Karbon Aktif dan *Biochar* dari Limbah Padat Kelapa Sawit untuk Pengolahan Air: Analisis Bibliometrik

Listiana Ningrum[1*], Syaidah Fitri[2], Riska Annisa[3], Azizatul Lutfiah[4], Mohammad Wahyu Diansyah[5], Naufal Hafidh Mahdi Sujarwo Putra[6], Riyan Riyadlun Najih[7]
[1-7]Universitas Islam Negeri Sultan Aji Muhammad Idris Samarinda, Samarinda, Indonesia

Corresponding Author's e-mail : *ningrum@uinsi.ac.id*

ARMADA
JURNAL PENELITIAN MULTIDISIPLIN

e-ISSN: 2964-2981

ARMADA : Jurnal Penelitian Multidisiplin

https://ejournal.45mataram.ac.id/index.php/armada

Vol. 04, No. 10 Oktober, 2026

Page: 6797-6807

DOI:

https://doi.org/10.55681/armada.v4i10.4698

Article History:

Received: Agustus 05, 2026

Revised: September 27, 2026

Accepted: Oktober 19, 2026

Abstract *: Solid oil palm waste is a promising low-cost precursor of activated carbon for water treatment. This study maps the growth, key contributors, influential works, and thematic structure of research on carbon materials derived from solid oil palm waste for water treatment. Data were retrieved from Scopus for 2017-2026. Of the 591 records initially retrieved, 87 articles were retained after formal filtering and title–abstract screening. Performance analysis was conducted with* Scopus Analyze Search Results*, and keyword mapping with VOSviewer 1.6.21. Overall, 56.3% of the articles were published in 2022-2026. Malaysia contributed to 52.9% of the articles and Indonesia to 27.6%. Eight of the ten most-cited articles tested dyes or heavy metals. The keyword map formed six clusters centred on adsorption, activated carbon, and palm kernel shell. Palm kernel shell was examined in 64.4% of the articles, whereas mesocarp fibre appeared in only 5.7%. Column systems, regeneration, and cost-effectiveness lay at the periphery of the map with low occurrence. The novelty of this study lies in quantifying the gap between laboratory testing and operational application. Future work should address real wastewater, column systems, regeneration, cost evaluation, and activator residue safety.*

Keywords *: Adsorption, Empty Fruit Bunch, Palm Kernel Shell, Regeneration, VOSviewer*

Abstrak : Limbah padat kelapa sawit berpotensi menjadi prekursor karbon aktif yang murah untuk pengolahan air. Penelitian ini bertujuan memetakan perkembangan publikasi, kontributor utama, artikel berpengaruh, dan struktur tema riset material karbon dari limbah padat kelapa sawit untuk pengolahan air. Data diperoleh dari Scopus untuk periode 2017-2026. Sebanyak 591 dokumen hasil pencarian disaring menjadi 87 artikel melalui kriteria formal serta penyaringan judul dan abstrak. Analisis kinerja menggunakan *Scopus Analyze Search Results*, sedangkan pemetaan kata kunci menggunakan VOSviewer 1.6.21. Sebanyak 56,3% artikel terbit pada 2022-2026. Malaysia terlibat dalam 52,9% artikel dan Indonesia dalam 27,6%. Delapan dari sepuluh artikel yang paling banyak dikutip menguji zat warna atau logam berat. Peta kata kunci membentuk enam klaster yang berpusat pada adsorpsi, karbon aktif, dan cangkang inti sawit. Cangkang inti sawit dibahas pada 64,4% artikel, sedangkan serat mesokarp hanya 5,7%. Sistem kolom, regenerasi, dan efektivitas biaya berada di pinggir peta dengan kemunculan rendah. Kebaruan penelitian terletak pada pengukuran kuantitatif jarak

antara uji laboratorium dan penerapan operasional. Penelitian lanjutan perlu menguji air limbah nyata, sistem kolom, regenerasi, evaluasi biaya, dan keamanan residu aktivator.

Kata Kunci : Adsorpsi, Cangkang Inti, Regenerasi, Tandan Kosong, VOSviewer

PENDAHULUAN

Ketersediaan air minum yang aman merupakan prasyarat bagi kesehatan masyarakat, kegiatan ekonomi, dan keberlanjutan ekosistem. Pada 2024, tiga dari empat penduduk dunia telah menggunakan layanan air minum yang dikelola secara aman. Namun, 2,1 miliar orang masih belum memperoleh layanan tersebut (World Health Organization dan United Nations Children's Fund, 2025). Di sisi lain, pertumbuhan penduduk dan industrialisasi terus menambah beban pencemar pada badan air. Zat warna, misalnya, tetap berdampak buruk bagi organisme akuatik meskipun hanya terdapat dalam jumlah renik (Somsiripan & Sangwichien, 2023). Adsorpsi merupakan salah satu dari dua pengolahan utama untuk dekontaminasi air, bersama biodegradasi. Proses ini mudah dioperasikan, rancangannya sederhana, efisiensinya tinggi, dan dapat diterapkan pada beragam pencemar (Crini dkk., 2019). Gugus fungsi oksigen pada permukaan karbon meningkatkan interaksi elektrostatik dengan logam berat dan zat warna kationi (Ibrahim dkk., 2021). Karbon aktif merupakan adsorben utama dalam pengolahan air limbah industri (Habeeb dkk., 2017). Kinerjanya ditentukan oleh struktur pori dan kimia permukaan, yang dipengaruhi jenis prekursor dan metode aktivasi (Bhatnagar dkk., 2013).

