JPFS 9 (2) 2026 303-314

Jurnal Pendidikan Fisika dan Sains (JPFS)

Journal homepage: http:// journal.unucirebon.ac.id/index.php/jpfs

Analisis Gaya Drag dan Torsi Aerodinamik pada Cup Counter Anemometer di BMKG Serang

Muhammad Mahfuzh Habibi[1*], Alisya Aulia Putri[2], Yuvita Oktarisa[3], Akhmad Fadholi[4], Rudi Haryadi[5]

[1,2,3,5] Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Serang, Indonesia

[4] Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Stasiun Meteorologi Maritim Kelas 1 Merak

*E-mail: mhmmdmahfuzh@gmail.com

DOI: https://doi.org/10.52188/jpfs.v9i2.2549

Accepted: 16 Oktober 2026 Approved: 12 November 2026 Published: 23 November 2026

ABSTRAK

Ketepatan pengukuran kecepatan angin memegang peranan penting dalam analisis meteorologi, dan anemometer cup counter merupakan instrumen yang paling banyak digunakan. Akan tetapi, kajian aerodinamika pada perangkat ini umumnya masih mengasumsikan kerapatan udara bernilai konstan serta belum memasukkan fluktuasi data lapangan ke dalam pemodelan torsi penggerak rotor. Penelitian ini bertujuan menguji gaya drag dan mengestimasi torsi aerodinamik pada anemometer cup counter RM Young 03002 di Stasiun BMKG Serang. Pendekatan deskriptif kuantitatif dengan pemodelan matematika diterapkan terhadap 50.640 titik data operasional yang valid sepanjang tahun 2025. Kerapatan udara dihitung dari suhu dan tekanan melalui persamaan gas ideal, sementara torsi diestimasi dari selisih gaya drag antara sisi cekung dan sisi cembung cup. Hasil penelitian menunjukkan kecepatan angin berkisar 0,00–6,46 m/s dengan rata-rata 1,3145 m/s. Torsi rata-rata yang diestimasi sebesar 1.1639×10^{-4} Nm dan nilai maksimumnya 1.8869×10^{-3} Nm. Koefisien variasi kerapatan udara hanya 1,01%, jauh lebih rendah dibandingkan kecepatan angin (69,61%) dan torsi (135,02%), yang menunjukkan bahwa variasi torsi hampir sepenuhnya ditentukan oleh kecepatan angin. Torsi meningkat secara kuadratik terhadap kecepatan angin, mencerminkan konsistensi perhitungan. Nilai torsi tersebut merupakan hasil estimasi pemodelan matematis, bukan pengukuran langsung. Temuan ini menyediakan landasan teoretis bagi evaluasi kinerja, pemeliharaan, dan kalibrasi anemometer.

Kata kunci: Anemometer Cup Counter, Torsi Aerodinamik, Gaya Drag, Kecepatan Angin, Kerapatan Udara, Pemodelan Matematis, Data Operasional BMKG

ABSTRACT

The accuracy of wind speed measurement is crucial in meteorological analysis, with the cup counter anemometer serving as the primary instrument. However, aerodynamic studies on this device generally assume constant air density and have not yet integrated field data fluctuations into the modeling of rotor driving torque. This study aims to examine drag force and estimate the aerodynamic torque of the RM Young 03002 cup counter anemometer at the Serang Meteorological, Climatological, and Geophysical Agency Station. A descriptive quantitative method with mathematical modeling was applied to 50,640 valid operational data points from 2025. Air density was calculated from temperature and pressure using the ideal gas equation, while torque was estimated from the difference in drag force between the concave and convex sides of the cups. The results show that wind speed ranged from 0.00–6.46 m/s

with an average of 1.3145 m/s. The estimated average torque was 1.1639×10^{-4} Nm with a maximum of 1.8869×10^{-3} Nm. The coefficient of variation for air density was only 1.01%, far below that of wind speed (69.61%) and torque (135.02%), indicating that torque variation is almost entirely determined by wind speed. Torque increases quadratically with wind speed, reflecting the consistency of the calculation. These torque values are estimates from mathematical modeling, not direct measurements. These findings provide a theoretical basis for the performance evaluation, maintenance, and calibration of anemometers.

Keyword: Cup Counter Anemometer, Aerodynamic Torque, Drag Force, Wind Speed, Air Density, Mathematical Modeling, BMKG Operational Data

@2026 Pendidikan Fisika FKIP Universitas Nahdlatul Ulama Cirebon

PENDAHULUAN

Pengukuran kecepatan angin yang presisi merupakan kebutuhan esensial dalam analisis meteorologi, mulai dari prakiraan cuaca, pemodelan iklim, keselamatan penerbangan, hingga sistem peringatan dini dan mitigasi bencana (Pedersen & Dahlberg, 2024). Di Stasiun BMKG Serang, *cup counter* anemometer tipe RM Young 03002 digunakan sebagai salah satu instrumen pengukuran kecepatan angin yang bekerja berdasarkan prinsip aerodinamika fluida (R.M. Young Company, n.d.). Rotasi pada sumbu vertikal anemometer dipicu oleh aliran udara yang menumbuk rotor tiga (3-cup rotor), di mana perbedaan gaya hambat (*drag force*) antara permukaan cekung (*concave*) dan permukaan cembung (*convex*) menghasilkan torsi aerodinamik penggerak rotor. Besarnya gaya hambat aerodinamik bergantung pada massa jenis udara (ρ), luas penampang frontal (A), kecepatan aliran udara (v), dan koefisien hambat (C_d) (Pedersen & Dahlberg, 2024).

Pada *cup counter anemometer*, aliran angin yang mengenai cup menimbulkan gaya drag sehingga cup dapat berputar. Gaya tersebut kemudian menghasilkan torsi pada sumbu anemometer. Hubungan antara gaya *drag* dan torsi ini dapat dianalisis secara matematis untuk memahami prinsip kerja anemometer. Gaya *drag* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Setyawan et al., 2025):

$$F_d = \frac{1}{2}\rho v^2 C_d A$$

dengan F_d adalah gaya *drag* (N), ρ adalah massa jenis udara (kg/m³), C_d adalah koefisien *drag*, A adalah luas penampang cup (m²), dan v adalah kecepatan aliran udara (m/s).

