

Pengaruh *Tonstein* terhadap Karakteristik Geokimia Batubara Lapangan Banko, PT Bukit Asam Tbk, Tanjung Enim, Sumatra Selatan

Angga Aditya Putra Tanjung¹⁾, Febrian Denny Irvana¹⁾

¹⁾Program Sarjana Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
Corresponding Author: Angga Aditya Putra Tanjung (Email: angga.aditya0303@mail.ugm.ac.id)

Abstract

Indonesia has abundant fossil energy resources, especially coal, which has long been the backbone of national energy supply. However, the government is committed to shifting from fossil fuels to renewable energy. This shift contrasts with the country's vast coal reserves, requiring innovations to enhance coal's value, particularly in the Muara Enim Formation at the Banko Field, owned by PT Bukit Asam Tbk. This area is ideal for studying coal's geochemical properties due to *tonstein* layers, which enrich trace elements in coal. This study analyzes *tonstein*'s influence on coal's geochemical traits and evaluates valuable and toxic elements. Multivariate statistical methods, including Principal Components Analysis (PCA) and Hierarchical Clustering Analysis (HCA), were used via Python programming. Results show *tonstein* affects moisture in seams A1 and B1, associated with oxygen, SiO₂, Al₂O₃, P₂O₅, TiO₂, Cu, and Mn. It also impacts ash in seams B2 and C, linked to sulfur, V, Co, Zn, As, Pb, and Sr. Seams D and E are more influenced by fixed carbon. Boron (B), abundant in seams D and E, is a valuable element tied to coal with high fixed carbon or calorific value. Conversely, Zinc (Zn), found mainly in seam C, is a toxic element associated with high ash and sulfur levels.

Keywords: *Tonstein*, Geochemical properties, Multivariate statistical analysis, Valuable and toxic elements, Muara Enim Formation

1. Pendahuluan

Indonesia memiliki cadangan batubara melimpah, mencapai 35,05 miliar ton, dengan produksi 687,43 juta ton pada 2022 untuk kebutuhan domestik dan ekspor. Namun, penggunaan batubara secara konvensional menghadapi tantangan lingkungan dan efisiensi rendah. Perpres No. 22 Tahun 2017 tentang RUEN menekankan pentingnya optimalisasi energi melalui teknologi dan inovasi (Gambar 1).

Untuk menjaga relevansi dan nilai tambah batubara, diperlukan pengelolaan bijak, diversifikasi pemanfaatan, serta inovasi, seperti memanfaatkan batubara sebagai sumber elemen berharga bagi industri teknologi tinggi dan mengurangi unsur beracun. Pendekatan ini mendukung

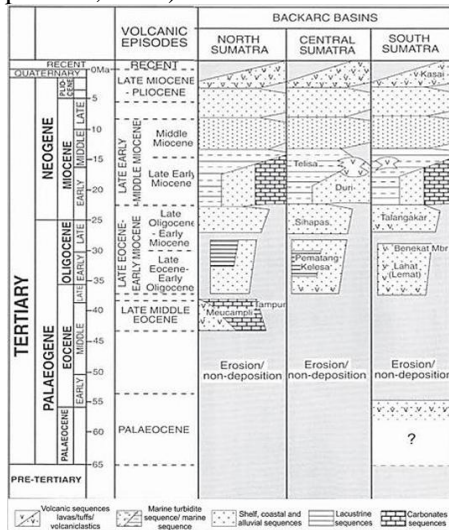
keberlanjutan energi dan kontribusi ekonomi di tengah perubahan energi global.



Gambar 1. Target bauran energi Indonesia hingga 2050 (PP No.22 Tahun 2017)

Aktivitas vulkanik di Sumatra selama periode Paleogen–Neogen hingga Kuartar diketahui berlangsung dalam tiga siklus semi-kontinu, yaitu Oligosen akhir–Miosen tengah, Miosen tengah–Kuartar awal, dan Kuartar akhir (van Bemmelen, 1949). Aktivitas ini memengaruhi pembentukan *paleomire* dan

pengendapan batubara, tidak hanya di SSB tetapi juga di seluruh wilayah Sumatra (Gambar 2), serta berpotensi menghasilkan lapisan *tonstein*. *Tonstein* merupakan lapisan tipis lempung yang khas, tersebar luas, dan berkaitan erat dengan lapisan batubara (Triplehorn, 1990).



Gambar 2. Episode vulkanisme Tersier dan distribusinya (Barber *et al.*, 2005)

Penelitian terbaru mengenai *tonstein* banyak difokuskan pada komposisinya dan pengaruhnya terhadap variasi mineralogi (Spears *et al.*, 1988; Goodarzi *et al.*, 1990; Ruppert dan Moore, 1993; Pollock *et al.*, 2000; dan lainnya), serta penggunaannya sebagai penanda (*marker*) lapisan (Zhou *et al.*, 1982; Addison *et al.*, 1983; Lyons *et al.*, 2006). Hower *et al.*, (1999) menunjukkan bahwa batubara yang dekat dengan *tonstein* memiliki variasi geokimia yang terkayakan.

