

Analisis Kluster Berdasarkan Deret Waktu Menggunakan *Dynamic Time Warping* Pada Pelanggaran Penggunaan Alat Pelindung Diri

Muhammad Radif Aftamaulana
Program Studi Teknologi Informasi
Universitas Telkom
Surabaya, Indonesia
radifam@telkomuniversity.ac.id

Yohanes Setiawan
Program Studi Teknologi Informasi
Universitas Telkom
Surabaya, Indonesia
yohanessetiawan@telkomuniversity.ac.id

Bernadus Anggo Seno Aji
Program Studi Teknologi Informasi
Universitas Telkom
Surabaya, Indonesia
Bernadusanggosenoaji@telkomuniversity.ac.id

Abstrak—Peningkatan kasus kecelakaan kerja di Indonesia dari 182.835 kasus pada 2019 menjadi 360.635 kasus hingga November 2023 berdasarkan data dari BPJS Ketenagakerjaan. Penelitian ini bertujuan untuk memahami pola pelanggaran APD menggunakan analisis kluster berbasis deret waktu dengan pendekatan *Dynamic Time Warping* (DTW). Data pelanggaran dikumpulkan dari CCTV di enam area operasional PT Pelindo Marine Service, dengan fokus pada pelanggaran seperti tidak menggunakan helm dan rompi keselamatan. Berdasarkan temuan lapangan di PT Pelindo Marine Service, pelanggaran terjadi secara berulang di hampir seluruh lokasi dimana berjumlah 23.258 kejadian, menunjukkan adanya pola ketidakpatuhan yang konsisten antara area operasional. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa konfigurasi dua kluster memberikan hasil terbaik dengan Koefisien Silhouette sebesar 0,4464. Kluster 1 terdiri dari lokasi-lokasi dengan jumlah pelanggaran rendah dan pola yang relatif stabil, sedangkan Kluster 2 mencakup lokasi dengan jumlah pelanggaran tinggi dan pola fluktuatif yang signifikan. Rata-rata pelanggaran harian pada Kluster 2 mencapai 107,10, dengan maksimum 294 pelanggaran/hari. Selain itu, hasil analisis juga menghasilkan matriks jarak antar lokasi berdasarkan kesamaan pola pelanggaran, serta perhitungan total pelanggaran kumulatif per lokasi selama periode observasi. Visualisasi hasil analisis disajikan dalam website visualisasi analitik untuk membantu manajemen dalam memantau, mengidentifikasi pola risiko, dan meningkatkan kepatuhan penggunaan APD. Solusi ini diharapkan dapat memperkuat strategi keselamatan kerja dan menurunkan risiko kecelakaan di lingkungan operasional perusahaan.

Kata kunci—Time Series Clustering, Dynamic Time Warping, Alat Pelindung Diri, Keselamatan Kerja, Website Analitik

I. PENDAHULUAN

Keselamatan kerja merupakan aspek penting dalam menjaga operasional industri dan mencegah kecelakaan kerja. Namun, data dari BPJS Ketenagakerjaan menunjukkan tren peningkatan kasus kecelakaan kerja, dari 182.835 kasus pada 2019 menjadi 360.635 kasus hingga November 2023,

yang mengindikasikan masih lemahnya implementasi keselamatan di lapangan.

Salah satu penyebab utama kecelakaan adalah pelanggaran penggunaan Alat Pelindung Diri (APD), seperti helm dan rompi, yang dapat berdampak fatal bagi pekerja maupun perusahaan[1]. Pelanggaran ini juga memengaruhi produktivitas dan stabilitas operasional [2]. Namun, data pelanggaran APD sering kali tidak terstruktur dan kurang dianalisis secara mendalam.

Pengamatan di PT Pelindo Marine Service menunjukkan bahwa pelanggaran APD terjadi secara berulang di berbagai area kerja, menandakan pola ketidakpatuhan yang kolektif. Untuk memahami pola ini, diperlukan pendekatan analitis berbasis data deret waktu. Salah satu metode yang relevan adalah time series clustering dengan pendekatan *Dynamic Time Warping* (DTW), yang telah banyak digunakan dalam berbagai penelitian[3][4]. DTW efektif dalam mengukur kemiripan pola waktu dan dikombinasikan dengan algoritma complete linkage untuk hasil kluster yang lebih padat[5].

Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi pola pelanggaran APD menggunakan metode time series clustering dengan DTW serta mengembangkan sistem visualisasi analitik berbasis web. Sistem ini memanfaatkan data dari 6 kamera CCTV di area galangan PT Pelindo Marine Service dan dirancang untuk membantu tim K3 dan SDM dalam melakukan pengawasan serta tindakan preventif secara lebih efektif.

