

Penerapan Metode Dynamic Time Warping dan Clustering dalam Evaluasi Kondisi Permukaan Jalan (Contoh Jalan USAID Aceh)

M. Arief Zuhdi Nasution

Jurusan Statistika FMIPA, Universitas Syiah Kuala, Jl. Teuku Nyak Arief, Banda Aceh
E-mail: arifzuhdi815@gmail.com

Samsul Anwar*

Jurusan Statistika FMIPA, Universitas Syiah Kuala, Jl. Teuku Nyak Arief, Banda Aceh
E-mail: samsul.anwar@usk.ac.id

Radhiah

Jurusan Matematika FMIPA, Universitas Syiah Kuala, Jl. Teuku Nyak Arief, Banda Aceh
E-mail: radhiah_is@yahoo.co.id

Abstrak

Kondisi permukaan jalan merupakan faktor yang memengaruhi kenyamanan dan keselamatan pengendara. Sehingga perlu dilakukan pemeriksaan kondisi jalan secara berkala. Pemantauan kondisi permukaan jalan di Indonesia pada umumnya masih dilakukan secara konvensional. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menerapkan pendekatan yang lebih efisien dalam mengukur kondisi permukaan jalan dengan menggunakan sensor accelerometer dan global positioning sistem (GPS) yang terinstall pada smartphone. Penelitian ini menggunakan metode Dynamic Time Warping (DTW) untuk mengevaluasi kondisi permukaan jalan secara umum dan metode K-means clustering untuk mengidentifikasi lokasi anomali yang terdapat pada permukaan jalan. Data hasil perekaman kondisi permukaan jalan USAID dari SMA Negeri 1 Lhoknga sampai Pantai Lhokseudu di Provinsi Aceh (lebih kurang 16 kilometer) dianalisis pada penelitian ini. Hasil analisis menunjukkan bahwa bentuk topografi jalan menurun dan menanjak cenderung memiliki kondisi yang lebih buruk dibandingkan segmen jalan yang mendatar. Selain itu, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa kawasan dengan kepadatan penduduk yang lebih rendah memiliki kondisi jalan yang kurang baik dibandingkan kawasan dengan kepadatan penduduk yang lebih tinggi. Metode DTW dan K-means clustering berpotensi untuk digunakan sebagai metode alternatif dalam mengukur kondisi permukaan jalan yang lebih hemat tenaga, waktu dan biaya jika dibandingkan dengan pemeriksaan secara konvensional.

Kata-kata Kunci: DTW, k-means clustering, permukaan jalan, smartphone

Abstract

The condition of the road surface is a factor that affects the comfort and safety of the driver. It is necessary to examine the condition of the road on a regular basis. Monitoring of road surface conditions in Indonesia is generally still done conventionally. Therefore, this study aims to apply a more efficient approach in measuring road surface conditions using accelerometer sensors and a global positioning system (GPS) installed on a smartphone. This study employs the Dynamic Time Warping (DTW) method to evaluate general road surface conditions and the K-means clustering method to identify the location of anomalies on the road surface. Recording data of USAID road surface condition from SMA Negeri 1 Lhoknga to Lhok Seudu Beach in Aceh Province (approximately 16 kilometers) were analyzed in this study. The results of the analysis show that the topography of downhill and uphill roads tends to possess worse conditions than the horizontal road segments. In addition, the results also show that areas with lower population densities have adverse road conditions than areas with higher population densities. The DTW method and K-means clustering demonstrate the potential to be used as an alternative method in measuring road surface conditions which is more efficient in energy, time and cost when compared to conventional inspection.

Keywords: DTW, k-means clustering, road surface, smartphone

1. Pendahuluan

Transportasi memiliki peranan penting bagi kehidupan masyarakat yang berfungsi dalam mendukung keberhasilan program pembangunan ekonomi. Salah satu komponen penting dalam bidang transportasi

adalah media jalan. Kekasaran permukaan jalan dianggap sebagai salah satu kondisi yang paling penting dari media jalan karena memengaruhi biaya perawatan kendaraan, konsumsi bahan bakar, kenyamanan dan keselamatan berkendara (Allouch, Koubaa, Abbes, & Ammar, 2017). Kondisi jalan yang

*Penulis Korespondensi: samsul.anwar@usk.ac.id

ideal harus dipertahankan agar dapat berfungsi secara optimal.

Proses pemantauan, perencanaan pemeliharaan, dan pengelolaan infrastruktur jalan yang baik membutuhkan jumlah data yang besar (Sazali, Setiadji, & Haryadi, 2019). Secara umum, sistem pemantauan kondisi jalan di negara maju dilakukan dengan menggunakan beberapa metode yaitu metode citra digital, metode getaran, dan metode rekonstruksi tiga dimensi (Kim & Ryu, 2014). Sebaliknya, pemeriksaan kondisi jalan di Indonesia saat ini lebih didominasi oleh metode konvensional yang membutuhkan banyak sumber daya manusia, anggaran yang tinggi dan waktu pemeriksaan yang relatif lama. Untuk membantu mengatasi kekurangan tersebut, pemeriksaan kondisi permukaan jalan dapat dilakukan dengan menggunakan bantuan sensor smartphone. Data kondisi jalan yang terekam melalui sensor smartphone selanjutnya dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi permukaan jalan yang diperiksa.

Sattar, Li, & Chapman (2018) melakukan penelitian terkait monitoring kondisi permukaan jalan dengan menggunakan metode Dynamic Time Warping (DTW). DTW adalah algoritma yang digunakan untuk menyelaraskan dua data time series yang berbeda dengan menghitung jarak minimal antar titik data yang ada (A. H. Ali, Atia, & Sami, 2017). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode DTW dapat digunakan untuk mengukur kualitas permukaan jalan. Akan tetapi, metode DTW memiliki kelemahan yaitu tidak dapat memberikan informasi mengenai lokasi dari kerusakan atau anomali yang terdapat pada permukaan jalan sehingga diperlukan metode lain yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi lokasi keberadaan dari anomali tersebut.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Ali et al. (2017), metode K-means clustering dapat digunakan untuk mengklasifikasikan data kondisi permukaan jalan menjadi dua kelas yaitu jalan dengan kondisi yang rata (smooth) dan bergelombang (bumpy). Berdasarkan kedua penelitian tersebut, analisis kondisi permukaan jalan pada penelitian ini dilakukan dengan menggabungkan analisis DTW dan K-means clustering terhadap data hasil sensor smartphone untuk mendeteksi anomali dan lokasinya. Penerapan metode DTW dan K-means clustering dalam mengevaluasi kondisi permukaan jalan memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan pemeriksaan secara konvensional. Keunggulan yang pertama terkait dengan kebutuhan sumber daya manusia yang jauh lebih sedikit dibandingkan dengan pemeriksaan secara konvensional karena proses perekaman data dilakukan dengan menggunakan smartphone. Kedua, biaya yang dibutuhkan pada pemeriksaan kondisi permukaan jalan secara konvensional jauh lebih besar dari pada menggunakan metode DTW dan K-means clustering.

Ketiga, waktu pemeriksaan jalan dapat dilakukan dengan lebih cepat dibandingkan dengan metode konvensional. Selain itu, tingkat akurasi hasil pemeriksaan melalui metode ini jauh lebih tinggi dibandingkan dengan pemeriksaan secara konvensional yang sangat bergantung pada penilaian subjektif dari petugas di lapangan.

Sebagai contoh kasus, penerapan metode DTW dan K-means clustering dalam memeriksa kondisi permukaan jalan akan dilakukan pada jalan USAID Aceh yang dibangun oleh lembaga donor USAID (The United States Agency for International Development) setelah gempa bumi dan tsunami terjadi di Provinsi Aceh pada tanggal 26 Desember 2004. Perekaman sampel data dilakukan pada ruas jalan USAID dari lokasi SMA Negeri 1 Lhoknga sampai dengan Pantai Lhokseudu sepanjang lebih kurang 16 kilometer. Penelitian ini diawali dengan mempartisi data berdasarkan bentuk topografi jalan dan kepadatan penduduk di sekitar jalan. Kemudian dilanjutkan dengan melakukan analisis DTW dan K-means clustering pada setiap segmen jalan, sehingga akan diketahui kondisi masing-masing segmen permukaan jalan serta lokasi anomali yang mungkin terdapat pada permukaan jalannya.

2. Metodologi

2.1 Metode pengumpulan data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data primer yang diperoleh secara langsung dengan teknik perekaman menggunakan sensor smartphone. Pengumpulan data kondisi permukaan jalan dilakukan dengan bantuan software Physics Toolbox Suite yang diinstall pada smartphone. Physics Toolbox Sensor Suite adalah aplikasi Android yang dapat merekam, menampilkan, dan mengeksport data dari sensor internal pada smartphone. Proses perekaman data pada penelitian ini dilakukan pada bulan Mei tahun 2022 terhadap jalan USAID dengan sampel dari lokasi SMA Negeri 1 Lhoknga, Kec. Lhoknga sampai dengan Pantai Lhokseudu, Kec. Leupung, Kab. Aceh Besar, Provinsi Aceh. Jarak titik awal sampai akhir lokasi perekaman data adalah sepanjang lebih kurang 16 kilometer.