Penggunaan karbon aktif komersial secara luas masih terbatas karena biayanya tinggi dan regenerasinya mahal (Crini dkk., 2019). Prekursor karbon aktif komersial, seperti kokas minyak bumi dan batu bara, juga tidak terbarukan (Habeeb dkk., 2017). Kondisi ini mendorong pemanfaatan limbah pertanian yang melimpah dan terbarukan sebagai prekursor alternatif (Somsiripan & Sangwichien, 2023). Limbah padat kelapa sawit, yaitu cangkang inti sawit, tandan kosong, dan serat mesokarp, mengandung 43–47% karbon dengan kadar abu kurang dari 1% (Rashidi & Yusup, 2017). Indonesia telah melampaui Malaysia sebagai produsen minyak sawit terbesar dunia sejak 2007 (Awalludin dkk., 2015). Pertumbuhan industri ini menghasilkan limbah biomassa berlebih yang menyulitkan pembuangan dan menambah biaya operasional(Awalludin dkk., 2015). Konversi limbah tersebut menjadi karbon aktif sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular karena sekaligus memulihkan lingkungan dan menciptakan nilai ekonomi (Habeeb dkk., 2017). Penelitian terbaru menunjukkan perkembangan dari uji kapasitas sederhana menuju matriks air nyata, sistem kontinu, dan evaluasi lingkungan. Aktivasi uap berbantuan gelombang mikro menghasilkan karbon aktif cangkang inti sawit dengan luas permukaan 539,75 m^2/g. Karbon tersebut menyerap Cd^{2+} sebesar 116,0 mg/g dan Pb^{2+} sebesar 59,9 mg/g dari lindi tempat pemrosesan akhir sampah (Kong dkk., 2022). Dalam kolom aliran tetap, karbon aktif cangkang inti sawit menyisihkan BOD_5 34 mg/g dan COD 56 mg/g dari *greywater* domestik (Oteng-Peprah dkk., 2023). Penilaian daur hidup menunjukkan bahwa rute aktivasi kimia menurunkan potensi pemanasan global 35,5% dibandingkan dengan rute fisik (Nuñez-Vargas dkk., 2026).

Di Indonesia, penggunaan air minum kemasan tumbuh pesat sejak 2000 (World Health Organization dan United Nations Children's Fund, 2025). Setiap produsen atau penyelenggara air minum wajib memastikan produknya memenuhi standar baku mutu kesehatan lingkungan tersebut mencakup unsur fisik, biologi, kimia, dan radioaktif. Peralatan depot air minum, termasuk filter, wajib berbahan tara pangan dan dilengkapi alat sterilisasi (Permenkes Nomor 2 Tahun 2023, 2023). Karena itu, karbon aktif berbahan limbah sawit perlu diuji residu aktivatornya sebelum dipakai sebagai media pengolahan air minum. Sejumlah kajian ulasan telah membahas adsorben nonkonvensional, modifikasi karbon aktif, dan produksi karbon aktif dari limbah sawit(Bhatnagar dkk., 2013; Crini dkk., 2019; Rashidi & Yusup, 2017). Penelitian Rashidi & Yusup (2017) mengulas teknologi aktivasi berdasarkan studi sejak 2011 untuk beragam aplikasi, mulai dari adsorpsi gas sampai superkapasitor. Kajian naratif tersebut belum memetakan pertumbuhan publikasi, kontributor, dan struktur tema secara kuantitatif. Tinjauan konvensional juga terbatas pada jumlah dokumen yang dapat dikaji dan rentan terhadap bias subjektivitas (Hashem E dkk., 2023). Analisis

bibliometrik dapat melengkapi tinjauan naratif melalui analisis kinerja publikasi dan pemetaan struktur konseptual(Donthu dkk., 2021). Kajian bibliometrik tentang material karbon dari biomassa mulai berkembang, tetapi umumnya berfokus pada aplikasi lain. Bintari & Setiawan (2026) memetakan 104 artikel tentang *biochar* sebagai pemodifikasi aspal, termasuk *biochar* dari serat mesokarp sawit. Belum ada pemetaan yang secara khusus menghubungkan limbah padat sawit, material karbon, dan pengolahan air pada periode 2017-2026.

Penelitian ini bertujuan memetakan perkembangan publikasi ilmiah, mengidentifikasi kontributor utama dan artikel yang berpengaruh, serta menganalisis struktur tema penelitian material karbon berbasis limbah padat kelapa sawit untuk pengolahan air selama periode 2017–2026. Kebaruan penelitian terletak pada penyaringan korpus publikasi berdasarkan relevansinya terhadap aplikasi pengolahan air serta pengukuran kuantitatif kesenjangan antara penelitian berskala laboratorium dan kebutuhan penerapan operasional. Secara khusus, penelitian ini menganalisis tren perkembangan publikasi serta produktivitas penulis, institusi, dan negara yang berkontribusi dalam bidang tersebut. Penelitian ini juga mengidentifikasi artikel yang memiliki pengaruh ilmiah tinggi, jenis material karbon dan polutan yang menjadi fokus kajian, struktur serta keterkaitan antartema penelitian, dan jenis limbah padat kelapa sawit yang paling dominan sebagai bahan baku. Selain itu, penelitian ini mengevaluasi sejauh mana aspek operasional, khususnya penggunaan sistem kolom, regenerasi adsorben, dan analisis biaya, memperoleh perhatian dalam perkembangan tema penelitian. Melalui pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat mengidentifikasi kecenderungan perkembangan ilmu pengetahuan, kesenjangan penelitian, dan peluang pengembangan teknologi material karbon yang lebih relevan dengan kebutuhan pengolahan air pada skala operasional. Temuan penelitian juga diharapkan menjadi dasar ilmiah bagi peneliti, praktisi, dan pemangku kebijakan dalam menentukan prioritas pengembangan karbon aktif berbasis limbah kelapa sawit yang efektif, aman, ekonomis, dan memiliki ketertelusuran bahan baku untuk mendukung penerapan teknologi pengolahan air berkelanjutan di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan metode analisis bibliometrik. Analisis bibliometrik terdiri atas analisis kinerja dan pemetaan sains (Donthu dkk., 2021). Pendekatan ini digunakan untuk memetakan tren publikasi dan jaringan kata kunci secara kuantitatif (Sihap dkk., 2026). Analisis kinerja mengukur kontribusi publikasi, penulis, institusi, negara, sumber, dan sitasi. Pemetaan sains menggambarkan struktur konseptual bidang melalui hubungan antarkata kunci. Data diperoleh dari basis data Scopus pada 9 Oktober 2026. Scopus dipilih karena memiliki cakupan publikasi internasional yang luas dan terstandar (Sihap dkk., 2026). Basis data ini juga menyediakan metadata judul, abstrak, kata kunci, afiliasi, negara, sumber, sitasi, dan bidang ilmu yang dapat diekspor. Format ekspor Scopus juga dapat dibaca langsung oleh VOSviewer. Metadata diekspor dalam format CSV dengan informasi sitasi, bibliografi, abstrak, dan kata kunci. Pencarian menggunakan kombinasi istilah bahan baku, karbon aktif, dan pengolahan air sebagai berikut: *TITLE-ABS-KEY ("palm kernel shell*" OR "oil palm shell*" OR "empty fruit bunch*" OR "oil palm empty fruit bunch*" OR "mesocarp fiber*" OR "oil palm fiber*") AND ("activated carbon" OR "activated charcoal") AND ("water treatment" OR "wastewater treatment" OR "water purification" OR "wastewater purification").* Penyaringan berdasarkan tahun, jenis dokumen, jenis sumber, tahap publikasi, akses terbuka, dan bahasa, lalu seleksi manual judul dan abstrak (Sihap dkk., 2026). Kriteria seleksi disajikan pada Tabel 1.