II. KAJIAN TEORI

A. Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3)

Keselamatan Kerja adalah kondisi aman yang bebas dari risiko kecelakaan dan kerusakan di tempat kerja, yang mencakup kondisi bangunan, kondisi mesin, peralatan keselamatan, dan kondisi pekerja (Saputra & Rizky Mahaputra, 2022). Berdasarkan Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja, keselamatan kerja diwajibkan di seluruh sektor industri untuk mencegah

kecelakaan kerja, melindungi kesehatan pekerja, dan memastikan bahwa setiap aktivitas kerja dilakukan dengan risiko yang terkendali. Aspek-aspek keselamatan kerja meliputi pengelolaan risiko, pelaksanaan pelatihan keselamatan, penggunaan alat pelindung diri (APD), dan pemantauan kepatuhan terhadap standar keselamatan. Studi menunjukkan bahwa penerapan sistem keselamatan kerja yang baik tidak hanya mengurangi tingkat kecelakaan, tetapi juga meningkatkan kepuasan kerja dan produktivitas karyawan[2].

B. Alat Pelindung Diri

Alat Pelindung Diri (APD) merupakan seperangkat alat yang digunakan oleh pekerja untuk melindungi sebagian atau seluruh tubuhnya dari adanya potensi bahaya atau kecelakaan kerja. Menurut Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Republik Indonesia Nomor PER.08/MEN/VII/2010, APD adalah suatu alat yang mempunyai kemampuan untuk melindungi seseorang yang fungsinya mengisolasi sebagian atau seluruh tubuh dari potensi bahaya di tempat kerja. Berdasarkan fungsi dan bagian tubuh yang dilindungi, APD dapat dikategorikan sebagai berikut:

- Pelindung Kepala
Helm keselamatan, topi pelindung
- Pelindung Mata dan Wajah
Kacamata keselamatan, face shield, welding mask
- Pelindung Pernapasan
Masker debu, respirator, SCBA (Self-Contained Breathing Apparatus)
- Pelindung Pendengaran
Ear plug, ear muff
- Pelindung Tangan dan Lengan
Sarung tangan kerja, sleeve protector
- Pelindung Badan
Safety vest, apron, coverall
- Pelindung Kaki
Safety shoes, safety boots, sepatu anti-slip

C. Analisis Kluster Hirarki

Analisis kluster adalah metode yang digunakan untuk mengidentifikasi kelompok-kelompok dalam suatu kumpulan data, dengan tujuan agar data yang tergolong dalam satu kelompok memiliki kesamaan yang tinggi, dan memiliki perbedaan yang signifikan dengan kelompok lainnya[6]. Analisis kluster memiliki 2 jenis yaitu analisis kluster hirarki dan analisis kluster non-hirarki[7]. Penelitian ini berfokus menggunakan kluster hirarki sebagai teknik pengelompokan. Kluster hirarki membentuk kluster dengan struktur seperti pohon (dendrogram), dimulai dari kelompok objek dengan kesamaan tertinggi hingga ke objek yang kurang mirip[8].

Adapun dua jenis metode pendekatan pada kluster hirarki yaitu agglomerative dan divisive hierarchical. Pada kluster agglomerative hierarchical, terdapat beberapa metode penggabungan (linkage method) yang biasanya digunakan, yaitu single linkage, complete linkage, average linkage dan ward[9]. Metode penggabungan yang digunakan dalam penelitian ini adalah complete linkage. Metode ini

mendefinisikan jarak antar dua kluster berdasarkan jarak maksimum antara pasangan anggota dari kedua kluster tersebut[10]. Untuk menentukan kluster menggunakan complete linkage digunakan persamaan (1)[11]

$$d_{(UV)W} = \max\{d_{UW}, d_{VW}\} \quad (1)$$

dimana $d_{(UV)W}$ adalah jarak kluster (UV) dengan kluster W; d_{UW} adalah jarak tetangga terdekat antara U dan W; d_{VW} adalah jarak tetangga terdekat antara V dan W[11].

