

Pengembangan dan Karakterisasi Instrumen Dedicated Cup Anemometer untuk Pengukuran Distribusi Kecepatan Angin pada Area Luas

Kiki Zakaria^{1*}

¹ Program Studi Magister Teknik Mesin, Program Pascasarjana, Universitas Pasundan, Bandung, Indonesia

*Corresponding author email: kikizakaria94@gmail.com

Abstrak

Informasi kecepatan angin pada suatu area dapat mengalami variasi secara spasial maupun temporal sehingga pengukuran pada satu titik belum tentu merepresentasikan kondisi angin pada keseluruhan area. Kondisi tersebut menjadi salah satu pertimbangan dalam kebutuhan pengukuran multi-titik, termasuk untuk mendukung penentuan lokasi yang memerlukan informasi kondisi angin. Penelitian ini bertujuan mengembangkan dedicated cup anemometer berbasis sensor Hall Effect yang dapat beroperasi secara mandiri, menentukan persamaan kalibrasi, menganalisis karakteristik instrumen, serta mengevaluasi kesesuaian hasil pengukuran terhadap anemometer referensi. Instrumen dikembangkan menggunakan mekanisme cup anemometer, magnet neodimium, sensor Hall Effect A3144, Arduino Uno, RTC DS3231, modul microSD, dan baterai Li-Ion. Putaran rotor dideteksi melalui pulsa sensor Hall Effect, kemudian diproses oleh mikrokontroler menjadi RPM dan dikonversi menjadi kecepatan angin berdasarkan persamaan kalibrasi. Hasil regresi kalibrasi menghasilkan persamaan $V = 0,0101RPM + 0,7316$ dengan $R^2 = 0,9677$. Nilai sensitivitas berdasarkan kemiringan regresi adalah 0,0101 m/s/RPM, sedangkan resolusi teoritis sistem dengan empat magnet dan interval pengukuran dua detik adalah sekitar 0,076 m/s. Starting threshold teramati pada kisaran 1,67–1,70 m/s. Hasil pengujian repeatability dan presisi menunjukkan kecenderungan peningkatan performa pada kecepatan angin yang lebih tinggi. Validasi terkendali menghasilkan $R^2 = 0,9648$, MAE 0,36 m/s, RMSE 0,38 m/s, dan MAPE 12,09%. Sementara itu, validasi lapangan menghasilkan $R^2 = 0,3811$, MAE 0,62 m/s, RMSE 0,81 m/s, dan MAPE 18,85%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa instrumen telah berhasil dikembangkan sebagai sistem pengukuran mandiri, tetapi performanya pada kondisi lapangan masih memerlukan penyempurnaan sebelum digunakan untuk pengukuran angin terdistribusi pada area luas.

Kata kunci: cup anemometer, Hall Effect, kecepatan angin, kalibrasi, karakterisasi instrumen, validasi

Abstract

Wind speed information within an area may vary spatially and temporally, such that measurements at a single point may not necessarily represent wind conditions across the entire area. This condition highlights the need for multi-point measurements, including to support the identification of locations requiring information on wind conditions. This study aimed to develop a dedicated cup anemometer based on a Hall Effect sensor that can operate independently, determine its calibration equation, analyze the instrument characteristics, and evaluate the agreement of its measurements with those of a reference anemometer. The instrument was developed using a cup anemometer mechanism, neodymium magnets, an A3144 Hall Effect sensor, an Arduino Uno, an RTC DS3231, a microSD module, and Li-Ion batteries. Rotor rotation was detected through Hall Effect sensor pulses, which were processed by the microcontroller into RPM and converted into wind speed using the calibration equation. The calibration regression resulted in the equation $V = 0.0101RPM + 0.7316$, with $R^2 = 0.9677$. The sensitivity based on the regression slope was 0.0101 m/s/RPM, while the theoretical resolution of the system, using four magnets and a two-second measurement interval, was approximately 0.076 m/s. The observed starting threshold was in the range of 1.67–1.70 m/s. Repeatability and precision tests indicated an improvement in performance at higher wind speeds. Controlled validation resulted in $R^2 = 0.9648$, MAE = 0.36 m/s, RMSE = 0.38 m/s, and MAPE = 12.09%. Meanwhile, field validation resulted in $R^2 = 0.3811$, MAE = 0.62 m/s, RMSE = 0.81 m/s, and MAPE = 18.85%. These results indicate that the instrument has been successfully developed as a standalone measurement system; however, its performance under field conditions still requires further improvement before it can be used for distributed wind measurements over large areas.

Keywords: cup anemometer, Hall Effect, wind speed, calibration, instrument characterization, validation

1. Pendahuluan

Kecepatan angin merupakan salah satu parameter lingkungan yang memiliki variasi terhadap waktu dan posisi. Pengukuran kecepatan angin pada satu titik pengamatan tidak selalu dapat menggambarkan kondisi angin pada keseluruhan area karena karakteristik aliran dapat berubah secara spasial maupun temporal. Oleh karena itu, informasi distribusi kecepatan angin pada beberapa titik dapat memberikan gambaran yang lebih representatif mengenai kondisi angin suatu area.

