



Kinerja Karbon Aktif Ampas Kopi Teraktivasi H_3PO_4 dan KOH pada Limbah Laundry

R.A. Amanda Luthfia Sari^{1*}, Linda Ekawati², Muhammad Yerizam³

^{1,2,3}Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Kimia Industri, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang, Indonesia

*E-mail: linda.ekawati@polsri.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.52188/jpfs.v9i2.2384>

Accepted: 4 Agustus 2026

Approved: 11 Agustus 2026

Published: 30 September 2026

ABSTRAK

Ampas kopi berpotensi dikonversi menjadi adsorben untuk pengolahan limbah cair laundry yang kaya bahan organik dan padatan tersuspensi. Penelitian ini membandingkan karakteristik serta kinerja karbon aktif ampas kopi yang diaktivasi dengan H_3PO_4 dan KOH. Ampas kopi dikarbonisasi pada 600 °C selama 2 jam, diayak 100 mesh, kemudian direndam selama 24 jam dalam H_3PO_4 1 M atau KOH 1 M. Adsorben dikarakterisasi berdasarkan kadar air, kadar abu, daya serap iodin, dan spektrum FTIR. Uji adsorpsi menggunakan 250 mL limbah laundry dilakukan pada massa 2–10 g dan waktu kontak 40 atau 60 menit. Kedua adsorben memenuhi SNI 06-3730-1995. Aktivasi H_3PO_4 menghasilkan kadar air 3,48%, kadar abu 1,38%, dan daya serap iodin 1.078,7 mg/g, sedangkan KOH menghasilkan 3,88%, 1,55%, dan 951,8 mg/g. Efisiensi COD tertinggi dicapai KOH pada 4 g selama 60 menit sebesar 93,88%, sedangkan H_3PO_4 mencapai 91,84% pada 6 g. Efisiensi TSS tertinggi masing-masing 84,05% dan 84,59% pada 10 g. Hasil menunjukkan bahwa karakteristik adsorben, dosis, dan waktu kontak perlu dioptimalkan secara bersama, karena daya serap iodin tertinggi tidak secara langsung menghasilkan penyisihan COD tertinggi.

Kata kunci: Adsorpsi; Ampas Kopi; Karbon Aktif; Limbah Laundry; COD Dan TSS

ABSTRACT

Spent coffee grounds can be converted into adsorbents for treating laundry wastewater containing organic matter and suspended solids. This study compared the characteristics and performance of coffee-ground activated carbons treated with H_3PO_4 and KOH. The material was carbonized at 600 °C for 2 h, sieved to 100 mesh, and soaked for 24 h in 1 M H_3PO_4 or 1 M KOH. The adsorbents were characterized by moisture content, ash content, iodine number, and FTIR spectra. Adsorption tests were conducted using 250 mL of laundry wastewater at adsorbent masses of 2–10 g and contact times of 40 or 60 min. Both products met SNI 06-3730-1995. H_3PO_4 activation produced 3.48% moisture, 1.38% ash, and an iodine number of 1,078.7 mg/g, whereas KOH produced 3.88%, 1.55%, and 951.8 mg/g. The highest COD removal was obtained with KOH at 4 g and 60 min (93.88%), while H_3PO_4 reached 91.84% at 6 g. Maximum TSS removals were 84.05% and 84.59%, respectively, at 10 g. Adsorbent properties, dosage, and contact time therefore require simultaneous optimization because a higher iodine number did not directly correspond to superior COD removal.

Keyword: Activated Carbon; Adsorption; Coffee Grounds; Laundry Wastewater; COD And TSS

@2026 Pendidikan Fisika FKIP Universitas Nahdlatul Ulama Cirebon

PENDAHULUAN

Pertumbuhan konsumsi kopi memberikan manfaat ekonomi, tetapi juga meningkatkan aliran limbah padat berupa ampas kopi. Biomassa ini masih sering berakhir di tempat pembuangan, padahal kandungan karbon dan lignoselulosanya memungkinkan pengolahan menjadi material bernilai tambah. Ampas kopi mengandung selulosa, hemiselulosa, lignin, protein, dan fraksi organik lain yang dapat membentuk kerangka karbon setelah pemanasan. Dalam perspektif ekonomi sirkular, konversi ampas kopi menjadi adsorben mempertemukan dua kebutuhan sekaligus, yaitu pengurangan beban limbah organik dan penyediaan material pengolahan air yang relatif murah. Pendekatan ini lebih bernilai dibanding pembuangan langsung karena karbon yang semula berada dalam residu konsumsi dimanfaatkan kembali sebagai permukaan aktif untuk menangkap pencemar (McNutt & He, 2019; Reza et al., 2020; Ahmed et al., 2024).

Karbon aktif merupakan padatan berpori yang memiliki luas permukaan internal tinggi dan gugus kimia permukaan yang dapat berinteraksi dengan adsorbat. Pembentukannya umumnya mencakup karbonisasi dan aktivasi. Karbonisasi menguraikan fraksi volatil biomassa serta meningkatkan proporsi karbon aromatik, sedangkan aktivasi membuka pori, membersihkan residu tar, dan memodifikasi kimia permukaan. Kinerja adsorben tidak hanya ditentukan oleh luas permukaan, tetapi juga distribusi mikro-, meso-, dan makropori, polaritas permukaan, muatan, serta aksesibilitas pori bagi molekul target. Karena itu, bahan baku yang sama dapat menghasilkan kinerja berbeda ketika diproses dengan aktivator dan kondisi operasi yang berbeda (IUPAC, 1994; Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006; Chen et al., 2022).

Asam fosfat dan kalium hidroksida merupakan dua aktivator kimia yang bekerja melalui mekanisme berbeda. H_3PO_4 bersifat mendehidrasi, membantu pemutusan ikatan dalam struktur lignoselulosa, dan dapat membentuk gugus yang mengandung fosfor pada permukaan karbon. Proses tersebut sering dikaitkan dengan perkembangan mesopori dan peningkatan gugus asam permukaan. Sebaliknya, KOH dapat memicu reaksi redoks dan pengikisan matriks karbon sehingga jaringan mikropori berkembang. Interkalasi spesies kalium dan pelepasan gas selama perlakuan termal juga dapat memperbesar ruang antar-lapis karbon. Perbedaan mekanisme ini penting karena air limbah laundry tidak mengandung satu adsorbat tunggal, melainkan campuran surfaktan, bahan organik, bahan pembantu pencucian, serta padatan halus. Adsorben yang unggul terhadap iodine belum tentu paling efektif terhadap campuran tersebut (Reffas et al., 2010; Chen et al., 2022; Ma et al., 2024).

Limbah cair laundry menjadi persoalan lingkungan terutama di kawasan permukiman dan wilayah perkotaan dengan pertumbuhan usaha pencucian skala kecil. Deterjen, surfaktan, pelembut, pemutih, kotoran pakaian, serat tekstil, dan partikel tanah masuk ke aliran buangan dalam konsentrasi yang beragam. Bahan organik teroksidasi secara kimia tercermin dalam nilai *Chemical Oxygen Demand* (COD), sedangkan partikel yang tidak terlarut direpresentasikan oleh *Total Suspended Solids* (TSS). Nilai COD tinggi menunjukkan kebutuhan oksigen yang besar untuk mengoksidasi senyawa dalam limbah; bila dibuang langsung, kondisi tersebut berpotensi menurunkan oksigen terlarut di badan air. TSS yang tinggi meningkatkan kekeruhan, menghambat penetrasi cahaya, dan dapat membawa pencemar terikat pada permukaan partikel (Mulyani et al., 2021; Putri et al., 2021; Sari et al., 2022).