D. Dynamic Time Warping (DTW)

Dynamic Time Warping (DTW) adalah sekumpulan algoritma yang digunakan untuk menghitung peregangan atau kompresi pada sumbu waktu dua *time series*, sehingga keduanya dapat dibandingkan secara optimal. DTW sangat efektif untuk mengukur jarak antara dua *time series* dengan panjang yang tidak sama. Jarak antara dua nilai dalam *time series* dihitung dengan menggunakan *Euclidean Distance* (ED), yang dinyatakan pada Persamaan (2).

$$d(q_i, c_j) = |q_i - c_j| \quad (2)$$

Kemudian, untuk menghitung *Dynamic Time Warping* (DTW) antara dua *time series*, kita membangun matriks jalur $n \times m$ yang mengukur jarak antara titik q_i pada urutan Q dan titik c_j pada urutan C.

$$\omega(i, j) = d(q_i, c_j) + \min\{\omega(i-1, j-1), \omega(i-1, j), \omega(i, j-1)\} \quad (3)$$

Di mana $\omega(i, j)$ adalah cumulative distance pada posisi (i, j) , dan fungsi rekursif ini menggabungkan jarak dari elemen saat ini dengan jarak kumulatif dari elemen-elemen sekitarnya untuk menemukan jalur terbaik[12]

E. Koefisien Silhouette

Koefisien silhouette digunakan untuk mengevaluasi seberapa efektif suatu clustering, dengan menilai jarak objek dalam satu kluster dibandingkan dengan jarak objek di kluster lain. Koefisien ini memiliki rentang nilai antara -1 dan 1[13]. Semakin tinggi nilainya, semakin baik objek berada dalam kluster yang sesuai dan terpisah dengan jelas dari kluster lainnya. Didapatkan rumus koefisien silhouette pada Persamaan (4).

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (4)$$

Dimana jarak rata-rata objek terhadap objek lain dalam kluster yang sama $a(i)$ dan jarak rata-rata objek i terhadap kluster terdekat $b(i)$.

III. METODE

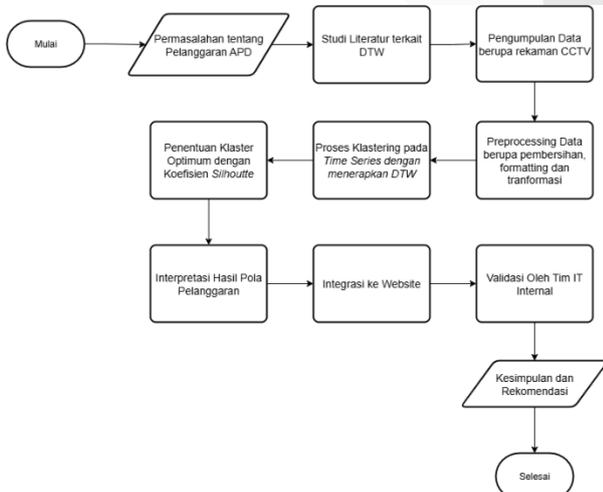
Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari sistem deteksi pelanggaran APD berbasis CCTV yang terpasang di enam titik lokasi PT Pelindo Marine Service. Data direkam secara otomatis selama periode Februari hingga Maret 2025. Unit observasi adalah lokasi kamera, sebanyak 6 lokasi, dengan data *time series* berdurasi 58 hari. Contoh struktur data disajikan pada Tabel I.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel I Contoh dan Struktur Data Penelitian

Timestamp	Location	Violation Type
2025-02-10 8:13:42	Camera 1 - Dermaga	no vest
	Nilam - Jalur Masuk Kapal	
2025-02-10 7:52:03	Camera 5 - Pintu Masuk Galangan	no vest and no helmet
	Camera 9 - Galangan	
2025-02-10 7:40:01	Area Gudang Material & Tabung Gas	no vest
	Camera 2 - Galangan	
2025-02-04 8:25:11	Area Perbaikan Kapal	no vest
	Camera 1 - Dermaga	
2025-02-04 8:07:13	Nilam - Area Utama Sandar Kapal	no vest
	Camera 9 - Workshop Pengelasan Galangan	
2025-02-02 7:43:21		no vest and no helmet

Langkah-langkah dalam penelitian ini dimulai dari studi literatur untuk mendalami teori clustering, time series, dan evaluasi kluster. Setelah itu, dilakukan pengumpulan data hasil deteksi pelanggaran APD. Data kemudian dianalisis secara deskriptif untuk melihat gambaran umum pelanggaran per lokasi. Tahap berikutnya adalah proses klusterisasi menggunakan hierarchical clustering dengan dua pendekatan jarak: Euclidean dan DTW. Evaluasi dilakukan menggunakan koefisien silhouette untuk menentukan jumlah kluster terbaik. Selanjutnya, dilakukan analisis deskriptif tiap kluster untuk mengidentifikasi karakteristik kluster. Terakhir, hasil divisualisasikan dan disimpulkan.