Studi mengenai fenomena gaya hambat fluida serta perancangan instrumen pemantau cuaca berbasis sensor digital dan mikrokontroler telah berkembang pesat dalam lima tahun terakhir (Fitriyani & Hadi, 2023). Karakteristik aerodinamik fluida seperti penentuan koefisien drag (C_d) dan distribusi tekanan pada seksi uji terowongan angin subsonik dikaji secara kuantitatif untuk memahami pola hambatan aliran udara pada berbagai variabel kecepatan. Di sisi lain, perancangan anemometer dan sistem pemantauan cuaca digital berbasis mikrokontroler serta *Internet of Things* (IoT) dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi akuisisi data lapangan (Kumar & Patel, 2021; Isra & Mukhaiyar, 2022; Hidayat et al., 2024; Fadil et al., 2025). Meskipun studi aerodinamika dan perancangan instrumen telah banyak dilakukan, terdapat kesenjangan ilmiah (*research gap*) mendasar pada pemodelan fisika kuantitatif di bawah kondisi operasional lapangan riil. Sebagian besar studi aerodinamika dan pengujian laboratorium mengasumsikan nilai massa jenis udara konstan ($\rho \approx$ 1,2 kg/m³), padahal dalam kondisi atmosfer terbuka, nilai ρ berfluktuasi secara dinamis terhadap perubahan suhu lingkungan (T) dan tekanan udara (P) berdasarkan hukum gas ideal $\rho = \frac{P}{R_{sp}T}$ (Yang et al., 2024). Memperhitungkan variasi massa jenis udara secara dinamis sangat krusial dalam analisis kinerja anemometer karena gaya *drag* dan torsi aerodinamik berbanding lurus secara linier dengan massa jenis udara $F_d \propto dan\ \tau_{aero} \propto \rho$ Fluktuasi ρ akibat dinamika suhu dan tekanan udara lokal mengubah rasio antara gaya aerodinamik penggerak dan torsi penyediaan mekanis bantalan poros (τ_{fric}), yang pada akhirnya dapat menyebabkan pergeseran fungsi transfer atau konstanta kalibrasi instrumen ($v = Sebuah\ f + B$) serta menimbulkan bias pengukuran kecepatan angin di lapangan (Alfonso-Corcuera et al., 2024).

Kesenjangan lain terletak pada keterbatasan analisis yang sering kali memisahkan antara pemodelan aljabar fisika aerodinamika dengan fluktuasi data iklim mikro riil di lokasi pengamatan. Pada kondisi operasional di Stasiun BMKG Serang, dinamika atmosfer lokal menghasilkan fluktuasi harian pada suhu dan tekanan udara yang secara langsung mengubah nilai ρ. Karena gaya drag berbanding lurus dengan massa jenis udara ($F_d \propto \rho$), pengabaian fluktuasi ρ dapat menimbulkan deviasi pada perhitungan gaya hambat dan kalkulasi torsi penggerak rotor. Oleh sebab itu, evaluasi mekanis *cup counter* anemometer memerlukan integrasi data operasional sekunder dengan interval pencatatan setiap 10 menit ke dalam pemodelan aljabar fisika agar dinamika gaya drag dan pembentukan torsi aerodinamik dapat dipahami secara komprehensif pada kondisi nyata (Mangano et al., 2022; Pedersen & Dahlberg, 2024)

Penelitian ini bertujuan menganalisis prinsip gaya drag dan torsi aerodinamik pada mekanisme rotaasi *cup counter* anemometer RM Young 03002, menghitung nilai massa jenis udara (ρ) secara dinamis menggunakan persamaan gas ideal berdasarkan data operasional suhu dan tekanan udara, serta menganalisis besarnya torsi aerodinamik (τ_{aero}) yang dihasilkan berdasarkan data kecepatan angin, suhu, dan tekanan udara aktual di Stasiun BMKG Serang tahun 2025. Kebaruan penelitian ini terletak ada pendekatan pemodelan matematika fisika yang mengintegrasikan data operasional nyata BMKG per 10 menit dengan variasi harian massa jenis udara, tanpa perlu memodifikasi instrumen yang ada ataupun mengembangkan alat baru. Pendekatan ini membedakan penelitian ini dari studi berbasis IoT/mikrokontroler yang berfokus pada akuisisi data semata, sekaligus dari studi aerodinamika di laboratorium yang menggunakan kondisi atmosfer statis. Analisis deskriptif ini diharapkan memberikan sumbangan teoretis bagi pemahaman dinamika rotasi instrumen standar meteorologi, serta menjadi dasar evaluasi kinerja, pemeliharaan, dan kalibrasi *cup counter anemometer*. tanpa pembuatan alat baru maupun modifikasi fisik pada instrumen. Hasil analisis deskriptif ini diharapkan memberikan kontribusi teoritis bagi pemahaman dinamika rotasi instrumen meteorologi standar serta menjadi landasan evaluasi performa, pemeliharaan, dan kalibrasi *cup counter* anemometer.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif dengan pendekatan pemodelan matematika-fisika fluida, yang menggabungkan dua tahapan utama, yaitu pengumpulan data dan pemodelan matematika (Subhaktiyasa et al.,2023). Penelitian dilaksanakan di Stasiun BMKG Serang, Provinsi Banten, pada periode 24 Agustus 2026-27 November 2026. Perlu ditegaskan bahwa rentang waktu Agustus–November 2026 merupakan periode pelaksanaan penelitian, yang mencakup proses ekstraksi data, pembersihan (*data cleaning*), perumusan model aljabar, kalkulasi komputasional, serta analisis statistik. Sementara itu, data operasional iklim mikro yang diolah dan dianalisis adalah data sekunder beresolusi tinggi selama satu tahun penuh, yaitu periode 1 Januari 2025 hingga 31 Desember 2025 dengan interval pencatatan setiap 10 menit. Instrumen yang menjadi objek analisis adalah *cup counter* anemometer tipe RM Young 03002 (Wind Sentry Anemometer Model 03102). Alat ini mengukur kecepatan angin berdasarkan prinsip rotasi tiga mangkuk setengah bola (*hemispherical 3-cup rotor assembly*) yang terpasang simetris pada lengan radial mengelilingi poros vertikal. Berdasarkan *datasheet* teknis resmi pabrik, instrumen ini memiliki diameter mangkuk (D_{cup}) sebesar 40 mm (0,04 m), diameter rotor putar 12 cm (sehingga jari-jari rotasi lengan $R = 0{,}06$ m dari poros ke pusat mangkuk) (R.M. Young Company, n.d.).

Populasi penelitian ini mencakup seluruh data pencatatan kecepatan angin, suhu, dan tekanan udara yang diperoleh dari BMKG Serang sepanjang tahun 2025. Secara teoritis, pencatatan kontinu dengan interval 10 menit selama 365 hari menghasilkan total 52.560 titik data mentah (365 hari × 24 jam × 6 data/jam). Dari populasi tersebut, diperoleh sampel sebanyak 50.640 titik data valid (sekitar 96,3%) yang memenuhi kriteria kelayakan analisis statistik. Proses seleksi dan pembersihan data dilakukan berdasarkan penghapusan data tidak lengkap (*missing data*), yaitu sebanyak 1.920 titik data dieliminasi karena adanya kekosongan parameter pencatatan akibat *downtime* sistem *data logger*, gangguan transmisi telemetry, atau perawatan berkala instrumen di lapangan. Sementara data spesifikasi teknis alat seperti jari-jari rotasi, dan luas penampang cup diperoleh dari *datasheet* resmi pabrik (R.M. Young Company, n.d.). Pemodelan matematika kemudian digunakan untuk menurunkan persamaan torsi aerodinamik secara aljabar dari persamaan gaya *drag*, yang kemudian digunakan

sebagai dasar untuk melakukan perhitungan torsi aerodinamik pada data sampel (Pedersen & Dahlberg, 2022).

