

Pembuatan Arang Aktif Kultur Jaringan dari Pelelepah Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) dengan Metode Aktivasi Fisika-Kimia

Yudia Azmi*, Eka Sri Utami, Reiza Mutia AR

Program Studi Agroteknologi Institut Teknologi Perkebunan Pelalawan Indonesia

*Email: udiaazmi@gmail.com

Abstrak

Pelelepah kelapa sawit berpotensi dijadikan arang aktif kultur jaringan sebagai penyerap senyawa fenol yang menyebabkan *browning* dan membantu pertumbuhan eksplan. Tujuan penelitian ini adalah menghasilkan arang aktif dari pelepah kelapa sawit yang sesuai Standar Nasional Indonesia (SNI 06-3730-1995) dan arang aktif kultur jaringan komersial, menghasilkan arang aktif dengan ukuran pori yang lebih besar dan bersih dari pengotor, serta menentukan suhu aktivasi optimum dalam menghasilkan arang aktif pelepah kelapa sawit kultur jaringan menggunakan metode aktivasi fisika-kimia. Rancangan penelitian yang digunakan adalah rancangan acak lengkap-non faktorial yang terdiri atas 4 perlakuan dan 3 ulangan, yaitu E0 (Kontrol, tanpa aktivasi fisika), E1 (suhu aktivasi fisika 450 °C), E2 (suhu aktivasi fisika 600 °C), dan E3 (suhu aktivasi fisika 750 °C). Parameter yang diamati yaitu rendemen arang aktif (%), kadar air (%), kadar abu (%), daya serap terhadap iodine (%), kadar zat menguap pada pemanasan 950 °C (*volatile matter*, %) dan morfologi permukaan arang aktif. Rendemen arang aktif yang dihasilkan berkisar 0,56–1,09%. Seluruh perlakuan memberikan pengaruh nyata terhadap kadar air, kadar abu, daya serap iodine, dan *volatile matter*. Secara umum, karakteristik arang aktif telah sesuai SNI dan arang aktif kultur jaringan komersial, kecuali kadar air yang masih lebih tinggi. Suhu 750 °C (E3) menjadi kondisi aktivasi optimum karena menghasilkan kadar air dan abu yang rendah, daya serap iodine tinggi, *volatile matter* rendah, serta pori yang lebih besar dan bersih.

Kata kunci: Aktivasi fisika-kimia, Arang aktif, Pelelepah kelapa sawit.

Abstract

Oil palm frond has potential to be utilized as activated charcoal for plant tissue culture as phenolic compound absorber which causes browning and to promote explant growth. The objectives of this study were to produce activated charcoal from palm oil fronds which has characteristics in accordance with Indonesian National Standards (SNI 06-3730-1995) and commercial activated charcoal for plant tissue culture, to obtain larger activated charcoal pores and clean from the impurities, and to find optimum activated temperature in producing oil palm frond's activated charcoal using physical-chemical activation method. The research design used was a non factorial - completely randomized design consisted of 4 treatments and 3 replications, namely E0 (control, without physical activation), E1 (physical activation of 450 °C), E2 (physical activation of 600 °C), E3 (physical activation of 750 °C). The parameters observed were the yield of activated charcoal (%), moisture content (%), ash content (%), iodine absorption (mg/g), *volatile matter* (%) and surface morphology of activated charcoal. The yield of activated charcoal ranged from 0.56 to 1.09%. All treatments significantly affected moisture content, ash content, iodine adsorption, and *volatile matter*. Overall, the characteristics of the activated charcoal met the SNI standards and commercial tissue-culture charcoal, except for moisture content. The 750 °C activation temperature (E3) was identified as the optimum condition, producing low moisture and ash content, high iodine adsorption, low *volatile matter*, and larger, cleaner pore morphology.

Keyword: Activated charcoal, oil palm frond, physical-chemical activation.

<https://ejournal.urindo.ac.id/index.php/pertanian>

Article History :

Submitted 26 September 2024, Accepted 30 Maret 2026, Published 31 Maret 2026

PENDAHULUAN

Perkebunan kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) merupakan tumbuhan industri penting penghasil minyak industri, maupun bahan bakar. Menurut [1], luas areal perkebunan kelapa sawit Provinsi Riau mencapai 3.494.582 ha dengan sebaran 1.802.529 ha perkebunan milik rakyat, 1.041.490 ha perkebunan milik swasta dan luas akan dikonfirmasi 573.569 ha. Aktivitas budidaya kelapa sawit menghasilkan limbah padat berupa pelepah. Menurut [2], setiap pokok kelapa sawit menghasilkan rata-rata sebanyak 22 pelepah pertahun. Menurut [3], limbah pelepah kelapa sawit dari kegiatan penunasan dan pemanenan yang dapat dihasilkan di Provinsi Riau dapat mencapai 8.179 pelepah/tahun/ha. Besarnya jumlah limbah pelepah kelapa sawit yang dihasilkan tersebut berpotensi dikembangkan menjadi produk yang memiliki nilai ekonomi.

Limbah pelepah kelapa sawit biasanya hanya digunakan sebagai pakan ternak atau bahan baku pupuk kompos. Menurut [4], pelepah dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku arang aktif yang bernilai ekonomi. Arang aktif adalah arang yang telah mengalami perubahan sifat fisika dan kimia karena diberi perlakuan aktivasi dengan aktivator bahan kimia atau dengan pemanasan pada temperatur tinggi, sehingga daya serap dan luas permukaan partikel serta kemampuan arang tersebut akan menjadi lebih tinggi. [5] melaporkan, pembuatan arang aktif pelepah

kelapa sawit dengan jenis aktivator kimia H_3PO_4 9%, NaCl dan belimbing wuluh. Perlakuan aktivator H_3PO_4 9% dengan suhu pengeringan $110\text{ }^\circ\text{C}$ menghasilkan arang aktif sesuai dengan SNI. [6] melaporkan pembuatan arang aktif cangkang kelapa sawit dengan metode aktivasi fisika menggunakan perlakuan suhu $850\text{ }^\circ\text{C}$ menghasilkan arang aktif dengan kualitas terbaik.

Arang aktif komersil umumnya sulit diperoleh dan memiliki harga yang relatif mahal sehingga diperlukan bahan alternatif yang lebih terjangkau dan mudah ditemukan salah satunya yaitu pelepah kelapa sawit. Selain itu, pelepah kelapa sawit merupakan limbah padat kelapa sawit yang banyak dijumpai di Pelalawan. Arang aktif dapat digunakan dalam industri kesehatan, lingkungan dan pertanian. Pada industri kesehatan arang aktif digunakan sebagai bahan tambahan produk pemeliharaan kebersihan, antara lain sabun, lulur dan sampo. Arang aktif juga bisa digunakan dalam proses penjernihan air dan udara di bidang lingkungan. Arang aktif di bidang pertanian digunakan pada media kultur *in vitro* untuk meningkatkan pertumbuhan tinggi plantlet, tunas dan jumlah akar [7]. Arang aktif juga dapat digunakan dalam kultur jaringan untuk menyerap senyawa fenol yang dapat menyebabkan *browning* dan membantu pertumbuhan eksplan [8]. Arang aktif mampu merangsang pertumbuhan akar dan menumbuhkan kalus dari pollen anter yang ditumbuhkan pada media cair [9]. Hasil penelitian [10], melaporkan bahwa pemberian

arang aktif komersial sebanyak 1 g/l dapat memacu pertunasan dan merangsang perakaran pada eksplan jeruk nipis (*Citrus aurantifolia* L.). [11], menyatakan bahwa penambahan 2 g/l arang aktif komersial mampu meningkatkan jumlah dan panjang akar, menyebabkan penyerapan air dan nutrisi yang ada pada media menjadi optimal sehingga menghasilkan banyaknya akar primer dan penampilan visual tunas atau tanaman lebih baik dibandingkan tanpa penambahan arang aktif. Menurut [12], arang aktif cangkang kelapa sawit sebanyak 3 g/l dapat mencegah *browning* dan induksi kalus jeruk kasturi dengan waktu kalus 14 hari setelah inisiasi.

