

Analisis *Radial Run Out* untuk Seleksi *Green Tire*: Implementasi *3-Pt Range*, *PCA*, dan *T-Squared* dengan R

Jukardi Kurniawan

Teknik Informatika S-2, Program Pascasarjana, Universitas Pamulang, Kota Tangerang Selatan, Banten
e-mail: r.djukardi.k@gmail.com

Abstrak—Kualitas akhir ban sangat ditentukan oleh konsistensi dimensi *Green Tire*, dengan parameter *Radial Run Out* (RRO) sebagai indikator kritis ketidakbulatan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengimplementasikan prosedur analisis statistik multivariat dengan pemrograman R untuk menyeleksi *Green Tire* berdasarkan karakteristik RRO. Metodologi yang diterapkan mengintegrasikan tiga teknik: (1) pra-pemrosesan data sirkular menggunakan metode *3-Point Range* untuk merangkum variasi maksimum pada setiap titik keliling ban, (2) reduksi dimensi melalui *Principal Component Analysis* (PCA) menggunakan algoritme berbasis dekomposisi nilai singular (SVD) guna mengekstrak fitur utama dari data rangkuman dan (3) pengujian multivariat dan perankingan dengan menghitung statistik *Hotelling's T-Squared* untuk setiap sampel. Nilai T^2 kemudian dinormalisasi menjadi *Severity Index* (skala 0-1) yang berfungsi sebagai dasar seleksi objektif. Implementasi alur kerja lengkap ini dengan R menghasilkan sistem analisis yang otomatis, terukur, dan dapat direproduksi. Hasil penerapan pada lima sampel uji menunjukkan kinerja metode melalui peringkat prioritas tindakan perbaikan sebagai berikut: Ban 1 ($T^2=41.46$, Indeks=1.000), Ban5 ($T^2=28.07$, Indeks=0.6328), Ban 2 ($T^2=20.92$, Indeks=0.4367), Ban 4 ($T^2=9.25$, Indeks=0.1166), dan Ban 3 ($T^2=4.99$, Indeks=0). Temuan ini membuktikan bahwa integrasi ketiga metode statistik dalam satu lingkungan R tidak hanya mampu mengidentifikasi outlier (Ban 1) secara tegas, tetapi juga memetakan spektrum penyimpangan kualitas secara kuantitatif. Penelitian ini menyajikan kerangka kerja komputasi yang siap pakai untuk mendukung keputusan inspeksi akhir di lini produksi, menawarkan solusi yang objektif, efisien, dan konsisten guna meningkatkan jaminan kualitas produk ban.

Kata Kunci—*Green Tire*, *Radial Run Out*, Statistik Multivariat, Pemrograman R, Kontrol Kualitas

I. PENDAHULUAN

Industri manufaktur ban beroperasi dalam lingkungan yang sangat kompetitif, di mana konsistensi kualitas dan efisiensi produksi menjadi penentu utama daya saing. (Weyssenhoff et al., 2019) menyatakan bahwa ban berfungsi sebagai antarmuka utama antara kendaraan dan permukaan jalan, sehingga ketidaksempurnaan geometris maupun kerusakan struktural pada ban secara langsung memengaruhi karakteristik dinamika kendaraan, termasuk stabilitas, kemampuan pengendalian, dan keselamatan operasional. Salah satu bentuk ketidaksempurnaan geometris yang berpengaruh signifikan adalah *Radial Run-Out* (RRO).

Dalam konteks manufaktur ban, (Moskwa et al., 2025) mengemukakan bahwa evaluasi keseragaman (uniformity) ban tidak hanya bergantung pada satu parameter, melainkan pada kombinasi berbagai parameter geometris dan gaya, seperti *radial run-out* (RRO), *lateral run-out* (LRO), *radial force variation* (RFV) beserta analisis harmoniknya, *lateral force variation* (LFV), serta *conicity* (CON). Di antara parameter geometris tersebut, RRO merupakan salah satu indikator paling kritis dalam menentukan kualitas ban (Kenny, 1989, sebagaimana dikutip dalam (Biantoro & Hernadewita, 2021)), karena merepresentasikan penyimpangan bentuk lingkaran luar ban terhadap sumbu putarnya.

Variasi RRO yang tidak terkendali berkontribusi secara langsung terhadap munculnya masalah *vibration*, *roughness*, dan *durability* pada produk akhir. Kondisi ini berdampak pada penurunan kenyamanan berkendara, ketidakpuasan konsumen, serta meningkatnya risiko recall. Oleh karena itu, inspeksi dan seleksi *green tire* yang akurat sebelum proses *curing* merupakan langkah strategis untuk mencegah pemborosan material dan energi, sekaligus mendukung prinsip *green manufacturing* dan *zero-defect production*.

Penelitian terdahulu umumnya menganalisis RRO menggunakan pendekatan statistik konvensional berbasis *single-point measurement*. Dalam literatur desain mekanik, *run-out* diperlakukan sebagai toleransi geometrik yang dievaluasi berdasarkan deviasi maksimum terhadap sumbu referensi melalui pengukuran kontak, misalnya dengan *dial indicator* (Budynas & Keith Nisbett, 2015). Pendekatan ini memiliki keterbatasan dalam menangkap variasi keseluruhan profil keliling serta keterkaitan antar titik pengukuran.

Data RRO yang diukur sepanjang sudut rotasi 0° – 360° secara inheren memiliki sifat sirkular. (Zulkipli et al., 2019) menegaskan bahwa data sirkular tidak dapat dianalisis secara tepat menggunakan statistik linear konvensional karena sifat periodik dan kontinuitas batasnya. Perlakuan data sirkular sebagai data linear berpotensi mendistorsi informasi geometris rotasional dan menghasilkan interpretasi yang tidak akurat.

Lebih lanjut digunakan *Principal Component Analysis* (PCA) merupakan metode statistik multivariat yang bertujuan untuk mereduksi dimensi data kompleks dengan mentransformasikan data dari ruang berdimensi tinggi ke dalam subruang berdimensi lebih rendah melalui pembentukan sekumpulan variabel baru yang saling tidak berkorelasi, yang dikenal sebagai *principal components*. Transformasi ini dirancang untuk mempertahankan variansi maksimum dari data asli, di mana komponen utama pertama (PC1) menangkap proporsi variasi terbesar, diikuti oleh komponen-komponen berikutnya secara berurutan dengan kontribusi variansi yang semakin kecil (Kini et al., 2024).