Variabel yang dikaji dalam penelitian ini meliputi kecepatan angin aktual (v_{aktual}, dalam m/s), suhu udara (T, dalam ℃), dan tekanan udara (P, dalam hPa), variabel terikat yang diperoleh sebagai data sekunder operasional langsung di BMKG Serang. Sementara jari-jari rotasi cup (r, dalam meter) dan luas penampang cup (A, dalam m²) yang diperoleh dari *datasheet* alat (R.M. Young Company, n.d.). Untuk massa jenis udara (ρ, dalam kg/m³) yang dihitung dari data sekunder operasional suhu dan tekanan udara BMKG Serang menggunakan persamaan gas ideal (Yang et al., 2024). Sedangkan koefisien *drag* pada sisi cekung dan cembung cup ($C_{d,cekung}$ dan $C_{d,cembung}$) yang dirujuk dari literatur mekanika fluida (ERAU, n.d.). Variabel tersebut menjadi masukan bagi perhitungan torsi aerodinamik (τ_{aero}, dalam Nm) sebagai variabel hasil utama penelitian (Pedersen & Dahlberg, 2024).

Massa jenis udara dinamis (ρ) dihitung untuk setiap titik data pada interval 10 menit dengan menggunakan Persamaan Gas Ideal (Persamaan 1)

$$\rho = \frac{P \cdot 100}{R_{sp} \cdot (T + 273{,}15)}$$

dengan keterangan ρ adalah massa jenis udara dinamis (kg/m³), P adalah tekanan udara atmosfer aktual (hPa, dikalikan 100 untuk konversi ke Pascal atau N/m²), T adalah suhu udara lingkungan (°C, ditambah 273,15 untuk konversi ke Kelvin K), dan R_{sp} adalah konstanta gas spesifik untuk udara kering (287,058 J/($kg \cdot K$)).

Luas penampang frontal mangkuk setengah bola (A) dihitung melalui persamaan yang digunakan untuk penentuan geometri mangkuk dan koefisien drag (C_d).

$$A = \frac{\pi}{4} D_{cup}^2 = \frac{\pi}{4} (0{,}04 \text{ m})^2 = 0{,}001256 \approx 1{,}256 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Nilai koefisien drag dirujuk dari karakteristik aerodinamika *bluff body* untuk geometri setengah bola (*hemispherical cup*) subsonik, yaitu koefisien drag permukaan cekung (*concave*, aliran menumbuk rongga dalam mangkuk) sebesar C_d cekung = 1,42 dan koefisien drag permukaan cembung (*convex*, aliran melewati punggung mangkuk yang aerodinamis) sebesar C_d cembung = 0,38.

Torsi aerodinamik penggerak rotor dihitung dengan mensubstitusikan ρ, v_{aktual}, dan parameter geometri ke dalam Persamaan (2) untuk memperoleh torsi aerodinamik bersih (τ_{aero}).

$$\tau_{aero} = \frac{1}{2} \rho v_{aktual}^2 \left(C_{d,cekung} - C_{d,cembung}\right) A \cdot R$$

Dengan τ_{aero} adalah torsi aerodinamik bersih penggerak rotor ($N \cdot m$), ρ adalah massa jenis udara dinamis hasil kalkulasi Persamaan (1) (kg/m³), v_{aktual} adalah kecepatan angin aktual terukur di lapangan (m/s), C_d cekung adalah koefisien drag permukaan cekung sebesar 1,42, C_d cembung adalah koefisien drag permukaan cembung sebesar 0,38, A adalah luas penampang frontal mangkuk sebesar 0,001257 m², dan R adalah radius rotasi lengan dari sumbu poros ke pusat mangkuk sebesar 0,038 m.

Data dikumpulkan melalui tiga teknik. Pertama, studi dokumentasi spesifikasi teknis alat, yaitu penelusuran *datasheet* resmi pabrik *cup anemometer* yang digunakan RM Young 03002 untuk memperoleh data jumlah cup, diameter cup, panjang lengan/radius rotasi (R.M. Young Company, n.d.). Kedua, pengumpulan data sekunder operasional, yaitu data kecepatan angin aktual yang diperoleh langsung dari sistem pencatatan BMKG Serang, dengan interval pencatatan setiap 10 menit sepanjang tahun 2025. Ketiga, data kondisi lingkungan berupa suhu dan tekanan udara pada resolusi waktu yang sama, yang diperoleh sebagai data sekunder operasional dari BMKG Serang dan digunakan untuk menghitung massa jenis udara (ρ) melalui persamaan gas ideal (Yang et al., 2024).

Pengolahan dan analisis data dilakukan menggunakan tiga program komputer, yaitu Microsoft Exel, IBM SPSS Statistics, dan Python. Analisis data dilakukan secara bertahap. Pertama, menggunakan Microsoft Exel untuk menghitung massa jenis udara (ρ) untuk setiap titik data

berdasarkan data suhu dan tekanan udara aktual pada waktu yang sama melalui persamaan gas ideal (Yang et al., 2024). Kemudian dilanjutkan dengan menghitung torsi aerodinamik (τ_{aero}) untuk setiap titik data dengan mensubtitusikan ρ, v_{aktual}, serta parameter tetap ($A, r, C_{d\ cekung} - C_{d\ cembung}$) ke dalam persamaan torsi aerodinamik (Pedersen & Dahlberg, 2024). Selanjutnya, dilakukan analisis statistik deskriptif yang meliputi nilai rata-rata, minimum, maksimum, dan simpangan baku untuk variabel torsi aerodinamik dan massa jenis udara selama periode pengamatan menggunakan IBM SPSS Statistics (Subhaktiyasa et al.,2023). Kemudian visualisasi data berupa tabel dan grafik dibuat menggunakan Python untuk memudahkan interpretasi karakteristik torsi pada kondisi operasional aktual di BMKG Serang.