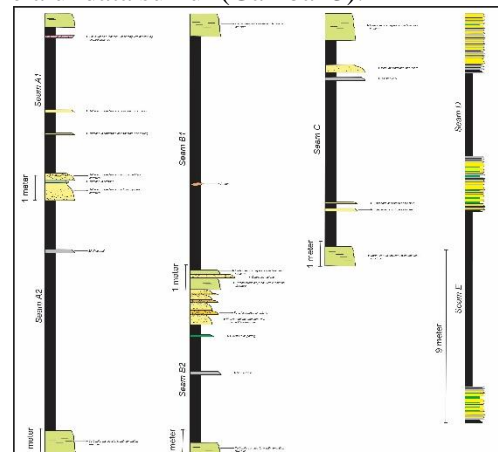
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh *tonstein* terhadap karakteristik geokimia batubara, sehingga diharapkan mampu menjadi analog eksplorasi unsur berharga dan mitigasi unsur beracun di lokasi penelitian.

2. Data

Penelitian ini menggunakan data primer dan sekunder, data primer berupa hasil observasi lapangan di sekitar area pengeboran yang digunakan untuk data sekunder. Data primer terdiri dari deskripsi batubara dan non-batubara, *strike dip*, dan *measured section*. Sedangkan data sekunder merupakan data milik PT Bukit Asam Tbk meliputi data sumur, uji proksimat, ultimat, oksida utama, dan unsur jejak.

Data Primer

Data primer yang diperoleh bertujuan untuk memetakan secara vertikal posisi *tonstein* yang terdapat pada *seam* batubara di area penelitian. *Seam* batubara yang dijumpai di lapangan terdiri dari *seam* A1, A2, B1, B2, dan C. Sedangkan *seam* D dan E diidentifikasi melalui data sumur (Gambar 3).



Gambar 3. Penampang stratigrafi *seam* A1 hingga E

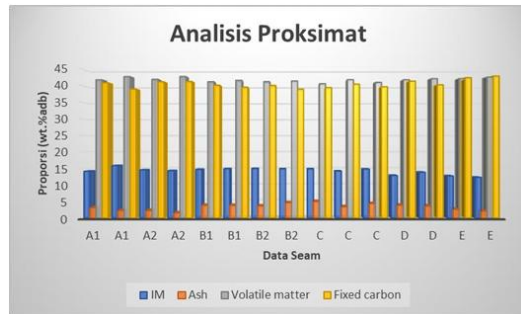
Strike berada di kuadran IV dan *dip* berada di kuadran I, berkisar N 335–341° E/18–22° NE. Batubara pada *seam* A1 memiliki litotipe *bright coal* dengan tebal *seam* 4,5 meter, terdapat 3 lapisan *tonstein*, di mana 2 *tonstein* di bagian bawah berupa *tuffaceous sandstone* dan di bagian atas berupa *lapilli tuff* dengan struktur *coarsening upward*. *Seam* A2 memiliki litotipe *bright coal* dan *banded bright coal* dengan tebal *seam* 8 meter, tidak terdapat *tonstein*, tetapi terdapat *silicified coal*.

Batubara *seam* B1 memiliki litotipe *bright coal* dan *banded bright coal* dengan tebal *seam* 7 meter, terdapat 1 *tonstein* berupa *tuffaceous claystone* (Anggara *et al.*, 2018). Pada *seam* B2 memiliki litotipe *bright coal* dan *banded bright coal* dengan tebal *seam* 3,5 meter, terdapat 1 *tonstein* berupa *tuffaceous claystone* dan terdapat 1 *silicified coal*. Batubara *seam* C memiliki litotipe *bright coal* dengan tebal 6,5 meter, memiliki 2 *tonstein* serupa dengan yang dijumpai oleh Anggara *et al.*, 2018, dan 1 *silicified coal*.

Data Sekunder

Data sekunder yang digunakan untuk analisis statistik berasal dari 6 sumur eksplorasi dan berjumlah 15 sampel dengan rincian *seam* A1, A2, B1, B2, D, dan E berjumlah 2 sampel, dan *seam* C berjumlah 3

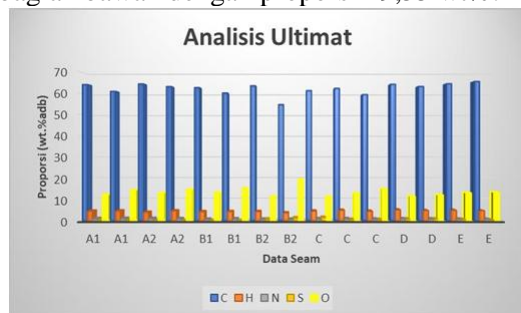
sampel. Data proksimat yang digunakan terdiri dari *total moisture*, *inherent moisture*, *ash*, *volatile matter*, dan *fixed carbon* dalam basis *air dried* (Gambar 4). Hasil analisis proksimat bertujuan untuk mengetahui karakteristik batubara.



Gambar 4. Visualisasi data proksimat

Secara umum kadar lengas tertinggi terdapat pada seam A1 bagian bawah dengan proporsi 15,88 wt%, kadar abu tertinggi terdapat pada seam C bagian atas dengan proporsi 5,02 wt%, zat terbang banyak sekali data *overlay* tetapi kadar tertinggi ada pada seam A2 dengan proporsi 42,82 wt%, dan karbon tertambat tertinggi terdapat pada seam E bagian bawah dengan proporsi 42,95 wt%.