Kebutuhan terhadap informasi tersebut antara lain dapat dijumpai pada penentuan lokasi helipad yang membutuhkan informasi kondisi angin pada area yang akan digunakan. Penggunaan satu instrumen pengukur pada satu titik memiliki keterbatasan apabila kondisi angin pada titik tersebut berbeda dengan titik lainnya. Pendekatan multi-titik membutuhkan sejumlah instrumen yang dapat ditempatkan pada beberapa lokasi sekaligus. Dengan demikian, instrumen yang dikembangkan perlu memiliki kemampuan untuk beroperasi secara mandiri dan melakukan pencatatan data secara independen.

Cup anemometer merupakan salah satu instrumen yang umum digunakan untuk mengukur kecepatan angin. Prinsip pengukurannya didasarkan pada hubungan antara kecepatan angin dengan kecepatan rotasi rotor. Penelitian mengenai cup anemometer telah mencakup pengembangan instrumen berbiaya rendah, metode deteksi putaran, karakteristik performa, serta metode kalibrasi. Avallone et al. (2019), misalnya, mengembangkan anemometer berbiaya rendah berbasis Arduino. Bai et al. (2021) mengembangkan metode deteksi berdaya rendah untuk three-cup anemometer, sedangkan penelitian lain membahas pengaruh karakteristik lingkungan dan respons dinamik terhadap kinerja cup anemometer (Alfonso-Corcuera et al., 2024; Pedersen & Dahlberg, 2024).

Selain pengembangan perangkat, kalibrasi merupakan bagian penting dalam pengembangan instrumen pengukuran. Hubungan antara keluaran instrumen dan besaran yang diukur perlu ditentukan melalui perbandingan terhadap instrumen referensi. Pendekatan berbasis penghitungan pulsa juga telah digunakan dalam karakterisasi keluaran cup anemometer (Ramos-Cenzano et al., 2019). Sementara itu, pendekatan kalibrasi berbasis data dan artificial neural network juga telah dikaji untuk meningkatkan proses kalibrasi cup anemometer (Li & Kikumoto, 2022).

Berdasarkan kebutuhan tersebut, penelitian ini mengembangkan dedicated cup anemometer berbasis sensor Hall Effect yang dilengkapi sistem akuisisi dan penyimpanan data. Sensor Hall Effect digunakan untuk mendeteksi putaran rotor melalui perubahan medan magnet. Sinyal pulsa yang dihasilkan kemudian diproses oleh mikrokontroler untuk memperoleh RPM dan selanjutnya dikonversikan menjadi kecepatan angin.

Penelitian ini tidak hanya berfokus pada pengembangan perangkat, tetapi mencakup rangkaian pengembangan, kalibrasi, karakterisasi, dan validasi. Karakterisasi dilakukan melalui analisis sensitivitas, linearitas, repeatability, presisi, resolusi, dan akurasi. Akurasi dievaluasi menggunakan bias, mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), dan mean absolute percentage error (MAPE). Selanjutnya, instrumen yang telah dikalibrasi dibandingkan dengan instrumen referensi pada kondisi terkendali dan kondisi lapangan.

Tujuan penelitian ini adalah: (1) mengembangkan dedicated cup anemometer berbasis sensor Hall Effect sebagai instrumen pengukuran mandiri; (2) menentukan persamaan kalibrasi antara RPM dan kecepatan angin; (3) menganalisis karakteristik instrumen berdasarkan sensitivitas, linearitas, repeatability, presisi, resolusi, dan akurasi; serta (4) mengevaluasi kesesuaian hasil pengukuran terhadap anemometer referensi pada kondisi terkendali dan lapangan.

2. Metode Penelitian

2.1. Pengembangan Instrumen

Instrumen dikembangkan sebagai dedicated cup anemometer yang dapat melakukan pengukuran dan penyimpanan data secara mandiri. Komponen utama terdiri atas mekanisme cup anemometer, poros, bearing, magnet neodymium, sensor Hall Effect A3144, Arduino Uno, RTC DS3231, modul microSD, dan baterai Li-Ion.

Sistem bekerja berdasarkan prinsip bahwa kecepatan angin menyebabkan rotor cup anemometer berputar. Magnet yang dipasang pada rotor menghasilkan perubahan medan magnet pada saat rotor berputar. Perubahan tersebut dideteksi oleh sensor Hall Effect dan menghasilkan pulsa digital. Pulsa kemudian dihitung oleh Arduino Uno untuk menentukan RPM. Nilai RPM selanjutnya dikonversikan menjadi kecepatan angin menggunakan persamaan kalibrasi.

RTC DS3231 digunakan untuk memberikan timestamp pada data pengukuran, sedangkan modul microSD digunakan untuk menyimpan data sehingga instrumen dapat bekerja sebagai sistem data logger secara mandiri.

2.2. Perhitungan RPM

Pada konfigurasi instrumen yang digunakan, rotor dilengkapi empat magnet dan pengukuran dilakukan dengan interval dua detik. Jumlah pulsa yang terdeteksi dalam interval pengukuran digunakan untuk menentukan RPM. Secara umum, hubungan jumlah pulsa, jumlah magnet, dan interval waktu digunakan untuk memperoleh kecepatan rotasi rotor.

Konfigurasi empat magnet dan interval dua detik memberikan perubahan terkecil sebesar satu pulsa. Satu pulsa tersebut ekuivalen dengan 7,5 RPM.