HASIL

Hasil penelitian ini didapat melalui perhitungan dari spesifikasi teknis resmi cup anemometer RM Young 03002 (Wind Sentry Anemometer Model 03102) yang digunakan di BMKG Serang, dan dihubungkan dengan nilai koefisien *drag hemisphere* dari literatur mekanika fluida/aerodinamika (ERAU, n.d.). Ringkasan spesifikasi *cup counter* anemometer disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi cup counter anemometer

Parameter	Nilai	Sumber
Jumlah cup	3 buah	Datasheet pabrik
Diameter cup	40 mm (0,04 m)	Datasheet pabrik
Diameter roda cup	12 cm (0,12 m)	Datasheet pabrik
Jari-jari rotasi (r)	6 cm (0,06 m)	Diturunkan dari datasheet
Luas penampang cup (A)	$\pi(0{,}02)^2 \approx 1{,}256 \times 10^{-3}$ m^2	Dihitung dari diameter cup
Koefisien drag cekung ($C_{d\ cekung}$)	1,42	ERAU (n.d.), tabel drag coefficient hemisphere
Koefisien drag cembung ($C_{d\ cembung}$)	0,38	ERAU (n.d.), tabel drag coefficient hemisphere

Jari-jari rotasi diperoleh dari setengah diameter roda cup, yaitu $0{,}12 \div 2 = 0{,}06m$, sedangkan luas penampang satu cup dihitung dari diameter cup 40 mm sebagai $\pi(0{,}02)^2 \approx 1{,}256 \times 10^{-3}$ m^2. Jumlah cup, ukuran cup, dan diameter roda cup bersumber dari manual resmi pabrik (R. M. Young Company, n.d.). Dengan selisih koefisien *drag* sebesar $1{,}42 - 0{,}38 = 1{,}04$, bagian persamaan yang bernilai tetap, yaitu $\frac{1}{2}\, A\, r\, (C_{d\ cekung} - C_{d\ cembung})$, bernilai $3{,}92 \times 10^{-5}$ m^3. Persamaan torsi aerodinamik untuk alat ini menjadi $\tau_{aero} = 3{,}92 \times 10^{-5}\, \rho v^2$, dengan τ_{aero} dalam Nm, ρ dalam kg/m^3, dan v dalam m/s.

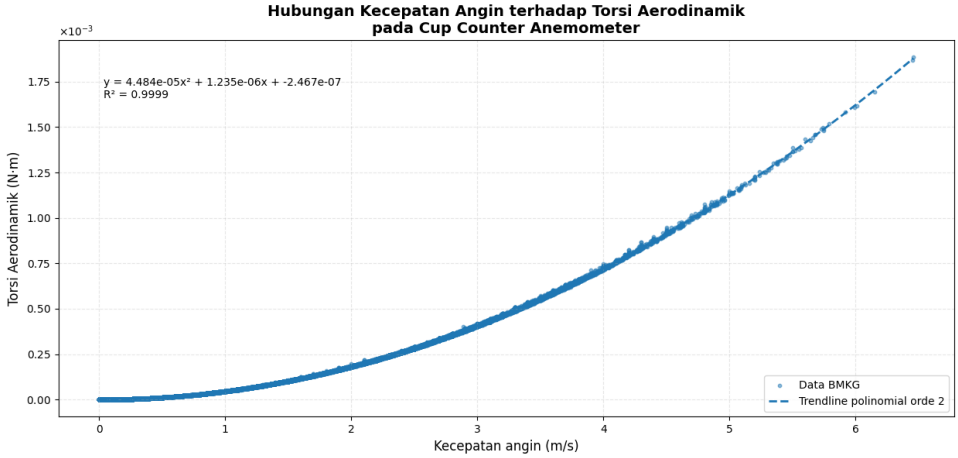
Dengan mensubstitusikan nilai-nilai pada Tabel 1 ke persamaan torsi aerodinamik, diperoleh gambaran torsi aerodinamik pada beberapa kondisi kecepatan angin yang disajikan pada Tabel 2:

Tabel 2. Torsi aerodinamik pada beberapa kondisi kecepatan angin

Kecepatan (m/s)	Torsi Aerodinamik (Nm)
2,1	0,00020337

1,6	0,000117961
0,9	0,000037293
1,2	0,000066271
1,4	0,000090163

Berdasarkan data pada Tabel 2, torsi aerodinamik meningkat secara kuadratik terhadap kecepatan angin, sesuai dengan bentuk persamaan gaya drag (NASA Glenn Research Center, 2023). Pada kecepatan angin rendah, torsi aerodinamik yang dihasilkan berada pada orde yang sangat kecil (10^4 sampai 10^6 Nm). Grafik berikut disajikan untuk melihat hubungan kecepatan angin terhadap torsi aerodinamik pada *cup counter* anemometer.



Gambar 1. Hubungan kecepatan angin terhadap torsi aerodinamik pada cup counter anemometer

Berdasarkan Gambar 1, titik-titik data menunjukan hubungan yang meningkat dan melengkung ke atas antara kecepatan angin dan torsi aerodinamik. Pada kecepatan angin di bawah sekitar 2 m/s, kenaikan torsi relatif landai, kemudian menjadi semakin curam seiring bertambahnya kecepatan angin. Garis tren polinomial orde 2 menghasilkan persamaan $y = 4{,}484 \times 10^{-5}x^2 + 1{,}235 \times 10^{-6}x - 2{,}467 \times 10^{-7}$ dengan $R^2 = 0{,}9999$. Dalam persamaan tersebut menyatakan kecepatan angin (m/s), sedangkan y menyatakan torsi aerodinamik (Nm). Koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9999 menunjukkan bahwa sekitar 99,99% variasi nilai torsi pada data yang diplot dapat dijelaskan oleh model polinomial orde dua. Koefisien x^2 yang positif menunjukkan pola kenaikan kuadratik, sesuai dengan hubungan torsi aerodinamik terhadap kuadrat kecepatan angin pada model yang digunakan. Namun, karena nilai torsi pada grafik dihitung dari persamaan teoretis, nilai R^2 tersebut menunjukkan kesesuaian model terhadap hasil perhitungan, bukan validasi independen kinerja alat. Pembuktian kinerja alat tetap memerlukan pengukuran langsung.