Pembuatan arang aktif terdiri atas dua tahap yaitu proses karbonisasi dan aktivasi. Karbonisasi merupakan proses pembakaran bahan baku pada suhu tinggi yang menyebabkan terjadinya dekomposisi senyawa organik yang menyusun struktur bahan baku [4], sedangkan proses aktivasi bertujuan untuk memperbesar porositas dan luas permukaan karbon aktif [13]. Arang aktif perlu diaktivasi karena sebagian dari pori-porinya masih tertutup hidrokarbon, tar, dan senyawa organik lain. Menurut [14], permukaan arang aktif yang telah bebas dari deposit hidrokarbon mampu melakukan adsorpsi karena permukaannya lebih luas dan pori-porinya telah terbuka.

Aktivasi dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu aktivasi secara kimia dan aktivasi secara fisika [13]. Aktivasi secara kimia yaitu proses pemutusan rantai karbon dari senyawa

organik dengan pemakaian bahan-bahan kimia, sedangkan aktivasi secara fisika yaitu proses aktivasi dengan cara memutuskan ikatan karbon dari senyawa organik dengan bantuan panas CO₂ dan uap [15]. Selain kedua cara tersebut, aktivasi arang aktif dapat dilakukan dengan menggabungkan cara fisika dan kimia. Tujuan penggabungan aktivasi fisika dan kimia untuk memperoleh karbon aktif dengan pori yang lebih besar, serta membersihkan seluruh permukaan karbon aktif yang masih tertutup oleh tar dan pengotor lainnya [16]. [16], membandingkan pembuatan arang aktif cangkang kelapa sawit dengan aktivasi secara fisika, kimia dan fisika-kimia. Penelitian ini menghasilkan arang aktif cangkang kelapa sawit secara fisika-kimia mempunyai daya jerap yang paling baik dengan perlakuan optimum suhu aktivasi fisika 750 °C dalam waktu 4 jam dan aktivasi kimia menggunakan ZnCl₂.

Tujuan dilakukan penelitian ini untuk Mengetahui rendemen arang aktif pelepah kelapa sawit yang dihasilkan dengan metode aktivasi fisika-kimia. pengaruh perlakuan suhu aktivasi fisika berpengaruh terhadap karakteristik arang aktif pelepah kelapa sawit yang dihasilkan. Menghasilkan arang aktif dari pelepah kelapa sawit yang memiliki karakteristik sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI 06- 3730-1995) dan arang aktif kultur jaringan komersil. Menghasilkan arang aktif pelapah kelapa sawit dengan pori-pori yang lebih besar dan bersih dari pengotor.

Menentukan suhu aktivasi optimum dalam menghasilkan arang aktif pelepah kelapa sawit

METODE

Tempat dan Waktu

Penelitian ini mulai dilaksanakan pada bulan maret 2024 sampai dengan bulan mei 2024. Lokasi penelitian antara lain Laboratorium Terpadu, Institut Teknologi Perkebunan Pelalawan Indonesia (ITP2I), Laboratorium Teknik Kimia Universitas Riau (UR), Unit Pelaksana Teknis Daerah (UPTD) Laboratorium Peralatan Energi Sumber Daya Mineral (ESDM) Kota Pekanbaru, serta Laboratorium Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis Institut Teknologi Bandung (ITB). Kegiatan yang dilakukan di Laboratorium Terpadu ITP2I yaitu preparasi bahan, dehidrasi dan pengecilan ukuran, proses aktivasi kimia, penghitungan rendemen arang serta uji kadar air. Kegiatan yang dilakukan di Laboratorium Teknik Kimia UR yaitu karbonisasi, aktivasi fisika dan analisis sampel uji daya serap iodine. Analisis kadar abu dan uji bagian yang hilang pada pemansan 950 °C (*Volatile matter*) arang aktif dilaksanakan di UPTD Laboratorium Peralatan (ESDM) Kota Pekanbaru. Kegiatan yang dilakukan Laboratorium Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis di ITB yaitu uji SEM.

kultur jaringan dengan metode aktivasi fisika-kimia.

Bahan dan Alat Penelitian

Bahan dan Alat penelitian ini adalah Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanur, saringan, oven, *erlenmeyer*, termometer, pH meter, ayakan 50 *mesh* dan 60 *mesh*, suntikan 1 ml, *beaker glass*, cawan krusibel, cawan petri, pipet tetes, corong, spatula, kertas saring 40 (110 mm), cawan porselen, pengaduk, parang, lumpang porselin, blender, timbangan analitik, desikator, label, *plastic wrap*, plastik klip, *aluminium foil*, dan kamera. Bahan yang digunakan adalah pelepah kelapa sawit, larutan H₃PO₄ 9%, silica gel, larutan iodium, larutan natrium tiosulfat, serbuk emas dan *aquadest*.

Rancangan Penelitian

Rancangan Penelitian ini adalah dengan 4 perlakuan dan 3 ulangan sehingga diperoleh 12 unit percobaan. Adapun perlakuan yang akan digunakan sebagai berikut:

E0 = Kontrol (Tanpa Aktivasi Fisika)

E1 = Suhu Aktivasi Fisika 450 °C

E2 = Suhu Aktivitas Fisika 600 °C

E3 = Suhu Aktivitas Fisika 750 °C

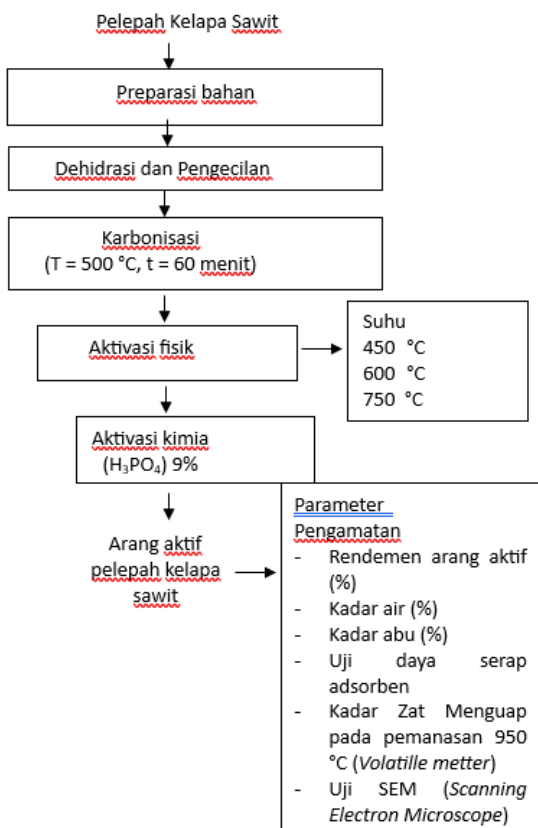
Analisis Data

Analisis perbedaan (ANOVA) digunakan untuk menganalisis parameter penelitian pada taraf signifikansi 0,05 ($p \leq 0,05$). Analisis ANOVA menggunakan program SPSS IBM 18 *one Way*. Jika hasil analisis data menunjukkan pengaruh yang signifikan, uji

lanjut dilakukan menggunakan *Duncan's Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf 5%.

Langkah Kerja

Diagram alir pelaksanaan penelitian disajikan pada Gambar 1. Secara garis besar, penelitian ini terdiri atas 6 (enam) tahap, yaitu: preparasi bahan, pengecilan ukuran, karbonisasi, aktivasi fisika, aktivasi kimia, dan pengujian parameter. Pembahasan mengenai masing-masing tahap adalah sebagai berikut.



