

KARAKTERISASI KARBON AKTIF DARI LIMBAH PADAT SAWIT MENGGUNAKAN AKTIVASI HCL DAN TEKNIK KARBONISASI

¹Nawang Puspitawati, ¹Nurul Widji Triana, ¹Nur Mila Eka Zaliyanty, ¹Mochammad Arip Pancar Agung, ¹Mochammad Fadilah Ramadhani, ¹Mochammad Dhani Dharmawan, ¹Sani*

¹Teknik Kimia, Fakultas Teknik & Sains, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Gunung Anyar 60249

*Penulis korespondensi: sani.tk@upnjatim.ac.id

Abstrak. Peningkatan volume limbah padat kelapa sawit di Indonesia memberikan peluang besar untuk dimanfaatkan menjadi material bernilai tambah sekaligus mengurangi dampak lingkungan. Penelitian ini mengeksplorasi potensi konversi limbah kelapa sawit—yang terdiri dari tandan kosong, cangkang, dan serat—menjadi karbon aktif melalui aktivasi menggunakan asam klorida (HCl). Proses karbonisasi divariasikan pada lima tingkat suhu (250–450 °C) dan durasi (60–120 menit) untuk menentukan kondisi optimum sesuai dengan kriteria SNI 06-3730-2021. Setelah tahap karbonisasi, dilakukan aktivasi kimia menggunakan larutan HCl 20% untuk meningkatkan karakteristik pori dan kapasitas adsorpsi. Hasil terbaik diperoleh pada suhu 450 °C selama 105 menit, menghasilkan karbon aktif dengan kadar karbon tetap 81,68%, kadar air 3,85%, zat menguap 10,29%, dan kadar abu 4,18%. Selain itu, kapasitas adsorpsi mencapai 763,98 mg/g untuk iodin dan 178,82 mg/g untuk metilen biru. Penelitian ini menunjukkan bahwa limbah kelapa sawit dapat diolah menjadi karbon aktif berkualitas yang berpotensi diaplikasikan pada industri pengolahan air maupun adsorben lingkungan, serta mendukung upaya pengelolaan limbah berkelanjutan.

Kata kunci: karbon aktif, limbah kelapa sawit, aktivasi HC

Abstract. The increasing volume of palm oil solid waste in Indonesia provides a significant opportunity to be converted into value-added materials while reducing environmental impact. This study investigates the potential of transforming palm oil residues—comprising empty fruit bunches, shells, and fibers—into activated carbon through hydrochloric acid (HCl) activation. The carbonization process was carried out under five temperature levels (250–450 °C) and durations (60–120 minutes) to determine the optimum conditions according to the requirements of SNI 06-3730-2021. Following carbonization, chemical activation using a 20% HCl solution was performed to enhance pore structure and adsorption capacity. The most favorable condition was achieved at 450 °C for 105 minutes, producing activated carbon with 81.68% fixed carbon, 3.85% moisture, 10.29% volatile matter, and 4.18% ash content. Furthermore, adsorption capacities reached 763.98 mg/g for iodine and 178.82 mg/g for methylene blue. These findings demonstrate that palm oil solid waste can be effectively converted into high-quality activated carbon with potential applications in water treatment and environmental adsorption processes, thereby supporting sustainable waste management efforts.

Keywords: activated carbon, palm oil solid waste, HCl activation

1. Pendahuluan

Sebagai salah satu produsen utama minyak kelapa sawit di dunia dengan kapasitas sekitar 44,76 juta ton per tahun, Indonesia menghasilkan limbah padat yang cukup besar dari aktivitas pengolahan minyak sawit. Diperkirakan sekitar 20% dari total produksi tersebut berupa limbah padat, yang meliputi tandan kosong, serat, dan cangkang kelapa sawit. Limbah ini memiliki potensi ekonomi dan lingkungan yang signifikan untuk dimanfaatkan sebagai bahan bernilai tambah. Komposisi limbah kelapa sawit sebagian besar mengandung selulosa dengan kadar mendekati 40%, sehingga berpotensi menjadi

sumber bahan baku terbarukan (Hambali et al., 2017). Selain itu, limbah padat kelapa sawit memiliki kandungan serat yang terdiri dari lignin, hemiselulosa, dan selulosa. Berdasarkan analisis komponen serat, cangkang mengandung sekitar 42,96% lignin, 26,27% selulosa, dan 12,61% hemiselulosa. Serat mengandung sekitar 37,9% selulosa, 33,5% lignin, dan 15,5% hemiselulosa, sedangkan tandan kosong mengandung 26,11% lignin, 21,06% selulosa, dan 8,39% hemiselulosa. Salah satu upaya pemanfaatan limbah tersebut adalah mengolahnya menjadi karbon aktif, dengan memanfaatkan kandungan selulosa sebagai bahan baku utama (Sukiran et al., 2017). Kandungan selulosa dapat memengaruhi sifat fisik dan kimia karbon aktif, termasuk selektivitas adsorpsi terhadap senyawa tertentu. Sebagai contoh, karbon aktif yang berasal dari sumber kaya selulosa cenderung lebih efektif dalam mengadsorpsi senyawa organik (Zhu et al., 2017).