Gambar 1 Flowchart Penelitian

Bagian ini menyajikan hasil dari proses analisis data pelanggaran penggunaan APD menggunakan metode time series clustering dengan pendekatan DTW. Hasil dibagi ke dalam tiga subbagian utama yaitu karakteristik awal data, hasil pengelompokan (clustering), serta implementasi dan tampilan visualisasi data dalam bentuk dashboard web. Pembahasan dilakukan dengan menyoroti pola-pola penting dari hasil klusterisasi serta relevansinya terhadap pengambilan keputusan dalam sistem keselamatan kerja.

A. Karakteristik Data

Data pelanggaran yang dikumpulkan terdiri dari 23.258 entri selama 59 hari observasi dari 1 Februari hingga 31 Maret 2025 di enam titik lokasi berbeda. Rata-rata pelanggaran harian di seluruh lokasi mencapai 66,9 pelanggaran, dengan lokasi paling tinggi pelanggarannya adalah Camera 9 - Workshop Pengelasan Galangan dan terendah adalah Camera 1 - Dermaga Nilam - Area Utama Sandar Kapal. Tren awal menunjukkan adanya fluktuasi pelanggaran yang cukup signifikan di beberapa lokasi pada hari-hari tertentu.

B. Hasil Clustering

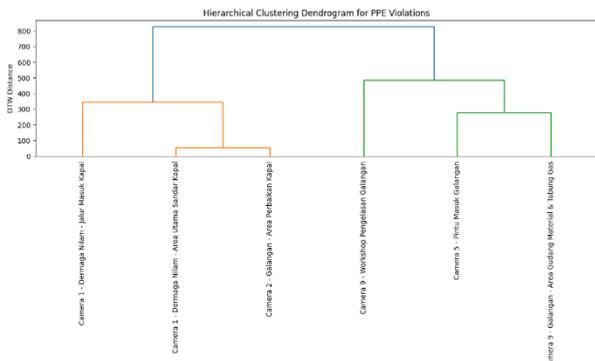
Clustering dilakukan dengan dua pendekatan jarak, yaitu Euclidean dan Dynamic Time Warping (DTW). Pengujian jumlah kluster dari 2 hingga 5 menunjukkan bahwa nilai koefisien silhouette tertinggi adalah 0,4464 pada dua kluster. Oleh karena itu, jumlah kluster optimal adalah 2.

Kluster pertama terdiri dari Camera 1 – Jalur Masuk Kapal dan Area Sandar, serta Camera 2 – Area Perbaikan Kapal dengan karakteristik pelanggaran rendah dan relatif stabil. Sementara itu, kluster kedua mencakup Camera 9 – Workshop Pengelasan Galangan, Camera 9 – Area Gudang Material & Tabung Gas, dan Camera 5 – Pintu Masuk Galangan yang memiliki intensitas pelanggaran tinggi serta pola yang lebih fluktuatif. Rata-rata pelanggaran harian pada kluster dua mencapai 107,1 pelanggaran per hari, bahkan pada hari tertentu tercatat hingga 294 pelanggaran.

Tabel II Hasil Jumlah Kluster dengan Evaluasi Nilai

Jumlah kluster(k)	Koefisien Silhouette
2	0.4464
3	0.3798
4	0.3669
5	0.2824

Tabel II menunjukkan nilai koefisien silhouette untuk jumlah kluster (k) dari 2 hingga 5. Berdasarkan hasil evaluasi, nilai tertinggi adalah 0,4464 ketika jumlah kluster adalah 2. Hal ini menunjukkan bahwa struktur kluster paling optimal dan paling terpisah terjadi saat data dibagi menjadi dua kelompok. Penurunan nilai silhouette pada k = 3 hingga 5 mengindikasikan bahwa struktur kluster semakin lemah dan kurang representatif jika dipaksa terbagi menjadi lebih banyak kelompok.