Gambar 1. Diagram Alir Pelaksanaan Penelitian

Langkah Kerja

Pelepah kelapa sawit yang telah dikumpulkan kemudian dipotong dengan ukuran 2 cm. Pelepah kelapa sawit yang telah dipotong lalu dicuci dengan air bersih

sebanyak 3 kali. Selanjutnya pelepah kelapa sawit dikeringanginkan selama 1 jam [17]. Kemudian selama satu jam, pelepah dipanaskan dalam oven pada suhu 100 °C hingga bahan baku kering atau kadar airnya berkurang [4]. Setelah dioven, pelepah dihaluskan dan diayak dengan ukuran 50 *mesh*. Pelepah kelapa sawit dikarbonisasi pada suhu 500 °C selama 60 menit sampai terbentuk arang dan diayak dengan ukuran 100 *mesh*. Proses aktivasi dilakukan dengan Pelepah kepala sawit yang telah di karbonisasi, diaktivasi secara aktivasi fisik menggunakan metode [16] yang telah dimodifikasi. Arang hasil karbonisasi diaktivasi di dalam tanur dengan suhu sesuai perlakuan selama 4 jam. Arang yang sudah di aktivasi secara fisik lalu dimasukkan ke dalam desikator selama 24 jam untuk didinginkan. Arang yang sudah dilakukan aktivasi fisika kemudian dilakukan proses aktivasi secara kimia dengan metode [5], yang telah dimodifikasi. Arang aktif pelepah kelapa sawit direndam dengan larutan H₃PO₄ 9%, perbandingan arang aktif larutan H₃PO₄ yaitu 1:15 (b/v). Campuran arang aktif dan larutan H₃PO₄ 9% diaduk selama 2 menit, kemudian ditutup dengan *plastic wrap* dan campuran didiamkan selama 22 jam pada suhu ruang. Kemudian, arang aktif disaring dengan kertas saring *whatmann* 40 (110 mm) dan dibilas dengan *aquadest* sebanyak 6 kali atau hingga pH air bilasan netral. Setelah pH arang aktif netral, arang aktif dikeringkan dalam oven pada suhu 110 °C

selama 1 jam 30 menit. Arang aktif yang telah didinginkan dalam desikator hingga suhu ruang. Arang aktif yang telah dingin dimasukkan kedalam plastik klip dan disimpan di dalam kotak yang berisi silica gel untuk menyerap kelembaban.

Parameter Penelitian

1. Rendemen Arang Aktif

Arang aktif yang sudah jadi didinginkan dalam desikator hingga suhu ruang. Arang aktif masing-masing perlakuan ditimbang massanya. Rendemen arang aktif dihitung dengan menggunakan Rumus berikut :

$$\text{Persentase Rendemen} = \frac{\text{Berat Arang aktif}}{\text{Berat Pelepah}} \times 100\%$$

2. Kadar Air (%)

Satu gram arang aktif dimasukkan ke dalam cawan petri yang telah dikeringkan. Sampel kemudian didehidrasi selama dua jam menggunakan oven pada suhu=110°C. Kemudian, sampel didinginkan dalam desikator dan ditimbang

Kadar air dapat dihitung menggunakan Rumus berikut:

$$\text{Kadar air} = \frac{M1-M2}{M2} \times 100\%$$

Keterangan :

M1 = berat awal arang aktif (g)

M2 = berat kering arang aktif (g)

3. Kadar Abu (%)

Tambahkan 1 g arang aktif ke dalam cawan Petri dan nyalakan api hingga seluruh sampel menjadi abu. Cawan petri didinginkan dalam desikator dan arang aktif ditimbang [18]. Kadar abu dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$\text{Kadar abu} = \frac{\text{berat abu}}{\text{berat sampel}} \times 100\%$$

4. Uji Daya Serap Terhadap Iodin

Masukkan 5 gram arang aktif ke dalam labu Erlenmeyer, kemudian tambahkan 100 ml larutan yodium 0,1 N dan aduk selama 15 menit. Kemudian pindahkan isinya ke dalam tabung centrifuge hingga karbon aktifnya keluar, kemudian ambil 10 ml air dan titrasi dengan larutan natrium tiosulfat 0,1 N. Bila air mulai berubah warna menjadi kuning pucat, tambahkan larutan amilum 1% sebagai indikator. Tunggu kembali hingga warna indikator berubah dari biru muda menjadi biru tua [19]. Uji serapan iodium dapat dihitung dengan rumus berikut ini :

$$\text{Daya Serap Iod} = \frac{a}{b} \times \frac{(V \text{ blanko} - V \text{ sampel}) \times N \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}{W}$$

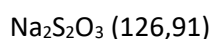
a= Volume larutan iodin (mL)

b= Volume Na₂S₂O₃ yang terpakai (ml)

W= bobot karbon aktif (g)

N(Na₂S₂O₃)= konsentrasi Na₂S₂O₃ (N)

BE 12 = jumlah iodine sesuai 1 ml larutan



5. Kadar Zat Menguap Pada Pemanasan 950 °C (*Volatile Matter*)

Timbang sampel hingga 1 gram, masukkan ke dalam gelas kimia dan tutupi dengan gelas kimia lain yang beratnya diketahui. Kemudian dipanaskan dalam tungku pada suhu 950 °C [18]. Setelah mencapai suhu, beratnya diukur. Diamati menggunakan Rumus sebagai berikut:

$$\text{Bagian yang menguap} = \frac{a-b}{a} \times 100\%$$

Keterangan :

a = berat arang aktif awal (g)

b= berat arang aktif setelah dipanaskan(g).

6. Morfologi Permukaan Arang Aktif

Morfologi permukaan arang dan arang aktif pelepah kelapa sawit diamati dengan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Sampel arang aktif sebanyak 1 gram dibekukan di atas aluminium foil hingga kering. Kemudian sampel ditaburi emas selama 30 detik menggunakan polaron. Sampel dimasukkan ke dalam SEM (*Scanning Electron Microscopy*) dengan jumlah dan arah yang berbeda dan kemudian akan ditangkap oleh detektor dan akan diteruskan ke sistem layar. Hasil yang diperoleh merupakan gambaran yang jelas dari permukaan dan patahan pori-pori arang aktif spesimen dalam bentuk tiga dimensi [20].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Rendemen Arang Aktif (%)

Rendemen arang aktif adalah perbandingan berat kering arang aktif yang dihasilkan dengan berat bahan baku. Penghitungan rendemen arang aktif bertujuan untuk mengetahui jumlah arang aktif yang dihasilkan dari proses karbonasi dan aktivasi. Rendemen arang aktif pelepah kelapa sawit yang didapatkan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Rendemen arang aktif

Perlakuan	Rendemen arang aktif (%)
E0	1,09
E1	1,01
E2	0,82
E3	0,56

Keterangan: E0 (kontrol), E1 (Suhu aktivasi fisika 450 °C), E2 (Suhu aktivasi fisika 600 °C), E3 (Suhu aktivasi fisika 750 °C).

Berdasarkan Tabel 4.1, rendemen tertinggi dihasilkan oleh perlakuan E0 yaitu sebesar 1,09% dan rendemen terendah dihasilkan oleh perlakuan E3 (kombinasi aktivasi kimia dan suhu aktivasi fisika 750 °C) yaitu sebesar 0,56%. Rendemen arang aktif pelepah kelapa sawit pada penelitian ini lebih kecil dibandingkan dengan arang aktif tempurung kemiri pada penelitian [21] yang

berkisar antara 56,67-77,33%. Rendemen yang kecil ini diduga terjadi karena karakteristik bahan baku arang aktif yang berbeda, kadar air, bahan baku, serta teknologi pengolahan yang digunakan [22].

Semakin tinggi suhu aktivasi fisika, semakin rendah rendemen yang didapatkan. Menurut [23], faktor yang mempengaruhi rendahnya rendemen arang aktif adalah suhu aktivasi fisika yang terlalu tinggi, sehingga dapat menyebabkan terbentuknya abu. Pernyataan ini sejalan dengan [21], suhu aktivasi fisika yang tinggi dan waktu aktivasi yang lama menyebabkan arang aktif menjadi terdegradasi dan uap air dalam aktivasi menyebabkan pencucian hidrokarbon yang terdapat di permukaan arang, sehingga bobot arang aktif yang dihasilkan rendah. Selain itu, kombinasi proses aktivasi dengan menggunakan H_3PO_4 setelah aktivasi fisika dilakukan, menyebabkan berat arang aktif yang didapatkan semakin rendah. Hal ini disebabkan adanya proses pembilasan dan penyaringan arang membuat sebagian arang aktif yang terlarut atau terbuang selama proses ini dilakukan [24].