2.3. Kalibrasi

Kalibrasi dilakukan dengan membandingkan RPM dedicated cup anemometer terhadap kecepatan angin yang diukur oleh anemometer referensi. Pasangan data RPM dan kecepatan angin referensi digunakan untuk memperoleh hubungan regresi linear.

Persamaan umum kalibrasi dinyatakan sebagai:

$$V = a(RPM) + b$$

dengan:

- V = kecepatan angin (m/s),
- RPM = kecepatan rotasi rotor,
- a = sensitivitas berdasarkan kemiringan regresi (m/s/RPM),
- b = konstanta/intercept.

Hasil regresi kemudian diimplementasikan pada sistem mikrokontroler untuk mengubah nilai RPM menjadi kecepatan angin.

2.4. Karakterisasi Instrumen

Karakterisasi dilakukan terhadap beberapa parameter pengukuran.

1. Sensitivitas ditentukan berdasarkan kemiringan (slope) hubungan RPM dengan kecepatan angin. Nilai tersebut menunjukkan perubahan kecepatan angin yang dihasilkan untuk setiap perubahan RPM.
2. Linearitas dievaluasi menggunakan koefisien determinasi (R^2). Nilai R^2 menunjukkan tingkat kekuatan hubungan linear antara keluaran instrumen dan nilai referensi.
3. Repeatability dianalisis melalui standar deviasi hasil pengukuran berulang pada kondisi yang sama. Nilai standar deviasi yang lebih kecil menunjukkan penyebaran hasil pengukuran yang lebih kecil.
4. Presisi dianalisis menggunakan coefficient of variation (CV), yang menunjukkan penyebaran relatif hasil pengukuran terhadap nilai rata-ratanya.
5. Resolusi ditentukan berdasarkan perubahan kecepatan angin terkecil yang dapat ditunjukkan sistem akibat satu pulsa pada konfigurasi empat magnet dan interval dua detik.
6. Akurasi dianalisis menggunakan bias, MAE, RMSE, dan MAPE.

2.5. Validasi

Validasi dilakukan dengan membandingkan kecepatan angin hasil pengukuran dedicated cup anemometer yang telah dikalibrasi dengan anemometer referensi.

Validasi dilakukan dalam dua kondisi, yaitu validasi terkendali dan validasi lapangan. Validasi terkendali dilakukan pada kondisi pengukuran yang lebih terkontrol dengan beberapa variasi kecepatan angin. Validasi lapangan dilakukan pada kondisi lingkungan yang lebih dinamis.

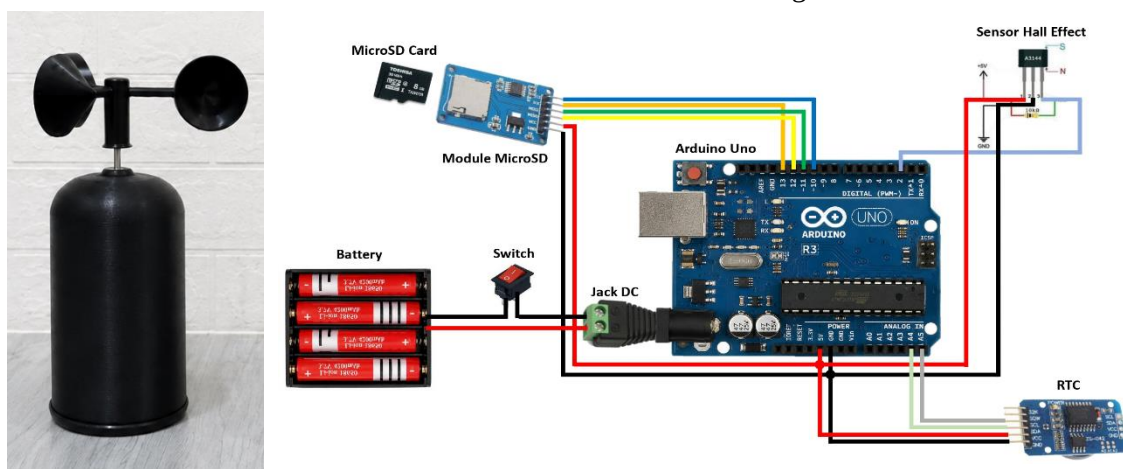
Parameter evaluasi yang digunakan meliputi slope, R^2 , bias, MAE, RMSE, dan MAPE.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Pengembangan Instrumen

Hasil pengembangan menghasilkan sebuah dedicated cup anemometer yang mengintegrasikan sistem mekanik, elektronik, dan perangkat lunak. Sistem mekanik terdiri atas rotor cup anemometer, poros, bearing, dan magnet. Sistem elektronik terdiri atas sensor Hall Effect, Arduino Uno, RTC DS3231, modul microSD, serta baterai.

