Rancang Bangun dan Validasi *Cup* Anemometer *3D Printing* untuk Aplikasi HVAC

Muhammad Latif[1], Pratikto[2*], Wirenda Sekar Ayu[3]

[1, 2, 3] Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
[1] E-mail : muhammad.latif.tptpu421@polban.ac.id
[2] E-mail : pratikto@polban.ac.id*
[3] E-mail :wirendasekar@polban.ac.id

ABSTRAK

Monitoring kecepatan udara merupakan parameter krusial dalam sistem *Heating, Ventilation, and Air Conditioning* (HVAC) karena berpengaruh langsung terhadap efisiensi energi dan kenyamanan termal. Namun, anemometer komersial seringkali mahal, tidak fleksibel dalam integrasi sistem, dan kurang ekonomis untuk implementasi skala kecil atau edukasi dan penelitian. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun sistem *cup* anemometer berbasis 3D *printing* yang ekonomis, mudah diintegrasikan, dan memiliki tingkat akurasi sesuai standar industri HVAC (*error* <10%). Desain alat mengadopsi konfigurasi *hemisphere cup* dengan diameter 80 mm dan lengan 20 mm, dicetak menggunakan material PLA+. Kalibrasi dilakukan menggunakan *wind tunnel* dengan acuan *hot wire* anemometer pada rentang kecepatan optimal 3.053-12.06 m/s. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu mencapai koefisien determinasi R^2 sebesar 0,998 dan rata-rata *error* 1,60% dan kesalahan maksimum 4,45%. Validasi ini membuktikan bahwa alat yang dikembangkan layak digunakan untuk aplikasi edukasi, penelitian, serta sistem HVAC skala kecil dengan akurasi yang memadai.

Kata Kunci
Cup anemometer, HVAC, 3D *printing*, *wind tunnel*, kalibrasi

Air velocity monitoring is a crucial parameter in Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) systems as it directly affects energy efficiency and thermal comfort. However, commercial anemometers are often expensive, lack flexibility for system integration, and are less economical for small-scale or educational implementations. This study aims to design and develop a cost-effective, easily integrable cup anemometer system based on 3D printing technology, with an accuracy level meeting HVAC industry standards (±10%). The device adopts a hemisphere cup configuration with a diameter of 80 mm and an arm length of 20 mm, printed using PLA+ material. Calibration was conducted using a wind tunnel, referencing a hot-wire anemometer within an optimal velocity range of 3.053–12.06 m/s. The test results showed that the system achieved a coefficient of determination (R^2) of 0.998, with an average error of 1.60% and a maximum error of 4.45%. These validation results indicate that the developed device is feasible for educational, research, and small-scale HVAC applications with adequate accuracy.

Keywords
Cup anemometer, HVAC, 3D printing, wind tunnel, calibration

1. PENDAHULUAN

Pengukuran kecepatan udara merupakan salah satu parameter penting dalam sistem *Heating, Ventilation, and Air Conditioning* (HVAC) karena secara langsung memengaruhi performa sistem, efisiensi energi, serta kenyamanan termal di dalam ruangan (1). Aliran udara yang tidak sesuai standar dapat menyebabkan ketidakseimbangan distribusi udara, peningkatan beban kerja peralatan, dan konsumsi energi yang berlebihan (2). Oleh karena itu, pemantauan dan pengendalian kecepatan udara secara akurat sangat dibutuhkan, baik dalam tahap instalasi, pengujian, maupun perawatan sistem HVAC (3).

Seiring berkembangnya kebutuhan akan sistem HVAC yang efisien dan berkelanjutan, permintaan terhadap alat ukur kecepatan udara yang akurat, mudah digunakan, dan terjangkau pun semakin meningkat, khususnya untuk aplikasi edukasi, penelitian, serta sistem HVAC (4). Anemometer tipe *cup* menjadi salah satu jenis alat ukur kecepatan udara yang umum digunakan karena desainnya sederhana, biaya pembuatan rendah, dan tidak memerlukan rangkaian elektronik yang kompleks (5). Namun demikian, perangkat anemometer komersial yang tersedia di pasaran seringkali memiliki harga relatif mahal serta kurang fleksibel untuk kebutuhan penelitian dan pengembangan prototipe.