Rekaman data yang digunakan pada penelitian ini terbagi menjadi tiga bagian. Bagian pertama adalah rekaman sensor accelerometer pada permukaan papan dengan kemiringan 10° dan 20° yang digunakan untuk menganalisis pengaruh kemiringan terhadap pengumpulan data. Bagian kedua adalah rekaman sensor accelerometer pada papan dengan permukaan kasar dan mulus yang digunakan untuk menganalisis pengaruh kekasaran permukaan terhadap proses pengumpulan data. Kemudian bagian ketiga adalah rekaman sensor accelerometer dan sensor GPS pada permukaan sampel jalan USAID sepanjang 16 km.

Tabel 1. Definisi variabel penelitian

Variabel	Keterangan	Skala	Satuan
Sumbu z	Rekaman sensor <i>accelerometer</i> pada sumbu z	Interval	m/s ²
Latitude	Rekaman sensor GPS pada koordinat lintang	Rasio	Derajat (°)
Longitude	Rekaman sensor GPS pada koordinat bujur	Rasio	Derajat (°)

Tabel 1 menyajikan informasi mengenai variabel-variabel yang digunakan dalam perekaman data bagian ketiga.

Proses pengumpulan data dilakukan dengan menggunakan kendaraan roda empat (mobil). Smartphone yang digunakan diletakkan pada bagian dashboard mobil untuk menerima getaran saat kendaraan melalui permukaan jalan. Ketika kendaraan melalui jalan yang berlubang, maka sensor accelerometer pada sumbu z akan menunjukkan nilai yang rendah. Selanjutnya pada saat melewati jalan yang terdapat hambatan, maka sensor accelerometer pada sumbu z akan menunjukkan nilai yang tinggi. Sedangkan pada saat melewati jalan yang ideal, maka nilai sensor accelerometer pada sumbu z akan berada di sekitar nol (0).

Penelitian ini dilakukan dengan satu kali proses perekaman data menggunakan software Physics Toolbox Suite. Perekaman data dilakukan secara kontinu dari lokasi awal sampai lokasi akhir. **Tabel 2** menyajikan beberapa batasan yang dilakukan dalam proses perekaman data agar kualitas data yang dihasilkan memiliki bias yang kecil.

Tabel 2 menunjukkan bahwa smartphone yang digunakan dalam penelitian ini telah memiliki fitur-fitur yang mendukung dalam proses perekaman data. Kendaraan yang digunakan merupakan jenis MPV yang pacu dengan kecepatan antara 60-70 km/jam agar data yang dihasilkan tidak terlalu besar atau tidak terlalu kecil.

Setelah data hasil perekaman diperoleh, kemudian dilakukan partisi terhadap data berdasarkan kondisi topografi permukaan jalan dan kepadatan penduduk di sekitar lokasi jalan. Penentuan segmen jalan mendatar, menurun, atau menanjak dilakukan dengan memperhatikan bentuk topografi permukaan jalannya, dan penentuan tingkat kepadatan penduduk dilakukan dengan kriteria yang ditampilkan pada **Tabel 3**.

2.2 Pengolahan dan analisis data

Penelitian ini menggunakan tiga metode inferensia statistika yaitu T-test, Dynamic Time Warping (DTW), dan K-means clustering. Metode T-test digunakan untuk melihat perbedaan nilai sensor accelerometer pada

rekaman bagian pertama dan kedua yaitu pada kemiringan dan kekasaran permukaan papan tertentu. Metode DTW digunakan pada hasil rekaman data bagian ketiga untuk membandingkan kualitas masing-masing segmen permukaan jalan (berdasarkan topografi dan kepadatan penduduk) terhadap data kondisi jalan ideal. Permukaan jalan ideal didefinisikan sebagai jalan tanpa anomaly apapun atau pada saat nilai sensor accelerometer menunjukkan nilai 0 secara kontinu. Sedangkan metode K-means clustering digunakan untuk mengelompokkan titik-titik anomaly yang terdeteksi pada permukaan jalan, sehingga dapat diketahui lokasinya pada data rekaman bagian ketiga.

Perekaman dan proses analisis data yang dilakukan pada penelitian ini secara umum terbagi menjadi dua tahapan utama. Pada tahap pertama, perekaman dan analisis data dilakukan pada pilot proyek. Pilot proyek dilakukan untuk memastikan sensor accelerometer yang terinstall pada smartphone dapat bekerja dengan baik dalam merekam kondisi permukaan jalan, baik pada kondisi kemiringan tertentu maupun pada saat terdapat hambatan pada permukaan jalannya. Perekaman dan proses analisis data tahap kedua merupakan studi utama pada penelitian ini. Studi utama dilakukan untuk membandingkan kondisi permukaan jalan menggunakan metode DTW dan mengelompokkan lokasi anomaly pada permukaan jalan menggunakan metode K-means clustering. Penerapan metode K-means clustering dilakukan terhadap permukaan jalan yang memiliki kondisi paling buruk berdasarkan analisis metode DTW, baik pada segmen jalan berdasarkan kondisi topografinya maupun berdasarkan kepadatan penduduk yang ada di sekitarnya. Alur penelitian secara lengkap dapat dilihat pada **Gambar 1**.

Pengolahan data pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak Microsoft Excel 2007 dan R versi 4.0.4 dengan packages yang digunakan adalah dtw dan dtwclust. Berikut dijelaskan secara singkat mengenai metode-metode inferensia yang digunakan dalam proses analisis data pada penelitian ini.

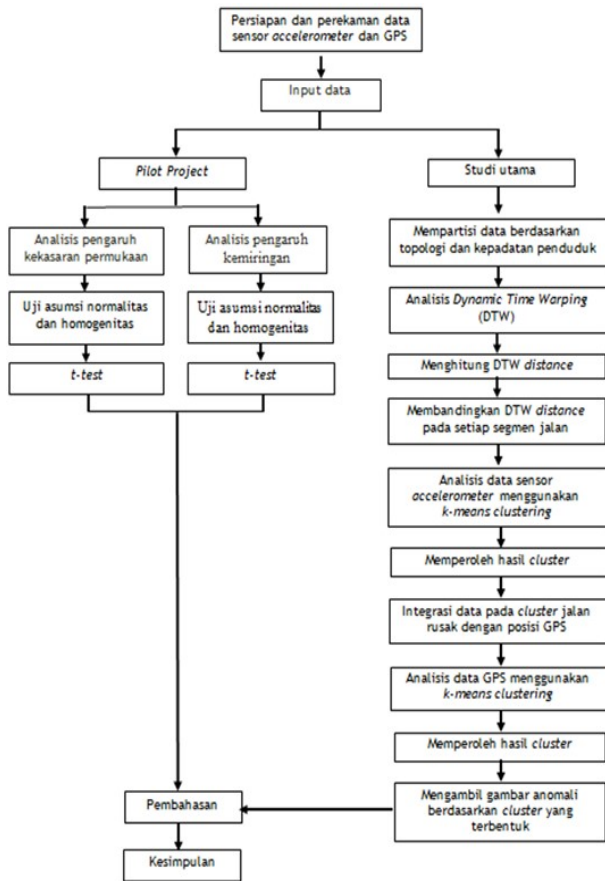
T-test adalah metode statistik inferensial yang digunakan untuk menentukan apakah terdapat

Tabel 2. Batasan dalam pengumpulan data

No	Batasan	Deskripsi
1	Smartphone	Smartphone keluaran tahun 2019 yang memiliki sensor <i>fingerprint</i> , <i>accelerometer</i> , <i>ambient light sensor</i> , <i>proximity sensor</i> , <i>e-compass</i> , dan <i>virtual gyroscope</i> .
2	Kendaraan	Mobil tipe MPV (<i>Multi Purpose Vehicle</i>)
3	Kecepatan kendaraan	Proses perekaman data dilakukan dengan kecepatan yang relatif konstan, yaitu pada kecepatan 60-70 km/jam

Tabel 3. Kriteria dalam proses partisi data

Variabel	Kategori	Keterangan
Kepadatan penduduk	Rendah	Rekaman sensor pada wilayah jalan dengan jumlah penduduk ≤ 550 jiwa
	Sedang	Rekaman sensor pada wilayah jalan dengan jumlah penduduk 551-1100 jiwa
	Tinggi	Rekaman sensor pada wilayah jalan dengan jumlah penduduk ≥ 1101 jiwa
	Mendatar	Rekaman sensor pada wilayah jalan mendatar
Topografi	Menanjak	Rekaman sensor pada wilayah jalan menanjak
	Menurun	Rekaman sensor pada wilayah jalan menurun



Gambar 1. Diagram alur penelitian

perbedaan yang signifikan antara rata-rata dua buah kelompok. T-test biasanya digunakan dalam kasus-kasus di mana subjek eksperimen dibagi menjadi dua kelompok (Potochnik, Colombo, & Wright, 2018). Dengan asumsi dua kelompok data memiliki varian yang setara, statistik uji untuk T-test dua sampel dapat dituliskan sebagai **Persamaan (1)** (Ramachandran & Tsokos, 2009).

$$t_{hitung} = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (1)$$

Dimana $\bar{x}_1$ adalah rata-rata skor kelompok 1 dan $\bar{x}_2$ adalah rata-rata skor kelompok 2. Kemudian S_1 adalah standar deviasi kelompok 1 dan S_2 adalah standar deviasi kelompok 2. Sedangkan n_1 dan n_2 masing-masing adalah jumlah subjek pada kelompok 1 dan kelompok 2. Kriteria pengujian untuk T-test adalah membandingkan nilai statistik uji terhadap t-tabel dengan area penolakan sebesar $\alpha/2$. H_0 yang menyatakan tidak ada perbedaan antara kedua kelompok dapat ditolak jika statistik $-t_{hitung} > t_{table}$ dan $t_{hitung} < -t_{table}$ atau taraf signifikansi $< \alpha(0,05)$.

