

## **Tren Penelitian Global Pemanfaatan Limbah Abu Terbang Batubara (*Coal Fly Ash*): Analisis Bibliometrik Menggunakan Database Pengindeks Scopus**

### *Global Research Trends on the Utilization of Coal Fly Ash: A Bibliometric Analysis Using the Scopus Indexing Database*

**Intan Abdillah Arrasyid<sup>1</sup>, M. Nurcholis<sup>2</sup>, Shofa Rijalul Haq<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Mahasiswa Program Studi Magister Teknik Pertambangan UPN "Veteran" Yogyakarta

<sup>2</sup>Dosen Program Studi Magister Teknik Pertambangan UPN "Veteran" Yogyakarta

Korespondensi: [intanabdillaharrasyid@gmail.com](mailto:intanabdillaharrasyid@gmail.com)

#### **ABSTRAK**

Penelitian ini menyajikan tinjauan bibliometrik sistematis mengenai tren riset global dalam pemanfaatan abu terbang batubara (CFA) antara tahun 2015 sampai 2025, memanfaatkan data dari basis Scopus. Analisis menunjukkan adanya peningkatan signifikan dalam publikasi, khususnya lonjakan tajam pada tahun 2023 dan 2024, yang mengindikasikan semakin mendesaknya perhatian terhadap pengelolaan limbah industri berkelanjutan. Secara geografis, Tiongkok memimpin kontribusi penelitian, sejalan dengan perannya sebagai produsen batubara utama, diikuti oleh Polandia, Amerika Serikat, dan India, menyoroti relevansi topik ini dalam berbagai aplikasi global, dari konstruksi hingga remediasi lingkungan. Fokus penelitian tersebar luas di beberapa bidang utama, termasuk ilmu lingkungan, ilmu material, dan energi. Topik-topik penting yang diidentifikasi meliputi remediasi lingkungan, upaya mitigasi emisi karbon melalui proses pembakaran, dan pengembangan material inovatif seperti semen dan zeolit yang menggunakan CFA sebagai bahan alternatif. Keberadaan kata kunci "fly ash" sebagai inti jaringan tematik menegaskan sentralitasnya dalam eksplorasi potensi abu terbang sebagai bahan bernilai tambah. Kajian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman komprehensif di bidang pendidikan, pembuat kebijakan, dan sektor industri mengenai dinamika riset terkini serta arah prospektif dalam pemanfaatan CFA.

**Kata Kunci:** Batubara, Abu Terbang, Bibliometrik, VOSviewer

#### **ABSTRACT**

*This study presents a systematic bibliometric review of global research trends in coal fly ash (CFA) utilization between 2015 until 2025, drawing data from the Scopus database. The analysis reveals a notable increase in publications, particularly a sharp surge in 2023 and 2024, indicating growing urgency regarding sustainable industrial waste management. Geographically, China leads research contributions, aligning with its role as a major coal producer, followed by Poland, the United States, and India, underscoring the topic's relevance across diverse global applications, from construction to environmental remediation. Research focus is broadly distributed across several key fields, including environmental science, materials science, and energy. Prominent topics identified remediation of environmental concerns, carbon emission mitigation efforts through combustion processes, and the development of innovative materials such as cement and zeolites using CFA as an alternative component. The central position of "fly ash" as a core keyword in the thematic network underscores its centrality in exploring the potential of this valuable by-product. This review aims to provide comprehensive insights for the scientific community, policymakers, and industrial sectors regarding current research dynamics and prospective directions in CFA utilization.*

**Keyword:** Coal, Fly Ash, Bibliometric, VOSviewers

#### **PENDAHULUAN**

Pengelolaan dan pemanfaatan abu terbang batubara (*coal fly ash* atau CFA) yang merupakan produk sampingan dari proses pembakaran batubara telah menarik perhatian besar secara global, baik karena kekhawatiran terhadap dampaknya terhadap lingkungan maupun potensinya sebagai sumber daya bernilai tambah. Tinjauan literatur berbasis bibliometrik kini menjadi metode yang efektif untuk menelusuri perkembangan riset tentang CFA, karena mampu memberikan wawasan kuantitatif terkait tren publikasi, fokus tematik, hingga penulis-penulis

berpengaruh (Yang et al., 2018; Hussain et al., 2023). Penelitian awal yang dilakukan oleh Blissett & Rowson (2012) telah memetakan berbagai jalur pemanfaatan multikomponen, termasuk untuk geopolimer, katalis, dan adsorben, sehingga membentuk gambaran menyeluruh tentang berbagai bidang aplikasinya. Studi-studi terkini semakin menekankan potensi CFA dalam remediasi lingkungan, penangkapan energi, serta sebagai bahan material berkelanjutan ((Kuznia, 2025); (Zhao et al., 2024; Nassar et al., 2024; Nomani et al., 2024). Penilaian terhadap risiko lingkungan tetap menjadi fokus utama, terutama terkait aspek kelarutan dan dampak ekotoksikologis (Wang et al., 2020; Chen et al., 2024). Sementara itu, riset yang berorientasi pada teknologi lebih menitikberatkan pada analisis struktur mikro dan efisiensi proses pengolahan energi (Petrus et al., 2022; Kato et al., 2019). Kemunculan geopolimer berbasis CFA sebagai alternatif ramah lingkungan pengganti semen juga telah banyak didokumentasikan (Zhao et al., 2024; Blissett & Rowson, 2012; Hussain et al., 2023). Sejalan dengan itu, studi mengenai pemulihan unsur tanah jarang (*rare earth elements*) dan mekanisme penangkapan karbon menunjukkan kedalaman dan sifat interdisipliner yang semakin berkembang dalam bidang ini (Pan et al., 2020; Kuznia, 2025; Hussain et al., 2023).

