



Pemetaan Wilayah Aman dan Berkelanjutan dalam Dimensi Lingkungan di Indonesia dengan Pendekatan *K-Means Clustering*

Ikhlasul A'mal¹, Ni Putu Lidya Pramesty², Landha Pratiwi Shaleh³, Robert Kurniawan⁴

^{1,2,3}Program Studi Statistika, Politeknik Statistika STIS, Jakarta, Indonesia

⁴Program Studi Komputasi Statistik, Politeknik Statistika STIS, Jakarta, Indonesia

¹212112105@stis.ac.id

²212112257@stis.ac.id

³212112151@stis.ac.id

⁴robertk@stis.ac.id

Corresponding author email: 212112105@stis.ac.id

Abstract: The 11th goal of the SDGs is to make cities and human settlements inclusive, safe, resilient, and sustainable. The characteristics of each province in Indonesia are very diverse, but there is no information regarding the achievement of criteria towards this target. Focusing on the target of safe and sustainable areas from an environmental perspective, this research aims to classify the 34 provinces in Indonesia based on three dimensions: disaster resilience, environmental pollution levels, and access to energy, and to analyze the associations between these dimensions. Data obtained from BPS and Google Earth Engine were analyzed using the *K-means* method and odds ratio. The results of the study indicate that no province has performed well in all dimensions, 11 provinces have performed well in 2 dimensions, and there are still 2 provinces that have not performed well in any dimension. Each dimension is associated with the others, which is expected to be a consideration in policy making.

Keywords: disaster resilience, energy access, environmental pollution, *K-means clustering*

Abstrak: Tujuan ke-11 dalam SDGs adalah menjadikan kota dan pemukiman yang inklusif, aman, tangguh dan berkelanjutan. Karakteristik masing-masing provinsi di Indonesia sangat beragam, namun belum ada informasi mengenai ketercapaian kriteria menuju target tersebut. Dengan berfokus pada target wilayah aman dan berkelanjutan dari perspektif lingkungan, penelitian ini bertujuan untuk melakukan klasifikasi 34 provinsi di Indonesia berdasarkan tiga dimensi, yaitu ketahanan terhadap bencana alam, tingkat pencemaran lingkungan, dan akses terhadap energi serta menganalisis asosiasi antara ketiga dimensi. Data yang diperoleh dari BPS dan *Google Earth Engine* dianalisis dengan metode *K-means clustering* dan *odds ratio*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa belum ada provinsi yang sudah tergolong baik pada semua dimensi, 11 provinsi sudah tergolong baik pada 2 dimensi, dan masih ada 2 provinsi yang belum tergolong baik pada dimensi mana pun. Masing-masing dimensi berasosiasi dengan dimensi lainnya, yang diharapkan dapat menjadi pertimbangan dalam pembuatan kebijakan.

Kata kunci: akses energi, *K-means clustering*, ketahanan bencana alam, pencemaran lingkungan

I. PENDAHULUAN

Rencana pembangunan semua negara di dunia mengacu pada *Sustainable Development Goals* (SDGs) yang menjadi kesepakatan global guna mencapai kehidupan yang lebih baik dan berkelanjutan [1]. Dari 17 tujuan di dalamnya, tujuan ke-11 bertujuan untuk menjadikan kota dan pemukiman yang inklusif, aman, tangguh dan berkelanjutan. Tujuan tersebut mencakup target yang berkaitan dengan dampak lingkungan terkhusus kualitas udara dan pengelolaan limbah, serta strategi risiko bencana [2]. Karena SDGs merupakan tujuan yang bersifat global, maka dalam penerapannya harus mempertimbangkan kondisi sosial, ekonomi, dan lingkungan di wilayah masing-masing.

Indonesia berada pada persimpangan tiga lempeng besar bumi, yakni lempeng Pasifik, lempeng Indo-Australia, dan lempeng Eurasia [3]. Kondisi ini menyebabkan wilayah Indonesia sering dilanda bencana alam, seperti letusan gunung berapi, gempa bumi, banjir, dan tanah longsor. Menurut Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), banyaknya kejadian bencana alam di Indonesia mengalami tren meningkat satu dekade terakhir. Bahkan, sepanjang tahun 2023, kejadian bencana alam



di Indonesia mencapai 5.400 kejadian [4]. Tentunya, pemerintah perlu mengupayakan mitigasi bencana melalui peringatan dini, jalur evakuasi, pusat informasi, dan penyediaan *shelter* [5].

Indonesia sebagai negara kepulauan juga memiliki sumber daya energi yang besar dan beragam, seperti minyak dan gas, panas bumi, serta batu bara [6]. Selain itu, potensi sumber energi terbarukan juga dimiliki Indonesia, seperti tenaga air, biomassa, energi surya, dan tenaga angin [7]. Indonesia sudah mulai menggunakan energi terbarukan sebagai sumber energi nasional. Namun, energi terbarukan hanya memenuhi 6 % dari kebutuhan energi nasional, sehingga Indonesia masih sangat bergantung pada energi tak terbarukan seperti bahan bakar fosil (41%), gas alam (24%), dan batu bara (29%) [8]. Penggunaan energi tak terbarukan secara masif sangat berdampak pada lingkungan melalui peningkatan jumlah emisi CO₂ yang secara langsung menimbulkan efek gas rumah kaca [9]. Kondisi ini memperparah kejadian pencemaran lingkungan yang masih terus terjadi karena berbagai faktor. Misalnya, polusi udara yang utamanya disebabkan oleh emisi kendaraan bermotor [10]. Selain itu, polusi air dan tanah yang disebabkan alih fungsi lahan untuk sektor industri [11].

