

INVESTIGASI KEBERADAAN DAN KETERKAITAN UNSUR KELUMIT PADA BATUBARA FORMASI MANUMBAR PIT Y-2 DI CEKUNGAN KUTAI, KALIMANTAN TIMUR

An Investigation Into the Presence and Interrelationships of Trace Elements in the Y-2 PIT Manumbar Formation Coal, Located in the Kutai Basin in East Kalimantan

EZZA R. R. PRASETYO^{1*}, EKO B. PURWASATRIYA^{2**}, AKHMAD K. GIBRAN^{2*},
DIDIK J. MULYANTO^{3*}

¹ PT. Pelsart Tambang Kencana, Jakarta

² Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto

³ PT. Indexim Coalindo

e-mail korespondensi: akgibran@unsoed.ac.id

* Kontributor Utama

**Korespondensi Anggota

ABSTRAK

Cekungan Kutai yang terkenal sebagai cekungan penghasil batubara merupakan salah satu cekungan terbesar di Indonesia. Batubara terdiri dari beberapa unsur penyusun antara lain unsur primer, unsur kelumit, maseral, mineral pengotor, dan komponen lainnya. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan penyelidikan rinci terhadap komposisi unsur batubara, dengan fokus khusus pada unsur kelumit. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui sifat unsur, potensi, dan konsentrasi unsur kelumit dalam batubara, serta hubungannya dengan nilai total sulfur dan kandungan abu. Pemeriksaan menggunakan ICP-OES (*Induktif Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometer*), dilakukan terhadap 11 lapisan batubara PIT Y-2 untuk menilai keberadaan unsur kelumit, unsur utama, nilai total sulfur, dan kandungan abu. Temuan penelitian menjelaskan bahwa distribusi dan konsentrasi elemen kelumit pada grafik analisis kemostratigrafi dikategorikan menjadi lima fitur berbeda, yang kemudian direpresentasikan sebagai kemozon. Selain itu, diketahui bahwa kemozon 3 menunjukkan potensi paling besar, karena semua elemen mengalami pengkayaan substansial di area ini dengan total 304,88 ppm di sampel pada seam E18U1. Telah diketahui bahwa beberapa elemen menunjukkan korelasi dengan fluktuasi keseluruhan konsentrasi sulfur dan abu yang ditemukan dalam batubara. Unsur kelumit Cd, Mn, dan Pb memiliki korelasi positif dengan variasi kadar total sulfur, sedangkan Cr, Cu, Pb, dan V berhubungan dengan korelasi positif terhadap perubahan nilai kandungan abu. Studi ini meningkatkan pemahaman kita mengenai distribusi spasial dan kelimpahan unsur kelumit dalam batubara dari wilayah penghasil batubara terbesar di Indonesia. Data ini dapat dimanfaatkan untuk membangun model geokimia dan stratigrafi yang lebih tepat dalam penelitian selanjutnya.

Kata kunci: cekungan Kutai, kemostratigrafi, kadar sulfur, kandungan abu, unsur kelumit.

ABSTRACT

The Kutai Basin, renowned as a coal-bearing basin, ranks among the largest basins in Indonesia. Coal consists of various constituents, including major elements, trace elements, macerals, mineral impurities, and other components. The purpose of this research is to conduct a more in-depth analysis of the content of coal, with a specific focus on trace components. This study aimed to investigate the features, potential, enrichment of trace elements, and their correlation with the total sulfur and ash content in coal. An examination using ICP-OES (Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometer) was conducted on 11 coal seams from Y-2 PIT.

This analysis aimed to identify the level of trace elements, main elements, total sulfur, and ash content in the coal. The study's findings revealed that the elements' distribution and characteristics on the chemostratigraphy analysis chart were categorized into five distinct features, subsequently represented as chemozone. Moreover, it is established that the area with the highest potential is chemozone 3, where all trace elements undergo substantial enrichment within this region. It is well-established that several trace elements exhibit a positive correlation with changes in the overall sulfur and ash content of coal. The trace elements shown to be positive correlation linked to variations in the overall sulfur level are Cd, Mn, and Pb. On the other hand, the elements Cr, Cu, Pb, and V are tied positive correlation with changes in the ash content value. This study expands our understanding of the distribution and concentration of trace elements in coal from Indonesia's largest coal producing area. This data can be utilized to create more precise geochemical and stratigraphic models in the future.

Keywords: Kutai basin, chemostratigraphy, sulphur content, ash content, trace elements.

PENDAHULUAN

Salah satu cekungan penghasil batubara di Indonesia adalah Cekungan Kutai, Kalimantan Timur (Anggara dkk., 2024). Daerah penelitian berada pada tatanan tektonik yang cukup kompleks karena berbatasan dengan *Mangkalihat Platform* (bagian Blok Schwarner) yang dibatasi zona sesar Sangkulirang dan sesar Bengalon (Heriawan dkk., 2020). Berdasarkan kondisi geologi tersebut, tentunya cukup mempengaruhi proses deposisi material sedimen dan unsur kelumit yang tertransportasi pada batubara Formasi Manumbar, Cekungan Kutai (Anggara dkk., 2024).

Beberapa unsur kelumit dapat dijadikan parameter untuk mengidentifikasi lapisan yang berguna dalam korelasi stratigrafi dan asosiasinya untuk menganalisa lingkungan pengendapan (Sumardi dan Darijanto, 1998; Patria dkk., 2024). Belum adanya penelitian dan publikasi lebih lanjut mengenai karakteristik unsur kelumit pada batubara Cekungan Kutai, menjadikan topik ini menarik untuk dikaji lebih lanjut.

METODE

Analisis Data Geokimia Anorganik

Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) memanfaatkan induksi medan magnet dan listrik sebagai sumber energi untuk menstimulasi elektron dari atom dalam sampel, mengikuti premis dasar pendekatan analitis ini. Analisis ini merupakan metode analisis multi-unsur untuk menentukan unsur-unsur kelumit (*trace element*) dalam suatu batuan pada tingkat konsentrasi ppm (*part per million*) (Balaram, 2019).

Untuk mengetahui proses pengkayaan unsur kelumit diperlukan analisis faktor pengkayaan (FP) untuk mendapatkan informasi *trend* kandungan unsur. Selain itu, analisis kurva silang dan multivariat *Principle Component Analysis* (PCA) juga dilakukan untuk mengelompokkan unsur tertentu, sehingga dapat diketahui karakteristik unsur kelumit yang selanjutnya dapat dilakukan penarikan korelasi unsur sehingga menggambarkan zona kemostratigrafi (Algeo dan Liu, 2020; Pedernera, Mancuso dan Ottone, 2022; Valetich dkk., 2022).

Selain informasi tren unsur, diperlukan juga informasi mengenai karakterisasi unsur kelumit yang dilakukan dengan Analisis multivariat PCA dan Kurva Silang menggunakan perangkat lunak atau *PAST Statistical Software*.

Analisis Sulfur Batubara

Analisis sulfur dilakukan untuk mengetahui nilai total sulfur pada batubara yang digunakan sebagai salah satu parameter kualitas batubara. Selain itu total sulfur juga dapat dikaitkan dengan perubahan muka air laut dan gejala geologi lainnya seperti asosiasinya terhadap keberadaan unsur kelumit (Peng dkk., 2016; Chen dkk., 2022).

Analisis kandungan sulfur pada batubara dilakukan menggunakan perangkat *Sulfur Analyzer* LECO S144DR & LECO S832. Hasil analisis sulfur akan menggambarkan nilai total sulfur dari batubara yang akan dijadikan salah satu parameter korelasi terhadap kandungan unsur kelumit.

Analisis Abu Batubara

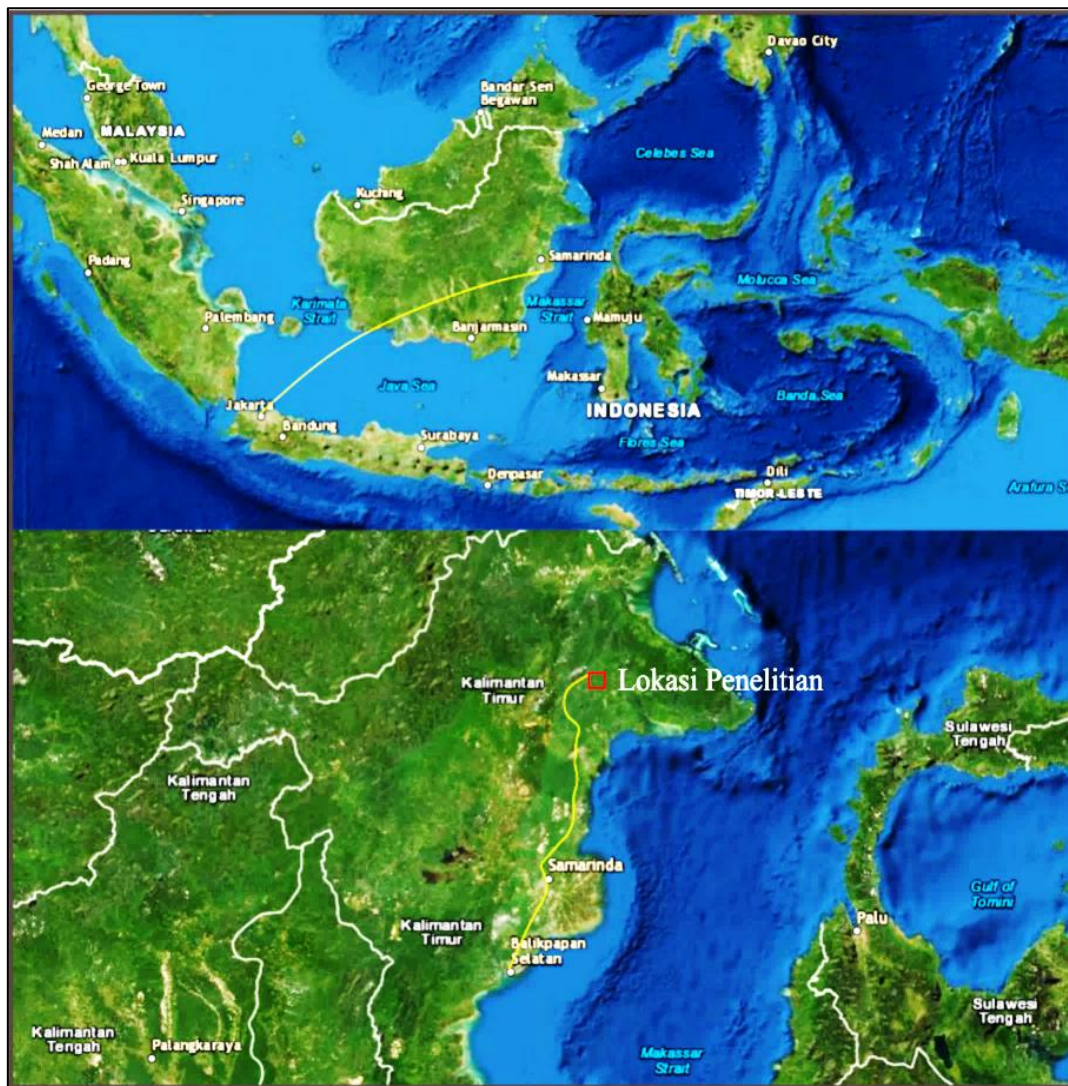
Kandungan abu batubara merupakan sisa zat anorganik yang terdapat dalam batubara.