Penggunaan alat bibliometrik seperti VOSviewer turut mempermudah identifikasi jaringan kolaborasi dan tema-tema baru yang sedang berkembang (Yang et al., 2018; Hussain et al., 2023; Petrus et al., 2022). Analisis geografis dan institusional juga menunjukkan dominasi kuat dari negara-negara seperti Tiongkok, India, dan Amerika Serikat, yang disertai kontribusi Eropa yang semakin meningkat, khususnya dalam hal tata kelola dan konstruksi berkelanjutan (Yang et al., 2018; Hussain et al., 2023; Petrus et al., 2022). Meningkatnya jumlah artikel ulasan dan prosiding konferensi menandai bahwa riset CFA telah bertransformasi dari isu pengelolaan limbah yang sempit menjadi suatu bidang riset multidisipliner yang matang dan memiliki kepentingan strategis (Blissett & Rowson, 2012; Hussain et al., 2023).

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan tinjauan literatur sistematis dengan pendekatan bibliometrik guna memetakan struktur dan perkembangan studi pemanfaatan CFA, mengidentifikasi arah penelitian yang sedang tumbuh, serta menyoroti area-area potensial untuk pengembangan riset di masa depan. Dengan menerapkan metode kuantitatif, studi ini diharapkan dapat memberikan gambaran menyeluruh bagi peneliti, pembuat kebijakan, dan pelaku industri mengenai kondisi ilmiah terkini terkait CFA beserta arah prospektifnya.

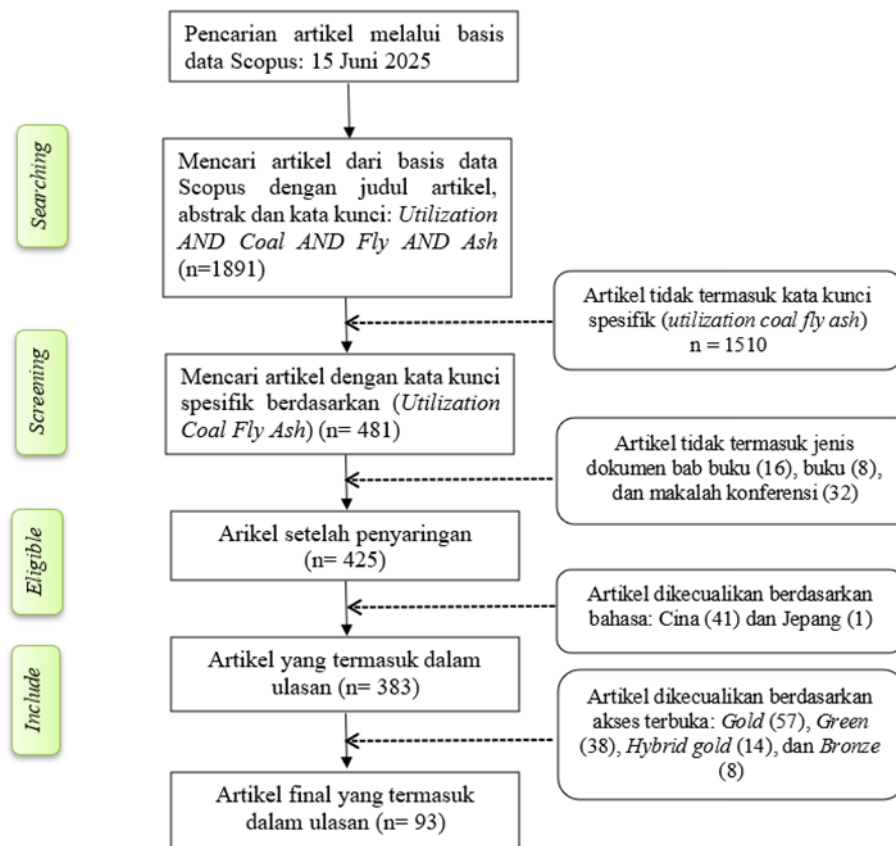
## METODE PENELITIAN

Penelitian ini melakukan tinjauan literatur secara sistematis dengan pendekatan bibliometrik untuk memahami bagaimana perkembangan suatu bidang studi, termasuk pola-pola riset yang muncul, kolaborasi antarpemulis, serta tema utama yang banyak dibahas. Metode ini mengikuti panduan PRISMA (**Gambar 1.**) agar proses penelusuran dan seleksi literatur berlangsung secara transparan, terstruktur, dan dapat direplikasi oleh peneliti lain (Moher et al., 2009). Pendekatan bibliometrik ini dikenal pula sebagai *text data mining*, dan seiring perkembangannya sering dikaitkan dengan metode *big data* karena kemampuannya dalam mengolah dan menganalisis informasi dalam jumlah besar (Hassani et al., 2020). Artikel yang dianalisis dalam kajian ini dipilih berdasarkan tiga kriteria: (1) diterbitkan tahun 2015 hingga tahun 2025, (2) ditulis dalam bahasa Inggris, dan (3) berfokus pada topik *Utilization of Coal Fly ash* atau pemanfaatan abu terbang batubara. Untuk mengolah data, digunakan perangkat lunak VOSViewer yang memetakan informasi bibliografi secara visual. Melalui alat ini, dapat dianalisis bagaimana hubungan kutipan antarartikel, pola kerja sama antarpemulis, serta kemunculan kata kunci yang saling berkaitan. VOSViewer dapat menyajikan dan merepresentasikan informasi khusus tentang peta grafis bibliometrik. Hasilnya membantu memberikan gambaran menyeluruh tentang arah, struktur, dan dinamika penelitian dalam topik yang dikaji (Van Eck & Waltman, 2010).

Menggabungkan analisis bibliometrik dan tinjauan sistematis membantu peneliti merangkum hasil-hasil penelitian yang sudah ada dan melihat gambaran besar dari perkembangan suatu topik. Pendekatan ini juga memudahkan dalam mengenali siapa saja peneliti penting di bidang