Setiap daerah di Indonesia tentunya memiliki perbedaan karakteristik, yang sangat mempengaruhi implementasi dan pencapaian tujuan SDGs tersebut. Untuk mendukung keberhasilan pembangunan di tahun 2030, perlu diketahui kondisi setiap daerah berdasarkan kriteria yang berkaitan. Namun, saat ini masih belum ada informasi mengenai daerah yang sudah memenuhi kriteria pembangunan sesuai tujuan SDGs ke-11. Hal inilah yang mendasari pentingnya dilakukan pemetaan daerah-daerah di Indonesia berdasarkan dimensi-dimensi spesifik yang relevan dengan tujuan tersebut.

Dalam berbagai penelitian yang sudah dilakukan, ternyata belum ada yang melakukan analisis dengan beberapa dimensi dalam tujuan SDGs. Seperti yang dilakukan [12] dengan melakukan pengklasifikasian daerah berdasarkan iklim mengenai penggunaan sumber energi terbarukan. Selanjutnya, penelitian oleh [13] juga melakukan pengklasifikasian daerah di Indonesia yang berpotensi rawan terjadinya bencana alam. Namun, dari kedua penelitian tersebut masih belum mencakup beberapa dimensi pada tujuan SDGs yang mana dalam mewujudkan tujuan tersebut dibutuhkan pembahasan komprehensif dari beberapa dimensi yang saling berkaitan dan berkesinambungan satu sama lain.

Dalam data mining terdapat teknik pengelompokan atau *clustering* yang mana sebagai teknik klasifikasi untuk mengetahui individu-individu dari suatu populasi termasuk dalam kelompok yang berbeda dengan perbandingan karakteristiknya [14]. Dalam penelitian ini menggunakan metode klasifikasi berupa *K-means clustering* karena memiliki keunggulan dalam hal efisiensi dan kecepatan [15]. Beberapa penelitian sudah banyak yang telah menerapkan metode *k-means*. Namun, jarang yang melanjutkan dengan analisis asosiasi antar dimensi dari hasil *clustering* guna melihat hubungan antar dimensi dari masing-masing kelompok hasil *clustering*.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan klasifikasi dan pemetaan provinsi di Indonesia sebagai wilayah yang aman dan berkelanjutan dari perspektif lingkungan. Dalam penelitian ini digunakan tiga dimensi utama yaitu ketahanan terhadap bencana alam, akses terhadap energi, dan tingkat pencemaran lingkungan yang akan dianalisis menggunakan metode *K-means*. Selain itu, akan dilanjutkan analisis asosiasi antara ketiga dimensi tersebut melalui *odds ratio*. Hasil penelitian ini diharapkan bisa menjadi perhatian pemangku kepentingan dalam menerapkan kebijakan untuk daerahnya masing-masing dalam mendukung pembangunan berkelanjutan melalui *Sustainable Development Goals*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Ketahanan terhadap Bencana Alam

The United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR) mendefinisikan bencana sebagai



gangguan serius terhadap masyarakat dengan skala apapun yang diakibatkan oleh peristiwa yang berbahaya dan melibatkan kerugian serta dampak manusia, material, ekonomi, dan lingkungan [16]. Bencana alam diartikan sebuah peristiwa atau gangguan yang berefek pada masyarakat yang diakibatkan oleh faktor alam yang berakibat pada korban jiwa maupun material [17]. Risiko terhadap bencana merupakan kemungkinan terjadinya kehilangan nyawa, kerusakan atau kehancuran aset dalam masyarakat, atau sistem tertentu dalam lingkungan selama periode waktu tertentu, yang melibatkan elemen bahaya, kerentanan, dan kapasitas [18]. Risiko terhadap bencana alam dapat dilihat dari dua perspektif yakni bahaya bencana dilihat dari frekuensi bencana dan intensitas bencana, serta kerentanan masyarakat yang terdampak bencana dilihat dari sensitivitas, kemampuan tanggap, dan kemampuan beradaptasi [19].

2.2. Pencemaran Lingkungan

Pencemaran lingkungan terjadi ketika makhluk hidup, energi, zat, ataupun komponen lain masuk atau dimasukkan ke dalam lingkungan, atau ketika struktur lingkungan berubah akibat proses alam atau kegiatan manusia [20]. Hal ini mengakibatkan penurunan kualitas lingkungan hingga mencapai tingkat tertentu di mana lingkungan tidak bisa berfungsi dengan baik sesuai peruntukannya. Pencemaran lingkungan dapat disebabkan oleh kejadian alam seperti letusan gunung berapi atau pelepasan gas beracun, maupun oleh aktivitas manusia [20]. Pencemaran lingkungan dapat dibedakan menjadi tiga jenis berdasarkan tempat terjadinya, yaitu pencemaran tanah, air, dan udara [21]. Adapun untuk mengetahui tingkat pencemaran suatu wilayah dapat dilihat melalui nilai Indeks Kualitas Tutupan Lahan (IKTL), Indeks Kualitas Air (IKA), dan Indeks Kualitas Udara (IKU) [22].

2.3. Akses Terhadap Energi

Akses terhadap energi sangat krusial untuk memenuhi kebutuhan dasar dan mendorong pembangunan manusia [23]. Hal ini karena akses terhadap energi akan mempengaruhi produktivitas, kesehatan, dan pelayanan masyarakat. Akses yang disediakan ditujukan untuk penerangan, proses memasak, pemanasan, dan sebagai tenaga penggerak bagi populasi khususnya di negara berkembang. Akses terhadap energi dalam definisi yang lebih luas memerlukan ketersediaan energi yang andal dan memadai dalam kualitas dan kuantitas serta teknologi yang dapat diterima secara sosial serta ramah lingkungan [24].

