

Pengembangan Sistem Penilaian Kinerja Environmental, Social, and Governance Berbasis K-Means Clustering dengan Pendekatan Best-in-Class

Haidar Aditya Baran, Dewi Yanti Liliana

Jurusan Teknik Informatika dan Komputer, Politeknik Negeri Jakarta

Depok, Jawa Barat

haidar.aditya.baran.tik22@mhs.wpnj.ac.id

Abstract Cross-sector Environmental, Social, and Governance (ESG) performance evaluation faces a fundamental methodological challenge in the form of sector bias, which arises when companies from different industries are compared on a single scale without considering their operational characteristics. This study develops UNBEESG, a web-based ESG assessment system that integrates the Katadata ESG Index (KESGI) 2025 weighting methodology with intra-sector K-Means Clustering to produce a best-in-class classification that is free from sector bias. The scoring pipeline comprises categorical conversion, revenue normalization, Min-Max normalization, sub-aspect aggregation, and differential KESGI weighting, while clustering is performed separately within each sector in a per-pillar 1D mode and a combined 3D mode with $k=3$ (Leader, Average, Laggard). Three benchmark algorithms (Agglomerative Clustering, DBSCAN, and Gaussian Mixture Model) are evaluated as validation, and SHapley Additive exPlanations (SHAP) is integrated to guarantee model interpretability. The system is built on a Flask REST API backend and a Vue.js 3 frontend. Scoring validation using PT Vale Indonesia Tbk 2024 as a case study shows 100% consistency with manual spreadsheet calculation (final ESG score of 98.53 with a difference of 0.00). Cluster quality evaluation yields Silhouette Scores of 0.60–0.83 for the 1D mode and 0.32–0.60 for the 3D mode, indicating statistically meaningful cluster separation, and black box testing of 13 REST API scenarios achieves a 100% pass rate.

Keywords: best-in-class, ESG, K-Means Clustering, KESGI, SHAP

Abstrak Evaluasi kinerja Environmental, Social, and Governance (ESG) lintas sektor menghadapi tantangan metodologis fundamental berupa bias sektoral, yaitu distorsi yang timbul ketika perusahaan dari industri yang berbeda dibandingkan dalam satu skala tunggal tanpa mempertimbangkan karakteristik operasionalnya. Penelitian ini mengembangkan UNBEESG, sistem penilaian ESG berbasis web yang mengintegrasikan pembobotan Katadata ESG Index (KESGI) 2025 dengan K-Means Intra-Sector Clustering untuk menghasilkan klasifikasi best-in-class yang bebas dari bias sektoral. Pipeline penskoran meliputi konversi kategorik, revenue normalization, normalisasi Min-Max, agregasi sub-aspek, dan pembobotan KESGI diferensial, sedangkan klusterisasi dilakukan terpisah per sektor dalam mode 1D per pilar dan mode 3D gabungan dengan $k=3$ (Leader, Average, Laggard). Tiga algoritma pembanding (Agglomerative Clustering, DBSCAN, dan Gaussian Mixture Model) dievaluasi sebagai validasi, dan SHapley Additive exPlanations (SHAP) diintegrasikan untuk menjamin interpretabilitas model. Sistem dibangun dengan backend Flask REST API dan frontend Vue.js 3. Validasi penskoran menggunakan studi kasus PT Vale Indonesia Tbk 2024 menunjukkan konsistensi 100% dengan perhitungan manual (skor ESG akhir 98,53 dengan selisih 0,00). Evaluasi kualitas kluster menghasilkan Silhouette Score 0,60–0,83 pada mode 1D dan 0,32–0,60 pada mode 3D yang mengindikasikan pemisahan kluster bermakna, serta black box testing terhadap 13 skenario REST API mencapai pass rate 100%.