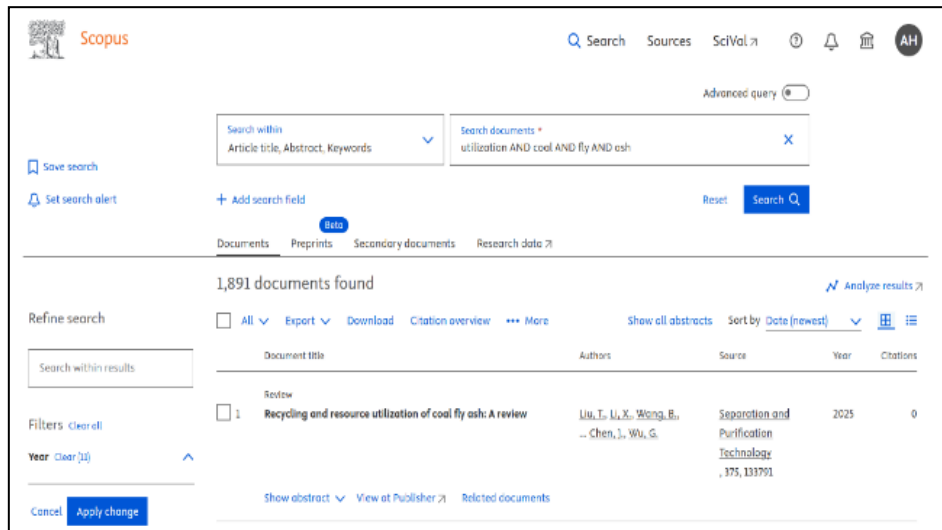
tersebut, serta tren atau isu-isu baru yang sedang banyak dibahas (Ni & Abdullah, 2025). Integrasi kedua pendekatan memberikan yang komprehensif pemahaman tentang perkembangan, aliran sejarah, dan arah masa depan bidang penelitian, membuatnya sangat bermanfaat dalam studi interdisipliner untuk mendapatkan wawasan yang lebih dalam (Marzi et al., 2024).

Fase awal dalam pemeriksaan ilmiah ini melibatkan pemilihan kata kunci, yang dapat diselesaikan melalui metodologi makro (dari atas ke bawah), berkembang dari lintasan pencarian yang ekspansif ke studi dan topik yang didefinisikan lebih sempit. Akibatnya, setelah mengevaluasi keterbatasan yang melekat dalam penelitian sebelumnya dan kelangkaan studi yang membahas pemanfaatan *Fly ash* batubara, penyelidikan ini menggabungkan kata kunci "*Utilization of coal fly ash*" sebagai titik fokus dalam judul artikel, dan bagian kata kunci. Selanjutnya, basis data "Scopus" digunakan oleh para peneliti untuk berbagai tujuan investigasi, termasuk melakukan tinjauan literatur, mengidentifikasi ahli materi pelajaran, dan memantau tren penelitian.



**Gambar 1.** PRISMA Penelitian

Berdasarkan **Gambar 1**, pencarian artikel pada tanggal 15 juni 2025 dilakukan melalui basis data dari Scopus menggunakan menu pencarian judul artikel, abstrak dan kata kunci: "Utilization AND Coal AND Fly AND Ash" yang memuat data sepuluh (10) tahun terakhir yaitu publikasi tahun 2015 sampai 2025. Hasil pencarian menunjukkan 1.891 total dokumen yang berkaitan dengan kata kunci tersebut (**Gambar 2**). Selanjutnya dilakukan penyaringan artikel berdasarkan *keyword* yang relevan, lalu dilanjutkan dengan meniadakan artikel sesuai dengan klasifikasinya untuk mendapatkan artikel yang *eligible*. Artikel yang tidak masuk kategori diantaranya berupa bab buku (16), buku (8), dan makalah konferensi (32).



**Gambar 2.** Hasil *Meta Data Mining* Pada Basis Data Scopus

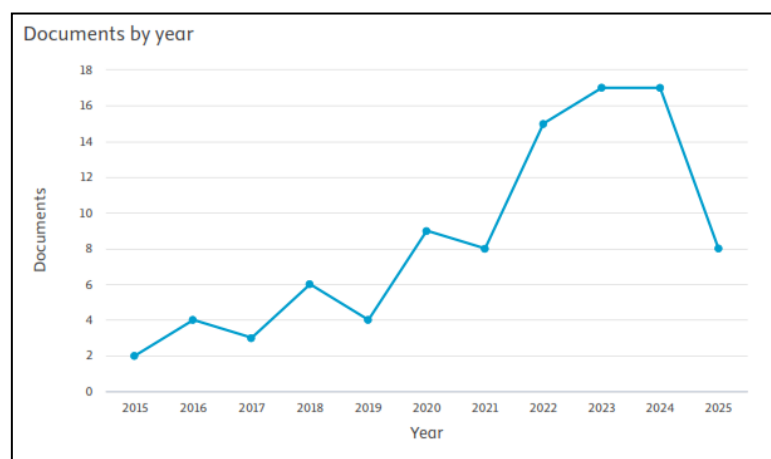
Dalam penelitian ini, artikel yang akan diolah adalah artikel berbahasa Inggris, sehingga artikel dengan bahasa lain dihilangkan. Adapun artikel yang dihilangkan berdasarkan bahasa yaitu Cina (41) dan Jepang (1). Selain itu, penyaringan artikel juga dilakukan berdasarkan *open access* dari artikel. Hasil akhir penyaringan dari seluruh artikel sebanyak 93 artikel yang termasuk dalam data yang dibutuhkan dalam penelitian ini. 93 artikel tersebut kemudian dianalisis lebih lanjut untuk menjawab pertanyaan berikut:

1. Bagaimana tren perkembangan penelitian tentang utilization of coal fly ash dalam beberapa tahun terakhir?
2. Bagaimana alokasi penelitian yang berkaitan dengan utilization of coal fly ash?
3. Bagaimana kontribusi penulis terhadap penelitian tentang utilization of coal fly ash?
4. Apa topik dominan dalam penelitian utilization of coal fly ash?

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Tren Penelitian *Utilization Of CFA* 10 tahun terakhir (2015 – 2025)

Berdasarkan hasil pemetaan bibliometrik dari basis data Scopus selama periode 2015 hingga pertengahan tahun 2025, terlihat adanya pertumbuhan yang cukup signifikan dalam jumlah publikasi yang membahas topik *Utilization of Coal Fly ash*. Grafik tren (**Gambar 3.**) memperlihatkan bahwa minat peneliti terhadap isu ini mengalami peningkatan bertahap yang kemudian berubah menjadi lonjakan tajam dalam tiga tahun terakhir.