III. METODE PENELITIAN

3.1. Data dan Sumber Data

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang mewakili dimensi ketahanan terhadap bencana alam, akses terhadap energi, dan pencemaran lingkungan pada 34 provinsi di Indonesia tahun 2022 yang bersumber dari Badan Pusat Statistik (BPS) dan *Google Earth Engine*. Adapun data yang digunakan adalah sebagai berikut.

Tabel 1. Daftar Variabel

Variabel	Deskripsi Variabel	Satuan
1. Dimensi Bencana Alam		
KBA	Jumlah Kejadian Bencana Alam	-
KHH	Luas Kawasan Hutan yang Hilang	Ha
KR	Jumlah Kerusakan Rumah yang Diakibatkan Bencana Alam	-
KP	Kepadatan Penduduk	jiwa/km ²
KI	Jumlah Kerusakan Infrastruktur Akibat Bencana Alam	-
2. Dimensi Akses terhadap Energi		
ELD	Banyak energi listrik yang didistribusikan	GWh



Variabel	Deskripsi Variabel	Satuan
CBB	Sebaran cadangan batubara	juta ton
PBE	Sebaran potensi bioenergi	GWe
PB	Sebaran potensi energi bayu	GW
PH	Sebaran potensi energi hidro	GW
PS	Sebaran potensi energi surya	GWp
JG	Sebaran jaringan gas (jargas) menggunakan APBN	SR
3. Dimensi Pencemaran Lingkungan		
IKA	Indeks Kualitas Air	-
IKU	Indeks Kualitas Udara	-
IKTL	Indeks Kualitas Tutupan Lahan	-

3.2. Metode Pengolahan Data

3.2.1. Algoritma *K-Means*

K-Means merupakan algoritma untuk mengelompokkan data dengan membagi data tersebut ke beberapa kelompok berbeda [25]. Metode ini membuat data yang memiliki karakteristik sama berada pada *cluster* yang sama, sedangkan data yang memiliki karakteristik berbeda berada pada *cluster* yang berbeda [26]. Penggunaan algoritma ini memiliki beberapa aturan, yaitu menentukan berapa banyak *cluster* yang diperlukan dan hanya dapat digunakan pada atribut dengan tipe numerik. Algoritma ini memulai dengan mengambil beberapa sampel secara acak dari seluruh populasi data sebagai pusat *cluster* awal. Selanjutnya, posisi pusat *cluster* akan dihitung ulang hingga semua data dikelompokkan ke dalam *cluster* masing-masing dan terbentuk *cluster* baru. Adapun proses algoritma *K-means* dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Tentukan jumlah *cluster* yang diinginkan, yaitu pusat *cluster* k . Salah satu cara yang dapat digunakan adalah dengan *scree plot* untuk menentukan jumlah *cluster* optimal.
2. Inisialisasi ke pusat *cluster* [27]. Salah satu cara yang paling sering digunakan yaitu dengan cara random (acak) dengan memberi nilai pada pusat-pusat *cluster* secara random. Adapun rumus yang digunakan pada tahap iterasi adalah (1).

$$V_{ij} = \frac{1}{N^i} \sum_{k=0}^{N^i} X_{kj} \quad (1)$$

Dengan V_{ij} adalah centroid rata-rata *cluster* ke- i untuk variabel ke- j ; N^i adalah jumlah anggota *cluster* ke- i ; i, k adalah indeks dari *cluster*; j adalah indeks dari variabel; dan X_{kj} adalah nilai data ke- k variabel ke- j untuk *cluster* tersebut.

3. Gunakan jarak *Euclidean* untuk menghitung jarak setiap data ke pusat *cluster*, kemudian lakukan klasterisasi seluruh data ke dalam *cluster* terdekat.

$$d_{ik} = \sqrt{\sum_j^m (C_{ij} - C_{kj})^2} \quad (2)$$

dengan d_{ik} adalah jarak data ke- i ke pusat k , C_{ij} adalah data ke- i pada atribut data ke- j ; dan C_{kj} adalah titik pusat ke- k pada atribut ke- j .

4. Kategorikan data ke dalam *cluster* menggunakan jarak terpendek.
5. Hitung kembali pusat *cluster* menggunakan keanggotaan *cluster* sekarang melalui (3).

$$C_{kj} = \frac{\sum_{i=1}^k X_{ij}}{p} \quad (3)$$

dengan $X_{ij} \in$ *cluster* ke- k ; dan p adalah banyak member *cluster* ke- k



6. Ulangi langkah tiga hingga empat sampai sudah tidak ada lagi data yang berpindah ke *cluster* lain.

3.2.2. Odds Ratio

Odds ratio merupakan bagian dari analisis nonparametrik dan merupakan ukuran yang menjelaskan asosiasi dua variabel kategorik [28]. Sehingga, *odds ratio* sangat tepat digunakan pada penelitian ini, yang bertujuan untuk menganalisis asosiasi antar variabel kategorik dengan jumlah observasi terbatas. *Odds* adalah perbandingan antara probabilitas terjadinya suatu kejadian dengan probabilitas kejadian tersebut tidak terjadi [29]. Lebih lanjut, *odds ratio* (OR) adalah rasio dari *Odds* wilayah yang dikategorikan kelompok A dengan *Odds* wilayah yang dikategorikan kelompok B. Sebagai contoh, jika dari n wilayah dalam kelompok A terdapat a wilayah ber-*cluster* 1 dan b wilayah ber-*cluster* 2, maka nilai *Odds* untuk kelompok A adalah $\frac{(a/n)}{(b/n)}$ yang disederhanakan menjadi $\frac{a}{b}$. Jika dari m wilayah dalam kelompok A terdapat c wilayah ber-*cluster* 1 dan d wilayah ber-*cluster* 2, maka nilai *Odds* untuk kelompok B adalah $\frac{(c/m)}{(d/m)}$ yang disederhanakan menjadi $\frac{c}{d}$. Apabila disajikan dalam bentuk tabel silang 2×2 , maka dapat dilihat pada tabel 2 berikut.