Kata kunci: best-in-class, ESG, K-Means Clustering, KESGI, SHAP

I. PENDAHULUAN

Paradigma pengelolaan perusahaan telah bergeser dari *shareholder capitalism* menuju *stakeholder capitalism* yang menuntut penciptaan nilai bagi seluruh pemangku kepentingan, termasuk karyawan, komunitas, dan lingkungan [1]. Manifestasi operasionalnya terangkum dalam

kerangka Environmental, Social, and Governance (ESG) yang kini menentukan akses perusahaan terhadap modal, reputasi pasar, dan lisensi sosial. Integrasi ESG didukung bukti empiris kuat: meta-analisis lebih dari 2.000 studi menemukan sekitar 90% penelitian menunjukkan korelasi non-negatif antara kinerja ESG dan kinerja finansial [2], dan perusahaan dengan kebijakan keberlanjutan yang

kuat terbukti mengungguli kompetitornya dalam jangka panjang [3].

Tuntutan keberlanjutan tersebut berakar pada Sustainable Development Goals (SDGs) yang ditetapkan Perserikatan Bangsa-Bangsa pada 2015 dan diadopsi Indonesia melalui Peraturan Presiden Nomor 111 Tahun 2022 tentang Pelaksanaan Pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan yang secara eksplisit menempatkan dunia usaha sebagai salah satu pelaksana utama [4]. Kerangka ESG menjadi mekanisme operasional untuk menerjemahkan target SDGs nasional ke dalam praktik bisnis terukur, sehingga penilaian ESG yang objektif menjadi prasyarat untuk mengukur kontribusi riil perusahaan, bukan sekadar formalitas pelaporan.

Adopsi ESG juga didorong kerangka regulasi dan inisiatif pasar modal: POJK No. 51/2017 [5] dan SEOJK No. 16/2021 [6] mewajibkan laporan keberlanjutan bagi perusahaan publik dan lembaga jasa keuangan, sementara Bursa Efek Indonesia menyusun IDX ESG Leaders Index sebagai acuan investor. Di sisi lain, Katadata Insight Center mengembangkan Katadata ESG Index (KESGI) sejak 2022 yang menilai ESG perusahaan publik Indonesia pada delapan sektor industri dengan metodologi terstandarisasi berbasis SEOJK No. 16/2021 [7].

Namun, evaluasi ESG lintas sektor menghadapi bias sektoral (*sector bias*): distorsi ketika seluruh perusahaan dibandingkan dalam satu skala tunggal tanpa mempertimbangkan karakteristik operasional sektornya. Data KESGI 2025 mengonfirmasi hal ini: skor median aspek Lingkungan sektor Perbankan (59,41) lebih tinggi daripada Transportasi dan Logistik (52,23) dan hampir setara Pertambangan (62,19), padahal Perbankan memperolehnya bukan karena mengelola dampak ekologis besar [7]. KESGI telah menerapkan pembobotan diferensial per sektor, tetapi belum menjawab pertanyaan inti: perusahaan mana yang menjadi perintis (*leader*), rata-rata (*average*), atau tertinggal (*laggard*) di dalam sektornya sendiri.

Penelitian terdahulu menyoroti persoalan ini dari berbagai sisi: analisis 16 lembaga rating ESG menunjukkan lemahnya materialitas dan standarisasi [8]; regresi panel membuktikan ukuran perusahaan dan sektor merupakan bias sistematis tanpa menawarkan mekanisme koreksi [9]; K-Means telah dipakai untuk data ESG namun secara global lintas sektor [10]; dan divergensi rating antar enam

lembaga (korelasi 0,54) teridentifikasi tanpa solusi aplikatif bermetodologi terbuka [11]. Penelitian yang memadukan klusterisasi intra-sektor, standar KESGI lokal, dan interpretabilitas model belum pernah dilakukan di Indonesia.