Adsorpsi dipilih karena operasinya relatif sederhana, dapat diterapkan secara *batch*, dan kompatibel dengan unit pengolahan skala usaha. Pada proses ini, molekul atau partikel berpindah dari fase cair menuju permukaan dan pori adsorben melalui interaksi fisik maupun kimia. Kinerja proses dipengaruhi oleh dosis adsorben, waktu kontak, konsentrasi awal, pH, ukuran partikel, kecepatan pengadukan, suhu, serta sifat permukaan. Penambahan massa biasanya meningkatkan jumlah situs yang tersedia, tetapi setelah melewati titik tertentu, partikel dapat beragregasi, pori saling tertutup, dan efisiensi penggunaan adsorben menurun. Waktu kontak juga mempunyai batas; setelah kesetimbangan mendekat, penambahan waktu memberi kenaikan yang kecil dan dalam sistem tertentu dapat diikuti pelepasan kembali komponen yang terikat lemah (Tran et al., 2021; Pungut et al., 2021).

Penelitian terdahulu telah memanfaatkan karbon aktif berbasis biomassa untuk limbah laundry maupun limbah industri lain. Karbon aktif kayu besi dilaporkan menurunkan COD dan TSS limbah laundry, sedangkan karbon berbahan kulit singkong, eceng gondok, dan ampas kopi juga menunjukkan kemampuan terhadap bahan organik atau padatan tersuspensi (Mulyani et al., 2021; Destanti et al., 2023; Kirani & Ali, 2023; Sari et al., 2025). Akan tetapi, hasil antarpencapaian sulit dibandingkan secara langsung karena perbedaan bahan baku, konsentrasi awal, pH, aktivator, suhu

karbonisasi, dosis, dan metode analisis. Selain itu, kajian yang membandingkan H_3PO_4 dan KOH pada bahan ampas kopi dalam sistem limbah laundry yang sama masih terbatas. Perbandingan dalam satu rancangan diperlukan agar pengaruh aktivator tidak tertutup oleh variasi bahan dan kondisi limbah.

Kesenjangan lain adalah kecenderungan menilai adsorben hanya dari satu indikator, misalnya daya serap iodin atau persentase penyisihan maksimum. Daya serap iodin terutama menggambarkan kemampuan terhadap molekul kecil dan sering digunakan sebagai indikator perkembangan mikropori, sedangkan COD limbah laundry mencakup campuran senyawa dengan ukuran dan polaritas beragam. Persentase penyisihan juga dapat meningkat hanya karena dosis adsorben diperbesar, meskipun jumlah pencemar yang ditangkap per gram adsorben justru menurun. Artikel yang berorientasi rekayasa perlu membaca karakterisasi material, persentase penyisihan, dosis optimum, dan beban adsorpsi secara bersamaan agar kesimpulan tidak berhenti pada angka tertinggi.

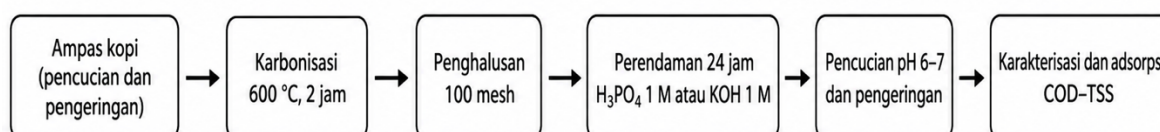
Karakteristik awal limbah pada penelitian ini, yaitu COD 392 mg/L dan TSS 148 mg/L, menunjukkan bahwa sampel memerlukan pengolahan sebelum dilepas ke lingkungan. Nilai tersebut juga memberikan tantangan yang berbeda bagi adsorben. COD mencakup senyawa terlarut, koloid, dan sebagian bahan tersuspensi yang dapat teroksidasi, sedangkan TSS secara khusus merepresentasikan partikel yang tertahan oleh media penyaring. Karena definisi analitiknya berbeda, kondisi terbaik untuk satu parameter tidak harus menjadi kondisi terbaik untuk parameter lain. Penilaian yang hanya berfokus pada efisiensi maksimum juga belum cukup, sebab proses lapangan harus memenuhi konsentrasi akhir, menggunakan massa material secara rasional, serta menghasilkan residu yang dapat dikelola. Kerangka evaluasi ini digunakan agar hasil penelitian tidak hanya menjawab apakah karbon aktif bekerja, tetapi juga menunjukkan bagaimana kinerjanya berubah ketika dosis dan waktu diubah.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi karakteristik karbon aktif ampas kopi hasil perlakuan H_3PO_4 dan KOH berdasarkan SNI 06-3730-1995 dan FTIR, menganalisis pengaruh massa adsorben serta waktu kontak terhadap penurunan COD dan TSS, dan membandingkan kinerja kedua aktivator dalam sistem yang sama. Kebaruan praktisnya terletak pada penggabungan karakterisasi mutu teknis dengan evaluasi dua parameter utama limbah laundry pada rentang dosis yang luas. Interpretasi dilakukan secara kritis dengan membedakan hasil empiris, penjelasan mekanistik, dan keterbatasan rancangan sehingga kondisi terbaik dapat diposisikan sebagai optimum dalam rentang uji, bukan sebagai optimum universal.

METODE

Penelitian eksperimental dilaksanakan di Laboratorium Jurusan Teknik Kimia Politeknik Negeri Sriwijaya pada April–Mei 2026. Bahan utama berupa ampas kopi robusta dan limbah cair laundry. Bahan kimia yang digunakan meliputi H_3PO_4 , KOH , HCl , akuades, larutan iodin, natrium tiosulfat, dan indikator amilum. Peralatan utama terdiri atas *furnace*, oven, ayakan 100 mesh, neraca analitik, desikator, pengaduk magnetik, reaktor COD, peralatan filtrasi, serta instrumen FTIR. Penelitian membandingkan dua jenis aktivator, lima massa adsorben, dan dua waktu kontak. Suhu karbonisasi, ukuran partikel, volume limbah, kecepatan pengadukan, dan suhu adsorpsi dikendalikan agar perbandingan berfokus pada variabel tersebut.

Ampas kopi dicuci untuk mengurangi residu larut dan kotoran, dijemur, kemudian dikeringkan pada 105 °C selama 1 jam. Biomassa kering dikarbonisasi pada 600 °C selama 2 jam dalam *furnace*. Arang didinginkan, digerus, dan diayak hingga ukuran 100 mesh. Ukuran seragam dipilih untuk mengurangi variasi luas permukaan eksternal dan hambatan perpindahan massa antarperlakuan. Seratus gram arang digunakan pada masing-masing perlakuan aktivator. Rangkaian utama proses disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian pembuatan, karakterisasi, dan pengujian karbon aktif ampas kopi

Larutan H_3PO_4 1 M disiapkan dari larutan pekat 85%, sedangkan larutan KOH 1 M dibuat dengan melarutkan KOH padat. Arang direndam dalam masing-masing aktivator selama 24 jam pada suhu ruang. Setelah perendaman, padatan disaring dan dicuci menggunakan akuades hingga pH 6–7, kemudian dikeringkan pada 105 °C selama 3 jam. Prosedur ini mengikuti rancangan pada skripsi sumber. Secara terminologis, tahap tersebut merupakan perlakuan kimia pascakarbonisasi; karena tidak ada tahap pemanasan suhu tinggi setelah impregnasi, interpretasi mekanisme pembentukan pori dibatasi pada data karakterisasi yang tersedia dan tidak disamakan sepenuhnya dengan aktivasi kimia konvensional yang diikuti pemanasan.

Karakterisasi mutu mencakup kadar air, kadar abu, dan daya serap iodine berdasarkan SNI 06-3730-1995. Kadar air ditentukan dari kehilangan massa setelah pemanasan sampel pada 105 °C hingga massa konstan. Kadar abu dihitung dari residu setelah pemanasan pada 750 °C selama 4 jam. Daya serap iodine ditentukan dengan mengontakkan 0,5 g karbon aktif dengan 50 mL iodine 0,1 N selama 15 menit, menyaring campuran, kemudian menitrasi 10 mL filtrat menggunakan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,1 N dengan indikator amilum. Gugus fungsi dianalisis menggunakan FTIR pada rentang bilangan gelombang instrumen yang digunakan laboratorium pengujian.