Pada dasarnya metode Dynamic Time Warping (DTW) adalah metode yang digunakan untuk mengukur kesamaan dua data time series yang memiliki jumlah periode waktu yang berbeda (Yadav & Alam, 2018). Penyelarasan dua buah time series menggunakan

metode DTW memerlukan sebuah matriks berukuran $N \times M$ yang mengandung jarak $D(i, j)$ (Senin, 2008). Pada penelitian ini, analisis perbandingan kondisi permukaan jalan melalui data hasil perekaman sensor accelerometer dimulai dengan menetapkan data sensor accelerometer pada permukaan jalan ideal (bernilai nol) sebagai Query, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ dan data hasil perekaman sensor accelerometer pada permukaan jalan yang dievaluasi sebagai Reference, $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$. Kemudian dihitung jarak antara data Reference (Y) dan Query (X) dalam bentuk local cost matrix menggunakan **Persamaan (2)**.

$$C \in R^{N \times M}: c_{i,j} = ||x_i - y_j||, i \in [1, N], j \in [1, M] \quad (2)$$

Setelah itu dibangun global cost matrix dengan menggunakan **Persamaan (3)** hingga **Persamaan (5)** dengan ketentuan sebagai berikut:

Baris pertama :

$$D(1, j) = \sum_{k=1}^j c(x_1, y_k) \quad (3)$$

Kolom pertama:

$$D(i, 1) = \sum_{k=1}^i c(x_k, y_1) \quad (4)$$

Elemen lainnya:

$$D(i, j) = \min\{D(i-1, j-1), D(i-1, j), D(i, j-1)\} + c(x_i, y_j) \quad (5)$$

Berdasarkan global cost matrix yang terbentuk kemudian ditentukan cost function yang menjadi titik awal dalam warping path. Cost function didefinisikan dengan menggunakan **Persamaan (6)**.

$$c_p(X, Y) = \sum_{l=1}^k c(x_{nl}, y_{ml}) \quad (6)$$

Setelah diperoleh semua kemungkinan warping path yang ada, kemudian ditentukan optimal warping path yang memenuhi tiga kriteria. Pertama, boundary condition: $p_1 = (1, 1)$ dan $p_k = (N, M)$. Boundary condition menjelaskan bahwa titik awal dan akhir dari sebuah warping path membutuhkan jalur lengkung untuk memulai dan menyelesaikan jalur sisi yang berlawanan secara diagonal dari global cost matrix. Kedua, monotonicity condition: $n_1 \leq n_2 \leq \dots \leq n_k$ dan $m_1 \leq m_2 \leq \dots \leq m_k$. Kondisi ini akan membatasi langkah-langkah yang diizinkan pada jalur sel yang berdekatan, sehingga urutan waktu tetap dari terendah sampai tertinggi. Ketiga, step size condition. Aturan ini akan memaksa warping path menjadi monoton dalam waktu sehingga tidak terjadi pergeseran waktu yang terlalu jauh (Senin, 2008). Berdasarkan optimal warping path yang terpilih, kemudian dihitung nilai DTW distance dengan menggunakan **Persamaan (7)**.

$$DTW(X, Y) = c_{p^*}(X, Y) = \min\{c_p(X, Y), p \in P^{N \times M}\} \quad (7)$$

Dimana $p \in P^{N \times M}$ merupakan himpunan semua kemungkinan warping path yang ada.

K-means clustering digunakan untuk mengelompokkan n titik data ke dalam k cluster, dimana anggota dalam masing-masing cluster memiliki kemiripan yang tinggi dan anggota antar cluster memiliki kemiripan yang

rendah. Metode K-means clustering membutuhkan proses perulangan (iterasi) untuk menetapkan setiap titik data ke cluster dengan centroid (titik tengah atau rata-rata cluster) terdekat. Centroid yang terbentuk pada tahap awal diperoleh secara acak, sehingga lokasi centroid tersebut cenderung tidak stabil. Titik data pada masing-masing cluster akan mengalami perpindahan sampai sampai nilai centroid pada cluster tersebut tidak berubah secara signifikan (Shukla & S, 2014). Menurut Nishom (2019), salah satu ukuran jarak yang sering digunakan pada analisis K-means clustering adalah ukuran jarak Euclidean yang dapat dituliskan sebagai **Persamaan (8)**.

$$d_{ik} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - y_{kj})^2} \quad (8)$$

Dimana x_{ij} dan y_{kj} merupakan dua titik yang dihitung jaraknya.

Proses analisis menggunakan K-means clustering dilakukan terhadap segmen jalan dengan kondisi paling buruk pada masing-masing topografi jalan (mendatar, menurun atau menaik) dan kepadatan penduduk disekitar jalan (rendah, sedang atau tinggi). Dalam menentukan jumlah dan lokasi anomali yang ada pada sebuah segmen permukaan jalan, dilakukan dua tahap analisis menggunakan metode K-means clustering.

Pada tahap pertama, analisis K-means clustering dilakukan dengan jumlah cluster sebanyak 2 terhadap data hasil perekaman sensor accelerometer pada sumbu z untuk menentukan ada tidaknya anomali pada permukaan jalan yang dievaluasi. Dengan menggunakan jumlah cluster sebanyak 2, diharapkan data pada kondisi permukaan jalan yang bagus (smooth) akan masuk ke dalam satu cluster, dan data pada kondisi permukaan jalan dengan anomali masuk ke dalam cluster lainnya. Namun apabila data hasil perekaman sensor accelerometer yang diperoleh tidak terlalu bervariasi, maka jumlah cluster yang digunakan disesuaikan sampai memperoleh nilai centroid yang mendekati hasil analisis pada segmen lainnya.

Pada tahap kedua, analisis K-means clustering dilakukan khusus terhadap data pada lokasi permukaan jalan yang memiliki anomali berdasarkan hasil analisis tahap pertama. Data yang dianalisis pada K-means clustering tahap kedua merupakan data sensor GPS lokasi anomali yang terdeteksi pada analisis tahap sebelumnya. Pada

tahap ini, ditetapkan jumlah cluster sebanyak k sehingga dapat diketahui lokasi awal dan akhir dari anomali yang ada pada permukaan jalan yang dievaluasi. Jumlah cluster disesuaikan dengan jumlah kerusakan berdasarkan hasil analisis terhadap data hasil perekaman sensor accelerometer pada sumbu z pada analisis K-means clustering tahap pertama.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pilot proyek

Pengumpulan data untuk pilot proyek dilakukan pada papan sepanjang 2 meter yang dijadikan sebagai media uji coba. Papan yang digunakan dibedakan menjadi 4 kondisi yaitu memiliki permukaan mulus, memiliki permukaan kasar, berada pada kemiringan 10° , dan berada pada kemiringan 20° . Pengumpulan data dilakukan dengan menggerakkan smartphone yang diikat pada media yang dipasang roda sebanyak 10 kali perulangan pada masing-masing kondisi permukaan papan tersebut. Berdasarkan data yang terkumpul, kemudian dilakukan analisis menggunakan T-test untuk melihat pengaruh kemiringan dan kekasaran permukaan terhadap kemampuan sensor accelerometer dalam merekam kondisi permukaan media uji coba.