Kandungan abu berasal dari pengotor bawaan dalam proses pengendapan batubara maupun pengotor yang berasal dari proses penambangan. Abu ditentukan dengan menimbang residu yang tersisa setelah pembakaran sekitar 1 g batubara di bawah kondisi berat sampel, suhu, waktu, atmosfer, dan spesifikasi peralatan yang dikontrol secara ketat (Liu dkk., 2022).

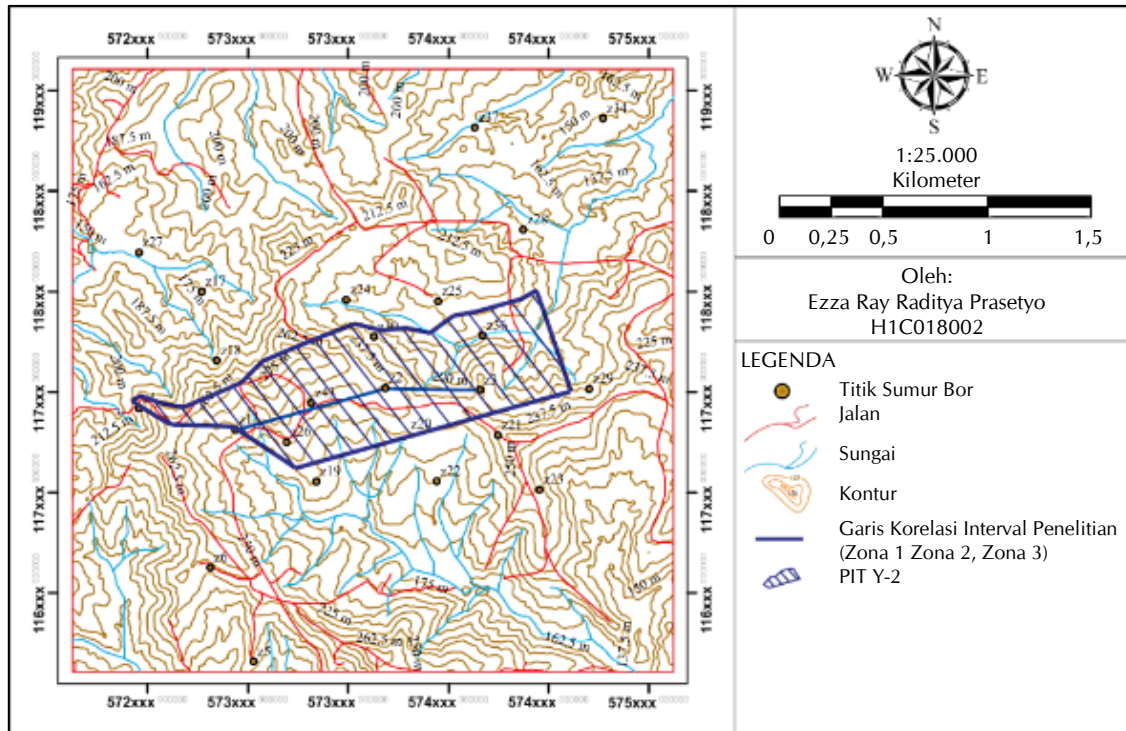
Kandungan abu umumnya terdiri dari Silika, Aluminium, Besi dan Kalsium serta unsur lain seperti Titanium, Mangan, Magnesium, Sodium dan Kalium dimana semuanya hadir dalam bentuk silikat, oksida, sulfida, sulfat dan fosfat. Unsur lain seperti arsen, tembaga, timbal, nikel, seng dan uranium dapat hadir dalam jumlah yang sangat kecil (Sun dkk., 2024).

Lokasi dan Pengambilan Sampel

Penelitian dilakukan di area konsesi PT. Indexim Coalindo, Kecamatan Kaibun, Kabupaten Kutai Timur, Kalimantan Timur (Gambar 1). Area tersebut merupakan pembukaan tambang di mana beberapa lapisan dianalisis kandungan sulfur dan kualitas abu sebanyak 1 sampel dari masing-masing seam dengan jumlah sebanyak 11 seam. Tingkat unsur kelumit diperoleh dari sampel pengeboran langsung untuk meminimalkan kontaminasi unsur sebanyak 1 sampel dari masing-masing seam menggunakan analisis ICP-OES. Sampel tersebut diambil pada 11 lapisan seam batubara di berbagai titik pengeboran secara berurutan secara stratigrafi sehingga diperoleh 11 sampel (Gambar 2).



Gambar 1. Peta lokasi dan kesampaian daerah penelitian (sumber Google Earth dengan skala 1:500.00)



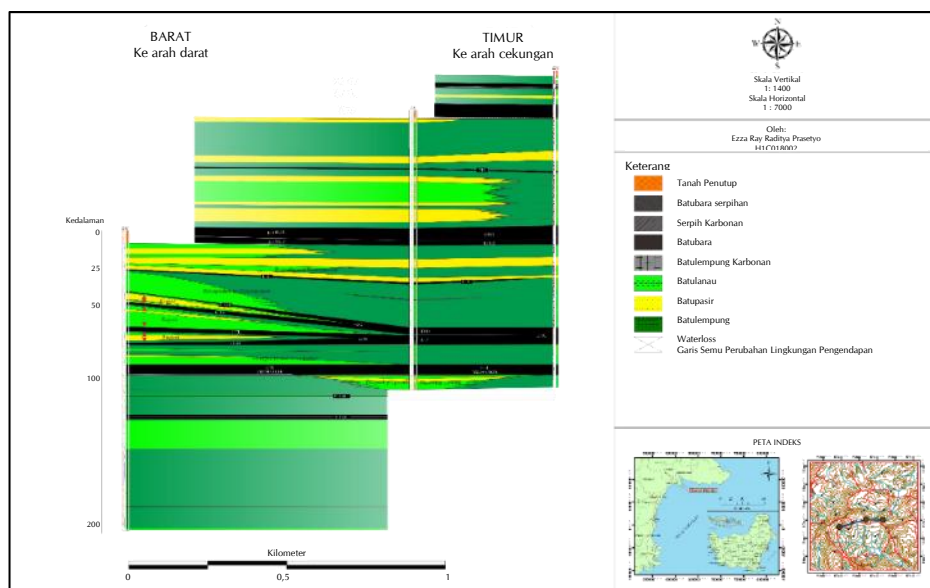
Gambar 2. Peta sebaran titik bor dan interval studi khusus pengambilan sampel (hasil penelitian)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Stratigrafi Interval Penelitian

Lapisan batubara dianalisis dengan menggunakan korelasi antar titik pengeboran untuk memperoleh gambaran stratigrafi.

Jahitan paling awal adalah jahitan E16L dan E16U, dimana E16L memiliki ketebalan paling konstan. Saat bergerak ke barat, belahan tipis muncul, membelah lapisan menjadi E18A dan E17U. Jahitan E18A terbagi menjadi E18AU dan E18AL, sedangkan jahitan E17U terbagi menjadi E17U dan E17M (Gambar 3).



Gambar 3. Korelasi stratigrafi interval studi khusus penelitian (hasil penelitian)

Penyajian Data

Kumpulan data yang digunakan mencakup konsentrasi unsur utama yang didapat dari konversi senyawa oksida pada kandungan abu batubara, unsur kelumit, dan nilai total sulfur serta kandungan abu yang mewakili parameter kualitas batubara. Konsentrasi senyawa oksida kandungan abu batubara yang telah di konversi menjadi utama disajikan dalam Tabel 1 dan ditampilkan menggunakan satuan (%) sampel, sedangkan data unsur kelumit yang didapatkan dari hasil analisis ICP-OES disajikan pada Tabel 2 menggunakan satuan ppm (*part per million*). Untuk kumpulan data hasil analisis kualitas

batubara mencakup nilai total sulfur dan kandungan abu disajikan dalam (%adb) atau *air dried base* pada (Tabel 3).