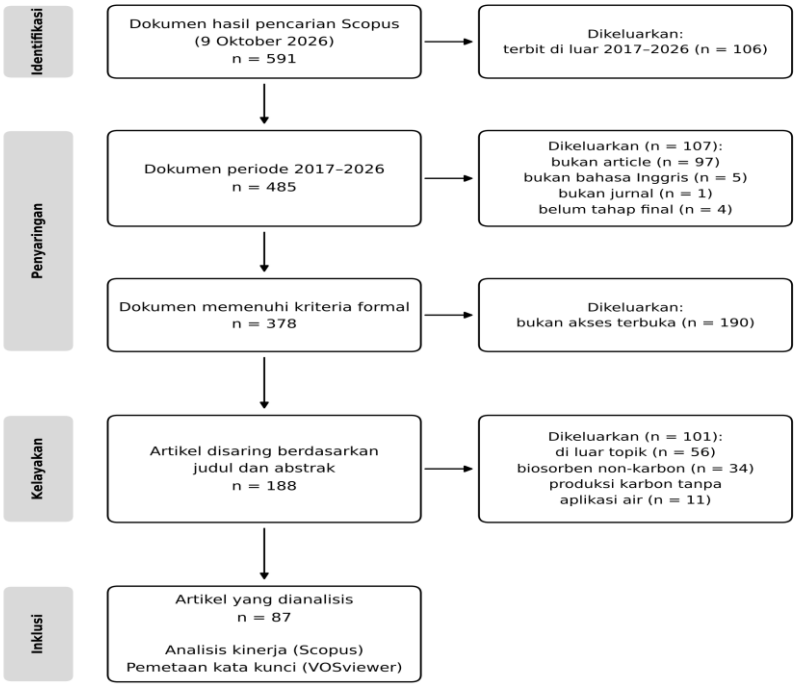
Tabel 1. Kriteria inklusi

Kriteria	Inklusi
Tahun terbit	2017-2026
Jenis dokumen	*Article*
Jenis sumber	Jurnal
Bahasa	Inggris
Tahap publikasi	*Final*
Akses	*All Open Access*

Sumber: Data Scopus (2026), diolah penulis

Pencarian awal menghasilkan 591 dokumen. Pembatasan tahun menyisakan 485 dokumen. Pembatasan jenis dokumen, bahasa, sumber, dan tahap publikasi menyisakan 378 dokumen. Pembatasan akses terbuka menghasilkan 188 artikel. Penyaringan judul dan abstrak mengeluarkan 101 artikel sehingga korpus akhir berjumlah 87 artikel (Gambar 1).

Gambar 1. Alur seleksi dokumen



Sumber: Data Scopus (2026), diolah penulis

Penyaringan judul dan abstrak mengeluarkan 56 artikel di luar topik, 34 artikel biosorben nonkarbon, dan 11 artikel produksi karbon tanpa aplikasi air. Penyaringan dilakukan dalam dua putaran dengan aturan yang sama untuk menjaga konsistensi keputusan. Artikel di luar topik mencakup energi, adsorpsi gas, material konstruksi, remediasi tanah, dan limbah selain kelapa sawit. Kata kunci kemudian dibersihkan menggunakan *thesaurus* VOSviewer berisi 151 baris. Analisis kinerja menggunakan fitur *Analyze search results* pada Scopus. Indikatornya meliputi jumlah publikasi tahunan, penulis, institusi, negara, sumber, bidang ilmu, dan jumlah sitasi. Seluruh angka dari Scopus dicocokkan ulang dengan berkas CSV untuk memastikan konsistensi data. Pemetaan sains menggunakan VOSviewer versi 1.6.21(Sihap dkk., 2026; van & Waltman, 2010). Unit analisisnya adalah *all keywords* dengan analisis *co-occurrence* dan metode *full counting*. Ambang minimum tiga kemunculan menghasilkan 52 dari 750 kata kunci. Hasil pemetaan dibaca melalui *network* dan *density visualization*. Ukuran *node* menunjukkan frekuensi kemunculan, garis menunjukkan kemunculan bersama, dan jarak menunjukkan kedekatan hubungan. Warna menunjukkan klaster pada *network* dan kepadatan pada *density*. Ukuran dan warna *node* tidak digunakan sebagai indikator kualitas penelitian. Penyaringan judul dan abstrak juga melibatkan pertimbangan peneliti sehingga keputusan seleksi dilaporkan sebagai materi pelengkap.