Secara umum, PCA dilakukan melalui beberapa tahapan utama, yaitu standarisasi data, perhitungan matriks kovarians, serta penentuan nilai eigen dan vektor eigen yang merepresentasikan arah dan besaran variansi data (Jewsbury & Johnson, 2025). Dalam konteks analisis *Radial Run Out* (RRO), komponen utama dengan variansi terbesar merepresentasikan faktor dominan yang berkontribusi terhadap ketidakseragaman radial ban. Dengan demikian, PCA memungkinkan kompleksitas data RRO direduksi secara signifikan, sekaligus mempertahankan informasi penting yang relevan untuk evaluasi kualitas dan pengendalian proses manufaktur.

Untuk mengukur tingkat penyimpangan menggunakan Hotelling's T-Squared (T^2) merupakan generalisasi multivariat dari uji-t univariat yang mengamati kondisi rata-rata multivariat. Metode ini mempertimbangkan kovarians antarvariabel sehingga mampu memberikan ukuran penyimpangan global yang lebih representatif dibandingkan pendekatan univariat.

Nilai T^2 yang besar mengindikasikan bahwa suatu pengamatan memiliki penyimpangan signifikan dari kondisi normal multivariat. Oleh karena itu, *Hotelling's T^2* banyak digunakan dalam multivariate process monitoring, *anomaly detection*, serta evaluasi kualitas berbasis data multivariat.

Berdasarkan kajian literatur tersebut, dapat diidentifikasi adanya celah penelitian yang mencakup kebutuhan akan sistem pengukuran RRO *green tire* yang otomatis, serta metode pengolahan data RRO sirkular dalam kerangka analisis statistik multivariat. Celah ini menjadi dasar pengembangan kerangka konseptual dan metodologis penelitian ini. Novelty penelitian diajukan melalui integrasi spesifik metode *3-Point Circular Range* yang dimodifikasi sebagai tahap pra-pemrosesan kritis untuk data sirkular. Modifikasi ini memungkinkan peringkasan variasi maksimum lokal yang melekat pada geometri lingkaran, sebelum dilakukan reduksi dimensi menggunakan *Principal Component Analysis* (PCA) dan evaluasi penyimpangan multivariat dengan *Hotelling's T-Squared* (T^2).

Seluruh alur analisis diimplementasikan menggunakan perangkat lunak R, yang menawarkan fleksibilitas, reproduisibilitas, serta potensi integrasi dengan model virtual berbasis data untuk inspeksi kualitas. Aspek ini masih relatif jarang dibahas dalam penelitian sejenis yang umumnya bergantung pada perangkat lunak statistik komersial tertutup.

Berdasarkan uraian tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah belum tersedianya alur analisis statistik multivariat yang terintegrasi dan komputasional untuk mengolah data *Radial Run-Out* (RRO) *green tire* yang bersifat sirkular secara akurat dan objektif menggunakan *3-Point Circular Range*, PCA, dan *Hotelling's T-Squared*. Pendekatan konvensional berbasis statistik linear dan pengukuran titik tunggal masih memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan variasi profil keliling ban serta keterkaitan multivariat antar titik pengukuran, sehingga berpotensi menghasilkan evaluasi kualitas yang kurang komprehensif.

Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah: (1) merancang dan mengimplementasikan alur analisis statistik multivariat terintegrasi—yang terdiri atas *3-Point Circular Range*, PCA, dan *Hotelling's T-Squared*—menggunakan perangkat lunak R untuk memproses data RRO *green tire*; serta (2) mengevaluasi efektivitas alur tersebut dalam melakukan seleksi dan perankingan *green tire* berdasarkan tingkat penyimpangan multivariatnya. Dengan demikian, penelitian ini mengisi celah metodologis antara teori statistik multivariat klasik dan kebutuhan praktis analisis data sirkular di industri manufaktur ban, sekaligus menyajikan solusi komputasi yang siap diimplementasikan.

II. METODE PENELITIAN

1. Tempat dan Objek Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada lingkungan industri manufaktur ban (PT XYZ), dengan objek penelitian berupa *green tire* pada tahap pra-vulkanisasi dengan metode kuantitatif. Data yang dianalisis adalah data *Radial Run-Out* (RRO) hasil pengukuran profil keliling *green tire* sebelum proses *curing*. Pengukuran dilakukan secara non-destruktif menggunakan sistem pengukuran RRO yang tersedia di lini inspeksi.

2. Jenis dan Sumber Data

Jenis data yang digunakan adalah data kuantitatif multivariat berbentuk profil RRO circular dengan rentang sudut 0° – 360° . Setiap *green tire* direpresentasikan oleh sejumlah titik pengukuran radial yang memiliki ketergantungan sirkular.

Sumber data terdiri dari:

- Data primer, berupa hasil pengukuran RRO *green tire* yang dikumpulkan langsung dari proses inspeksi.
- Data sekunder, berupa parameter proses dan batas spesifikasi internal yang digunakan sebagai referensi evaluasi hasil analisis.

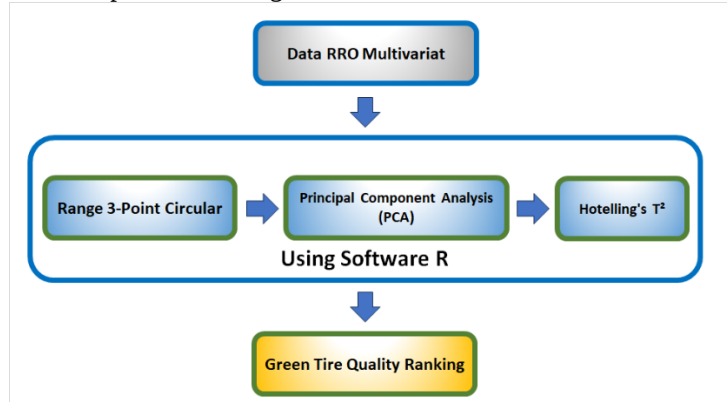
3. Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh *green tire* yang diproduksi pada lini produksi yang menjadi objek penelitian. Sampel diambil secara terbatas sesuai kebutuhan pengujian sistem, yaitu sejumlah ban yang mewakili kondisi produksi normal dan variasi kualitas yang umum terjadi.