Analisis Kandungan Unsur Utama

Korelasi kemostratigrafi adalah metode yang digunakan untuk mempelajari konsentrasi unsur-unsur seperti silika, aluminium, besi, kalsium, fosfor, kalium, dan sulfur dalam lapisan batubara (Ramkumar, 2015b, 2015a). Perubahan ini dapat disebabkan oleh perubahan karakteristik lapisan batubara, seperti ukuran butir, lingkungan pengendapan,

Tabel 1. Data unsur utama hasil analisis kandungan abu batubara (%) menggunakan analisis ICP-OES

Unsur Kimia (%)	Nama Seam										
	E17L	E17M	E17U	E18AL	E18AU	E18L	E18U2	E18U1	E18	E20	E21
Si	3,58	14,85	3,60	15,43	16,22	12,56	19,52	10,90	2,84	11,19	11,47
Al	3,18	7,13	2,22	12,57	10,78	5,14	7,76	10,86	6,23	5,45	8,46
Fe	11,61	17,36	14,77	11,06	8,13	19,47	19,03	24,15	27,86	12,52	9,16
Ca	23,22	11,16	26,23	8,62	11,87	12,04	4,72	6,73	17,62	13,23	11,93
Mg	6,24	2,96	5,99	1,89	2,15	1,89	1,23	1,19	5,05	3,00	3,09
Na	0,89	0,33	0,64	0,17	0,15	0,17	0,21	0,17	0,53	0,52	0,35
P	0,04	0,15	0,05	0,90	0,16	0,11	0,11	0,09	0,08	0,03	0,06
Ti	0,20	0,24	0,17	0,28	0,46	0,23	0,39	0,76	0,29	0,61	0,50
S	3,68	6,59	3,72	2,62	2,09	4,91	3,63	3,33	7,13	2,44	9,83
K	0,42	0,92	0,29	1,00	0,98	0,52	0,35	0,27	0,42	0,53	0,71

Tabel 2. Data unsur kelumit hasil analisis ICP-OES

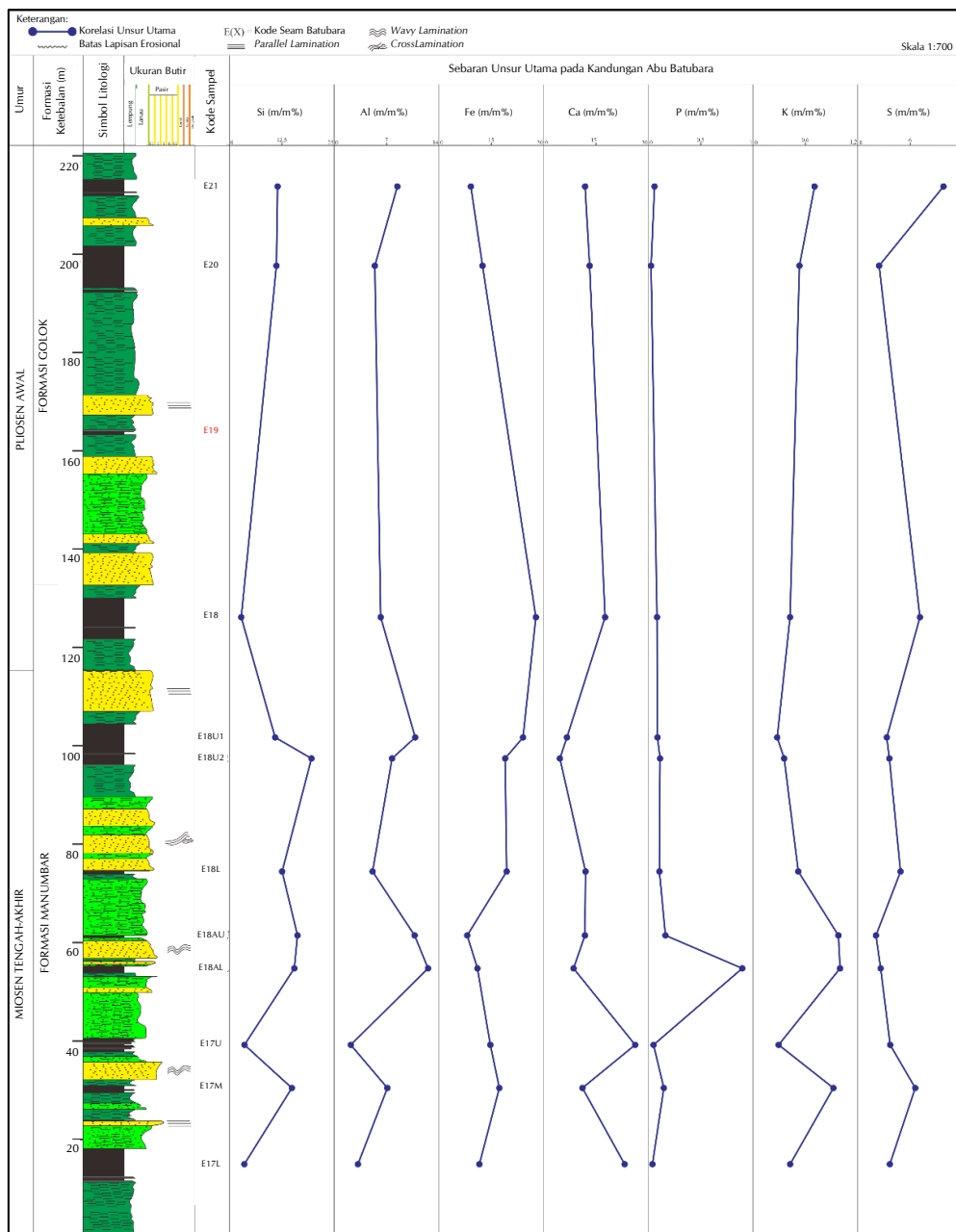
Nama Unsur (ppm)	Nama Seam										
	E17L	E17M	E17U	E18AL	E18AU	E18L	E18U2	E18U1	E18	E20	E21
Be	0,04	0,39	0,02	0,26	0,15	0,25	1,04	0,23	0,03	0,03	0,05
Cd	0,07	0,05	0,07	0,07	0,02	0,07	0,03	0,12	0,09	0,14	0,18
Cr	0,47	7,34	0,58	7,61	8,56	2,57	4,52	1,75	0,49	2,40	3,31
Cu	2,47	15,05	2,06	6,72	8,71	8,06	10,22	4,53	4,15	3,85	3,81
Mn	31,18	75,22	35,90	73,04	128,24	164,83	214,67	263,63	100,99	100,49	139,92
Ni	1,63	5,76	1,10	4,26	3,19	3,98	4,18	12,00	0,88	3,86	2,15
Pb	0,52	2,23	0,44	1,70	1,19	1,24	1,89	0,78	1,15	1,45	1,49
V	0,91	20,46	0,96	16,12	16,37	5,63	10,16	3,87	1,10	4,60	6,37
Zn	3,18	9,33	1,74	4,30	3,20	4,54	3,32	15,77	3,99	5,45	3,89
As	0	0	0	5,27	3,05	4,06	4,86	1,97	0	0	0
Se	0	0	0	0,24	0,20	0,26	0,30	0,19	0	0	0
Hg	0	0	0	0,05	0,04	0,05	0,06	0,04	0	0	0
Total Unsur Kelumit	40,47	135,83	42,87	119,64	172,92	195,54	255,25	304,88	112,87	122,27	161,17

Tabel 3. Data hasil analisis sulfur dan abu batubara (%adb)

(%adb)	Nama Seam										
	E17L	E17M	E17U	E18AL	E18AU	E18L	E18U2	E18U1	E18	E20	E21
Total Sulfur	0,12	0,26	0,36	0,36	0,37	1,05	0,20	0,20	0,16	1,13	1,32
Kandungan abu	3,33	7,26	6,92	5,75	7,42	5,59	5,54	3,67	4,10	4,14	7,93

dan kondisi paleoredoks (Takaya *dkk.*, 2018; Bennett dan Canfield, 2020; Pecorari *dkk.*, 2023). Al dan Si menunjukkan kurva yang berlawanan, namun Al dan Si mempunyai orientasi konsentrasi yang sama (Tribovillard *dkk.*, 2006). Grafik menunjukkan pengkayaan authigenik akibat pelarutan batu besi, sedangkan unsur Ca menggambarkan kondisi sedimentasi pada saat pengendapan (Farkaš, Frýda dan Holmden, 2016; Albut *dkk.*, 2019). Unsur Ca berasosiasi dengan bahan karbonat dan lingkungan laut tertutup, sedangkan unsur

Fe berasosiasi dengan sulfur anorganik seperti pirit dalam batubara. Grafik elemen P menunjukkan anomali konsentrasi pada lapisan E18AL, yang menunjukkan regresi lokal selama pengendapan, menyebabkan lapisan terpecah menjadi E18AU dan E18AL, terisi sedimen. Grafik unsur Al dan K menunjukkan hubungan searah dengan mineral pirit, sedangkan grafik unsur Fe dan S menunjukkan hasil sebaliknya karena adanya sulfur organik pada resin (Gambar 4).