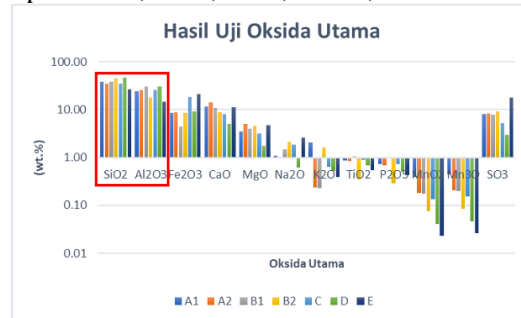
Data analisis ultimat terdiri dari oksigen (O), hidrogen (H), sulfur (S), nitrogen (N), dan oksigen (O) dengan basis *air dried* (Gambar 5). Secara umum kadar karbon tertinggi berada pada seam E bagian bawah dengan proporsi 65,59 wt%, kadar hidrogen tertinggi berada pada seam D bagian atas dengan proporsi 5,28 wt%, kadar sulfur tertinggi berada pada seam C bagian atas dengan proporsi 1,7 wt%, kadar nitrogen tertinggi berada pada seam A1 bagian bawah dan seam A2 bagian atas dengan proporsi 1,21 wt%, dan kadar oksigen tertinggi berada pada seam B2 bagian bawah dengan proporsi 19,55 wt%.



Gambar 5. Visualisasi data ultimat

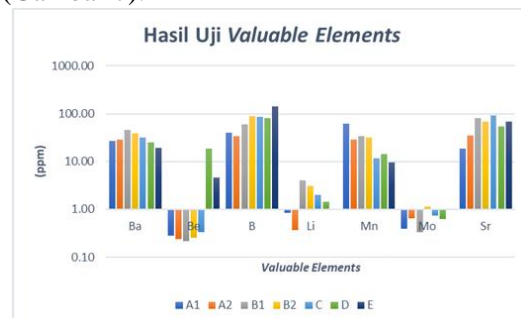
Oksida utama yang paling melimpah pada batubara di daerah penelitian ialah SiO_2 dan Al_2O_3 (Gambar 6), dengan proporsi

masing-masing (24,83-59,03 wt%) dan (9,67-40,43 wt%). Secara perhitungan komposit, SiO_2 melimpah pada seam B2 dan D sedangkan Al_2O_3 melimpah pada seam B1 dan D. Oksida utama yang hadir mayoritas <1 ppm seperti K_2O , TiO_2 , P_2O_5 , MnO_2 , dan Mn_3O .



Gambar 6. Visualisasi data oksida utama

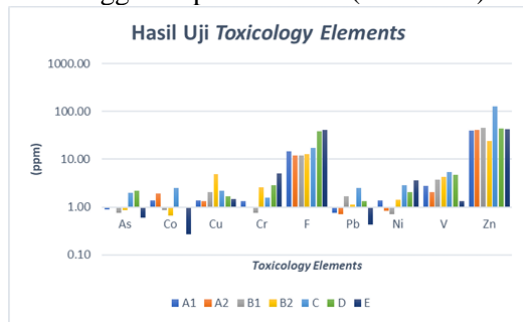
Unsur jejak pada penelitian ini penulis bagi menjadi 2 kategori yaitu unsur jejak berharga (*valuable elements*) dan unsur jejak beracun (*toxicology elements*). Unsur jejak berharga (*valuable elements*) terdiri dari Ba, Be, B, Li, Mn, Mo, dan Sr. Secara perhitungan komposit, unsur berharga yang hadir dalam proporsi yang tidak signifikan (<1 ppm) adalah Be dan Mo. Sedangkan Ba, B, Li, Mn, dan Sr sebagian besar hadir dalam jumlah yang signifikan (>1 ppm). Ba melimpah pada seam B1, B melimpah pada seam E, Li melimpah pada seam B1, Mn melimpah pada seam A1, dan Sr melimpah pada seam C (Gambar 7).



Gambar 7. Visualisasi data unsur jejak berharga

Unsur jejak beracun (*toxicology elements*) terdiri dari As, Co, Cu, Cr, F, Pb, Ni, V, dan Zn. Secara perhitungan komposit, sebagian besar unsur ini tidak hadir dalam jumlah yang signifikan (<1 ppm). Namun, terdapat beberapa unsur beracun yang patut menjadi perhatian karena hadir dalam jumlah yang signifikan (>1 ppm) diantaranya Cu, F, V, dan Zn. Kadar Cu tertinggi terdapat pada seam B2, kadar F tertinggi terdapat pada seam

E, kadar V tertinggi pada seam C, dan kadar Zn tertinggi ada pada seam C (Gambar 8).



Gambar 8. Visualisasi data unsur jejak beracun

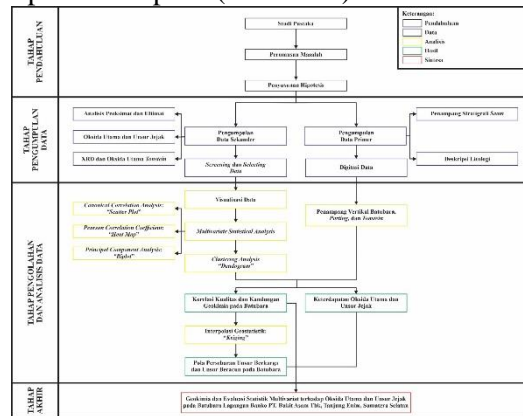
3. Metodologi

Metode yang digunakan pada penelitian ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu secara kualitatif dan kuantitatif, berdasarkan data primer maupun data sekunder yang tersedia. Data karakteristik dan analisis abu diawali dengan pemeriksaan data untuk memilih data yang layak digunakan. Data yang terpilih dikumpulkan dalam *Microsoft Excel* dan diubah ke format *CSV* untuk diolah menggunakan bahasa pemrograman *Python*. Data lapangan berupa *measured section* digunakan untuk menentukan posisi *tonstein* pada *seam* dan memahami stratigrafi lokasi penelitian.