Uji adsorpsi dilakukan secara *batch*. Sebanyak 250 mL limbah laundry dimasukkan ke dalam erlenmeyer dan ditambahkan karbon aktif sebanyak 2, 4, 6, 8, atau 10 g. Campuran diaduk pada 100 rpm pada suhu ruang sekitar 27–30 °C selama 40 atau 60 menit. Setelah kontak, campuran disaring dan filtrat dianalisis untuk COD dan TSS. Konsentrasi awal limbah adalah 392 mg/L untuk COD dan 148 mg/L untuk TSS. Efisiensi penurunan dihitung sebagai $\eta = ((C_0 - C_t)/C_0) \times 100\%$, dengan C_0 sebagai konsentrasi awal dan C_t sebagai konsentrasi setelah perlakuan. Beban penyisihan semu per massa adsorben dihitung sebagai $q = ((C_0 - C_t)V)/m$ untuk membantu menilai efisiensi penggunaan material, dengan V sebagai volume limbah dan m sebagai massa adsorben.

Keandalan analisis dipertahankan dengan menggunakan volume limbah, kecepatan pengadukan, ukuran partikel, dan suhu yang sama pada seluruh perlakuan. Meskipun demikian, data sumber tidak mencantumkan pengukuran pH limbah selama adsorpsi, blanko pereaksi, duplo, atau triplo. Karena COD dan TSS merupakan metode yang sensitif terhadap pengambilan sampel serta homogenitas, hasil diperlakukan sebagai nilai observasi tunggal. Angka efisiensi ditampilkan sampai dua desimal untuk mengikuti perhitungan, tetapi ketelitian angka tersebut tidak dimaknai sebagai kepastian analitik dua desimal. Pendekatan ini mencegah kesan presisi yang lebih tinggi daripada dukungan rancangan eksperimen.

Data dianalisis secara deskriptif melalui perbandingan konsentrasi akhir, efisiensi penurunan, pola terhadap massa, pola terhadap waktu, dan kesesuaian terhadap acuan mutu yang digunakan dalam penelitian. Tidak terdapat informasi pengulangan eksperimen dan simpangan baku pada data sumber. Oleh sebab itu, istilah “berpengaruh signifikan” tidak digunakan dan perbedaan antarkondisi tidak diklaim sebagai perbedaan statistik. Kondisi optimum didefinisikan sebagai kondisi dengan hasil tertinggi dalam kombinasi perlakuan yang diuji. Batas COD 100 mg/L dan TSS 30 mg/L digunakan sebagai acuan evaluasi sesuai Permen LH/BPLH Nomor 11 Tahun 2025 yang dirujuk penelitian.

HASIL

Hasil karakterisasi dan pengujian adsorpsi dirangkum pada Tabel 1–5 serta Gambar 2–4. Penyajian hasil dipisahkan dari interpretasi agar pola empiris dapat dibaca terlebih dahulu sebelum dibahas secara mekanistik.

Tabel 1. Karakteristik karbon aktif ampas kopi dan kesesuaiannya terhadap SNI 06-3730-1995

Aktivator	Kadar air (%)	Kadar abu (%)	Daya serap iodine (mg/g)	Evaluasi
H_3PO_4	3,48	1,38	1.078,7	Memenuhi
KOH	3,88	1,55	951,8	Memenuhi
SNI	Maks. 15	Maks. 10	Min. 750	Acuan

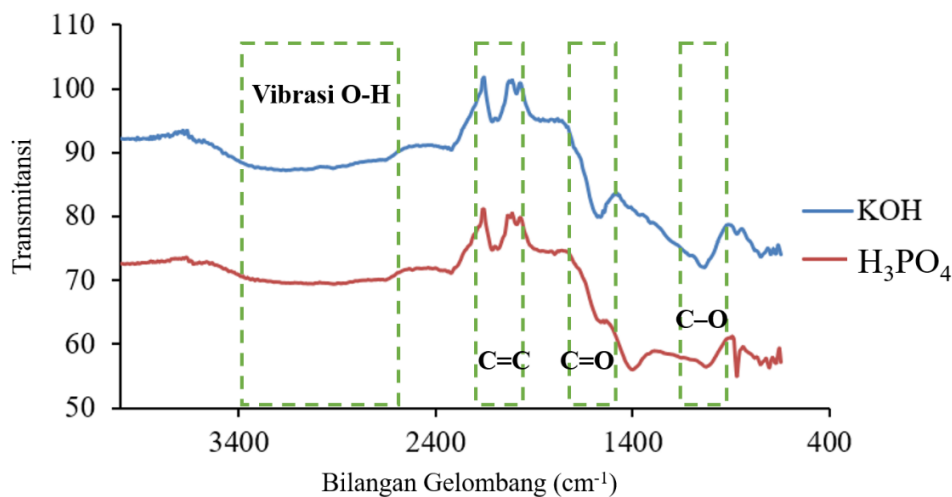
Sumber: data hasil penelitian (2026); acuan mutu: SNI 06-3730-1995.

Karbon aktif H_3PO_4 dan KOH menunjukkan kadar air dan kadar abu yang jauh di bawah batas maksimum SNI, sedangkan daya serap iodine keduanya melampaui nilai minimum 750 mg/g. H_3PO_4 menghasilkan kadar air 3,48%, kadar abu 1,38%, dan daya serap iodine 1.078,7 mg/g. KOH

R.A. Amanda Luthfia Sari¹, Linda Ekawati², Muhammad Yerizam³/ JPFS 9 (2) (2026) 235-247
menghasilkan kadar air 3,88%, kadar abu 1,55%, dan daya serap iodine 951,8 mg/g. Selisih daya serap iodine mencapai 126,9 mg/g atau sekitar 13,3% terhadap nilai KOH.

Tabel 2. Pita utama FTIR karbon aktif H₃PO₄ dan KOH

Aktivator	Bilangan gelombang (cm ⁻¹)	Gugus	Interpretasi
H ₃ PO ₄	3.160	O–H	Hidroksil
H ₃ PO ₄	1.871	C=O	Karbonil
H ₃ PO ₄	1.580	C=C	Aromatik
H ₃ PO ₄	1.043	P–O/C–O	Fosfat/alkohol-eter
KOH	3.630	O–H	Hidroksil bebas
KOH	1.797	C=O	Karbonil
KOH	1.402	C–H/O–H	Deformasi/tekuk
KOH	1.029	C–O	Alkohol, eter, atau ester



Gambar 2. Spektrum FTIR karbon aktif ampas kopi teraktivasi H₃PO₄ dan KOH

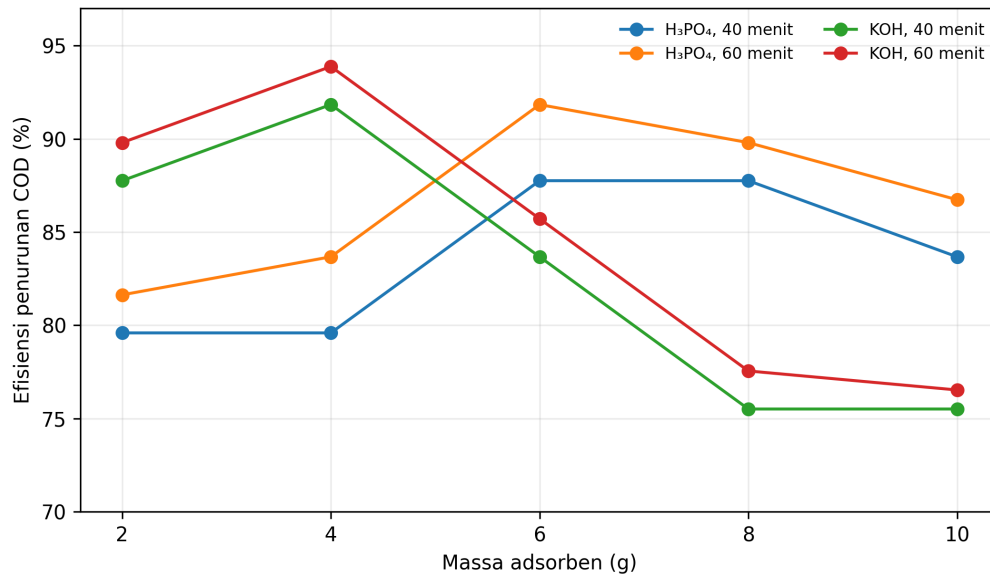
Spektrum FTIR memperlihatkan gugus beroksigen pada kedua adsorben. Karbon H₃PO₄ memiliki pita O–H pada 3.160 cm⁻¹, C=O pada 1.871 cm⁻¹, C=C aromatik pada 1.580 cm⁻¹, dan pita P–O/C–O pada 1.043 cm⁻¹. Karbon KOH menunjukkan O–H bebas pada 3.630 cm⁻¹, C=O pada 1.797 cm⁻¹, serta C–O pada 1.029 cm⁻¹. Pita pada sekitar 2.341–2.362 cm⁻¹ dapat berkaitan dengan CO₂ teradsorpsi atau daerah ikatan rangkap tiga. Data ini mengonfirmasi perbedaan kimia permukaan, tetapi tidak memberikan informasi kuantitatif mengenai luas permukaan dan distribusi ukuran pori.