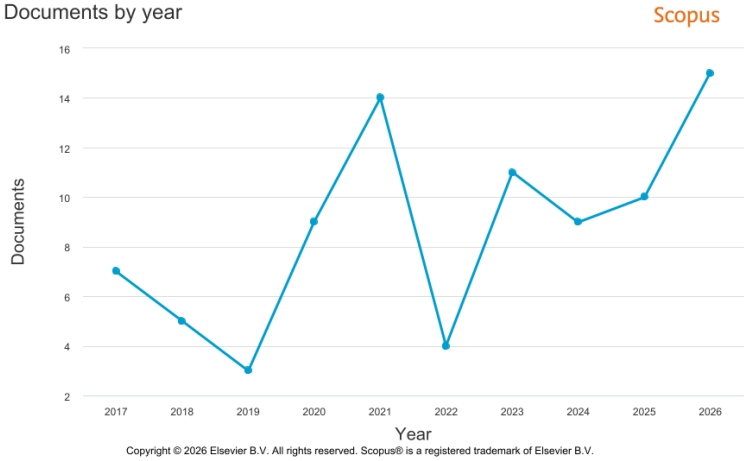
HASIL DAN PEMBAHASAN

Perkembangan Publikasi

Korpus terdiri atas 87 artikel yang terbit pada 2017–2026, dengan rata-rata 8,7 artikel per tahun. Sebanyak 51 artikel (58,6%) membahas karbon aktif, sedangkan 36 artikel (41,4%) membahas material karbon lain, seperti *biochar* dan *hydrochar*. *Biochar* umumnya memiliki luas permukaan lebih rendah daripada karbon aktif sehingga kinerjanya sering ditingkatkan melalui aktivasi atau fungsionalisasi permukaan (Ibrahim dkk., 2021). Publikasi turun dari tujuh artikel

pada 2017 menjadi tiga artikel pada 2019. Jumlahnya naik menjadi 14 artikel pada 2021, turun menjadi empat artikel pada 2022, lalu naik lagi sampai 15 artikel pada 2026 (Gambar 2).

Gambar 2. Perkembangan jumlah publikasi 2017–2026



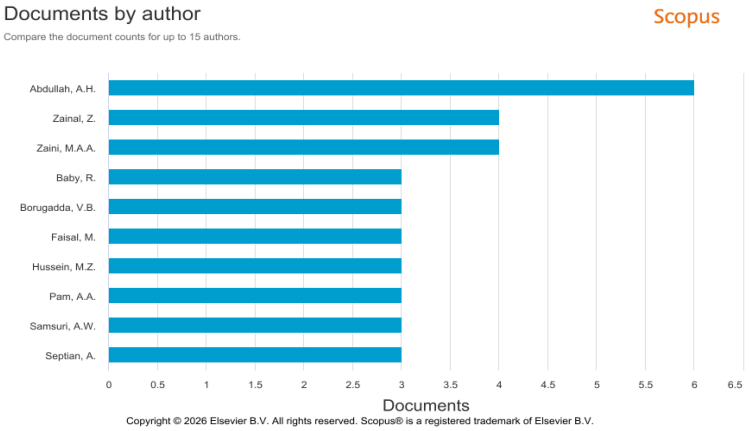
Sumber: Fitur *Analyze search results* Scopus (2026)

Periode 2022-2026 menghasilkan 49 artikel atau 56,3% korpus, lebih banyak daripada 38 artikel pada 2017-2021. Pola ini menunjukkan minat yang menguat, tetapi pertumbuhannya tidak linear. Jumlah tahunan dalam korpus kecil peka terhadap beberapa artikel saja sehingga penurunan pada 2022 belum cukup dibaca sebagai turunnya minat. Data 2026 juga belum final karena baru mencakup publikasi sampai 9 Oktober 2026. Kajian Rashidi & Yusup (2017) mencakup studi sejak 2011 dan menempatkan pengolahan air sebagai salah satu dari banyak aplikasi karbon aktif sawit. Korpus ini menunjukkan bahwa aplikasi air terus menghasilkan publikasi setelah periode kajian tersebut. Implikasinya, pengolahan air layak diperlakukan sebagai bidang aplikasi tersendiri dalam riset karbon dari limbah sawit.

Penulis, Institusi, Negara, Sumber, dan Sitasi

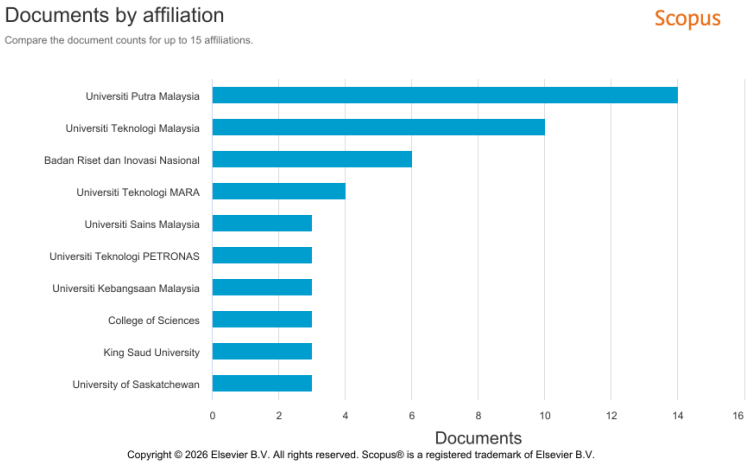
Abdullah, A.H. merupakan penulis paling produktif dengan enam artikel, diikuti Zainal, Z. dan Zaini, M.A.A. dengan masing-masing empat artikel. Tujuh penulis lain masing-masing menghasilkan tiga artikel (Gambar 3). Universiti Putra Malaysia menjadi institusi paling produktif dengan 14 artikel, diikuti Universiti Teknologi Malaysia (10 artikel) dan Badan Riset dan Inovasi Nasional (6 artikel) (Gambar 4). Pada tingkat negara, Malaysia terlibat dalam 46 artikel (52,9%), Indonesia 24 artikel (27,6%), dan Nigeria 10 artikel (Gambar 5).