Untuk mengisi kesenjangan tersebut, penelitian ini mengoperasionalkan pendekatan *best-in-class* melalui K-Means Clustering terpisah di dalam masing-masing sektor (*intra-sector clustering*) [12], sehingga setiap perusahaan dinilai relatif terhadap centroid sektornya sendiri. K-Means dipilih karena bersifat *unsupervised*, berkomputasi ringan untuk aplikasi web interaktif, dan centroid-nya mudah diinterpretasikan; $k=3$ mengacu pada MSCI ESG Ratings (Leaders, Average, Laggards). Interpretabilitas dijamin melalui SHapley Additive exPlanations (SHAP) [13] yang menjawab kritik model *black box* [14]. Kontribusinya adalah sistem web UNBEESG yang mengintegrasikan pembobotan KESGI 2025, klusterisasi intra-sektor mode 1D dan 3D dengan validasi tiga algoritma pembanding, interpretasi SHAP, persona korporat deterministik, dan dashboard interaktif untuk *self-assessment* pihak internal perusahaan sebelum menghadapi penilaian lembaga pemeringkat eksternal.

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Rancangan Penelitian

Penelitian dilaksanakan melalui enam tahapan (Gambar 1): identifikasi kebutuhan melalui studi literatur metodologi KESGI 2025 dan verifikasi dataset referensi; pengembangan pipeline pengolahan data ESG (klasifikasi per sektor, pembersihan, normalisasi, agregasi, pembobotan); pengembangan model clustering per sektor beserta evaluasinya; pengembangan aplikasi web; pengujian sistem; dan penulisan laporan. Sistem dibangun dengan Python Flask (backend REST API), Vue.js 3 (frontend), scikit-learn dan SHAP (pemodelan), serta SQLite (basis data).

B. Data Penelitian

Tiga sumber data sekunder digunakan. Pertama, Public Company ESG Ratings Dataset dari Kaggle [15] yang dikembangkan ESG Enterprise [16], berisi 722 perusahaan global dengan skor pilar E, S, G skala 0–1000, sebagai populasi referensi normalisasi; konversi ke skala 0–100 dengan faktor 1/10 tervalidasi 100% terhadap tabel grade resminya. Kedua, dokumen metodologi KESGI 2024–2025 [7] sebagai acuan indikator, pembobotan, dan grade. Ketiga, Laporan

Keberlanjutan PT Vale Indonesia Tbk 2024 [17] sebagai objek uji validasi penskoran (47 indikator, pemetaan 1:1). Distribusi populasi referensi ditampilkan pada Tabel I; sektor Perkebunan (0 perusahaan) tidak dapat diklasifikasi, sedangkan Pertambangan tepat di ambang minimum sepuluh perusahaan.

TABEL I. DISTRIBUSI POPULASI REFERENSI PER SEKTOR KESGI

Sektor KESGI	Jumlah	Persentase	Syarat ≥ 10
Perbankan	89	12,3%	Ya
Pertambangan	10	1,4%	Ya (minimum)
Perkebunan	0	0,0%	Tidak
Makanan & Minuman	20	2,8%	Ya
Transportasi & Logistik	22	3,0%	Ya
Bahan Kimia	19	2,6%	Ya
Energi	51	7,1%	Ya
Perhotelan	30	4,2%	Ya
Lainnya	481	66,6%	Ya
Total	722	100,0%	

C. Pipeline Penskoran KESGI

Pipeline penskoran memproses 47–52 indikator per sektor melalui enam tahap: (1) konversi kategorik ke numerik sesuai KESGI 2025 (Ada/Tidak ke 0–1, PROPER ke 0–5, perlindungan flora-fauna ke 1–5); (2) *revenue normalization*, yakni indikator kuantitatif absolut dibagi pendapatan usaha agar komparabel antar skala operasi; (3) normalisasi Min-Max terhadap populasi referensi menggunakan persamaan (1); (4) agregasi skor indikator ke sub-aspek dan aspek dengan rata-rata sederhana; (5) pembobotan diferensial per sektor sesuai Tabel II; dan (6) penentuan grade C (0,00–25,00), B (25,01–50,00), A (50,01–75,00), atau A+ (75,01–100,00).

$$Skor = ((X_i - X_{min}) / (X_{max} - X_{min})) \times 100(1)$$

Keterangan: X_i = nilai aktual indikator perusahaan; X_{min} dan X_{max} = nilai minimum dan maksimum indikator pada populasi referensi.