Gambar 1: Dedicated Anemometer dan skema rangkaian elektronik

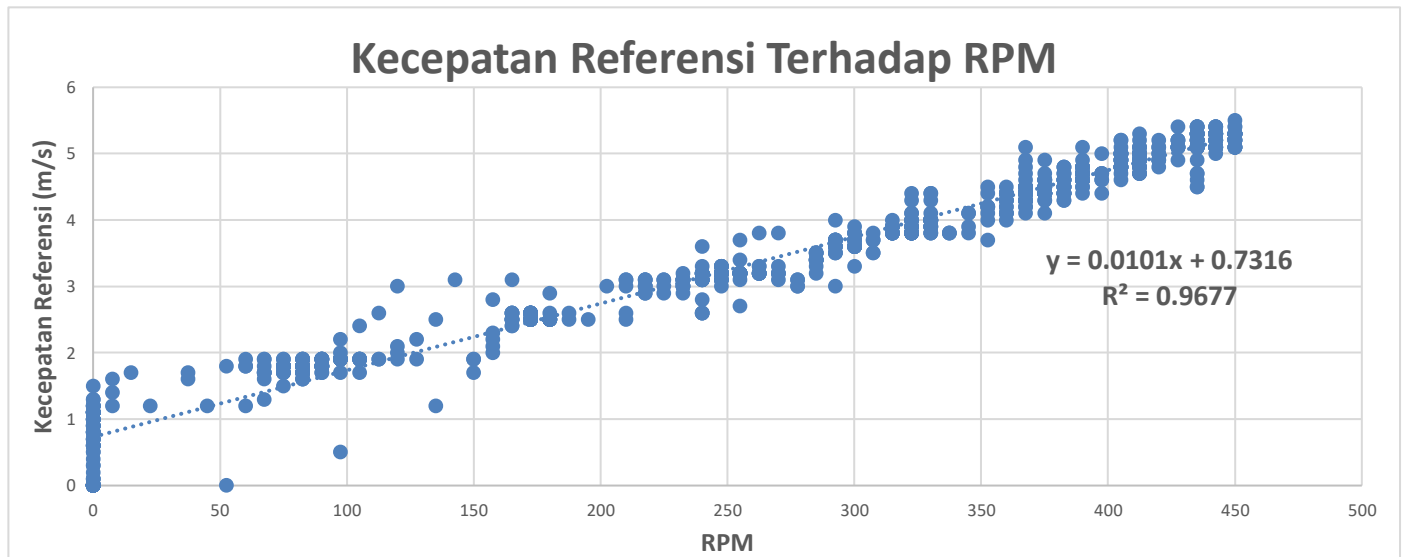


Hasil pengujian menunjukkan bahwa instrumen mampu mendeteksi putaran rotor, menghitung RPM, mengonversinya menjadi kecepatan angin, serta menyimpan data pengukuran secara mandiri. Dengan demikian, fungsi dasar instrumen sebagai sistem pengukuran standalone telah dapat direalisasikan. Pengembangan sistem standalone ini menjadi bagian penting karena instrumen dirancang untuk dapat ditempatkan pada beberapa titik pengukuran secara independen.

3.2. Hasil Kalibrasi

Hasil pengukuran menunjukkan adanya hubungan antara kecepatan angin referensi dan RPM rotor. Ketika kecepatan angin meningkat, RPM rotor juga meningkat. Sebaliknya, penurunan kecepatan angin diikuti oleh penurunan RPM.

Gambar 2: Grafik regresi linear Hasil Kalibrasi Dedicated Anemometer



Hasil regresi linear menghasilkan persamaan:

$$V = 0,0101RPM + 0,7316$$

dengan:

$$R^2 = 0,9677$$

Nilai R^2 sebesar 0,9677 menunjukkan hubungan linear yang kuat antara RPM dan kecepatan angin referensi. Persamaan tersebut kemudian digunakan untuk mengonversikan RPM menjadi kecepatan angin.

Nilai intercept sebesar 0,7316 m/s menyebabkan persamaan regresi menghasilkan nilai kecepatan yang tidak sama dengan nol ketika RPM bernilai nol. Oleh karena itu, kondisi $RPM = 0$ diperlakukan sebagai kondisi batas dan keluaran instrumen ditetapkan sebesar 0 m/s ketika rotor tidak berputar.

3.3. Sensitivitas dan Linearitas

Kemiringan persamaan kalibrasi sebesar 0,0101 m/s/RPM digunakan sebagai nilai sensitivitas instrumen. Nilai tersebut menunjukkan perubahan kecepatan angin yang dihasilkan untuk setiap perubahan satu RPM.

Sementara itu, nilai $R^2 = 0,9677$ menunjukkan linearitas hubungan antara RPM dan kecepatan angin referensi. Dengan demikian, pada tahap kalibrasi terdapat hubungan yang kuat antara keluaran mekanik rotor dan besaran kecepatan angin yang diukur.

Perlu dibedakan antara sensitivitas pada tahap kalibrasi dan slope pada tahap validasi. Pada validasi terkendali, perbandingan antara kecepatan dedicated dan referensi menghasilkan slope sebesar 0,9133 dengan $R^2 = 0,9648$. Slope tersebut menunjukkan kesesuaian gain atau skala respons terhadap instrumen referensi, sedangkan slope 0,0101 m/s/RPM merupakan sensitivitas berbasis hubungan RPM-kecepatan pada tahap kalibrasi.

3.4. Resolusi

Konfigurasi instrumen menggunakan empat magnet dan interval pengukuran dua detik. Satu pulsa merupakan perubahan terkecil yang dapat dideteksi oleh sistem.