Tabel 2. Ilustrasi *Odds Ratio*

Kelompok	Cluster		Total
	1	2	
A	a	b	n
B	c	d	m

Pada *cell a* menunjukkan jumlah wilayah pada kelompok A yang masuk dalam *cluster* 1. *Cell b* menunjukkan jumlah wilayah pada kelompok A yang masuk dalam *cluster* 2. *Cell c* menunjukkan jumlah wilayah pada kelompok B yang masuk dalam *cluster* 1. Sedangkan *cell d* menunjukkan jumlah wilayah pada kelompok B yang masuk dalam *cluster* 2 [20]. Berikut adalah rumus untuk menghitung *Odds Ratio* berdasarkan tabel 2.

$$Odds\ Ratio\ (OR) = \frac{odds_A}{odds_B} = \frac{\left(\frac{a/n}{b/n}\right)}{\left(\frac{c/m}{d/m}\right)} = \frac{a/b}{c/d} = \frac{ad}{bc} \quad (4)$$

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil

Ringkasan statistik variabel pada dimensi ketahanan terhadap bencana alam disajikan pada tabel 3. Rentang nilai masing-masing variabel yang besar menunjukkan bahwa masing-masing provinsi di Indonesia memiliki karakteristik yang sangat beragam dalam hal ketahanan terhadap bencana alam.

Tabel 3. Ringkasan Statistik Variabel pada Dimensi Ketahanan Terhadap Bencana Alam

Ukuran Statistik	KBA	KHH	KR	KP	KI
Minimum	8,00	0,53	800	4,00	1,0
Rata-rata	104,35	29.350,84	36.043	771,18	1.062,9
Maksimum	825,00	148.333,54	235.981	16.084,00	3.857,6

Seluruh variabel dapat diikutsertakan dalam analisis *cluster* karena tidak berhubungan kuat satu sama lain (koefisien korelasi tidak melampaui 0,80). Dengan kelima variabel tersebut, didapatkan nilai Hopkins *statistic* sebesar 0,67 (lebih dari 0,50) yang mengindikasikan bahwa terdapat kecenderungan

yang cukup kuat pada data dalam membentuk *cluster*. Melalui metode *Silhouette*, didapat jumlah *cluster* optimal sebanyak dua *cluster*, dengan rata-rata yang disajikan dalam tabel 4.

Tabel 4. Rata-rata Variabel Menurut *Cluster* Dimensi Ketahanan Terhadap Bencana Alam

Rata-rata	KBA	KHH	KR	KP	KI
<i>Cluster 1</i>	51,00	22.974,28	10.222,62	846,69	788,32
<i>Cluster 2</i>	277,75	50.074,67	119.959,88	525,75	1.955,36

Rata-rata variabel yang semakin tinggi menunjukkan tingkat ketahanan terhadap bencana alam yang semakin rendah. Secara umum, *cluster 2* memiliki rata-rata variabel yang lebih tinggi dari pada *cluster 1*. Dengan kata lain, tingkat ketahanan terhadap bencana alam wilayah provinsi pada *cluster 2* lebih rendah dari pada provinsi pada *cluster 1*. Maka, selanjutnya *cluster 1* disebut sebagai *cluster* cukup tahan bencana, sedangkan *cluster 2* disebut sebagai *cluster* kurang tahan bencana.



Gambar 1. Pemetaan Hasil Klasterisasi Provinsi Berdasarkan Ketahanan Terhadap Bencana Alam

Hasil klasterisasi pada dimensi ketahanan terhadap bencana alam dipetakan pada gambar 1. Terdapat 26 provinsi yang tergolong *cluster* cukup tahan bencana, sedangkan 8 provinsi lainnya tergolong *cluster* kurang tahan bencana. Delapan provinsi tersebut meliputi Aceh, Sumatera Utara, Jawa Barat, Jawa Tengah, Jawa Timur, Kalimantan Barat, Kalimantan Tengah, dan Kalimantan Timur.

Dimensi pencemaran lingkungan diukur dari 3 variabel. Berdasarkan tabel 5, IKTL seluruh provinsi paling beragam daripada kedua indeks lainnya. Hal ini diketahui dari rentang nilai indeks yang paling panjang. Secara rata-rata, kualitas air seluruh provinsi lebih rendah daripada kualitas tutupan lahan dan udara. Bahkan, nilai maksimum IKA paling rendah daripada kedua indeks lainnya. Ada pun kualitas udara secara rata-rata lebih tinggi dibandingkan kualitas air dan tutupan lahan.

Tabel 5. Ringkasan Statistik Variabel pada Dimensi Pencemaran Lingkungan

Ukuran Statistik	IKTL	IKA	IKU
Minimum	27,07	39,31	68,06
Rata-rata	62,31	53,72	89,18
Maksimum	100,00	62,00	95,79

Selanjutnya, didapatkan koefisien korelasi antar variabel tidak lebih dari 0,80. Dengan kata lain, masing-masing variabel tidak berhubungan kuat dengan variabel lain. Oleh karena itu, seluruh variabel dapat diikutsertakan dalam analisis *cluster*. Selanjutnya, nilai Hopkins *statistic* sebesar 0,69 (lebih dari 0,50) mengindikasikan bahwa terdapat kecenderungan yang cukup kuat pada data dalam membentuk kelompok atau *cluster*. Jumlah *cluster* optimal untuk 34 provinsi di Indonesia adalah sebanyak dua *cluster*. Ada pun rata-rata setiap variabelnya disajikan dalam tabel 6.