Teknik sampling yang digunakan adalah purposive sampling, dengan pertimbangan bahwa sampel dipilih berdasarkan kesesuaian spesifikasi ban dan kesiapan fasilitas pengukuran.

4. Desain dan Tahapan Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain analisis rekayasa berbasis alur komputasional, di mana setiap tahapan dirancang saling terintegrasi untuk menghasilkan keputusan seleksi dan perankingan kualitas green tire. Alur metodologi penelitian secara ringkas ditunjukkan pada flowchart penelitian, sebagai berikut:



Gambar 1. Tahapan Penelitian dengan 3-Pt Range, PCA, dan T-Squared dengan R

4.1. Akuisisi dan Pra-pemrosesan Data dengan 3-Point Circular Range

Data RRO direkam sebagai fungsi sudut rotasi ban (0° – 360°) dan membentuk data sirkular. Untuk mengurangi pengaruh noise dan menangkap fluktuasi lokal, digunakan metode Range 3-point circular yang didefinisikan sebagai:

$$R_i = \max(x_{i-1}, x_i, x_{i+1}) - \min(x_{i-1}, x_i, x_{i+1}) \quad (2.1).$$

Dengan asumsi batas sirkular:

$$x_0 = x_n, \quad x_{n+1} = x_1$$

4.2. Standardisasi Data

Sebelum analisis multivariat, data distandarisasi menggunakan Z-score untuk menghilangkan pengaruh perbedaan skala antarvariabel dan melihat matrik korelasinya

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \mu_j}{\sigma_j} \quad (2.2)$$

4.3. Reduksi Dimensi Menggunakan Principal Component Analysis (PCA)

PCA digunakan untuk mereduksi dimensi data multivariat dan mengatasi multikolinearitas.

Tahapan PCA meliputi:

4.3.1. Perhitungan matrik kovarians:

$$Cov = \frac{z^T z}{n - 1} \quad (2.3).$$

4.3.2. Penentuan nilai eigenvalue (λ) dari matrik kovarians (Cov):

$$\det(Cov - \lambda I) = 0 \quad (2.4).$$

4.3.3. Hitung proporsi variansi dari akar-akar λ

$$Proporsi PC = \frac{\lambda_i}{\sum \lambda}$$

(2.5).

4.3.4. Normalisasi eigenvector dari matrik kovarians (Cov):

$$(Cov - \lambda I)v = 0$$

(2.6).

4.3.5. Transformasi data ke ruang komponen utama:

$$T = ZV$$

(2.7).

4.4. Evaluasi Penyimpangan Multivariat dengan Hotelling's T^2

Skor PCA yang diperoleh kemudian digunakan sebagai input dalam perhitungan Hotelling's T -Squared (T^2).

Nilai T^2 merepresentasikan jarak penyimpangan multivariat setiap green tire terhadap kondisi referensi proses.

$$T^2 = \sum_{j=1}^k \frac{T_j^2}{\lambda_j}$$

(2.8).

Nilai T^2 yang tinggi menunjukkan adanya penyimpangan signifikan terhadap kondisi normal kualitas green tire.

4.5. Perankingan Kualitas Green Tire

Nilai T^2 digunakan sebagai dasar untuk:

- Menilai tingkat penyimpangan multivariat setiap green tire,
- Melakukan perankingan kualitas green tire dari kondisi paling stabil hingga paling menyimpang,
- Memberikan rekomendasi seleksi untuk proses curing atau tindakan lanjutan.

Hasil akhir penelitian berupa daftar peringkat kualitas green tire yang bersifat kuantitatif dan objektif.

5. Perangkat Lunak dan Implementasi

Seluruh tahapan analisis diimplementasikan menggunakan perangkat lunak R. Pemilihan R didasarkan pada kemampuannya dalam pengolahan data statistik multivariat, fleksibilitas pemrograman, serta kemudahan reproduktibilitas analisis. Alur analitik dikembangkan dalam bentuk skrip terstruktur sehingga memungkinkan integrasi lanjutan dengan sistem inspeksi digital atau pengembangan sistem pendukung keputusan otomatis.

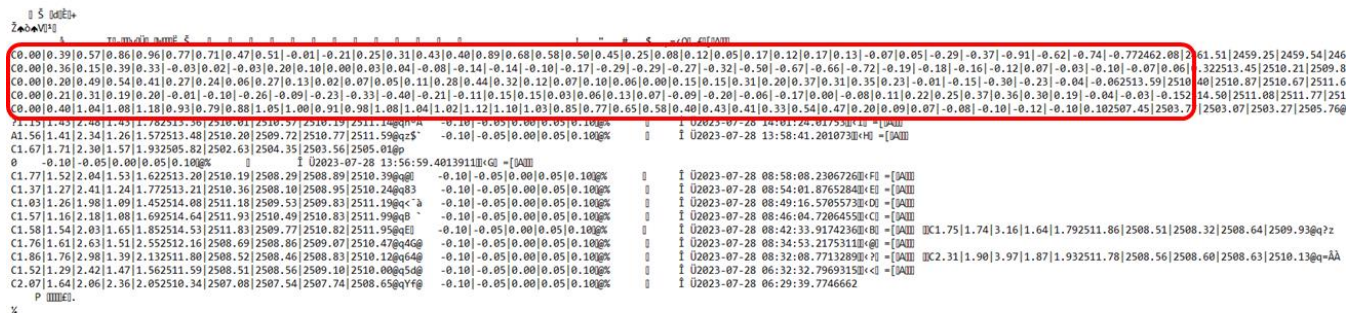
6. Visualisasi dan Interpretasi (Visualization and Interpretation)

Hasil analisis pada penelitian ini disajikan tidak hanya dalam bentuk nilai numerik, tetapi juga visualisasi grafis untuk memudahkan interpretasi dan pengambilan keputusan di lingkungan industri. Visualisasi digunakan sebagai alat bantu evaluasi kualitas green tire secara komprehensif dan operasional.

Diagram batang perankingan kualitas green tire: nilai Hotelling's T^2 digunakan sebagai dasar penyusunan diagram batang perankingan kualitas green tire, di mana green tire diurutkan berdasarkan tingkat penyimpangan multivariatnya. Visualisasi ini memberikan gambaran langsung mengenai prioritas seleksi, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai dasar keputusan inspeksi, sorting, atau tindakan korektif sebelum proses curing juga dapat digunakan untuk membuat master tire.