Analisis statistik multivariat dimulai dengan visualisasi antar parameter menggunakan *Canonical Correlation Analysis*. *Pearson Correlation Coefficient* dilakukan di *Google Colab* dengan visualisasi berupa *heat map*. Data yang sama divisualisasikan menggunakan *Principal Component Analysis* dan *Hierarchical Clustering Analysis*. Visualisasi ini dapat mengidentifikasi korelasi antar parameter, dan membantu menginterpretasi keterdapatannya dari setiap unsur pada batubara. Pada artikel jurnal ini, penelitian difokuskan pada metode *Principal Components Analysis (PCA)* dan *Hierarchical Clustering Analysis (HCA)*. Tetapi tidak menghilangkan dua metode lainnya karena semua metode memiliki keterkaitan satu sama lain.

Hasil analisis statistik multivariat membantu mereduksi data untuk menyoroti informasi penting dari korelasi antar parameter. Unsur jejak berharga dan unsur jejak beracun yang terkayakan dibandingkan dengan rata-rata batubara dunia, China, dan

Amerika Serikat. Dari hasil ini, unsur jejak yang hadir signifikan dapat digunakan sebagai analog eksplorasi unsur berharga atau mitigasi unsur beracun. Diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada (Gambar 9).



Gambar 9. Diagram alir penelitian

4. Hasil dan Pembahasan

Peringkat Batubara

Peringkat batubara di daerah penelitian ditentukan melalui uji proksimat, meliputi kadar lengas, abu, zat terbang, karbon tertambat, dan nilai kalori. Kadar lengas yang tinggi (12,32–15,88% adb) dan karbon tertambat rendah (39–42,95% adb) menunjukkan batubara peringkat rendah berdasarkan ASTM. Penentuan peringkat hanya menggunakan nilai kalori, tanpa perlu menghitung karbon tertambat dan zat terbang dalam basis dmmf, karena metode tersebut berlaku untuk batubara peringkat tinggi. Nilai kalori diubah dari Kcal/kg ke Btu/lb. Dari konversi satuan, dapat dilihat peringkat batubara di daerah penelitian pada (Tabel 1).

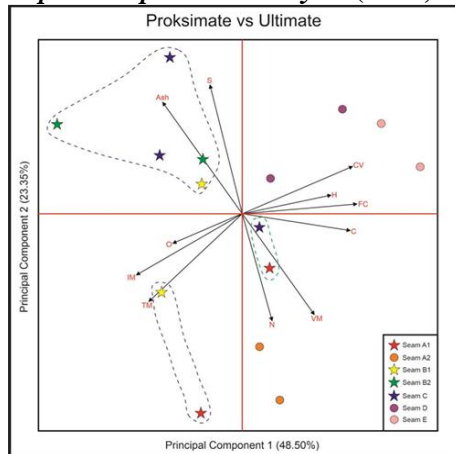
Tabel 1. Peringkat batubara daerah penelitian

Sampel	CV (Kcal/Kg)	CV (Btu/lb)	Peringkat (ASTM (Thomas, 2002))
A1_a	5902	10617.698	Sub-bituminous A coal
A1_b	5831	10489.969	Sub-bituminous B coal
A2_a	5920	10650.08	Sub-bituminous A coal
A2_b	5957	10716.643	Sub-bituminous A coal
B1_a	5839	10504.361	Sub-bituminous A coal
B1_b	5825	10479.175	Sub-bituminous B coal
B2_a	5902	10617.698	Sub-bituminous A coal
B2_b	5772	10383.828	Sub-bituminous B coal
C_a	5889	10594.311	Sub-bituminous A coal
C_b	5927	10662.673	Sub-bituminous A coal
C_c	5909	10630.291	Sub-bituminous A coal
D_a	6159	11080.041	Sub-bituminous A coal
D_b	6013	10817.387	Sub-bituminous A coal
E_a	6340	11405.66	Sub-bituminous A coal
E_b	6440	11585.56	High volatile C bituminous coal

Dapat dilihat bahwa peringkat batubara di daerah penelitian didominasi oleh *sub-bituminous coal* dengan pengecualian pada *seam E* di bagian bawah yang termasuk ke dalam *high-volatile bituminous coal*. Hal ini menunjukkan bahwa *seam E* bagian bawah memiliki pengaruh dari tekanan dan suhu yang

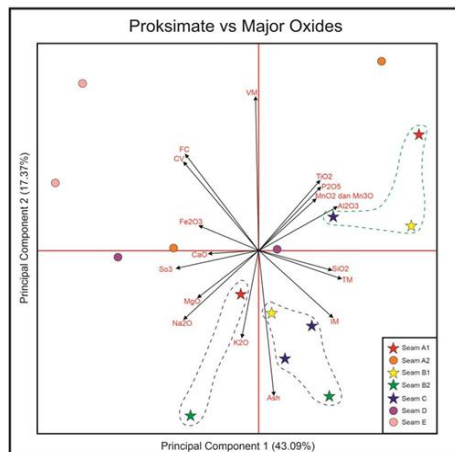
lebih tinggi karena posisinya secara stratigrafi di paling bawah.

