C (sampel E) telah dipilih untuk dianalisis. Rajah 5 menunjukkan difraktogram bagi karbon aktif tersebut. Berdasarkan Rajah 5, terdapat dua puncak lebar dan tiada puncak tajam. Dua puncak lebar tersebut pada kedudukan  $2\theta = \sim 24^\circ$  dan  $2\theta = \sim 44^\circ$ . Hal ini dapat membuktikan bahawa struktur karbon pada karbon aktif yang dihasilkan mempunyai sebahagian besar struktur amorfus dan sebahagian kecil struktur hablur yang dapat dikaitkan dengan ketiadaan puncak tajam (Saad et al. 2020). Berdasarkan puncak lebar yang terhasil, struktur amorfus ini boleh dikatakan terdiri daripada kepingan grafena aromatik 17 yang berorientasi secara rawak serta sebahagian kecil satah (002) dan satah (100) bagi struktur grafit (Keppetipola et al. 2021). Hal ini demikian kerana proses pengaktifan stim menyebabkan struktur grafit dimusnahkan dan kepingan karbon yang tinggal kebanyakannya tidak teratur dengan liang-liang di kawasan permukaan karbon diaktifkan oleh wap air (Mopoung & Dejang 2021). Hasil kajian ini adalah hampir sama dengan hasil kajian yang telah dijalankan oleh Noor et al. (2014) iaitu, dua puncak lebar terhasil pada kedudukan  $2\theta = 20-30^\circ$  dan  $2\theta = 40-50^\circ$  apabila karbon aktif EFB dianalisis. Hal tersebut dapat membuktikan bahawa struktur karbon pada karbon aktif mengandungi sebahagian besar struktur amorfus. Sehubungan itu, bagi peratus kehabluran dan amorfus, karbon aktif ini menunjukkan peratus amorfus yang lebih tinggi berbanding kehabluran. Keputusan ini sejajar dengan puncak yang terhasil di dalam difraktogram yang mana puncak lebar yang tinggi menandakan kehadiran struktur amorfus dalam karbon aktif. Peratus amorfus

yang terdapat di dalam karbon aktif ini ialah 77.8%. Peratusan ini telah diperolehi terus daripada perisian XRD iaitu DIFFRAC.EVA.