Karbon aktif merupakan bentuk karbon amorf yang tersedia dalam bentuk granular maupun serbuk, yang telah melalui proses aktivasi untuk mengembangkan pori-pori sehingga memiliki kapasitas adsorpsi yang jauh lebih tinggi dibandingkan karbon biasa. Proses pembuatan karbon aktif meliputi tahap karbonisasi dan aktivasi. Karbonisasi biasanya dilakukan pada suhu 250–400 °C untuk mengubah bahan baku menjadi arang, diikuti dengan tahap aktivasi untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi melalui pembentukan pori yang lebih luas (Ge et al., 2022). Berkat karakteristik strukturnya, karbon aktif digolongkan sebagai karbon amorf dengan mikroporositas tinggi. Gugus fungsional pada permukaannya turut mendukung efektivitas karbon aktif dalam mengadsorpsi senyawa kimia tertentu. Kapasitas adsorpsi yang tinggi ini sebagian besar disebabkan oleh luas permukaan spesifiknya yang besar terhadap volume, menjadikannya sangat efektif sebagai adsorben (Baysal et al., 2018). Proses karbonisasi umumnya terdiri dari tiga tahap utama yang berlangsung secara berurutan, yaitu tahap pengeringan yang ditandai dengan penurunan massa secara bertahap (Chen et al., 2020), tahap devolatilisasi dengan penurunan massa yang cepat (Niu et al., 2018), dan tahap karbonisasi yang ditandai dengan perlambatan penurunan massa. Tahap karbonisasi menghasilkan produk utama berupa arang yang kemudian diaktivasi untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi (Dizbay-Onat et al., 2017).

Berdasarkan penelitian Suroto dan Setiawati (2020), karbon aktif dari cangkang kelapa sawit diperoleh melalui proses karbonisasi pada suhu 500 °C selama 2 jam, dengan larutan NaCl 20% sebanyak 100 mL sebagai agen aktivasi. Karbon aktif yang dihasilkan telah memenuhi standar SNI dengan kadar air 4,88%, kadar abu 3,54%, dan zat menguap 14,63% (Suroto et al., 2020). Penelitian Putri, Haryati, dan Rahmatullah (2019) mengenai pengaruh suhu karbonisasi pada kualitas karbon aktif dari ampas tebu dengan aktivator NaOH menunjukkan hasil terbaik pada suhu karbonisasi 300 °C selama 2 jam, dengan kadar air 8,4%, kadar abu 8,88%, dan daya serap iodin 142,9 mg/g (Haryati et al., 2019). Selanjutnya, penelitian Oko (2021) mengenai pengaruh suhu dan konsentrasi aktivator HCl terhadap karakteristik karbon aktif dari ampas kopi juga menghasilkan karbon aktif sesuai SNI. Proses karbonisasi dilakukan pada suhu 400–700 °C selama 20 menit dengan hasil terbaik pada suhu 400 °C, yaitu kadar air 1,56%, kadar abu 10,16%, zat menguap 9,89%, dan kapasitas serap iodin 771,28 mg/g (Oko et al., 2021).

Berdasarkan hasil-hasil penelitian sebelumnya, diperlukan pembaruan metode pembuatan karbon aktif dengan mengoptimalkan pemilihan aktivator asam, penggunaan suhu karbonisasi yang moderat, serta waktu karbonisasi yang tidak terlalu lama. Pada penelitian ini, bahan baku yang digunakan merupakan campuran limbah padat kelapa sawit (serat : tandan : cangkang) dengan rasio 2:2:1. Aktivator yang digunakan adalah HCl 20%, dengan variasi suhu karbonisasi 250–450 °C dan waktu karbonisasi 60, 75, 90, 105, serta 120 menit.

2. Bahan dan Metode

2.1. Bahan

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah padat kelapa sawit berupa serat, tandan kosong, dan cangkang yang diperoleh dari PT Sawit Arum Madani, Kabupaten Blitar, Jawa Timur. Bahan kimia yang digunakan meliputi akuades dan asam klorida (HCl) dengan konsentrasi teknis, yang diperoleh dari Tidar Kimia, Surabaya, Jawa Timur, serta minyak jelantah yang dikumpulkan dari salah satu restoran cepat saji di Surabaya.

2.2. Metode

Proses pembuatan karbon aktif dilakukan melalui tahapan karbonisasi dan aktivasi kimia menggunakan peralatan laboratorium teknik kimia. Peralatan utama yang digunakan meliputi oven laboratorium (Mettler UN110), furnace listrik (Carbolite GPC12), magnetic stirrer dengan hot plate (IKA C-MAG HS7), gelas beaker (Pyrex), termometer digital, neraca analitik (Mettler Toledo), serta peralatan gelas standar seperti labu ukur dan silinder ukur. Peralatan tambahan seperti clamp, stand, dan cawan petri digunakan selama tahap persiapan dan aktivasi sampel.