Tabel 4.1 juga menunjukkan rendemen arang aktif yang dihasilkan perlakuan E0 (kontrol) lebih besar dibandingkan dengan rendemen arang aktif yang dihasilkan dari kombinasi aktivasi fisika-kimia (E1, E2, dan E3). Hal ini disebabkan oleh proses aktivasi arang aktif perlakuan E0 hanya dilakukan satu kali, sehingga jumlah arang aktif yang hilang selama proses tersebut tidak banyak. Selain itu

menurut [25], lebih tingginya rendemen arang aktif yang diaktivasi kimia disebabkan oleh penggunaan H_3PO_4 9% saat aktivasi dapat melindungi arang dari suhu tinggi dan memperlambat laju reaksi pada proses oksidasi. [26] juga menyatakan hal yang sama yaitu penambahan aktivator kimia H_3PO_4 dapat memperlambat laju reaksi oksidasi, sehingga rendemen yang dihasilkan cenderung lebih tinggi.

Kadar Air (%)

Kadar air merupakan banyaknya air yang terkandung dalam bahan dan dinyatakan dalam persen. Penentuan kadar air bertujuan untuk mengetahui sifat higroskopis dari arang aktif, sehingga dapat dijadikan absorben yang baik. Menurut [27], persentase kadar air arang aktif sangat dipengaruhi oleh jumlah uap air di udara, lama proses pendinginan, dan sifat higroskopis dari arang tersebut. Hasil pengamatan terhadap kadar air arang aktif pelepah kelapa sawit dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Berdasarkan hasil ANOVA, suhu aktivasi fisika berpengaruh terhadap kadar air arang aktif. Kadar air arang aktif pelepah kelapa sawit yang didapatkan pada penelitian ini yaitu antara 25,00% - 39,00%. Persentase kadar air paling tinggi dihasilkan oleh perlakuan E1 sebesar $53,33 \pm 0,58\%$ dan berbeda nyata dengan perlakuan E0, E2, dan E3. Kadar air terendah dihasilkan oleh perlakuan E3 sebesar $25,00 \pm 1,72\%$ dan berbeda nyata dengan E0, E1, dan E2. Secara keseluruhan,

kadar air pada penelitian ini hampir sama dengan kadar air arang aktif pelepah kelapa sawit yang dihasilkan dari penelitian [5] yaitu 37,3 – 54,2%. Kadar air yang dihasilkan oleh arang aktif dalam penelitian ini lebih tinggi dibandingkan kadar air SNI dan arang aktif komersil.

Tabel 2. Kadar air (%) arang aktif pelepah kelapa sawit

Perlakuan	Kadar Air(%)
E0	39,00±1,00c
E1	53,33 ± 0,58 d
E2	36,6 ± 1, 53 b
E3	25,00 ± 1,72 a
SNI 06-37301995	Maks.10
Komersial	0,7

Keterangan : E0 (kontrol), E1 (Suhu aktivasi fisika 450 °C), E2 (Suhu aktivasi fisika 600 °C), E3 (Suhu aktivasi fisika 750 °C). Notasi huruf yang berbeda menunjukkan beda nyata pada taraf 5%.

Kadar air yang tinggi tidak diinginkan pada arang aktif. Menurut [28], semakin kecil kadar air, maka semakin baik kualitas arang aktif tersebut, sedangkan semakin besar kadar air maka semakin banyak pori arang aktif yang tertutup oleh air. Hal ini menyebabkan daerah penyerapan pada permukaan arang aktif semakin kecil sehingga menyebabkan daya adsorbsinya semakin kecil. Tingginya kadar air arang aktif pelepah kelapa sawit pada penelitian ini diduga disebabkan adanya molekul air yang

terikat baik berbentuk uap maupun cair yang terperangkap dalam pori-pori arang aktif dan tidak keluar saat proses pemanasan pada suhu aktivasi tinggi. [29], kadar air yang tinggi dapat disebabkan oleh pada tahap pembilasan arang aktif (setelah aktivasi kimia) dan pendinginan (setelah proses pengeringan), uap air dari udara terperap dalam pori arang aktif karena sifat higroskopis dari arang aktif tersebut.

Tabel 2 juga menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu aktivasi fisika, maka semakin rendah kadar air arang aktif pelepah kelapa sawit. Hal ini sejalan dengan pernyataan [30] yaitu suhu saat aktivasi mempengaruhi tingginya kadar air arang aktif. [31] juga menyatakan suhu tinggi dan lama aktivasi berpengaruh terhadap kadar air arang aktif kayu kelapa. Perlakuan yang menghasilkan kadar air arang aktif terendah (2,52%) yaitu dengan suhu aktivasi 800 °C dan waktu 3 jam.

Kadar Abu (%)

Kualitas arang aktif juga dapat dilihat dari persentase kadar abu. Bahan alam sebagai bahan baku pembuatan arang aktif tidak hanya mengandung senyawa karbon tetapi juga mengandung beberapa mineral. Sebagian mineral tersebut hilang pada saat karbonisasi dan aktivasi, sedangkan sebagian lagi diperkirakan masih tertinggal dalam arang aktif [32]. Persentase kadar abu menunjukkan jumlah sisa zat-zat mineral yang tidak hilang selama proses pembakaran (karbonisasi) dan tidak terpisah pada saat aktivasi. Penentuan

kadar abu juga bertujuan untuk mengetahui kandungan oksida logam dalam arang aktif [33]. Hasil pengamatan terhadap kadar abu arang aktif pelepah kelapa sawit dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Kadar abu arang aktif pelepah kelapa sawit

Perlakuan	Kadar Abu (%)
E0	2,21 ± 0,03 a
E1	4,20 ± 0,07 b
E2	4,53 ± 0,03 c
E3	2,18 ± 0,00 a
SNI 06-3730-1995	Maks.10
Komersial	0,7

Keterangan : E0 (kontrol), E1 (Suhu aktivasi fisika 450 °C), E2 (Suhu aktivasi fisika 600 °C), E3 (Suhu aktivasi fisika 750 °C). Notasi huruf yang berbeda menunjukkan beda nyata pada taraf 5%.

Berdasarkan hasil ANOVA, suhu aktivasi fisika berpengaruh terhadap kadar abu arang aktif pelepah kelapa sawit. Kadar abu yang didapatkan pada penelitian ini yaitu antara 2,18% - 4,53%. Persentase kadar abu paling tinggi dihasilkan oleh perlakuan E2 sebesar 4,53 ± 0,03% dan berbeda nyata dengan perlakuan E0, E1, dan E3. Kadar abu terendah dihasilkan oleh perlakuan E3 sebesar 2,18 ± 0,00% dan berbeda nyata dengan perlakuan E1 dan E2, tetapi tidak berbeda nyata dengan perlakuan

E0. Kadar abu pelepah kelapa sawit yang dihasilkan pada penelitian ini lebih rendah dibandingkan dengan kadar abu arang aktif pelepah kelapa sawit yang dihasilkan oleh [5] yaitu 9,6%. Seluruh arang aktif yang dihasilkan pada penelitian ini menghasilkan kadar abu yang sudah sesuai dengan SNI, tetapi masih lebih tinggi dibandingkan dengan kadar abu arang aktif komersial. Kadar abu yang tinggi tidak diinginkan dalam arang aktif. Menurut [34], kadar abu yang berlebihan pada saat aktivasi fisika dapat menyebabkan terjadinya penyumbatan pori-pori arang aktif sehingga luas permukaan arang aktif berkurang dan terbentuknya garam-garam mineral pada saat pengarangan.

Tabel 3. menunjukkan semakin tinggi suhu aktivasi fisika, kadar abu arang aktif cenderung semakin rendah. Hal ini diduga disebabkan oleh suhu aktivasi fisika yang tinggi menyebabkan bahan mineral dan oksida logam pada arang aktif lebih banyak yang hilang sehingga persentase kadar abunya lebih rendah. Sebaliknya suhu aktivasi fisika yang rendah menyebabkan bahan mineral pada arang aktif lebih sedikit yang hilang sehingga persentase kadar abunya lebih tinggi.