Gambar 3. Penulis paling produktif



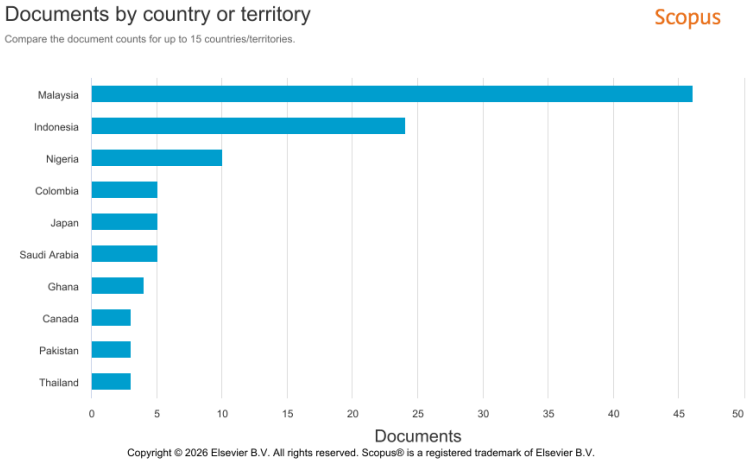
Sumber: Fitur *Analyze search results* Scopus (2026)

Gambar 4. Institusi paling produktif



Sumber: Fitur *Analyze search results* Scopus (2026)

Gambar 5. Negara paling produktif



Sumber: Fitur *Analyze search results* Scopus (2026)

Selisih produktivitas penulis kecil sehingga bidang ini tidak bergantung pada satu penulis. Namun, beberapa penulis teratas bekerja dalam kelompok yang sama. Baby, Hussein, Zainal, dan Abdullah, misalnya, menulis bersama studi bioadsorben cangkang inti sawit untuk air tercemar logam berat (Baby dkk., 2023). Hitungan negara bersifat noneksklusif karena satu artikel dapat melibatkan lebih dari satu negara. Dominasi Malaysia sejalan dengan tekanan pengelolaan limbah di negara tersebut. Industri sawit Malaysia menghasilkan limbah biomassa berlebih, sedangkan pembakaran terbuka residu dibatasi regulasi lingkungan (Awalludin dkk., 2015; Rashidi & Yusup, 2017). Malaysia mempublikasikan riset sebanyak 46 artikel, sedangkan Indonesia mempublikasikan riset sebanyak 24 artikel. Posisi BRIN di tiga besar institusi menunjukkan kapasitas riset Indonesia yang berkembang di bidang ini. Sepuluh artikel yang paling banyak dikutip disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Sepuluh artikel yang paling banyak dikutip

No	Artikel	Material dan aplikasi	Sitasi
1	Baloo dkk. (2021)	Karbon aktif tandan kosong dan serat mesokarp; zat warna	158
2	Fahmi dkk. (2018)	*Biochar* tandan kosong; timbal	138
3	Kyi dkk. (2020)	*Biochar* cangkang inti sawit; *crystal violet*	116
4	García dkk. (2018)	Karbon aktif cangkang inti sawit ($ZnCl_2$); metilen biru	92

No	Artikel	Material dan aplikasi	Sitasi
5	Anyika dkk. (2017)	Karbon aktif magnetik cangkang inti sawit; logam berat	91
6	Jabar & Odusote (2020)	*Biochar* teraktivasi serat tandan kosong; zat warna reaktif	73
7	Kimbi Yaah dkk. (2021)	*Hydrochar* cangkang inti sawit; diklofenak	70
8	Habeeb dkk. (2017)	Karbon aktif cangkang inti sawit termodifikasi; H_2S dalam air limbah	68
9	Somsiripan & Sangwichien (2023)	Karbon aktif tandan kosong (KOH); tiga zat warna	61
10	Ibrahim dkk. (2021)	Fungsionalisasi *biochar* tandan kosong; metilen biru	61

Sumber: Data Scopus (2026), diolah penulis

Delapan dari sepuluh artikel teratas menguji zat warna atau logam berat dalam larutan berair. Artinya, pengaruh terbesar di bidang ini masih berasal dari studi kapasitas adsorpsi skala laboratorium. Polutan baru mulai masuk daftar teratas, misalnya diklofenak yang disisihkan 95% oleh *hydrochar* cangkang inti sawit teraktivasi (Kimbi Yaah dkk., 2021).

Distribusi Bidang Ilmu

Environmental Science merupakan bidang terbesar dengan 43 dokumen (49,4%), diikuti *Engineering* (28 dokumen; 32,2%) dan *Chemical Engineering* (27 dokumen; 31,0%). *Agricultural and Biological Sciences* hanya mencakup 9 dokumen (10,3%) (Tabel 3). Satu artikel dapat masuk lebih dari satu bidang sehingga jumlah persentase melebihi 100%.

Tabel 3. Distribusi dokumen berdasarkan bidang ilmu

Bidang ilmu	Dokumen	% dari 87 artikel
Environmental Science	43	49,4
Engineering	28	32,2
Chemical Engineering	27	31,0
Chemistry	21	24,1
Materials Science	17	19,5
Agricultural and Biological Sciences	9	10,3
Energy	6	6,9
Biochemistry, Genetics and Molecular Biology	6	6,9

Sumber: Data Scopus (2026), diolah penulis

Komposisi ini menunjukkan sifat multidisipliner topik. *Environmental Science* berkaitan dengan pencemaran dan pengolahan air, sedangkan *Chemical Engineering* berkaitan dengan karbonisasi, aktivasi, dan perpindahan massa. *Chemistry* dan *Materials Science* berkaitan dengan kimia permukaan dan struktur pori, dua faktor penentu kinerja karbon aktif (Bhatnagar dkk., 2013). Porsi *Agricultural and Biological Sciences* yang kecil menunjukkan bahwa limbah sawit lebih sering diperlakukan sebagai prekursor material daripada bagian dari sistem agroindustri. Kolaborasi dengan peneliti agroindustri diperlukan untuk mengaitkan pasokan bahan baku dengan kebutuhan pengolahan air.

