JURNAL KIMIA MULAWARMAN
Vol 24, No. 1, Jul - Des 2026 pp. 15-23
https://jurnal.kimia.fmipa.unmul.ac.id/index.php/JKM
P-ISSN 1693-5616 E-ISSN 2476-9258

Karakterisasi Penyusun Utama Abu Layang Batubara menggunakan FTIR dan XRD

Vebria Ardina [a,1,*], Muh Rizal B [b,2], Teguh Setyawan [c,3]

[a] Department of Industrial Chemistry, Faculty of Sciences and Technology, Universitas Jambi, Indonesia
[b] Department of Chemistry, Faculty of Sciences and Technology, Universitas Jambi, Indonesia
[c] Department of Analyst Chemistry, Faculty of Sciences and Technology, Universitas Jambi, Indonesia
* Corresponding Author: vebriaardina@unja.ac.id

ABSTRACT

Coal fly ash is a fine material resulting from the combustion of coal in power plant boilers. The coal fly ash used in this study was sourced from the PT. Petrokimia Gresik power plant. The primary objective of this study was to characterize the main constituents of coal fly ash before and after activation with HCl using XRD and FTIR instruments. Determination of the percentage composition of oxides, as well as analysis of the phases and functionality of coal fly ash before and after activation with HCl. The method used to determine the percentage of oxides in coal fly ash was AAS, in which the coal fly ash was first subjected to chemical destruction. The results of the study show that the percentage composition of SiO_2 after activation increased from 33.33% to 41.67%, as did that of Al_2O_3, from 16% to 17%. Meanwhile, the percentages of Fe_2O_3 and CaO decreased. FTIR analysis of the coal fly ash revealed the presence of main vibrations of the Si–O functional group at wavenumbers of 462 and 1080 cm^{-1}, Al–O at 1088 cm^{-1}, and the silanol group at a wavenumber of 1635 cm^{-1}. Based on the XRD characterization results, it was found that the main constituents of the coal fly ash are quartz and mullite.

This is an open-access article under the CC–BY-SA license.

Article History
Received 2026-01-20
Revised 2026-06-22
Accepted 2026-06-29
Publish 2026-11-30

Keywords
Abu layang batubara,
Destruksi basa,
FTIR,
XRD.

1. Pendahuluan

Energi merupakan pilar utama dalam pembangunan ekonomi dan industri global. Di tengah upaya transisi menuju energi terbarukan, batubara tetap memegang peranan krusial sebagai sumber energi primer, terutama dalam pembangkitan listrik melalui Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) [1]. Di banyak negara berkembang, termasuk Indonesia, cadangan batubara yang melimpah menjadikannya pilihan yang paling ekonomis dan stabil untuk memenuhi permintaan beban dasar (*base load*) listrik nasional. Namun, penggunaan batubara secara masif membawa konsekuensi lingkungan yang signifikan, salah satunya adalah timbunan limbah padat berupa abu sisa pembakaran [2], [3].

Abu batubara secara garis besar terbagi menjadi dua jenis yaitu abu dasar (*bottom ash*) yang mengendap di bagian bawah tungku, dan abu layang (*fly ash*) yang terbawa oleh gas buang dan ditangkap oleh alat pengendali emisi seperti *electrostatic precipitators*. Dari total abu yang dihasilkan, sekitar 60-88 % adalah abu layang. Mengingat volume produksinya yang mencapai jutaan ton per tahun secara global, pengelolaan abu layang telah bergeser dari sekadar isu pembuangan limbah menjadi upaya pemanfaatan material yang bernilai guna tinggi [4], [5].

Abu layang batubara terdiri dari campuran kompleks konstituen organik (1-9%) dan anorganik (90-99%) di mana sekitar 3084% amorf dan 1763% kristal yang berukuran antara 1500 µm dan memiliki distribusi ukuran partikel tri-modal yang sebagian besar terletak di bawah 75 µm. Warna dari abu layang batubara tergantung pada kandungan karbon dan besi yang tidak terbakar, dapat berwarna cokelat kemerahan karena besi atau abu-abu sampai hitam

karena kandungan karbon. Komponen abu layang batubara yang berbeda memiliki struktur atau bentuk yang berbeda dengan fase gelas alumino-silikat yang berbentuk bulat, sedangkan pada fase kristalin kuarsa dan karbon yang tidak terbakar adalah partikel yang berbentuk tidak teratur [5]. Kepadatan abu layang batubara berkisar antara 0,540,86 g cm^3 [6], dan luas permukaannya biasanya terletak antara 0,210 m^2 g^1, abu layang batubara yang kandungan karbonnya tidak terbakar memiliki luas permukaan sekitar 200 m2 g^1 [7]

Klasifikasi abu layang batubara didasarkan pada kandungan CaO. Apabila unsur-unsur kimia seperti silika, oksida besi, dan alumina membentuk lebih dari 70% dari seluruh abu mentah, maka dikategorikan sebagai abu tipeF menurut ASTM C 618. Jika silika, oksida besi, dan alumina kandungannya kurang dari 70% dari keseluruhan abu mentah, maka abu layang dikategorikan sebagai abu tipeC [8]. Kriteria lain sesuai standar ASTM adalah abu layang yang diperoleh dari pembakaran batu bara *bituminous* atau *anthracite* sebagai kelas-F dan yang diperoleh dari pembakaran batu bara *subbituminous* atau *lignite* digolongkan sebagai abu layang kelasC. Sebagian besar abu layang batubara tipe-F telah digunakan oleh para peneliti untuk aplikasi pengolahan air dan sangat sedikit penelitian yang menggunakan abu layang tipeC [9].