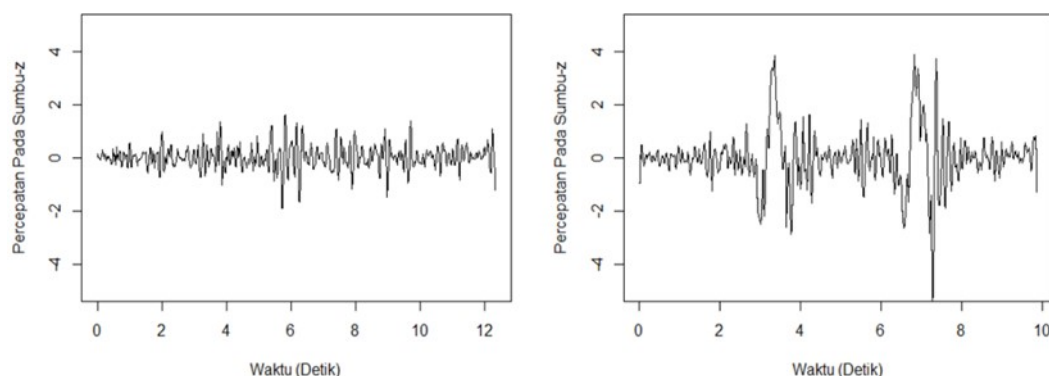
3.1.1 Pengaruh kekasaran permukaan

Analisis pengaruh kekasaran permukaan dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor accelerometer pada smartphone dalam mengenali permukaan mulus dan permukaan dengan hambatan. Proses perekaman data untuk setiap perulangan dilakukan pada frekuensi 100 Hz. Tampilan grafik untuk perulangan pertama pada permukaan mulus dan permukaan kasar dapat dilihat pada **Gambar 2**.

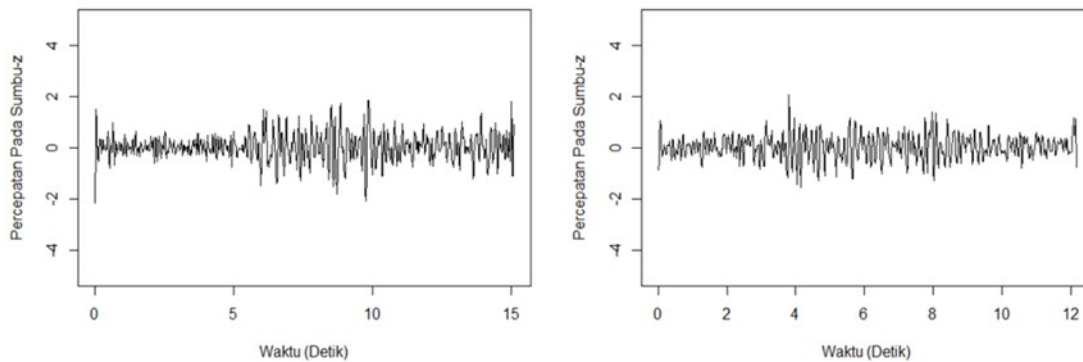
Berdasarkan **Gambar 2**, dapat dilihat bahwa sensor accelerometer pada smartphone dapat mengenali hambatan pada permukaan benda. Ketika sensor accelerometer melewati hambatan maka terjadi kenaikan dan penurunan yang cukup ekstrim pada pola pergerakan sumbu z.

3.1.2 Pengaruh kemiringan permukaan

Analisis efek kemiringan permukaan dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor accelerometer pada



Gambar 2. Plot data hasil perekaman pertama sensor *accelerometer* pada permukaan mulus (kiri) dan pada permukaan kasar (kanan)



Gambar 3. Plot data hasil perekaman pertama sensor *accelerometer* pada permukaan dengan kemiringan 10° (kiri) dan 20° (kanan)

smartphone dalam mendeteksi beberapa jenis kemiringan. Proses perekaman data dilakukan pada papan dengan kemiringan 10° dan 20° pada frekuensi sensor sebesar 100 Hz. Tampilan grafik untuk perulangan pertama pada permukaan dengan kemiringan 10° dan 20° dapat dilihat pada **Gambar 3**.

Gambar 3 menunjukkan bahwa pola pergerakan sensor *accelerometer* pada sumbu z dengan kemiringan 10° dan 20° cenderung stasioner pada rentang -2 m/s² sampai 2 m/s². Secara visual, terlihat tidak adanya perbedaan pola pergerakan sumbu z pada kedua kemiringan yang dianalisis.

3.1.3 Pengujian pengaruh kemiringan dan kekasaran permukaan berdasarkan t-test

Hipotesis nol (H_0) yang digunakan pada T-test menyatakan tidak terdapat perbedaan nilai rata-rata sensor *accelerometer* pada sumbu z antara data pada permukaan mulus dan permukaan kasar yang dibandingkan, dan antara data pada permukaan dengan kemiringan 10° dan 20°. Hipotesis nol dapat ditolak jika nilai statistik uji ($t_{hitung} > t_{tabel}$ dan $t_{hitung} < -t_{tabel}$ atau $p\text{-value} < \alpha$ (0,05). Nilai statistik uji dan p-value untuk perbandingan antara permukaan media yang mulus (tanpa hambatan) dan kasar (dengan hambatan) dan perbandingan antara permukaan media dengan kemiringan 10° dan 20° dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Hasil pengujian pada **Tabel 4** menunjukkan bahwa perekaman data dengan bantuan sensor *accelerometer* pada sumbu z yang terinstall pada smartphone dapat mengenali hambatan yang terdapat pada permukaan media uji coba serta dapat mengakomodir pengaruh kemiringan permukaan media uji coba tersebut. Dengan demikian, sensor *accelerometer* pada smartphone dapat digunakan untuk merekam kondisi permukaan jalan pada studi utama.

3.2 Studi utama

3.2.1 Partisi data kondisi jalan berdasarkan topografi dan kepadatan penduduk

Data yang digunakan pada studi utama penelitian ini adalah data rekaman kondisi permukaan jalan USAID pada lokasi dari SMAN 1 Lhoknga sampai Pantai Lhokseudu. Rekaman diperoleh dengan menggunakan sensor *accelerometer* dan GPS pada smartphone di sepanjang permukaan jalan yang dilalui. Data yang diperoleh kemudian dipartisi menjadi beberapa segmen berdasarkan kriteria yang telah ditentukan pada **Tabel 3**. Rincian partisi data berdasarkan topografi dan kepadatan penduduk masing-masing dapat dilihat pada **Tabel 5** dan **Tabel 6**.

Tabel 4. Statistik uji dan *p-value* dari pengujian T-test terhadap data pilot proyek

No	Perbandingan	Statistik Uji	<i>p-value</i>	Keputusan
1	Permukaan mulus - Permukaan dengan hambatan	27,480	<0,001	Dapat menolak H_0
2	Kemiringan permukaan 10° - Kemiringan permukaan 20°	3,301	0,003	Dapat menolak H_0

Tabel 5. Partisi data berdasarkan topografi jalan

Segmen Jalan	Topografi jalan	Jarak (km)	Jumlah Data
I	Mendatar 1	1,30	32.250
II	Menanjak 1	0,40	7.140
III	Menurun 1	0,55	10.116
IV	Menanjak 2	0,40	7.452
V	Menurun 2	0,30	5.241
VI	Mendatar 2	7,70	129.086
VII	Menanjak 3	0,80	14.899
VIII	Menurun 3	1,10	20.248
IX	Mendatar 3	3,10	57.736

Tabel 6. Partisi data berdasarkan kepadatan penduduk di sekitar jalan

Segmen Jalan	Kepadatan Penduduk	Nama Gampong	Jarak (km)	Jumlah Data
I	Tinggi	Mon Ikeun, Lamkruet, Weuraya	4,40	88.456
II	Sedang	Deah Mamplam	5,20	94.786
III	Rendah	M. Bak U, M. Mesjid, Lamseunia	2,00	35.617
IV	Sedang	Pulot, Layeun	4,20	77.693

Tabel 7. Perbandingan nilai DTW distance segmen jalan berdasarkan bentuk topografi jalan

Topografi jalan	Jumlah Data	DTW distance	Average DTW distance	Rank
Mendatar 1 (Segmen I)	32.250	47.327	1,467	1
Menanjak 1 (Segmen II)	7.140	11.870	1,662	4
Menurun 1 (Segmen III)	10.116	18.223	1,801	7
Menanjak 2 (Segmen IV)	7.452	11.989	1,608	2
Menurun 2 (Segmen V)	5.241	10.029	1,913	9
Mendatar 2 (Segmen VI)	129.086	220.219	1,705	6
Menanjak 3 (Segmen VII)	14.899	27.717	1,860	8
Menurun 3 (Segmen VIII)	20.248	33.823	1,670	5
Mendatar 3 (Segmen IX)	57.736	95.777	1,658	3

3.2.2 Analisis DTW berdasarkan topografi jalan

Analisis DTW berdasarkan topografi permukaan jalan dilakukan dengan membandingkan kondisi geometri vertikal permukaan jalan terhadap kondisi permukaan jalan ideal yaitu jalan dengan nilai sensor accelerometer pada sumbu z sebesar 0. Analisis DTW dapat memberikan informasi mengenai segmen permukaan jalan mana yang memiliki kondisi terbaik yang mendekati kondisi permukaan jalan ideal. Analisis DTW berdasarkan topografi jalan dilakukan dengan membandingkan rekaman permukaan jalan ideal terhadap rekaman 9 segmen permukaan jalan yang dipartisi berdasarkan topografi permukaannya.