Prosedur penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

a. Tahap persiapan

Limbah padat kelapa sawit (serat, tandan kosong, dan cangkang) dipotong menjadi ukuran kecil, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 110 °C hingga diperoleh berat konstan. Selanjutnya, sampel dihancurkan dan diayak menggunakan ayakan berukuran 60 mesh.

b. Tahap karbonisasi

Proses karbonisasi dilakukan di dalam furnace pada variasi suhu 250 °C, 300 °C, 350 °C, 400 °C, dan 450 °C dengan waktu pemanasan 60, 75, 90, 105, dan 120 menit.

c. Tahap aktivasi

Sebanyak 50 gram arang hasil karbonisasi direaksikan dengan 100 mL larutan HCl 20%. Proses aktivasi dilakukan pada suhu 80 °C menggunakan magnetic stirrer dengan kecepatan 500 rpm selama 2 jam.

d. Tahap uji FFA (Free Fatty Acid)

Sebanyak 10 gram karbon aktif yang telah memenuhi uji SNI dicampurkan dengan 100 mL minyak jelantah ke dalam gelas beaker, kemudian ditutup dan dibiarkan selama 24 jam untuk menguji kemampuan penyerapan asam lemak bebas.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis Hasil dan Bahan Baku

Bahan baku berupa limbah padat kelapa sawit dianalisis menggunakan metode High Performance Liquid Chromatography (HPLC) untuk mengetahui kandungan komposisi kimianya. Pengujian HPLC dilakukan di Laboratorium Gizi, Departemen Gizi Kesehatan,

Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Airlangga, Surabaya. Hasil analisis yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 1.

Table 1. Komposisi Limbah Padat Kelapa Sawit

Komposisi	Konsentrasi (%)
Hemiselulosa	26,9
Selulosa	47,5
Lignin	29,9

3.2. Analisis Karbon Aktif Berdasarkan Standar Mutu SNI

Hasil analisis karbon aktif yang dihasilkan dibandingkan dengan standar mutu SNI 06-3730-2021 meliputi parameter kadar air, kadar abu, zat menguap, karbon terikat, kehalusan, kapasitas adsorpsi iodine, dan kapasitas adsorpsi metilen biru. Uji mutu dilakukan di Laboratorium Pengujian dan Kalibrasi BPJI Surabaya. Pengujian SNI difokuskan pada variabel waktu karbonisasi 105 menit, karena pada waktu tersebut diperoleh kadar air terendah berdasarkan perhitungan gravimetri. Hasil analisis karbon aktif ditunjukkan pada Tabel 2.

Table 2. Hasil uji karbon aktif dibandingkan dengan standar mutu SNI

Parameter	Unit	250°C	300°C	350°C	400°C	450°C	SNI
Kadar Air	%	8,68	7,67	5,75	3,87	3,85	Max 15
Zat Menguap	%	25,21	20,11	18,62	12,87	10,29	Max 25
Kadar Abu	%	17,11	14,86	11,61	8,38	4,18	Max 10
Karbon Terikat	%	49,00	57,36	64,02	74,88	81,68	Min65
Kehalusan	%	88,91	89,88	91,11	91,83	95,89	Min 90
Iodin	Mg/g	298,14	332,18	489,92	742,76	763,98	Min 750
Metilen Biru	Mg/g	67,72	81,73	91,89	128,48	178,82	Min120

Berdasarkan hasil penelitian, karbon aktif dengan kualitas optimal diperoleh pada suhu karbonisasi 450 °C selama 105 menit menggunakan HCl sebagai agen aktivasi. Pada kondisi ini, kadar air sebesar 3,85%, jauh di bawah batas maksimum SNI yaitu 15%. Zat menguap tercatat 10,29%, yang juga memenuhi batas SNI yaitu maksimum 25%. Kadar abu sebesar 4,18%, masih berada di bawah batas maksimum SNI yaitu 10%. Karbon terikat sebagai parameter utama kualitas karbon aktif mencapai 81,68%, melebihi syarat minimum SNI yaitu 65%. Kehalusan karbon aktif mencapai 95,98%, melampaui batas minimum SNI 90%. Kapasitas adsorpsi iodine sebesar 763,98 mg/g, di atas standar minimum SNI 750 mg/g. Selain itu, kapasitas adsorpsi metilen biru mencapai 178,82 mg/g, jauh di atas batas minimum SNI 120 mg/g.

Hasil ini menunjukkan bahwa karbon aktif yang dihasilkan pada kondisi karbonisasi 450 °C selama 105 menit telah memenuhi seluruh parameter mutu yang ditetapkan dalam SNI 06-3730-2021. Berdasarkan temuan Ramadhani dan Dharmawan (2023) dari repositori UPN Veteran Jawa Timur, kualitas karbon aktif yang memenuhi semua standar SNI hanya diperoleh pada suhu karbonisasi tersebut dengan waktu 105 menit. Pada suhu 400 °C, kapasitas adsorpsi iodine dan metilen biru masih berada di bawah standar, serta kadar karbon terikat juga belum mencapai nilai minimum yang dipersyaratkan.