Meskipun diklasifikasikan sebagai limbah, abu layang batubara memiliki potensi nilai ekonomi yang tinggi jika dimanfaatkan kembali secara optimal. Pemanfaatan ini sangat bergantung pada pemahaman yang mendalam mengenai sifat fisik dan kimianya. Abu layang bukanlah material tunggal yang homogen; komposisinya sangat bervariasi tergantung pada asal geologis batubara, teknologi pembakaran yang digunakan, serta efisiensi sistem penangkapan partikulat [10]. Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada integrasi karakterisasi kualitatif dan kuantitatif abu layang batubara melalui kombinasi spektroskopi FTIR dan difraksi sinar-X (XRD) untuk mengidentifikasi fase mineral dominan sekaligus menentukan persentase komposisi penyusunnya secara lebih komprehensif. Pendekatan ini tidak hanya memetakan gugus fungsi dan struktur kristalin, tetapi juga menghasilkan informasi proporsi komponen utama yang dapat mendukung pemanfaatan abu layang sebagai material bernilai tambah dan dasar evaluasi potensi aplikasinya. Oleh karena itu, karakterisasi penyusun utama abu layang menjadi langkah krusial. Pada penelitian ini, abu layang batubara di destruksi secara kimia yang kemudian dianalisis menggunakan *atomic adsorption spectrometry* (AAS) untuk menentukan persen oksida komposisi penyusunnya. Dua instrumen yang menjadi standar dalam analisis fase dan fungsionalitas kimia material anorganik adalah *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR). Fokus utama akan diberikan pada interpretasi spektrum dan pola difraksi pada abu layang batubara sebelum dan setelah diaktivasi.

2. Metode

2.1. Material and Instrumentasi

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain abu layang batubara PT. Petrokimia Gresik. Asam klorida (HCl), asam nitrat (HNO_3), asam florida (HF) yang diperoleh dari Sigma-Aldrich, sementara instrumen yang digunakan meliputi *atomic absorption spectrometry* (AAS, Perkin Elmer 3110), *X-Ray diffraction* (XRD, Bruker AXS D8 Advance Eco) dengan radiasi Cu Kα (λ = 1,5418 Å), pada 2θ 5–80° *dan Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (Shimadzu model FR-IR Prestige 21) dengan menggunakan pelet KBr pada bilangan gelombang 400-4000 cm^{-1}.

2.2. Destruksi Abu layang batubara

Abu layang batubara terlebih dahulu dioven selama 2 jam pada suhu 130°C yang bertujuan uang menguapkan kandungan airnya. Sebanyak 0.5 gram abu layang dicampurkan dengan 16 mL aqua regia (12 mL HCl dan 4 mL HNO_3, 3:1) dalam labu destruksi. Selanjutnya dilakukan pemanasan pada suhu 120°C selama 4 jam sambil diaduk menggunakan magnetik stirrer. Setelah proses destruksi selesai, campuran kemudian disaring menggunakan kertas saring Whatman No. 42. Selanjutnya cairan hasil destruksi diambil 5 mL dan diencerkan menjadi 100 mL menggunakan aquabides. Cairan kemudian dianalisis menggunakan AAS menentukan kadar Si, Al, Fe dan Ca nya.

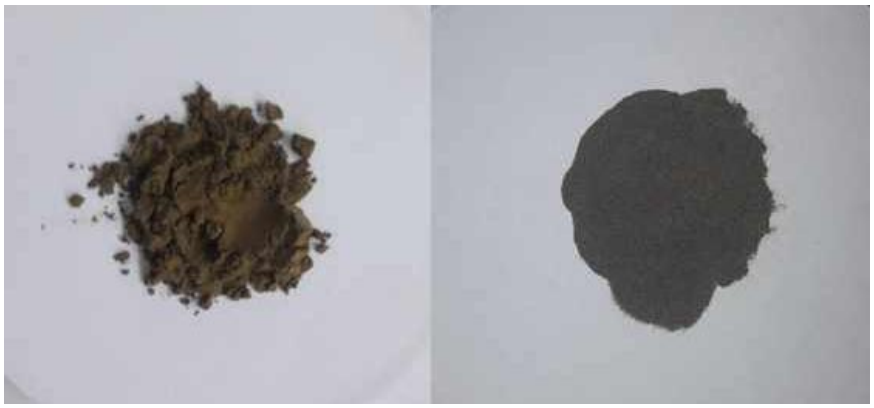
2.3. Aktivasi dan Karakterisasi Abu layang batubara

Abu layang batubara diaktivasi dengan cara merefluks 10 g abu layang batubara dengan larutan 120 mL larutan HCl 6M pekat selama 6 jam pada suhu 100 ^{o}C. Abu layang hasil aktivasi kemudian dinetralkan dengan aquades. Abu layang kemudian disaring dan dikeringkan dalam oven pada suhu 50 ^{o}C selama 4 jam. Padatan abu layang sebelum dan setelah aktivasi HCl dikarakterisasi menggunakan XRD dan FT-IR.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Destruksi dan aktivasi abu layang batubara