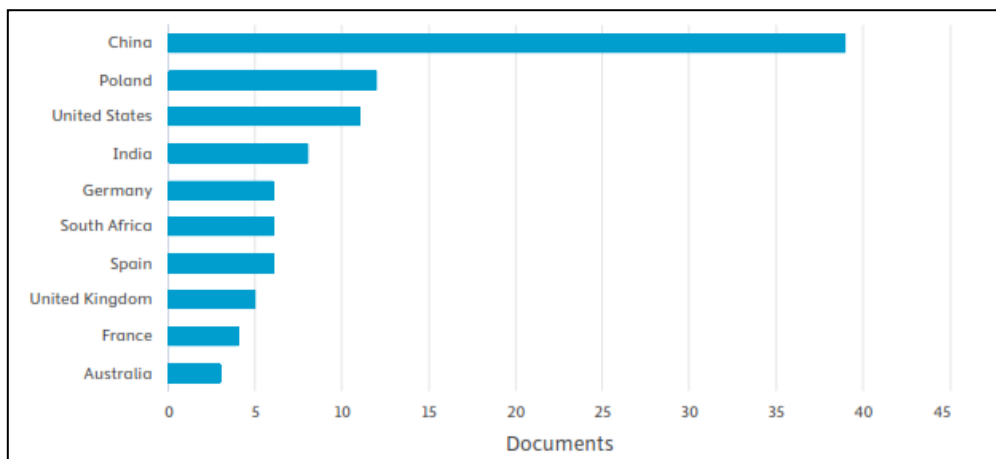
**Gambar-3.** Tren Publikasi *Utilization of CFA* Tahun 2015 – 2025 dari database scopus

Pada periode awal (2015–2017), jumlah publikasi masih relatif rendah dan fluktuatif, yakni hanya berkisar antara 2 hingga 6 artikel per tahun. Hal ini mencerminkan bahwa pada masa tersebut, pemanfaatan abu terbang batubara masih merupakan topik belum menjadi fokus utama dalam penelitian akademik maupun industri. Namun, sejak tahun 2018 hingga 2020, terjadi peningkatan minat yang lebih stabil, dengan puncaknya mulai terlihat pada tahun 2020. Salah satu publikasi tahun 2015 yang ditulis oleh Yao et al, membahas tentang kebutuhan untuk mengembangkan metode daur ulang baru bagi abu terbang batubara menjadi semakin mendesak dan terus berlanjut. Salah satu pengembangan yang dapat dilakukan yaitu memanfaatkan CFA dalam perbaikan tanah, industri konstruksi, industri keramik, katalisis, pemisahan dalam, sintesis zeolit, dan lain sebagainya. Selain itu, pada bagian akhir penelitiannya membahas kelebihan dan kekurangan dari berbagai aplikasi tersebut, pola pemanfaatan abu terbang di berbagai negara, serta arah penelitian di masa mendatang.

Puncak jumlah publikasi tercatat pada tahun 2023 dan 2024, masing-masing dengan 17 dokumen. Hal ini menunjukkan bahwa isu pemanfaatan limbah batubara telah menjadi perhatian serius di kalangan akademisi. Fenomena ini tidak hanya mencerminkan urgensi global terhadap pengelolaan limbah industri secara berkelanjutan, tetapi juga menunjukkan adanya dorongan kuat dari sektor kebijakan dan industri untuk mencari solusi berbasis teknologi hijau. Tahun 2025, meskipun baru memasuki pertengahan tahun, telah mencatatkan 8 publikasi. Jika tren ini berlanjut, maka tahun ini berpotensi menyamai atau bahkan melampaui capaian tahun-tahun sebelumnya. Peningkatan ini tidak hanya penting dari sisi akademik, tetapi juga menjadi indikator bahwa dunia riset sedang bergerak menuju solusi nyata atas permasalahan lingkungan melalui pendekatan inovatif yang berbasis limbah.

## 2. Kontribusi Global terhadap Penelitian *Utilization Of CFA*

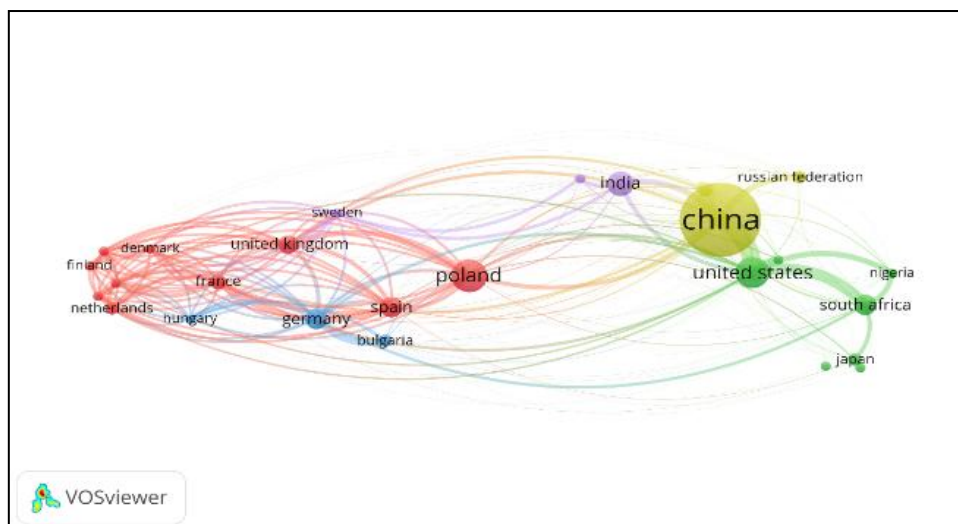
Data dari Scopus menunjukkan bahwa Cina mendominasi publikasi terkait *Utilization of Coal Fly ash* dengan 39 dokumen dari total 93, mencerminkan peran negara ini sebagai produsen dan pengguna utama batubara global. Dominasi ini didorong oleh kebutuhan besar untuk mengelola limbah industri secara efisien di tengah tekanan pengurangan emisi dan peralihan menuju energi bersih. Polandia (12 dokumen) dan Amerika Serikat (11 dokumen) berada di posisi berikutnya, menunjukkan bahwa negara maju pun menaruh perhatian besar pada pemanfaatan *fly ash*, baik untuk konstruksi, stabilisasi tanah, maupun inovasi material. India juga menunjukkan kontribusi penting (8 dokumen), terutama dalam konteks agrikultur dan reklamasi lahan yang terdampak limbah. Kontribusi negara lain seperti Jerman, Afrika Selatan, dan Spanyol (masing-masing 6 dokumen), serta Inggris dan Prancis, memperlihatkan bahwa isu ini bersifat global dan lintas benua. Grafik kontribusi negara secara global terhadap penelitian dapat dilihat pada **Gambar 4**.