Struktur Konseptual Berdasarkan *Network Visualization*

Setelah *thesaurus* diterapkan, 52 kata kunci membentuk enam klaster. *Adsorption* menjadi *node* terbesar (54 kemunculan; *total link strength* atau TLS 339) dan terhubung dengan seluruh 51 *node* lain. *Activated carbon* (35 kemunculan; TLS 223) dan *palm kernel shell* (33 kemunculan; TLS 224) menyusul sebagai pusat jaringan (Tabel 4).

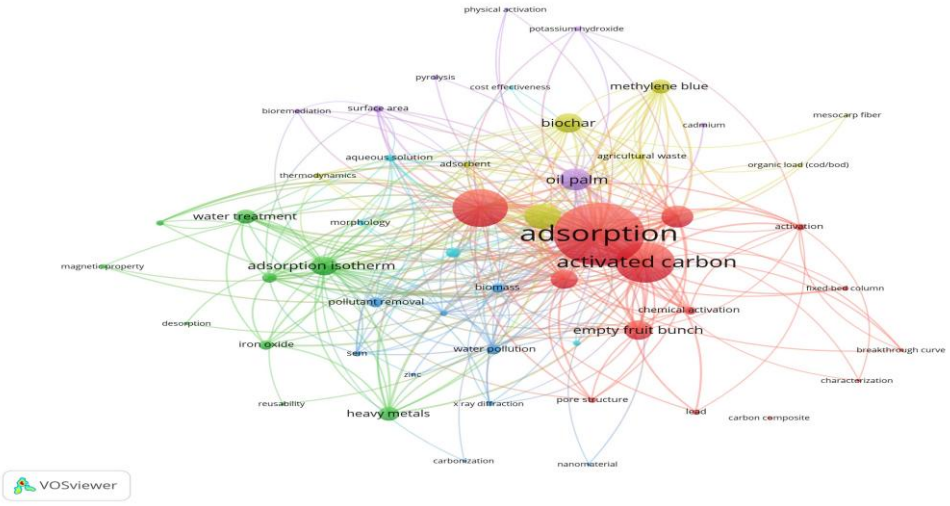
Tabel 4. Sepuluh kata kunci dengan kemunculan tertinggi

Kata kunci	Klaster	Kemunculan	TLS
adsorption	1 (merah)	54	339
activated carbon	1 (merah)	35	223
palm kernel shell	1 (merah)	33	224
wastewater treatment	4 (kuning)	22	171

Kata kunci	Klaster	Kemunculan	TLS
dye	1 (merah)	19	154
oil palm	5 (ungu)	19	143
biochar	4 (kuning)	17	102
empty fruit bunch	1 (merah)	17	96
kinetics	1 (merah)	16	132
adsorption isotherm	2 (hijau)	16	152

Sumber: Hasil analisis VOSviewer (2026), diolah penulis

Gambar 6. Network visualization



Sumber: Hasil analisis VOSviewer (2026), diolah penulis

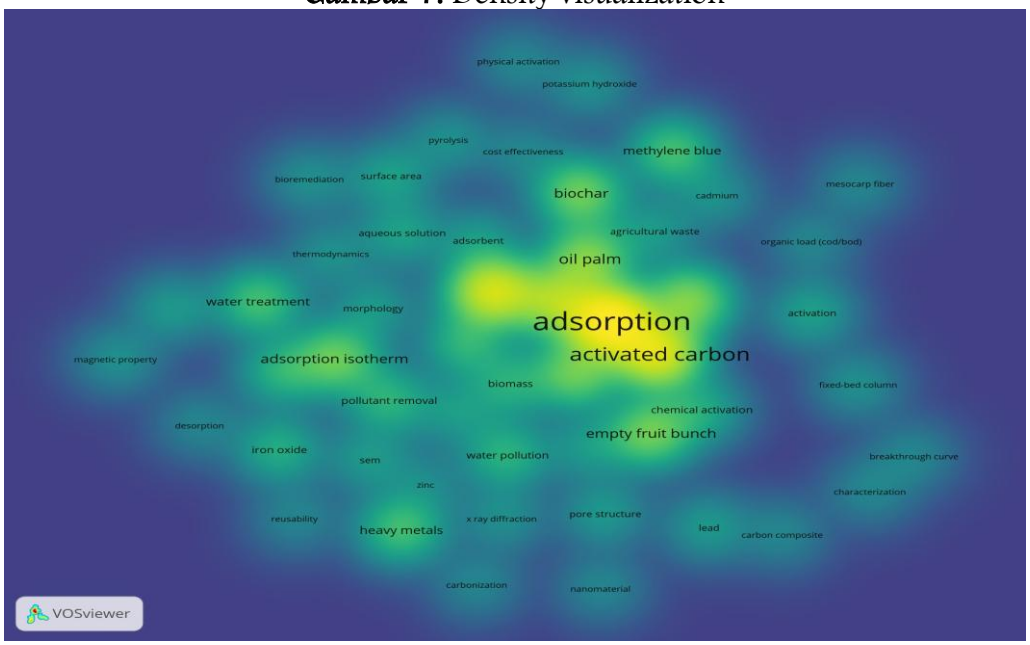
Klaster merah merupakan inti jaringan yang menyatukan karbon aktif, cangkang inti sawit, tandan kosong, aktivasi kimia, dan kinetika. Cangkang inti sawit dibahas pada 56 artikel (64,4%), tandan kosong pada 29 artikel (33,3%), dan serat mesokarp hanya pada 5 artikel (5,7%). Padahal, Rashidi & Yusup, (2017) menilai ketiga residu tersebut sama-sama layak dikonversi menjadi karbon berpori. Zubir dkk. (2026) juga mencatat bahwa tandan kosong masih kurang dimanfaatkan walaupun berpotensi besar sebagai prekursor karbon. Klaster hijau memuat adsorben magnetik untuk logam berat, yang memudahkan pemisahan adsorben setelah digunakan (Anyika dkk., 2017). Klaster kuning menghubungkan *biochar* dengan air limbah dan beban organik, misalnya *biochar* serat sawit untuk pemulihan nitrogen amonia (Ahmad dkk., 2024). Klaster ungu memuat rute konversi termal, sedangkan klaster biru dan biru muda memuat karakterisasi serta kapasitas adsorpsi. Pembagian ini sejalan dengan (Bhatnagar dkk., 2013) yang menempatkan kimia permukaan dan struktur pori sebagai penentu kinerja karbon aktif.