Tabel 6. Rata-rata Variabel Menurut *Cluster* Dimensi Pencemaran Lingkungan

Rata-rata	IKTL	IKA	IKU
<i>Cluster 1</i>	49,64	52,21	87,40
<i>Cluster 2</i>	85,55	56,49	92,46

Rata-rata indeks yang semakin tinggi menunjukkan kualitas lingkungan yang semakin baik. Secara umum, *cluster 2* memiliki rata-rata indeks kualitas tutupan lahan, indeks kualitas air, dan indeks kualitas udara yang lebih tinggi daripada *cluster 1*. Dengan kata lain, tingkat pencemaran pada provinsi di *cluster 1* lebih tinggi dari pada provinsi di *cluster 2*. Maka, selanjutnya *cluster 1* disebut sebagai *cluster* tercemar, sedangkan *cluster 2* disebut sebagai *cluster* sedikit tercemar.



Gambar 2. Pemetaan Hasil Klasterisasi Provinsi Berdasarkan Pencemaran Lingkungan

Seperti yang ditampilkan pada gambar 2, terdapat 22 provinsi yang tergolong dalam *cluster* tercemar, sedangkan 12 provinsi lainnya tergolong dalam *cluster* sedikit tercemar. Dua belas provinsi tersebut meliputi Aceh, Kalimantan Tengah, Kalimantan Timur, Kalimantan Utara, Sulawesi Tengah, Sulawesi Tenggara, Gorontalo, Sulawesi Barat, Maluku, Maluku Utara, Papua Barat, dan Papua.

Dimensi ketiga yaitu akses terhadap energi yang diukur dari 7 variabel. Berdasarkan tabel 7, karakteristik masing-masing provinsi dalam akses terhadap energi cukup beragam. Hal ini diketahui melalui rentang nilai yang panjang untuk masing-masing variabel. Beberapa daerah tidak memiliki potensi pada jenis energi tertentu. Hal ini karena Indonesia sebagai negara kepulauan, sehingga masing-masing daerah memiliki keunikan dan keterbatasan terkait energi yang tersedia.

Tabel 7. Ringkasan Statistik Variabel pada Dimensi Akses Terhadap Energi

Ukuran Statistik	ELD	CBB	PBE	PB	PH	PS	JG
Minimum	192,1	0	0,000	0,000	0,000	6,5	0,000
Rata-rata	8.051,8	1.031	0,068	4,559	2,802	96,9	20,693
Maksimum	56.226,1	13,702	0,460	22,500	32,900	369,5	176,071

ELD dan PBE berhubungan kuat dengan koefisien korelasi mencapai 0,84. Maka, dari kedua variabel tersebut hanya dipilih salah satu untuk diikutsertakan dalam analisis *cluster*. Dalam hal ini, variabel yang dipilih adalah ELD. Dengan 6 variabel yang tersisa, didapatkan nilai Hopkins *statistic* sebesar 0,89 (lebih dari 0,75) yang mengindikasikan bahwa terdapat kecenderungan yang kuat pada data dalam membentuk kelompok atau *cluster*. Ada pun jumlah *cluster* optimal sebanyak dua *cluster* dengan rata-rata disajikan dalam tabel 8.

Tabel 8. Rata-rata Variabel Menurut *Cluster* Dimensi Akses Terhadap Energi

Rata-rata	ELD	CBB	PB	PH	PS	JG
<i>Cluster 1</i>	37.124,318	0,000	7,40	0,124	122,00	61,51

Rata-rata	ELD	CBB	PB	PH	PS	JG
Cluster 2	3.039,307	1.208,761	4,07	3,263	92,57	13,66

Rata-rata variabel yang semakin tinggi menunjukkan akses terhadap energi yang semakin baik. Secara umum, *cluster* 1 memiliki rata-rata nilai ELD, PB, PS, dan JG yang lebih tinggi daripada *cluster* 2. Sedangkan, *cluster* 2 memiliki rata-rata nilai CBB dan PH yang lebih tinggi dari pada *cluster* 1. Maka, *cluster* 1 selanjutnya disebut sebagai *cluster* energi modern dan *cluster* 2 sebagai *cluster* energi konvensional. Terdapat 5 provinsi yang tergolong dalam *cluster* energi modern, sedangkan 29 provinsi lainnya tergolong dalam *cluster* energi konvensional. Lima provinsi tersebut meliputi DKI Jakarta, Banten, Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Jawa Timur, seperti yang ditampilkan pada gambar 3.



Gambar 3. Pemetaan Hasil Klasterisasi Provinsi Berdasarkan Akses Terhadap Energi

Untuk mengevaluasi kebaikan hasil analisis *cluster*, digunakan ukuran berupa *Silhouette index*. Hasil klasterisasi berdasarkan dimensi ketahanan terhadap bencana alam, tingkat pencemaran lingkungan, dan akses terhadap energi menghasilkan *Silhouette index* berturut-turut sebesar 0,61, 0,57, dan 0,82. Seluruhnya bernilai lebih dari 0,50, yang menunjukkan bahwa *cluster* yang dibentuk sudah baik karena titik-titik data sebagian besar berada pada *cluster* yang sesuai.