**Gambar 4.** Kontribusi Global Penelitian *Utilization of CFA* dari database scopus

Perbedaan fokus antarnegara mencerminkan pendekatan yang beragam dari rekayasa material hingga penguatan kebijakan lingkungan yang membuka peluang kolaborasi internasional untuk menjawab tantangan limbah batubara secara berkelanjutan.

Kontribusi negara secara global divisualisasikan pada (**Gambar 5.**) yang menunjukkan visualisasi jaringan kolaborasi antar negara dalam penelitian *Utilization of Coal Fly ash* memperlihatkan struktur kolaboratif yang kompleks dan terbagi ke dalam beberapa klaster yang ditandai dengan warna berbeda. Klaster paling dominan ditunjukkan oleh Tiongkok (China) dengan ukuran node terbesar dan konektivitas tinggi, menandakan bahwa negara ini tidak hanya aktif dalam publikasi tetapi juga memiliki jejaring kolaborasi internasional yang kuat, khususnya dengan Amerika Serikat, India, dan negara-negara di kawasan Afrika seperti Afrika Selatan dan Nigeria. **Klaster hijau** ini mencerminkan dominasi riset Asia dan Global South yang semakin berkembang dalam bidang pemanfaatan limbah batubara. Sementara itu, **klaster merah** yang dipimpin oleh Polandia, menunjukkan pusat aktivitas kolaborasi di wilayah Eropa Tengah dan Utara, dengan keterhubungan intensif terhadap negara-negara seperti United Kingdom, Denmark, Sweden, Netherlands, dan Finland. **Klaster biru** yang dipimpin oleh Jerman dan Spanyol menunjukkan koneksi kuat dengan negara-negara Eropa Timur dan Selatan seperti Hungaria dan Bulgaria. Sedangkan **klaster ungu** yang melibatkan India dan Sweden merepresentasikan lintasan kolaborasi antara negara berkembang dan maju yang berfokus pada adaptasi teknologi *fly ash* untuk keperluan agrikultur dan pemulihan tanah.

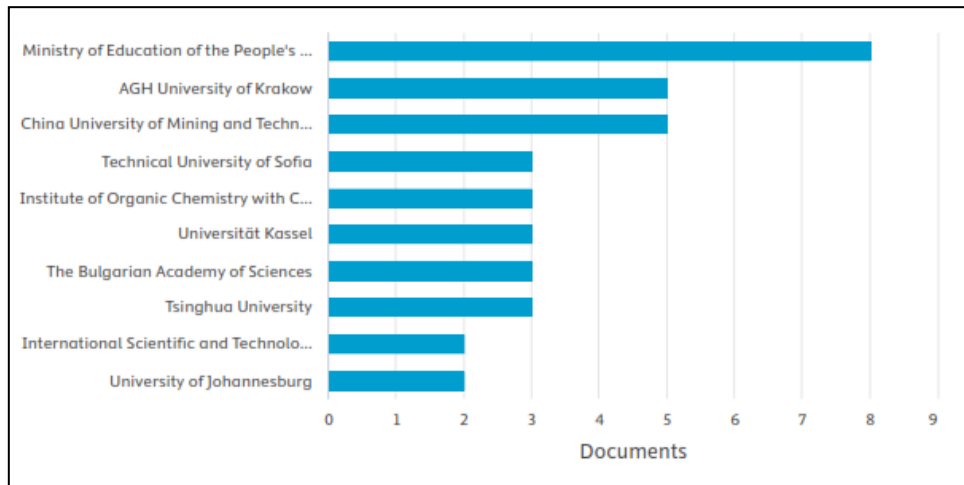


**Gambar 5.** Visualisasi Hubungan Antar Negara yang melakukan penelitian *utilization of CFA* menggunakan *software VOSviewer*

Secara keseluruhan, visualisasi ini menunjukkan bahwa kolaborasi internasional dalam topik ini bersifat multi-polar dan lintas kawasan, dengan beberapa negara berperan sebagai pusat jejaring (hubs) yang memperkuat arus pengetahuan global. Pola ini juga mencerminkan pentingnya kerja sama internasional dalam menjawab tantangan pemanfaatan limbah industri secara berkelanjutan melalui riset terpadu dan berbagi keahlian antarnegara.

### 3. Afiliasi Penelitian *Utilization Of CFA*

Data afiliasi menunjukkan bahwa Ministry of Education of the People's Republic of China merupakan institusi paling produktif dalam publikasi mengenai *Utilization of Coal Fly ash*, dengan total 8 dokumen (**Gambar 6**). Dominasi ini mengindikasikan peran aktif pemerintah Cina dalam mendukung riset-riset terkait pemanfaatan limbah batubara sebagai bagian dari strategi nasional menuju pembangunan berkelanjutan.