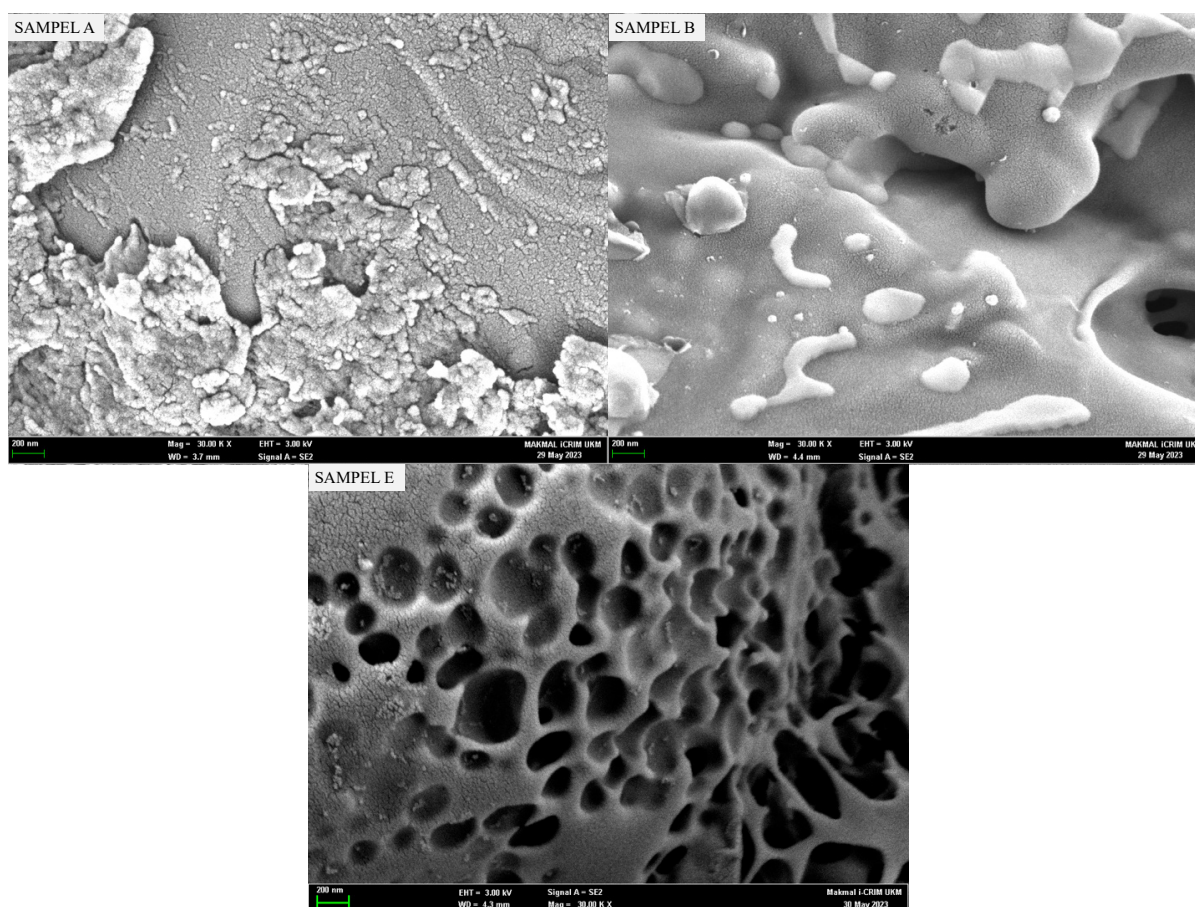
Analisis FESEM telah dijalankan untuk mengkaji morfologi permukaan serbuk tandan sawit kosong (sampel A), bio-arang (sampel B) dan karbon aktif 800 °C (sampel E). Morfologi permukaan seperti struktur liang, struktur permukaan dan susunan liang bagi setiap sampel dianalisis melalui analisis ini pada magnifikasi 30000 kali. Rajah 6 menunjukkan imej FESEM bagi sampel-sampel tersebut. Berdasarkan imej FESEM tersebut, sampel A mempunyai permukaan tidak teratur dan kasar yang merupakan ciri susunan struktur bahan mentah yang biasa digunakan sebagai bahan pemula untuk penghasilan karbon aktif (Lopes et al. 2021). Sampel B pula mempunyai permukaan kurang kasar berbanding sampel A dan sedikit berliang yang menunjukkan proses pengkarbonan telah dijalankan. Semasa proses tersebut, sedikit struktur liang mula terbentuk pada bahan pemula. Manakala sampel E mempunyai jumlah struktur liang lebih tinggi berbanding sampel lain. Struktur liang yang berbentuk bulat dan susunannya yang kurang teratur merupakan hasil daripada proses pengkarbonan dan pengaktifan stim. Semasa proses pengaktifan stim, molekul wap air bertindak balas dengan karbon dengan meresap masuk dalam struktur bio-arang yang membentuk rangkaian liang dengan lebih luas. Tambahan pula, penyingkiran bahan bahan meruap dan bahan bertar pada bio-arang telah berlaku lalu hal ini menyebabkan permukaan karbon aktif menjadi kurang kasar dan berliang (Mopoung & Dejang 2021). Sehubungan itu, karbon aktif adalah sejenis karbon yang tidak mengandungi grafit tetapi boleh menjadi grafit dengan struktur mikro yang tidak