Untuk indikator *reverse* (semakin tinggi semakin buruk, seperti total emisi), hasil persamaan (1) dikurangkan dari 100. Indikator numerik tanpa data pembandingan diberi skor *proxy* netral 50 yang lebih konservatif dibandingkan skor 0.

TABEL II. FORMULA PEMBOBOTAN KESGI PER KLASIFIKASI SEKTOR

Klasifikasi Sektor	Formula Pembobotan
Non-Finansial (Pertambangan, Perkebunan, Makanan & Minuman, Transportasi & Logistik, Bahan Kimia, Energi, Perhotelan)	KESGI = 50%E + 30%S + 20%G
Perbankan / Keuangan	KESGI = 20%E + 30%GE + 30%S + 20%G

D. K-Means Intra-Sector Clustering

Klasterisasi dilakukan terpisah per sektor (minimal sepuluh perusahaan) menggunakan K-Means $k=3$ dengan inisialisasi *k-means++* [18]. Karena K-Means sensitif terhadap pencilaan, data input diproses melalui *winsorization* berbasis IQR: nilai di luar $Q1-1,5 \times IQR$ atau $Q3+1,5 \times IQR$ digantikan nilai batas terdekat sehingga jumlah observasi dipertahankan. Klasterisasi berjalan dalam dua mode: 1D per pilar (label per pilar E, S, G) dan 3D gabungan (profil menyeluruh), dengan fitur masukan skor pilar mentah. Klaster diberi label deterministik berdasarkan peringkat skor rata-rata (*cluster mean ranking*): terendah Laggard, menengah Average, tertinggi Leader. Penempatan perusahaan baru memakai prinsip *nearest centroid*: skor dinormalisasi dengan *scaler* sektor tersimpan, lalu jarak Euclidean terhadap tiap centroid dihitung dengan persamaan (2).

$$d(x, c) = \sqrt{[(x_{env} - c_{env})^2 + (x_{soc} - c_{soc})^2 + (x_{gov} - c_{gov})^2]}(2)$$

Keterangan: $d(x, c)$ = jarak Euclidean antara vektor skor perusahaan x dan centroid klaster c ; x_{env} , x_{soc} , x_{gov} = skor ternormalisasi perusahaan pada pilar Environment, Social, dan Governance; c_{env} , c_{soc} , c_{gov} = nilai centroid klaster pada pilar yang sama.

Nilai $k=3$ ditetapkan atas dua pertimbangan: secara konseptual mengikuti klasifikasi tiga tier standar metodologi *best-in-class* (MSCI, Sustainalytics), dan secara statistik evaluasi Elbow Method serta Silhouette Score untuk $k=2$ hingga $k=6$ menunjukkan $k=3$ memberikan nilai memadai dengan interpretabilitas lebih kaya. Mode 1D mengidentifikasi kekuatan dan kelemahan spesifik per pilar, sedangkan mode 3D dikombinasikan dengan SHAP untuk membentuk persona korporat. Kualitas klaster dievaluasi dengan Silhouette Score [19]; tiga algoritma pembandingan (Agglomerative Clustering, DBSCAN, Gaussian Mixture Model) turut dievaluasi dan K-Means dipertahankan selama selisih Silhouette Score-nya tidak melebihi 0,02 dari

algoritma terbaik. Model, *scaler*, centroid, dan metadata dikemas dalam file .joblib per sektor untuk inferensi backend.