Pada konfigurasi tersebut, satu pulsa ekuivalen dengan 7,5 RPM. Berdasarkan persamaan kalibrasi, perubahan tersebut menghasilkan perubahan kecepatan angin sekitar 0,07575 m/s. Dengan demikian, resolusi teoritis sistem adalah sekitar:

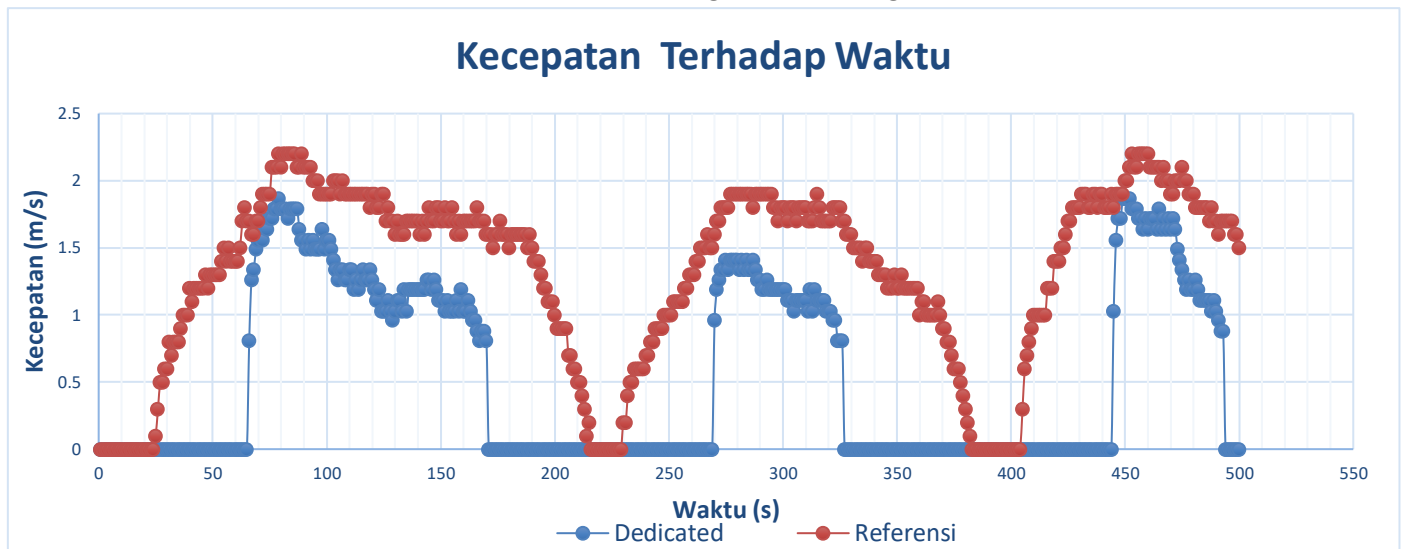
$$0,076 \text{ m/s}$$

Nilai tersebut merupakan resolusi teoritis yang ditentukan oleh konfigurasi jumlah magnet dan interval pengukuran.

3.5. Starting Threshold

Pengujian starting threshold dilakukan untuk menentukan kecepatan angin minimum ketika rotor mulai memberikan respons pengukuran.

Gambar 3: Grafik Pengamatan starting treshold



Tiga kali pengujian menunjukkan respons mulai terdeteksi pada kisaran 1,6–1,8 m/s. Rata-rata kecepatan referensi ketika respons muncul pada kondisi kenaikan kecepatan adalah 1,70 m/s, sedangkan pada kondisi penurunan kecepatan sebesar 1,67 m/s.

Dengan demikian, starting threshold instrumen berada pada kisaran:
 $1,67 - 1,70 \text{ m/s}$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa instrumen memiliki keterbatasan dalam mendeteksi kecepatan angin yang sangat rendah.

3.6. Repeatability dan Presisi

Pengujian repeatability dilakukan pada kondisi kecepatan rendah, sedang, dan tinggi dengan pengukuran berulang. Hasil menunjukkan bahwa standar deviasi pengukuran dedicated cenderung menurun ketika kecepatan angin meningkat.

Pada kondisi rendah, sedang, dan tinggi, nilai standar deviasi dedicated masing-masing sekitar 0,0428 m/s, 0,0424 m/s, dan 0,0178 m/s. Penurunan standar deviasi tersebut menunjukkan bahwa penyebaran hasil pengukuran semakin kecil pada kecepatan angin yang lebih tinggi.

Presisi yang dinyatakan melalui CV juga menunjukkan kecenderungan yang sama. Nilai CV dedicated turun dari sekitar 2,88% pada kondisi rendah menjadi 1,18% pada kondisi sedang dan 0,35% pada kondisi tinggi.

Dengan demikian, repeatability dan presisi relatif instrumen menunjukkan performa yang lebih baik pada kecepatan angin yang lebih tinggi. Sebaliknya, kondisi kecepatan rendah menunjukkan variasi relatif yang lebih besar.

3.7. Akurasi

Pengujian akurasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran dedicated dengan anemometer referensi pada 18 variasi kecepatan angin.