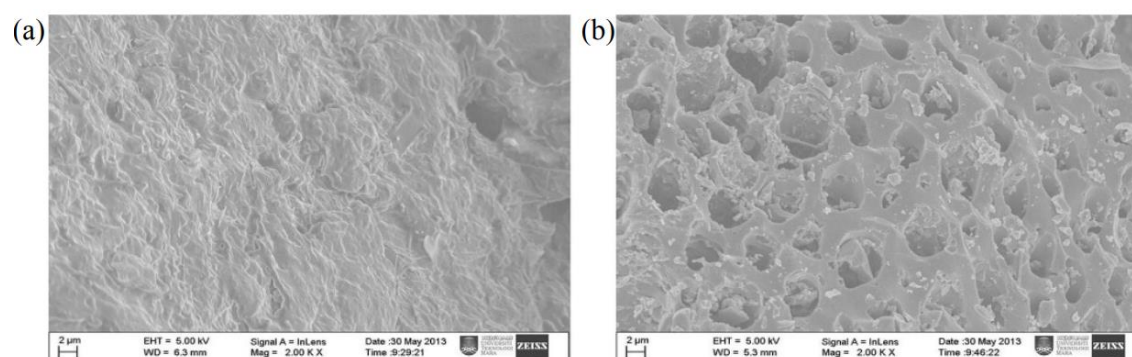
RAJAH 5. Difraktogram bagi sampel E

teratur kerana mempunyai unit struktur asas yang hampir kepada struktur grafit (Saad et al. 2020). Imej FESEM bagi serbuk EFB dan karbon aktif 800 °C dalam kajian ini adalah hampir sama dengan imej SEM yang terhasil bagi EFB mentah dan karbon aktif EFB yang dijalankan oleh Noor et al. (2014). Berdasarkan kajian mereka, permukaan EFB mentah adalah kasar dan hanya

mengandungi sedikit liang bersaiz kecil manakala permukaan karbon aktif EFB menunjukkan kehadiran liang bersaiz besar selepas pengaktifan stim dijalankan pada suhu 765 °C selama 77 minit seperti ditunjukkan pada Rajah 7. Justeru, dapat dilihat bahawa setiap proses yang dijalankan menghasilkan perubahan morfologi permukaan signifikan bagi setiap sampel dalam kajian ini.



RAJAH 6. Imej FESEM bagi sampel A, B dan E pada magnifikasi 30000 kali



RAJAH 7. Imej SEM bagi a) EFB mentah dan b) karbon aktif EFB

Sumber: Noor et al. (2014)

## KESIMPULAN

Karbon aktif daripada biojisim tandan sawit kosong melalui proses pengaktifan stim telah berjaya dihasilkan dalam kajian ini. Proses pengaktifan stim merupakan salah satu proses pengaktifan fizikal. Dalam kajian ini, suhu pengaktifan telah dimanipulasikan iaitu pada suhu 700, 750, 800, 900 dan 1000 °C manakala masa pengaktifan telah dimalarkan iaitu 1 jam. Hasil kajian mendapati suhu pengaktifan memberi impak besar dalam penghasilan karbon aktif ini. Peningkatan suhu pengaktifan daripada 700 hingga 800 °C memperlihatkan luas permukaan dan jumlah isi padu liang meningkat serta purata saiz liang menurun. Manakala, peningkatan suhu pengaktifan daripada 900 hingga 1000 °C memperlihatkan luas permukaan dan jumlah isi padu liang menurun serta purata saiz liang meningkat. Oleh itu, dapatlah dikatakan bahawa suhu pengaktifan 800 °C merupakan suhu yang paling optimum untuk menghasilkan karbon aktif berdasarkan kajian ini kerana pada suhu ini, karbon aktif yang terhasil mempunyai luas permukaan (561.0 m<sup>2</sup>/g) dan jumlah isi padu liang tertinggi (0.2800 cm<sup>3</sup>/g), purata saiz liang terendah (2.9 nm) serta terdapat kehadiran mikroliang tertinggi berbanding yang lain. Justeru, karbon aktif 800 °C telah dipilih untuk menjalani analisis FTIR, XRD dan FESEM. Analisis FTIR pula menunjukkan karbon aktif ini mengandungi kumpulan berfungsi seperti alifatik-CH, C=O dan -C-O. Selain itu, analisis XRD karbon aktif ini membuktikan bahawa karbon aktif merupakan struktur amorfus dengan peratus amorfus sebanyak 77.8%. Manakala, analisis FESEM memperlihatkan morfologi permukaannya berliang yang tidak teratur dan berbentuk bulat serta permukaan kurang kasar berbanding permukaan bahan pemula hasil daripada pengaktifan stim. Kesimpulannya, semua objektif dalam kajian ini telah tercapai dengan jayanya.