Persentase kadar abu yang dihasilkan dari arang pelepah kelapa sawit perlakuan E0 (kontrol) lebih kecil dibandingkan dengan arang aktif dari perlakuan kombinasi aktivasi fisika-kimia terutama pada perlakuan E1 dan E2. Hal ini diduga karena abu yang dihasilkan setelah tahap aktivasi fisika dengan kandungan mineral

tertentu akan bereaksi dengan senyawa kimia yang digunakan pada saat aktivasi kimia. Hasil reaksi ini akan terbakar dan sebagian menjadi abu pada saat analisis kadar abu. Oleh karena itu, abu yang terukur bukan hanya dari arang itu sendiri tetapi juga berasal dari hasil reaksi antara kandungan mineral dalam abu dan senyawa kimia sebagai aktivator [16].

Menurut [35], pada pori-pori arang biasanya terdapat pengotor berupa mineral anorganik dan oksida logam yang menutupi pori. Selama proses aktivasi kimia, pengotor tersebut larut dalam aktivator sehingga menyebabkan luas permukaan pori-pori semakin besar. [24] saat tahap pencucian diakhir proses aktivasi kimia dapat melarutkan logam-logam atau mineral yang ada pada arang aktif sehingga kadar abunya menjadi relatif lebih rendah.

Daya Serap Terhadap Iodine

Daya serap terhadap iodine merupakan parameter utama dalam menentukan kualitas arang aktif. Penentuan daya serap iodine bertujuan untuk menentukan kapasitas adsorpsi arang aktif [36]. [37] menyatakan bahwa uji daya serap iodine bertujuan untuk mengetahui kemampuan arang aktif dalam menyerap larutan berwarna dengan ukuran molekul kurang dari 1 nm. Hasil pengamatan terhadap daya serap iodine arang aktif pelepah kelapa sawit dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Daya serap terhadap iodine arang aktif pelepah kelapa sawit

Perlakuan	Nilai daya serap terhadap iodine (mg/g)
E0	3.325,57 ± 228,33 a
E1	3.401,72 ± 252,54 b
E2	3.452,50 ± 244,81 b
E3	3.528,65 ± 216,53 c
SNI 06-3730-1995	Minimal 750
Komersial	843

Keterangan: E0 (kontrol), E1 (Suhu aktivasi fisika 450 °C), E2 (Suhu aktivasi fisika 600 °C), E3 (Suhu aktivasi fisika 750 °C). Notasi huruf yang berbeda menunjukkan beda nyata pada taraf 5%.

Berdasarkan hasil ANOVA, suhu aktivasi fisika berpengaruh terhadap daya serap iodine arang aktif pelepah kelapa sawit. Nilai daya serap terhadap iodine yang didapatkan pada penelitian ini yaitu antara 3.325,57 - 3.528,65 mg/g. Nilai daya serap terhadap iodine paling tinggi dihasilkan oleh perlakuan E3 sebesar 3.528,65 ± 216,53 mg/g dan berbeda nyata dengan perlakuan E0, E1, dan E2. Nilai daya serap terhadap iodine terendah dihasilkan oleh perlakuan E0 sebesar 3.325,57 ± 228,33 mg/g dan berbeda nyata dengan perlakuan E1, E2, dan E3. Secara keseluruhan, nilai daya serap iodine arang aktif pelepah kelapa sawit yang dihasilkan pada penelitian ini lebih tinggi dibandingkan dengan nilai daya serap iodine arang aktif pelepah kelapa sawit tertinggi yang

dihasilkan pada penelitian [5] yaitu 742,4337 mg/g. Secara keseluruhan, daya serap iodine pada penelitian ini sudah memenuhi standar SNI dan lebih tinggi dibandingkan arang aktif komersial.

Menurut [38] tinggi rendahnya nilai daya serap arang aktif terhadap iodine menunjukkan banyaknya jumlah dan besarnya diameter pori arang aktif yang terbentuk. Oleh karena itu, semakin besar nilai daya serap terhadap iodine maka semakin banyak jumlah pori dan semakin besar ukuran pori arang aktif yang terbentuk dan semakin baik kualitas arang aktif tersebut.

Tabel 4 menunjukkan semakin tinggi suhu aktivasi, nilai daya serap iodine arang aktif pelepah kelapa sawit semakin besar. Selain itu, nilai daya serap iodine arang aktif pelepah kelapa sawit dari perlakuan kombinasi aktivasi fisika-kimia (E1, E2, E3) lebih besar dibandingkan dengan kontrol (E0). [38] menyatakan bahwa ukuran diameter pori arang aktif sangat dipengaruhi oleh suhu. Semakin tinggi suhu aktivasi yang digunakan, maka semakin banyak pelat-pelat karbon yang bergeser yang akan mendorong senyawa hidrokarbon, tar dan senyawa organik lainnya untuk keluar dari pori. [39] menyatakan bahwa Rendahnya daya serap arang aktif dapat disebabkan oleh kerusakan atau erosi dinding pori karbon dan dapat juga menggambarkan sedikitnya struktur mikropori yang terbentuk dan kedalaman pori yang kurang dalam atau dangkal.

Kadar Zat Menguap Pada Pemanasan 950 °C (*Volatile Matter*)

Volatile matter merupakan zat (selain air, abu dan karbon) yang menguap pada proses pemanasan dan menyebabkan bahan akan kehilangan beratnya [40]. *Volatile matter* umumnya terdiri dari senyawa sulfur, metana, hidrokarbon, hidrogen dan carbon monoksida, dan gas tidak mudah terbakar seperti karbon dioksida dan nitrogen [41]. Penentuan kadar bagian yang hilang (*volatile matter*) pada pemanasan 950 °C bertujuan untuk mengukur kandungan senyawa yang belum menguap saat dilakukannya proses karbonisasi pada arang aktif. Hasil pengamatan terhadap *volatile matter* arang pelepah kelapa sawit dapat dilihat pada Tabel 5.

Berdasarkan hasil ANOVA, suhu aktivasi fisika berpengaruh terhadap persentase *volatile matter* arang aktif pelepah kelapa sawit. Tabel 5 menunjukkan nilai *volatile matter* yang diperoleh pada arang aktif pelepah kelapa sawit berkisar antara 11,01 - 23,62%. Persentase *volatile matter* tertinggi dihasilkan dari perlakuan E2 yaitu $23,62 \pm 0,00\%$ dan berbeda nyata dengan perlakuan E0, E1, dan E3. Persentase *volatile matter* terendah dihasilkan dari perlakuan E0 yaitu $11,01 \pm 0,01\%$ dan berbeda nyata dengan perlakuan E1, E2, dan E3. Persentase *volatile matter* yang dihasilkan pada penelitian ini hampir sama dengan persentase *volatile matter* arang pelepah kelapa sawit yang dihasilkan dari penelitian [5] yaitu 14,4 – 20,8%.

Secara keseluruhan, persentase *volatile matter* arang aktif pelepah kelapa sawit yang dihasilkan pada penelitian ini sudah memenuhi SNI dan lebih kecil dibandingkan arang aktif kultur jaringan komersial.

Persentase *volatile matter* yang kecil menunjukkan arang aktif yang dihasilkan memiliki kualitas yang baik. Menurut [42] besarnya kadar zat mudah menguap disebabkan terdapatnya senyawa non karbon yang menempel pada permukaan karbon aktif pelepah sawit. Senyawa non karbon tersebut merupakan zat pengotor yang dapat menutupi pori-pori karbon aktif, sehingga mengurangi efektifitasnya dalam menyerap kontaminan. Oleh karena itu, semakin kecil persentase *volatile matter* maka semakin baik arang aktif tersebut.

Tabel 5. Kadar Zat Menguap (*Volatile matter*) arang aktif

Perlakuan	<i>Volatile matter</i> (%)
E0	11,01 ± 0,01 a
E1	16,60 ± 0,01 c
E2	23,62 ± 0,00 d
E3	16,30 ± 0,01 b

SNI 06-3730-1995	Maks.25
Komersial	33,41

Keterangan : E0 (kontrol), E1 (Suhu aktivasi fisika 450 °C), E2 (Suhu aktivasi fisika 600 °C), E3 (Suhu aktivasi fisika 750 °C). Notasi huruf yang berbeda menunjukkan beda nyata pada taraf 5%.