Beberapa faktor yang memengaruhi kualitas karbon aktif antara lain suhu dan lama karbonisasi, jenis serta konsentrasi agen aktivasi, serta karakteristik bahan baku yang digunakan. Temuan ini sejalan dengan penelitian lain yang menyatakan bahwa peningkatan suhu karbonisasi hingga titik optimum dapat memperbesar luas permukaan spesifik dan memperbanyak pori mikro, sehingga meningkatkan daya adsorpsi. Namun,

suhu yang terlalu tinggi juga dapat menyebabkan kerusakan struktur pori dan meningkatkan kadar abu. Oleh karena itu, pemilihan kondisi karbonisasi yang tepat menjadi kunci untuk menghasilkan karbon aktif dengan kualitas yang sesuai standar.

3.3. Analisis Efektivitas Penyerapan FFA oleh Karbon Aktif

Untuk mengevaluasi efektivitas daya serap karbon aktif yang dihasilkan, dilakukan pengujian penurunan kadar *free fatty acid* (FFA) pada minyak jelantah yang diperoleh dari salah satu restoran cepat saji ayam goreng di Surabaya. Pengujian dilakukan di Laboratorium Pengujian dan Kalibrasi BPJI Surabaya dengan hasil yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Table 3. Hasil analisis efektivitas penyerapan FFA oleh karbon aktif (Ramadhani and Dharmawan, 2023)

Parameter	Before	After
FFA	1,29%	0,78%

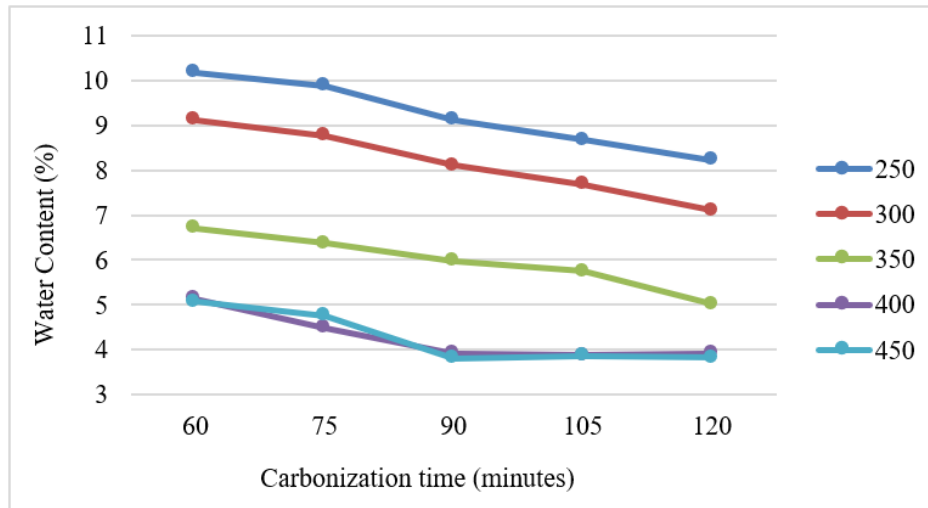
Sebelum perlakuan menggunakan karbon aktif, kadar FFA minyak jelantah terukur sebesar 1,29%. Menurut SNI 01-3741-2002 tentang standar mutu minyak goreng, kadar maksimum FFA yang diperbolehkan adalah 0,3%. Setelah proses adsorpsi menggunakan karbon aktif hasil penelitian ini, kadar FFA menurun menjadi 0,78%, sehingga terjadi penurunan sebesar 0,51%.

Meskipun nilai akhir FFA belum memenuhi batas maksimum SNI, hasil ini menunjukkan bahwa karbon aktif mampu menurunkan kadar FFA secara signifikan. Ketidakmampuan memenuhi standar SNI kemungkinan disebabkan oleh waktu kontak yang kurang lama dan minimnya pengadukan selama proses adsorpsi. Selain itu, rasio karbon aktif terhadap minyak jelantah yang digunakan juga dapat memengaruhi efektivitas penyerapan FFA (Asikin-Mijan et al., 2020).