Tabel 3. Konsentrasi dan efisiensi penurunan COD limbah laundry

Aktivator	Massa (g)	40 menit	40 menit	60 menit	60 menit
Aktivator	Massa (g)	COD (mg/L)	Efisiensi (%)	COD (mg/L)	Efisiensi (%)
H ₃ PO ₄	2	80	79,59	72	81,63
H ₃ PO ₄	4	80	79,59	64	83,67
H ₃ PO ₄	6	48	87,76	32	91,84
H ₃ PO ₄	8	48	87,76	40	89,80
H ₃ PO ₄	10	64	83,67	52	86,73
KOH	2	48	87,76	40	89,80
KOH	4	32	91,84	24	93,88
KOH	6	64	83,67	56	85,71

Aktivator	Massa (g)	40 menit	40 menit	60 menit	60 menit
Aktivator	Massa (g)	COD (mg/L)	Efisiensi (%)	COD (mg/L)	Efisiensi (%)
KOH	8	96	75,51	88	77,55
KOH	10	96	75,51	92	76,53

Konsentrasi COD awal = 392 mg/L.



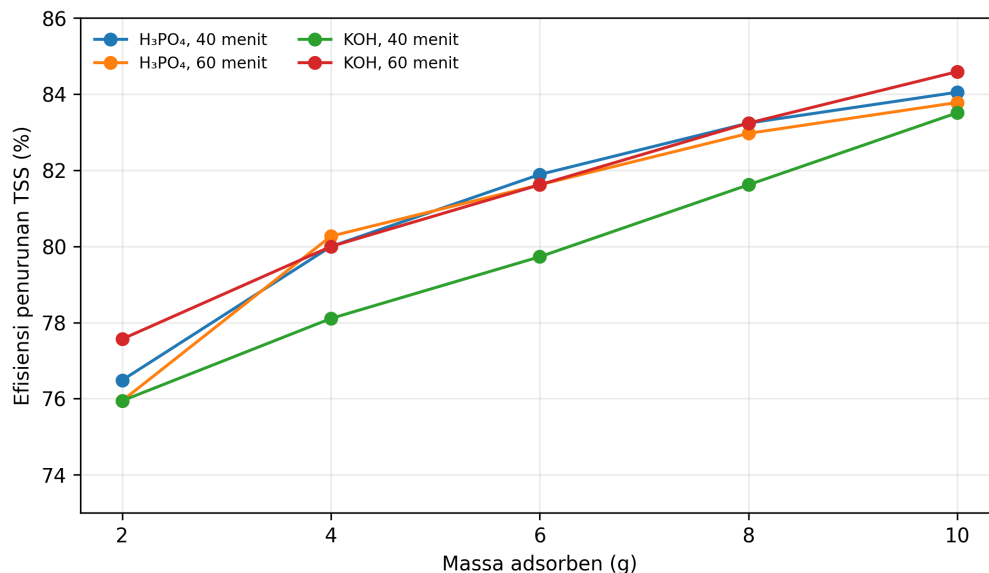
Gambar 3. Efisiensi penurunan COD berdasarkan massa adsorben dan waktu kontak

Konsentrasi COD awal 392 mg/L turun pada seluruh perlakuan. Pada karbon H₃PO₄, nilai terendah 32 mg/L dicapai pada 6 g dan 60 menit, setara dengan efisiensi 91,84%. Peningkatan massa di atas 6 g tidak memperbaiki hasil; COD meningkat menjadi 40 mg/L pada 8 g dan 52 mg/L pada 10 g. Pada karbon KOH, nilai terendah 24 mg/L diperoleh pada 4 g dan 60 menit, setara dengan efisiensi 93,88%. Penambahan dosis menjadi 6–10 g justru menurunkan efisiensi. Seluruh konsentrasi COD akhir berada di bawah acuan 100 mg/L.

Tabel 4. Konsentrasi dan efisiensi penurunan TSS limbah laundry

Aktivator	Massa (g)	40 menit	40 menit	60 menit	60 menit
Aktivator	Massa (g)	TSS (mg/L)	Efisiensi (%)	TSS (mg/L)	Efisiensi (%)
H ₃ PO ₄	2	34,8	76,49	35,6	75,95
H ₃ PO ₄	4	29,6	80,00	29,2	80,27
H ₃ PO ₄	6	26,8	81,89	27,2	81,62
H ₃ PO ₄	8	24,8	83,24	25,2	82,97
H ₃ PO ₄	10	23,6	84,05	24,0	83,78
KOH	2	35,6	75,95	33,2	77,57
KOH	4	32,4	78,11	29,6	80,00
KOH	6	30,0	79,73	27,2	81,62
KOH	8	27,2	81,62	24,8	83,24
KOH	10	24,4	83,51	22,8	84,59

Konsentrasi TSS awal = 148 mg/L.



Gambar 4. Efisiensi penurunan TSS berdasarkan massa adsorben dan waktu kontak

Konsentrasi TSS awal 148 mg/L menurun menjadi 22,8–35,6 mg/L. Berbeda dari COD, pola TSS cenderung membaik ketika massa ditambah. H₃PO₄ mencapai efisiensi tertinggi 84,05% pada 10 g dan 40 menit, dengan TSS 23,6 mg/L; pada 60 menit, nilai 24,0 mg/L setara dengan 83,78%. KOH mencapai hasil terbaik 84,59% pada 10 g dan 60 menit, dengan TSS 22,8 mg/L. Dengan batas 30 mg/L, sebagian besar dosis menengah–tinggi memenuhi acuan, sedangkan dosis 2 g pada kedua adsorben belum memenuhi. KOH 4 g selama 40 menit juga masih menghasilkan 32,4 mg/L.

Tabel 5. Perbandingan kondisi terbaik dan status terhadap acuan konsentrasi akhir

Parameter	Aktivator	Massa (g)	Waktu (menit)	Akhir (mg/L)	Efisiensi (%)	Beban semu (mg/g)
COD	H ₃ PO ₄	6	60	32	91,84	15,00
COD	KOH	4	60	24	93,88	23,00
TSS	H ₃ PO ₄	10	40	23,6	84,05	3,11
TSS	KOH	10	60	22,8	84,59	3,13

Beban semu dihitung dari $(C_0 - C_t)V/m$. Seluruh kondisi terbaik memenuhi acuan COD 100 mg/L dan TSS 30 mg/L.