Sebagai alternatif solusi, penelitian ini mengembangkan sistem *cup* anemometer berbasis teknologi pencetakan 3D (3D *printing*) dengan konfigurasi *hemisphere cup* dan material PLA+. Pendekatan ini dipilih karena teknologi 3D *printing* menawarkan keunggulan dalam hal kecepatan produksi, kemudahan modifikasi desain, dan efisiensi biaya, sehingga sangat cocok untuk keperluan edukasi dan alat prototipe (6). Sistem anemometer yang dirancang dilengkapi dengan sensor optocoupler untuk mendeteksi putaran baling-baling dan mikrokontroler ESP32 sebagai pemroses data, yang kemudian mengonversi jumlah putaran menjadi nilai kecepatan udara secara digital.

Untuk memastikan akurasi dan keandalan alat, proses kalibrasi dilakukan di *wind tunnel* dengan membandingkan hasil pengukuran sistem anemometer yang dikembangkan dengan *hot wire* anemometer sebagai alat standar acuan, pada rentang kecepatan udara 1 hingga 12 m/s. Penelitian ini bertujuan menghasilkan alat ukur kecepatan udara yang akurat, stabil, ekonomis, serta fleksibel, yang dapat dimanfaatkan untuk aplikasi penelitian dan *monitoring* sistem HVAC berskala kecil, sekaligus menjadi alternatif solusi bagi keterbatasan anemometer komersial yang ada di pasaran.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengukuran Kecepatan Udara dalam HVAC

Kecepatan udara merupakan parameter fundamental dalam sistem HVAC karena mempengaruhi efisiensi distribusi udara, kenyamanan termal, dan konsumsi energi (7). Menurut standar NEBB, pengujian dan penyeimbangan sistem ventilasi harus dilakukan dengan instrumen yang memiliki akurasi minimal ±10% untuk memastikan kinerja sistem sesuai desain. Pengukuran kecepatan udara yang akurat sangat penting untuk optimasi sistem ventilasi, terutama dalam aplikasi industri yang memerlukan kontrol lingkungan yang presisi.

2.2 Prinsip Kerja *Cup* Anemometer

Cup anemometer merupakan instrumen yang mengukur kecepatan angin berdasarkan prinsip rotasi. Alat ini terdiri dari tiga baling-baling cangkir (*cup*) yang berputar akibat hembusan angin (8). Hubungan matematis antara kecepatan angin dan kecepatan rotasi *cup* dinyatakan dalam persamaan:

$$V = \frac{n\ x\ 2\pi r}{t} \tag{1}$$

$$V = RPS\ x\ 2\pi r \tag{2}$$

Dimana,

V : kecepatan angin (m/s)

n : jumlah putaran dalam waktu

r : jari-jari lintasan *cup* ke poros (m)

t : waktu (detik)

RPS : *Rotation per Second* $(n/\ t)$

2.3 Teknologi 3D *Printing* untuk Instrumen Pengukuran

Penggunaan teknologi 3D *printing* dalam pembuatan instrumen pengukuran telah mengalami perkembangan signifikan (9). Keunggulan utama teknologi ini meliputi fleksibilitas desain geometris, efisiensi biaya produksi, dan kemampuan *rapid prototyping* yang memungkinkan iterasi desain yang cepat. Material PLA+ (Polylactic Acid Plus) dipilih karena memiliki karakteristik mekanik yang superior dibandingkan PLA standar, termasuk kekuatan tarik yang lebih tinggi, stabilitas dimensi yang baik, dan ketahanan terhadap deformasi (10).

2.4 Sistem Akuisisi Data dan Sensor

Sistem akuisisi data dalam alat ini menggunakan sensor optocoupler dan *encoder disk* untuk mengkonversi gerakan rotasi menjadi pembacaan kecepatan udara. ESP32 dipilih sebagai mikrokontroler karena kemampuan pemrosesan yang tinggi dan konsumsi daya yang efisien (11).