3.4. Pengaruh Suhu dan Waktu Karbonisasi terhadap Kadar Air

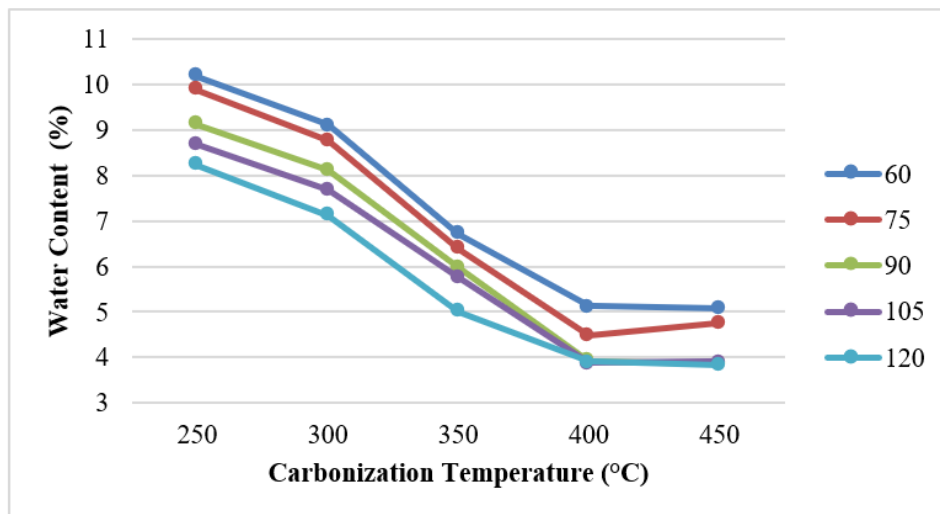
Pengujian karbon aktif terhadap SNI 06-3730-2021 difokuskan pada variabel waktu karbonisasi 105 menit, karena pada kondisi ini diperoleh kadar air terendah berdasarkan perhitungan gravimetri. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kadar air terendah dicapai pada waktu karbonisasi 105 menit dengan suhu karbonisasi 450 °C.

Uji kadar air bertujuan untuk mengetahui jumlah air yang terkandung di dalam karbon aktif, karena kandungan air dapat memengaruhi kapasitas adsorpsi karbon aktif. Hasil terbaik, yaitu kadar air 3,85%, diperoleh pada suhu karbonisasi 450 °C dengan waktu karbonisasi 105 menit. Nilai ini terkait dengan tiga tahapan utama pembentukan karbon, yaitu: tahap penguapan air, dehidrasi selulosa, dan degradasi termal. Ketiga tahapan tersebut berkontribusi terhadap penurunan kadar air dalam sampel. Apabila seluruh tahapan ini telah tercapai, karbon aktif yang dihasilkan memiliki kadar air minimal dan kualitas yang lebih baik.



Gambar 1. Pengaruh waktu karbonisasi pada berbagai suhu karbonisasi terhadap kadar air karbon aktif

Berdasarkan data dari Ramadhani dan Dharmawan (2023), pada suhu karbonisasi 450 °C kadar air terendah diperoleh pada waktu karbonisasi 105 menit. Pada tahap awal proses karbonisasi, kadar air pada karbon aktif cenderung menurun secara signifikan karena air menguap dari bahan baku. Namun, dapat dilihat bahwa nilai kadar air pada waktu karbonisasi 90 menit, 105 menit, dan 120 menit tidak menunjukkan perbedaan yang terlalu besar. Hal ini terjadi karena proses dekomposisi bahan baku telah mencapai titik jenuh atau keadaan kesetimbangan pada suhu dan waktu tertentu selama karbonisasi.



Gambar 2. Pengaruh suhu karbonisasi pada berbagai waktu karbonisasi terhadap kadar air karbon aktif

Berdasarkan penelitian tesis Ramadhani dan Dharmawan (2023) yang terdapat pada repositori UPN “Veteran” Jawa Timur, proses karbonisasi umumnya berlangsung melalui empat tahapan yang dibedakan berdasarkan rentang suhu tertentu. Tahap pertama terjadi pada suhu 25–150 °C yang ditandai dengan penguapan air dan bersifat reversibel. Selanjutnya pada tahap kedua, yang berlangsung pada suhu 150–250 °C, selulosa mengalami dehidrasi sehingga memungkinkan terbentuknya ikatan silang antar molekul gula untuk menggantikan ikatan hidrogen, yang berperan penting dalam pembentukan karbon dalam jumlah signifikan. Tahap ketiga terjadi pada suhu 240–400 °C, ditandai oleh degradasi termal yang menyebabkan pemutusan ikatan CO dan C–C pada

struktur selulosa. Pada fase ini hanya sedikit karbon yang dihasilkan karena sebagian produk degradasi berupa levoglukosan yang kemudian berubah menjadi tar serta menghasilkan gas H_2O , CO , dan CO_2 . Beberapa produk degradasi juga terdiri atas senyawa rantai empat karbon yang kemudian berkontribusi pada pembentukan struktur menyerupai grafit pada tahap keempat, yaitu tahap aromatisasi dan polimerisasi (Lichtenstein et al., 2017).

Proses karbonisasi ini berlangsung melalui mekanisme radikal dengan suhu optimum berada pada kisaran 250–450 °C. Apabila suhu melebihi kisaran tersebut, pembentukan abu meningkat sehingga dapat menurunkan kualitas karbon aktif yang dihasilkan. Sebaliknya, karbonisasi masih dapat berlangsung pada suhu di bawah 250 °C, namun selulosa sebagai komponen utama pembentuk karbon tidak mengalami ikatan silang antar molekul gula yang diperlukan untuk menggantikan ikatan hidrogen. Sementara itu, jika suhu karbonisasi melebihi 450 °C, pembentukan abu yang berlebihan dapat terjadi dan pada akhirnya menurunkan kapasitas adsorpsi karbon aktif (Li et al., 2020).