Gambar 2 Dendrogram Klastering Hierarki Pelanggaran APD

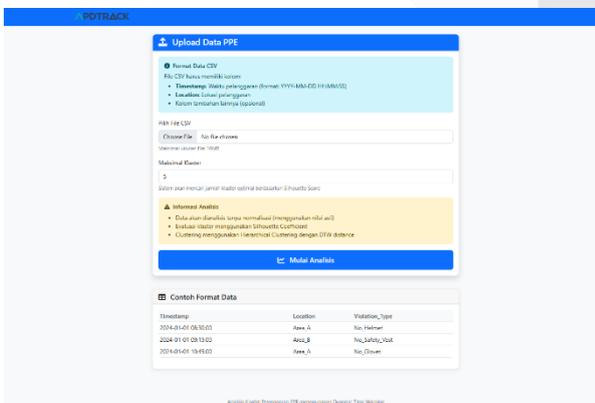
Berdasarkan Gambar 2, hasil dendrogram menunjukkan bahwa Camera 2, Camera 1, dan Camera 3 tergabung lebih awal dengan jarak DTW rendah (<400), menandakan bahwa pola pelanggaran harian ketiganya saling mirip dan cenderung stabil. Di sisi lain, Camera 9, Camera 5, dan Camera 6 membentuk kelompok lain yang bergabung pada level linkage lebih tinggi, mengindikasikan pola yang lebih fluktuatif dan berbeda secara operasional. Penggabungan dua kluster besar terjadi pada jarak DTW sekitar 700, menegaskan perbedaan signifikan antar kelompok tersebut.

C. Visualisasi Web

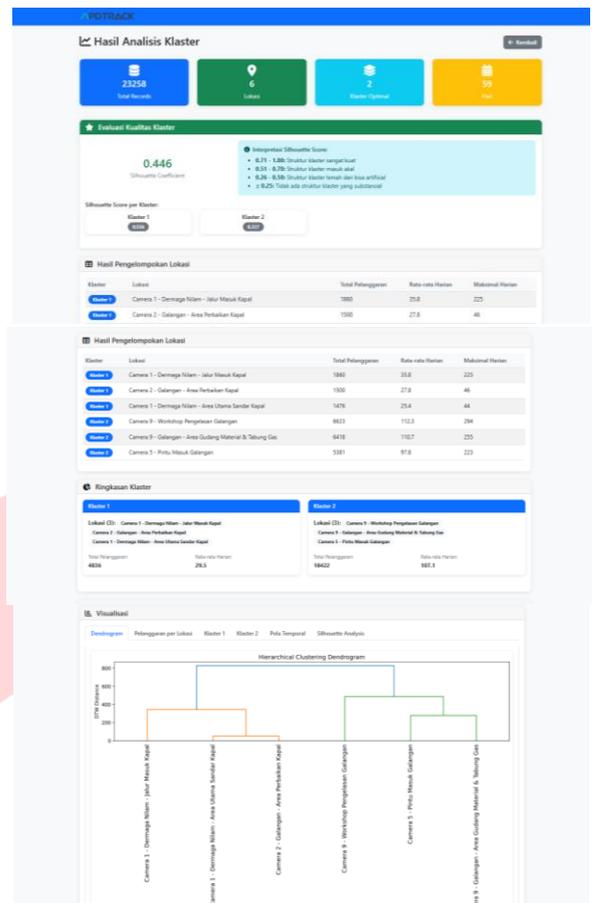
Visualisasi hasil klusterisasi pelanggaran APD dilakukan melalui antarmuka web interaktif yang dirancang untuk memudahkan interpretasi data dan mendukung pengambilan keputusan cepat oleh tim K3.

Sistem visual menampilkan informasi penting seperti total data (23.258 entri), jumlah lokasi (6 titik), jumlah hari observasi (59 hari), serta hasil evaluasi kluster berupa silhouette coefficient (total: 0,446; kluster 1: 0,5546; kluster 2: 0,3117).

Selain itu, dashboard menyajikan tabel pengelompokan lokasi berdasarkan kluster yang meliputi total pelanggaran, rata-rata pelanggaran harian, dan jumlah maksimum pelanggaran per hari. Informasi ini juga diringkas dalam bagian ringkasan kluster untuk memberikan gambaran umum karakteristik masing-masing kelompok.



Gambar 3 Tampilan Awal Website



Gambar 4 Tampilan Hasil Analisis pada Website

V. KESIMPULAN.

Penelitian ini menunjukkan bahwa metode time series clustering dengan pendekatan Dynamic Time Warping (DTW) dan hierarchical clustering mampu mengidentifikasi pola pelanggaran APD berdasarkan kemiripan deret waktu antar lokasi. Hasil evaluasi menggunakan koefisien silhouette menghasilkan dua kluster optimal, dengan karakteristik berbeda: kluster pertama terdiri dari lokasi dengan pelanggaran stabil dan rendah, sedangkan kluster kedua mencakup lokasi dengan tingkat pelanggaran tinggi dan fluktuatif.