Fixed-bed column (4 kemunculan) dan *breakthrough curve* (3 kemunculan) masuk klaster merah, tetapi berada di tepi kanan peta. Keduanya hanya memiliki 15 dan 12 tautan, jauh di bawah *node* inti yang memiliki 47–51 tautan. Implikasinya, uji sistem kolom memang terkait dengan riset karbon aktif, tetapi belum menjadi bagian arus utama.

Kepadatan Tema Berdasarkan *Density Visualization*

Kepadatan tertinggi berada di sekitar *adsorption*, *activated carbon*, dan *palm kernel shell* (Gambar 7). Pusat sekunder terlihat pada *oil palm*, *biochar*, *empty fruit bunch*, *adsorption isotherm*, *wastewater treatment*, dan *heavy metals*. Wilayah pinggiran berisi istilah operasional, yaitu *fixed-bed column*, *breakthrough curve*, *reusability*, *desorption*, *cost effectiveness*, dan *organic load* (COD/BOD).

Gambar 7. Density visualization



Sumber: Hasil analisis VOSviewer (2026), diolah penulis

Pola ini menunjukkan bahwa literatur paling banyak membahas pembuatan material dan kemampuan adsorpsinya. Istilah yang berkaitan langsung dengan sistem kontinu, regenerasi, dan biaya masih jarang muncul. Biaya tinggi dan regenerasi yang mahal sudah lama disebut sebagai kendala karbon aktif (Crini dkk., 2019). Proses aktivasi juga menambah biaya karena membutuhkan suhu tinggi, bahan kimia pekat, dan peralatan khusus (Ibrahim dkk., 2021). Kendala yang sama belum menjadi fokus riset karbon dari limbah sawit. Dengan demikian, keunggulan biaya prekursor limbah sawit belum dibuktikan melalui evaluasi biaya dan regenerasi yang memadai.

KESIMPULAN DAN SARAN

Riset material karbon dari limbah padat kelapa sawit untuk pengolahan air menghasilkan 87 artikel pada 2017-2026, dengan 56,3% di antaranya terbit pada 2022-2026. Pertumbuhannya tidak linear, tetapi minat terhadap topik ini menguat pada periode terbaru. Malaysia terlibat dalam 52,9% artikel dan Indonesia dalam 27,6%, sedangkan Universiti Putra Malaysia menjadi institusi paling produktif. Delapan dari sepuluh artikel yang paling banyak dikutip menguji zat warna atau logam berat dalam larutan berair, dengan sitasi tertinggi 158. Struktur tema berpusat pada adsorpsi, karbon aktif, dan cangkang inti sawit. Cangkang inti sawit dibahas pada 64,4% artikel, tandan kosong pada 33,3%, dan serat mesokarp hanya pada 5,7%. Tema operasional berada di pinggir peta. *Fixed-bed column* dan *breakthrough curve* hanya muncul empat dan tiga kali, sedangkan *reusability*, *desorption*, dan *cost effectiveness* berada di wilayah berkepadatan rendah. Dengan demikian, riset di bidang ini masih didominasi uji kapasitas adsorpsi skala laboratorium.

Penelitian lanjutan perlu membandingkan karbon dari cangkang inti sawit, tandan kosong, dan serat mesokarp dengan rute aktivasi yang sama. Pengujian sebaiknya memakai air limbah nyata di samping larutan sintetis. Kinerja perlu diukur dalam kolom aliran tetap, termasuk kurva *breakthrough* dan jumlah siklus regenerasi. Evaluasi biaya dan daur hidup perlu menyertai uji kinerja sebelum material diuji pada skala pilot. Bagi Indonesia, residu aktivator dan mutu air hasil olahan perlu diuji terhadap standar air minum sebelum karbon dari limbah sawit dipakai sebagai media pengolahan air. Kajian bibliometrik berikutnya dapat memperluas sumber data ke basis data lain dan artikel berakses tertutup.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi dalam pelaksanaan penelitian ini. Apresiasi juga disampaikan kepada para peneliti dan institusi akademik yang publikasi ilmiahnya menjadi sumber data dalam analisis bibliometrik.

Dukungan tersebut berperan penting dalam penyusunan kajian mengenai perkembangan penelitian material karbon berbasis limbah padat kelapa sawit untuk pengolahan air serta identifikasi peluang pengembangan teknologi pengolahan air yang efektif dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmad, T., Sethupathi, S., Bashir, M. J. K., & Tan, S. Y. (2024). The role of oxidation on oil palm fiber biochar for ammoniacal nitrogen recovery from aquaculture wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, *60*, 105091. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105091

Anyika, C., Asri, N. A. M., Majid, Z. A., Yahya, A., & Jaafar, J. (2017). Synthesis and characterization of magnetic activated carbon developed from palm kernel shells. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, *2*(1), 16. https://doi.org/10.1007/s41204-017-0027-6

Awalludin, M. F., Sulaiman, O., Hashim, R., & Nadhari, W. N. A. W. (2015). An overview of the oil palm industry in Malaysia and its waste utilization through thermochemical conversion, specifically via liquefaction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *50*, 1469–1484. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.085

Baby, R., Hussein, M. Z., Zainal, Z., & Abdullah, A. H. (2023). Preparation of Functionalized Palm Kernel Shell Bio-adsorbent for the treatment of heavy metal-contaminated water. *Journal of Hazardous Materials Advances*, *10*, 100253. https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100253

Baloo, L., Isa, M. H., Sapari, N. B., Jagaba, A. H., Wei, L. J., Yavari, S., Razali, R., & Vasu, R. (2021). Adsorptive removal of methylene blue and acid orange 10 dyes from aqueous solutions using oil palm wastes-derived activated carbons. *Alexandria Engineering Journal*, *60*(6), 5611–5629. https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.04.044