3.5. Pengaruh Suhu dan Waktu Karbonisasi terhadap Karbon Terikat pada Waktu 105 Menit

Karbon aktif diuji berdasarkan SNI 06-3730-2021 dengan waktu karbonisasi 105 menit, karena pada durasi ini diperoleh kadar air terendah berdasarkan analisis gravimetri. Pada suhu karbonisasi 250 °C, kadar karbon terikat tercatat sebesar 49%. Seiring dengan peningkatan suhu karbonisasi, kadar karbon terikat menunjukkan kenaikan yang signifikan, yakni mencapai 57,36% pada 300 °C dan meningkat lagi menjadi 64,02% pada 350 °C.

Table 4. Pengaruh suhu dan waktu karbonisasi terhadap karbon terikat

Waktu Karbonisasi 105 Menit pada Berbagai Suhu Karbonisasi							
Parameter	Unit	250°C	300°C	350°C	400°C	450°C	SNI
Karbon Terikat	%	49,00	57,36	64,02	74,88	81,68	Min65

Tabel tersebut menunjukkan bahwa peningkatan suhu karbonisasi menyebabkan konversi bahan organik menjadi karbon terikat semakin tinggi, yang ditunjukkan dengan meningkatnya kadar karbon terikat. Pada suhu 400 °C dan 450 °C, kadar karbon terikat meningkat tajam masing-masing menjadi 74,88% dan 81,68%. Hal ini membuktikan bahwa semakin tinggi suhu karbonisasi, semakin besar pula transformasi bahan organik menjadi karbon terikat. Jumlah karbon terikat dipengaruhi oleh kadar air, abu, dan zat menguap; semakin tinggi kandungan komponen tersebut, semakin rendah hasil karbon terikat yang diperoleh. Kondisi ini berdampak langsung terhadap kualitas karbon aktif, karena kadar karbon terikat yang rendah akan menurunkan kapasitas adsorpsi material. Oleh karena itu, jika daya serap iodin atau metilen biru tidak memenuhi standar minimum SNI, karbon aktif tersebut dianggap tidak layak digunakan (Yang et al., 2020). Peningkatan kadar karbon terikat ini konsisten dengan hasil penelitian Ramadhani dan Dharmawan (2023) dalam tesis mereka di UPN Veteran Jawa Timur.

3.6. Pengaruh Suhu dan Waktu Karbonisasi terhadap Kapasitas Adsorpsi Iodin dan Metilen Biru pada Waktu 105 Menit

Karbon aktif diuji mengacu pada SNI 06-3730-2021 dengan variabel waktu karbonisasi 105 menit, karena pada kondisi ini diperoleh kadar air terendah berdasarkan perhitungan gravimetri. Hasil analisis kapasitas adsorpsi menunjukkan bahwa nilai tertinggi dicapai pada suhu karbonisasi 450 °C, yaitu kapasitas adsorpsi iodin sebesar

763,98 mg/g dan kapasitas adsorpsi metilen biru sebesar 178,82 mg/g. Pengujian kapasitas adsorpsi bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan karbon aktif dalam mengadsorpsi senyawa tertentu. Hasil optimum ini berhubungan dengan tercapainya tiga tahapan utama pembentukan karbon, yaitu penguapan air, dehidrasi selulosa, dan degradasi termal. Ketika ketiga tahapan ini telah berlangsung sempurna, karbon aktif yang dihasilkan memiliki kadar karbon terikat tinggi dan daya adsorpsi yang baik. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian tesis Ramadhani dan Dharmawan (2023) di UPN Veteran Jawa Timur.

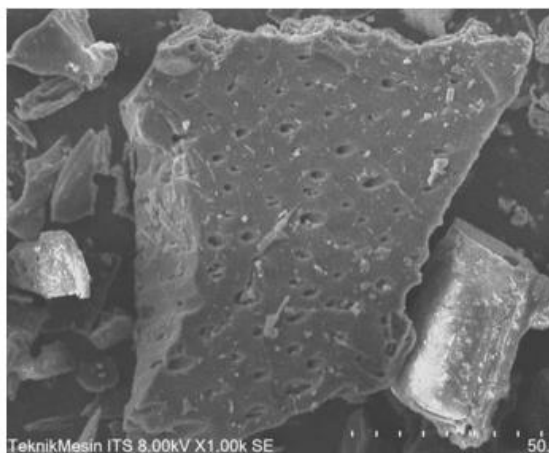
Table 5. Pengaruh suhu dan waktu karbonisasi terhadap kapasitas adsorpsi iodine dan metilen biru

Parameter	Unit	250°C	300°C	350°C	400°C	450°C	SNI
Iodin	Mg/g	298,14	332,18	489,92	742,76	763,98	Min 750
Metilen Biru	Mg/g	67,72	81,73	91,89	128,48	178,82	Min120