2.5 Kalibrasi dan Validasi dengan *Wind tunnel*

Wind tunnel merupakan fasilitas pengujian standar untuk kalibrasi anemometer karena kemampuannya menghasilkan aliran udara yang stabil dan terkontrol (12). Metode kalibrasi yang diterapkan adalah dengan membandingkan kinerja anemometer yang dikembangkan dengan instrumen referensi. Data yang diperoleh dari perbandingan ini selanjutnya dianalisis menggunakan metode regresi linier untuk menentukan persamaan kalibrasi.

$$y = a \cdot x + b \tag{3}$$

Dimana,

y : kecepatan angin referensi (m/s)

x : kecepatan angin hasil alat (m/s)

a : *Slope*

b : *Intercept*

Untuk mengevaluasi performa dan validitas persamaan kalibrasi yang dihasilkan, digunakan koefisien determinasi (R^2) dan *Mean Absolute Percentage Error (MAPE).*

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma(y_i - \hat{y}_i)^2}{\Sigma(y_i - \bar{y})^2} \tag{4}$$

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum \left|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right| \times 100\% \tag{5}$$

Dimana,

y_i : kecepatan angin referensi (m/s)

$\hat{y}_i$: kecepatan angin hasil alat (m/s)

$\bar{y}$: rata-rata kecepatan angin referensi (m/s)

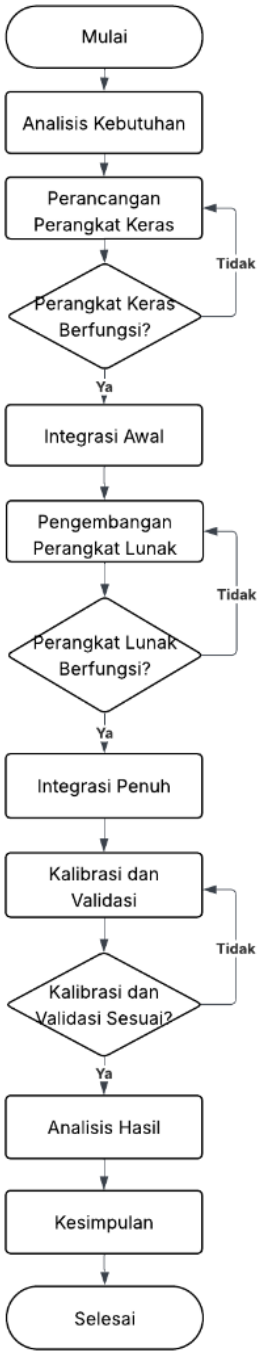
n : jumlah data

3. METODOLOGI

3.1 Metode Perancangan

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dengan tahapan sistematis yang mencakup perancangan, fabrikasi, kalibrasi, dan validasi. Metodologi yang digunakan mengikuti standar pengembangan instrumen ilmiah dengan fokus pada akurasi, pengulangan, dan

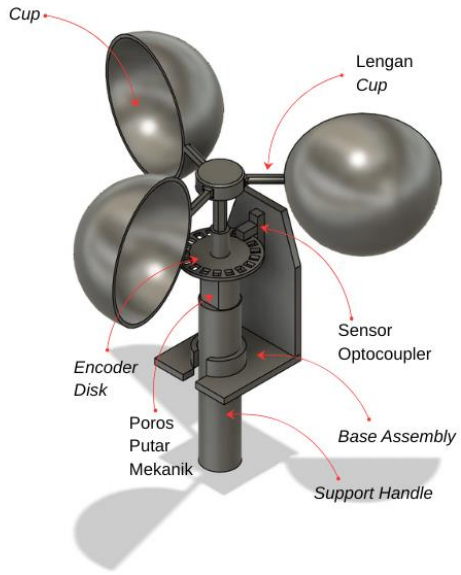
efektivitas biaya. Diagram alir metodologi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Metode Perancangan