III. HASIL DAN DISKUSI

1. Akuisisi dan Pra-pemrosesan Data dengan 3-Point Circular Range



Data diatas diubah ke data csv;

0	0.39	0.57	0.86	0.96	0.77	0.71	0.47	0.51	-0.01	-0.21	0.25	0.31	0.43	0.4	0.89	0.68	0.58	0.5	0.45	0.25	0.08	0.12	0.05	0.17	0.12	0.17	0.13	-0.07	0.05	-0.29	-0.37	-0.91	-0.62	-0.74	-0.77
0	0.36	0.15	0.39	0.33	-0.03	0.02	-0.03	0.2	0.1	0	0.03	0.04	-0.08	-0.14	-0.14	-0.1	-0.17	-0.29	-0.29	-0.27	-0.32	-0.5	-0.67	-0.66	-0.72	-0.19	-0.18	-0.16	-0.12	0.07	-0.03	-0.1	-0.07	0.06	0.32
0	0.2	0.49	0.54	0.41	0.27	0.24	0.06	0.27	0.13	0.02	0.07	0.05	0.11	0.28	0.44	0.32	0.12	0.07	0.1	0.06	0	0.15	0.15	0.31	0.2	0.37	0.31	0.35	0.23	-0.01	-0.15	-0.3	-0.23	-0.04	-0.06
0	0.21	0.31	0.19	0.2	-0.01	-0.1	-0.26	-0.09	-0.23	-0.33	-0.4	-0.21	-0.11	0.15	0.15	0.03	0.06	0.13	0.07	-0.09	-0.2	-0.06	-0.17	0	-0.08	0.11	0.22	0.25	0.37	0.36	0.3	0.19	-0.04	-0.03	-0.15
0	0.4	1.04	1.08	1.18	0.93	0.79	0.88	1.05	1	0.91	0.98	1.08	1.04	1.02	1.12	1.1	1.03	0.85	0.77	0.65	0.58	0.4	0.43	0.41	0.33	0.54	0.47	0.2	0.09	0.07	-0.08	-0.1	-0.12	-0.1	0.1

Data 3-Pt range circular:

Tabel 1.

Data 3-Pt range circular

Ban/Titik	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27	T28	T29	T30	T31	T32	T33	T34	T35	T36
Ban 1	1.16	0.57	0.47	0.39	0.19	0.25	0.30	0.24	0.52	0.72	0.46	0.52	0.18	0.12	0.49	0.49	0.31	0.18	0.13	0.25	0.37	0.17	0.07	0.12	0.12	0.05	0.05	0.24	0.20	0.34	0.42	0.62	0.54	0.29	0.15	0.77
Ban 2	0.36	0.36	0.24	0.24	0.42	0.36	0.05	0.23	0.23	0.20	0.10	0.04	0.12	0.18	0.06	0.04	0.07	0.19	0.12	0.02	0.05	0.23	0.35	0.17	0.06	0.53	0.54	0.03	0.06	0.23	0.19	0.17	0.07	0.16	0.39	0.32
Ban 3	0.26	0.49	0.34	0.13	0.27	0.17	0.21	0.21	0.25	0.11	0.05	0.06	0.23	0.33	0.16	0.32	0.25	0.05	0.04	0.10	0.15	0.15	0.16	0.16	0.17	0.17	0.06	0.12	0.36	0.38	0.29	0.15	0.26	0.19	0.06	
Ban 4	0.36	0.31	0.12	0.12	0.21	0.30	0.25	0.17	0.17	0.17	0.19	0.29	0.36	0.26	0.12	0.12	0.10	0.07	0.22	0.27	0.14	0.14	0.14	0.17	0.17	0.17	0.19	0.30	0.14	0.15	0.12	0.07	0.17	0.34	0.23	0.12
Ban 5	0.40	1.04	0.68	0.14	0.25	0.39	0.14	0.26	0.17	0.14	0.09	0.17	0.10	0.06	0.10	0.10	0.09	0.25	0.26	0.20	0.19	0.25	0.18	0.03	0.10	0.21	0.21	0.34	0.38	0.13	0.17	0.17	0.04	0.22	0.22	
Statistik	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27	T28	T29	T30	T31	T32	T33	T34	T35	T36
Mean	0.5080	0.5540	0.3700	0.2040	0.2680	0.2940	0.1900	0.2220	0.2600	0.3100	0.1860	0.1940	0.1500	0.1900	0.2480	0.1820	0.1820	0.1940	0.1260	0.1460	0.1960	0.1880	0.1780	0.1300	0.1220	0.2300	0.2540	0.1620	0.1820	0.2360	0.2460	0.2840	0.2280	0.1920	0.2140	0.3000
Min	0.26	0.31	0.12	0.12	0.19	0.17	0.05	0.17	0.17	0.14	0.09	0.04	0.06	0.06	0.04	0.07	0.10	0.05	0.02	0.05	0.14	0.07	0.03	0.06	0.05	0.05	0.03	0.06	0.12	0.07	0.17	0.04	0.02	0.12	0.06	
Max	1.16	1.04	0.68	0.39	0.42	0.39	0.30	0.26	0.52	0.72	0.46	0.52	0.29	0.36	0.49	0.49	0.32	0.25	0.36	0.25	0.37	0.25	0.35	0.17	0.17	0.53	0.54	0.34	0.38	0.36	0.42	0.62	0.54	0.29	0.39	
Std Dev	0.3681	0.2906	0.2159	0.1146	0.0907	0.0879	0.0977	0.0342	0.1476	0.2332	0.1563	0.1943	0.0894	0.1145	0.1751	0.1775	0.1228	0.0619	0.0820	0.1076	0.1288	0.0492	0.1043	0.0596	0.0449	0.1789	0.1834	0.1285	0.1217	0.1128	0.1484	0.1949	0.2099	0.1076	0.1055	0.2790

- Menyoroti variasi local (local roughness)
- Meredam komponen low-frequency (global shape)
- Berguna untuk deteksi cacat local (local defects)
- Nilai tinggi = area dengan ketidakmulusan tinggi
- PCA pada data ini akan mengungkap pola-pola ketidakmulusan/local variation daripada bentuk global

2. Standardisasi Data

Tabel 2.