Visualisasi hasil dalam bentuk dashboard web interaktif membantu mempermudah analisis dan interpretasi oleh tim K3. Dengan demikian, metode ini dapat menjadi alat pendukung pengambilan keputusan untuk strategi pengawasan keselamatan kerja yang lebih terarah dan berbasis data.

REFERENSI

- [1] A. Asgaruddin, "Work Professionalism Through Work Discipline on Employee Performance (a Literature Study Human Resource Management)," Apr. 2023, doi: 10.31933/dijms.v4i6.
- [2] P. P. Keselamatan, K. Kerja, P. Karyawan, and A. Sarbiah, "Penerapan Pelaksanaan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) pada Karyawan," 2023.

- [3] L. Putu Widya Adnyani and P. Robinson Sihombing, "ANALISIS CLUSTER TIME SERIES DALAM PENGELOMPOKAN PROVINSI DI INDONESIA BERDASARKAN NILAI PDRB," 2021. [Online]. Available: <http://bayesian.lppmbinabangsa.id/index.php/home>
- [4] D. A. N. Sirodj, I. M. Sumertajaya, and A. Kurnia, "Analisis Clustering Time Series untuk Pengelompokan Provinsi di Indonesia Berdasarkan Indeks Pembangunan Manusia Jenis Kelamin Perempuan," *STATISTIKA Journal of Theoretical Statistics and Its Applications*, vol. 23, no. 1, pp. 29–37, Jun. 2023, doi: 10.29313/statistika.v23i1.2181.
- [5] D. Setiawan and A. Zahra, "Pengelompokan Kemiskinan di Indonesia Menggunakan Time Series Based Clustering," *Inferensi*, vol. 6, no. 1, p. 83, Mar. 2023, doi: 10.12962/j27213862.v6i1.14969.
- [6] R. N. Puspita, D. Kependudukan, P. Sipil, and K. Tangerang, "PERBANDINGAN METODE ANALISIS CLUSTER HIRARKI PADA DATA MARGIN PERDAGANGAN DAN PENGANGKUTAN (MPP) KOMODITAS STRATEGIS DI INDONESIA," vol. 3, no. 1, 2022, doi: 10.46306/lb.v3i1.
- [7] F. Alfiah, A. Almadayani, D. Al Farizi, and E. Widodo, "Analisis Clustering K-Medoids Berdasarkan Indikator Kemiskinan di Jawa Timur Tahun 2020," *JURNAL ILMIAH SAINS*, vol. 22, no. 1, p. 1, Dec. 2021, doi: 10.35799/jis.v22i1.35911.
- [8] D. T. Utari and D. S. Hanun, "Hierarchical Clustering Approach for Region Analysis of Contraceptive Users," *EKSAKTA: Journal of Sciences and Data Analysis*, pp. 99–108, Sep. 2021, doi: 10.20885/eksakta.vol2.iss2.art3.
- [9] M. Diarty and A. W. Wijayanto, "Analisis Aspek Ketahanan Pangan Indonesia dengan Hard dan Soft Clustering, 2022," *Rekayasa*, vol. 17, no. 1, pp. 108–123, Apr. 2024, doi: 10.21107/rekayasa.v17i1.21774.
- [10] T. Li, A. Rezaeipanah, and E. S. M. Tag El Din, "An ensemble agglomerative hierarchical clustering algorithm based on clusters clustering technique and the novel similarity measurement," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 6, pp. 3828–3842, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.jksuci.2022.04.010.
- [11] G. R. Suraya and A. W. Wijayanto, "Comparison of Hierarchical Clustering, K-Means, K-Medoids, and Fuzzy C-Means Methods in Grouping Provinces in Indonesia according to the Special Index for Handling Stunting," *Indonesian Journal of Statistics and Its Applications*, vol. 6, no. 2, pp. 180–201, Aug. 2022, doi: 10.29244/ijsa.v6i2p180-201.
- [12] T. Li, X. Wu, and J. Zhang, "Time series clustering model based on DTW for classifying car parks," *Algorithms*, vol. 13, no. 3, Mar. 2020, doi: 10.3390/a13030057.
- [13] E. Sulistiyawan *et al.*, "PERBANDINGAN METODE OPTIMASI UNTUK PENGELOMPOKAN PROVINSI BERDASARKAN SEKTOR PERIKANAN DI INDONESIA (Studi Kasus Dinas Kelautan dan Perikanan Indonesia)," vol. 10, no. 1, pp. 76–84, 2021, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/gaussian/>