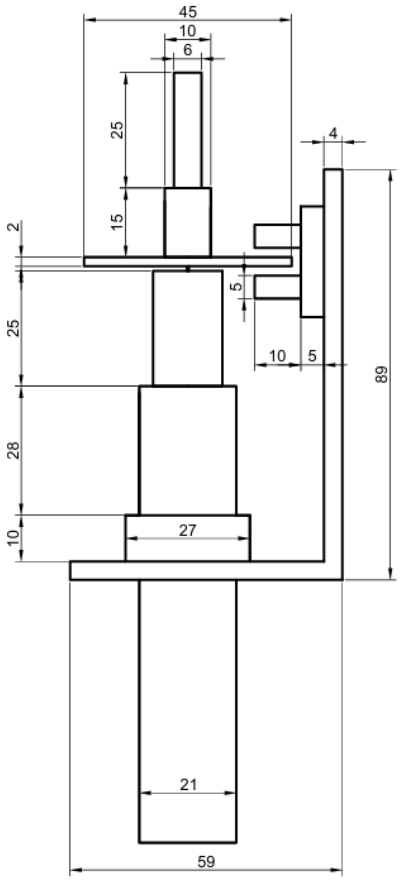
3.2 Perancangan *Cup* Anemometer

Model *hemisphere cup* dipilih berdasarkan analisis penelitian sebelumnya yang menunjukkan karakteristik aerodinamis yang stabil (13) (14). Poros putar memanfaatkan motor DC miniatur sebagai poros putar mekanik pada sistem *cup* anemometer, karena memiliki kelancaran putaran yang stabil pada kecepatan rendah hingga menengah. Pada poros dipasang *encoder disk* berdiameter 4,5 cm dengan 18 celah sebagai elemen yang dibaca oleh sensor optocoupler. Komponen utama *cup* anemometer terdiri dari beberapa bagian yang terintegrasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Bagian-Bagian *Cup* Anemometer

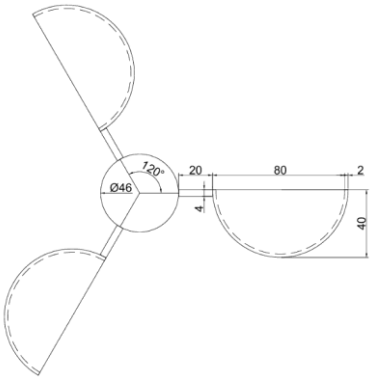
Dimensi detail badan *cup* anemometer dirancang dengan presisi tinggi untuk memastikan keseimbangan dinamis yang optimal yang ditunjukan pada Gambar 3.



Gambar 3. Dimensi Badan *Cup* Anemometer

Komponen *cup* menggunakan geometri *hemisphere* dengan dimensi diameter 80 mm dan panjang lengan 20 mm yang

telah terbukti memberikan sensitivitas optimal terhadap variasi kecepatan angin (15). Spesifikasi dimensional *cup* ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Geometri dan Dimensi *Hemisphere Cup*

Realisasi desain 3D, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5, menampilkan cawan dengan dimensi yang telah dijelaskan sebelumnya. Desain ini dirancang untuk memastikan distribusi massa yang seimbang, yang merupakan kunci untuk mencapai rotasi yang stabil.

Gambar 5. Desain 3D *Hemisphere Cup*

3.3 Sistem Elektronik dan Akuisisi Data

Sistem elektronik pada *cup* anemometer ini dirancang dengan konfigurasi modular untuk mempermudah integrasi dan pemeliharaan. Komponen-komponen utama yang membentuk sistem akuisisi data tercantum dalam Tabel 1.