Tahapan analisis dengan menggunakan metode DTW dimulai dengan menentukan variabel Reference (Y) dan variabel Query (X). Selanjutnya dibangun local cost matrix yang berisi jarak dua buah titik data yang dilanjutkan dengan membangun global cost matrix dan menentukan titik awal warping path. Langkah berikutnya adalah menentukan warping path paling optimal serta diakhiri dengan menghitung nilai DTW distance berdasarkan warping path yang terbentuk sebelumnya. Hasil analisis DTW seluruh segmen jalan berdasarkan topografi permukaannya ditampilkan pada **Tabel 7**.

Sebagai catatan, semakin kecil nilai DTW distance yang diperoleh maka kondisi permukaan jalan yang dievaluasi akan semakin mendekati kondisi permukaan jalan ideal. Demikian juga sebaliknya, nilai DTW distance yang besar mengindikasikan bahwa jalan tersebut semakin jauh dari kondisi jalan ideal. Akan tetapi, nilai DTW distance sangat dipengaruhi oleh banyaknya data yang digunakan dalam perhitungannya. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan nilai rata-rata DTW distance untuk menyamakan ukuran perbandingan antar segmen jalan yang dievaluasi. Dengan menggunakan kriteria rata-rata DTW distance tersebut, maka dapat diketahui bahwa segmen jalan yang memiliki kondisi yang paling mendekati permukaan jalan ideal adalah segmen jalan lurus 1 (average DTW distance sebesar 1,467). Sedangkan

segmen permukaan jalan yang paling jauh dari kondisi ideal adalah segmen jalan menurun 2 karena memiliki rata-rata DTW distance yang paling besar (average DTW distance sebesar 1,913) diantara ke delapan segmen lainnya (**Tabel 7**). Secara umum, dengan melihat nilai rata-rata DTW distance dapat diketahui bahwa segmen jalan yang menanjak dan menurun cenderung memiliki kondisi yang lebih buruk dibandingkan dengan segmen jalan dengan topografi mendatar.

3.2.3 Analisis DTW berdasarkan kepadatan penduduk di sekitar jalan

Kepadatan penduduk di sekitar jalan secara tidak langsung akan memengaruhi kondisi permukaan jalan di wilayah tersebut. Secara umum, tingkat kepadatan penduduk yang tinggi cenderung akan mengakibatkan volume kendaraan yang melalui jalan juga semakin tinggi. Berdasarkan hal tersebut, analisis DTW berdasarkan kepadatan penduduk perlu dilakukan untuk mengetahui segmen permukaan jalan mana yang memiliki kondisi terbaik jika dilihat dari kepadatan penduduk di sekitarnya. Perhitungan DTW distance dan rata-rata DTW distance berdasarkan kepadatan penduduk juga dihitung dengan prosedur yang sama seperti pada perbandingan berdasarkan topografi permukaan jalan sebelumnya. Hasil analisis DTW seluruh segmen permukaan jalan berdasarkan kepadatan penduduk ditampilkan pada **Tabel 8**.

Dengan melihat rata-rata DTW distance pada **Tabel 8** untuk keempat segmen permukaan jalan yang dievaluasi, dapat disimpulkan bahwa segmen jalan IV dengan kepadatan penduduk kategori sedang mulai dari Desa Pulot sampai Desa Layeun memiliki kondisi permukaan jalan paling baik (average DTW distance sebesar 1,582). Sedangkan segmen permukaan jalan yang paling jauh dari kondisi ideal berdasarkan kepadatan penduduk adalah segmen jalan III dengan kepadatan penduduk kategori rendah yang berlokasi dari Desa Meunasah Bak U sampai Desa Lamseunia (average DTW distance sebesar 1,793).

Tabel 8. Perbandingan nilai DTW *distance* segmen jalan berdasarkan kepadatan penduduk

Kepadatan Penduduk	Jumlah Data	DTW <i>distance</i>	Average DTW <i>distance</i>	Rank
Tinggi (Segmen I)	88.456	132.769	1,651	2
Sedang (Segmen II)	94.786	153.994	1,746	3
Rendah (Segmen III)	35.617	61.423	1,793	4
Sedang (Segmen IV)	77.693	128.789	1,582	1

3.2.4 Analisis k-means clustering berdasarkan topografi jalan

Pada tahap ini dilakukan analisis K-means clustering terhadap segmen jalan dengan kondisi permukaan yang paling buruk berdasarkan topografinya. Segmen jalan dengan kondisi yang paling buruk dipilih karena diduga memiliki anomali pada permukaan jalannya. Berdasarkan Tabel 7, diketahui bahwa segmen jalan menurun 2 merupakan segmen jalan dengan kondisi permukaan yang paling buruk dibandingkan segmen jalan lainnya, sehingga analisis K-means clustering dilakukan terhadap segmen jalan menurun 2 tersebut. Data yang dianalisis dengan metode K-means clustering tahap pertama merupakan data hasil perekaman sensor accelerometer pada sumbu z di wilayah segmen jalan menurun 2. Hasil analisis K-means clustering pada segmen jalan menurun 2 ditampilkan melalui plot pada Gambar 4.

Berdasarkan Gambar 4, diduga bahwa terdapat satu anomali pada segmen jalan menurun 2 (cluster 2). Untuk mengetahui dimana lokasi anomali pada permukaan jalan menurun 2, selanjutnya dilakukan analisis K-means clustering tahap kedua terhadap data posisi latitude dan longitude dari titik data yang masuk ke dalam cluster 2. Hasil analisis K-means clustering berdasarkan data posisi latitude dan longitude dapat dilihat pada Tabel 9.

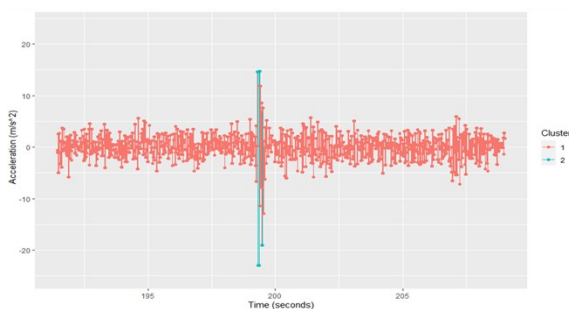
Berdasarkan Tabel 9, diketahui bahwa satu-satunya anomali yang berada pada segmen jalan menurun 2 memiliki jarak yang cukup pendek. Meskipun demikian, Gambar 4 menunjukkan bahwa anomali

tersebut akan memengaruhi pergerakan kendaraan secara signifikan karena memiliki fluktuasi nilai sumbu z yang sangat tinggi.

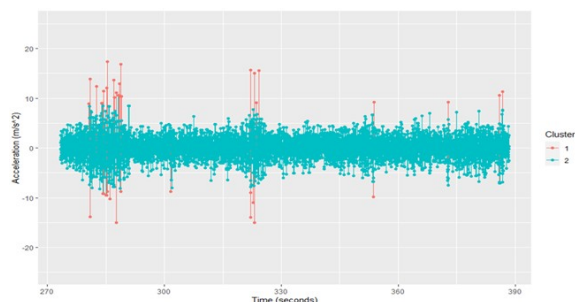
3.2.5 Analisis k-means clustering berdasarkan kepadatan penduduk di sekitar jalan

Berdasarkan Tabel 8 diketahui bahwa segmen jalan III dari lokasi Desa Meunasah Bak U sampai Desa Lamseunia merupakan segmen jalan dengan kondisi permukaan paling buruk dibandingkan segmen jalan lainnya. Selanjutnya dilakukan analisis K-means clustering tahap pertama dengan jumlah cluster sebanyak 2 terhadap data hasil sensor accelerometer pada sumbu z yang direkam pada segmen jalan tersebut. Hal ini dilakukan untuk mengetahui banyaknya anomali yang mungkin terdapat pada permukaan jalan segmen III tersebut. Plot hasil analisis K-means clustering pada segmen jalan III dapat dilihat pada Gambar 5.

Berbeda halnya dengan hasil clustering berdasarkan topografi sebelumnya, Gambar 5 menunjukkan bahwa lokasi anomali berdasarkan kepadatan penduduk tergolong ke dalam cluster 1. Untuk mengetahui lokasi anomali yang terdeteksi berdasarkan hasil analisis pada cluster 1 tersebut, selanjutnya dilakukan analisis K-means clustering tahap kedua dengan menggunakan data posisi latitude dan longitude dari titik observasi yang masuk ke dalam cluster 1. Hasil analisis K-means clustering tahap kedua berdasarkan posisi latitude dan longitude ditampilkan pada Tabel 10.