Perbandingan kondisi terbaik menunjukkan bahwa KOH memerlukan massa lebih rendah untuk mencapai penyisihan COD maksimum. Beban COD yang dihilangkan pada KOH 4 g dan 60 menit sekitar 23,0 mg/g, sedangkan H₃PO₄ 6 g dan 60 menit sekitar 15,0 mg/g. Namun, pada dosis KOH 2 g dan 60 menit, beban penyisihan mencapai sekitar 44,0 mg/g meskipun efisiensi totalnya 89,80%. Temuan ini memperlihatkan perbedaan antara target konsentrasi akhir dan efisiensi penggunaan adsorben. Untuk TSS, beban penyisihan semu pada kondisi terbaik sekitar 3,11–3,13 mg/g karena dosis 10 g digunakan.

PEMBAHASAN

Karakteristik karbon aktif H₃PO₄ dan KOH berdasarkan SNI dan FTIR

Rumusan masalah pertama dijawab oleh hasil karakterisasi yang menunjukkan bahwa kedua karbon aktif memenuhi tiga parameter SNI 06-3730-1995 yang diuji. Kadar air 3,48–3,88% berada jauh di bawah batas maksimum 15%. Kadar air rendah mengurangi kemungkinan molekul air menempati pori dan bersaing dengan adsorbat. Selisih 0,40 poin persentase antara H₃PO₄ dan KOH relatif kecil, tetapi arah perbedaannya menunjukkan bahwa adsorben H₃PO₄ sedikit lebih mudah mencapai kondisi kering pada prosedur yang sama. Kadar air bukan hanya atribut penyimpanan; pada adsorpsi fase cair, air yang terikat kuat pada gugus hidrofilik dapat mengubah aksesibilitas permukaan dan interaksi dengan surfaktan.

Kadar abu H₃PO₄ sebesar 1,38% dan KOH sebesar 1,55% juga jauh di bawah batas maksimum 10%. Abu mewakili residu mineral yang tidak terbakar. Kadar abu tinggi dapat mengurangi fraksi karbon aktif, menyumbat pori, dan mengubah pH larutan. Nilai rendah pada kedua

sampel menunjukkan bahwa pencucian dan karbonisasi cukup efektif mengurangi residu anorganik. Meskipun demikian, kadar abu total tidak menjelaskan komposisi mineral maupun kemungkinan sisa fosfat atau kalium. Analisis unsur menggunakan XRF atau SEM-EDS diperlukan untuk memastikan bahwa pencucian hingga pH netral juga menurunkan residu aktivator ke tingkat yang aman.

Daya serap iodin membedakan kedua adsorben lebih jelas. H_3PO_4 mencapai 1.078,7 mg/g, sedangkan KOH 951,8 mg/g. Keduanya melampaui SNI, tetapi nilai H_3PO_4 13,3% lebih tinggi. Iodin berukuran relatif kecil dan sering digunakan sebagai indikator akses terhadap mikropori. Hasil tersebut mengisyaratkan bahwa perlakuan H_3PO_4 menghasilkan jumlah situs atau akses pori yang lebih besar bagi iodin. Reffas et al. (2010) menunjukkan bahwa aktivasi ampas kopi dengan H_3PO_4 dapat membentuk karbon berpori dengan kimia permukaan yang khas. Namun, nilai iodin tidak dapat diterjemahkan langsung menjadi luas permukaan BET dan tidak menggambarkan kemampuan terhadap semua kontaminan.

Interpretasi FTIR mendukung adanya perbedaan kimia permukaan. Pita P–O/C–O pada 1.043 cm^{-1} hanya tercatat pada karbon H_3PO_4 . Gugus mengandung fosfor dapat meningkatkan polaritas dan menyediakan lokasi interaksi dengan senyawa bermuatan atau polar. Pita O–H, C=O, C=C, dan C–O menunjukkan bahwa permukaan kedua karbon tidak sepenuhnya grafitik dan masih mengandung gugus oksigen. Gugus tersebut dapat membentuk ikatan hidrogen, interaksi dipol, dan interaksi asam-basa dengan komponen limbah. Pada karbon KOH, pita O–H bebas pada 3.630 cm^{-1} dan C–O pada 1.029 cm^{-1} menunjukkan permukaan kaya oksigen tanpa indikasi P–O.

Puncak FTIR perlu dibaca sebagai bukti keberadaan gugus, bukan ukuran jumlah situs aktif. Intensitas pita tidak dilaporkan secara kuantitatif dan tidak ada spektrum bahan baku, arang tanpa aktivasi, atau kontrol aktivator. Karena itu, perubahan yang secara khusus disebabkan oleh H_3PO_4 atau KOH tidak dapat dihitung. Pita sekitar 2.300 cm^{-1} juga berpotensi berasal dari CO_2 atmosfer dalam jalur optik, sehingga tidak layak dipakai sebagai dasar utama mekanisme adsorpsi. Publikasi lanjutan sebaiknya menyertakan spektrum mentah beresolusi tinggi, koreksi garis dasar, intensitas relatif, dan perbandingan sebelum–sesudah aktivasi.

Terdapat catatan metodologis penting. Dalam aktivasi kimia konvensional, biomassa sering diimpregnasi terlebih dahulu lalu dipanaskan agar reaksi aktivator–karbon berkembang pada suhu tinggi. Penelitian ini mengkarbonisasi bahan terlebih dahulu, kemudian merendam arang pada aktivator dan hanya mengeringkannya pada $105\text{ }^\circ\text{C}$. Oleh sebab itu, peningkatan daya serap iodin kemungkinan berasal dari kombinasi pembersihan pori, pelarutan residu, dan modifikasi permukaan, bukan semata-mata pembentukan pori melalui reaksi termal. Penjelasan ini tidak mengurangi validitas hasil empiris, tetapi membatasi generalisasi mekanismenya.

Daya serap iodin juga tidak dapat digunakan untuk menebak ukuran pori secara tunggal. Nilai yang tinggi dapat dipengaruhi oleh jumlah mikropori, aksesibilitas permukaan, dan gugus yang berinteraksi dengan iodin. Tanpa adsorpsi nitrogen, volume pori dan luas permukaan spesifik belum diketahui. Adsorben dengan luas BET tinggi pun dapat berkinerja rendah bila pori terlalu kecil untuk komponen limbah atau bila permukaannya tidak sesuai secara kimia. Oleh karena itu, hasil iodin dalam penelitian ini paling tepat digunakan untuk membandingkan mutu relatif kedua sampel pada metode yang sama, bukan untuk menyatakan luas permukaan tertentu.

Kesesuaian terhadap SNI perlu ditempatkan secara proporsional. Standar kadar air, kadar abu, dan daya serap iodin memastikan mutu dasar arang aktif teknis, tetapi tidak secara langsung menetapkan selektivitas terhadap surfaktan atau kemampuan menangkap padatan pada limbah laundry. Dua adsorben dapat sama-sama memenuhi SNI namun menunjukkan dosis optimum yang berbeda ketika diuji pada matriks kompleks. Dengan kata lain, pengujian SNI berfungsi sebagai penyaringan kualitas material, sedangkan keputusan aplikasi memerlukan uji kinerja pada limbah sasaran. Hubungan ini menjelaskan mengapa karakterisasi H_3PO_4 yang lebih baik tidak otomatis menghasilkan COD akhir terendah.

Secara keseluruhan, H_3PO_4 menghasilkan mutu karakterisasi yang sedikit lebih baik: kadar air dan abu lebih rendah serta daya serap iodin lebih tinggi. KOH tetap memenuhi SNI dan memiliki gugus beroksigen yang relevan untuk adsorpsi. Dengan demikian, jawaban terhadap rumusan masalah pertama bukan bahwa satu aktivator unggul mutlak, melainkan bahwa H_3PO_4 lebih unggul pada indikator mutu material yang diukur, sementara kesesuaian kinerja terhadap limbah nyata tetap harus ditentukan melalui pengujian adsorpsi.