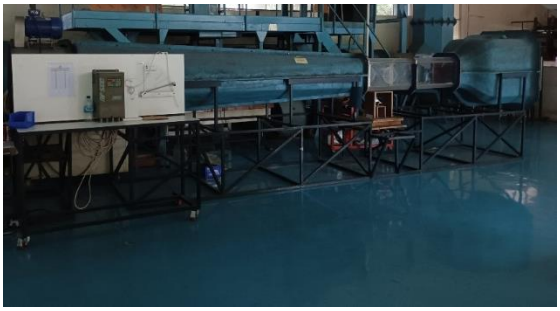
Tabel 1. Perangkat Keras

Nama	Keterangan
Mikrokontroller	ESP32 dan ESP32 Expansion Board
Sensor	Optocoupler
Encoder disk	⌀4,5 cm dengan 18 pulsa
Display	5 Inch LCD Nextion Intellegent

Sistem ini menggunakan mikrokontroler utama ESP32 (dipasang pada ESP32 Expansion Board) untuk memproses data. Rotasi dideteksi oleh sensor optocoupler yang berinteraksi dengan *encoder disk* berdiameter 4,5 cm (18 pulsa), dan hasilnya ditampilkan pada layar LCD Nextion Intelligent 5 inci untuk pembacaan langsung.

3.4 Wind tunnel

Proses kalibrasi dan validasi *cup* anemometer dilakukan di *wind tunnel* Laboratorium Aerodinamika Politeknik Negeri Bandung.



Gambar 6. *Wind Tunnel Open Loop*

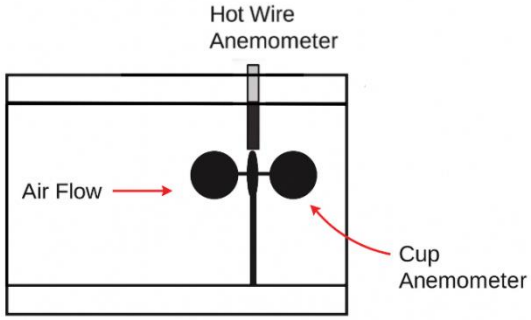
Tabel 2. Spesifikasi Wind tunnel

Nama	Spesifikasi
Inlet Contraction	47 cm x 37cm x 37 cm
Test Section	61,9 cm x 17 cm x 17 cm
Diffuser	Panjang 138 cm
Fan	Diameter 79 cm
RPM Maksimal	3600 RPM

Berdasarkan pengujian, *wind tunnel* ini menunjukkan keseragaman aliran yang stabil dan dapat diterima untuk pengujian aerodinamis, dengan karakteristik aliran udara pada *test section* memiliki deviasi kecepatan -1% sampai 3% dalam pengujian kecepatan rata-rata 21,31 m/s.

3.5 Kalibrasi dan Validasi

Penempatan *cup* anemometer dan sensor referensi (*hot wire* anemometer) di dalam *wind tunnel* diposisikan untuk memastikan kondisi aliran udara yang representatif selama pengujian. Proses kalibrasi diawali dengan penentuan kecepatan udara pada *wind tunnel* dalam rentang 1 hingga 12 m/s dengan mengendalikan putaran motor (RPM) kipas. Pada fase ini, *hot wire* anemometer digunakan sebagai instrumen acuan untuk mengukur kecepatan udara aktual yang dihasilkan pada setiap pengaturan RPM. Setelah diperoleh nilai RPM yang mampu menghasilkan kecepatan udara 1–12 m/s, *cup* anemometer kemudian diposisikan pada area pengujian dan dilakukan variasi kecepatan udara untuk proses kalibrasi. Penempatan *cup* anemometer selama proses kalibrasi ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Penempatan Anemometer Saat Kalibrasi

Selanjutnya, kecepatan angin diatur secara bertahap dalam rentang 1 hingga 12 m/s. Selama pengaturan kecepatan ini, data dicatat secara simultan. Data yang terkumpul kemudian dianalisis menggunakan metode regresi linier untuk memperoleh persamaan kalibrasi yang akan diimplementasikan pada program sehingga mendapatkan pembacaan kecepatan pada *cup* anemometer yang mendekati anemometer referensi. Setelah kalibrasi selesai, validasi dilakukan melalui pengujian independen untuk memverifikasi akurasi dan kinerja alat dalam kondisi operasional yang sesungguhnya.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Rancang Bangun Perangkat Keras

Proses fabrikasi menggunakan teknologi 3D *printing* berhasil menghasilkan komponen *cup* anemometer dengan toleransi ±0,2 mm. Hasil fabrikasi *cup* anemometer ditunjukkan pada Gambar 8.