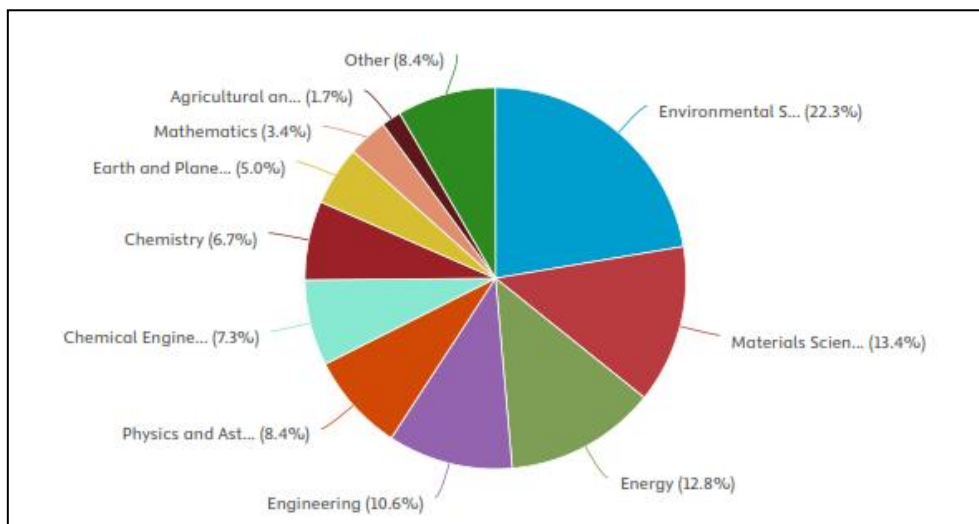


**Gambar 6.** Kontribusi Universitas terhadap Penelitian *Utilization of CFA* dari database scopus

Gambar 6. menunjukkan kontribusi penelitian dari AGH University of Krakow dan China University of Mining and Technology, masing-masing dengan 5 publikasi. Keduanya berfokus pada pengembangan teknologi material dan remediasi lingkungan. Keberadaan beberapa institusi Eropa Timur seperti Technical University of Sofia dan Universität Kassel, serta lembaga penelitian seperti Bulgarian Academy of Sciences, memperlihatkan bahwa kolaborasi antar universitas lintas negara mulai berkembang, khususnya dalam menjawab isu global terkait pengelolaan limbah industri dan transisi menuju ekonomi sirkular.

#### 4. Jumlah Publikasi Penelitian *Utilization Of CFA* berdasarkan Bidang Subjek (*Subject Area*)

Berdasarkan bidangnya, ada 10 bidang yang melakukan penelitian terkait *utilization of coal fly ash*, diantaranya 22,3% bidang *environmental science* (40), 13,4% *material science* (24), 12,8% *energy* (23), 10,6% *engineering* (19), 8,4% *physics and astronomy* (15), 7,3% *chemical engineering* (13), 6,7% *chemistry* (12), 5,0% *earth and planetary sciences* (9), 3,4% *mathematics* (6), 1,7% *agricultural*, dan 8,4% lainnya yang dapat dilihat pada (**Gambar 7**).

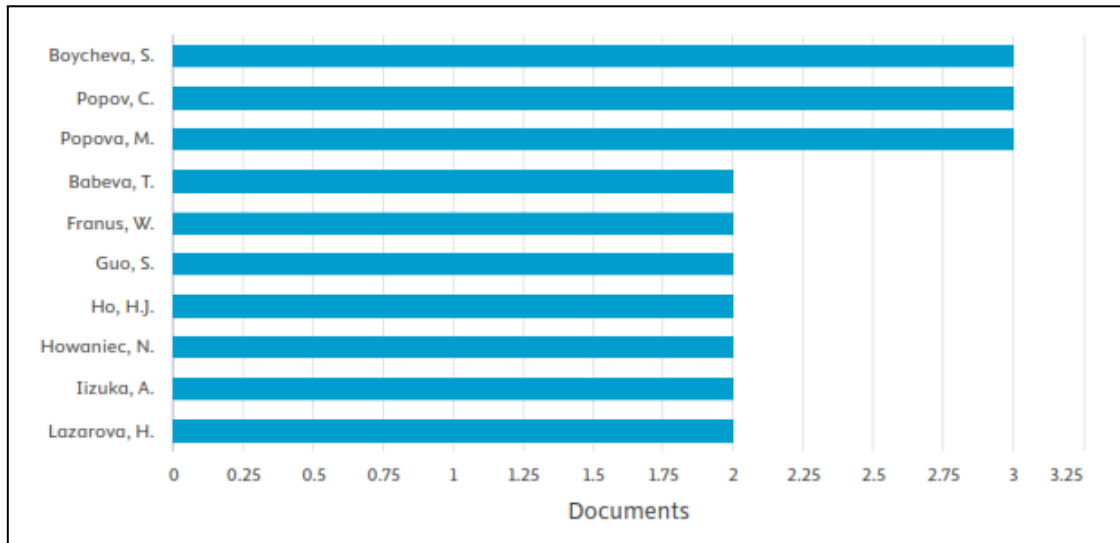


**Gambar 7.** Subjek Bidang (10 teratas) penelitian *utilization of CFA* dari database scopus

#### 5. Jumlah Publikasi Penulis Artikel *Utilization Of CFA*

Distribusi penelitian terkait *utilization of coal fly ash* tidak mengungkapkan dominasi yang jelas. Diantara 10 penulis teratas, 3 penulis (Boycheva, S ; Popov; Popova, M) menulis 3 artikel,

sedangkan 7 lainnya (Babeva; Franus; Guo, S; Ho, H.J; Howaniec, N; Iizuka; Lazarova, H) menulis 2 artikel (**Gambar 8**).