Pengaruh massa adsorben dan waktu kontak terhadap penurunan COD dan TSS

Rumusan masalah kedua dijawab oleh pola yang berbeda antara COD dan TSS. Pada tahap awal penambahan massa, jumlah partikel dan situs permukaan meningkat sehingga peluang kontak dengan pencemar bertambah. Akan tetapi, COD tidak menurun secara monoton. Karbon H_3PO_4 mencapai titik terbaik pada 6 g, sedangkan KOH pada 4 g. Setelah titik tersebut, konsentrasi COD naik kembali. Pola ini menunjukkan bahwa penambahan adsorben tidak selalu identik dengan peningkatan penggunaan situs secara efektif.

Beberapa mekanisme dapat menjelaskan penurunan efisiensi pada dosis berlebih. Partikel halus dapat beragregasi sehingga luas permukaan efektif lebih kecil daripada jumlah permukaan teoritis. Tumpang tindih lapisan difusi di sekitar partikel dapat memperpanjang jalur perpindahan massa. Pada sistem pengadukan, jumlah padatan tinggi juga meningkatkan viskositas semu dan mengubah hidrodinamika. Selain itu, sisa zat larut dari adsorben dapat memberi kontribusi pada pengukuran COD apabila pencucian belum sepenuhnya menghilangkan residu organik atau aktivator. Karena tidak ada kontrol blanko adsorben dan tidak tersedia replikasi, mekanisme tersebut harus diperlakukan sebagai hipotesis yang konsisten dengan pola data, bukan bukti langsung.

Waktu 60 menit umumnya menghasilkan COD lebih rendah daripada 40 menit pada massa yang sama. Hal ini terlihat pada seluruh pasangan perlakuan, walaupun besar peningkatannya bervariasi. Waktu tambahan memungkinkan adsorbat menembus pori dan menempati situs yang lebih sulit diakses. Pada tahap awal, adsorpsi terjadi cepat pada permukaan eksternal; selanjutnya laju dikendalikan oleh difusi film dan difusi intrapartikel. Data hanya memiliki dua titik waktu sehingga model kinetika pseudo-orde pertama, pseudo-orde kedua, atau difusi intrapartikel belum dapat diterapkan secara sah. Titik 60 menit juga belum dapat dipastikan sebagai kesetimbangan tanpa pengukuran lebih panjang.

Pola TSS lebih konsisten terhadap penambahan massa. Konsentrasi umumnya menurun sampai 10 g karena lebih banyak permukaan dan media padat tersedia untuk menangkap partikel. Penyisihan TSS dalam percobaan ini kemungkinan bukan adsorpsi molekuler murni. Karbon berukuran 100 mesh dapat bertindak sebagai media intersepsi, mengikat flok halus, meningkatkan aglomerasi, dan membantu pemisahan pada tahap filtrasi. Oleh karena itu, istilah “penyisihan” lebih tepat daripada menganggap seluruh TSS teradsorpsi ke dalam mikropori. Mekanisme ini menjelaskan mengapa TSS membutuhkan dosis lebih tinggi daripada COD dan mengapa perbedaan aktivator relatif kecil.

Karakter TSS sebagai partikel juga menimbulkan potensi bias bila sampel tidak dihomogenkan dengan cara yang sama sebelum pengambilan. Partikel dapat mengendap selama penanganan, menempel pada dinding wadah, atau tertahan bersama karbon pada kertas saring. Karena tahap akhir percobaan memang menggunakan filtrasi, konsentrasi TSS yang rendah merupakan hasil gabungan kontak dengan karbon dan pemisahan padat-cair. Untuk membedakan kontribusi adsorben, penelitian berikutnya memerlukan kontrol filtrasi tanpa karbon dan pengukuran kekeruhan atau distribusi ukuran partikel sebelum serta sesudah kontak.

Pengaruh waktu pada TSS tidak seragam. Untuk KOH, 60 menit umumnya lebih baik daripada 40 menit. Pada H_3PO_4 , beberapa dosis justru menghasilkan TSS sedikit lebih tinggi setelah 60 menit, misalnya 35,6 dibanding 34,8 mg/L pada 2 g dan 24,0 dibanding 23,6 mg/L pada 10 g. Selisih kecil ini dapat berasal dari variasi filtrasi, pecahnya agregat selama pengadukan lebih lama, atau ketidakpastian pengukuran. Tanpa pengulangan dan simpangan baku, perbedaan kurang dari satu miligram per liter tidak boleh ditafsirkan sebagai efek proses yang pasti.

Analisis kepatuhan memberi gambaran operasional yang lebih tajam. Seluruh konsentrasi COD akhir berada di bawah 100 mg/L, bahkan pada kondisi terendah efisiensinya masih 75,51%. Namun, tidak seluruh kondisi TSS memenuhi 30 mg/L. Pada H_3PO_4 , dosis 2 g pada kedua waktu masih di atas batas; dosis 4 g atau lebih sudah memenuhi. Pada KOH, dosis 2 g pada kedua waktu dan dosis 4 g selama 40 menit belum memenuhi; dosis 4 g selama 60 menit serta dosis 6 g atau lebih memenuhi. Koreksi pembacaan ini penting karena kesimpulan berbasis efisiensi saja dapat menutupi fakta bahwa suatu kondisi masih melewati batas konsentrasi.

Persentase penyisihan perlu dilengkapi dengan beban penyisihan per gram. KOH 4 g selama 60 menit mencapai efisiensi COD tertinggi 93,88% dan beban sekitar 23,0 mg/g. Namun, KOH 2 g selama 60 menit memiliki efisiensi sedikit lebih rendah, 89,80%, tetapi beban sekitar 44,0 mg/g.

Artinya, adsorben pada dosis rendah digunakan lebih intensif. Pemilihan kondisi industri bergantung pada tujuan: bila target utama adalah konsentrasi akhir terendah, 4 g lebih tepat; bila target utama adalah efisiensi material dan biaya, dosis yang lebih rendah patut diuji bersama unit pengolahan lanjutan.

Perbandingan konsentrasi akhir dan beban per gram memperlihatkan adanya pertukaran antara kualitas efluen dan efisiensi material. Dosis tinggi menyediakan lebih banyak situs sehingga konsentrasi akhir dapat ditekan, tetapi sebagian besar situs mungkin tidak terisi karena jumlah adsorbat terbatas. Akibatnya, beban yang ditangkap per gram menurun. Dosis rendah menggunakan setiap gram lebih intensif, tetapi mungkin belum mencapai target efluen. Dalam perancangan, titik operasi ideal berada pada dosis minimum yang tetap memenuhi baku mutu dengan faktor keamanan yang cukup. Penentuan titik tersebut memerlukan pengulangan, analisis biaya, dan pengujian pada variasi konsentrasi limbah karena komposisi air buangan laundry berubah antarhari.

Data mendukung kesimpulan bahwa massa dan waktu harus dioptimalkan bersama, bukan dinaikkan tanpa batas. Untuk COD terdapat optimum internal pada 4–6 g, sedangkan TSS terus membaik hingga dosis tertinggi. Perbedaan tersebut mencerminkan sifat pencemar: COD didominasi komponen terlarut dan koloid yang sensitif terhadap kimia permukaan, sementara TSS lebih dipengaruhi jumlah media dan pemisahan fisik. Rancangan proses yang hanya memakai satu dosis untuk kedua parameter berpotensi tidak ekonomis. Unit bertahap, misalnya penyisihan padatan awal diikuti adsorpsi karbon, dapat mengurangi kebutuhan karbon aktif.

Perbandingan kinerja aktivator, implikasi, dan keterbatasan penelitian

Rumusan masalah ketiga dijawab melalui perbandingan kondisi optimum. KOH memberikan COD terendah 24 mg/L pada 4 g dan 60 menit, sedangkan H_3PO_4 menghasilkan 32 mg/L pada 6 g dan 60 menit. Selisih efisiensi maksimum hanya 2,04 poin persentase, tetapi KOH menggunakan massa sepertiga lebih rendah. Dalam konteks pengolahan COD, KOH lebih efisien pada kondisi uji. Untuk TSS, perbedaannya sangat kecil: KOH 84,59% dan H_3PO_4 84,05%. Karena tidak ada analisis statistik, kinerja TSS sebaiknya disebut hampir setara, bukan berbeda signifikan.