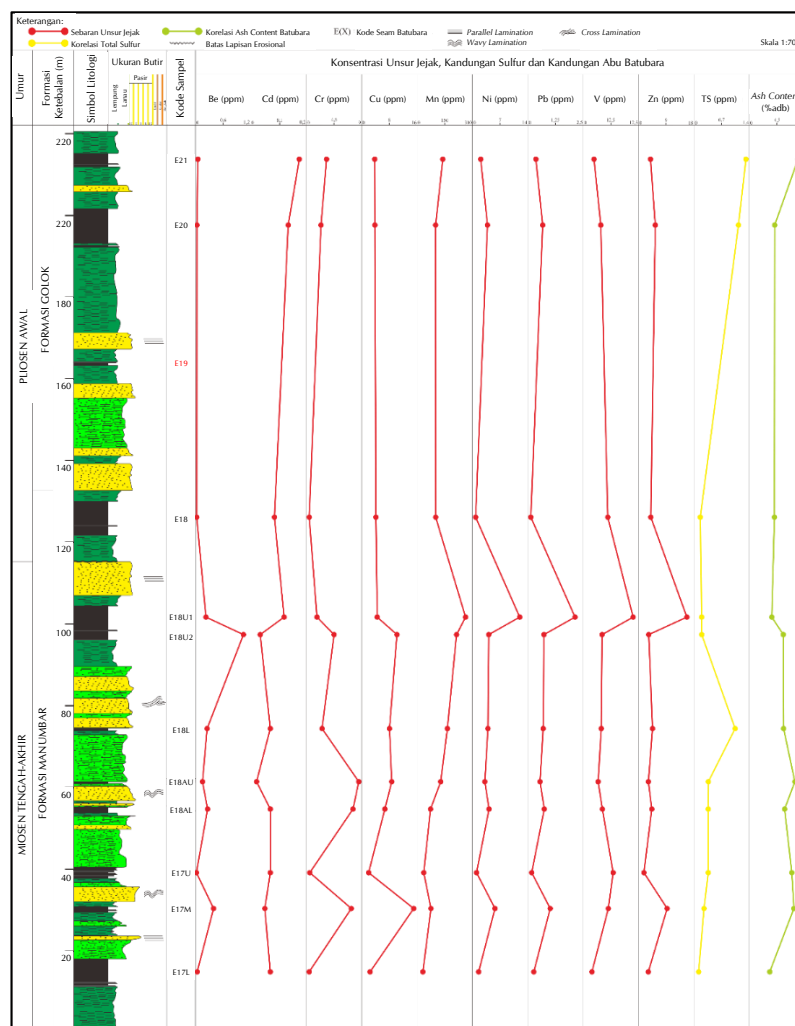
Gambar 4. Korelasi profil litologi dengan sebaran unsur utama (hasil penelitian)

Analisis Kandungan Unsur Kelumit

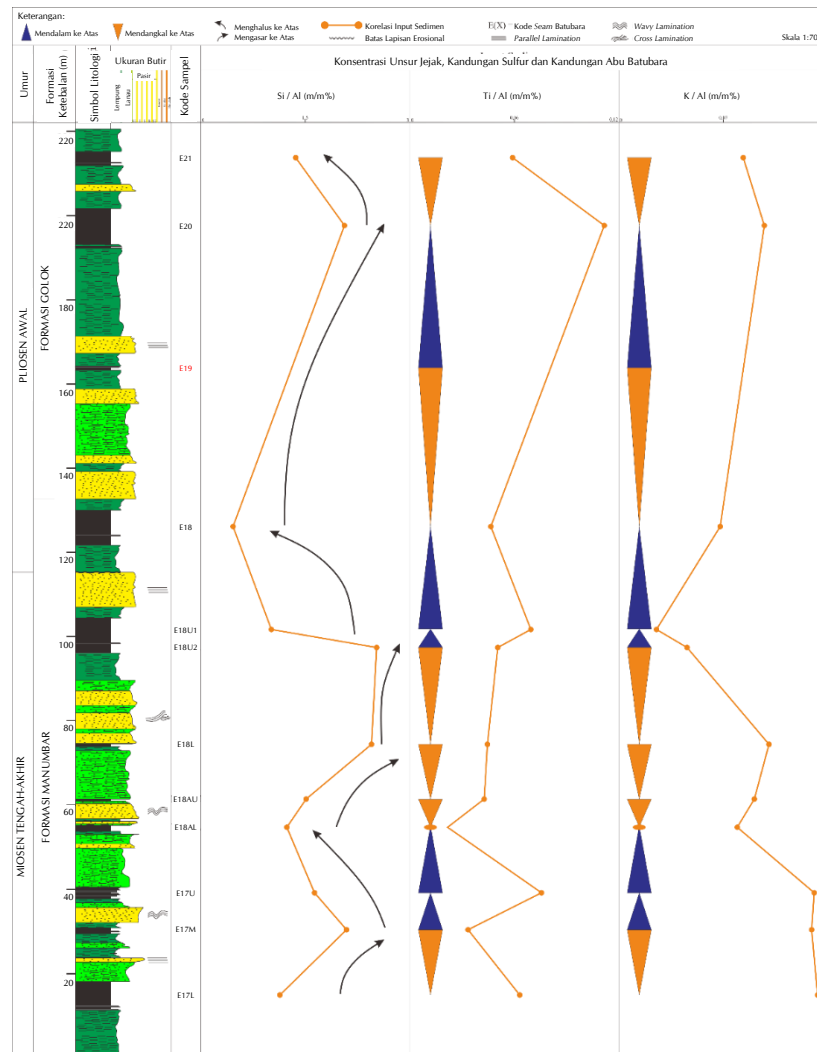
Penelitian ini menggunakan elemen kelumit seperti berilium, kadmium, tembaga, mangan, timbal, nikel, kromium, vanadium, dan seng untuk menginterpretasikan sampel batubara (Gambar 5). Grafik unsur Be menunjukkan perubahan konsentrasi yang signifikan pada lapisan E18U2 yang menunjukkan hubungannya dengan batuan granit pegmatit (Wang dan Lei, 2024). Grafik unsur Cd dan Mn menunjukkan pola serupa, kemungkinan terkait dengan bahan organik atau karbonat (Cui dkk., 2019). Harmoni konsentrasi unsur Cr dan Cu dalam batubara menunjukkan adanya hubungan afinitas organik yang kuat (Patricia dkk., 2020). Konsentrasi Ni, Pb, V, dan Zn menunjukkan adanya hubungan afinitas organik yang kuat pada batubara (Ramkumar, 2015a). Kadar sulfur dan abu mewakili parameter

kualitas batubara yang mempengaruhi keberadaan unsur kelumit (Dai dkk., 2014, 2020). Konsentrasi aluminium, titanium, silika, dan kalium dalam batuan sedimen dapat digunakan untuk mengukur masukan sedimen dan menunjukkan perubahan pasokan limbah (Zubovic, Stadnichenko dan Sheffey, 1961; Sageman dkk., 2003). Unsur Ti pada batubara dapat berasal dari bahan organik dan mineral lempung (Finkelman, 1993).

Al dan K merupakan unsur yang berkaitan dengan mineral lempung dan bahan berbutir halus (Finkelman, Palmer dan Wang, 2018). Grafik unsur Ti terhadap unsur Al dan unsur K terhadap unsur Al dapat menginterpretasikan perubahan relatif permukaan laut, karena unsur Ti diendapkan di lingkungan yang lebih dangkal dan unsur K di lingkungan yang lebih dalam (Gambar 6).



Gambar 5. Korelasi profil litologi dengan sebaran unsur kelumit, total sulfur, dan kandungan abu



Gambar 6. Korelasi profil litologi dengan unsur utama input sedimen

Batubara tidak memiliki ukuran butir sehingga sulit untuk menginterpretasikan perubahan ukuran butir (Xia *dkk.*, 2021). Namun perubahan ukuran butir dapat diartikan dari lapisan dan belahan akibat pola sedimentasi. Grafik Si/Al dapat digunakan sebagai parameter perubahan butir, dengan nilai Si/Al yang lebih tinggi menghasilkan butir yang lebih kasar. Analisis grafik masukan sedimen menunjukkan perbandingan terbalik antara nilai Ti/Al untuk Si/Al dan K/Al, kemungkinan karena mekanisme pasokan sampah yang berbeda. Unsur Ti berasal dari proses yang kompleks, sedangkan unsur Si berasal dari kerusakan sistem vulkanik dan pengendapan fluvial (Finkelman, Palmer dan Wang, 2018). Unsur K berkerabat dekat dengan mineral lempung dan material berbutir halus. Membandingkan grafik-grafik ini dapat

menunjukkan perubahan pada permukaan laut relatif lokal dan proksi ukuran butir.

Analisis Faktor Pengkayaan

Analisis faktor pengkayaan (FP) atau biasa disebut *enrichment factor* (EF) dilakukan untuk mengetahui kondisi apakah suatu unsur mengalami pengkayaan atau pemiskinan terhadap konsentrasi rata-rata serpih. Konsentrasi unsur yang digunakan mencakup unsur kelumit terpilih. Dalam analisis faktor pengkayaan, unsur Al digunakan untuk normalisasi dengan pertimbangan dimana unsur Al sangat sensitif terhadap proses diagenesa dan pengaruh material organik terkhusus biologis (Vosoughi Moradi, Sari dan Akkaya, 2016; Ocubalidet, Rimmer dan Conder, 2018; Algeo dan Liu, 2020).

Sehingga analisis faktor pengkayaan ini dilakukan dengan menggunakan perhitungan rumus sebagai berikut:

$$EF_X = \left[\frac{X_{\text{Al Sample}}}{X_{\text{Al average-grey-shale}}} \right] \dots\dots\dots (1)$$

Dengan X merupakan unsur kelumit terpilih seperti unsur Be, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, V dan Zn. Selanjutnya setelah seluruh sampel telah dinormalisasikan terhadap unsur Al, unsur dapat dikatakan mengalami suatu pengkayaan atau *enrichment* ketika nilai FP bernilai lebih dari satu. Begitupun sebaliknya apabila nilai FP kurang dari satu, maka unsur disimpulkan mengalami suatu *depleted* atau pemiskinan *relative* terhadap rata-rata serpih.

Analisis faktor pengkayaan lapisan batubara PIT Y-2 menunjukkan adanya korelasi langsung antara grafik FP unsur kelumit dan grafik kandungan unsur kelumit. Nilai FP tertinggi ditemukan pada lapisan E18L, di mana semua elemen diperkaya. Kehadiran unsur Be berkorelasi dengan konsentrasi dalam analisis kandungan unsur (Gluskoter, 1975), sedangkan pengkayaan unsur Cd pada lapisan E17U terjadi secara in situ.