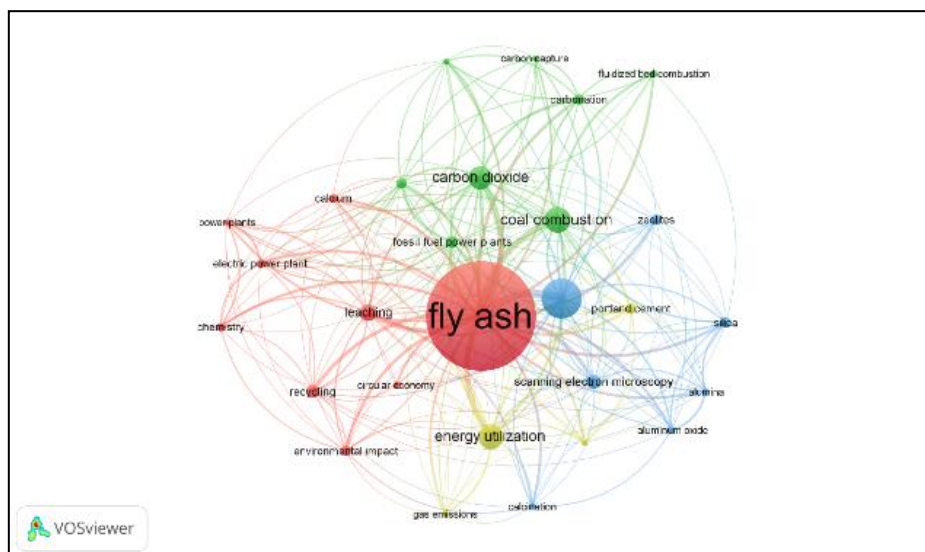


**Gambar 8.** Jumlah publikasi dari penulis artikel *utilization of CFA* dari database scopus

## 6. Distribusi Topik Penelitian *Utilization Of CFA*

Berdasarkan visualisasi *co-occurrence of keywords* menggunakan VOSviewer (**Gambar 9**), jaringan kata kunci dalam topik *Utilization of Coal Fly ash* menunjukkan adanya struktur tematik yang terbagi ke dalam beberapa klaster, masing-masing merepresentasikan fokus utama penelitian dalam bidang ini. Kata kunci sentral "*fly ash*" menjadi node terbesar dan paling terkoneksi, menandakan bahwa seluruh aspek pembahasan dalam domain ini berpusat pada potensi pemanfaatan abu terbang sebagai bahan alternatif.

**Klaster merah** menggambarkan fokus pada aspek lingkungan dan pengelolaan limbah, dengan kata kunci seperti *leaching*, *power plants*, *electric power plant*, *recycling*, *circular economy*, dan *environmental impact*. Klaster ini menunjukkan perhatian besar terhadap dampak lingkungan dari abu terbang dan bagaimana daur ulang serta pemanfaatannya dapat dikaitkan dengan pendekatan ekonomi sirkular dan keberlanjutan. **Klaster hijau** berfokus pada isu emisi karbon dan proses pembakaran, dengan kata kunci dominan seperti *carbon dioxide*, *coal combustion*, *carbon capture*, dan *fluidized bed combustion*. Hal ini mengindikasikan keterkaitan erat antara penelitian abu terbang dengan teknologi pengurangan emisi dan efisiensi pembakaran batubara, menjadikannya bagian dari strategi mitigasi perubahan iklim. **Klaster biru** mengangkat tema pemanfaatan material dan aplikasi teknis, dengan istilah seperti *portland cement*, *zeolites*, *silica*, *alumina*, dan *aluminum oxide*. Klaster ini mencerminkan pendekatan yang lebih aplikatif, terutama dalam sektor konstruksi dan rekayasa material, di mana abu terbang digunakan sebagai bahan baku alternatif dalam pembuatan semen, beton, dan keramik fungsional. Sedangkan, klaster kuning, meskipun lebih kecil, menghubungkan kata kunci seperti *energy utilization*, *gas emissions*, dan *calcination*, menekankan pentingnya efisiensi energi dan pengurangan emisi dalam proses pengolahan abu terbang. Kata kunci *scanning electron microscopy* juga muncul kuat, menandakan bahwa pendekatan karakterisasi mikrostruktur secara ilmiah merupakan bagian penting dalam studi pemanfaatan *fly ash*.



**Gambar 9.** Visualisasi Jaringan Kata Kunci Penelitian *Utilization Of CFA* menggunakan software VOSviewer

Secara keseluruhan, visualisasi ini mengungkap bahwa penelitian *Utilization of Coal Fly ash* bersifat multidisipliner menggabungkan perspektif lingkungan, energi, kimia material, dan teknologi industri. Distribusi kata kunci dalam kluster memperjelas arah riset global yang tidak hanya menyoroti dampak limbah batubara, tetapi juga menggali potensi pemanfaatannya sebagai solusi inovatif dalam mendukung pembangunan berkelanjutan.

**Tabel 1.** Kata Kunci dari Penulis

Rank	Kata Kunci	Total Link Strength
1	<i>Fly Ash</i>	599
2	<i>Coal Fly Ash</i>	174
3	<i>Coal Combustion</i>	169
4	<i>Energy Utilization</i>	145
5	<i>Leaching</i>	117
6	<i>Fossil Fuel Power Plants</i>	101
7	<i>Recycling</i>	85
8	<i>Coal-Fired Power Plant</i>	83
9	<i>Electric Power Plant</i>	69
10	<i>Silica</i>	69

(Sumber: Output Vosviewers Software)

Berdasarkan Tabel 1., kata kunci **“Fly Ash”** menempati posisi paling sentral dengan total link strength sebanyak 599, menunjukkan bahwa topik ini menjadi pusat utama dari berbagai penelitian yang saling terhubung dalam studi pemanfaatan abu terbang batubara. Kata kunci lainnya seperti **“Coal Fly Ash”** (174), **“Coal Combustion”** (169), dan **“Energy Utilization”** (145) juga memiliki tingkat keterkaitan yang tinggi, merepresentasikan fokus utama penelitian pada asal-usul material, proses pembakaran, dan potensi pemanfaatannya dalam sektor energi. Istilah seperti **“Leaching”** dan **“Recycling”** mencerminkan kekhawatiran terhadap dampak lingkungan sekaligus pendekatan sirkular dalam pengelolaan limbah. Sementara itu, kemunculan kata kunci teknis seperti **“Electric Power Plant”** dan **“Silica”** mengindikasikan bahwa penelitian tidak hanya bersifat teoretis tetapi juga diarahkan pada aplikasi praktis di sektor energi dan material. Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa pemanfaatan *coal fly ash* telah menjadi tema lintas bidang dengan pendekatan multidisipliner yang kuat.

## KESIMPULAN

Penelitian mengenai pemanfaatan abu terbang batubara (CFA) menunjukkan tren peningkatan signifikan secara global dalam dekade terakhir, khususnya antara tahun 2015 hingga 2025. Lonjakan publikasi yang tajam, terutama pada tahun 2023 dan 2024, mengindikasikan semakin besarnya urgensi dan minat riset terhadap solusi pengelolaan limbah industri yang berkelanjutan.