Tabel 5. menunjukkan persentase *volatile matter* arang aktif pelepah kelapa sawit meningkat dengan kenaikan suhu aktivasi fisika menjadi 600 °C, kemudian kembali turun pada suhu aktivasi fisika 750 °C. Meningkatnya persentase *volatile matter* pada perlakuan E2 diduga karena proses karbonisasi yang kurang sempurna, sehingga arang aktif masih banyak mengandung sulfur dan nitrogen. Hal ini sejalan dengan pernyataan [43] yaitu tingginya persentase *volatile matter* pada arang aktif tergantung pada waktu dan suhu proses karbonisasi. Suhu yang tinggi dan lamanya proses karbonisasi menyebabkan banyaknya zat terbang yang terbang, sehingga akan menurunkan kadar *volatile matter* di dalam arang aktif. [44] proses pencucian setelah aktivasi kimia yang kurang sempurna juga dapat menambah persentase *volatile matter* pada saat pengujian. Sebaliknya, rendahnya persentase *volatile matter* pada arang aktif disebabkan oleh kandungan sulfur dan nitrogen yang telah tereduksi saat aktivasi sehingga senyawa sulfur dan nitrogen dalam arang aktif berkurang. Rendahnya persentase *volatile*

matter arang aktif juga dapat disebabkan oleh senyawa hidrokarbon yang menempel pada permukaan arang terekstraksi pada saat proses aktivasi.

Arang aktif pelepah kelapa sawit perlakuan E0 menunjukkan persentase *volatile matter* yang lebih kecil dibandingkan dengan perlakuan kombinasi aktivasi fisika-kimia (E1, E2, dan E3). Menurut [45], penggunaan H_3PO_4 mampu mengurangi senyawa non karbon yang menempel pada permukaan arang aktif. Selain bersifat membersihkan senyawa non karbon pada permukaan arang aktif, H_3PO_4 juga mampu masuk ke dalam dasar arang melalui pori-pori pada arang dan melindungi bahan dari panas sehingga mengurangi senyawa non karbon yang mudah menguap.

Morfologi Permukaan Arang Aktif

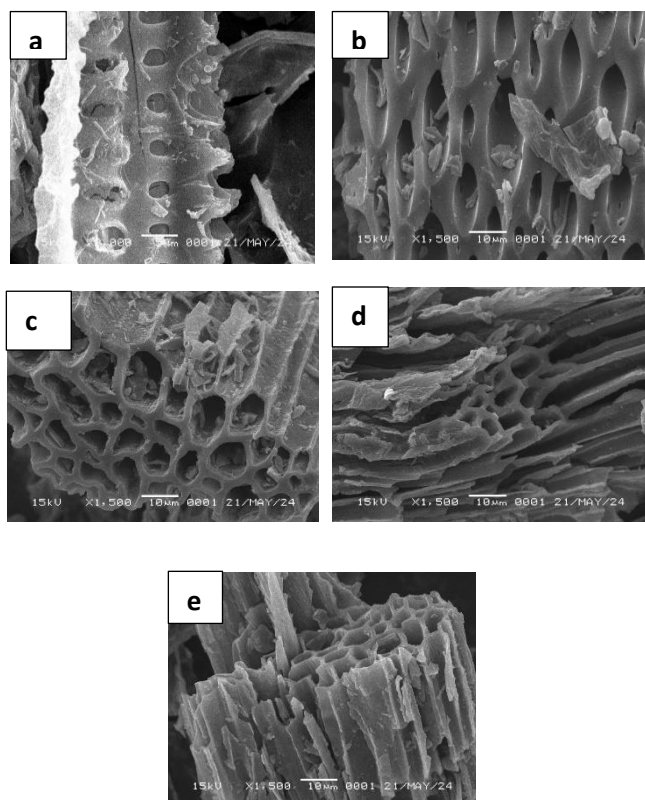
Morfologi permukaan arang aktif pelepah kelapa sawit dianalisa dengan menggunakan SEM. Penampakan morfologi arang (sebelum aktivasi) dan arang aktif pelepah kelapa sawit seluruh perlakuan disajikan pada Gambar 2. Gambar 2. a menunjukkan penampakan morfologi arang pelepah kelapa sawit (sebelum aktivasi) yang porinya masih tertutup oleh berbagai macam pengotor seperti hidrokarbon, tar, dan senyawa organik lain. Oleh karena itu, perlu dilakukan aktivasi agar permukaan arang aktif bebas dari deposit hidrokarbon sehingga permukaannya lebih luas dan pori-porinya terbuka [14].

Pada perlakuan E0 (Gambar 2.b), arang aktif yang hanya diaktivasi secara kimia menunjukkan pori yang berukuran besar, bersih dari pengotor, tetapi kedalaman pori cenderung dangkal. Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan [46] menyatakan bahwa permukaan pori-pori arang cangkang kelapa sawit dengan aktivasi H_3PO_4 5%, memiliki pori-pori permukaan arang aktif yang bersih. Menurut [47], aktivasi kimia arang serabut kelapa dengan H_3PO_4 menyebabkan terjadinya pelarutan zat-zat pengotor yang menutupi permukaan pori-pori arang, sehingga terbentuk pori yang baru dalam mesopori (permukaan dalam) dengan diameter pori yang lebih besar dan tersusun teratur dengan jumlah yang banyak, serta tidak terisi sumbatan senyawa hidrokarbon. [48] Hal ini menunjukkan bahwa proses aktivasi kimia dapat mengikat senyawa-senyawa pengotor keluar dari pori-pori arang sehingga permukaan dari arang aktif tersebut semakin lebar atau luas.

Pada perlakuan E1 (Gambar 2. c), E2 (Gambar 2. d), dan E3 (Gambar 2.e), pori yang terbentuk lebih banyak dan juga memiliki pori yang dalam sehingga terlihat seperti lorong atau kanal. Banyaknya pori yang terbentuk pada arang aktif pelepah kelapa sawit perlakuan kombinasi aktivasi fisika-kimia sejalan dengan tingginya nilai daya serap terhadap iodine arang aktif tersebut. Menurut [49] banyaknya rongga pori dari arang aktif dikarenakan adanya pengaruh panas saat

proses aktivasi yang menyebabkan banyaknya senyawa *volatile matter* yang terlepas.

Gambar 2 juga menunjukkan semakin tinggi suhu aktivasi fisika, semakin bersih pori arang aktif yang dihasilkan. Pori arang aktif perlakuan E1 (Gambar 2. c) dan perlakuan E2 (Gambar 2. d) terlihat masih banyak terdapat pengotor dibandingkan dengan pori arang aktif E3 (Gambar 2.e). Temuan ini didukung dengan pembahasan sebelumnya mengenai kadar air dan kadar abu yaitu persentase kadar air dan kadar abu arang aktif semakin rendah dengan semakin meningkatnya suhu aktivasi fisika



Gambar 2. Penampakan morfologi melalui SEM (a) arang (sebelum aktivasi) dengan

perbesaran 3000 kali dan arang aktif pelepah kelapa sawit dengan perbesaran 1.500 kali, (b) E0 (kontrol), (c) E1 (suhu aktivasi fisika 450 °C), (d) E2 (suhu aktivasi fisika 600 °C), (e) E3 (suhu aktivasi fisika 750 °C)

Berdasarkan morfologinya, pelepah kelapa sawit perlakuan E3 menunjukkan permukaan yang paling baik karena jumlah pori yang terbentuk lebih banyak dibandingkan E0 (kontrol), menghasilkan pori yang bersih dan memiliki kedalaman pori yang menyerupai kanal. Hal ini juga terlihat dari tingginya nilai uji daya serap arang aktif tersebut terhadap iodine. Oleh karena itu, arang aktif dari perlakuan E3 diharapkan mampu menyerap senyawa fenol lebih optimal dan dapat mencegah terjadinya *browning* pada eksplan.