Principal Components Analysis (PCA)



Gambar 10. Diagram PCA proksimat vs ultimat

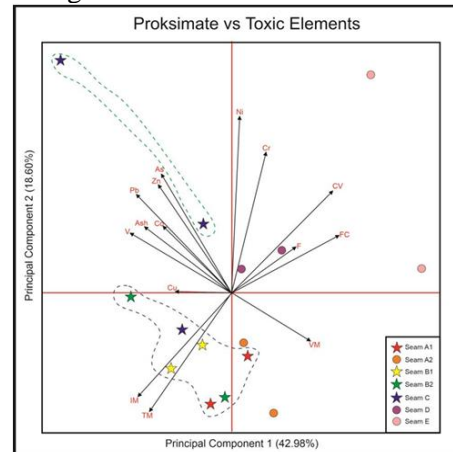
Pada *biplot* proksimat vs ultimat (Gambar 10), secara umum batubara yang memiliki *tonstein* sangat dikontrol oleh *ash*, *moisture*, sulfur, dan oksigen. Terdapat juga beberapa sampel dari seam A1 dan C yang lebih dikontrol oleh *volatile matter*. Seam D dan E lebih dikontrol oleh *fixed carbon*, *calorific value*, hidrogen, dan karbon. Hal ini menunjukkan bahwa seam D dan E erat kaitannya dengan proses pembatubaraan yang berhubungan dengan keempat parameter tersebut dibandingkan dengan *ash* atau *moisture*.



Gambar 11. Diagram PCA proksimat vs oksida utama

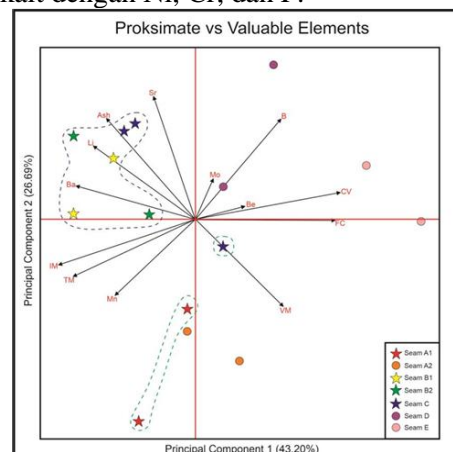
Pada *biplot* proksimat vs oksida utama (Gambar 11), batubara dengan *tonstein* berkaitan erat dengan *ash* dan *moisture*. *Ash* berhubungan dengan K_2O karena afinitas anorganiknya (Dai *et al.*, 2021), sedangkan *moisture* terkait dengan oksida seperti SiO_2 , Al_2O_3 , MnO_2 , P_2O_5 , dan TiO_2 , yang menunjukkan mineral hasil sedimentasi. Seam

E konsisten berhubungan dengan *fixed carbon*, *calorific value*, dan Fe_2O_3 , yang melimpah akibat pengaruh air laut dan presipitasi mineral sulfida. Seam A2 dan D menunjukkan persebaran yang tidak konsisten pada diagram.



Gambar 12. Diagram PCA proksimat vs unsur beracun

Pada *biplot* proksimat vs unsur beracun (Gambar 12), sebagian besar seam batubara yang terdapat *tonstein* berasosiasi dengan *moisture* mengandung unsur beracun berupa Cu, karena korelasi *moisture* dengan Cu cukup kuat. Seam C terkait erat dengan unsur beracun yang berasosiasi dengan sulfur, serta memiliki kadar abu dominan. Analisis menunjukkan *ash* berkorelasi kuat dengan unsur beracun terkait sulfur di seam C. Sementara itu, seam D dan E berhubungan erat dengan *fixed carbon* dan *calorific value*, yang terkait dengan Ni, Cr, dan F.

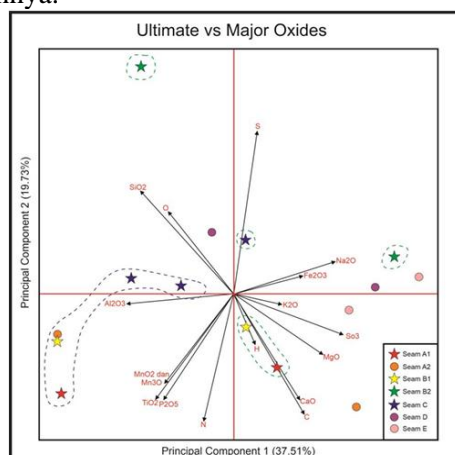


Gambar 13. Diagram PCA proksimat vs unsur berharga

Pada *biplot* proksimat vs unsur berharga (Gambar 13), batubara dengan *tonstein* yang berasosiasi dengan abu memiliki hubungan dengan unsur berharga Ba, Li, dan Sr,

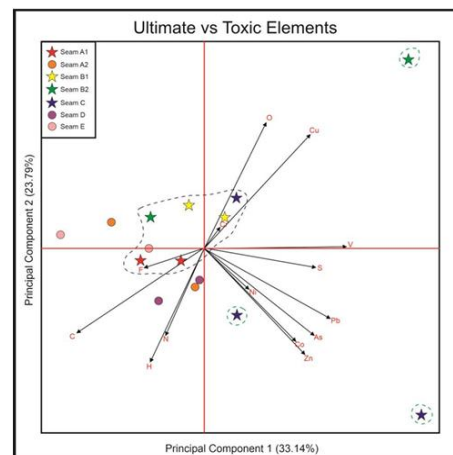
terutama pada *seam* B1, B2, dan C. Namun, *seam* C juga mengandung unsur beracun yang signifikan. *Seam* D dan E konsisten berasosiasi dengan *fixed carbon* dan *calorific value*, serta terkait erat dengan unsur non-volatil seperti Mo, Be, dan B. Untuk mencari unsur tersebut, fokuslah pada *seam* dengan *fixed carbon* atau *calorific value* tinggi (batubara peringkat tinggi).