Data 3-Pt range circular Z-score

Ban/Titik	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27	T28	T29	T30	T31	T32	T33	T34	T35	T36
Ban 1	1.771111	0.055064	0.465241	1.623232	-0.86892	-0.50045	1.125618	0.526235	1.760942	1.75769	1.759028	1.676098	0.33541	-0.61139	1.381042	1.794833	1.042686	-0.22622	0.048759	0.966449	1.351316	-0.36639	-1.09588	-0.16704	-0.0445	-1.00623	-1.11241	0.606861	0.147059	0.932163	1.172309	1.740497	1.48622	0.911088	-0.60664	1.68445
Ban 2	-0.40203	-0.66766	-0.80221	0.314174	1.676516	0.750679	-1.4326	0.233882	-0.20919	-0.47162	-0.55022	-0.79178	-0.33541	-0.08737	-1.0735	-0.79983	-0.91235	-0.06463	-0.07314	-1.17089	-1.13386	0.653772	1.649733	0.671345	-1.37940	1.677051	1.559562	-1.027	-1.00216	-0.05318	-0.37729	-0.50496	-0.75264	-0.2975	1.666265	0.07169
Ban 3	-0.67687	-0.22026	-0.13897	-0.6458	0.022059	-1.41397	0.204653	-0.35002	-0.38864	-0.25725	-0.48624	-0.74036	-1.00633	0.349402	0.468228	-0.12392	1.12445	0.904075	-0.26942	-0.36033	-0.74555	-0.26636	0.503509	0.645489	-0.33541	-0.45805	-0.79359	-0.50929	1.099025	0.902802	0.680787	-0.37155	0.632182	-0.22748	-0.68017	
Ban 4	-0.40203	-0.83973	-1.1581	-0.73307	-0.63972	0.068244	0.613973	-1.52023	-0.60956	-0.30012	-0.10037	-0.02057	1.565240	1.485297	0.696521	-0.34932	-0.50505	-1.51309	-0.68262	0.687666	0.574680	-0.97574	-0.36448	0.671345	1.067960	-0.22261	0.250839	-0.17117	-0.26286	-1.02812	-1.16578	-0.50496	0.533515	0.353278	-0.89101	-0.5376
Ban 5	-0.29337	1.672584	1.458047	-0.55853	-0.19653	1.091897	-0.51164	1.11094	-0.60956	-0.72887	-0.6142	-0.12339	-0.53902	-1.13582	-0.84509	-0.46187	-0.74943	0.904075	1.633418	0.50181	-0.0466	1.268329	0.051933	-1.67836	-0.48949	-0.1118	-0.22993	1.384889	1.628451	-0.93949	-0.51204	-0.50496	-0.89554	-1.59905	0.056873	-0.3584

3. Reduksi Dimensi Menggunakan Principal Component Analysis (PCA)

Matrik Kovarian dengan (36x36):

Tabel 3.

Matrik Kovarian (36x36)