Gambar 4. Plot K-Means clustering data hasil sensor accelerometer pada sumbu z segmen jalan menurun 2



Gambar 5. Plot K-Means clustering data hasil sensor accelerometer pada sumbu-z segmen jalan III berdasarkan kepadatan penduduk di sekitar jalan

Tabel 9. Hasil analisis K-means clustering berdasarkan data posisi latitude dan longitude pada segmen jalan menurun 2

Anomali ke-	Posisi Latitude dan Longitude	Panjang Anomali (m)
1	5,36582833;95,2538 s/d 5,36586132;95,2538	~3,6

Tabel 10. Hasil analisis *K-means clustering* berdasarkan data posisi *latitude* dan *longitude* pada segmen jalan III berdasarkan kepadatan penduduk di sekitar jalan

Anomali ke-	Posisi <i>Latitude</i> dan <i>Longitude</i>	Panjang Anomali (m)
1	5,37759167;95,25830167 s/d 5,377865;95,2584	~ 3,2
2	5,378;95,25845167 s/d 5,37813833;95,25850167	~ 1,6
3	5,37827667;95,258555 s/d 5,37841667;95,25860667	~ 1,7
4	5,37855667;95,25865833 s/d 5,37869667;95,258705	~ 1,6
5	5,38056;95,25936167 s/d 5,38056;95,25936167	< 1
6	5,38365333;95,260075 s/d 5,38394833;95,260105	~ 3,3
7	5,38862;95,259905 s/d 5,38862;95,259905	< 1
8	5,39159833;95,2590133 s/d 5,39159833;95,2590133	< 1
9	5,393515;95,25806333 s/d 5,39364667;95,25798833	~ 1,7

3.2.6 Identifikasi anomali pada segmen Jalan dengan kondisi paling buruk berdasarkan topografi dan kepadatan penduduk di sekitar jalan

Identifikasi anomali berdasarkan topografi dan kepadatan penduduk jalan dilakukan untuk melihat jenis kerusakan yang terdapat pada permukaan jalan dan memastikan hasil analisis DTW dan *K-means clustering* yang diperoleh sebelumnya sesuai dengan kondisi di lapangan. Berdasarkan **Tabel 9**, dapat diketahui bahwa anomali pada permukaan jalan menurun 2 dimulai dari lokasi dengan koordinat 5,36582833;95,2538 sampai dengan 5,36586132;95,2538. Dengan menggunakan aplikasi google maps, maka dapat diperkirakan bahwa ukuran anomali pada segmen jalan menurun 2 adalah sepanjang lebih kurang 3,6 meter dengan jenis anomali yang ditampilkan pada **Gambar 6a**. Selanjutnya untuk segmen jalan III berdasarkan kepadatan penduduk di sekitar jalan (mulai dari Desa Meunasah Bak U hingga Desa Lamseunia), diperkirakan terdapat sembilan titik anomali di sepanjang permukaan jalannya (**Gambar 6b** hingga **Gambar 6j**).

Ukuran masing-masing anomali dapat diketahui dengan mengukur jarak antara koordinat awal dan koordinat akhir dari setiap cluster sebagaimana yang ditampilkan pada **Tabel 10** kolom ketiga. Berdasarkan **Tabel 10**, diketahui bahwa panjang ukuran anomali pada permukaan segmen jalan III berdasarkan kepadatan penduduk di sekitar jalan cukup bervariasi antara kurang dari 1 meter hingga sekitar 3,3 meter.

3.3 Pembahasan hasil penelitian

Gempabumi yang terjadi di Provinsi Aceh pada tanggal 24 Desember 2004 merupakan salah satu gempabumi terbesar yang terekam manusia. Dikutip dari berbagai sumber, gempabumi tersebut memiliki magnitudo yang berkisar antara 9,1-9,3 (Anwar, 2019, 2022) dan menyebabkan terjadinya gelombang tsunami yang menyebabkan begitu banyak korban jiwa di berbagai negara.

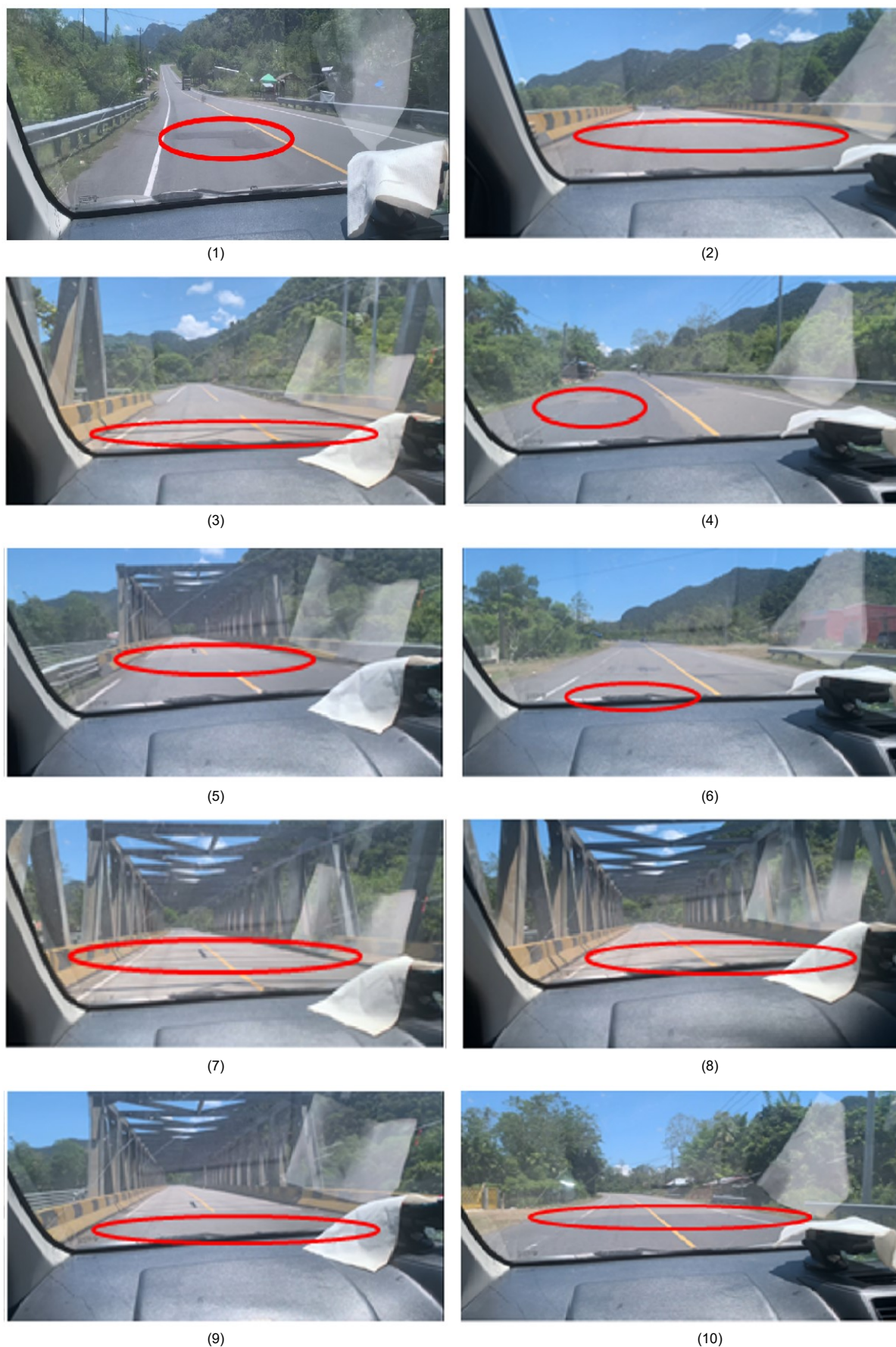
Selain menyebabkan korban jiwa, gempabumi dan tsunami Aceh juga telah menyebabkan kerugian materil berupa rusaknya fasilitas fisik termasuk infrastruktur

serta kerugian nonfisik lainnya yang diperkirakan mencapai Rp41,40 triliun (Nazamuddin, 2007). Salah satu infrastruktur yang paling terdampak karena terjadinya bencana gempabumi dan tsunami tersebut adalah sektor transportasi. Sehingga pembangunan kembali sarana transportasi termasuk media jalan merupakan hal yang sangat mendesak agar ekonomi masyarakat dapat segera pulih kembali.

United States Agency for International Development (USAID) sebagai salah satu lembaga donor pada tahun 2006 hingga 2010 telah membangun kembali jalan di wilayah pantai barat Aceh mulai dari Kota Banda Aceh hingga Kota Meulaboh sepanjang 250 kilometer dengan anggaran sekitar 2,2 triliun rupiah. Pembangunan jalan tersebut telah membantu menyambung kembali arus transportasi dari Ibukota Provinsi Aceh ke wilayah pantai barat yang sempat terputus total karena musibah gempabumi dan tsunami (DPU Provinsi Aceh, 2005).