Pada *biplot* ultimat vs oksida utama (Gambar 14), sampel batubara dengan *tonstein* pada *seam* A1, B1, dan C terkait erat dengan Al_2O_3 , MnO_2 , Mn_3O , TiO_2 , dan P_2O_5 , yang merepresentasikan kadar lengas (*moisture*). *Seam* D dan E dominan mengandung Fe_2O_3 , Na_2O , dan K_2O , menunjukkan keberadaan mineral lempung, sulfida, dan sedikit silikat. Sampel di kuadran II berasosiasi dengan oksida utama terkait mineral karbonat, mengindikasikan kandungan mineral karbonat yang lebih tinggi dibandingkan sampel lainnya.



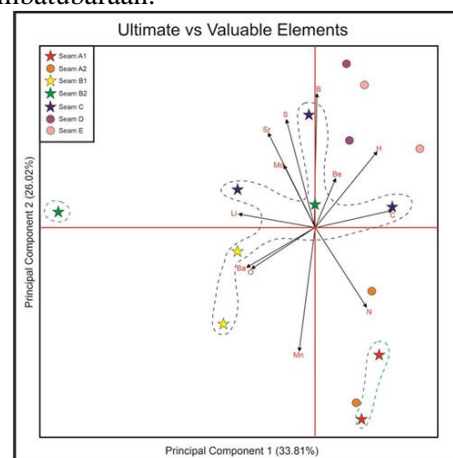
Gambar 14. Diagram PCA ultimat vs oksida utama

Pada *biplot* ultimat vs unsur beracun (Gambar 15), secara konsisten pada kuadran II, 2 sampel yang berasal dari *seam* C berasosiasi dengan unsur beracun yang memiliki kaitan erat dengan mineral sulfida. Pada kuadran III, merepresentasikan proses pembatubaraan yang dominan, dan *seam* D dan E masih konsisten juga dalam kelompok tersebut. Pada diagram kali ini, sebagian besar sampel yang memiliki *tonstein* tidak terlalu terlihat penyebaran polanya.



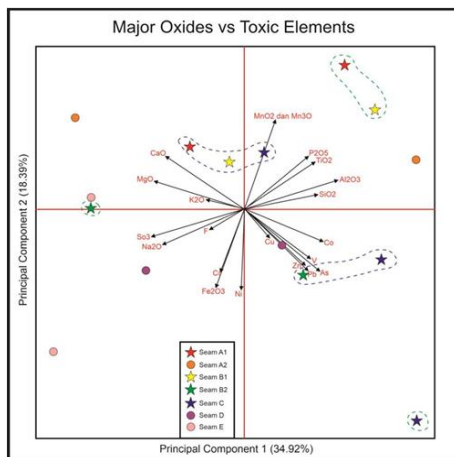
Gambar 15. Diagram PCA ultimat vs unsur beracun

Pada *biplot* ultimat vs unsur berharga (Gambar 16), batubara yang mengandung *tonstein* pada grafik terlihat cukup menyebar. Tetapi konsistensi pada sampel *seam* B1, B2, dan C yang terikat dengan unsur berharga dari abu (Ba, Li, dan Sr) cukup terlihat disini. *Seam* D dan E juga menunjukkan konsistensi yang sama. *Seam* ini masih berikatan dengan C, H, B, dan Be yang berhubungan dengan proses pembatubaraan.



Gambar 16. Diagram PCA ultimat vs unsur berharga

Pada *biplot* oksida utama vs unsur beracun (Gambar 17), sampel batubara yang mengandung *tonstein* sangat menyebar. Sampel batubara yang mengandung *tonstein* pada *seam* B2 dan C masih terlihat konsisten berkaitan dengan unsur beracun yang berasosiasi dengan mineral sulfida dan dikontrol oleh abu. Hal serupa terlihat pada sampel *seam* A1 dan B1 yang dikontrol dengan MnO_2 , Mn_3O , P_2O_5 , TiO_2 , Al_2O_3 , dan SiO_2 dimana oksida tersebut sangat dikontrol oleh *moisture*. *Seam* D dan E terlihat sangat menyebar pada grafik ini.

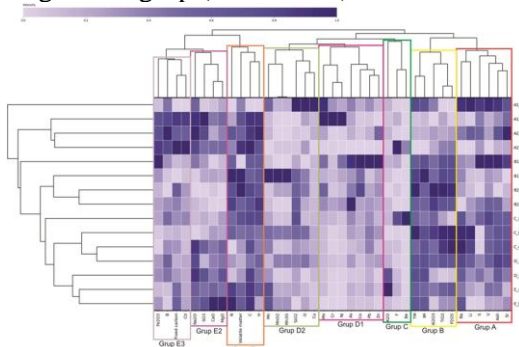


Gambar 17. Diagram PCA oksida utama vs unsur beracun

Pada *biplot* oksida utama vs unsur berharga (Gambar 18), persebaran batubara yang terdapat *tonstein* secara umum dibagi pada kuadran I dan II-III. Pada kuadran I, *seam* B1 dan 1 sampel *seam* C masih konsisten dengan P_2O_5 , TiO_2 , dan Al_2O_3 yang berhubungan dengan *moisture*. Pada kuadran II-III, memiliki kekerabatan yang dekat dengan Li, Mo, dan Be. Ketiga unsur ini sangat berkaitan erat dengan SiO_2 . Hal ini menunjukkan bahwa Li, Mo, dan Be terutama terjadi pada mineral silikat.