Berdasarkan kategori setiap provinsi, dilakukan analisis asosiasi dengan *odds ratio* seperti yang ditampilkan pada tabel 9 dan 10. Kecenderungan suatu provinsi yang sedikit tercemar untuk cukup tahan terhadap bencana alam daripada kurang tahan terhadap bencana alam adalah 0,882 kali lebih kecil dibandingkan provinsi yang tercemar. Sedangkan, kecenderungan suatu provinsi yang cukup tahan bencana alam untuk memiliki akses terhadap energi modern daripada energi konvensional adalah 0,139 kali lebih kecil dibandingkan provinsi yang kurang tahan bencana alam.

Tabel 9. Tabel Kontingensi Antara Dimensi Pencemaran Lingkungan dan Ketahanan Terhadap Bencana Alam

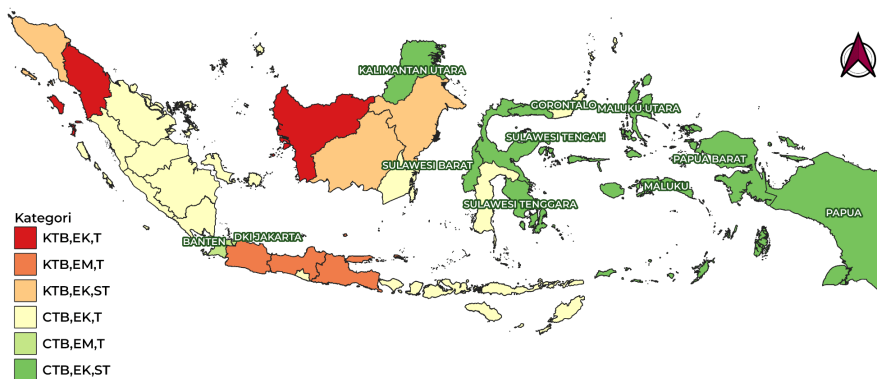
Pencemaran Lingkungan	Ketahanan Terhadap Bencana Alam		Odds Ratio
	Cukup Tahan Bencana	Kurang Tahan Bencana	
Sedikit Tercemar	9	3	0,882
Tercemar	17	5	

Tabel 10. Tabel Kontingensi Antara Dimensi Ketahanan Bencana Alam dan Akses Terhadap Energi

Ketahanan Terhadap Bencana Alam	Akses Terhadap Energi		Odds Ratio
	Energi Modern	Energi Konvensional	
Cukup Tahan Bencana	2	24	0,139
Kurang Tahan Bencana	3	5	

Provinsi yang paling memenuhi kriteria aman dan berkelanjutan seharusnya masuk dalam *cluster* yang lebih baik pada ketiga dimensi, yaitu cukup tahan bencana-energi modern-sedikit tercemar. Namun, tidak ada provinsi yang masuk dalam kategori tersebut. Beberapa provinsi masuk dalam *cluster*

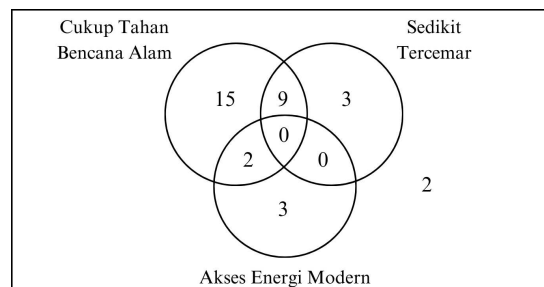
yang lebih baik pada 2 dari 3 dimensi, dengan tiga kemungkinan kategori, yaitu (1) cukup tahan bencana-energi konvensional-sedikit tercemar, (2) cukup tahan bencana-energi modern-tercemar, dan (3) kurang tahan bencana-energi modern-sedikit tercemar. Terdapat 9 provinsi yang tergolong kategori (1), yaitu Kalimantan Utara, Sulawesi Tengah, Sulawesi Tenggara, Gorontalo, Sulawesi Barat, Maluku, Maluku Utara, Papua Barat, dan Papua. Selanjutnya, 2 provinsi tergolong kategori (2), yaitu DKI Jakarta dan Banten. Sedangkan, tidak ada provinsi yang tergolong kategori (3), seperti yang ditampilkan pada gambar 4.



Gambar 4. Pemetaan Hasil Klasterisasi Provinsi Berdasarkan Tiga Dimensi

4.2. Pembahasan

Hasil klasterisasi dalam 3 dimensi berbeda menunjukkan gambaran yang lebih komprehensif mengenai ketercapaian masing-masing daerah provinsi menuju daerah aman dan berkelanjutan. Secara relatif, belum ada provinsi di Indonesia yang sudah tergolong baik pada semua dimensi, seperti yang ditunjukkan pada gambar 5. Sebanyak 11 provinsi sudah baik dalam 2 dari 3 dimensi, yang meliputi DKI Jakarta, Banten, Kalimantan Utara, Sulawesi Tengah, Sulawesi Tenggara, Gorontalo, Sulawesi Barat, Maluku, Maluku Utara, Papua Barat, dan Papua. Dengan kata lain, 11 provinsi ini diindikasikan mampu mencapai status wilayah aman dan berkelanjutan dalam perspektif lingkungan dengan lebih cepat daripada provinsi lainnya. Namun, tantangan terberat adalah bagi provinsi yang belum tergolong baik di seluruh dimensi. Provinsi-provinsi ini berkategori kurang tahan bencana-energi konvensional-tercemar. Ada pun provinsi yang termasuk dalam kategori ini adalah Sumatera Utara dan Kalimantan Barat.