Abu layang batubara yang digunakan pada penelitian ini berasal dari PT. Petrokimia Gresik, yang berupa butiran-butiran halus berwarna kecokelatan. Warna dari abu layang dipengaruhi oleh komposisi kandungan karbon atau besi yang tidak terbakar, dapat berwarna coklat-kemerahan karena besi dan abu-abu kehitaman karena karbon [5]. Karena abu layang batubara yang digunakan dalam penelitian ini berwarna cokelat maka dapat diperkirakan kadar Fe dalam abu layang lebih besar daripada kadar karbonnya. Warna abu layang batubara yang semakin muda, menunjukkan bahwa pembakaran batubara semakin sempurna dan mutunya makin baik, atau dapat dikatakan semakin cerah warna yang dihasilkan, maka semakin rendah kandungan karbonnya. Warna yang cerah dari abu layang batubara yang digunakan dalam penelitian ini menunjukkan bahwa mutunya relatif baik. Abu layang batubara sebelum dan setelah aktivasi ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Abu layang batubara sebelum (a) dan setelah aktivasi

Gambar 1 menunjukkan bahwa abu layang batubara setelah diaktivasi mengalami perubahan warna dari kecokelatan menjadi abu-abu yang menandakan bahwa kadar Fe dari abu layang batubara telah berkurang setelah diaktivasi. Hal ini dapat dibuktikan dari hasil analisis penentuan komposisi atau kadar dari abu layang batubara seperti yang ditampilkan pada Tabel 1. Penentuan komposisi dari abu layang batubara bertujuan untuk mengetahui kadar dari oksida-oksida logam utama yang terkandung di dalamnya, dan telah dilakukan dengan proses destruksi basah. Proses destruksi basah bertujuan untuk melarutkan atau mengubah keadaan sampel (abu layang batubara) dari padatan menjadi larutan sehingga lebih mudah untuk dianalisis.

Proses destruksi basah dilakukan dengan menggunakan campuran HF dan Aquaregia. HF bertujuan untuk melarutkan sampel khususnya SiO2 dengan menaikkan suhu destruksi. Aquaregia yang merupakan campuran antara HCl pekat dan HNO3 pekat dengan perbandingan volume 3:1, digunakan untuk melarutkan logam-logam dalam sampel yang tidak larut dalam HF, HCl atau HNO3. Setelah sampel selesai didestruksi ditambahkan asam boraks yang bertujuan untuk menghilang sisa HF yang masih terdapat dalam larutan sampel. Pada penelitian ini, kadar mineral atau oksida dari abu layang batubara yang dianalisis adalah SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 dan CaO yang merupakan mineral utama dari abu layang batubara. Hasil analisis AAS pada abu layang batubara sebelum dan setelah diaktivasi ditampilkan pada Tabel 1.

Table 1. Hasil analisis mineral abu layang batubara menggunakan AAS

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa mineral utama yang terkandung dalam abu layang batubara seperti SiO2, Al2O3, dan Fe2O3 memiliki total kadar sebesar 62 %, yang berarti bahwa abu layang batubara yang digunakan pada penelitian tergolong ke dalam abu layang tipe-C menurut ASTM C 618 karena total kadar dari ketiga mineral tersebut di bawah 70%. Kadar Fe2O3 sebelum aktivasi adalah 12,23% (b/b), namun setelah aktivasi berkurang menjadi 4,18% (b/b). Turunnya kadar Fe_2O_3 disebabkan oleh proses pelindian asam (acid leaching) yang melarutkan fase oksida besi dari matriks abu layang. Dalam abu layang batubara, besi umumnya berada dalam bentuk mineral hematit (Fe_2O_3) dan magnetit (Fe_3O_4) yang relatif lebih reaktif terhadap serangan asam dibandingkan dengan fase silika dan sebagian aluminosilikat. Ketika HCl ditambahkan, ion H^+ menyerang ikatan Fe–O dan mengubah oksida besi menjadi ion logam terlarut yang kemudian membentuk garam klorida dan terpisah saat pencucian [11]. Turunnya kadar Fe2O3 setelah aktivasi mengakibatkan perubahan warna pada abu layang dari kecokelatan menjadi abu-abu sebagaimana terlihat pada Gambar 1. Sedangkan kadar SiO2 pada abu layang batubara teraktivasi mengalami peningkatan dari 33,33% (b/b) menjadi 41,67% (b/b) begitupun dengan Al2O3 mengalami kenaikan sedikit dari 16% (b/b) menjadi 17% (b/b). Hal ini mungkin disebabkan oleh terjadinya dealuminasi fase *glassy* selama proses aktivasi [12]. Hasil yang diperoleh telah sesuai dengan penelitian yang telah dilaporkan sebelumnya dimana abulayang yang diaktivasi dengan HCl mengalami peningkatan kadar SiO_2 dari 43.7% menjadi 66.2%, begitupun dengan kadar Al_2O_3 dari 15.7 menjadi 22.1% [13].