Hasil pengujian menunjukkan rata-rata bias sebesar $-0,36 \text{ m/s}$. Nilai negatif menunjukkan kecenderungan dedicated cup anemometer memberikan hasil pengukuran yang lebih rendah dibandingkan instrumen referensi.

Nilai MAE yang diperoleh adalah 0,36 m/s, sedangkan RMSE sebesar 0,38 m/s. Nilai MAPE rata-rata adalah 12,09%. Error relatif terbesar terjadi pada kecepatan angin rendah dengan MAPE sebesar 42,58%. Secara umum, MAPE cenderung menurun ketika kecepatan angin meningkat.

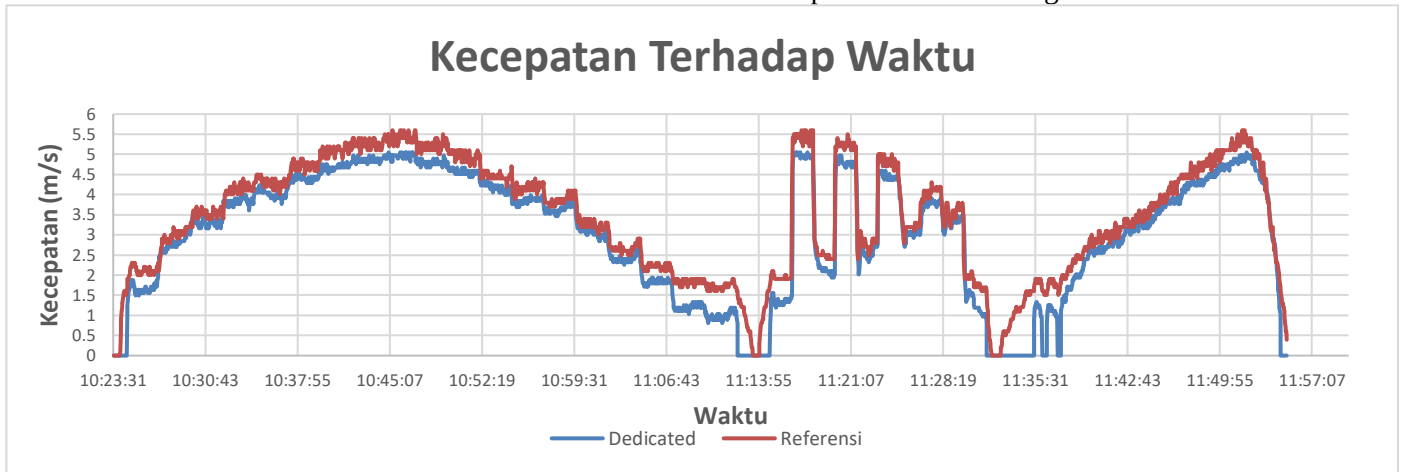
Tabel 1: Hasil pengujian akurasi pada 18 variasi kecepatan angin

Parameter	Rata-rata	Maksimum	Minimum
Uncertainty referensi (m/s)	0,22	0,45	0,10
Uncertainty dedicated (m/s)	0,19	0,455	0,11
Bias (m/s)	$-0,36$	$-0,20$	$-0,73$
MAE (m/s)	0,36	0,73	0,20
RMSE (m/s)	0,38	0,74	0,22
MAPE (%)	12,09	42,58	5,80

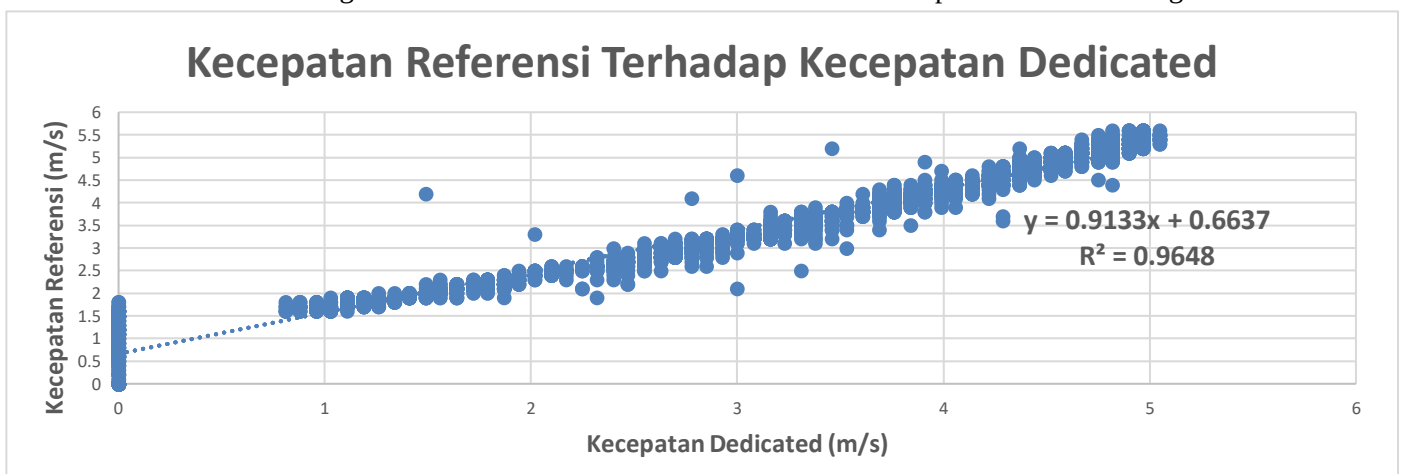
3.8. Validasi Terkendali

Validasi terkendali menunjukkan hubungan yang kuat antara hasil pengukuran dedicated dan anemometer referensi.