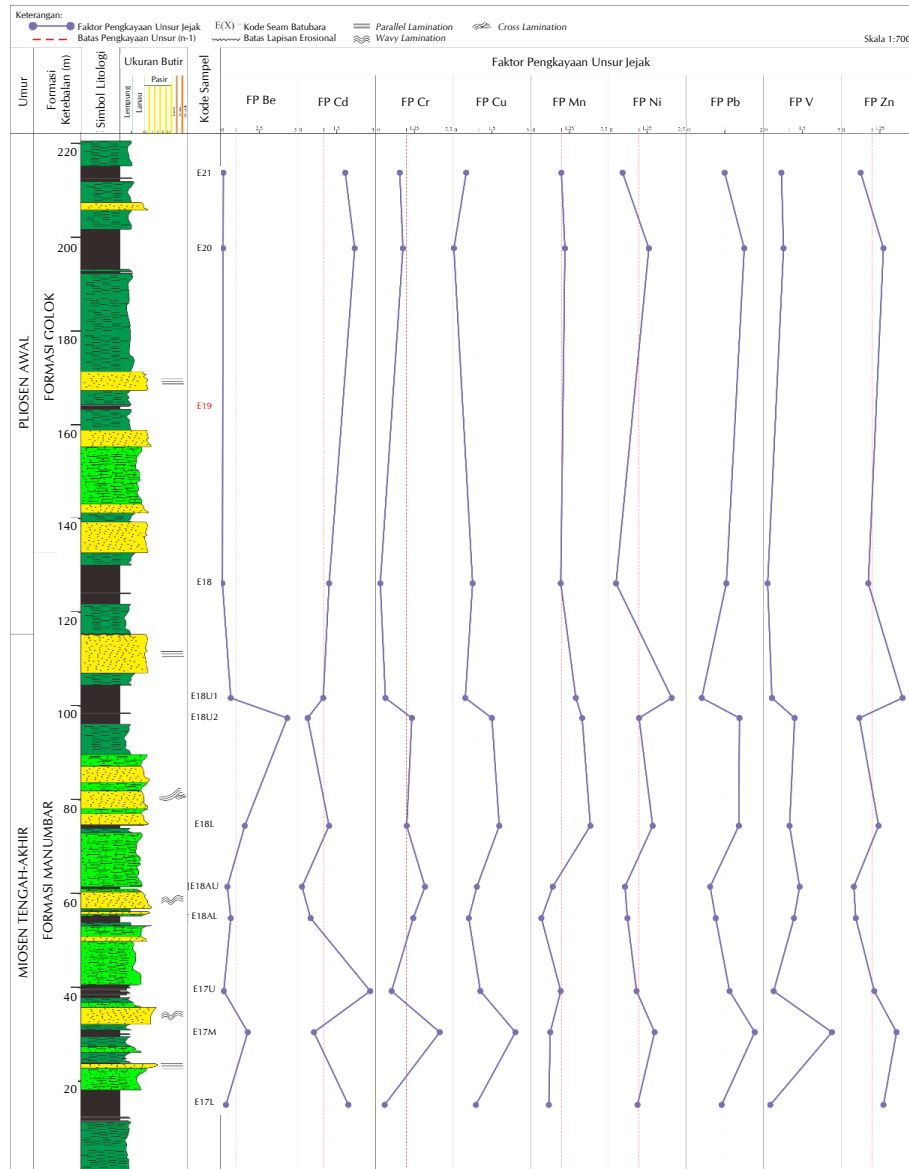
Grafik nilai FP Cr berbanding lurus dengan grafik nilai FP Cu, dimana selaras juga dengan tampilan grafik konsentrasi kedua unsur tersebut. Unsur Cu sebenarnya dapat berasosiasi dengan material anorganik seperti kalkopirit yang hadir pada batubara, namun pada batubara peringkat rendah unsur ini umumnya berasosiasi dengan material

organik. Sedangkan unsur Cr sebenarnya kuat asosiasinya dengan mineral lempung ataupun kelompok mineral spinel seperti kromit, namun pada batubara peringkat rendah sering umumnya berasosiasi dengan material organik (Finkelman, Palmer dan Wang, 2018). Hal ini mengindikasikan kuatnya korelasi kedua unsur tersebut dimana dapat berasosiasi dengan material organik (Finkelman, Palmer dan Wang, 2018).

Finkelman, Palmer dan Wang (2018) menemukan bahwa proses pengkayaan unsur-unsur seperti unsur Ni, Pb, V, dan Zn pada lapisan batubara tidak serta merta berkorelasi dengan pengkayaan unsur lainnya. Hal ini menunjukkan pengkayaan mandiri unsur Mn, yang umumnya berasosiasi dengan mineral lempung yang terikat pada bahan organik batubara. Namun, beberapa unsur Mn juga ditemukan berasosiasi dengan pirit karena mineral sulfida dalam batubara. Untuk mengetahui keberadaan unsur Mn secara lebih akurat, akan dilakukan analisis kurva silang dengan unsur Ca. Keserasian dalam grafik konsentrasi unsur tidak menutup kemungkinan adanya korelasi terbalik, karena kandungan konsentrasi dalam suatu lapisan tidak menentukan proses pengkayaan yang tepat. Namun grafik FP unsur Pb dan V pada lapisan E18U1 berbanding terbalik dengan grafik FP unsur Ni dan Zn, sehingga menunjukkan adanya penipisan atau pemiskinan (Gambar 7). Grafik FP elemen V diperkaya secara signifikan pada lapisan E17M, biasanya ditemukan pada batubara yang dikombinasikan dengan mineral lempung seperti illite atau smektit (Finkelman, Palmer dan Wang, 2018).

Tabel 4. Hasil normalisasi faktor pengkayaan unsur kelumit pada daerah penelitian

Nama Unsur (FP%)	Nama Seam										
	E17L	E17M	E17U	E18AL	E18AU	E18L	E18U2	E18U1	E18	E20	E21
Be	0,36	1,77	0,22	0,67	0,45	1,57	4,32	0,67	0,13	0,18	0,19
Cd	1,96	0,62	2,80	0,49	0,16	1,21	0,38	0,98	1,21	2,20	1,84
Cr	0,30	2,08	0,52	1,22	1,60	1,01	1,18	0,32	0,16	0,89	0,79
Cu	0,89	2,42	1,06	0,61	0,93	1,80	1,51	0,48	0,76	0,02	0,52
Mn	0,59	0,63	0,97	0,35	0,71	1,93	1,66	1,46	0,97	1,11	0,99
Ni	0,95	1,50	0,92	0,63	0,55	1,44	1,00	2,05	0,26	1,31	0,47
Pb	0,92	1,78	1,13	0,77	0,62	1,36	1,38	0,41	1,04	1,51	1,00
V	0,26	2,65	0,40	1,18	1,40	1,01	1,21	0,33	0,16	0,78	0,69
Zn	1,36	1,78	1,06	0,47	0,40	1,20	0,58	1,97	0,87	1,36	0,62
As	0,00	0,00	0,00	0,79	0,53	1,49	1,18	0,34	0,00	0,00	0,00
Se	0,00	0,00	0,00	0,57	0,57	1,55	1,17	0,54	0,00	0,00	0,00
Hg	0,00	0,00	0,00	0,56	0,59	1,53	1,12	0,58	0,00	0,00	0,00



Gambar 7. Korelasi profil litologi dengan grafik FP unsur kelumit pada batubara

Analisis Multivariat

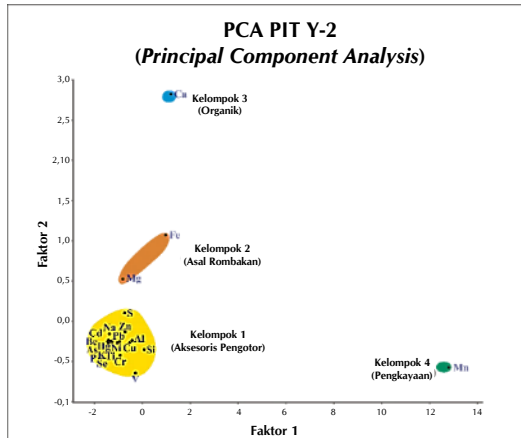
Keberadaan unsur-unsur pada lapisan batubara dipengaruhi oleh pasokan sedimen, energi sedimentasi, dan proses pengkayaan. Untuk menentukan hubungan dan asosiasi, elemen dikelompokkan menggunakan metode statistik, seperti *Principal Component Analysis* (PCA) dan *PAST Statistical Software V3*. Analisis tersebut menormalkan konsentrasi elemen setiap lapisan menggunakan pendekatan *Z-Score*. Sehingga normalisasi tersebut dapat digunakan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{new data} = \frac{(\text{data}-\text{mean})}{\text{Std}} \dots\dots\dots (2)$$

Dengan *new data* merupakan data hasil normalisasi, *mean* merupakan rata-rata unsur pada setiap *seam*, dan *std* merupakan nilai standar deviasi pada unsur tersebut.

Analisis multivariat PCA PIT Y-2 menghasilkan empat kelompok elemen: elemen pengotor/aksesori, elemen serpihan, elemen karbonat, dan elemen pengkayaan (Gambar 8). Golongan yang paling dominan adalah unsur pengotor/aksesori yang meliputi unsur S, Al, Si, Zn, Pb, Cu, V, Cr, Ni, Na, Cd, Be, Hg, As, K, P, Se, dan Ti. Unsur puing,

seperti Fe dan Mg, berasosiasi dengan bahan mineral sulfida anorganik dan pecahan batuan. Unsur karbonat, diwakili oleh unsur Ca, berkerabat dengan mineral karbonat. Unsur pengkayaan yang diwakili oleh unsur Mn berasosiasi dengan karbonat sebagai siderit pada lapisan batuan (Cui dkk., 2019; LI dkk., 2022).