Sebelum dilakukan analisis statistik deskriptif, tahap pembersihan data (*data cleaning*) dilakukan terhadap seluruh data operasional. Baris data yang mengalami kekosongan pencatatan suhu atau tekanan yang menghasilkan nilai massa jenis udara 0,00 kg/m^3 dieliminasi. Pembersihan ini untuk memastikan seluruh estimator statistik mencerminkan kondisi meteorologis aktual di lapangan

Tabel 3. Analisis deskriptif kecepatan angin aktual, massa jenis udara, dan torsi aerodinamik dengan SPSS

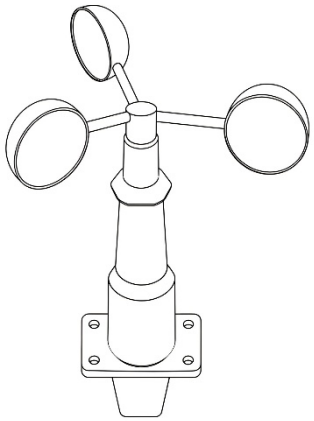
Variabel	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation

Kecepatan angin (m/s)	50640	0,00	6,46	1,3145	0,91501
Torsi aerodinamik (Nm)	50640	0,0000	0,0018	0,0001163	0,0001571
Massa jenis udara (kg/m^3)	50640	1,0517	1,2566	1,1661	0,0118

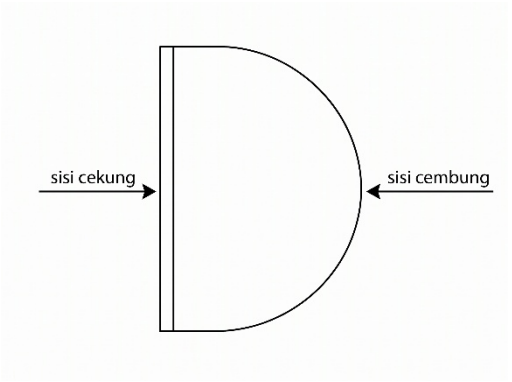
Berdasarkan Tabel 3 didapat hasil analisis deskriptif menggunakan IBM SPSS Statistics terhadap 50.640 data sampel yang valid setelah tahap pembersihan data. Terdapat selisih sebanyak 1.920 pengamatan dari potensi total teoretis 52.560 data satu tahun (berdasarkan interval pengamatan 10 menit, $6 \times 24 \times 365$) yang disebabkan oleh penghapusan data kosong (*missing values*), serta pembuangan baris data bernilai nol yang tidak valid. Kecepatan angin aktual tercatat berkisar dari 0,00 m/s hingga 6,46 m/s dengan nilai rata-rata 1,3145 m/s dan simpangan baku 0,91501 m/s.

Torsi aerodinamik memiliki nilai minimum 0,0000 Nm dan maksimum 0,0018 Nm, dengan rata-rata 0,0001163 Nm serta simpangan baku 0,0001571 Nm. Nilai maksimum torsi sekitar 16,2 kali nilai rata-ratanya. Sementara itu, massa jenis udara memiliki rentang 1,0517 hingga 1,2566 kg/m³, dengan nilai rata-rata 1,1661 kg/m³ dan simpangan baku 0,0118 kg/m³. Koefisien variasi yang diperoleh sebesar 69,61% untuk kecepatan angin, 135,02% untuk torsi aerodinamik, dan 1,01% untuk massa jenis udara. Hasil ini menunjukkan bahwa massa jenis udara memiliki variasi relatif yang jauh lebih kecil dibandingkan kecepatan angin dan torsi aerodinamik selama periode pengamatan.

PEMBAHASAN



Gambar 2. Wind sentry anemometer model 03102



Gambar 3. *Cup counter* anemometer

Berdasarkan Gambar 2, ditunjukkan *Wind Sentry Anemometer model 03102* yang memiliki tiga cup berbentuk setengah bola (*hemisphere*) pada lengan radial yang berputar mengelilingi poros vertikal. Sedangkan pada Gambar, menunjukkan penampang satu cup beserta orientasi kedua sisinya, yaitu sisi cekung (*concave*) yang berupa sisi terbuka menghadap datangnya aliran udara, dan sisi cembung (*convex*) yang berupa sisi bulat. Perbedaan bentuk aerodinamis kedua sisi ini menyebabkan koefisien *drag* keduanya berbeda, dan perbedaan itulah yang menjadi dasar fisik penurunan persamaan torsi aerodinamik.

Gaya drag pada satu cup akibat aliran udara dapat dinyatakan sebagai:

$$F_d = \frac{1}{2}\rho v^2 C_d A$$

dengan F_d sebagai gaya drag (N), ρ sebagai massa jenis udara (kg/m³), v sebagai kecepatan angin (m/s), C_d sebagai koefisien drag, dan A sebagai luas penampang cup (m²) (Setyawan et al., 2025).

Pada *cup counter anemometer*, cup yang menerima aliran udara pada sisi cekung mempunyai koefisien *drag* lebih besar daripada cup pada sisi berlawanan yang menerima aliran pada sisi cembung. Oleh karena itu, gaya *drag* pada kedua sisi dapat ditulis sebagai:

$$F_{d\ cekung} = \frac{1}{2}\rho v^2 C_{d\ cekung}\, A$$

$$F_{d\ cembung} = \frac{1}{2}\rho v^2 C_{d\ cembung}\, A$$

Karena:

$$C_{d\ cekung} > C_{d\ cembung}$$

Maka:

$$F_{d\ cekung} > F_{d\ cembung}$$

Perbedaan gaya *drag* tersebut menghasilkan resultan gaya tangensial yang menimbulkan torsi aerodinamik dan mendorong rotor untuk berputar (Pedersen & Dahlberg, 2024).

Torsi merupakan hasil kali gaya tangensial dengan lengan momennya. Dengan $r$sebagai jarak dari sumbu rotasi ke pusat cup, torsi masing-masing gaya drag dapat ditulis sebagai:

$$\tau_{cekung} = F_{d\ cekung} \times r$$

$$\tau_{cembung} = F_{d\ cembung} \times r$$

Karena kedua gaya menghasilkan putaran yang berlawanan, torsi aerodinamik merupakan selisih kedua torsi tersebut:

$$\tau_{aero} = \tau_{cekung} - \tau_{cembung}$$

$$\tau_{aero} = (F_{d\ cekung} - F_{d\ cembung}) \times r$$

Dengan mensubstitusikan persamaan gaya drag pada sisi cekung dan cembung, diperoleh:

$$\tau_{aero} = \left(\frac{1}{2}\rho v^2 C_{d\ cekung}\, A - \frac{1}{2}\rho v^2 C_{d\ cembung}\, A\right) \times r$$

Keluarkan faktor yang sama sehingga diperoleh:

$$\tau_{aero} = \frac{1}{2}\rho v^2 A\left(C_{d\ cekung} - C_{d\ cembung}\right) \times r$$

$$\tau_{aero} = \frac{1}{2}\rho v^2 Ar\left(C_{d\ cekung} - C_{d\ cembung}\right)$$

Persamaan ini digunakan untuk menghitung estimasi torsi aerodinamik akibat perbedaan gaya drag antara sisi cekung dan sisi cembung cup.