## PENGHARGAAN

Penulis ingin memberikan penghargaan kepada pihak Universiti Kebangsaan Malaysia dalam menyediakan peruntukan geran GP-K020401 dan kemudahan penyelidikan. Kesemua penulis tiada sebarang konflik kepentingan.

## RUJUKAN

- Acosta, R., Fierro, V., de Yuso, A.M., Nabarlatz, D. & Celzard, A. 2016. Tetracycline adsorption onto activated carbons produced by KOH activation of tyre pyrolysis char. *Chemosphere* 149: 168-176.
- Alam, M.Z., Muyibi, S.A. & Kamaldin, N. 2008. Production of activated carbon from oil palm empty fruit bunches for removal of zinc. *Twelfth International Water Technology Conference*. hlm. 374-383.
- Alhina, 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 Sources* 8: 1648-1656.
- Alvarez, J., Lopez, G., Amutio, M., Bilbao, J. & Olazar, M. 2015. Physical activation of rice husk pyrolysis char for the production of high surface area activated carbons. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 54(29): 7241-7250.
- Ayinla, R.T., Dennis, J.O., Zaid, H.M., Sanusi, Y.K., Usman, F. & Adebayo, L.L. 2019. A review of technical advances of recent palm bio-waste conversion to activated carbon for energy storage. *Journal of Cleaner Production* 229: 1427-1442.
- Elias, M.A., Hadibarata, T. & Sathishkumar, P. 2021. Modified oil palm industry solid waste as a potential adsorbent for lead removal. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 3: 1-7.
- Fu, J., Zhang, J., Jin, C., Wang, Z., Wang, T., Cheng, X. & Ma, C. 2020. Effects of temperature, oxygen and steam on pore structure characteristics of coconut husk activated carbon powders prepared by one-step rapid pyrolysis activation process. *Bioresource Technology* 310: 123413-123421.
- Gao, L., Dong, F.Q., Dai, Q.W., Zhong, G.Q., Halik, U. & Lee, D.J. 2016. Coal tar residues based activated carbon: Preparation and characterization. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineering* 63: 166-169.
- González-García, P. 2018. Activated carbon from lignocellulosics precursors: A review of the synthesis methods, characterization techniques and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82: 1393-1414.
- Hamzah, N., Tokimatsu, K. & Yoshikawa, K. 2019. Solid fuel from oil palm biomass residues and municipal solid waste by hydrothermal treatment for electrical power generation in Malaysia: A review. *Sustainability* 11(4): 1060.
- Ibrahim, I., Hassan, M.A., Abd-Aziz, S., Shirai, Y., Andou, Y., Othman, M.R., Ali, A.A.M. & Zakaria, M.R. 2017. Reduction of residual pollutants from biologically treated palm oil mill effluent final discharge by steam activated bioadsorbent from oil palm biomass. *Journal of Cleaner Production* 141: 122-127.
- Intarachandra, N., Siriworakon, S. & Sangmanee, T. 2019. Preparation of oil palm empty fruit bunch based activated carbon for adsorption of dye from aqueous solution. *MATEC Web of Conferences* 268: 06008-06013.
- Jawad, A.H., Mamat, N.F.H., Abdullah, M.F. & Ismail, K. 2017. Adsorption of methylene blue onto acid-treated mango peels: Kinetic, equilibrium and thermodynamic. *Desalination and Water Treatment* 59: 210-219.