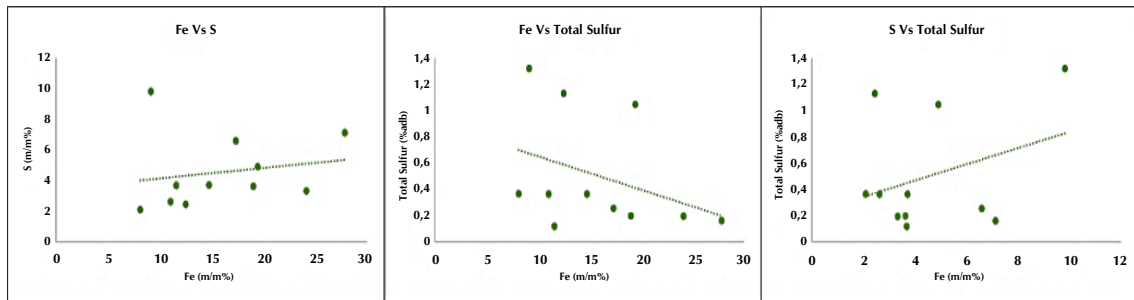


Gambar 8. Hasil analisis multivariat PCA PIT Y-2

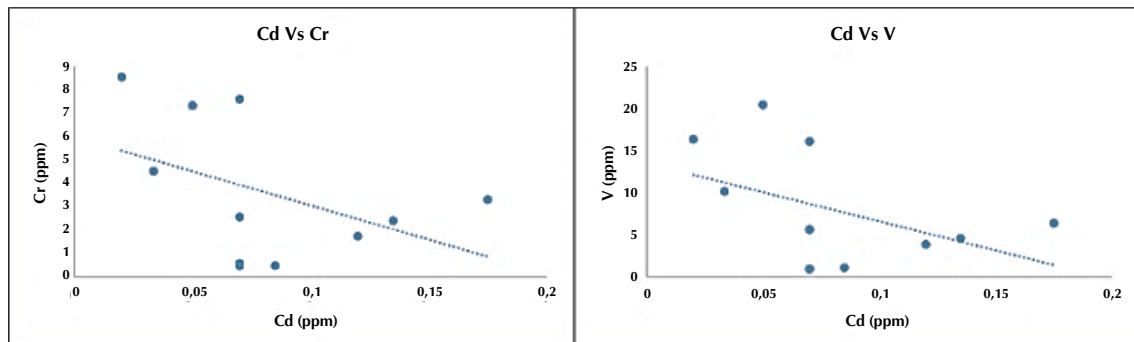
Analisis Kurva Silang

Analisis plot kurva silang digunakan untuk mengetahui hubungan antara unsur Fe, S, dan pirit dalam batubara, yang sering berasosiasi dengan mineral belerang anorganik. Hasil penelitian menunjukkan adanya korelasi positif antara unsur Fe dan S yang menunjukkan adanya pirit sebagai sulfur anorganik. Namun, ditemukan korelasi negatif antara unsur Fe dan nilai total sulfur, yang menunjukkan bahwa sulfur organik juga terdapat dalam batubara (Gambar 9).

Unsur kelumit juga dianalisis untuk menentukan hubungannya dengan pengkayaan in situ oleh senyawa sulfida. Unsur Cd menunjukkan korelasi negatif yang menunjukkan bahwa sebaran unsur Cr lebih didominasi oleh hasil pemecahan dibandingkan sebaran in situ (Nalbandian, 2012). Unsur V menunjukkan kecenderungan negatif, hal ini menunjukkan bahwa korelasi antara unsur V dengan bahan tanah liat lebih dominan dibandingkan dengan hubungan unsur V dengan bahan organik (Gambar 10).



Gambar 9. Plot kurva silang antara unsur Fe, S dan nilai total sulfur



Gambar 10. Plot kurva silang antara unsur Cr, V, dan Cd

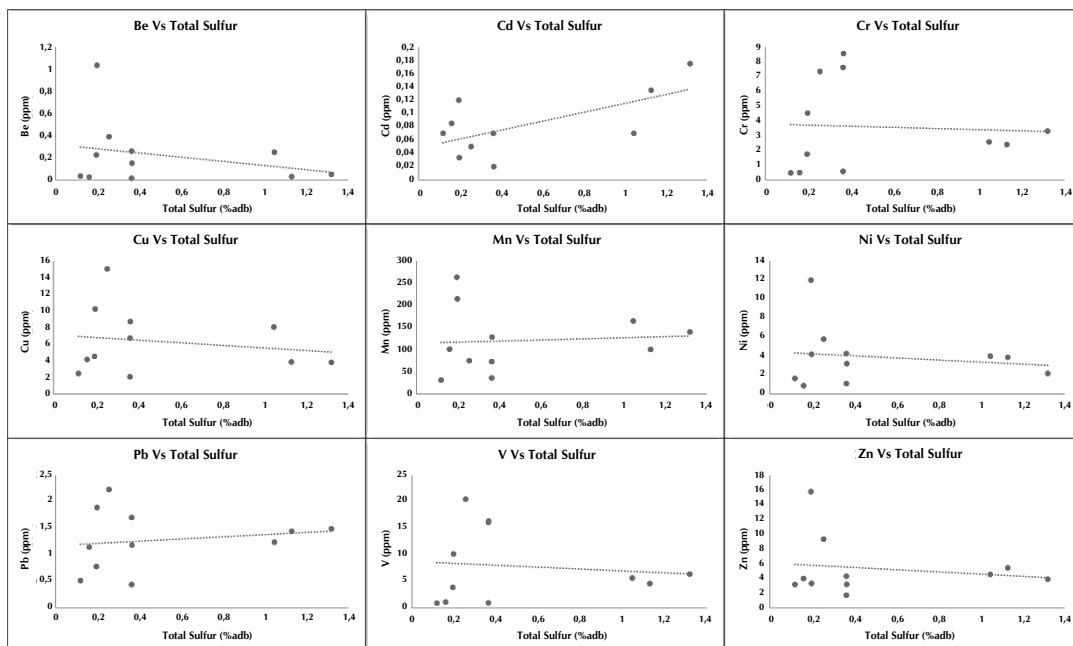
Analisis kurva silang menunjukkan tren yang beragam, dengan beberapa unsur yang berkorelasi positif terhadap peningkatan nilai total sulfur, seperti unsur Cd, Mn, dan Pb. Unsur-unsur yang berkorelasi negatif terhadap nilai total sulfur adalah unsur Be, Cr, Cu, Ni, V, dan Zn. Unsur yang berkorelasi positif berasosiasi dengan bahan anorganik, sedangkan unsur yang berkorelasi negatif didominasi oleh unsur yang memiliki afinitas organik (Finkelman, Palmer dan Wang, 2018). Beberapa unsur yang berkaitan dengan bahan organik atau organik menampilkan grafik berlawanan, yang menunjukkan bahwa afinitas organik atau anorganiknya tidak berhubungan dengan kandungan sulfur di daerah penelitian (Gambar 11).

Analisis nilai unsur kelumit dan kandungan abu memberikan wawasan mengenai kenaikan dan penurunan nilai yang terkait dengan unsur-unsur tersebut. Beberapa unsur kelumit seperti unsur Be, Cd, Mn, Ni, dan Zn tidak menunjukkan korelasi yang signifikan terhadap peningkatan nilai kandungan abu. Namun, unsur Be menunjukkan sedikit hubungan dengan kandungan abu. Tren korelasi positif mencakup unsur Cr, Cu, Pb, dan V. Unsur Cr dan Cu terikat kuat, dengan Cr diserap ke dalam tanah liat dan bahan organik selama pengendapan batubara (Chakraborty *dkk.*, 2023). Unsur Pb dan V merupakan bagian dari

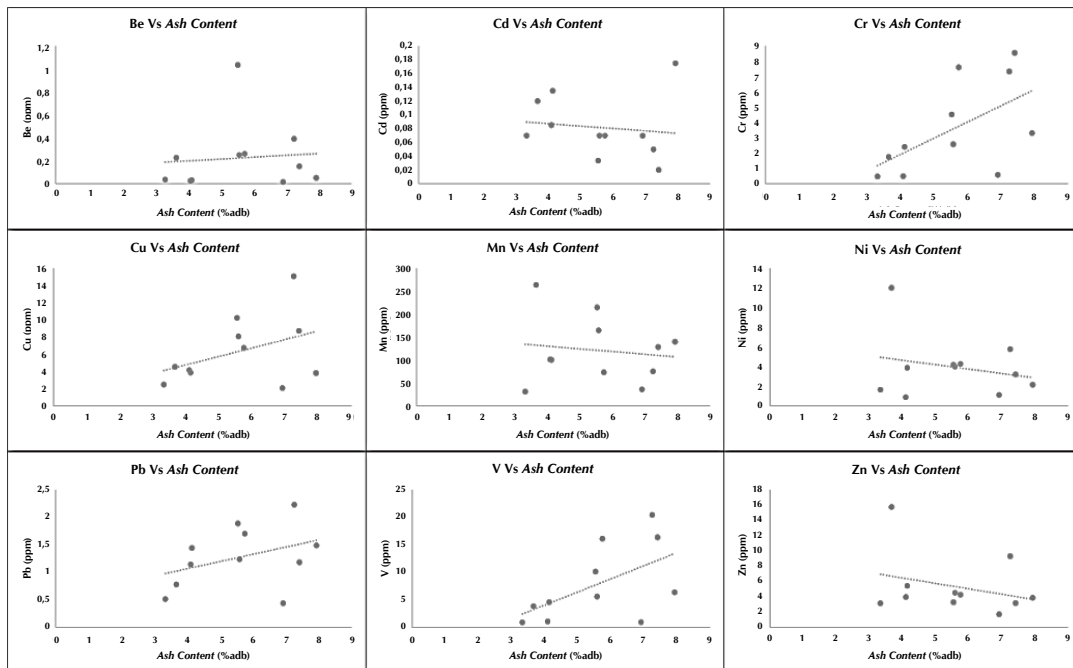
gugus afinitas organik, yang keberadaannya berkorelasi dengan peningkatan kandungan abu. Unsur Cd dan V diartikan sebagai penyebab utama (Gambar 12).