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27	T28	T29	T30	T31	T32	T33	T34	T35	T36	
T1	1	0.0903	0.3001	0.9106	-0.474	-0.146	0.5837	0.3399	0.9631	0.9527	0.9687	0.9575	0.2354	-0.387	0.696	0.9384	0.4698	-0.1598	0.1338	0.6056	0.7835	-0.1121	-0.544	-0.171	-0.0949	-0.5269	-0.5798	0.4212	0.1591	0.4006	0.5617	0.9187	0.8083	0.4086	-0.3126	0.9638	
T2	0.0903	1	0.9581	-0.074	-0.242	0.3877	-0.099	0.7712	-0.05	-0.125	-0.093	0.1487	-0.446	-0.8	-0.195	0.0444	-0.1026	0.6551	0.8902	0.3284	0.1088	0.6268	-0.1903	-0.9848	-0.2458	-0.2751	-0.4034	0.8385	0.9326	-0.216	0.0642	-0.0021	-0.3199	-0.7154	-0.0694	0.0216	
T3	0.3001	0.9581	1	0.1748	-0.239	0.2503	-0.023	0.8769	0.2039	0.1087	0.1119	0.3007	-0.53	-0.908	-0.018	0.2609	0.0962	0.7167	0.8329	0.3035	0.17	0.5909	-0.2466	-0.9349	-0.3118	-0.3328	-0.5065	0.7992	0.8457	0.037	0.3207	0.246	-0.1776	-0.548	-0.0351	0.2412	
T4	0.9106	-0.074	0.1748	1	-0.076	-0.081	0.2701	0.412	0.9501	0.8746	0.8512	0.7585	0.0634	-0.425	0.5063	0.7897	0.3672	-0.091	0.0606	0.2632	0.4809	0.0461	0.1833	0.0146	-0.3903	0.1659	-0.2674	0.1317	-0.1154	0.512	0.5892	0.8376	0.6313	0.4028	0.0769	0.9767	
T5	-0.474	-0.242	-0.239	-0.076	1	0.3494	-0.914	0.1709	-0.338	-0.493	-0.563	-0.687	-0.441	-0.084	-0.714	-0.63	-0.4825	0.2246	-0.0182	-0.8389	-0.86	0.5258	0.9701	0.2962	-0.7105	0.9588	0.8622	-0.6067	-0.4933	-0.0034	-0.1902	-0.4932	-0.678	-0.2943	0.9681	-0.2332	
T6	-0.146	0.3877	0.2503	-0.081	0.3494	1	-0.611	0.3791	-0.316	-0.422	-0.321	-0.131	0.124	-0.348	-0.769	-0.455	-0.9112	-0.0818	0.7411	0.1554	-0.122	0.8058	0.5329	-0.4772	-0.6668	0.5246	0.5322	0.3863	0.4125	-0.7868	-0.6958	-0.506	-0.4315	-0.8232	0.4695	-0.001	
T7	0.5837	-0.099	-0.023	0.2701	-0.914	-0.611	1	-0.329	0.5354	0.6976	0.7283	0.73	0.4748	0.2503	0.9159	0.7738	0.696	-0.3431	-0.3212	0.6823	0.8424	-0.7592	-0.9545	0.0558	0.7513	-0.921	-0.8258	0.2946	0.1261	0.297	0.3947	0.6813	0.8652	0.654	-0.9239	0.3677	
T8	0.3399	0.7712	0.8769	0.412	0.1709	0.3791	-0.329	1	0.3119	0.1379	0.1094	0.2127	-0.637	-0.996	-0.183	0.1968	-0.601	0.7157	0.7965	0.0231	-0.054	0.7904	0.1276	-0.7483	-0.7025	0.049	-0.177	0.5391	0.5571	0.1516	0.3614	0.2498	-0.2674	-0.5314	0.3921	0.406	
T9	0.9631	-0.05	0.2039	0.9501	-0.338	-0.316	0.5354	0.3119	1	0.9764	0.9501	0.8627	0.0965	-0.348	0.7416	0.9385	0.6014	-0.0793	-0.0413	0.3871	0.6351	-0.1824	-0.4645	0.0028	-0.1093	-0.4487	-0.5318	0.2016	-0.0487	0.6153	0.7176	0.9634	0.9179	0.5525	-0.2054	0.9473	
T10	0.9527	-0.125	0.0879	0.8746	-0.493	-0.422	0.6976	0.1379	0.9764	1	0.9861	0.9610	0.2361	-0.185	0.8526	0.975	0.668	-0.209	-0.1568	0.4831	0.7409	-0.368	-0.6086	0.072	-0.099	-0.5812	-0.6184	0.1918	-0.0608	0.5899	0.6932	0.9752	0.8889	-0.6597	-0.3922	0.9828	
T11	0.9687	-0.093	0.1119	0.8152	-0.563	-0.321	0.7283	0.1094	0.9501	0.9861	1	0.9529	0.3612	-0.162	0.8244	0.9652	0.5738	-0.303	-0.0893	0.6097	0.8313	-0.3525	-0.6419	0.1314	0.1153	-0.68	-0.6159	0.9524	0.0215	0.4048	0.5649	0.9371	0.9239	0.5999	-0.4536	0.9017	
T12	0.9575	0.1487	0.3007	0.7585	-0.687	-0.131	0.73	0.2127	0.8627	0.9610	0.9529	1	0.4024	-0.276	0.7906	0.9242	0.4352	-0.2696	-0.195	0.8	0.9272	-0.2173	-0.7096	-0.2481	0.075	-0.6869	-0.6839	0.5626	0.3058	0.2276	0.4027	0.8536	0.8642	0.3712	-0.3595	0.8647	
T13	0.2354	-0.446	-0.53	0.0634	-0.441	0.124	0.4748	-0.037	0.965	0.2361	0.3612	0.4024	1	0.6081	0.233	0.1716	-0.217	-0.962	-0.2521	-0.626	0.6273	-0.4659	-0.3029	0.302	0.3856	-0.2125	0.0229	0.0761	-0.1056	-0.4657	-0.4896	-0.0387	0.6151	0.304	-0.4901	0.1913	
T14	-0.387	-0.8	-0.908	-0.425	-0.084	-0.348	-0.2503	-0.996	-0.183	-0.1968	-0.601	-0.7157	0.7965	1	0.1185	-0.257	-0.016	-0.7059	-0.8041	-0.0954	-0.02	-0.7504	-0.0419	0.7809	0.6646	-0.0266	0.2573	-0.5965	-0.6047	-0.1587	-0.387	-0.2993	0.2091	0.5077	-0.3106	-0.421	
T15	0.696	-0.195	-0.018	0.5963	-0.714	-0.769	0.9159	-0.183	0.7416	0.8526	0.8244	0.7306	0.233	0.1185	1	0.8911	0.8863	-0.1721	-0.4288	0.4386	0.7035	-0.7289	-0.8423	-0.8428	-0.9795	-0.8172	-0.8015	0.0968	0.0877	0.4622	0.6998	0.8698	0.8703	0.8125	-0.7112	0.5285	