Gambar 4: Grafik Validasi Terkendali antara Kecepatan Referensi dengan Dedicated



Gambar 5: Grafik Regresi Linear Hasil Validasi Terkendali antara Kecepatan Referensi dengan Dedicated



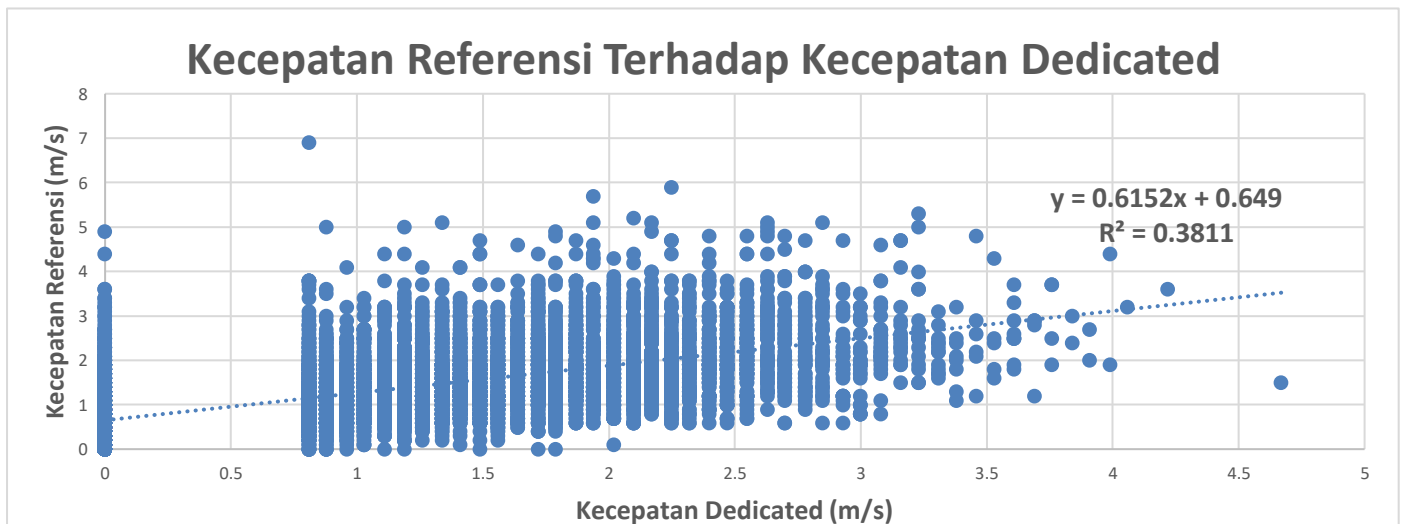
Nilai slope sebesar 0,9133 menunjukkan bahwa skala respons dedicated relatif mendekati respons referensi, sedangkan nilai $R^2 = 0,9648$ menunjukkan hubungan linear yang kuat.

Nilai MAE sebesar 0,36 m/s dan RMSE sebesar 0,38 m/s menunjukkan tingkat kesalahan absolut yang relatif lebih kecil dibandingkan hasil validasi lapangan. Nilai MAPE sebesar 12,09% juga menunjukkan error relatif rata-rata pada kondisi terkendali.

3.9. Validasi Lapangan

Berbeda dengan kondisi terkendali, pengukuran lapangan dilakukan pada lingkungan yang lebih dinamis.

Gambar 6: Grafik Regresi Linear Hasil Validasi Lapangan antara Kecepatan Referensi dengan Dedicated



Hasil pengukuran menunjukkan fluktuasi kecepatan angin referensi dan dedicated yang cukup besar. Pada data dedicated juga ditemukan sejumlah keluaran bernilai nol yang menunjukkan kondisi ketika sistem tidak menghasilkan respons pengukuran.

Hasil evaluasi menunjukkan penurunan performa dibandingkan validasi terkendali. Nilai R^2 turun dari 0,9648 menjadi 0,3811. MAE meningkat dari 0,36 m/s menjadi 0,62 m/s, sedangkan RMSE meningkat dari 0,38 m/s menjadi 0,81 m/s. MAPE juga meningkat dari 12,09% menjadi 18,85%.

Tabel 2 : Perbandingan hasil validasi terkendali dan validasi lapangan

Parameter	Validasi Terkendali	Validasi Lapangan
R^2	0,9648	0,3811
Bias (m/s)	-0,36	-0,06
MAE (m/s)	0,36	0,62
RMSE (m/s)	0,38	0,81
MAPE (%)	12,09	18,85

Hasil tersebut menunjukkan bahwa instrumen memiliki hubungan pengukuran yang baik pada kondisi terkendali, tetapi kesesuaiannya terhadap instrumen referensi menurun ketika digunakan pada kondisi lapangan. Dengan demikian, hasil validasi lapangan menjadi aspek penting yang perlu diperhatikan sebelum instrumen digunakan untuk pengukuran distribusi kecepatan angin secara terdistribusi pada area luas.