Karakteristik Kemostratigrafi

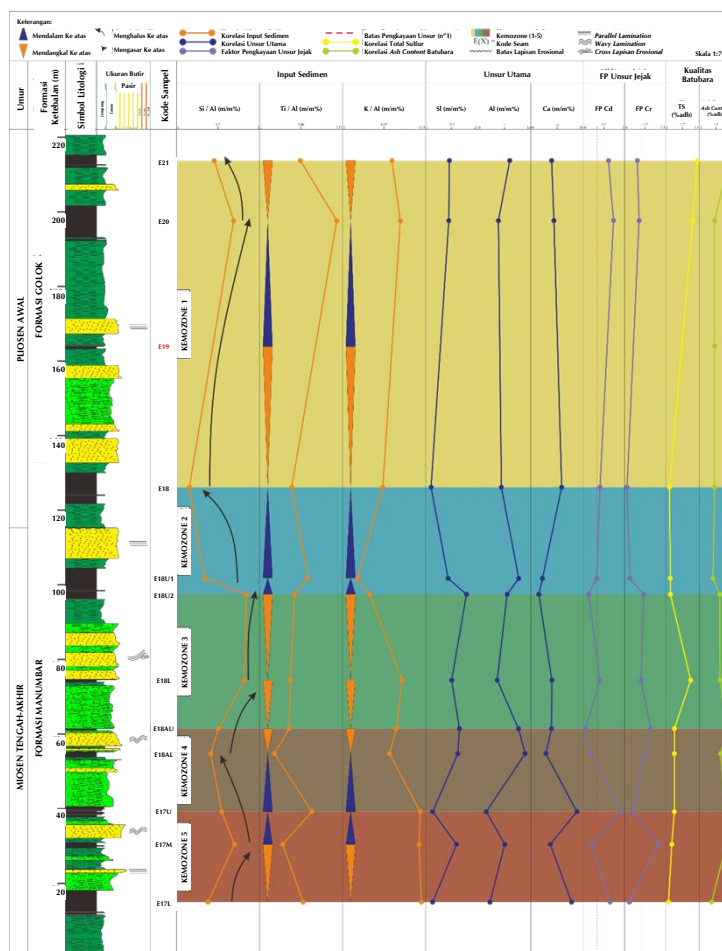
Zona kemostratigrafi diidentifikasi dengan mengamati perubahan konsentrasi unsur yang signifikan, menentukan batas setiap zona atau satuan kemozon. Penelitian ini menggunakan parameter konsentrasi unsur utama, unsur kelumit, masukan sedimen, dan kualitas batubara untuk membandingkan lapisan batubara di daerah penelitian. Unsur utamanya adalah Silika, Aluminium, dan Karbonat, dengan tren grafis berbeda yang mewakili proses pengendapan yang berbeda. Grafik masukan sedimen menafsirkan batas perubahan permukaan laut, sedangkan grafik unsur kelumit FP mewakili proksi berbeda dalam batubara, dengan unsur Cd dan Cr masing-masing mewakili bahan anorganik dan organik (Cui *et al.*, 2019). Nilai total kandungan sulfur dan abu menginterpretasikan tren peningkatan dan penurunan yang terkait dengan unsur kelumit di wilayah studi. Interval satuan kemozon dibagi menjadi lima satuan yang masing-masing mempunyai karakteristik kandungan unsur berbeda, yang menggambarkan pengkayaan atau pemiskinan lapisan batubara (Gambar 13).



Gambar 11. Plot kurva silang antara unsur kelumit dan nilai total sulfur



Gambar 12. Plot kurva silang antara unsur kelumit dan nilai kandungan abu



Gambar 13. Korelasi kemostratigrafi dan pembagian unit kemozon

Unit Kemozon I

Satuan kemozon ini terletak pada bagian atas profil litologi termasuk dalam Formasi Golok. Kemozon Ini mencakup lapisan batubara E19 dan E20, dengan lapisan E21 dan E18 di batas atas dan bawah. Konsentrasi unsur Ca semakin meningkat, sedangkan grafik Si/Al menunjukkan anomali. Nilai FP Cd semakin kaya di semua lapisan, sedangkan FP Cr semakin miskin di semua lapisan batubara. Nilai Total Sulfur (TS) meningkat ke atas, dan nilai kandungan abu meningkat pada kisaran 4,1 hingga 7,9 in.

Unit Kemozon II

Unit kemozon ini terletak pada Formasi Manumbar, pada kemozon unit 1 yang mengandung lapisan batubara E18U1 dan E18U2. Konsentrasi unsur Si, Al, dan Ca mengalami penurunan, sedangkan masukan sedimen menunjukkan pola ke atas yang halus. Nilai FP unsur Cd dan Cr memperkaya dan memiskinkan pada titik yang berbeda. Nilai TS tetap konstan, dan nilai kandungan abu mengalami penurunan ke atas namun tidak signifikan. Unit kemozon menunjukkan ketidaksesuaian antara kedua pola tersebut.

Unit Kemozon III

Unit kemozon ini terletak pada Formasi Manumbar, pada kemozon unit 2 yang berisi lapisan batubara E18L, E18U2, dan E18AU. Konsentrasi unsur Si dan Al menurun pada lapisan E18L, sedangkan unsur Ca tetap konstan. Grafik Si/Al menunjukkan pola yang semakin kasar ke atas, sedangkan grafik Ti/Al menunjukkan pola yang meningkat. Nilai FP Cd dan FP Cr sejajar pada bagian tengah lapisan E18L, mengalami pengkayaan namun terjadi pemiskinan pada bagian atas dan bawah. Nilai TS meningkat pada bagian tengah lapisan E18L.

Unit Kemozon IV

Unit kemozon yang terletak pada Formasi Manumbar, pada kemozon unit 3 ini meliputi lapisan batubara E18AL, E18AU, dan E17U. Konsentrasi unsur Si dan Al meningkat pada lapisan E18AL, sedangkan konsentrasi unsur Ca menurun. Grafik Si/Al menunjukkan pola halus-kasar ke atas, sedangkan grafik Ti/Al dan

K/Al menunjukkan pola yang seragam. Nilai FP Cd mengalami pemiskinan pada lapisan E18AL dan E18AU namun mengalami pengkayaan pada lapisan E17U. Nilai TS tetap konstan, nilai kandungan abu menurun dan kemudian meningkat.

Unit Kemozon V

Lapisan batubara ini terletak pada Formasi Manumbar, unit kemozon termasuk lapisan E17M, dengan unsur Si dan Al meningkat dan unsur Ca menurun. Grafik Si/Al menunjukkan pola kasar ke atas, sedangkan grafik Ti/Al menunjukkan pola menurun. Grafik K/Al tidak menunjukkan perubahan signifikan, menunjukkan pola ke atas yang dalam. Nilai FP Cd mengalami pemiskinan di tengah, sedangkan nilai FP Cr mengalami pengkayaan di tengah. Nilai TS tetap konstan, dan nilai kandungan abu meningkat namun tidak signifikan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan korelasi profil litologi yang ada pada PIT Y-2 terhadap tren kandungan unsur, input sedimen, dan pengkayaan unsur yang disajikan dalam korelasi kemostratigrafi, potensi pengkayaan unsur kelumit pada daerah penelitian terlihat cukup signifikan di beberapa *seam* batubara. Keterdapatannya masing-masing unsur juga dapat menjelaskan bagaimana proses pengkayaan yang terjadi, terutama unsur kelumit seperti Fosfor (P) yang erat kaitannya dengan mineral pembawa unsur tanah jarang. Selain itu, unsur kelumit Cd, Mn, dan Pb menunjukkan korelasi positif dengan variasi kadar total sulfur, sedangkan unsur Cr, Cu, Pb, dan V memiliki korelasi positif terhadap perubahan nilai kandungan abu. Unit Kemozon yang diduga paling potensial adalah unit Kemozon 3, di mana semua unsur kelumit mengalami pengkayaan pada zona ini, terutama pada *seam* E18L, sedangkan pada unit lain hanya diduga menjadi zona potensi biasa. Profil studi khusus daerah penelitian terbagi menjadi 5 unit Kemozon, yang mana masing-masing unit Kemozon memiliki karakteristik dan pola grafik yang berbeda-beda. Studi ini memperluas pemahaman kita mengenai distribusi dan konsentrasi unsur kelumit dalam batubara. Hasil ini dapat dimanfaatkan