Persamaan torsi aerodinamik tersebut memperlihatkan bahwa torsi bergantung pada massa jenis udara, kuadrat kecepatan angin, luas penampang cup, jari-jari rotasi, dan selisih koefisien drag kedua sisi. Dengan parameter alat yang tetap, perubahan torsi hanya berasal dari perubahan massa jenis udara dan kecepatan angin. Hasil pada Tabel 3 menunjukkan bahwa kedua variabel itu berbeda jauh tingkat variasinya, koefisien variasi kecepatan angin 69,6%, sedangkan massa jenis udara 1,0%. Perbandingan koefisien variasi tersebut menunjukkan bahwa variasi relatif kecepatan angin lebih besar daripada variasi relatif massa jenis udara pada data yang dianalisis.

Pengaruh massa jenis udara yang jauh lebih kecil daripada pengaruh kecepatan angin sejalan dengan kajian terdahulu. Alfonso-Corcuera et al. (2024) menyebut variasi massa jenis udara sebagai efek orde kedua selama anemometer dipakai pada ketinggian yang tidak jauh dari tempat kalibrasinya, sedangkan Pindado et al. (2012) menunjukkan bahwa konstanta kalibrasi anemometer berubah secara linear terhadap massa jenis udara. Dalam penelitian ini, massa jenis udara dihitung dari suhu dan tekanan dengan persamaan gas ideal untuk udara kering, sehingga pengaruh kelembapan tidak ikut diperhitungkan.

Nilai koefisien drag yang digunakan (cekung 1,42 dan cembung 0,38) berasal dari tabel hemisphere generik (ERAU, n.d.) dan belum tentu sama dengan geometri cup RM Young model 03102. Koefisien drag cup juga bergantung pada bilangan Reynolds. Hubbard dan Brescoll (1934) melaporkan koefisien gaya normal cup setengah bola tunggal berdiameter 15,5 cm sebesar 1,39–1,60 untuk sisi cekung dan 0,43–0,54 untuk sisi cembung pada bilangan Reynolds $4{,}7 \times 10^4$ sampai $1{,}9 \times 10^5$. Nilai yang digunakan dalam penelitian ini berada pada kisaran yang sama, dengan sisi cembung sedikit lebih rendah, dan selisih koefisien kedua sisi pada pengujian tersebut berkisar 0,85–1,16 dibandingkan 1,04 pada penelitian ini. Namun, bilangan Reynolds cup berdiameter 40 mm pada kecepatan angin 1–10 m/s berada pada orde 10^3–10^4, lebih rendah daripada rentang pengujian tersebut, sehingga koefisien drag yang tetap merupakan penyederhanaan.

Karena torsi pada Persamaan di atas sebanding dengan selisih koefisien drag, galat pada koefisien tidak hanya berpindah ke hasil, tetapi dapat membesar. Selisih 1,04 diperoleh dari dua nilai yang masing-masing berasal dari tabel generik, sehingga ketidaktepatan salah satunya langsung mengubah estimasi torsi secara proporsional. Jika selisih koefisien pada pengujian Hubbard dan Brescoll (1934) sebesar 0,85–1,16 dipakai sebagai pembanding, estimasi torsi akan berubah sekitar −18% sampai +12% dari nilai yang diperoleh dengan selisih 1,04, pada parameter lain yang sama. Rentang ini hanya ilustrasi sensitivitas, bukan interval ketidakpastian hasil. Selain itu, koefisien tersebut berasal dari cup tunggal pada aliran seragam, sedangkan cup pada rotor tiga cup terpasang pada lengan dan saling berdekatan, serta membentuk sudut terhadap arah angin yang berubah selama rotor berputar. Hubbard dan Brescoll (1934) melaporkan bahwa keberadaan cup lain di sekitarnya meningkatkan koefisien drag dan koefisien gaya normal sebuah cup, dan Pindado et al. (2012) menunjukkan bahwa wake dari cup di hulu memengaruhi gaya pada cup berikutnya secara kuat pada rentang sudut tertentu, serta bahwa perbedaan geometri cup (bentuk tepi dan sudut kerucut) membuat koefisien gaya normal menyimpang dari data terdahulu. Model dengan dua kondisi ideal (sisi cekung dan sisi cembung menghadap angin) yang dipakai di sini tidak menangkap interferensi aliran antar cup, pengaruh lengan, maupun perubahan sudut datang aliran. Pindado et al. (2014) juga menyatakan bahwa model tiga cup, yang mengintegrasikan gaya sepanjang satu putaran, lebih akurat daripada model dua cup yang hanya memakai posisi 0° dan 180°. Karena bilangan Reynolds berubah menurut kecepatan angin dan persamaan torsi dua cup tidak memperhitungkan pengaruhnya, yang menurut Pindado et al. (2014) penting pada kecepatan angin rendah, kesalahan akibat koefisien tetap juga tidak seragam di seluruh rentang kecepatan, sehingga sebaran torsi yang dihasilkan dapat ikut terdistorsi.

Pengaruh kecepatan sudut rotor perlu dijelaskan lebih rinci. Persamaan torsi aerodinamik yang dipakai menggunakan kecepatan angin v yang sama untuk kedua cup, padahal cup yang berputar bergerak dengan kecepatan tangensial ωr, dengan ω sebagai kecepatan sudut rotor (rad/s). Pada penyederhanaan satu dimensi, ketika arah gerak cup sejajar dengan arah angin, kecepatan angin relatif terhadap cup ditulis sebagai berikut. Pindado et al. (2012) menunjukkan bahwa kecepatan relatif sebenarnya juga bergantung pada sudut posisi cup terhadap arah angin, sehingga bentuk di bawah ini merupakan penyederhanaan:

$$v_{rel,cekung} = v - \omega r$$

$$v_{rel,cembung} = v + \omega r$$

Cup sisi cekung bergerak searah angin sehingga kecepatan relatifnya berkurang, sedangkan cup sisi cembung bergerak melawan angin sehingga kecepatan relatifnya bertambah. Karena gaya drag sebanding dengan kuadrat kecepatan relatif, torsi aerodinamik pada rotor yang berputar menjadi:

$$\tau_{aero}(\omega) = \frac{1}{2}\rho A r\left[C_{d\ cekung}(v - \omega r)^2 - C_{d\ cembung}(v + \omega r)^2\right]$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa torsi aerodinamik menurun seiring bertambahnya ω. Persamaan torsi yang dipakai dalam penelitian ini hanya sama dengan persamaan tersebut pada $\omega = 0$ (rotor diam), sehingga nilainya paling tepat dibaca sebagai torsi penggerak pada kondisi acuan rotor diam, dan cenderung lebih besar daripada torsi aerodinamik pada rotor yang sedang berputar. Sebagai gambaran, dengan koefisien yang sama (1,42 dan 0,38) dan tanpa hambatan lain, torsi aerodinamik pada model sederhana ini menjadi nol ketika $\frac{\omega r}{v} = \frac{1-k}{1+k}$, dengan $k = \sqrt{\frac{C_{d\ cembung}}{C_{d\ cekung}}}$, yaitu sekitar 0,32 dalam perhitungan ini, atau faktor anemometer v/(ωr) sekitar 3,1. Pada kondisi itu torsi netto tidak lagi menggerakkan rotor. Model dua cup dalam literatur memang menetapkan torsi aerodinamik sama dengan nol pada rotasi tunak (Pindado et al., 2012), sehingga kecepatan putar tunak ditentukan oleh keseimbangan torsi, bukan oleh nilai torsi pada rotor diam. Nilai 0,32 merupakan konsekuensi model dan koefisien yang diasumsikan, bukan hasil pengukuran. Nilai faktor anemometer tersebut berada dalam kisaran 2,5–3,5 yang dianalisis oleh Pindado et al. (2012), tetapi kesesuaian orde besar ini hanya menunjukkan bahwa model sederhana masuk akal secara fisis, bukan bahwa koefisien yang dipakai sesuai dengan alat. Model ini juga belum menggambarkan perubahan sudut cup terhadap arah angin pada satu putaran penuh maupun pengaruh turbulensi dan angin yang berubah arah dan kecepatan terhadap kecepatan sudut sesaat. Pedersen dan Dahlberg (2024) menunjukkan bahwa overspeeding dinamis pada pengukuran kecepatan angin rata-rata bergantung pada intensitas turbulensi.

Model juga belum memperhitungkan torsi gesekan bantalan. Torsi ini melawan putaran rotor sehingga torsi netto yang tersedia untuk menggerakkan rotor adalah:

$$\tau_{netto} = \tau_{aero} - \tau_{gesek} = J\frac{d\omega}{dt}$$

dengan J sebagai momen inersia rotor. Rotor baru mulai berputar jika torsi aerodinamik melampaui torsi gesekan awal bantalan. Oleh karena itu, pada kecepatan angin yang rendah, model ini tetap memberikan torsi bernilai positif walaupun pada alat sebenarnya rotor dapat belum berputar, sehingga nilai torsi pada kecepatan angin rendah berpotensi menggambarkan kondisi yang tidak terjadi pada alat. Literatur umumnya mengabaikan gesekan pada kecepatan angin di atas sekitar 1 m/s karena nilainya kecil dibandingkan torsi aerodinamik (Pindado et al., 2012); Pindado et al. (2014) memberi contoh torsi aerodinamik satu cup sekitar $1{,}6 \times 10^{-2}$ Nm berbanding torsi gesekan sekitar $2{,}1 \times 10^{-5}$ Nm pada anemometer yang mereka kaji. Nilai tersebut bukan nilai untuk RM Young model 03102. Gesekan tetap berperan sebagai offset pada konstanta kalibrasi dan berubah menurut suhu udara serta jenis bantalan (Pindado et al., 2012; Pindado et al., 2014), sehingga pengaruhnya relatif lebih besar pada kecepatan angin rendah. Karena kecepatan angin pada data bervariasi besar (koefisien variasi 69,6%), pengabaian gesekan paling berpengaruh pada periode berangin lemah. Beban lain seperti hambatan udara pada lengan rotor dan beban sensor keluaran juga belum dimasukkan. Besaran-besaran ini tidak tersedia dalam penelitian ini sehingga tidak dapat diestimasi.

Hasil penelitian ini belum divalidasi melalui pengukuran langsung. Konsistensi perhitungan, misalnya hasil yang stabil terhadap data masukan atau besaran koefisien yang berada pada kisaran literatur, hanya menunjukkan bahwa penurunan persamaan dan perhitungannya konsisten dengan asumsi yang dipakai. Hal tersebut tidak membuktikan bahwa asumsi itu sesuai dengan cup RM Young model 03102, dan bukan bukti empiris mengenai kinerja alat. Bahkan model dua cup yang sudah mapan dalam literatur memerlukan data eksperimen: Pindado et al. (2014) menyatakan bahwa kecocokannya dengan data percobaan menuntut distribusi tekanan tak seragam pada cup dan pengujian lebih lanjut untuk menilai pengaruh rotasi, sedangkan model tiga cup yang lebih lengkap memiliki akurasi sekitar

10% pada faktor anemometer, bergantung pada ukuran cup. Pembuktian memerlukan pembandingan estimasi dengan hasil pengukuran, misalnya torsi awal dan kecepatan angin ambang start pada unit alat yang diuji dalam aliran udara terkendali, serta respons kecepatan putar terhadap kecepatan angin acuan.

Dengan keterbatasan tersebut, hasil penelitian ini hanya dapat dipakai sebagai estimasi torsi penggerak aerodinamik pada kondisi acuan rotor diam, berdasarkan model sederhana perbedaan gaya drag sisi cekung dan sisi cembung serta data operasional BMKG Serang. Hasil ini menggambarkan besar dan sebaran torsi yang dihitung dari kondisi angin yang tercatat, bukan torsi aktual pada rotor yang berputar tunak, dan belum menunjukkan kinerja alat. Penelitian lanjutan perlu menggunakan koefisien drag yang sesuai dengan geometri cup, memasukkan kecepatan sudut rotor dan torsi gesekan bantalan, serta memvalidasi hasil dengan pengukuran langsung.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengestimasi torsi aerodinamik pada anemometer cup counter RM Young 03002 melalui selisih gaya drag antara sisi cekung dan cembung cup, menggunakan 50.640 data operasional BMKG Serang tahun 2025. Pemodelan menghasilkan torsi rata-rata sebesar $1{,}1639 \times 10^{-4}$ Nm dengan nilai maksimum $1{,}8869 \times 10^{-3}$ Nm, serta menunjukkan pola peningkatan torsi yang kuadratik terhadap kecepatan angin. Koefisien variasi massa jenis udara hanya 1,01%, jauh lebih rendah dibandingkan koefisien variasi kecepatan angin (69,61%) dan torsi (135,02%), sehingga variasi torsi hampir sepenuhnya ditentukan oleh variasi kecepatan angin.