Mineral	Abu layang batubara kadar (%, b/b)	Abu layang batubara teraktivasi kadar (%, b/b)
SiO_2	33,33	41,67
Al_2O_3	16,00	17,00
Fe_2O_3	12,23	4,18
CaO	0,58	0,38

Aktivasi abu layang batubara menggunakan larutan HCl merupakan salah satu metode modifikasi kimia yang bertujuan mengubah karakter permukaan, komposisi kimia, serta struktur material sehingga diperoleh sifat yang lebih reaktif dan fungsional. Mekanisme aktivasi ini melibatkan beberapa tahapan utama, yaitu pelarutan oksida pengotor, dealuminasi parsial, peningkatan rasio Si/Al, serta pembukaan pori dan pembentukan situs aktif yang berkaitan erat dengan perubahan pada struktur amorf dan kristalin abu layang [14], [15]. Tahap pertama adalah pelarutan oksida pengotor (acid leaching). Abu layang batubara umumnya tersusun atas komponen utama berupa SiO_2 dan Al_2O_3, disertai pengotor seperti Fe_2O_3, CaO, MgO, K_2O, dan Na_2O. Ketika diaktivasi menggunakan HCl, ion H^+ menyerang oksida-oksida tersebut dan mengubahnya menjadi senyawa klorida yang larut dalam air. Sebagai contoh, CaO dan Fe_2O_3 akan bereaksi membentuk $CaCl_2$ dan $FeCl_3$ yang kemudian terpisahkan dari matriks padatan. Penghilangan pengotor ini menyebabkan berkurangnya fase nonaktif yang menutupi permukaan sehingga struktur internal material menjadi lebih terbuka [16].

Tahap berikutnya adalah dealuminasi parsial, yaitu pelepasan sebagian atom aluminium dari kerangka aluminosilikat. Dalam kondisi asam, ikatan Al–O lebih rentan terhidrolisis dibandingkan ikatan Si–O karena energi ikatan Si–O relatif lebih tinggi dan lebih stabil terhadap serangan asam. Akibatnya, sebagian spesies aluminium, terutama yang berada pada daerah amorf atau kurang teratur, akan larut keluar dari struktur. Proses ini tidak menyebabkan penghancuran total kerangka material, tetapi menghasilkan modifikasi lokal pada jaringan aluminosilikat. Dealuminasi tersebut berdampak langsung pada peningkatan rasio Si/Al. Karena pelepasan aluminium berlangsung lebih cepat dibandingkan dengan silika, kandungan relatif Si meningkat[17] [12].

Perubahan komposisi ini juga memengaruhi struktur amorf dan kristalin abu layang. Pada bagian amorf, yang umumnya berupa fase gelas aluminosilikat, HCl lebih mudah menembus dan melarutkan komponen yang tidak teratur sehingga terjadi reorganisasi struktur serta terbentuk ruang kosong baru. Oleh karena itu, fase amorf mengalami perubahan lebih besar dibandingkan dengan fase kristalin. Sebaliknya, fase kristalin seperti kuarsa dan mullite memiliki susunan atom yang lebih teratur dan stabil sehingga relatif tahan terhadap perlakuan asam, meskipun intensitas atau kristalinitasnya dapat sedikit berubah akibat penghilangan fase pengotor di

sekitarnya.Keseluruhan proses tersebut menghasilkan pembukaan pori dan peningkatan jumlah situs aktif. Penghilangan pengotor dan sebagian aluminium menciptakan rongga baru, meningkatkan luas permukaan, serta memperbesar aksesibilitas terhadap gugus aktif pada permukaan material. Dengan demikian, aktivasi HCl tidak hanya mengubah komposisi kimia abu layang, tetapi juga mengoptimalkan karakter struktur amorf–kristalin sehingga material menjadi lebih efektif untuk aplikasi adsorben, katalis, maupun bahan prekursor sintesis lanjutan [13], [18].

Peningkatan kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 setelah aktivasi memberikan pengaruh signifikan terhadap performa abu layang sebagai adsorben maupun katalis. Kandungan SiO_2 yang lebih tinggi meningkatkan kestabilan struktur, ketahanan kimia, serta luas permukaan efektif untuk proses adsorpsi. Sementara itu, Al_2O_3 berperan dalam pembentukan situs aktif, terutama situs asam yang penting pada reaksi katalitik. Kombinasi keduanya menghasilkan kerangka aluminosilikat dengan porositas dan distribusi pori yang lebih baik sehingga meningkatkan interaksi antara permukaan material dan molekul target. Akibatnya, kapasitas penyerapan polutan, selektivitas adsorpsi, serta efisiensi dan aktivitas katalitik material dapat meningkat secara signifikan.

Penelitian Eteba dkk. (2023) menunjukkan bahwa abu layang yang diaktivasi menggunakan larutan HCl pada 90 °C dapat meningkatkan luas permukaan material dari 9,6 menjadi 60,4 m^2/g. Peningkatan ini terjadi akibat pelarutan komponen pengotor dan terbentuknya struktur yang lebih berpori. Abu layang teraktivasi menunjukkan efisiensi adsorpsi zat warna Direct Blue 78 mencapai sekitar 99%, jauh lebih baik dibandingkan dengan material tanpa aktivasi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa aktivasi HCl efektif meningkatkan jumlah situs aktif dan kapasitas interaksi antara adsorben dan adsorbat [19]. Hal serupa juga dilaporkan oleh Zhang dkk. (2022) bahwa modifikasi kimia pada coal fly ash melalui perlakuan asam–basa menghasilkan peningkatan luas permukaan dan porositas yang berdampak langsung pada kenaikan kemampuan adsorpsi berbagai zat warna industri. Material hasil modifikasi menghasilkan efisiensi penghilangan zat warna hingga **98%**, yang dikaitkan dengan terbentuknya struktur permukaan yang lebih terbuka serta meningkatnya aksesibilitas gugus aktif adsorben [18].