Gambar 5. Diagram Venn Jumlah Provinsi Berdasarkan Cluster pada Masing-Masing Dimensi

Provinsi yang sedikit tercemar memiliki kecenderungan lebih kecil untuk cukup tahan bencana dibandingkan provinsi yang tercemar. Dengan kata lain, provinsi yang tercemar cenderung cukup tahan bencana. Daerah yang tercemar umumnya merupakan daerah industri dan pusat ekonomi, seperti provinsi di Pulau Jawa, Sumatra, Bali, dan Nusa Tenggara. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian [30]



bahwa polusi di daerah industri lebih parah dibandingkan daerah agrikultur. Walaupun menghadapi isu pencemaran, daerah industri dan pusat ekonomi cenderung maju dalam pembangunan infrastruktur, memiliki pendapatan yang lebih tinggi, dan dilengkapi sarana pendidikan serta kesehatan yang lebih memadai [31]. Kondisi tersebut membantu masyarakat untuk meminimalisasi kerusakan akibat risiko bencana. Sesuai dengan hasil penelitian [32] bahwa daerah dengan pendapatan yang lebih tinggi, tingkat pendidikan yang lebih tinggi, dan keterbukaan yang lebih besar mengalami kerugian yang lebih sedikit saat terjadi bencana alam. Dengan demikian, ketahanan terhadap bencana di daerah industri dan pusat ekonomi akan menjadi lebih tinggi.

Selanjutnya, provinsi yang cukup tahan bencana cenderung memiliki akses lebih tinggi terhadap energi konvensional. Hasil klasterisasi menunjukkan bahwa mayoritas provinsi di Indonesia berstatus cukup tahan bencana. Namun, penggunaan energi tak terbarukan masih lebih disukai oleh masyarakat, bahkan menguasai 94% kebutuhan energi nasional [8]. Hal ini juga berkaitan dengan besarnya potensi sumber daya tak terbarukan yang dimiliki oleh daerah-daerah di Indonesia.

Untuk menghadapi kondisi ini, pembangunan infrastruktur dan kualitas sumber daya manusia perlu dilakukan dengan lebih merata dan menerapkan prinsip berkeadilan, untuk menghindari kesenjangan dalam ketahanan terhadap bencana alam antara provinsi berbasis industri dengan agrikultur. Selanjutnya, sosialisasi pengelolaan sampah dan limbah serta penegakan hukum terkait pencemaran lingkungan harus lebih masif untuk meningkatkan kualitas kesehatan lingkungan. Pada sisi lain, transisi energi konvensional menuju energi modern yang terbarukan perlu dipercepat di seluruh provinsi di Indonesia. Dengan kebijakan yang tepat sasaran dan berkesinambungan, diharapkan seluruh provinsi di Indonesia mampu memenuhi target menjadi wilayah aman dan berkelanjutan seperti pada tujuan ke-11 SDGs dari perspektif lingkungan.

IV. KESIMPULAN

Klasterisasi 34 provinsi di Indonesia berbasis perspektif lingkungan melalui dimensi Ketahanan Terhadap Bencana Alam, Pencemaran Lingkungan, dan Akses Terhadap Energi menunjukkan bahwa belum ada provinsi yang sudah tergolong baik pada semua dimensi, 11 provinsi sudah tergolong baik pada 2 dimensi, dan masih ada 2 provinsi yang belum tergolong baik pada dimensi mana pun. Masing-masing dimensi berasosiasi dengan dimensi lainnya, yang bisa menjadi pertimbangan dalam pembuatan kebijakan. Keterbatasan penelitian ini adalah menggunakan variabel-variabel yang belum mempertimbangkan luas wilayah dan jumlah penduduk. Selain itu, klasterisasi dilakukan pada level provinsi karena keterbatasan ketersediaan data, sehingga jumlah observasi masih sedikit. Analisis yang lebih relevan dan mendalam diharapkan dapat dilakukan pada penelitian selanjutnya dengan memberikan penimbang yang berkaitan dengan kepadatan penduduk serta dilakukan pada level yang lebih rendah, seperti di kabupaten/kota. Tentunya, data diharapkan dapat diperoleh dari *big data* dan metode sains data yang lebih *advance*.

REFERENSI

1. B. P. McCullough, T. Kellison, and E. N. Melton, *The Routledge Handbook of Sport and Sustainable Development*. 2022. doi: 10.4324/9781003023968.
2. T. Kellison, “An overview of sustainable development goal 11,” *Routledge Handb. Sport Sustain. Dev.*, pp. 261–275, 2022, doi: 10.4324/9781003023968-32.
3. R. D. Kusumastuti, Viverita, Z. A. Husodo, L. Suardi, and D. N. Danarsari, “Developing a resilience index towards natural disasters in Indonesia,” *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 10, no. PA, pp. 327–340, 2014, doi: 10.1016/j.ijdr.2014.10.007.
4. BNPB, “Buku Data Bencana Indonesia 2023,” vol. 3, pp. 3–11, 2024.