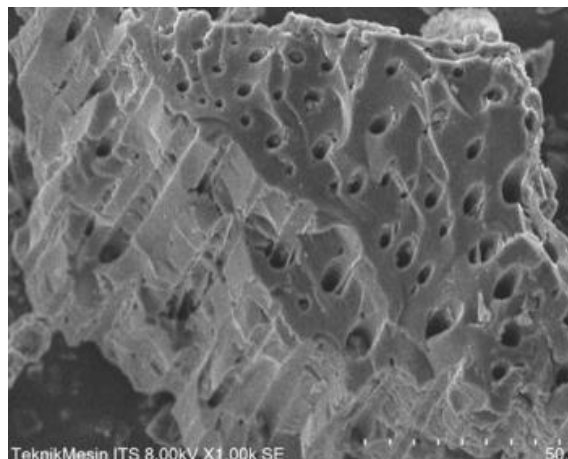
Berdasarkan data Ramadhani dan Dharmawan (2023), pada suhu karbonisasi 250 °C diperoleh kapasitas adsorpsi iodine sebesar 298,14 mg/g dan kapasitas adsorpsi metilen biru sebesar 67,72 mg/g. Seiring peningkatan suhu karbonisasi, terjadi peningkatan signifikan pada kedua kapasitas adsorpsi tersebut. Pada suhu 300 °C, kapasitas adsorpsi iodine naik menjadi 332,18 mg/g dan kapasitas adsorpsi metilen biru menjadi 81,73 mg/g. Pada suhu 350 °C, nilai adsorpsi iodine meningkat menjadi 489,92 mg/g dan metilen biru 91,89 mg/g. Tren peningkatan berlanjut hingga suhu 400 °C, di mana kapasitas adsorpsi iodine mencapai 742,76 mg/g dan metilen biru 128,48 mg/g. Nilai tertinggi diperoleh pada suhu 450 °C, dengan kapasitas adsorpsi iodine 763,98 mg/g dan metilen biru 178,82 mg/g.

Peningkatan suhu karbonisasi secara signifikan memengaruhi kapasitas adsorpsi karbon aktif terhadap iodine dan metilen biru yang menjadi indikator kemampuan karbon aktif dalam mengadsorpsi senyawa organik. Salah satu penyebabnya adalah peningkatan suhu karbonisasi yang cenderung memperbesar luas permukaan karbon aktif. Pada suhu yang lebih tinggi, dekomposisi bahan organik berlangsung lebih sempurna sehingga terbentuk struktur karbon yang lebih berpori dengan volume pori lebih besar. Struktur ini memperbanyak situs aktif untuk adsorpsi iodine maupun senyawa organik lainnya. Selain itu, suhu yang tinggi juga dapat memperlebar pori-pori yang telah terbentuk, sehingga meningkatkan kapasitas adsorpsi karbon aktif secara keseluruhan (Ramadhani and Dharmawan, 2023).

3.6. Hasil Analisis SEM Karbon Aktif dan Perbandingan Kondisi Karbon Sebelum dan Sesudah Aktivasi



Gambar 3. Hasil analisis SEM karbon aktif dengan suhu karbonisasi 450 °C dan waktu karbonisasi 105 menit



Gambar 4. Hasil analisis SEM karbon aktif dengan suhu karbonisasi 450 °C dan waktu karbonisasi 105 menit

Analisis Scanning Electron Microscopy (SEM) dilakukan untuk mengamati morfologi permukaan karbon aktif yang dihasilkan. Menurut Ramadhani dan Dharmawan (2023), analisis difokuskan pada sampel dengan hasil terbaik, yaitu pada kondisi suhu karbonisasi 450 °C dan waktu 105 menit. Hasil citra SEM menunjukkan bahwa pori-pori karbon aktif terbentuk dengan baik dan terbuka. Proses karbonisasi dan aktivasi kimia terbukti efektif dalam membentuk pori terbuka tersebut, sehingga menghasilkan karbon aktif dengan kapasitas adsorpsi yang sangat baik. Selain itu, kombinasi antara suhu karbonisasi yang optimal dan penggunaan aktivator kimia mampu menghasilkan struktur karbon yang lebih tipis, sehingga memperluas luas permukaan kontak dan meningkatkan kinerja adsorpsinya (Liu et al., 2018).