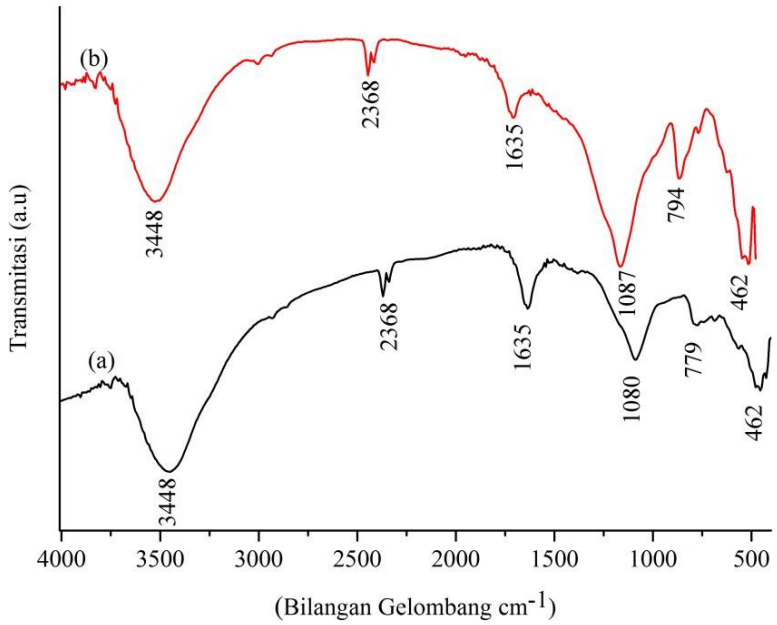
3.2. FTIR dan XRD Analisis

Hasil karakterisasi spektrofotometer inframerah (FT-IR) dari abu layang batubara sebelum dan sesudah aktivasi disajikan pada Gambar 2, sedangkan data bilangan gelombang spektra FT-IR abu layang batubara sebelum dan sesudah aktivasi ditunjukkan pada Tabel 2. Serapan lebar pada bilangan gelombang 3448 cm^{-1} mengindikasikan adanya vibrasi ulur ⍰OH yang molekul air dalam kerangka abu layang batubara. Sementara serapan pada bilangan gelombang 1635 cm^{-1} merupakan vibrasi dari gugus silanol (Si-OH). Vibrasi ulur asimetri pada bilangan gelombang 1080 cm^{-1} merupakan karakteristik dari Si-O dan Al-O. Vibrasi ikatan pita serapan 462 cm^{-1} dan 794 cm^{-1} merupakan Vibrasi tekuk asimetris Si-O-Si dan Vibrasi ulur Si-O, analisis ini sesuai dengan penelitian yang telah dilaporkan sebelumnya [20], [21], [22].

Setelah abu layang batubara diaktivasi dengan HCl terjadi sedikit pergeseran bilangan gelombang ke angka yang lebih besar (disebut juga sebagai *blue shift*) yaitu puncak vibrasi pada bilangan gelombang 1080 cm^{-1} menjadi 1087 cm^{-1}. Hal serupa juga terjadi pada puncak 779 cm^{-1} yang mengalami pergeseran puncak setelah aktivasi menjadi 794 cm^{-1}. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor, seperti terjadinya proses dealuminasi dan HCl dapat melarutkan oksida logam pengotor seperti CaO, MgO, dan Fe_2O_3 yang seringkali terikat atau menutupi situs silikam pada abu layang batubara, hilangnya kation-kation pengotor ini dapat mengurangi gangguan pada vibrasi ikatan Si-O, memungkinkannya bergetar pada frekuensi aslinya yang lebih tinggi tanpa beban interaksi dari kation pengotor tersebut [23]. Berdasarkan Tabel 2 terlihat bahwa tidak terjadi perubahan secara signifikan pada puncak serapan abu layang batubara sebelum dan sesudah aktivasi yang menunjukkan bahwa gugus fungsi yang ada pada abu layang batubara juga tidak berubah. Namun adanya pergeseran dan pelebaran puncak menunjukkan bahwa aktivasi terhadap abu layang batubara telah berhasil diaktivasi.

Penelitian oleh Gracias dkk. (2026) menunjukkan bahwa aktivasi kimia abu layang menggunakan HCl 2 M tidak mengubah jenis gugus fungsi utama yang terdeteksi FTIR, namun

menyebabkan pergeseran pita silanol (Si–O) dari 995 cm^{-1} menjadi 1057 cm^{-1}. Pergeseran ini dikaitkan dengan dealuminasi parsial pada kerangka aluminosilikat, sehingga permukaan menjadi lebih kaya silika dan memiliki densitas situs aktif yang lebih tinggi. Hasil XRD pada penelitian tersebut juga memperlihatkan penurunan intensitas mullite dan peningkatan dominasi kuarsa, yang menegaskan bahwa aktivasi berhasil memodifikasi struktur tanpa menghilangkan karakter dasar abu layang [24]. Temuan serupa dilaporkan oleh Saputro dkk. (2022). Spektrum FTIR sebelum dan sesudah aktivasi HCl tetap menunjukkan keberadaan gugus –OH, Si–O–Si, dan aluminosilikat, namun terjadi pergeseran bilangan gelombang dan perubahan ketajaman pita. Peneliti menyimpulkan bahwa perubahan tersebut berasal dari pembukaan pori dan restrukturisasi permukaan, bukan pembentukan gugus fungsi baru [25].