Agar jalan USAID tersebut tetap dapat berfungsi dengan baik, proses pengawasan dan perawatan terhadap jalan perlu dilakukan secara periodik demi keamanan dan kenyamanan para pengguna jalan. Kondisi keselamatan lalu lintas jalan di Indonesia masih belum baik, kecelakaan lalu lintas masih sering terjadi dan memakan banyak korban jiwa (Rakhmat, Kusumawati, Frazila, & Hendarto, 2012). Kecelakaan lalu lintas yang terjadi tidak hanya disebabkan oleh faktor manusia (*human error*), tetapi juga dipengaruhi oleh faktor kondisi jalan dan lingkungan (Samsudin, 2019; Saputra, 2017). Penelitian yang dilakukan oleh Herawati (2019) menunjukkan bahwa sekitar 15% kecelakaan lalu lintas yang terjadi di Indonesia pada tahun 2012 salah satunya disebabkan oleh faktor kondisi jalan. Meskipun demikian, pemeriksaan kondisi jalan yang dilakukan saat ini pada umumnya masih menggunakan metode pemeriksaan konvensional yang membutuhkan banyak tenaga kerja dan biaya serta membutuhkan waktu yang relatif lama sehingga dibutuhkan metode alternatif yang lebih hemat tenaga, biaya dan waktu pengerjaannya.

Di era digital saat ini, jumlah pengguna smartphone terus mengalami peningkatan dan diperkirakan



Gambar 6. Gambaran anomali pada segmen jalan menurun 2 dan segmen jalan III berdasarkan kepadatan penduduk di sekitar jalan

terdapat sekitar 3,8 milyar orang yang menggunakan smartphone pada tahun 2021 (Salsabila, Anwar, & Radhiah, 2021). Perkembangan teknologi telah memungkinkan smartphone untuk dapat digunakan pada berbagai kepentingan melalui fitur apps yang terinstall di dalamnya. Hal ini memungkinkan smartphone untuk digunakan juga dalam proses pemantauan dan pengumpulan data kondisi jalan misalnya melalui penggunaan aplikasi sensor accelerometer.

Analisis Dynamic Time Warping (DTW) berdasarkan topografi permukaan jalan dan kepadatan penduduk yang tinggal di sekitar jalan dilakukan dengan membandingkan kondisi permukaan jalan yang dievaluasi terhadap kondisi permukaan jalan ideal. Analisis DTW dapat memberikan informasi mengenai segmen jalan mana yang memiliki kondisi terbaik atau yang paling mendekati kondisi permukaan jalan ideal. Analisis DTW berdasarkan topografi permukaan jalan dan kepadatan penduduk di sekitarnya dilakukan dengan membandingkan rekaman permukaan jalan ideal terhadap rekaman pada kesembilan segmen permukaan jalan USAID yang telah dipartisi berdasarkan bentuk topografinya dan terhadap keempat segmen jalan yang dipartisi berdasarkan kategori kepadatan penduduknya.

Penelitian mengenai identifikasi kondisi permukaan jalan yang telah dilakukan menunjukkan bahwa bentuk topografi jalan menanjak dan menurun cenderung memiliki kondisi permukaan yang lebih buruk dibandingkan dengan kondisi jalan yang memiliki topografi yang mendatar. Kondisi ini akan berdampak terhadap kenyamanan dan keselamatan pengendara saat melalui jalan menanjak atau menurun.

Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini sejalan dengan penelitian Rianti & Farida (2022) yang menyimpulkan bahwa bentuk geometrik jalan berpengaruh terhadap kejadian kecelakaan lalu lintas. Kondisi jalan dengan topografi yang menanjak dan menurun serta tikungan yang tajam merupakan daerah rawan kecelakaan (Arianto & Heriwibowo, 2016). Hal ini juga didukung oleh penelitian Widiyanti (2016) yang menyimpulkan bahwa kondisi permukaan jalan yang tidak mulus seperti adanya lubang, atau geometrik yang kurang sempurna seperti derajat kemiringan yang terlalu kecil atau besar pada suatu belokan merupakan beberapa faktor-faktor yang menyebabkan kecelakaan lalu lintas. Disisi lain, kondisi jalan dengan topografi yang mendatar dan geometrik jalan yang normal cenderung tidak berbahaya (Mardiana, 2020).

Selain melihat pengaruh topografi permukaan jalan, penelitian ini juga mengevaluasi pengaruh kepadatan penduduk yang tinggal di sekitar jalan terhadap kondisi permukaan jalan di wilayah tersebut. Jumlah penduduk yang berada di sekitar jalan menjadi salah satu faktor yang diduga turut memengaruhi kondisi jalan. Menurut Ali & Abidin (2019), tingkat kenyamanan penggunaan jalan dipengaruhi secara signifikan oleh kepadatan penduduk dan kapasitas jalan. Ketika sebuah segmen jalan terletak pada daerah dengan kepadatan penduduk yang tinggi, maka volume lalu lintas pada jalan tersebut juga cenderung akan semakin besar. Volume lalu lintas yang besar akan berdampak terhadap kemampuan jalan

dalam menahan beban yang melintas di atasnya. Oleh karena itu, sering dijumpai kondisi permukaan jalan yang kurang baik pada daerah dengan penduduk yang padat. Akan tetapi, berdasarkan hasil penelitian ini diperoleh bahwa segmen jalan I dengan kepadatan penduduk yang paling tinggi justru memiliki kondisi permukaan jalan yang lebih baik daripada segmen jalan III dengan kepadatan penduduk yang lebih rendah. Meskipun terlihat bertolak belakang dengan hasil penelitian Ali & Abidin (2019), namun sebenarnya kedua penelitian tersebut masih sejalan karena rata-rata jumlah penduduk Kota Makassar untuk 10 desa yang dianalisis pada penelitian Ali & Abidin (2019) adalah sebanyak 19.583 jiwa. Sedangkan pada penelitian ini, rata-rata jumlah penduduk untuk 9 desa yang dilalui hanya sebanyak 766 jiwa. Dengan demikian, segmen jalan dengan kategori kepadatan penduduk yang tinggi (≥ 1.101 jiwa) pada penelitian ini masih tergolong rendah jika dibandingkan dengan kepadatan penduduk pada penelitian Ali & Abidin (2019). Selain itu, nilai rata-rata DTW berdasarkan kepadatan penduduk juga tidak terlalu berbeda antar tiap segmen jalannya. Selisih antara nilai average DTW distance tertinggi (segmen jalan III) dan terendah (segmen jalan IV) hanya sebesar 0,211 (1,793-1,582). Sedangkan selisih antara nilai average DTW distance tertinggi dan terendah berdasarkan topografi jalan dua kali lebih besar daripada nilai tersebut (0,446).

Fakta bahwa jalan USAID Aceh yang merupakan jalan nasional yang menghubungkan beberapa kabupaten/kota di wilayah pantai barat dan selatan Provinsi Aceh juga dapat membantu menjelaskan mengapa jalan di wilayah dengan kepadatan penduduk yang lebih rendah memiliki kondisi yang lebih buruk. Hal ini dikarenakan jalan di wilayah tersebut tidak hanya digunakan oleh penduduk sekitar, namun juga oleh masyarakat lainnya yang berpergian dari berbagai daerah di wilayah pantai barat-selatan ke Ibu kota Provinsi (Kota Banda Aceh) maupun sebaliknya. Sehingga efek dari faktor kepadatan penduduk di sekitar jalan dalam penelitian ini menjadi lebih sulit untuk diukur dan dijelaskan. Ditambah lagi, keberadaan pabrik semen PT. Solusi Bangun Andalas yang berada di daerah penelitian juga turut memengaruhi kondisi jalan USAID karena banyak truk pengangkut semen dengan kapasitas besar yang melalui jalan USAID tersebut untuk mendistribusikan semen ke berbagai wilayah di Provinsi Aceh. Selain itu, sering juga dijumpai truk pengangkut kelapa sawit dan truk pengangkut barang lainnya yang melintasi jalan USAID. Menurut Sinaga & Magdalena (2015), banyaknya kendaraan besar yang melebihi beban berat atau bertonase lebih membuat jalan menjadi berlubang dan rusak parah akibat tidak mampu menahan berat beban yang melebihi batas kapasitas berat beban jalan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode DTW dapat diterapkan dalam proses identifikasi kondisi permukaan jalan dengan cara membandingkan data real time kondisi permukaan

jalan yang direkam melalui sensor smartphone dengan data kondisi jalan ideal.