4. Kesimpulan

Karakteristik karbon aktif sangat dipengaruhi oleh suhu dan lama karbonisasi serta jenis aktivator yang digunakan. Peningkatan suhu umumnya meningkatkan kadar karbon terikat, sedangkan waktu karbonisasi yang lebih lama dapat memperbaiki struktur dan kinerja adsorpsi karbon karena paparan panas yang lebih optimal. Penggunaan aktivator dengan sifat asam kuat juga berkontribusi terhadap pembentukan pori yang lebih luas, sehingga meningkatkan kapasitas adsorpsinya.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Ramadhani dan Dharmawan (2023), karbon aktif dengan kualitas terbaik diperoleh pada suhu karbonisasi 450 °C selama 105 menit, dengan kandungan karbon terikat sebesar 81,68%, kadar air 3,85%, zat menguap 10,29%, dan kadar abu 4,18%. Kapasitas adsorpsi iodine mencapai 763,98 mg/g dan kapasitas adsorpsi metilen biru 178,82 mg/g, keduanya melampaui standar minimum SNI 06-3730-2021. Hasil analisis SEM menunjukkan adanya pori-pori yang berkembang dengan baik dengan diameter rata-rata 3,63 nm, yang mendukung kemampuan adsorpsi karbon aktif secara optimal.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Departemen Teknik Kimia, Universitas Pembangunan “Nasional” Veteran Jawa Timur atas dukungan dan fasilitas laboratorium yang diberikan selama penelitian ini berlangsung. Penulis juga mengapresiasi bimbingan serta masukan yang berharga dari para dosen pembimbing, yang telah memberikan kontribusi signifikan terhadap penyelesaian penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Asikin-Mijan, N., AbdulKareem-Alsultan, G., Izham, S.M. & Taufiq-Yap, Y.H., 2020. *Biodiesel production via simultaneous esterification and transesterification of chicken fat oil by mesoporous sulfated Ce supported activated carbon*. Biomass and Bioenergy, 141, 105714.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN), 2021. *SNI 06-3730-2021: Karbon Aktif*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Baysal, M., Bilge, K., Yilmaz, B., Papila, M. & Yürüm, Y., 2018. *Preparation of high surface area activated carbon from waste-biomass of sunflower piths: Kinetics and equilibrium studies on the dye removal*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 6(2), pp.1702–1713.
- Chen, S., Liu, Z., Jiang, S. & Hou, H., 2020. *Carbonization: A feasible route for reutilization of plastic wastes*. Science of the Total Environment, 710, 136250.
- Dizbay-Onat, M., Vaidya, U.K. & Lungu, C.T., 2017. *Preparation of industrial sisal fiber waste derived activated carbon by chemical activation and effects of carbonization parameters on surface characteristics*. Industrial Crops and Products, 95, pp.583–590.
- Ge, L. et al., 2022. *An analysis of the carbonization process and volatile-release characteristics of coal-based activated carbon*. Energy, 257, 124779.
- Hambali, E. & Rivai, M., 2017. *The potential of palm oil waste biomass in Indonesia in 2020 and 2030*. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 65(1), 012050. IOP Publishing.
- Li, Y.H. et al., 2020. *Activated carbon preparation from pyrolysis char of sewage sludge and its adsorption performance for organic compounds in sewage*. Fuel, 266, 117053.
- Lichtenstein, K. & Lavoine, N., 2017. *Toward a deeper understanding of the thermal degradation mechanism of nanocellulose*. Polymer Degradation and Stability, 146, pp.53–60.
- Liu, X. et al., 2018. *Net-like porous activated carbon materials from shrimp shell by solution-processed carbonization and H_3PO_4 activation for methylene blue adsorption*. Powder Technology, 326, pp.181–189.
- Niu, Z., Liu, G., Yin, H. & Zhou, C., 2018. *Devolatilization behaviour and pyrolysis kinetics of coking coal based on the evolution of functional groups*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 134, pp.351–361.
- Okro, S., Mustafa, M., Kurniawan, A. & Palulun, E.S.B., 2021. *Pengaruh suhu dan konsentrasi aktivator HCl terhadap karakteristik karbon aktif dari ampas kopi*. METANA, 17(1), pp.15–21.

- Putri, R.W., Haryati, S. & Rahmatullah, R., 2019. *Pengaruh suhu karbonisasi terhadap kualitas karbon aktif dari limbah ampas tebu*. Jurnal Teknik Kimia, 25(1), pp.1–4.
- Ramadhani, M.F. & Dharmawan, M.D., 2023. *Kajian pemanfaatan limbah padat kelapa sawit sebagai bahan pembuatan karbon aktif dengan metode karbonisasi*. Skripsi Sarjana, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur.
- Sukiran, M.A. et al., 2017. *A review of torrefaction of oil palm solid wastes for biofuel production*. Energy Conversion and Management, 149, pp.101–120.
- Suroto, E.S., 2020. *Pengaruh bahan aktivator pada pembuatan karbon aktif tempurung kelapa*. Jurnal Riset Industri Hasil Hutan, 2(1), pp.21–26.
- Yang, X., Kang, K., Qiu, L., Zhao, L. & Sun, R., 2020. *Effects of carbonization conditions on the yield and fixed carbon content of biochar from pruned apple tree branches*. Renewable Energy, 146, pp.1691–1699.
- Zhu, M.Q. et al., 2017. *The effects of autohydrolysis pretreatment on the structural characteristics, adsorptive and catalytic properties of the activated carbon prepared from Eucommia ulmoides Oliver based on a biorefinery process*. Bioresource Technology, 232, pp.159–167.