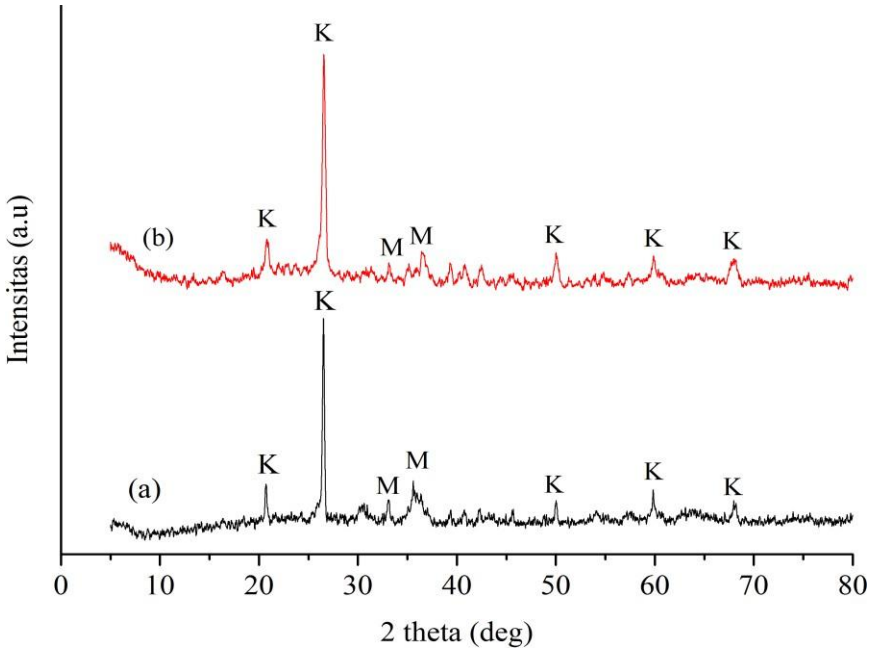


Gambar 2. Spektra FT-IR abu layang sebelum (a) dan setelah aktivasi (b)

Table 2. Interpretasi spektra IR abu layang sebelum dan sesudah aktivasi

Bilangan gelombang (cm^{-1})		
Abu layang	**Abu layang teraktivasi**	**Keterangan**
462	462	Vibrasi tekuk asimetris Si-O-Si
779	794	Vibrasi ulur Si-O
1080	1088	Vibrasi ulur asimetri Si-O dan Al-O
1635	1635	Vibrasi tekuk gugus silanol
3448	3448	Vibrasi ulur -OH

Difraktogram XRD dari abu layang batubara sebelum dan sesudah aktivasi ditunjukkan dalam Gambar 3. Data difraktogram diinterpretasi dengan cara membandingkan nilai 2θ dan d-*spacing* puncak utama yang muncul pada difraktogram abu layang batubara dengan data difraktogram *American Mineralogist Crystal Structure Database* (AMCSD). Berdasarkan data difraktogram AMCSD, puncak yang muncul pada 2θ 20,86; 26,64; 50,14; 59,97 dan 68,14° dengan d-*spacing* berturut-turut 4,2582; 3,461; 1,893; 1,5426 dan 1,3761 Å merupakan puncak kuarsa (SiO2), sedangkan puncak yang muncul pada 2θ 33,21 dan 35,27° dengan d-*spacing* 2,6975 dan 2,5450 Å merupakan puncak mullit (Al6Si2O13). Dengan data tersebut, komponen penyusun abu layang batubara tersebut dapat ditentukan seperti yang ditampilkan pada Tabel 3.



Gambar 3. Difraktogram abu layang batubara sebelum (a) dan sesudah (b) aktivasi (M:Mullit, K:Kuarsa)

Table 3. Data Difraktogram abu layang batubara sebelum dan sesudah aktivasi

Sampel	2θ (°)	d-spacing (Å)	Intensitas (%)	Keterangan
Abu layang batubara sebelum diaktivasi	20,71	2,28	16,47	Kuarsa
	26,52	3,36	100	Kuarsa
	33,15	2,70	9,95	Mullit
	35,61	2,52	14,66	Mullit
	50,07	1,82	8,68	Kuarsa
	59,82	1,54	14,73	Kuarsa
	68,1	1,37	6,23	Kuarsa
Abu layang batubara teraktivasi	20,83	4,26	15,62	Kuarsa
	26,54	3,35	100	Kuarsa
	33,16	2,70	8,38	Mullit
	36,07	2,55	6,62	Mullit
	50,05	1,82	13,74	Kuarsa
	59,91	1,54	11,09	Kuarsa
	68,05	1,37	9,56	Kuarsa