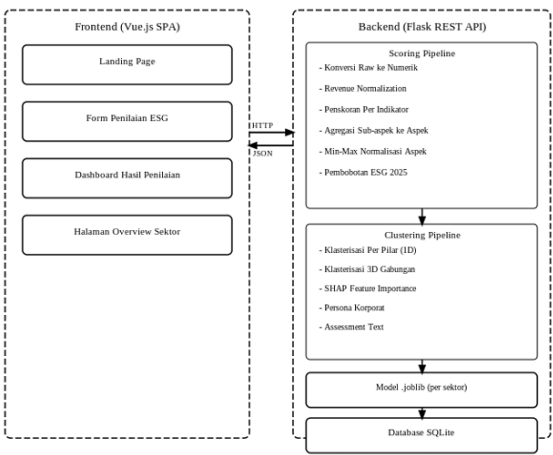
E. Interpretasi SHAP dan Persona Korporat

Nilai SHAP *mean absolute* per pilar [13] dihitung sekali saat pelatihan model 3D dan disimpan bersama model karena model bersifat statis. Hasil klasterisasi kemudian diterjemahkan menjadi persona korporat ESG: label bahasa natural yang ditentukan secara deterministik (*rule-based*) dari kombinasi label klaster 1D dan 3D, menghasilkan 18 kombinasi persona, misalnya “Comprehensive ESG Leader” untuk klaster 3D Leader dengan seluruh pilar Leader.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Implementasi Sistem

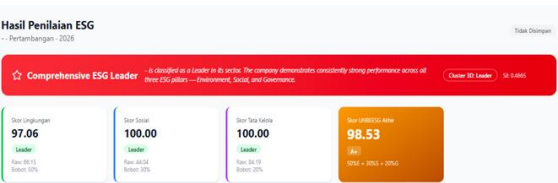
UNBEESG diimplementasikan dengan arsitektur dua lapisan terpisah penuh: backend Flask REST API [20] dan frontend Vue.js 3 dengan Tailwind CSS serta Chart.js (Gambar 2). Terdapat dua pipeline paralel: *scoring pipeline* menghasilkan skor E/S/G dan grade, sedangkan *clustering pipeline* menghasilkan label klaster melalui *scaler winsorized* tersimpan; keduanya sengaja memakai batas Min-Max berbeda. Basis data SQLite terdiri dari lima tabel dan backend menyediakan sepuluh endpoint REST API dengan autentikasi JWT dan *hashing* bcrypt.



Gambar 2. Arsitektur Sistem UNBEESG

Basis data terdiri dari lima tabel: *users*, *companies*, *assessments*, *indicator_answers*, dan *seed_companies* yang menyimpan 722 perusahaan referensi; endpoint dikelompokkan dalam tiga blueprint (*auth*, *assessment*, *company*) dengan respons JSON dan kode status HTTP yang sesuai.

Antarmuka web mencakup landing page, form penilaian multi-langkah (47–52 indikator ditampilkan bertahap untuk mengurangi beban kognitif pengguna), dashboard hasil penilaian, dan halaman ikhtisar sektor berisi scatter plot, distribusi klaster, dan peringkat perusahaan. Dashboard (Gambar 3) menampilkan persona banner, kartu skor per pilar, radar chart profil E/S/G terhadap centroid Leader/Average/Laggard, SHAP bar chart, panel posisi klaster 1D per pilar, grouped bar chart perbandingan dengan rata-rata sektor, serta tabel perbandingan peers dengan kode warna konsisten (Leader hijau, Average kuning, Laggard merah).



Gambar 3. Dashboard Hasil Penilaian UNBEESG

B. Validasi Konsistensi Penskoran

Validasi memakai studi kasus PT Vale Indonesia Tbk (INCO) 2024 sektor Pertambangan: 47 indikator dari laporan keberlanjutan [17] diinput ke sistem dan dibandingkan dengan perhitungan manual spreadsheet (Tabel III dan IV).