Hasil COD tampak berlawanan dengan daya serap iodine, karena H_3PO_4 memiliki nilai iodine lebih tinggi tetapi KOH menghasilkan penyisihan COD terbaik. Ketidakejajaran ini merupakan temuan penting. Iodine merupakan molekul kecil dan pengujiannya berlangsung dalam larutan terkontrol, sedangkan COD limbah laundry berasal dari campuran surfaktan, bahan organik, dan koloid dengan ukuran serta sifat kimia berbeda. Adsorpsi campuran dipengaruhi kompetisi antarmolekul, muatan permukaan, pH, dan distribusi mesopori. Adsorben KOH mungkin menyediakan kombinasi pori dan gugus permukaan yang lebih cocok bagi komponen dominan COD, walaupun kapasitas terhadap iodine lebih rendah.

Pita P–O pada H_3PO_4 dapat meningkatkan afinitas terhadap spesies tertentu, tetapi juga membuat permukaan lebih polar. Surfaktan dalam limbah dapat memiliki kepala hidrofilik dan ekor hidrofobik; mekanisme penjerapannya melibatkan interaksi elektrostatis, hidrogen, dispersi, dan asosiasi hidrofobik. Tanpa data pH titik muatan nol, potensial zeta, dan identifikasi surfaktan, kontribusi masing-masing interaksi belum dapat dibedakan. Oleh karena itu, penjelasan terbaik adalah bahwa aktivator mengubah pori dan kimia permukaan secara berbeda, kemudian komposisi limbah menentukan permukaan mana yang paling efektif.

Aspek keselamatan dan mutu efluen sekunder juga perlu diperhatikan. Residu H_3PO_4 dapat meningkatkan fosfat dan mendorong eutrofikasi bila pencucian tidak memadai, sedangkan residu KOH dapat meningkatkan alkalinitas dan kandungan kalium. Nilai pH netral setelah pencucian belum membuktikan bahwa ion sisa telah hilang, karena larutan dapat netral namun masih memiliki konduktivitas tinggi. Pengukuran fosfat, kalium, konduktivitas, dan total padatan terlarut pada air pencuci diperlukan untuk memastikan bahwa pembuatan adsorben tidak memindahkan pencemaran dari limbah laundry ke aliran pencucian karbon.

Dari sudut rekayasa, KOH menarik karena mencapai target COD pada dosis lebih rendah. Pengurangan dosis berarti volume adsorben, kebutuhan filtrasi, dan jumlah limbah padat pascapengolahan dapat ditekan. H_3PO_4 memiliki keunggulan mutu material serta daya serap iodine, dan dapat menjadi pilihan bila target adsorbat berbeda. Perbandingan biaya tidak dapat disimpulkan hanya dari massa adsorben karena harus memasukkan harga aktivator, kebutuhan air pencuci, korosivitas,

pemulihan bahan kimia, rendemen karbon, dan umur pakai. Pencucian hingga netral juga menghasilkan aliran limbah yang mengandung fosfat atau kalium dan memerlukan pengelolaan.

Untuk usaha laundry skala kecil, adsorben dapat ditempatkan sebagai tahap pemolesan setelah pengendapan atau filtrasi awal. Konfigurasi tersebut mengurangi beban padatan yang masuk ke karbon, mempertahankan pori lebih lama, dan memungkinkan dosis difokuskan pada senyawa penyumbang COD. Pada skala yang lebih besar, kolom alir kontinu lebih relevan daripada sistem batch. Data waktu tembus, tinggi lapisan, laju alir, dan regenerasi diperlukan untuk menerjemahkan hasil laboratorium ke desain kolom. Oleh karena itu, kondisi 4 g KOH atau 6 g H₃PO₄ dalam 250 mL tidak dapat langsung dikalikan secara linear tanpa mempertimbangkan perpindahan massa dan hidrodinamika.

Pemanfaatan ampas kopi memberikan keuntungan lingkungan potensial, tetapi klaim keberlanjutan membutuhkan neraca bahan dan energi. Pengeringan ampas kopi yang berkadar air tinggi dan karbonisasi 600 °C memerlukan energi. Jika energi berasal dari bahan bakar fosil dan adsorben hanya digunakan sekali, manfaat pengalihan limbah dapat berkurang. Pengembangan berikutnya perlu mengukur rendemen karbon, konsumsi energi per kilogram adsorben, kebutuhan air pencuci, serta kemampuan regenerasi. Residu karbon jenuh harus diuji karakteristiknya sebelum dibuang atau dimanfaatkan kembali.

Penelitian ini mempunyai keterbatasan mendasar. Pertama, tidak dilaporkan pengulangan, sehingga variabilitas dan signifikansi statistik tidak diketahui. Kedua, karakterisasi belum mencakup BET, distribusi pori, SEM, pH titik muatan nol, dan komposisi unsur. Ketiga, tidak ada kontrol arang tanpa aktivator, blanko tanpa adsorben, atau blanko adsorben dalam air murni. Keempat, pH limbah saat adsorpsi tidak dilaporkan, padahal pH memengaruhi muatan permukaan dan spesiasi surfaktan. Kelima, COD dan TSS adalah parameter agregat; komponen spesifik seperti surfaktan, fosfat, BOD, warna, dan toksisitas tidak dianalisis.

Keterbatasan lain adalah penggunaan satu konsentrasi aktivator dan dua waktu kontak. Hasil hanya menunjukkan perbandingan pada H₃PO₄ 1 M dan KOH 1 M, bukan perbandingan optimum masing-masing aktivator. Waktu 40 dan 60 menit belum cukup untuk membangun kinetika, sedangkan tidak adanya variasi konsentrasi awal mencegah penyusunan isotherm Langmuir atau Freundlich. Kapasitas adsorpsi maksimum tidak dapat ditentukan dari persentase penurunan pada satu sampel limbah. Karena itu, istilah “kapasitas” sebaiknya dibatasi pada beban penyisihan semu yang dihitung dari kondisi percobaan.

Penelitian lanjutan perlu menggunakan desain faktorial dengan sekurang-kurangnya tiga pengulangan, menguji konsentrasi aktivator, rasio impregnasi, suhu atau pemanasan pascaimpregnasi, dosis, waktu, dan pH. Analisis varians atau *response surface methodology* dapat mengidentifikasi interaksi serta optimum prediktif. Karakterisasi BET dan SEM-EDS perlu dihubungkan dengan pH_{pzc} dan spektrum FTIR. Uji adsorpsi sebaiknya mencakup kinetika, isotherm, regenerasi, dan beberapa siklus pemakaian. Pada limbah laundry, pengukuran surfaktan anionik, fosfat, BOD, serta toksisitas akan memperlihatkan apakah penurunan COD benar-benar diikuti penurunan risiko lingkungan.

Secara keseluruhan, kedua adsorben layak sebagai material uji pengolahan limbah laundry. H₃PO₄ unggul pada mutu karakterisasi, KOH unggul pada efisiensi dan kebutuhan dosis untuk COD, sedangkan keduanya hampir setara terhadap TSS. Temuan tersebut menolak pendekatan satu indikator dalam memilih adsorben. Pilihan material terbaik harus mempertimbangkan pencemar target, konsentrasi akhir, massa yang dibutuhkan, kapasitas per gram, kebutuhan bahan kimia, dan pengelolaan residu. Kerangka ini memberikan dasar lebih kuat untuk meningkatkan penelitian dari pembuktian laboratorium menuju desain proses yang efisien dan dapat dipertanggungjawabkan.