- Jawad, A.H., Rashid, R.A., Ishak, M.A.M. & Wilson, L.D. 2016. Adsorption of methylene blue onto activated carbon developed from biomass waste by H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> activation: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Desalination and Water Treatment* 57(52): 25194-25206.
- Jiang, C., Yakaboylu, G.A., Yumak, T., Zondlo, J.W., Sabolsky, E.M. & Wang, J. 2020. Activated carbons prepared by indirect and direct CO<sub>2</sub> activation of lignocellulosic biomass for supercapacitor electrodes. *Renewable Energy* 155: 38-52.
- Kannan, P., Nur Hanani Mansor, Mohd Haizal Zainal Abidin, Rusnani Md. Rus, Khairuman Hashim, Zaki Aman & Tan Say Peng. 2022. Operating model for partnership between smallholders and mills: A study in Perak and Johor, Malaysia. *Oil Palm Industry Economic Journal* 22(2): 27-41.
- Keppetipola, N.M., Dissanayake, M., Dissanayake, P., Karunaratne, B., Dourges, M.A., Talaga, D., Servant, L., Olivier, C., Toupance, T., Uchida, S., Tennakone, K., Kumara, G.R.A. & Cojocar, L. 2021. Graphite-type activated carbon from coconut shell: A natural source for eco-friendly non-volatile storage devices. *RSC Advances* 11(5): 2854-2865.
- Khor, K.H., Lim, K.O. & Zainal, Z.A. 2009. Characterization of bio-oil: A by-product from slow pyrolysis of oil palm empty fruit bunches. *American Journal of Applied Sciences* 6(9): 1647-1652.
- Kumar, K.V., Gadipelli, S., Wood, B., Ramisetty, K.A., Stewart, A.A., Howard, C.A., Brett, D.J.L. & Rodriguez-Reinoso, F. 2019. Characterization of the adsorption site energies and heterogeneous surfaces of porous materials. *Journal of Materials Chemistry A* 7: 10104-10137.
- Lopes, G.K.P., Zanella, H.G., Spessato, L., Ronix, A., Viero, P., Fonseca, J.M., Yokoyama, J.T.C., Cazetta, A.L. & Almeida, V.C. 2021. Steam-activated carbon from malt bagasse: Optimization of preparation conditions and adsorption studies of sunset yellow food dye. *Arabian Journal of Chemistry* 14(3): 103001-103016.
- Marrakchi, F., Ahmed, M.J., Khanday, W.A., Asif, M. & Hameed, B.H. 2017. Mesoporous activated carbon prepared from chitosan flakes via single-step sodium hydroxide activation for the adsorption of methylene blue. *International Journal of Biological Macromolecules* 98: 233-239.
- May, J., Thoe, L., Surugau, N., Lye, H. & Chong, H. 2019. Application of oil palm empty fruit bunch as adsorbent: A review. *Transactions on Science and Technology* 6(1): 9-26.
- Mopoung, S. & Dejang, N. 2021. Activated carbon preparation from eucalyptus wood chips using continuous carbonization–steam activation process in a batch intermittent rotary kiln. *Scientific Reports* 11(1): 13948-13957.
- Mostapha, M., Azamkamal, F., Salleh, K.M., Amran, U.A., Gan, S. & Zakaria, S. 2021. Parameter optimization on esterified oil palm empty fruit bunch cellulose (OPEFB). *Sains Malaysiana* 50(12): 3719-3732.
- Naher, L., Mazlan, N.A., Hamzah, N.A.B., Islam, S. & Ab Rhaman, S.M.S. 2022. Palm press fibre and rice straw for cultivation grey oyster mushroom (*Pleurotus sajor-caju*). *Sains Malaysiana* 51(5): 1305-1315.
- Noor, H.A.R., Nor, F.M., Sharmeela, M. & Sharifah, A.S.A.K. 2014. Preparation and characterization of activated carbon from oil palm empty fruit bunch (EFB). *Key Engineering Materials* 594-595: 44-48.
- Nur Sulihatimarsyila, A.W., Lau, H.L.N., Loh, S.K., Astimar, A.A., Zulkifli, A.R. & Choo, Y.M. 2017. Activated carbon from oil palm biomass as potential adsorbent for palm oil mill effluent treatment. *Journal of Oil Palm Research* 29(2): 278-290.
- Odetoye, T.E., Afolabi, T.J., Abu Bakar, M.S. & Titiloye, J.O. 2018. Thermochemical characterization of Nigerian *Jatropha curcas* fruit and seed residues for biofuel production. *Energy, Ecology and Environment* 3(6): 330-337.
- Radenahmad, N., Tasfiah, A., Saghir, M., Taweekun, J., Saifullah, M., Bakar, A., Reza, M.S & Kalam, A. 2020. A review on biomass derived syngas for SOFC based combined heat and power application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 119: 109560.
- Rafsanjani, H.H., Kamandari, H. & Najjarzadeh, H. 2013. Study on pore and surface development of activated carbon produced from Iranian coal in a rotary Kiln reactor. *Iranian Journal of Chemical Engineering* 10: 27-38.
- Rahayu, D.E., Wirjodirdjo, B. & Hadi, W. 2019. Availability of empty fruit bunch as biomass feedstock for sustainability of bioenergy product (system dynamic approach). *AIP Conference Proceedings* 2194(1): 020095.
- Rashid, R.A., Jawad, A.H., Ishak, M.A.B.M. & Kasim, N.N. 2018. FeCl<sub>3</sub>-activated carbon developed from coconut leaves: Characterization and application for methylene blue removal. *Sains Malaysiana* 47(3): 603-610.
- Rashidi, N.A. & Yusup, S. 2017. A review on recent technological advancement in the activated carbon production from oil palm wastes. *Chemical Engineering Journal* 314: 277-290.
- Reza, M.S., Yun, C.S., Afroze, S., Radenahmad, N., Bakar, M.S.A., Saidur, R., Taweekun, J. & Azad, A.K. 2020. Preparation of activated carbon from biomass and its' applications in water and gas purification, a review. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences* 27(1): 208-238.
- Saad, M.J., Hua, C.C., Misran, S., Zakaria, S., Sajab, M.S. & Abdul Rahman, M.H. 2020a. Rice husk activated carbon with NaOH activation: Physical and chemical properties. *Sains Malaysiana* 49(9): 2261-2267.
- Saad, M.J., Chin Hua, C., Zakaria, S., Sajab, M.S. & Misran, S. 2020b. Malaysia rice wastes for activated carbon production. *Proceeding - 9th Kuala Lumpur International Agriculture, Forestry and Plantation Conference (KLIAFP9)*. hlm. 20-26.
- Samiran, N.A., Jaafar, M.N.M., Chong, C.T. & Jo-Han, N. 2015. A review of palm oil biomass as a feedstock for syngas fuel technology. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)* 72: 13-18.