TABEL III. PERHITUNGAN SKOR PT VALE INDONESIA TBK 2024

Pilar	Skor Mentah	Skor Ternormalisasi	Keterangan
Lingkungan (E)	66,15	97,06	—
Sosial (S)	44,04	100,00	Melebihi Xmax (38,9); di-cap 100
Tata Kelola (G)	84,19	100,00	Melebihi Xmax (35,5); di-cap 100
ESG Akhir	—	98,53	$0,50 \times 97,06 + 0,30 \times 100 + 0,20 \times 100$

TABEL IV. HASIL VALIDASI KONSISTENSI PENSKORAN

Metode	E	S	G	ESG	Grade	Selisih
Sistem UNBEESG	97,06	100,00	100,00	98,53	A+	0,00
Manual (Excel)	97,06	100,00	100,00	98,53	A+	0,00

Seluruh skor identik dengan selisih 0,00, membuktikan translasi metodologi KESGI 2025 ke implementasi programatik akurat hal yang penting karena kesalahan penskoran akan berpropagasi ke klasterisasi dan persona. Skor Sosial dan Tata Kelola di-cap 100 akibat penambahan lima indikator

reklasifikasi dari aspek kesetaraan gender sesuai pemetaan KESGI 2025.

C. Evaluasi Kualitas Klaster

Silhouette Score mencapai 0,60–0,83 (mode 1D) dan 0,32–0,60 (mode 3D), mengindikasikan pemisahan klaster bermakna; mode 1D lebih tegas karena berdimensi rendah, dan sektor homogen seperti Perhotelan (3D = 0,60) lebih jelas daripada sektor heterogen seperti Makanan dan Minuman (0,32). K-Means konsisten terbaik atau dalam ambang 0,02 dari skor tertinggi, memvalidasi pilihannya [21]. Rentang skor tiap klaster per sektor (Gambar 4) yang berbeda-beda menegaskan klasifikasi bersifat relatif intra-sektor.



Gambar 4. Rentang Skor Klaster per Sektor

Sebagai demonstrasi, skor mentah PT Vale (66,15; 44,04; 84,19) dinormalisasi dengan *scaler* sektor Pertambangan lalu dibandingkan terhadap centroid (Tabel V); ketiga pilar jatuh pada klaster Leader. Pada mode 3D, jarak ke centroid Leader (3,48) terkecil dibandingkan Average (4,06) dan Laggard (4,41), sehingga persona yang dihasilkan adalah “Comprehensive ESG Leader”.

TABEL V. PENEMPATAN KLASSTER 1D PT VALE (SEKTOR PERTAMBANGAN)

Pilar	Skor Norm.	C. Laggard	C. Average	C. Leader	Klaster
Lingkungan	0,97	0,02	0,37	0,76	Leader
Sosial	1,00	0,11	0,56	0,87	Leader
Tata Kelola	1,00	0,04	0,68	1,00	Leader

D. Analisis Interpretabilitas dengan SHAP

Pada model 3D sektor Pertambangan, pilar Social berkontribusi tertinggi (0,1333), diikuti Environment (0,1000) dan Governance (0,0333) lihat Tabel VI dan Gambar 5. Artinya, perusahaan pertambangan yang ingin naik klaster sebaiknya memprioritaskan pilar Sosial.

TABEL VI. NILAI SHAP MEAN ABSOLUTE PER PILAR (SEKTOR PERTAMBANGAN, MODEL 3D)

Pilar	SHAP Mean Absolute	Peringkat Kontribusi
Social (S)	0,1333	1 (tertinggi)
Environment (E)	0,1000	2
Governance (G)	0,0333	3 (terendah)

Pada tingkat individual, SHAP menjelaskan penempatan yang tidak intuitif: Newmont Corporation menjadi Leader terutama karena pilar Social (+0,1333) meskipun Environment menahan (−0,1000); Nucor Corp menjadi Average karena defisit Governance memoderasi keunggulan Social-nya; Universal Stainless & Alloy Products menjadi Laggard di seluruh pilar. Lintas sektor, ConocoPhillips (Energi) juga didorong Social (+0,2298), sedangkan Microsoft Corp didorong Governance (+0,3872) perbedaan pola yang mengonfirmasi bahwa faktor ESG material memang berbeda antar industri [22].