KESIMPULAN

Karbon aktif ampas kopi hasil perlakuan H₃PO₄ dan KOH memenuhi parameter kadar air, kadar abu, dan daya serap iodine pada SNI 06-3730-1995. H₃PO₄ menghasilkan mutu karakterisasi lebih baik dengan kadar air 3,48%, kadar abu 1,38%, daya serap iodine 1.078,7 mg/g, dan pita P–O/C–O pada 1.043 cm⁻¹. KOH menghasilkan COD terendah 24 mg/L atau efisiensi 93,88% pada 4 g selama 60 menit, sedangkan H₃PO₄ mencapai 91,84% pada 6 g. Untuk TSS, hasil terbaik kedua adsorben hampir setara, yaitu 84,05% untuk H₃PO₄ dan 84,59% untuk KOH pada 10 g. Massa dan waktu kontak tidak menunjukkan pola yang sama untuk COD dan TSS: COD memiliki dosis

optimum internal, sedangkan TSS cenderung membaik dengan penambahan massa. Daya serap iodine yang lebih tinggi tidak otomatis memberikan penurunan COD tertinggi, sehingga seleksi adsorben harus menggabungkan karakteristik permukaan, konsentrasi akhir, dan efisiensi penggunaan massa. Hasil mendukung pemanfaatan ampas kopi sebagai adsorben, tetapi konfirmasi statistik, karakterisasi pori, optimasi pH, uji regenerasi, dan neraca proses masih diperlukan sebelum penerapan skala lapangan.

UCAPAN TERIMA KASIH / SPONSORSHIP

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Jurusan Teknik Kimia Politeknik Negeri Sriwijaya serta laboratorium pengujian yang mendukung pelaksanaan penelitian dan karakterisasi sampel.

REFERENSI

- Ahmed, M. J., Islam, M. A., & Asif, M. (2024). Coffee grounds as a precursor for activated carbon: Preparation, characterization, and applications. *Bioresource Technology Reports*, 25, 101718.
- Azhari, H., Rifa'i, A., & Hidayah, N. (2020). Pembuatan karbon aktif dari limbah biomassa sebagai adsorben untuk pengolahan air limbah. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 21(2), 123–130.
- Badan Pusat Statistik. (2024). *Statistik Kopi Indonesia 2024*. Jakarta: BPS.
- Bhatnagar, A., Sillanpää, M., & Witek-Krowiak, A. (2021). Biomass-based activated carbon for wastewater treatment: A review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 7, 100118.
- Chen, W., Gong, M., Li, K., Xia, M., Chen, Z., Xiao, H., Fang, Y., Chen, Y., Yang, H., & Chen, H. (2022). Insight into KOH activation mechanism during preparation of biomass-derived activated carbon. *Industrial Crops and Products*, 180, 114714.
- Destanti, M., Rahmawati, R., Sari, N., Annisa, F., & Fadlly, T. A. (2023). Adsorpsi zat organik limbah laundry menggunakan karbon aktif dari limbah kulit singkong. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 16(2), 145–153.
- Esterlita, M. O., & Herlina, N. (2015). Pengaruh penambahan aktivator $ZnCl_2$, KOH, dan H_3PO_4 dalam pembuatan karbon aktif dari pelepah aren. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 4(1), 47–52.
- Febrianti, C., Ulfah, M., & Kusumastuti. (2023). Pemanfaatan ampas kopi sebagai bahan karbon aktif untuk pengolahan air limbah industri batik. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 24(1), 67–75.
- International Union of Pure and Applied Chemistry. (1994). Recommendations for the characterization of porous solids. *Pure and Applied Chemistry*, 66(8), 1739–1758.
- Khotimah, N., Martin, A., & Taer, E. (2024). Pengaruh temperatur aktivasi terhadap daya serap iodine karbon aktif. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 13(1), 89–97.
- Kirani, R. D., & Ali, M. (2023). Ampas bubuk kopi sebagai karbon aktif untuk menurunkan COD dan TSS limbah cair industri tempe. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 29(2), 101–109.
- Lestari, D. Y., Rahmawati, A., & Prasetya, A. T. (2024). Pengaruh jenis aktivator asam dan basa terhadap karakteristik karbon aktif dari limbah biomassa. *Jurnal Kimia dan Kemasan*, 46(1), 21–30.
- Lowell, S., Shields, J. E., Thomas, M. A., & Thommes, M. (2004). *Characterization of Porous Solids and Powders: Surface Area, Pore Size and Density*. Dordrecht: Springer.
- Ma, X., Li, M., Chen, X., & Wang, Y. (2024). KOH activation mechanism of biomass-derived carbon and its applications: A review. *Journal of Energy Storage*, 78, 110021.
- Macías-García, A., Díaz-Díez, M. A., Cuerda-Correa, E. M., Olivares-Marín, M., & Gañán-Gómez, J. (2017). Preparation and characterization of activated carbons from lignocellulosic materials by chemical activation. *Applied Surface Science*, 427, 930–938.
- Marsh, H., & Rodríguez-Reinoso, F. (2006). *Activated Carbon*. Oxford: Elsevier.
- McNutt, J., & He, Q. (2019). Spent coffee grounds: A review on current utilization. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 71, 78–88.
- Mulyani, W., Mulyono, S., & Ayomi, A. C. (2021). Pemanfaatan karbon aktif kayu besi untuk mengurangi TSS, COD, dan fosfat limbah laundry. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 14(3), 187–195.

- R.A. Amanda Luthfia Sari¹, Linda Ekawati², Muhammad Yerizam³/ JPFS 9 (2) (2026) 235-247
- Mulyani, W., Sari, R. P., & Dewi, N. K. (2024). Pemanfaatan ampas kopi sebagai bahan baku alternatif karbon aktif. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*, 35(1), 58–67.
- Nabilla, L. E., & Rusmini. (2019). Pengaruh waktu kontak karbon aktif kulit durian terhadap COD, BOD, dan TSS limbah cair industri tahu. *CHEMICA: Jurnal Teknik Kimia*, 6(2), 47–54.
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2025 tentang Baku Mutu Air Limbah dan Standar Teknologi Pengolahan Air Limbah untuk Air Limbah Domestik.
- Pungut, P., Wardhani, E., & Wulandari, T. (2021). Optimasi dosis karbon aktif dalam pengolahan limbah cair industri tekstil. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 27(1), 33–42.
- Putri, A. R., Sari, D. K., & Hidayat, T. (2021). Karakteristik dan potensi pencemaran limbah cair laundry di kawasan permukiman padat. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 20(2), 134–141.
- Reffas, A., Bernardet, V., David, B., Reinert, L., Bencheikh-Lehocine, M., Dubois, M., Batisse, N., & Duclaux, L. (2010). Carbons prepared from coffee grounds by H₃PO₄ activation: Characterization and adsorption of methylene blue and Nylosan Red N-2RBL. *Journal of Hazardous Materials*, 175, 779–788. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.076>
- Reza, M. S., Yun, C. S., Afroze, S., Radenahmad, N., Abu Bakar, M. S., Saidur, R., Tawweekun, J., & Azad, A. K. (2020). Preparation of activated carbon from biomass and its applications in water and gas purification. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*, 27(1), 208–238.
- Rizki, F., & Ali, M. (2023). Karbon aktif ampas kopi robusta teraktivasi KOH: Karakterisasi dan aplikasi pengolahan limbah cair. *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*, 22(1), 15–24.
- Rodríguez-Reinoso, F., & Molina-Sabio, M. (1992). Activated carbons from lignocellulosic materials by chemical and physical activation: An overview. *Carbon*, 30(7), 1111–1118.
- Sari, D. K., Anwar, H., & Sumanjaya, E. (2025). Efektivitas karbon aktif eceng gondok dalam menurunkan COD dan deterjen limbah laundry. *Agroteknika*, 8(1), 153–164.
- Sari, R. K., Maharani, D. A., & Wulandari, F. (2022). Analisis surfaktan dan senyawa organik pada limbah cair usaha laundry. *Jurnal Sanitasi dan Lingkungan*, 3(2), 88–96.
- Standar Nasional Indonesia. (1995). SNI 06-3730-1995: Arang Aktif Teknis. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Tran, H. N., Lima, E. C., Juang, R. S., Bollinger, J. C., & Chao, H. P. (2021). Thermodynamic parameters of liquid-phase adsorption processes calculated from equilibrium constants: A comparison study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104968.