Secara geografis, Tiongkok memimpin kontribusi penelitian, yang selaras dengan posisinya sebagai produsen batubara utama dan kebutuhan akan pengelolaan limbah yang efisien. Negara-negara lain seperti Polandia, Amerika Serikat, dan India juga memberikan kontribusi substansial, menunjukkan relevansi global topik ini dalam berbagai konteks aplikasi, mulai dari konstruksi hingga remediasi lingkungan. Fokus penelitian tersebar di berbagai bidang, didominasi oleh ilmu lingkungan, ilmu material, dan energi. Topik-topik utama mencakup isu-isu lingkungan seperti pencucian (*leaching*), upaya mitigasi emisi karbon melalui proses pembakaran, serta pengembangan material baru menggunakan CFA, seperti semen dan zeolit. Posisi sentral kata kunci "fly ash" dalam jejaring tematik menunjukkan bahwa seluruh aspek penelitian berpusat pada optimalisasi potensi abu terbang sebagai bahan alternatif yang bernilai tambah.

## DAFTAR PUSTAKA

- Blissett, R. S., & Rowson, N. A. (2012). A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. *Fuel*, *97*, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.03.024>
- Boycheva, S., Zgureva, D., Lazarova, H., Lazarova, K., Popov, C., Babeva, T., & Popova, M. (2020). Processing of high-grade zeolite nanocomposites from solid fuel combustion by-products as critical raw materials substitutes. *Manufacturing Review*, *7*. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2020019>
- Chen, Y., Fan, Y., Huang, Y., Liao, X., Xu, W., & Zhang, T. (2024). A comprehensive review of toxicity of coal fly ash and its leachate in the ecosystem. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *269*, 115905. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115905>
- Hassani, H., Beneki, C., Unger, S., Mazinani, M. T., & Yeganegi, M. R. (2020). Text mining in big data analytics. *Big Data and Cognitive Computing*, *4*(1), 1–34. <https://doi.org/10.3390/bdcc4010001>
- Ho, H. J., Iizuka, A., & Shibata, E. (2021). Utilization of low-calcium fly ash via direct aqueous carbonation with a low-energy input: Determination of carbonation reaction and evaluation of the potential for CO<sub>2</sub> sequestration and utilization. *Journal of Environmental Management*, *288*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112411>
- Howaniec, N., Zdeb, J., Gogola, K., & Smoliński, A. (2023). Utilization of Carbon Dioxide and Fluidized Bed Fly Ash in Post-Industrial Land Remediation. *Materials*, *16*(13). <https://doi.org/10.3390/ma16134572>
- Hussain, A., Ali, J., & Faizan, S. (2023). Erratum: Correction to: Exploring the scientific research on coal fly ash and agriculture: knowledge mapping and future research directions (Environmental science and pollution research international (2023) 30 58 (121292-121305)). *Environmental Science and Pollution Research International*, *30*(60), 126231. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31378-8>
- Kato, K., Xin, Y., Hitomi, T., & Shirai, T. (2019). Surface modification of fly ash by mechano-chemical treatment. *Ceramics International*, *45*(1), 849–853. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.09.254>
- Kuźnia, M. (2025). A Review of Coal Fly Ash Utilization: Environmental, Energy, and Material Assessment. *Energies*, *18*(1), 52. <https://doi.org/10.3390/en18010052>
- Marzi, G., Balzano, M., Caputo, A., & Pellegrini, M. M. (2024). Guidelines for Bibliometric-Systematic Literature Reviews: 10 steps to combine analysis, synthesis and theory development. *International Journal of Management Reviews*, *December 2022*, 81–103. <https://doi.org/10.1111/ijmr.12381>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., Antes, G., Atkins, D., Barbour, V., Barrowman, N., Berlin, J. A., Clark, J., Clarke, M., Cook, D., D'Amico, R., Deeks, J. J., Devereaux, P. J., Dickersin, K., Egger, M., Ernst, E., Gøtzsche, P. C., ... Tugwell, P. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Medicine*, *6*(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>



- Nassar, R. U. D., Balachandra, A., & Soroushian, P. (2024). Mechanochemical processing of landfilled coal fly ash for enhanced CO<sub>2</sub> sequestration and heavy metal immobilization in sustainable hydraulic cements. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 44(11), 1976–2001. <https://doi.org/10.1080/19392699.2024.2398530>
- Ni, C., & Abdullah, N. L. (2025). Research on absorptive capacity in the green context: a bibliometric and visualization analysis. *Cogent Business and Management*, 12(1). <https://doi.org/10.1080/23311975.2024.2435602>
- Nomani, M. Z. M., Shaquib, O., & Lone, A. A. (2024). Environmental implications of fly ash management and utilization: A review of laws, policies, and practices. *Current World Environment*, 19(2). <https://doi.org/10.12944/CWE.19.2.10>
- Pan, J., Nie, T., Vaziri Hassas, B., Rezaee, M., Wen, Z., & Zhou, C. (2020). Recovery of rare earth elements from coal fly ash by integrated physical separation and acid leaching. *Chemosphere*, 248, 126112. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126112>
- Petrus, H. T. B. M., Olvianas, M., Shafiyurrahman, M. F., Pratama, I. G. A. A. N., Jenie, S. N. A., Astuti, W., Nurpratama, M. I., Ekaputri, J. J., & Anggara, F. (2022). Circular Economy of Coal Fly Ash and Silica Geothermal for Green Geopolymer: Characteristic and Kinetic Study. *Gels*, 8(4), 233. <https://doi.org/10.3390/gels8040233>
- Van Eck, 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>
- Wang, N., Sun, X., Zhao, Q., Yang, Y., & Wang, P. (2020). Leachability and adverse effects of coal fly ash: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 396. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122725>
- Yang, L., Wang, Q., Bai, X., Deng, J., & Hu, Y. (2018). Mapping of trace elements in coal and ash research based on a bibliometric analysis method spanning 1971–2017. *Minerals*, 8(3), 89. <https://doi.org/10.3390/min8030089>
- Yao, Z. T., Ji, X. S., Sarker, P. K., Tang, J. H., Ge, L. Q., Xia, M. S., & Xi, Y. Q. (2015). A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews*, 141, 105–121. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016>
- Zhao, Z., Zhang, K., Luo, J., Wu, M., Wang, X., Wang, K., & Liu, S. (2024). A Study on the Mechanisms of Coal Fly Ash to Improve the CO<sub>2</sub> Capture Efficiency of Calcium-Based Adsorbents. *Sustainability (Switzerland)*, 16(18). <https://doi.org/10.3390/su16188139>