Hierarchical Clustering Analysis (HCA)

Kesimpulan analisis statistik multivariat menunjukkan pengelompokan variabel berdasarkan kesamaan karakteristik. Analisis kluster mengidentifikasi keterkaitan antar variabel dan sampel. Penulis membagi variabel menjadi lima grup, dengan beberapa dengan sub-grup (Gambar 18).



Gambar 18. Hasil analisis kluster dengan dendrogram

Grup A terdiri dari *ash*, sulfur, Ba, Li, Sr (unsur berharga), dan V (unsur beracun). Signifikansi sulfur yang selalu konsisten berdampingan dengan abu mencirikan kandungannya yang cukup tinggi. Unsur jejak yang dikontrol abu secara umum berasosiasi

dengan *silicate* (Li dan V) serta *carbonate minerals* (Ba dan Sr).

Grup B terdiri dari *moisture*, Al_2O_3 , TiO_2 , dan P_2O_5 . Pada grup ini sangat erat kaitannya dengan proses sedimentasi. TiO_2 dan Al_2O_3 kemungkinan besar berasal dari produk vulkanik, mungkin *rutile*, *ilmenite*, dan mineral aluminosilikat lainnya dalam batubara. P_2O_5 mungkin terkait dengan mineral fosfat seperti *apatite* [$Ca_5(PO_4)_3$] atau *phosphorite* yang dapat berasal dari gunung api.

Grup C-D2 secara umum memiliki tingkat korelasi yang rendah. Hal ini menunjukkan bahwa oksida utama atau unsur jejak dalam grup tersebut akan banyak mengalami *overlap* di setiap *seam*. Pada grup D1, secara umum memperlihatkan unsur beracun yang berhubungan erat dengan kadar abu. Grup D2, berisi unsur yang sering berasosiasi dengan *moisture*.

Grup E1 terdiri dari *volatile matter*, nitrogen, karbon, dan hidrogen. Hal ini menunjukkan beberapa parameter ultimat yang berhubungan dengan proses pembatubaraan.

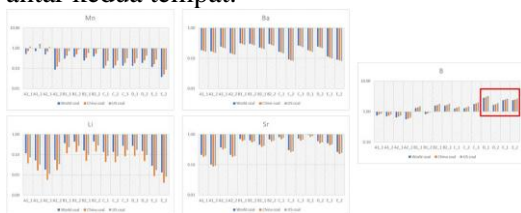
Grup E2 terdiri dari SO_3 , CaO, MgO, dan Na_2O . Secara umum grup ini menunjukkan keterkaitan beberapa oksida yang terjadi pada mineral karbonat. Sedangkan oksida Na_2O berhubungan dengan asosiasi bahan organik.

Grup E3 terdiri dari *fixed carbon*, *calorific value*, Fe_2O_3 , dan B. Secara umum parameter yang ada di grup ini berhubungan dengan proses peningkatan peringkat (pembatubaraan). Peningkatan kadar boron seiring dengan meningkatnya *fixed carbon* adalah hasil dari kombinasi faktor geokimia dan proses evolusi batubara yang mengeliminasi elemen-elemen volatil dan mempertahankan unsur non-volatil seperti boron.

Komparasi dengan Batubara Dunia, China, dan USA

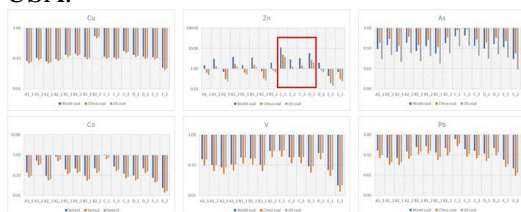
Komparasi dengan batubara dunia, China, dan USA digunakan untuk melihat apakah unsur-unsur di daerah penelitian memiliki konsentrasi di atas rata-rata. Nilai rata-rata diambil dari (Ketris dan Yudovich, 2009) dan dilakukan pada unsur jejak berharga dan beracun. Nilai batubara daerah penelitian dibandingkan dengan data negara tersebut

untuk mengetahui perbandingan konsentrasi antar kedua tempat.



Gambar 19. Komparasi unsur berharga dengan batubara dunia, China, dan USA

Pada (Gambar 19), untuk unsur berharga hanya Boron yang memiliki konsentrasi jauh di atas rata-rata dibandingkan batubara dunia, China, dan USA. Kadar Boron di daerah penelitian berkisar antara 31–158 ppm, dengan konsentrasi tertinggi di *seam* D dan E, meskipun *seam* B2 dan C juga memiliki kadar di atas rata-rata. Batubara daerah penelitian memiliki konsentrasi Boron hampir 3x lipat lebih tinggi dari batubara dunia dan China, serta hampir 4x lipat lebih tinggi dari batubara USA.