3.10. Durasi Operasi Baterai

Pengujian durasi operasi dilakukan pada 12 Agustus 2026 mulai pukul 13:34:43 sampai 18:21:19. Sistem menghasilkan 8.591 data dengan interval pencatatan dua detik.

Durasi operasi yang tercatat adalah:

$$4 \text{ jam } 46 \text{ menit } 36 \text{ detik}$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem telah mampu melakukan pencatatan data secara mandiri dalam durasi pengujian lebih dari empat jam.

4. Kesimpulan

Dedicated cup anemometer berbasis sensor Hall Effect berhasil dikembangkan sebagai instrumen pengukuran kecepatan angin yang dapat beroperasi secara mandiri. Sistem mampu mendeteksi putaran rotor, menghitung RPM, mengonversinya menjadi kecepatan angin, memberikan timestamp, dan menyimpan hasil pengukuran melalui sistem data logger.

Hasil kalibrasi menghasilkan persamaan:

$$V = 0,0101RPM + 0,7316$$

dengan $R^2 = 0,9677$. Nilai sensitivitas berdasarkan kemiringan regresi adalah 0,0101 m/s/RPM, sedangkan resolusi teoritis berdasarkan konfigurasi empat magnet dan interval dua detik adalah sekitar 0,076 m/s. Starting threshold instrumen berada pada kisaran 1,67–1,70 m/s.

Karakterisasi repeatability dan presisi menunjukkan bahwa penyebaran hasil pengukuran relatif semakin kecil pada kecepatan angin yang lebih tinggi. Pada kondisi tinggi, standar deviasi dedicated mencapai sekitar 0,018 m/s dan CV sekitar 0,35%.

Validasi terkendali menunjukkan performa yang baik dengan $R^2 = 0,9648$, MAE 0,36 m/s, RMSE 0,38 m/s, dan MAPE 12,09%. Namun, pada validasi lapangan terjadi penurunan kesesuaian dengan $R^2 = 0,3811$, MAE 0,62 m/s, RMSE 0,81 m/s, dan MAPE 18,85%.

Dengan demikian, instrumen telah memenuhi fungsi dasar sebagai dedicated cup anemometer standalone dan menunjukkan performa yang baik pada kondisi pengujian terkendali. Akan tetapi, hasil validasi lapangan menunjukkan bahwa instrumen masih memerlukan penyempurnaan, baik pada aspek instrumen maupun metode kalibrasi, sebelum diterapkan sebagai jaringan pengukuran kecepatan angin terdistribusi pada area luas.

References

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.

Avallone, E., Mioralli, P. C., Natividade, P. S. G., Palota, P. H., da Costa, J. F., Antonio, J. R., & Junior, S. A. V. (2019). An inexpensive anemometer using Arduino board. *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics*, 32(3), 359–368.

Bai, Y., Meng, X., Guo, H., Liu, D., Jia, Y., & Cui, P. (2021). Design and validation of an adaptive low-power detection algorithm for three-cup anemometer. *Measurement*, 172, 108887.

- Baseer, M. A., Meyer, J. P., Rehman, S., Alam, M. M., Al-Hadhrani, L. M., & Lashin, A. (2016). Performance evaluation of cup-anemometers and wind speed characteristics analysis. *Renewable Energy*, 86, 733–744.
- Dai, S., & Sweetman, B. (2023). Physics-based recalibration method of cup anemometers. *Flow Measurement and Instrumentation*, 91, 102343.
- Fraden, J. (2004). Handbook of modern sensors: Physics, designs, and applications. *Springer*.
- Güçyetmez, M., Keser, S., & Hayber, Ş. E. (2022). Wind speed measurement with a low-cost polymer optical fiber anemometer based on Fresnel reflection. *Sensors and Actuators A: Physical*, 339, 113509.
- Li, R., & Kikumoto, H. (2022). Data-driven calibration of cup anemometer based on field measurements and artificial neural network for wind measurement around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 231, 105239.
- Lanzolla, A., & Spadavecchia, M. (2021). Wireless sensor networks for environmental monitoring. *Sensors*, 21(4), 1172.
- 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.
- Ramos-Cenzano, A., Ogueta-Gutiérrez, M., & Pindado, S. (2019a). Cup anemometer measurement errors due to problems in the output signal generator system. *Flow Measurement and Instrumentation*, 69, 101621.
- Ramos-Cenzano, A., Ogueta-Gutierrez, M., & Pindado, S. (2019b). On the output frequency measurement within cup anemometer calibrations. *Measurement*, 136, 718–723.
- Ramos-Cenzano, A., Ogueta-Gutierrez, M., & Pindado, S. (2019c). Performance analysis of present cup anemometers. *Journal of Energy Systems*, 3(4), 129.
- Ripka, P., & Janosek, M. (2010). Advances in magnetic field sensors. *IEEE Sensors Journal*, 10(6), 1108–1116.
- Somov, M., & Venuganti, S. (2024). Wind direction and magnitude determination using Hall Effect-based rotary encoders on high altitude balloons. *Academic High Altitude Conference*, 2024(2).