Bhatnagar, A., Hogland, W., Marques, M., & Sillanpää, M. (2013). An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications. *Chemical Engineering Journal*, *219*, 499–511. https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.12.038

Bintari, L., & Setiawan, D. (2026). Research on biochar as a sustainable asphalt binder modifier: A systematic and bibliometric review. *Journal of Applied Engineering Science*, *24*(3), 473–495. https://doi.org/10.5937/jaes0-63855

Crini, G., Lichtfouse, E., Wilson, L. D., & Morin-Crini, N. (2019). Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, *17*(1), 195–213. https://doi.org/10.1007/s10311-018-0786-8

Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, *133*, 285–296. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070

Fahmi, A. H., Samsuri, A. W., Jol, H., & Singh, D. (2018). Physical modification of biochar to expose the inner pores and their functional groups to enhance lead adsorption. *RSC Advances*, *8*(67), 38270–38280. https://doi.org/10.1039/C8RA06867D

García, J. R., Sedran, U., Zaini, M. A. A., & Zakaria, Z. A. (2018). Preparation, characterization, and dye removal study of activated carbon prepared from palm kernel shell. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*(6), 5076–5085. https://doi.org/10.1007/s11356-017-8975-8

Habeeb, O. A., Ramesh, K., Ali, G. A. M., & Roslibin Mohd Yunus. (2017). Low-cost and eco-friendly activated carbon from modified palm kernel shell for hydrogen sulfide removal from wastewater: Adsorption and kinetic studies. *Desalination and Water Treatment*, *84*, 205–214. https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21196

Hashem E, A. R., Md Salleh, N. Z., Abdullah, M., Ali, A., Faisal, F., & Nor, R. M. (2023). Research trends, developments, and future perspectives in brand attitude: A bibliometric analysis utilizing the Scopus database (1944–2021). *Heliyon*, *9*(1), e12765. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12765

Ibrahim, I., Tsubota, T., Hassan, M. A., & Andou, Y. (2021). Surface Functionalization of Biochar from Oil Palm Empty Fruit Bunch through Hydrothermal Process. *Processes*, *9*(1), 149. https://doi.org/10.3390/pr9010149

Jabar, J. M., & Odusote, Y. A. (2020). Removal of cibacron blue 3G-A (CB) dye from aqueous solution using chemo-physically activated biochar from oil palm empty fruit bunch fiber.

Arabian Journal of Chemistry, *13*(5), 5417–5429. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.03.020

Kimbi Yaah, V. B., Zbair, M., Botelho De Oliveira, S., & Ojala, S. (2021). Hydrochar-derived adsorbent for the removal of diclofenac from aqueous solution. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, *6*(1), 3. https://doi.org/10.1007/s41204-020-00099-5

Kong, S. H., Chin, C. Y. J., Yek, P. N. Y., Wong, C. C., Wong, C. S., Cheong, K. Y., Liew, R. K., & Lam, S. S. (2022). Removal of heavy metals using activated carbon from microwave steam activation of palm kernel shell. *Environmental Advances*, *9*, 100272. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100272

Kyi, P. P., Quansah, J. O., Lee, C.-G., Moon, J.-K., & Park, S.-J. (2020). The Removal of Crystal Violet from Textile Wastewater Using Palm Kernel Shell-Derived Biochar. *Applied Sciences*, *10*(7), 2251. https://doi.org/10.3390/app10072251

Nuñez-Vargas, D., Barraza-Burgos, J., Díaz, L., Dalai, A. K., Borugadda, V. B., & Rodríguez Becerra, L. (2026). Comparative Life Cycle Assessment of Physical and Chemical Activation Routes for Oil Palm Shell-Derived Activated Carbon in Lufenuron 50-EC Pesticide Adsorption. *Eng*, *7*(6), 301. https://doi.org/10.3390/eng7060301

Oteng-Peprah, M., Obeng, P. A., Acheampong, M. A., & Anang, M. A. (2023). Fixed-bed column sorption kinetic rates on the removal of both biochemical oxygen demand (BOD5) and chemical oxygen demand (COD) in domestic greywater by using palm kernel activated carbon. *Water Practice & Technology*, *18*(7), 1628–1638. https://doi.org/10.2166/wpt.2023.097

Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan, Legis. No. BN.2023/No.55, Peraturan.go.id: 26 hlm. (2023). https://peraturan.bpk.go.id/details/245563/permenkes-no-2-tahun-2023

Rashidi, N. A., & Yusup, S. (2017). A review on recent technological advancement in the activated carbon production from oil palm wastes. *Chemical Engineering Journal*, *314*, 277–290. https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.11.059

Sihap, Bambang W. Nugroho, Muhammad Ardiansyah, Moh Ramadhan N.Hi Dunggio, & Dzulfadly. (2026). Transformasi Tata Kelola Lingkungan Global: Pemetaan Bibliometrik dan Tinjauan Sistematis. *ARMADA : Jurnal Penelitian Multidisiplin*, *4*(6), 1623–1636. https://doi.org/10.55681/armada.v4i6.2485

Somsiripan, T., & Sangwichien, C. (2023). Enhancement of adsorption capacity of Methylene blue, Malachite green, and Rhodamine B onto KOH activated carbon derived from oil palm empty fruit bunches. *Arabian Journal of Chemistry*, *16*(12), 105270. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105270

van, E. N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, *84*(2), 523–538. https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3

World Health Organization dan United Nations Children's Fund. (2025). *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2024: Special focus on inequalities*. WHO dan UNICEF. https://data.unicef.org/wp-content/uploads/2025/09/jmp-2025-wash-households-launch.pdf

Zubir, M., Jasmidi, J., Harahap, M. H., Miswanda, D., Taufik, A., Efiyanti, L., Jahro, I. S., Faradilla, P., Ramadhan, D. S., Khairahma, K., Pratama, A. A., & Lubis, A. H. (2026). Green synthesis of palm carbon composite derived of oil palm empty fruit bunches with metal organic frameworks comprising Cu(II)-benzene dicarboxylate for heavy metals remediation. *Next Materials*, *13*, 102628. https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2026.102628