Berdasarkan Tabel 3 menunjukkan bahwa mineral kursa dan mullit muncul pada abu layang batubara sebelum dan setelah aktivasi. Dari tabel terlihat bahwa mineral kuarsa lebih mendominasi dan memiliki intensitas yang lebih tinggi dari mullit, sehingga dapat disimpulkan bahwa komponen utama dari abu layang batubara adalah kuarsa. Puncak-puncak pada abu layang batubara setelah aktivasi mengalami sedikit penurunan intensitas baik pada mineral kuarsa maupun mullit, hal ini mungkin disebabkan oleh terjadinya proses pelarutan sebagian *glassy* pada permukaan abu layang batubara oleh asam pekat seperti yang dijelaskan sebelumnya, sehingga tingkat kristanilitas dari abu layang batubara setelah aktivasi mengalami sedikit penurunan.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kuarsa (SiO_2) dan mullit (Al6Si2O13) merupakan fase kristalin utama yang menyusun abu layang batubara, dengan kuarsa sering ditemukan sebagai fase yang paling dominan. Analisis XRD pada abu layang batubara secara konsisten memperlihatkan puncak difraksi yang kuat yang berkaitan dengan kuarsa dan mullit di atas latar belakang fase amorf aluminosilikat. Penelitian oleh Manyepedza dan Kabomo (2026) melaporkan bahwa pola XRD abu layang dari berbagai PLTU menunjukkan kesamaan mineralogi, yaitu didominasi oleh fase kristalin kuarsa dan mullit, dengan intensitas puncak kuarsa yang umumnya paling tinggi karena kuarsa berasal dari mineral asal batubara yang stabil selama proses pembakaran [26]. Penelitian Rosa dkk. (2021) pada abu layang batubara

menunjukkan bahwa kuarsa merupakan fase kristalin dominan dengan persentase relatif sekitar 77,9%, sedangkan mullit sekitar 8,0%. Hasil tersebut menegaskan bahwa kuarsa merupakan penyusun utama abu layang yang paling stabil terhadap temperatur pembakaran tinggi [27]. Dengan demikian, penelitian yang telah dilakuakn telah sesuai dengan penelitian serupa yang telah dilaporkan sebelumnya.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dapat disimpulkan bahwa persen komposisi dari SiO_2 setelah diaktivasi mengalami kenaikan dari 33,33 % menjadi 41,67 %, begitupun Al_2O_3 dari 16% menjadi 17%. Sementara untuk oksida Fe_2O_3 dan CaO mengalami penurunan. Analisis abu layang batubara dengan FTIR menunjukkan adanya vibrasi utama gugus fungsi dari Si-O-Si pada bilangan gelombang 462 dan 1080 cm^{-1}, Al-O 1088 cm^{-1}, serta gugus silanol pada bilangan gelombang 1635 cm^{-1}. Berdasarkan hasil karakterisasi XRD diperoleh hasil bahwa penyusun utama dari abu layang batubara adalah kuarsa dan mullit.

References

[1] A. R. K. Gollakota, V. Volli, and C. M. Shu, "Progressive utilisation prospects of coal fly ash: A review," *Science of The Total Environment*, vol. 672, pp. 951–989, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2019.03.337.

[2] W. Rosita *et al.*, "Sequential alkaline-organic acid leaching process to enhance the recovery of rare earth elements from Indonesian coal fly ash," *Journal of Rare Earths*, vol. 42, no. 7, pp. 1366–1374, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.JRE.2023.09.001.

[3] M. J. Lesmana, T. Nozaki, X. Fan, A. Darmawan, and F. B. Juangsa, "Utilization of fly ash for CO2 capture through mineral carbonation: An experimental study with Indonesian coal fly ash," *Chin. J. Chem. Eng.*, Dec. 2025, doi: 10.1016/J.CJCHE.2025.10.025.

[4] D. A. A. Besari, F. Anggara, W. Rosita, and H. T. B. M. Petrus, "Characterization and mode of occurrence of rare earth elements and yttrium in fly and bottom ash from coal-fired power plants in Java, Indonesia," *Int. J. Coal Sci. Technol.*, vol. 9, no. 1, p. 20, Dec. 2022, doi: 10.1007/s40789-022-00476-2.

[5] A. Dindi, D. V. Quang, L. F. Vega, E. Nashef, and M. R. M. Abu-Zahra, "Applications of fly ash for CO2 capture, utilization, and storage," *Journal of CO2 Utilization*, vol. 29, pp. 82–102, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.JCOU.2018.11.011.

[6] Z. T. Yao *et al.*, "A comprehensive review on the applications of coal fly ash," *Earth. Sci. Rev.*, vol. 141, pp. 105–121, Feb. 2015, doi: 10.1016/J.EARSCIREV.2014.11.016.

[7] M. R. Kamal, A. Bediwy, D. Kanaan, M. S. Alam, and K. M. A. Hossain, "Valorization of partially combusted wood fly ash with nano-silica as low-impact alternative to coal fly ash in cementitious composites," *J. Clean. Prod.*, vol. 538, p. 147251, Jan. 2026, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2025.147251.

[8] J.-H. Chang *et al.*, "Fly ash carbon composites: A breakthrough in CO2 capture and energy efficiency," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 135, pp. 450–473, Jan. 2026, doi: 10.1016/J.AEJ.2025.11.049.

[9] T. M. Mogashane, A. M. Motlatle, B. N. Mosoma, L. Mokoena, and J. Tshilongo, "Sustainable Remediation of Acid Mine Drainage Using Coal Fly Ash: A Comprehensive Review and Bibliometric Analysis," *Chemical Engineering Journal Advances*, p. 101047, Jan. 2026, doi: 10.1016/J.CEJA.2026.101047.