untuk membuat model geokimia dan stratigrafi yang lebih tepat di masa depan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih banyak penulis ucapkan kepada semua rekan yang telah membantu serta berpartisipasi aktif dalam penelitian ini. Apresiasi kepada rekan-rekan karyawan PT. Indexim Coalindo yang sangat terbuka dalam berbagi ilmu dan membantu kegiatan pengambilan data di lapangan. Terima kasih kepada kolega dari Jurusan Teknik Geologi Universitas Jenderal Soedirman atas saran dan masukan dalam menyusun artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Albut, G., Kamber, B.S., Brüske, A., Beukes, N.J., Smith, A.J.B. dan Schoenberg, R. (2019) "Modern weathering in outcrop samples versus ancient paleoredox information in drill core samples from a Mesoarchaeon marine oxygen oasis in Pongola Supergroup, South Africa," *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 265, hal. 330–353. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.09.001>.
- Algeo, T.J. dan Liu, J. (2020) "A re-assessment of elemental proxies for paleoredox analysis," *Chemical Geology*, 540(December 2019), hal. 119549. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119549>.
- Anggara, F., Patria, A.A., Rahmat, B., Wibisono, H., Putera, M.Z.J., Petrus, H.T.B.M., Erviana, F., Handini, E. dan Amijaya, D.H. (2024) "Signature characteristics of coal geochemistry from the Eocene Tanjung Formation and the Miocene Warukin Formation, Barito Basin: Insights into geological control on coal deposition and future critical element prospection," *International Journal of Coal Geology*, 282, hal. 104423. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2023.104423>.
- Balaram, V. (2019) "Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact," *Geoscience Frontiers*, 10(4), hal. 1285–1303. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>.
- Bennett, W.W. dan Canfield, D.E. (2020) "Redox-sensitive trace metals as paleoredox proxies: A review and analysis of data from modern sediments," *Earth-Science Reviews*, 204, hal. 103175. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103175>.
- Chakraborty, P., Wood, D.A., Singh, S. dan Hazra, B. (2023) "Trace element contamination in soils surrounding the open-cast coal mines of eastern Raniganj basin, India," *Environmental Geochemistry and Health*, 45(10), hal. 7275–7302. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01556-1>.
- Chen, W., Kemp, D.B., Newton, R.J., He, T., Huang, C., Cho, T. dan Izumi, K. (2022) "Major sulfur cycle perturbations in the Panthalassic Ocean across the Pliensbachian-Toarcian boundary and the Toarcian Oceanic Anoxic Event," *Global and Planetary Change*, 215, hal. 103884. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103884>.
- Cui, W., Meng, Q., Feng, Q., Zhou, L., Cui, Y. dan Li, W. (2019) "Occurrence and release of cadmium, chromium, and lead from stone coal combustion," *International Journal of Coal Science & Technology*, 6(4), hal. 586–594. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1007/s40789-019-00281-4>.
- Dai, S., Bechtel, A., Eble, C.F., Flores, R.M., French, D., Graham, I.T., Hood, M.M., Hower, J.C., Korasidis, V.A., Moore, T.A., Püttmann, W., Wei, Q., Zhao, L. dan O'Keefe, J.M.K. (2020) "Recognition of peat depositional environments in coal: A review," *International Journal of Coal Geology*, 219, hal. 103383. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.103383>.
- Dai, S., Luo, Y., Seredin, V. V., Ward, C.R., Hower, J.C., Zhao, L., Liu, S., Zhao, C., Tian, H. dan Zou, J. (2014) "Revisiting the late Permian coal from the Huayingshan, Sichuan, southwestern China: Enrichment and occurrence modes of minerals and trace elements," *International Journal of Coal Geology*, 122, hal. 110–128. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2013.12.016>.
- Farkaš, J., Frýda, J. dan Holmden, C. (2016) "Calcium isotope constraints on the marine carbon cycle and CaCO₃ deposition during the late Silurian (Ludfordian) positive $\delta^{13}\text{C}$ excursion," *Earth and Planetary Science Letters*, 451, hal. 31–40. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.06.038>.
- Finkelman, R.B. (1993) "Trace and minor elements in coal," in, hal. 593–607. Tersedia pada:

- https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2890-6_28.
- Finkelman, R.B., Palmer, C.A. dan Wang, P. (2018) "Quantification of the modes of occurrence of 42 elements in coal," *International Journal of Coal Geology*, 185, hal. 138–160. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2017.09.005>.
- Gluskoter, H.J. (1975) "Mineral matter and trace elements in coal," in S.P. Babu (ed.) *Trace Elements in Fuel*. Washington DC: American Chemical Society, hal. 1–22. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1021/ba-1975-0141.ch001>.
- Heriawan, M.N., Pillayati, P., Widodo, L.E. dan Widayat, A.H. (2020) "Drill hole spacing optimization of non-stationary data for seam thickness and total sulfur: A case study of coal deposits at Balikpapan Formation, Kutai Basin, East Kalimantan," *International Journal of Coal Geology*, 223, hal. 103466. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2020.103466>.
- Li, Y., Lu, Z., Yang, H., Jin, L. dan Hu, H. (2022) "Release characteristics of arsenic, selenium, lead and transformation of minerals during ashing process of coal," *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 50(1), hal. 11–18. Tersedia pada: [https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(21\)60115-9](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(21)60115-9).
- Liu, L., Ren, S., Yang, J., Jiang, D., Guo, J., Pu, Y. dan Meng, X. (2022) "Experimental study on K migration, ash fouling/slugging behaviors and CO₂ emission during co-combustion of rice straw and coal gangue," *Energy*, 251, hal. 123950. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123950>.
- Nalbandian, H. (2012) *Trace element emissions from coal, Profiles*.
- Ocubalidet, S.G., Rimmer, S.M. dan Conder, J.A. (2018) "Redox conditions associated with organic carbon accumulation in the Late Devonian New Albany Shale, west-central Kentucky, Illinois Basin," *International Journal of Coal Geology*, 190, hal. 42–55. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2017.11.017>.
- Patria, A.A., Suhendra, R., Anggara, F., Agangi, A., Obrochta, S.P. dan Setiawan, I. (2024) "Association and textural-compositional evolution of pyrite-organic matter in coals of the Tarakan, Barito, and Pasir Basins, Kalimantan, Indonesia," *International Journal of Coal Geology*, 282, hal. 104442. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2023.104442>.
- Patricia, G.R.O., Blandón, A., Perea, C. dan Mastalerz, M. (2020) "Petrographic characterization, variations in chemistry, and paleoenvironmental interpretation of Colombian coals," *International Journal of Coal Geology*, 227, hal. 103516. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2020.103516>.
- Pecorari, M., Caggiati, M., Dal Corso, J., Cruciani, G., Tateo, F., Chu, D. dan Gianolla, P. (2023) "Weathering and sea level control on siliciclastic deposition during the Carnian Pluvial Episode (Southern Alps, Italy)," *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 617(October 2022), hal. 111495. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2023.111495>.
- Pedernera, T.E., Mancuso, A.C. dan Ottone, E.G. (2022) "Triassic paleoclimate and paleofloristic trends of southwestern Gondwana (Argentina)," *Journal of South American Earth Sciences*, 116, hal. 103852. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103852>.
- Peng, Yang, Peng, Yongbo, Lang, X., Ma, H., Huang, K., Li, F. dan Shen, B. (2016) "Marine carbon-sulfur biogeochemical cycles during the steptoean positive carbon isotope excursion (SPICE) in the Jiangnan Basin, South China," *Journal of Earth Science*, 27(2), hal. 242–254. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1007/s12583-016-0694-4>.
- Ramkumar, M. (2015a) *Chemostratigraphy, Chemostratigraphy: Concepts, Techniques, and Applications*. Elsevier. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-09872-6>.
- Ramkumar, M. (2015b) "Toward standardization of terminologies and recognition of chemostratigraphy as a formal stratigraphic method," in *Chemostratigraphy*. Elsevier, hal. 1–21. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-419968-2.00001-7>.
- Sageman, B.B., Murphy, A.E., Werne, J.P., Ver Straeten, C.A., Hollander, D.J. dan Lyons, T.W. (2003) "A tale of shales: the relative roles of production, decomposition, and dilution in the accumulation of organic-rich strata, Middle–Upper Devonian, Appalachian basin," *Chemical Geology*, 195(1–4), hal. 229–273. Tersedia pada: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00397-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00397-2).

- Sumardi, D. dan Darijanto, T. (1998) "Darmawan Sumardi Totok Darijanto," *Proceeding ITB*, 30(3), hal. 31–40.
- Sun, B., Zhu, R., Shi, Y., Zhang, W., Zhou, Z., Ma, D., Wang, R., Dai, H. dan Che, C. (2024) "Effects of coal-fired power plants on soil microbial diversity and community structures," *Journal of Environmental Sciences*, 137, hal. 206–223. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.02.014>.
- Tribovillard, N., Algeo, T.J., Lyons, T. dan Riboulleau, A. (2006) "Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update," *Chemical Geology*, 232(1–2), hal. 12–32. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.02.012>.
- Valetich, M., Zivak, D., Spandler, C., Degeling, H. dan Grigorescu, M. (2022) "REE enrichment of phosphorites: An example of the Cambrian Georgina Basin of Australia," *Chemical Geology*, 588, hal. 120654. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120654>.
- Vosoughi Moradi, A., Sari, A. dan Akkaya, P. (2016) "Paleoredox reconstruction of bituminous shales from the Miocene Hançili Formation, Çankırı-Çorum Basin, Turkey: Evaluating the role of anoxia in accumulation of organic-rich shales," *Marine and Petroleum Geology*, 78, hal. 136–150. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.09.012>.
- Wang, C.-L., Jiang, S.-Y. dan Lei, X.-F. (2024) "Mechanism of beryllium mineralization in a granite-pegmatite system: Constraints from ore geology and beryl mineralogy of the large Arskartor Be-Nb-Mo deposit, southern Chinese Altai," *Ore Geology Reviews*, 167, hal. 105996. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.105996>.
- Xia, G., Mansour, A., Gentzis, T., Li, G., Carvajal-Ortiz, H., Ocubalidet, S., Yi, F., Yun, C. dan Yi, H. (2021) "Depositional paleoenvironment and source rock characterization across the Toarcian Oceanic Anoxic Event from the eastern Tethys, Tibet, SW China," *International Journal of Coal Geology*, 243(November 2020), hal. 103780. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2021.103780>.
- Zubovic, P., Stadnichenko, T. dan Sheffey, N.B. (1961) "Chemical Bases of Minor Element Associations in Coal and Other Carbonaceous Sediments," in *Short Papers in the Geologic and Hydrologic Sciences, Articles 293-435*. 424-D ed. Washington: U.S. Geological Survey, hal. D345–D348.
- Takaya, Y. et al. (2018) "The tremendous potential of deep-sea mud as a source of rare-earth elements," *Scientific Reports*, 8(1), hal. 5763. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23948-5>.