E. Black Box Testing

Seluruh 13 skenario black box testing endpoint REST API termasuk *edge case* input kosong, token JWT kedaluwarsa, dan akses tanpa autentikasi lulus 100%. Mekanisme *graceful degradation* (mengembalikan null alih-alih error 503 saat model 3D tidak tersedia) menjaga sistem tetap operasional untuk sektor tanpa model, seperti Perkebunan.

F. Pembahasan

Secara praktis, perusahaan dapat menggunakan UNBEESG untuk mengevaluasi posisi ESG relatif terhadap peers sektornya sebelum menghadapi penilaian lembaga pemeringkat eksternal. Informasi SHAP per pilar memungkinkan prioritisasi alokasi sumber daya pada perbaikan yang paling berdampak, sementara persona korporat menjembatani output algoritmik dengan pengambilan keputusan manajemen non-teknis.

UNBEESG berhasil mengoperasionalkan pendekatan *best-in-class* intra-sektor: berbeda dengan temuan divergensi rating antar penyedia [11], sistem memakai satu standar lokal KESGI; pendekatan intra-sektor sejalan dengan rekomendasi eliminasi *confounding factor* sektor [9]; dan integrasi SHAP menjadikan hasil dapat diaudit pemangku kepentingan non-teknis [14]. Keterbatasannya: dataset referensi didominasi perusahaan Amerika Serikat sehingga konversi skala tidak menjamin kesetaraan substansi;

normalisasi Min-Max hanya pada tingkat pilar agregat karena data per indikator tidak tersedia publik; dan pemeriksaan kontroversi perusahaan belum diimplementasikan.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Sistem penilaian ESG berbasis web UNBEESG berhasil dikembangkan menggunakan arsitektur Flask REST API dan Vue.js 3 dengan mengimplementasikan K-Means Intra-Sector Clustering berbobotan KESGI 2025, sehingga menghasilkan klasifikasi *best-in-class* yang menilai perusahaan relatif terhadap sektornya sendiri dan bebas bias sektoral. Pipeline penskoran konversi kategorik, *revenue normalization*, normalisasi Min-Max, agregasi, dan pembobotan diferensial terbukti akurat melalui validasi studi kasus PT Vale Indonesia Tbk dengan kesesuaian 100% terhadap perhitungan manual (skor ESG 98,53; selisih 0,00). Kualitas klusterisasi tergolong bermakna secara statistik (Silhouette Score 0,60–0,83 mode 1D dan 0,32–0,60 mode 3D) dengan K-Means konsisten dipertahankan atas tiga algoritma pembandingan. Integrasi SHAP memberikan transparansi pada tingkat agregat maupun individual, misalnya mengidentifikasi pilar Sosial sebagai penentu utama penempatan kluster sektor Pertambangan, dan black box testing mencapai pass rate 100% pada seluruh 13 skenario termasuk mekanisme *graceful degradation*.

Pengembangan lanjutan disarankan: normalisasi tingkat indikator individual bila data granular tersedia; penggantian populasi referensi dengan data perusahaan Bursa Efek Indonesia; *re-training* model berkala; analisis tren multi-tahun; pengumpulan data sektor Perkebunan; User Acceptance Testing dengan praktisi keberlanjutan; serta fitur ekspor hasil ke PDF dan Excel.