[10] W. Feng *et al.*, "Waste minimization in zeolites synthesis from coal fly ash by recycling alkaline waste," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 14, no. 1, p. 121110, Feb. 2026, doi: 10.1016/J.JECE.2026.121110.

[11] D. Valeev, A. Mikhailova, and A. Atmadzhidi, "Kinetics of Iron Extraction from Coal Fly Ash by Hydrochloric Acid Leaching," *Metals (Basel).*, vol. 8, no. 7, p. 533, Jul. 2018, doi: 10.3390/met8070533.

[12] C. Yang *et al.*, "Exploring the synergistic activation mechanism of mechanochemical processing in the enhancement of high-alumina coal fly ash utilization," *Waste Management*, vol. 206, p. 115067, Sep. 2025, doi: 10.1016/J.WASMAN.2025.115067.

[13] S. Banerjee, G. C. Sharma, M. C. Chattopadhyaya, and Y. C. Sharma, "Kinetic and equilibrium modeling for the adsorptive removal of methylene blue from aqueous solutions on of activated fly ash (AFSH)," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 1870–1880, Sep. 2014, doi: 10.1016/J.JECE.2014.06.020.

[14] M. Kurniasih, N. H. Aprilita, R. Roto, and M. Mudasir, "Modification of coal fly ash for high capacity adsorption of methylene blue," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 11, p. 101101, Jun. 2025, doi: 10.1016/J.CSCEE.2025.101101.

[15] S. Ghambi, L. Ren, J. Pan, L. Zhang, S. Shi, and C. Zhou, "Carboxylic acid leaching for rare earth element recovery from coal fly ash after pretreatment: a review," *Miner. Eng.*, vol. 246, p. 110376, Sep. 2026, doi: 10.1016/J.MINENG.2026.110376.

[16] Y. Zheng, S. Lan, X. Hu, and Z. Wang, "Influence of dissolved Al(III) on electrochemical iron removal from coal fly ash hydrochloric acid leachate," *Waste Management*, vol. 215, p. 115438, Apr. 2026, doi: 10.1016/J.WASMAN.2026.115438.

[17] I. Safdar, Q. Subhani, N. Muhammad, and I. Hussain, "Investigation of physicochemical properties and leaching behavior of coal fly ash and bottom ash by using XRF and AAS: Multivariate analysis," *Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc.*, vol. 232, p. 107272, Oct. 2025, doi: 10.1016/J.SAB.2025.107272.

[18] Z. Hussain *et al.*, "Modification of coal fly ash and its use as low-cost adsorbent for the removal of directive, acid and reactive dyes," *J. Hazard. Mater.*, vol. 422, p. 126778, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2021.126778.

[19] A. Eteba, M. Bassyouni, and M. Saleh, "Utilization of chemically modified coal fly ash as cost-effective adsorbent for removal of hazardous organic wastes," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 20, no. 7, pp. 7589–7602, Jul. 2023, doi: 10.1007/s13762-022-04457-5.

[20] T. Fan *et al.*, "Significant effect of saline wastewater on CO2 mineralization by coal fly ash," *Miner. Eng.*, vol. 233, p. 109600, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.mineng.2025.109600.

[21] S. A. Khan, I. Uddin, S. Moeez, and A. Ahmad, "Fungus-Mediated Preferential Bioleaching of Waste Material Such as Fly - Ash as a Means of Producing Extracellular, Protein Capped, Fluorescent and Water Soluble Silica Nanoparticles," *PLoS One*, vol. 9, no. 9, p. e107597, Sep. 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0107597.

[22] M. Rizal B. *et al.*, "Determination of Kinetic and Thermodynamic Parameters of Pb(II) Ion Adsorption Using Dithizone-Immobilized Coal Fly Ash," *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, vol. 29, no. 1, pp. 1–9, Feb. 2026, doi: 10.14710/jksa.29.1.1-9.

[23] H. Zhu, G. Liang, J. Xu, Q. Wu, and M. Zhai, "Influence of rice husk ash on the waterproof properties of ultrafine fly ash based geopolymer," *Constr. Build. Mater.*, vol. 208, pp. 394–401, May 2019, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.03.035.

[24] W. Gracias, R. Al Kausar, and E. Riskiani, "Comparative Study of Physical and Chemical Activation of Coal Fly Ash as Potential Adsorbent Based on FTIR and XRD Analyses," *Greensphere: Journal of Environmental Chemistry*, vol. 6, no. 1, pp. 56–62, Jun. 2026, doi: 10.14710/gjec.2026.31680.

[25] S. Saputro, L. Mahardiani, M. Masykuri, S. Yamtinah, and Cinthia, "Modification of coal fly ash waste by using core-shell method for Cu2+ adsorbent material," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2190, no. 1, p. 012002, Mar. 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2190/1/012002.

[26] T. Manyepedza and M. T. Kabomo, "Sustainable methods for the recovery of silica from coal fly ash for industrial applications," *Discover Chemistry*, vol. 3, no. 1, p. 74, Feb. 2026, doi: 10.1007/s44371-026-00540-9.

[27] T. Rosa, A. Martins, M. Santos, T. Trindade, and N. Nunes, "Coal Fly Ash Waste, a Low-Cost Adsorbent for the Removal of Mordant Orange Dye from Aqueous Media," *J. Braz. Chem. Soc.*, 2021, doi: 10.21577/0103-5053.20210116.