Selain mengamati penampakan jumlah dan bentuk pori, diameter pori arang aktif juga diukur untuk mengetahui ukuran pori yang terbentuk. Data diameter pori arang dan arang aktif pelepah kelapa sawit disajikan pada Tabel 4.6. Berdasarkan hasil penelitian, terjadi peningkatan diameter pori arang setelah diaktivasi baik secara kimia maupun secara fisika-kimia. Pembentukan dan pembesaran pori disebabkan oleh penguapan komponen selulosa yang terdegradasi selama proses aktivasi [49]. Diameter pori arang aktif terbesar didapatkan dari perlakuan E1 yaitu

9,53 μm , sedangkan diameter pori arang aktif terkecil didapatkan dari perlakuan E3 yaitu 6,18 μm . Selain itu, diameter pori arang aktif pelepah kelapa sawit semakin kecil dengan semakin tingginya suhu aktivasi fisika. Menurut [50], mengecilnya ukuran pori karena kenaikan suhu aktivasi disebabkan oleh naiknya energi panas. Energi panas yang semakin besar mengakibatkan partikel bergerak lebih cepat sehingga bertumbukan satu sama lain. Akibat dari tumbukan ini partikel terpecah menjadi lebih kecil sehingga menghasilkan pori yang lebih kecil.

Tabel 6. Diameter pori arang dan arang aktif pelepah kelapa sawit

Perlakuan	Diameter Pori (μm)
Arang	2,90
E0	8,00
E1	9,53
E2	6,56
E3	6,18

Keterangan: E0 (kontrol), E1 (Suhu aktivasi fisika 450 °C), E2 (Suhu aktivasi fisika 600 °C), E3 (Suhu aktivasi fisika 750 °C).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat ditarik simpulan sebagai berikut: Rendemen arang aktif kelapa sawit yang dihasilkan berkisar antara 0,56 – 1,09%. Hasil penelitian didapatkan seluruh perlakuan berpengaruh nyata terhadap parameter kadar air, kadar abu, daya serap terhadap iodine, dan *volatile matter*. Karakteristik arang aktif pelepah kelapa sawit yang dihasilkan telah sesuai dengan SNI arang aktif dan arang aktif kultur jaringan komersial, kecuali pada parameter kadar air. Arang aktif pelepah kelapa sawit yang memiliki pori yang besar dan bersih dari pengotor adalah perlakuan aktivasi kombinasi fisika-kimia E3 dengan suhu aktivasi 750 °C. Suhu optimum untuk membuat arang aktif pelepah kelapa sawit kultur jaringan adalah perlakuan E3 (suhu aktivasi fisika 750 °C), karena menghasilkan persentase kadar air dan kadar abu yang rendah, nilai daya serap iodine dan *volatile matter*, dan menunjukkan morfologi pori yang cukup besar dan bersih. Implikasi dari penelitian ini menunjukkan bahwa limbah pelepah kelapa sawit berpotensi besar sebagai sumber arang aktif berkualitas untuk kebutuhan kultur jaringan, sehingga dapat mengurangi ketergantungan pada arang aktif komersial yang mahal. Selain itu, penerapan metode aktivasi fisika-kimia pada suhu optimum 750 °C dapat menjadi rujukan bagi industri atau laboratorium dalam

menghasilkan arang aktif lokal yang lebih efisien, murah, dan ramah lingkungan. Temuan ini juga membuka peluang pemanfaatan limbah perkebunan secara lebih luas dalam bidang bioteknologi dan pertanian berkelanjutan.

PENUTUP

Terima kasih atas dana yang diberikan kepada penelitian skema PDP Tahun Anggaran 2024 oleh Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Direktorat Jenderal Perkebunan. 2022. Statistika perkebunan unggul nasional 2021-2023. Luas areal perkebunan di Riau Tahun 2021-2023. [Diakses 05 Maret 2024].
- [2] Mathius, I. W. 2009. Produk samping industry kelapa sawit dan teknologi pengkayaan sebagai bahan pakan sapi yang terintegrasi. Dalam: Sistem Integrasi Ternak Tanaman: Padi-Sawit-Kakao. Pusat Penelitian dan Peternakan. Badan Penelitian Pertanian. Hal. 65-109.
- [3] Dabuke, M.H. Pemanfaatan pelepah kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq) sebagai bahan baku pembuatan tali serat alami. Skripsi. Medan. Universitas Sumatera Utara. 2018.
- [4] Ramdja, A.F., Halim, M., Handi, J. Pembuatan karbon aktif dari pelepah kelapa (*Cocus nucifera*). Jurnal Teknik Kimia. 2008. 2(15):1-8. 10.26418/indonesian.v3i2.46309.
- [5] Astuti, C.S. Pembuatan arang aktif aultur jaringan dari pelepah kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) dengan berbagai aktivator. skripsi. Pelalawan. Institut Teknologi Perkebunan Pelalawan Indonesia. 2023.
- [6] Hendra. The manufacture of activated carbon from oil palm shells and mixture of wood sawdust. Jurnal Penelitian Hasil Hutan. 2010. 24(2): 117-132.
- [7] Lembang, M. Pembuatan dan kegunaan arang aktif. Jurnal Info Teknis EBONI. 2014. 11(2): 65-80.
- [8] Yusnita. Kultur jaringan tanaman sebagai teknik penting bioteknologi untuk menunjang pembangunan pertanian. Lampung. Jurnal Orasi Ilmiah Guru Besar Bioteknologi Aura Publishing. 2015. 33 (1): 23-54.
- [9] Hutami, S. Penggunaan arang aktif dalam kultur in vitro. Berita Biologi. 2006. 8(1):83-89.
- [10] Fajri, K. Respon pertumbuhan eksplan jeruk nipis (*Citrus aurantifolia* L.) dengan pemberian berbagai konsentrasi ekstrak pisang raja dan arang aktif pada media MS. Skripsi. Kuantan Singingi. Universitas Islam Kuantan Singingi. 2019.
- [11] Hariadi, H., Yusnita., Riniarti, M., Hapsoro, D. Pengaruh arang aktif, benziladenin, dan kinetin terhadap pertumbuhan tunas jati solomon. (*Tectona grandis* Linn. F) *In Vitro*. Jurnal Online Agroteknologi. 2019. 5(2): 21-30.
- [12] Lestari, W. Pengaruh penambahan arang aktif cangkang kelapa sawit terhadap

- browning* dan induksi kalus jeruk kasturi (*Citrus microcarpa*). Skripsi. Pelalawan. Institut Teknologi Perkebunan Pelalawan Indonesia. 2022.
- [13] Rahmawati, Y.D., Prasetyo, I., Rochmadi. Pengaruh penambahan zat pendeludrasi terhadap struktur mikropori material karbon yang dibuat dari pirolisis resin phenol-tert butyl phenol-formaldehid Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan”. Pengembangan Teknologi Kimia Untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia. Prosiding. Yogyakarta. UGM. 2010.
- [14] Baker, F.S., Miller, C.E., Repik, A.J., Tollens, E.D. Activated Carbon Encyclopedia of Separation Technology. New York. John Wiley and Sons. 1997.
- [15] Udayani, K., Purwaningsih, D.Y., Setiawan, R., Yahy, K. Pembuatan karbon aktif dari arang bakau menggunakan gabungan aktivasi kimia dan fisika dengan *microwave*. Iptek Media Komunikasi Teknologi. 2019. 23(1): 39-46. Doi:10.31284/j.iptek.2019.v23i1.479.
- [16] Meisrilestari, Y., Khoimani, R., Wijayanti, H. Pembuatan arang aktif dari cangkang kelapa sawit dengan aktivasi secara fisika, kimia dan fisika- kimia. Jurnal Konversi. 2013. 2(1): 45-50. Doi: 10.20527/k.v2i1.136.
- [17] Sa’bandi, F., Aimi, S., Nizar, U.K., Khair, M. Preparasi karbon aktif dari limbah pelepah kelapa sawit dengan aktivasi ultrasonik sebagai Adsorben. Chemistry Journal of Universitas Negeri Padang. 2021. 10(2):143-162.
- [18] Kurniati, E. Pemanfaatan cangkang kelapa sawit sebagai arang aktif. Jurnal Penelitian Ilmu Teknik. 2008. 8(2): 96-103.
- [19] Laos, L.E., Masturi, Yulianti, I. Pengaruh suhu aktivasi terhadap daya serap karbon aktif kulit kemiri. Prosiding. Jakarta. Universitas Negeri Jakarta. Doi:10.2100/03050226. 2016.
- [20] Tasanif, R., Isa, I., Kunusa, W.R. Potensi ampas tebu sebagai adsorben logam berat Cd, Cu dan Cr. Jamb.J.Chem. 2020. 2 (1):33-43.
- [21] Lempang, M., Syafi, W., Pan, G. Struktur dan komponen arang serta arang aktif tempurung kemiri. Jurnal Penelitian Hasil Hutan. 2012. 29(3): 278-294.
- [22] Sudrajat, R., Soleh, S. Petunjuk teknis pembuatan arang aktif. Jurnal Ilmiah Edu Research. 1994. 1(2): 21-27.
- [23] Sailah, I., Fitri, M., Andes, I., Tyara, P., Anis, A.A., Nastiti, S.I. Kinerja karbon aktif dari kulit singkong dalam menurunkan konsentrasi fosfat pada limbah air laundry. Jurnal Teknologi Industri pertanian. 2020. 30(2): 180-189.
- [24] Aryani, F., Mardiana, F., Wartomo. Metode aktivasi fisika dan metode aktivasi kimia pada pembuatan arang aktif dari tempurung kelapa (*Cocos nucifera* L.). Indonesia Journal of International Conference. 2019. 2(1): 16 - 20.
- [25] Ronny. Kemampuan arang aktif tempurung kemiri untuk menurunkan kadar besi (Fe) pada air sumur gali. Jurnal Higiene. 2016. 2(1): 1-7.