5. T. Dartanto, “Natural disasters, mitigation and household welfare in Indonesia: Evidence from a large-scale longitudinal survey,” *Cogent Econ. Financ.*, vol. 10, no. 1, 2022, doi: 10.1080/23322039.2022.2037250.
6. O. T. Winarno, Y. Alwendra, and S. Mujiyanto, “Policies and Strategies for Renewable Energy Development in Indonesia,” *5th Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl.*, vol. 5, pp. 7–9, 2016.
7. D. Hartono, S. H. Hastuti, A. Halimatussadiah, A. Saraswati, A. F. Mita, and V. Indriani, “Comparing the impacts of fossil and renewable energy investments in Indonesia: A simple general equilibrium analysis,” *Heliyon*, vol. 6, no. 6, p. e04120, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04120.
8. I. Kurniawan, R. Ichwani, R. Fionasari, A. Batubara, and A. Huda, “Indonesia’s Renewable Energy Outlook: What to Expect in The Future Renewable Energy of Indonesia. A Brief Review,” *Elkawnie*, vol. 8, no. 2, p. 298, 2022, doi: 10.22373/ekw.v8i2.18738.
9. P. K. Halder, N. Paul, M. U. H. Joardder, and M. Sarker, “Energy scarcity and potential of renewable energy in Bangladesh,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 1636–1649, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.069.
10. A. Purwadi, S. Suhandi, and U. Enggarsasi, “Urban air pollution control caused by exhaust gas emissions in developing country cities in public policy law perspective,” *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 10, no. 1, pp. 31–36, 2020, doi: 10.32479/ijeep.8337.
11. K. Hernawati, N. Insani, S. H. M. Bambang, W. Nur Hadi, and Sahid, “Mapping the Indonesian territory, based on pollution, social demography and geographical data, using self organizing feature map,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1868, 2017, doi: 10.1063/1.4995117.
12. V. Brazovskaia and S. Gutman, “Classification of Regions by Climatic Characteristics for the Use of Renewable Energy Sources,” *Int. J. Technol.*, vol. 12, no. 7, pp. 1537–1545, 2021, doi: 10.14716/IJTECH.V12I7.5339.
13. B. Supriyadi, A. P. Windarto, T. Soemartono, and Mungad, “Classification of natural disaster prone areas in Indonesia using K-means,” *Int. J. Grid Distrib. Comput.*, vol. 11, no. 8, pp. 87–98, 2018, doi: 10.14257/ijgdc.2018.11.8.08.
14. A. Ghosal, A. Nandy, A. K. Das, S. Goswami, and M. Panday, *A Short Review on Different Clustering Techniques and Their Applications*, vol. 937. Springer Singapore, 2020. doi: 10.1007/978-981-13-7403-6_9.
15. Y. Li and H. Wu, “A Clustering Method Based on K-Means Algorithm,” *Phys. Procedia*, vol. 25, pp. 1104–1109, 2012, doi: 10.1016/j.phpro.2012.03.206.
16. D. Teh and T. Khan, “Types, definition and classification of natural disasters and threat level,” *Handb. Disaster Risk Reduct. Resil. New Fram. Build. Resil. to Disasters*, pp. 27–56, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-61278-8_2.
17. I. M. Shaluf, “Disaster types,” *Disaster Prev. Manag. An Int. J.*, vol. 16, no. 5, pp. 704–717, 2007, doi: 10.1108/09653560710837019.
18. UNISDR, “Terminology on Disaster Risk Reduction,” *Routledge Handb. to Polit. Econ. Gov. Am.*, pp. 350–361, 2020, doi: 10.4324/9781351138444-36.
19. N. Chen, L. Chen, Y. Ma, and A. Chen, “Regional disaster risk assessment of china based on self-organizing map: Clustering, visualization and ranking,” *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 33, pp. 196–206, 2019, doi: 10.1016/j.ijdrr.2018.10.005.
20. Karnowahadi, “Odds Ratio : A Result of Business Research Analysis,” *Admisi & Bisnis*, vol. 18, no. 1, pp. 47–54, 2011.
21. A. Rachmawati, *Buku Ajar Pencemaran Lingkungan*, vol. 2, no. 2. 2022.
22. BPS, “STATISTIK LINGKUNGAN HIDUP INDONESIA 2023,” *J. Sains dan Seni ITS*, vol. 6, no. 1, pp. 51–66, 2023.
23. A. Gaye, “Access to Energy and Human Development,” *United Nations Dev. Program.*, no. 25, p. 21, 2007.
24. S. Pachauri and A. Brew-Hammond, “Energy Access for Development,” pp. 1401–1458, 2009.
25. P. Alkhairi and A. P. Windarto, “Penerapan K-Means Cluster pada Daerah Potensi Pertanian Karet Produktif di Sumatera Utara,” *Semin. Nas. Teknol. Komput. Sains*, pp. 762–767, 2019.
26. B. Amalina, T., Pramana, D. B., & Sari, “Metode K-Means Clustering Dalam Pengelompokan Penjualan Produk Frozen Food,” *J. Ilm. Wahana Pendidik.*, vol. 8, no. September, pp. 574–583, 2022, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7052276>.
27. P. Apriyani, A. R. Dikananda, and I. Ali, “Penerapan Algoritma K-Means dalam Klasterisasi Kasus Stunting Balita Desa Tegalwangi,” *Hello World J. Ilmu Komput.*, vol. 2, no. 1, pp. 20–33, 2023, doi:



10.56211/helloworld.v2i1.230.

28. A. Kalra, “The odds ratio: Principles and applications,” *J. Pract. Cardiovasc. Sci.*, vol. 2, no. 1, p. 49, 2016, doi: 10.4103/2395-5414.182992.
29. T. Widarsa, I. W. G. A. E. Putra, and P. A. S. Astuti, “Modul Analisis Data untuk Variabel Outcome Berskala Nominal Dua Kategori (Binary Outcome),” in *Program Studi Kesehatan Masyarakat. Fakultas Kedokteran Universitas Udayana*, 2016, p. 8.
30. Q. Yang, Z. Li, X. Lu, Q. Duan, L. Huang, and J. Bi, “A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment,” *Sci. Total Environ.*, vol. 642, pp. 690–700, 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.068.
31. S. D. Miradani, “Analisis Perencanaan Pembangunan Agroindustri Provinsi Jawa Timur: Pendekatan Sektorial dan Regional,” no. 2, p. 151, 2010.
32. H. Toya and M. Skidmore, “Economic development and the impacts of natural disasters,” *Econ. Lett.*, vol. 94, no. 1, pp. 20–25, 2007, doi: 10.1016/j.econlet.2006.06.020.