T16	0.9384	0.0444	0.2609	0.7897	-0.63	-0.455	0.7738	0.1968	0.9385	0.75	0.9652	0.9242	0.4352	0.716	-0.257	0.8911	1	0.7305	-0.0851	-0.0464	0.5658	0.791	-0.3656	-0.7412	-0.0874	0.1936	-0.7289	-0.7743	0.3482	0.1154	0.5746	0.7186	0.9824	0.684	0.5888	-0.5184	0.8312
T17	0.4698	-0.103	0.0962	0.3672	-0.482	-0.91	0.696	-0.031	0.6014	0.68	0.5788	0.4352	0.2127	-0.637	0.016	0.8863	0.7305	1	0.2323	-0.4508	-0.0613	0.3375	-0.6201	-0.6794	0.7143	-0.4975	-0.6889	-0.7611	-0.0684	-0.1475	0.8671	0.881	0.735	0.5551	0.78	-0.5007	0.316
T18	-0.1598	0.6551	0.7167	-0.091	0.2486	-0.082	-0.343	0.3717	-0.079	-0.201	-0.21	-0.3	-0.27	-0.962	-0.706	-0.712	-0.085	0.2323	1	0.4176	-0.4062	0.456	0.4878	0.1139	-0.5221	-0.3002	0.0135	-0.2154	0.818	0.3604	0.3752	0.4785	-0.0087	-0.5611	-0.3996	0.3071	-0.1679
T19	0.1338	0.8902	0.3284	0.1088	-0.6268	-0.1903	-0.9848	-0.2458	-0.2751	-0.4034	-0.8385	-0.9326	-0.216	0.0642	-0.0021	-0.3199	-0.7154	-0.0694	0.0216	1	0.3489	0.9928	0.84	0.0894	-0.3959	-0.5333	0.0733	-0.1768	0.8047	0.8471	-0.4505	-0.1446	-0.1145	-0.3838	-0.8431	0.031	0.6168
T20	0.6056	0.3284	0.1088	-0.6268	-0.1903	-0.9848	-0.2458	-0.2751	-0.4034	-0.8385	-0.9326	-0.216	0.0642	-0.0021	-0.3199	-0.7154	-0.0694	0.0216	0.3489	1	0.935	-0.1577	-0.7273	-0.4562	0.307	-0.309	-0.5995	0.787	0.6133	-0.327	-0.0967	-0.4043	0.6503	0.0171	-0.7249	0.9404	
T21	0.7835	0.0828	0.1017	0.2632	-0.489	-0.86	-0.122	0.8424	-0.054	0.6351	0.7409	0.8313	0.9272	0.6273	-0.02	0.7035	0.7911	0.3375	-0.4558	0.2928	0.935	1	-0.3765	-0.8201	-0.2248	0.3776	-0.7036	-0.6937	0.6033	0.3722	-0.0151	0.7013	0.6653	0.7188	0.3437	-0.7641	0.636
T22	-0.112	0.6268	0.5909	-0.0461	0.2508	0.8058	-0.759	0.9504	-0.474	-0.182	-0.368	-0.352	-0.213	-0.466	-0.75	-0.729	-0.366	-0.6201	0.4878	0.84	-0.1577	-0.377	1	0.5937	-0.6312	-0.8684	-0.5314	0.3863	0.5666	0.4475	-0.3531	-0.2342	-0.6393	-0.6272	-0.8589	-0.6905	0.0455
T23	-0.544	-0.19	-0.247	-0.183	0.9578	0.0379	0.554	0.1276	-0.646	-0.608	-0.642	-0.71	-0.303	-0.042	-0.842	-0.741	-0.6794	0.1139	0.0894	-0.7372	0.82	0.5937	1	0.2173	0.7188	0.9946	0.398	-0.5052	-0.3857	-0.2453	-0.1422	-0.6393	-0.7233	-0.4409	0.9419	-0.316	
T24	-0.173	-0.985	-0.935	-0.464	0.2962	-0.477	0.0558	-0.748	0.0028	0.0702	0.1334	-0.248	0.302	0.7809	0.1869	-0.087	0.1743	-0.5221	-0.3099	-0.4562	-0.225	0.6312	0.2173	1	0.2614	0.299	0.9395	-0.9075	-0.9651	0.3124	0.017	0.1094	0.2299	0.7127	0.014	-0.1068	
T25	-0.095	-0.246	-0.312	-0.39	-0.71	-0.667	0.7513	-0.703	-0.109	0.9978	0.1103	0.075	0.8356	0.6464	0.5753	0.1936	-0.4975	-0.3002	-0.5533	-0.307	0.3776	-0.8684	-0.7138	0.2614	1	-0.6841	-0.526	-0.0355	-0.3099	0.8049	0.054	0.1045	0.1465	0.5161	-0.8615	-0.325	
T26	-0.527	-0.275	-0.333	-0.166	0.5588	0.5246	-0.921	0.491	-0.449	-0.581	-0.608	-0.687	-0.213	0.0366	-0.817	-0.729	-0.6899	0.0135	0.0273	-0.3079	-0.784	0.5431	0.9946	0.2909	-0.6841	1	0.9648	-0.5458	-0.4454	-0.2626	-0.4422	-0.6235	-0.6631	-0.382	0.913	-0.2815	
T27	-0.58	-0.403	-0.506	-0.267	0.8622	0.5322	-0.826	-0.177	-0.532	-0.618	-0.616	-0.684	0.0229	0.2573	-0.801	-0.774	-0.617	-0.2154	-0.0798	-0.5995	-0.64	0.3863	0.938	0.9395	0.528	0.9648	1	-0.127	-0.4876	-0.411	-0.6202	-0.7127	-0.577	-0.3237	0.7859	-0.542	
T28	0.4212	0.8385	0.7992	0.1317	-0.607	0.3863	0.2846	0.5391	0.2016	0.1993	0.2954	0.5626	0.0761	-0.596	0.9968	0.3482	0.0684	0.1881	0.8047	0.787	0.6033	0.3566	-0.5052	-0.9075	-0.0335	-0.4458	-0.5721	1	0.9551	-0.3458	-0.0399	0.2282	0.1595	-0.4796	-0.4174	0.3067	
T29	0.1591	0.9326	0.8457	-0.115	-0.493	0.47125	0.1261	0.5571	-0.049	-0.061	0.0215	0.3058	-0.016	-0.605	-0.808	0.1154	-0.1475	0.3604	0.8471	0.6133	0.7272	-0.4475	-0.3857	-0.9651	-0.0329	-0.4454	-0.4876	0.9551	1	-0.407	-0.1074	0.0707	-0.1084	-0.6457	-0.3297	0.9474	
T30	0.4006	-0.216	0.037	0.512	-0.093	0.787	0.297	0.1516	0.6153	0.589	0.4843	0.276	-0.466	-0.159	0.6422	0.5746	0.8671	0.3752	-0.4505	-0.327	0.015	-0.3531	-0.2453	0.1324	0.8049	-0.2626	-0.4111	-0.3458	-0.407	1	0.9483	0.7013	0.3268	0.6724	-0.0088	0.3732	
T31	0.5617	0.0642	0.3207	0.5892	-0.19	-0.696	0.3947	0.614	0.7176	0.8839	0.5649	0.4207	-0.49	-0.387	0.8996	0.7186	0.881	0.4785	-0.1494	-0.0967	0.1073	-0.2342	-0.4142	0.017	0.054	-0.4482	-0.6202	-0.3099	-0.1074	0.9483	1	0.8157	0.9372				