- [26] Wibowo, S., Syafii, W., Pari, G. Karakteristik arang aktif tempurung biji nyamplung (*Calopbyllum inopbyllum* Linn). Jurnal Penelitian Hasil Hutan. 2010. 28(1):43-54.
- [27] Hendaway, A.N.A. Influence of HNO₃ oxidation on the structure and adsorptive properties of corncob-based activated carbon, Jurnal Carbon. 2003. 41:713-722.
- [28] Kurniasih, A., Pratiwi, D.A., Amin, M. Pemanfaatan ampas tebu sebagai arang aktif dengan aktivator larutan belimbing wuluh (*Averrhoa bilimbi* L.). Jurnal Kesehatan Lingkungan Ruwa Jurai. 2020. 14(2): 56-63. Doi: 10.26630/rj.v14i2.2287.
- [29] Pari, G., Hendra, D., Pasaribu, R.A. Pengaruh lama waktu aktivasi dan konsentrasi asam fosfat terhadap mutu arang aktif kulit kayu *Aacacia mangium*. Jurnal Penelitian Hasil Hutan. 2008. 26(1):33-46.
- [30] Lyliana, H.Y. Pemanfaatan arang aktif sebagai adsorben logam berat dalam air lindi di TPA Pakusari Jember. Skripsi. Jember. Universitas Jember. 2013.
- [31] Polli, F.F. Pengaruh suhu dan lama aktivasi terhadap mutu arang aktif dari kayu kelapa. Jurnal Industri Hasil Perkebunan. 2017. 2(12): 21-28.
- [32] Verayana, Papatungan, M., Iyabu, H. Pengaruh aktivator HCl dan H₃PO₄ terhadap karakteristik (morfologi pori) arang aktif tempurung kelapa serta uji adsorpsi pada Logam Timbal (Pb). Jurnal Entropi. 2018. 13(1): 67-75.
- [33] Manurung, M., Sahara, E., Sihombing, P.S. Pembuatan dan karakteristik arangaktif dari bambu apus (*Gigantochoa apus*) dengan aktivator H₃PO₄. Jurnal Kimia. 2019. 13(1): 16-21.
- [34] Eliabeth, P.P. Experiment on the generation of activated carbon from biomas. Institut For Nuclear And Energy Technologies Forschungs Karlsruhe. Jurnal Germany. 2006. 12(1):106-111.
- [35] Nasution, Jefri, H., Iriani. Pembuatan adsorben dari cangkang kerang bulu yang diaktivasi secara termal sebagai pengadsorpsi fenol. Jurnal Teknik Kimia USU. 2015. 4(4):51-57.
- [36] Rahman, A., Aziz, R., Indrawati, A., Usman, M. Pemanfaatan beberapa jenis arang aktif sebagai bahan absorben logam berat cadmium (Cd) pada tanah sedimen drainase kota Medan sebagai media tanam. Jurnal Agroteknologi Dan Ilmu Pertanian. 2020. 5(1): 42–54.
- [37] Pari, G., Tri, D.W., Mashato, Y. Mutu arang aktif dari serbuk gergaji kayu. Jurnal Penelitian Hasil Hutan. 2009. 27 (4): 381-398.
- [38] Pari, G., Hendra, Djani. Pengaruh lama waktu aktivasi dan konsentrasi asam fosfat terhadap mutu arang aktif kulit kayu *Acacia mangium*. Jurnal Penelitian Hasil Hutan. 2006. 24 (1): 33-46.
- [39] Lazulva, Sari, W.W. Uji kualitas karbon aktif dari kulit ubi kayu (*Manihot esculenta crantz*). Jurnal Photon. 2013. 3(2):33-37.

- [40] Harmiansyah, H., Amir, Hasibuan, A. Pengaruh variasi konsentrasi asam posfat H_3PO_4 dan waktu perendaman karbon terhadap karakteristik karbon aktif kulit durian. *Jurnal Teknik Kimia USU*. 2023. 11(2):11-14.
- [41] Suryaningsih, S., Nurhilal, O. Karakterisasi biobriket campuran serbuk kayu dan tempurung kelapa. *Jurnal Material dan Energi Indonesia*. 2017. 7(1):13-16.
- [42] Suherman, Hasanah, M., Ariandi, R., Ilmi. Pengaruh suhu aktivasi terhadap karakteristik dan mikrostruktur karbon aktif pelepah kelapa sawit (*Elaeis guinensis* Jacq). *Jurnal Industri Hasil Perkebunan*. 2021. 16(1): 1-9.
- [43] Kushdarini, E.A., Budiyanto, D., Ghafarunnisa. Produksi karbon aktif dari batubara batuminus dengan aktivasi tunggal H_3PO_4 , kombinasi H_3PO_4 , NH_4HCO_3 . *Jurnal Termal Reaktor*. 2017. 17(2):20-30.
- [44] Sahara, E., Sulihingtyas, W.D., Mahardika, I.P.A.S. Pembuatan dan karakterisasi arang aktif dari batang tanaman gumitir (*Tagetes erecta*) yang diaktivasi dengan H_3PO_4 . *Jurnal Kimia*. 2017. 11(1):1-9.
- [45] Gustama, A. Pembuatan Arang Aktif Tempurung Kelapa Sawit Sebagai Adsorben Dalam Pemurnian Biodisel. Skripsi. Bogor. Institut Pertanian Bogor. Fakultas Teknologi Pertanian. 2012.
- [46] Najmia, H., E. S. Mahreda., R. P. Mahyudin, Kissinger. 2021. Pemanfaatan arang aktif cangkang kelapa sawit teraktivasi H_3PO_4 untuk penurunan kadar besi (Fe), Mangan (Mn) dan Kondisi pH pada air asam tambang. *Jurnal Enviro Scienteeae*. 2021. 17(1): 30-37.
- [47] Abdullah, A.D. Adsorpsi arang aktif dari sabut kelapa (*cocos nucifera*) terhadap penurunan fenol. *Jurnal AL-KIMIA*. 2013. 7(2):32-44.
- [48] Suhendarawati, L., Suharto, B., Susanawati, L.D. Pengaruh konsentrasi larutan kalium hidroksida pada abu dasar ampas tebu teraktivasi. *Jurnal Sumber Daya Alam dan Lingkungan*. 2013. Malang. 1(1) :19 -25.
- [49] Handika, G., Mentari, V.A., Maulina, S. Perbandingan gugus fungsi dan morfologi permukaan karbon aktif dari pelepah kelapa sawit menggunakan aktivator asam fosfat H_3PO_4 dan asam nitrat HNO_3 . *Jurnal Teknik Kimia USU*. 2017. 7(1): 16-20.
- [50] Efendi, Z., Astuti, A. 2016. Pengaruh suhu aktivasi terhadap morfologi dan jumlah pori karbon aktif tempurung kemiri sebagai elektroda. *Jurnal Fisika Unand*. 2016. 5(4):297-302.