2. Dari 9 segmen jalan yang dipartisi berdasarkan topografi permukaannya, segmen jalan menurun dan menanjak memiliki kondisi permukaan yang lebih buruk dari pada segmen jalan yang mendatar, dimana segmen jalan menurun 2 merupakan segmen jalan dengan kondisi yang paling buruk dan memiliki 1 anomali sepanjang 3,6 meter.
3. Dari 4 segmen jalan yang dipartisi berdasarkan kepadatan penduduk di sekitar jalan, diketahui bahwa segmen jalan III yaitu mulai dari Desa Meunasah Mesjid hingga Desa Pulot memiliki kondisi permukaan jalan yang lebih buruk dari pada segmen jalan lainnya dengan 9 anomali yang terdeteksi. Meskipun demikian, efek dari faktor kepadatan penduduk pada penelitian ini masih belum dapat diukur secara objektif karena jalan USAID yang dievaluasi merupakan jalan nasional yang banyak dilalui oleh masyarakat dari berbagai kabupaten/kota yang berada di wilayah pantai barat dan selatan Provinsi Aceh dengan berbagai kepentingan.
4. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode DTW dan K-Means clustering berpotensi untuk digunakan sebagai metode alternatif dalam mengukur kondisi permukaan jalan yang lebih hemat tenaga, waktu dan biaya jika dibandingkan dengan pemeriksaan secara konvensional yang masih sering digunakan di Indonesia. Instansi atau dinas terkait yang berwenang dalam pembangunan infrastruktur jalan di Provinsi Aceh dapat menggunakan hasil penelitian ini sebagai salah satu referensi dalam proses pemantauan kondisi permukaan jalan terutama jalan USAID Aceh yang telah dibangun lembaga donor dengan biaya yang sangat besar.

Ucapan Terima Kasih

Dalam kesempatan kali ini tim penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Syiah Kuala yang telah membiayai penelitian ini melalui skema Penelitian Asisten Ahli (PAA) tahun 2022 [148/UN11/SPK/PNBP/2022], serta semua pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga tim penulis sampaikan kepada pengelola dan reviewer Jurnal Teknik Sipil yang memberikan kesempatan dan masukan berarti sehingga artikel ini dapat dipublikasikan.

Daftar Pustaka

- Ali, A. H., Atia, A., & Sami, M. (2017). *Recognizing Driving Behavior and Road Anomaly using Smartphone Sensors*. International Journal of Ambient Computing and Intelligence, 8(3), 1–10. <https://doi.org/10.4018/IJACI.2017070102>
- Ali, M. I., & Abidin, M. R. (2019). *Pengaruh Kepadatan Penduduk Terhadap Intensitas Kemacetan Lalu Lintas Di Kecamatan Rappocini Makassar*. Prosiding Seminar Nasional Lembaga Penelitian Universitas Negeri Makassar, 68–73.
- Allouch, A., Koubaa, A., Abbes, T., & Ammar, A. (2017). *RoadSense: Smartphone Application to Estimate Road Conditions Using Accelerometer and Gyroscope*. IEEE Sensors Journal, 17(13), 4231–4238. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2702739>
- Anwar, S. (2019). *Mengukur Peluang Kejadian Gempa Bumi dengan Lompatan Magnitudo di Wilayah Pulau Sumatera*. Jurnal Lingkungan Dan Bencana Geologi, 10(3), 159–170. <https://doi.org/10.34126/JLBG.V10I3.263>
- Anwar, S. (2022). *Earthquake behavior in Sumatra territory based on time and distance between consecutive large event*. In The 13th of Aceh International Workshop and Expo on Sustainable Tsunami Disaster Recovery (The 13th AIWEST-DR 2021) (Vol. 340, p. 01010). Banda Aceh: EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202234001010>
- Arianto, S. B., & Heriwibowo, D. (2016). *Evaluasi Kebutuhan Rambu Lalu Lintas Pada Ruas Jalan Perbatasan Antara Kabupaten Bantul-Gading di Gunungkidul, Yogyakarta*. Jurnal Penelitian Transportasi Darat, 18(1), 1–10. <https://doi.org/10.25104/JPTD.V18I1.107>
- DPU Provinsi Aceh. (2005). *Perbaikan dan Rekonstruksi Jalan dari Banda Aceh Sampai Meulaboh (Rencana Pengelolaan Lingkungan Hidup)*. Banda Aceh. Retrieved from https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/pdaci152.pdf
- Herawati, H. (2019). *Karakteristik Dan Penyebab Kecelakaan Lalu Lintas Di Indonesia Tahun 2012*. Warta Penelitian Perhubungan, 26(3), 133. <https://doi.org/10.25104/warlit.v26i3.875>
- Kim, T., & Ryu, S.-K. (2014). *Review and Analysis of Pothole Detection Methods*. Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences, 5(8), 603–608.
- Mardiana, T. S. (2020). *Analisis Kebutuhan Rambu dan Marka Jalan untuk Meningkatkan Keselamatan di Provinsi Bangka Belitung (Studi Kasus Ruas Jalan Provinsi di Kabupaten Bangka)*. Jurnal Penelitian Transportasi Darat, 22(2), 170–179. <https://doi.org/10.25104/JPTD.V22I2.1592>
- Nazamuddin, N. (2007). *Kebijakan Ekonomi Untuk Mitigasi Bencana dan Pemulihan Pascabencana*. In Kongres Ilmu Pengetahuan Wilayah Indonesia Bagian Barat (pp. 1–18). Palembang: Universitas Sriwijaya.
- Nishom, M. (2019). *Perbandingan Akurasi Euclidean Distance, Minkowski Distance, dan Manhattan*

- Distance pada Algoritma K-Means Clustering berbasis Chi-Square*. Jurnal Informatika: Jurnal Pengembangan IT, 4(1), 20–24. <https://doi.org/10.30591/jpit.v4i1.1253>
- Potochnik, A., Colombo, M., & Wright, C. (2018). *Statistics and Probability. In Recipes for Science*. New York City: Taylor & Francis Ltd.
- Rakhmat, L. A., Kusumawati, A., Frazila, R. B., & Hendarto, S. (2012). *Pengembangan Model Prediksi Kecelakaan Lalu Lintas pada Jalan Tol Purbaleunyi*. Jurnal Teknik Sipil, 19(3), 277–288. <https://doi.org/10.5614/jts.2012.19.3.8>
- Ramachandran, K. M., & Tsokos, C. P. (2009). *Mathematical Statistics with Applications*. London: Elsevier Academic Press.
- Rianti, A. M., & Farida, I. (2022). *Analisis Pengujian Kendaraan untuk Meminimalisir Resiko Kecelakaan Lalu Lintas*. Jurnal Konstruksi, 20(1), 151–160.
- Salsabila, I., Anwar, S., & Radhiah, R. (2021). *Perbandingan Kualitas Suara Smartphone Menggunakan Metode Dynamic Time Warping (DTW)*. Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem Dan Teknologi Informasi), 5(1), 82–90. <https://doi.org/10.29207/RESTI.V5I1.2764>
- Samsudin, I. (2019). *Analisa Faktor Penyebab Kecelakaan Pada Ruas Jalan Ir. H. Alala Kota Kendari Ditinjau dari Prasarana dan Geometrik Jalan*. Jurnal Penelitian Transportasi Darat, 21(1), 59–66. <https://doi.org/10.25104/JPTD.V21I1.1166>
- Saputra, A. D. (2017). *Studi Tingkat Kecelakaan Lalu Lintas Jalan di Indonesia Berdasarkan Data KNKT (Komite Nasional Keselamatan Transportasi) dari Tahun 2007-2016*. Warta Penelitian Perhubungan, 29(2), 179–190. <https://doi.org/10.25104/WARLIT.V29I2.557>
- Sattar, S., Li, S., & Chapman, M. (2018). *Road surface monitoring using smartphone sensors: A review*. Sensors, 18(11), 3845. <https://doi.org/10.3390/s18113845>
- Sazali, A., Setiadji, B. H., & Haryadi, B. (2019). *Aplikasi Model Rantai Markov Dalam Pengelolaan Jalan di Kabupaten Bangka Barat*. Rekayasa, 12(2), 141–150. <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v12i2.5907>
- Senin, P. (2008). *Dynamic Time Warping Algorithm Review*. Honolulu. Retrieved from http://seninp.github.io/assets/pubs/senin_dtw_litreview_2008.pdf.
- Shukla, S., & S, N. (2014). *A Review ON K-means DATA Clustering APPROACH*. International Journal of Information & Computation Technology, 4(17), 1847–1860.
- Sinaga, R., & Magdalena, M. (2015). *Evaluasi Jaringan Lintas Angkutan Barang di Bengkulu*. Jurnal Transportasi Multimoda, 13(4), 169–176. <https://doi.org/10.25104/MTM.V13I4.176>
- Widiyanti, D. (2016). *Kajian Daerah Rawan Kecelakaan (DRK) di Kabupaten Musi Banyuasin*. Jurnal Transportasi Multimoda, 14(2), 67–76. <https://doi.org/10.25104/MTM.V14I2.172>
- Yadav, M., & Alam, M. A. (2018). *Dynamic Time Warping (DTW) Algorithm In Speech: A Review*. International Journal of Research in Electronics and Computer Engineering, 6(1), 524–528.