4. Nilai eigenvalue (λ) dari matrik kovarians (Cov):

Tabel 4.
Nilai eigenvalue, Proporsi

Eigenvalue	Proporsi	Kumulatif
16.3499612866824+0i	0.454165591296735+0i	0.454165591296735+0i
9.61144351915069+0i	0.26698454219863+0i	0.721150133495365+0i
5.84860457441313+0i	0.162461238178143+0i	0.883611371673508+0i
4.18999162635536+0i	0.116388656287649+0i	1.00000002796116+0i
-1.00250685198344e-06+0i	-2.78474125550956e-08+0i	1.0000000011374+0i
-6.92507922837452e-09+0i	-1.92363311899292e-10+0i	0.99999999921381+0i
2.8642712682297e-09+0i	7.95630907841584e-11+0i	1.0000000000094+0i

5. Proporsi variansi dari akar-akar λ dan data T-score

Tabel 5.
Data T-score

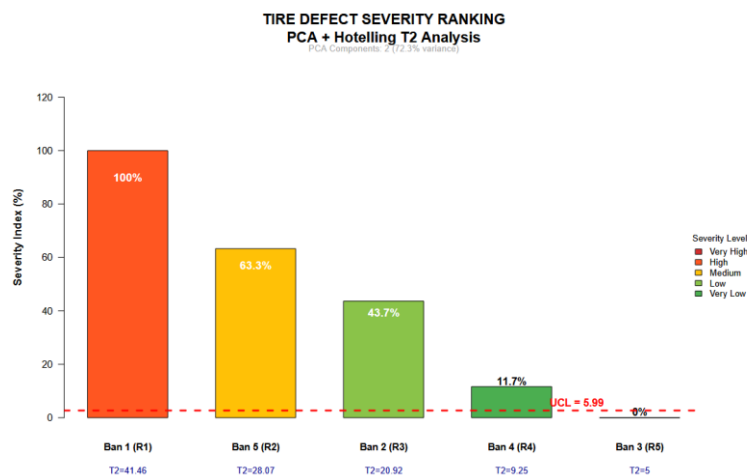
Variable	PC1 (45.4%)	PC2 (26.7%)	PC3 (16.2%)	PC4 (11.6%)
T1	0.844372	0.303717	-0.252752	0.361813
T2	-0.036173	0.929878	0.207184	-0.301818
T3	0.135639	0.944683	-0.025077	-0.29757
T4	0.622139	0.226102	-0.589105	0.46344
T5	-0.779615	-0.10014	-0.591628	0.179303
T6	-0.553281	0.537579	0.227633	0.594199
T7	0.915049	-0.188263	0.331065	-0.132805
T8	0.038438	0.006173	0.410343	0.047741

6. Menggunakan Software R didapat:

Tabel 6
Data Hotelling T-Square

Tire_ID	Tire_Name	Hotelling_T2	Severity_Percent	Percent_of_UCL	Above_UCL	Rank	Severity_Category
1	Ban 1	41.460741	100	692	TRUE	1	High
5	Ban 5	28.073901	63.28	468.56	TRUE	2	Medium
2	Ban 2	20.923605	43.67	349.22	TRUE	3	Low
4	Ban 4	9.249927	11.66	154.39	TRUE	4	Very Low
3	Ban 3	4.999396	0	83.44	FALSE	5	Very Low

7. Visualisasi menggunakan diagram batang



Gambar 2. Diagram Batang dari perankingan kualitas green tires

8. Interpretasinya

- Bar tertinggi → ban paling bermasalah
- Severity_Index ≈ 1 → defect paling parah di batch
- $0.7 - 1.0$ → *HIGH defect*
- $0.3 - 0.7$ → *MEDIUM*
- < 0.3 → *GOOD / STABLE*

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa analisis kualitas *green tire* berbasis *Radial Run-Out* (RRO) memerlukan pendekatan yang mampu merepresentasikan karakteristik variasi geometris secara menyeluruh. Hasil penelitian menegaskan bahwa pendekatan statistik multivariat yang mempertimbangkan sifat sirkular data RRO memberikan dasar evaluasi kualitas yang lebih objektif dan informatif dibandingkan metode konvensional. Kemampuan metode ini dalam membedakan tingkat penyimpangan kualitas memungkinkan proses seleksi *green tire* dilakukan secara lebih terstruktur dan berbasis data, sehingga berkontribusi pada peningkatan konsistensi kualitas produk serta efisiensi proses manufaktur.

Pentingnya hasil penelitian ini terletak pada tersedianya kerangka analisis yang siap diterapkan untuk mendukung pengambilan keputusan inspeksi di lini produksi. Visualisasi hasil dalam bentuk perankingan kualitas mempermudah interpretasi bagi operator maupun sistem inspeksi otomatis, serta membuka peluang integrasi dengan sistem produksi berbasis data. Untuk pengembangan selanjutnya, pendekatan ini dapat diperluas dengan melibatkan parameter kualitas tambahan dan jumlah data yang lebih besar, serta diintegrasikan dengan sistem inspeksi real-time atau model virtual berbasis data guna mendukung implementasi *smart manufacturing* di industri ban.

Untuk pengembangan selanjutnya, penelitian ini merekomendasikan penerapan metode pada jumlah sampel yang lebih besar dan pada kondisi proses yang bervariasi guna mengevaluasi keandalan dan kestabilan model dalam jangka panjang. Selain itu, integrasi parameter kualitas lain seperti LRO, RFV, dan LFV ke dalam kerangka analisis multivariat diharapkan dapat menghasilkan evaluasi keseragaman ban yang lebih holistik. Pengembangan lanjutan juga dapat diarahkan pada integrasi sistem ini dengan model virtual berbasis data atau sistem inspeksi otomatis di lini produksi, sehingga proses seleksi *green tire* dapat dilakukan secara *real-time* dan mendukung implementasi konsep *smart manufacturing*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Biantoro, B., & Hernadewita, H. (2021). ANALISA AKAR MASALAH RADIAL RUN OUT BAN MENGGUNAKAN DECISION TREE. Jurnal Muara Sains, Teknologi, Kedokteran Dan Ilmu Kesehatan, 5(2), 351. <https://doi.org/10.24912/jmstkik.v5i2.9417>
- [2] Budynas, R. G., & Keith Nisbett, J. (2015). Shigley's Mechanical Engineering Design 10th Edition.
- [3] Dinesh, M., Prakash, S., & Jadagerimath, A. N. (2023). AI-Based Principal Component Analysis (PCA) Approach for the Determination of Key Water Quality Parameters. International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, 11(3), 209–218.
- [4] Jewsbury, P. A., & Johnson, M. S. (2025). Principal component analysis on the covariance matrix for data reduction in large-scale assessments. Large-Scale Assessments in Education, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s40536-025-00264-9>
- [5] Kini, K. R., Harrou, F., Madakyaru, M., & Sun, Y. (2024). Enhanced data-driven monitoring of wastewater treatment plants using the Kolmogorov-Smirnov test. Environmental Science: Water Research and Technology, 10(6), 1464–1480. <https://doi.org/10.1039/d3ew00829k>
- [6] Moskwa, M., Gapiński, B., & Jakubowicz, M. (2025). Radial force variation parameter as a factor of tire uniformity. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, 73(2). <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.152609>
- [7] Suffeleers, J. (2010). Tyre non-uniformities and their effect on chassis vibrations. Eindhoven University of Technology.
- [8] Weyssenhoff, A., Opala, M., Koziak, S., & Melnik, R. (2019). Characteristics and investigation of selected manufacturing defects of passenger car tires. Transportation Research Procedia, 40, 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.020>
- [9] Zulkipli, N. S., Satari, S. Z., & Yusoff, W. N. S. W. (2019). DATA ANALYTICS AND APPLIED MATHEMATICS (DAAM) Descriptive analysis of circular data with outliers using Python programming language. <https://doi.org/10.15282/daam.v1i1.5085>