REFERENSI

- [1] World Economic Forum. Measuring Stakeholder Capitalism: Towards Common Metrics and Consistent Reporting of Sustainable Value Creation. Geneva: World Economic Forum. 2020.
- [2] Friede G, Busch T, Bassen A. ESG and Financial Performance: Aggregated Evidence from More than 2000 Empirical Studies. *Journal of Sustainable Finance & Investment*. 2015; 5(4): 210-233.
- [3] Eccles RG, Ioannou I, Serafeim G. The Impact of Corporate Sustainability on Organizational Processes and Performance. *Management Science*. 2014; 60(11): 2835-2857.
- [4] Sekretariat Negara Republik Indonesia. Peraturan Presiden Nomor 111 Tahun 2022 tentang Pelaksanaan Pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan. Jakarta. 2022.
- [5] Otoritas Jasa Keuangan. Peraturan Otoritas Jasa Keuangan Nomor 51/POJK.03/2017 tentang Penerapan Keuangan Berkelanjutan bagi Lembaga Jasa Keuangan, Emiten, dan Perusahaan Publik. Jakarta: OJK. 2017.
- [6] Otoritas Jasa Keuangan. Surat Edaran Otoritas Jasa Keuangan Nomor 16/SEOJK.04/2021 tentang Bentuk dan Isi Laporan Tahunan Emiten atau Perusahaan Publik. Jakarta: OJK. 2021.
- [7] Katadata Insight Center. Metodologi Katadata ESG Index (KESGI) 2025. Jakarta: Katadata. 2025.
- [8] Escrig-Olmedo E, Fernández-Izquierdo MÁ, Ferrero-Ferrero I, Rivera-Lirio JM, Muñoz-Torres MJ. Rating the Raters: Evaluating How ESG Rating Agencies Integrate Sustainability Principles. *Sustainability*. 2019; 11(3): 915.
- [9] Drempetic S, Klein C, Zwergel B. The Influence of Firm Size on the ESG Score: Corporate Sustainability Ratings Under Review. *Journal of Business Ethics*. 2020; 167(2): 333-360.
- [10] D'Amato V, D'Ecclesia R, Levantesi S. Fundamental Ratios as Predictors of ESG Scores: A Machine Learning Approach. *Decisions in Economics and Finance*. 2021; 44(2): 1087-1110.
- [11] Berg F, Kölbl JF, Rigobon R. Aggregate Confusion: The Divergence of ESG Ratings. *Review of Finance*. 2022; 26(6): 1315-1344.
- [12] Han J, Kamber M, Pei J. *Data Mining: Concepts and Techniques*. 3rd Edition. Waltham: Morgan Kaufmann. 2012.
- [13] Lundberg SM, Lee SI. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NeurIPS 2017)*. Long Beach. 2017: 4765-4774.
- [14] Lipton ZC. The Mythos of Model Interpretability. *Queue*. 2018; 16(3): 31-57.
- [15] King J. Public Company ESG Ratings Dataset. Kaggle. 2024.
- [16] ESG Enterprise. ESG Enterprise Methodology and Scoring Framework. ESG Enterprise Inc. 2024.
- [17] PT Vale Indonesia Tbk. Laporan Keberlanjutan PT Vale Indonesia Tbk 2024. Jakarta: PT Vale Indonesia Tbk. 2025.
- [18] Arthur D, Vassilvitskii S. k-means++: The Advantages of Careful Seeding. *Proceedings of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA '07)*. New Orleans. 2007: 1027-1035.
- [19] Rousseeuw PJ. Silhouettes: A Graphical Aid to the Interpretation and Validation of Cluster Analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 1987; 20: 53-65.
- [20] Grinberg M. *Flask Web Development: Developing Web Applications with Python*. 2nd Edition. Sebastopol: O'Reilly Media. 2018.
- [21] Jain AK. Data Clustering: 50 Years Beyond K-Means. *Pattern Recognition Letters*. 2010; 31(8): 651-666.
- [22] Khan M, Serafeim G, Yoon A. Corporate Sustainability: First Evidence on Materiality. *The Accounting Review*. 2016; 91(6): 1697-1724.