Semua nilai dalam penelitian ini merupakan estimasi teoritis yang diturunkan dari data operasional lapangan pada kondisi acuan diameter rotor, bukan hasil pengukuran torsi aktual pada instrumen. Kendati demikian, pendekatan ini tetap memberikan gambaran kuantitatif mengenai besaran dan sebaran torsi penggerak rotor tanpa perlu memodifikasi alat, sehingga dapat dijadikan landasan teoretis untuk mengevaluasi kinerja, pemeliharaan, dan kalibrasi anemometer. Agar akurasi yang diperoleh lebih menyeluruh, penelitian lanjutan disarankan melakukan pengukuran torsi secara langsung sebagai validasi empiris, sekaligus menggunakan koefisien drag yang sesuai dengan geometri spesifik cup instrumen.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terselesaikannya penelitian ini tidak lepas dari bantuan banyak pihak. Untuk itu, penulis menyampaikan rasa terima kasih yang setinggi-tingginya kepada Ketua Jurusan yang telah memberikan dukungan kebijakan dan fasilitas, Dosen Pembimbing Lapangan yang selalu membimbing serta memberi arahan ilmiah dalam penyempurnaan pemodelan fisika ini, dan Pamong di Stasiun Meteorologi BMKG Serang yang telah memfasilitasi data operasional parameter cuaca sekaligus berbagi wawasan teknis tentang instrumen di lapangan. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada seluruh jajaran staf dan pihak terkait yang telah membantu kelancaran penelitian ini.

REFERENSI

Alfonso-Corcuera, D., Meseguer-Garrido, F., Torralbo-Gimeno, I., & Pindado, S. (2024). On the Variation of Cup Anemometer Performance Due to Changes in the Air Density. *Applied Sciences*, *14*(5), 1843.

Brevoort, MJ, & Joyner, UT (1934). *Investigasi eksperimental anemometer cangkir tipe Robinson* (No. NACA-TR-513). National Advisory Committee for Aeronautics.

Busch, N. E., & Kristensen, L. (1976). Cup anemometer overspeeding. *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)*, 1328-1332.

Copernicus. (2024). Modelling of cup anemometry and dynamic overspeeding in average wind speed measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 17(5), 1441–1458.

Embry-Riddle Aeronautical University [ERAU]. (n.d.). *Bluff Body Flows*. In *Introduction to Aerospace Flight Vehicles*. ERAU Pressbooks.

Fadil, M., Wahyono, U., Werdhiana, I. K., Santoso, R., & Ilmianih, R. (2025). Pengembangan Alat Peraga Anemometer Sebagai Media Pembelajaran Pada Konsep Dinamika Fluida Untuk Siswa SMA. *Jurnal Pendidikan Fisika Tadulako Online*, 13(2), 182–193.

Fitriyani, L., & Hadi, S. (2023). Penerapan Alat Peraga Berbasis Digital untuk Meningkatkan Keterampilan Abad 21 Siswa. *Jurnal Pendidikan Sains Indonesia*, 11(1), 45–55.

Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2014). *Fundamentals of physics* (10th ed.). Wiley.

Hibbeler, R. C. (2016). *Engineering mechanics: Dynamics* (14th ed.). Pearson.

Hidayat, M. M., Santoso, A. D., & Rahmawati, M. (2024). Rancang Bangun Sistem Monitoring Cuaca Berbasis Google Spreadsheet untuk Nelayan di Wilayah Pesisir Pantai. *Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro dan Informatika (JTMEI)*, 3(2), 11–27.

Hoerner, S. F. (1965). *Fluid-dynamic drag: Practical information on aerodynamic drag and hydrodynamic resistance*. Hoerner Fluid Dynamics.

Hubbard, J. D., & Brescoll, G. P. (1934). Aerodynamic investigation of a cup anemometer (NACA Technical Note No. 502). National Advisory Committee for Aeronautics.

International Organization for Standardization [ISO]. (2007). *Meteorology — Wind measurements — Part 1: Wind tunnel test methods for rotating anemometer performance* (ISO 17713-1:2007). ISO.

Isra, R. L., & Mukhaiyar, R. (2022). Monitoring kecepatan angin berbasis mikrokontroler dan IoT. *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, *3*(2), 437-447.

Kristensen, L. (2002). Can a cup anemometer 'underspeed'? *Boundary-Layer Meteorology, 103*(1), 163–172. https://doi.org/10.1023/A:1014543307696

Kristensen, L., & Hansen, O. F. (2002). *Distance constant of the Risø cup anemometer* (Risø-R-1320(EN)). Risø National Laboratory.

Kumar, A., & Patel, M. (2021). IoT-Based Environmental Monitoring System Using Microcontroller. *International Journal of Electronics and Communication Engineering*, 10(3), 112–120.

Mangano, S., Vega, E., Martínez, A., Alfonso-Corcuera, D., Sanz-Andrés, Á., & Pindado, S. (2022). Performance Monitoring of Mast-Mounted Cup Anemometers Multivariate Analysis with ROOT. *Sensors*, *22*(24), 9774.

NASA Glenn Research Center. (2023, January 21). Modern drag equation.

Papadopoulos, K. H., Stefantos, N. C., Paulsen, U. S., & Morfiadakis, E. (2001). Effects of turbulence and flow inclination on the performance of cup anemometers in the field. *Boundary-Layer Meteorology, 101*(1), 77–107. https://doi.org/10.1023/A:1019254020039

Pedersen, T. F., & Dahlberg, J. Å. (2024). Modelling of cup anemometry and dynamic overspeeding in average wind speed measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, *17*(5), 1441-1461.

Picard, A., Davis, R. S., Gläser, M., & Fujii, K. (2008). Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007). *Metrologia, 45*(2), 149–155. https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/2/004

Pindado, S., Cubas, J., & Sorribes-Palmer, F. (2014). The cup anemometer, a fundamental meteorological instrument for the wind energy industry. Research at the IDR/UPM Institute. Sensors, 14(11), 21418–21452.

Pindado, S., Pérez, J., & Avila-Sanchez, S. (2012). On cup anemometer rotor aerodynamics. *Sensors*, *12*(5), 6198-6217.

R. M. Young Company. (n.d.). *Wind Sentry anemometer and vane: Model 03002*.

Setyawan, R. T., Hajar, I., & Gunawan, G. (2025). Perbandingan Kinerja Aerodinamika Berbagai Geometri Bodi Terhadap Gaya Hambat Dan Gaya Angkat Pada Kendaraan Hemat Energi. *Jurnal Teknik Terapan*, *4*(2), 74-79.

Subhaktiyasa, P. G., Ayu, S., Candrawati, K., Sumaryani, N. P., Sunita, W., & Syakur, A. (2023). Penerapan statistik deskriptif: Perspektif kuantitatif dan kualitatif. *Jurnal Edukasi Matematika Dan Sains P-ISSN*, *2302*, 2124.

White, F. M. (2011). *Fluid mechanics* (7th ed.). McGraw-Hill.

World Meteorological Organization [WMO]. (2018). *Guide to instruments and methods of observation* (WMO-No. 8, 2018 ed., Volume I, Chapter 5: Measurement of surface wind). WMO.

Yang, J., Wang, J., Liu, D., Guo, W., & Zhang, Y. (2024). Observation and simulation of neutral air density in the middle atmosphere during the 2021 sudden stratospheric warming event. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *24*(17), 10113-10127.