Gambar 20. Komparasi unsur beracun dengan batubara dunia, China, dan USA

Di sisi lain (Gambar 20), untuk unsur beracun hanya Zinc yang memiliki konsentrasi jauh di atas rata-rata dibandingkan batubara dunia, China, dan USA. Kadar Zinc di daerah penelitian berkisar antara 7,86–200,11 ppm, dengan konsentrasi tertinggi di *seam* C dan bagian atas *seam* D. *Seam* A1, A2, B1, dan B2 juga memiliki kadar Zinc signifikan. Batubara daerah penelitian memiliki konsentrasi Zinc 11x lipat lebih tinggi dari batubara dunia, hampir 5x lipat lebih tinggi dari batubara China, dan hampir 4x lipat lebih tinggi dari batubara USA, terutama di *seam* C.

5. Kesimpulan

Secara keseluruhan, mode keterdapatan unsur-unsur dalam batubara diklasifikasikan menjadi organik dan anorganik sebagai asosiasi. Mode keterdapatan yang berbeda untuk setiap unsur dalam batubara yang berbeda tergantung pada kondisi geologis pembentukan batubara, dari lingkungan

pengendapan gambut, melalui diagenesis, hingga epigenesis.

Moisture mengontrol batubara *seam* A1 dan B1 serta berkaitan dengan oksigen, SiO₂, Al₂O₃, P₂O₅, TiO₂, Cu, dan Mn. Kadar abu mengontrol batubara *seam* B2 dan C serta berkaitan dengan sulfur, V, Co, Zn, As, Pb, dan Sr. Sedangkan *fixed carbon* mengontrol batubara *seam* D dan E serta berkaitan dengan hidrogen, F, dan B.

Berdasarkan normalisasi dan komparasi dengan data rata-rata dunia, China, dan USA, unsur berharga yang memiliki konsentrasi di atas rata-rata adalah Boron (B), yang dapat ditemukan pada *seam* D dan E dengan kadar *fixed carbon* atau *calorific value* tinggi. Sementara itu, unsur beracun yang memiliki konsentrasi di atas rata-rata adalah Zinc (Zn), yang berhubungan dengan kadar abu tinggi dan sulfur, ditemukan pada *seam* C.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Geologi, FT UGM yang sudah memberikan segala ilmu serta tenaga pengajar berkualitas dalam usaha penulisan artikel ini. Selain itu, penulis juga berterima kasih kepada PT Bukit Asam Tbk terutama Satuan Kerja Eksplorasi yang berkenan untuk menyediakan data penelitian dalam artikel ini.

Daftar Pustaka

- Addison, R., Harrison, R.K., Land, D.H., 1983. Volcanogenic Tonsteins from tertiary coalmeasures, East Kalimantan, Int. J. of Coal Geol. 3, 1–30.
- Anggara, F., Amijaya, D. H., Harijoko, A., Tambaria, T. N., Sahri, A. A., & Asa, Z. a. N., 2018, Rare earth element and yttrium content of coal in the Banko coalfield, South Sumatra Basin, Indonesia: Contributions from tonstein layers, International Journal of Coal Geology, 196, 159–172.
- Barber, A.J., Crow, M.J., and Milsom, J., 2005, Sumatra: geology, resources and tectonic evolution: London, The Geological Society, pp. 290.
- Dai, S., Finkelman, R. B., French, D., Hower, J. C., Graham, I. T., & Zhao, F., 2021, Modes of occurrence of elements in coal:

- A critical evaluation. *Earth-Science Reviews*, 222, 103815.
- Goodarzi, F., Grieve, D.A., Labonte, M., 1990, Tonsteins in East Kootenay Coalfields, South Eastern British Columbia, *Energy Sources*, pp. 265–295 12 pp.
- Hower, J.C., Ruppert, L.F., Eble, C.F., 1999, Lanthanide, yttrium, and zirconium anomalies in the fire clay coal bed, eastern Kentucky, *Int. J. Coal Geol.* 39, 141–153.
- Indonesia, 2017, Peraturan Presiden (Perpres) Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional, Jakarta.
- Ketris, M., & Yudovich, Y., 2009, Estimations of Clarks for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals, *International Journal of Coal Geology*, 78(2), 135–148.
- Lyons, P.C., Krogh, T.E., Kwok, Y.Y., Davis, D.W., Outerbridge, W.F., Evans Jr., H.W., 2006, Radiometric ages of the Fire Clay tonstein [Pennsylvanian (Upper Carboniferous), Westphalian, Duckmantian]: A comparison of U–Pb zircon single crystal ages and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sanidine single-crystal plateau ages, *Int. J. Coal Geol.* 67, 259–266.
- Pollock, S.M., Goodarzi, F., Riediger, C.L., 2000, Mineralogical and elemental variation of coal from Alberta; Canada: an example from the no. 2 seam, Genesee mine. *Int. J. Coal Geol.* 43, 259–286.
- Ruppert, L.F., Moore, T.A., 1993, Differentiation of volcanic ash-fall and water-borne detrital layers in the Eocene Senakin coal bed, Tanjung formation, Indonesia, *Org. Geochem.* 20, 233–247.
- Spears, D.A., Duff, P., McL, D., Caine, P.M., 1988, The West Waterberg tonstein, South Africa, *Int. J. Coal Geol.* 9, 221–233.
- Triplehorn, D.D., 1990, Applications of tonsteins to coal geology: some example from western United States. *International Journal of Coal Geology* (16), pp: 157-160.
- van Bemmelen, R.W., 1949, The geology of Indonesia. In: Martinus Nijhoff. The Hague, Netherlands.
- Zhou, Y., Ren, Y., Bohor, B.F., 1982, Origin and distribution of Tonsteins in late Permian coal seams of southwestern China, *Int. J. Coal Geol.* 2, 49–77.