- United Nations Development Programme. 2017. Goal 13: *Climate Action*. UNDP. <https://www.my.undp.org/content/malaysia/en/home/sustainable-development-goals/goal-13-climate-action.html>. Diakses 22 Jun 2023.
- Wang, Y., Wang, L., Deng, X. & Gao, H. 2020. A facile pyrolysis synthesis of biochar/ZnO passivator: Immobilization behavior and mechanisms for Cu (II) in soil. *Environmental Science and Pollution Research* 27(2): 1888-1897.
- Wei, X. & Li, T. 2021. Wooden activated carbon production for dioxin removal via a two-step process of carbonization coupled with steam activation from biomass wastes. *ACS Omega* 6(8): 5607-5618.
- Wong, S., Ngadi, N., Inuwa, I.M. & Hassan, O. 2018. Recent advances in applications of activated carbon from biowaste for wastewater treatment: A short review. *Journal of Cleaner Production* 175: 361-375.
- Yin, Y., Liang, D., Liu, D. & Liu, Q. 2022. Preparation and characterization of three-dimensional hierarchical porous carbon from low-rank coal by hydrothermal carbonization for efficient iodine removal. *RSC Advances* 12(5): 3062-3072.
- Xu, J., Chen, L., Qu, H., Jiao, Y., Xie, J. & Xing, G. 2014. Preparation and characterization of activated carbon from reedy grass leaves by chemical activation with H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. *Applied Surface Science* 320: 674-680.
- Zainol, M.M., Amin, N.A.S. & Asmadi, M. 2017. Preparation and characterization of impregnated magnetic particles on oil palm frond activated carbon for metal ions removal. *Sains Malaysiana* 46(5): 773-782.

\*Pengarang untuk surat-menyurat; email: darfizzi@ukm.edu.my