Gambar 8. Hasil *Printing* 3D

Integrasi komponen elektronik dan mekanik dilakukan dengan mempertimbangkan kemudahan akses untuk maintenance dan kalibrasi. Sistem terintegrasi yang siap untuk pengujian ditunjukkan pada Gambar 9.

Gambar 9. Integrasi Hardware

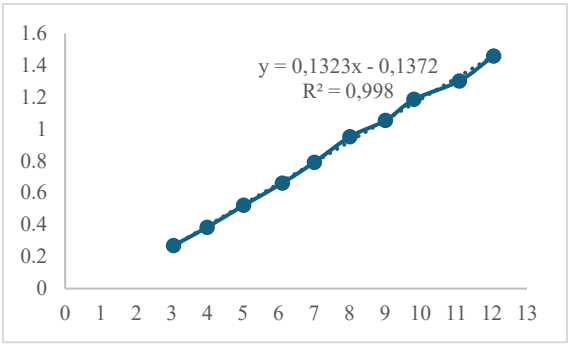
4.2 Analisis Kalibrasi

Proses kalibrasi menggunakan *wind tunnel* menghasilkan data yang komprehensif dengan 12 titik kecepatan dalam rentang 1-12 m/s. Hasil pengukuran menunjukkan adanya *dead zone* pada kecepatan rendah (<3 m/s) yang disebabkan oleh *insufficient torque* untuk menggerakkan sistem rotasi.

Tabel 3. Data Kalibrasi

Target (m/s)	RPM Fan	Kecepatan (m/s)	*Cup* Anemometer	Status
1	36,99	1,045	0	*Dead zone*
2	64,44	2,043	0	*Dead zone*
3	95,94	3,053	0,27	Data Aktif
4	122,8	3,997	0,384	Data Aktif
5	155,7	5,03	0,522	Data Aktif
6	191,3	6,118	0,661	Data Aktif
7	227,1	7,018	0,792	Data Aktif
8	270,2	8,02	0,952	Data Aktif
9	302,2	9,022	1,054	Data Aktif
10	338,7	9,824	1,186	Data Aktif
11	363,3	11,11	1,301	Data Aktif
12	413,6	12,06	1,458	Data Aktif

Analisis regresi linier pada data aktif (3.053-12.06 m/s) menghasilkan grafik seperti berikut:



Gambar 10. Grafik Persamaan Kalibrasi

Dengan koefisien determinasi R^2 = 0.998, menunjukkan korelasi yang sangat kuat antara kecepatan referensi dan output *cup* anemometer. Kemudian persamaan kalibrasi y = 0,1323x - 0,1372 diimplementasikan pada program. Ditunjukan pada Gambar 11.

```
const double CALIBRATION_SLOPE = 0.1323;
const double CALIBRATION_INTERCEPT = -0.1372;

double applyCalibratedSpeed(double rawSpeed) {
  if (rawSpeed < 0.0001) {
    return 0.0;
  }

  double calibratedSpeed = (rawSpeed + abs(CALIBRATION_INTERCEPT)) / CALIBRATION_SLOPE;
  calibratedSpeed = round(calibratedSpeed * 1000.0) / 1000.0;

  return (calibratedSpeed < 0) ? 0.0 : calibratedSpeed;
}
```

Gambar 11. Impelmentasi pada program

4.3 Validasi dan Evaluasi Performa

Validasi dilakukan dengan implementasi persamaan kalibrasi pada sistem embedded dan pengujian independen. Hasil validasi menunjukkan performa yang memuaskan dengan karakteristik *error* yang dapat diterima untuk aplikasi HVAC.

Tabel 4. Data Validasi

Hot wire	*Cup* Anemometer	Keterangan
1,045	0,000	*Dead zone*
2,043	0,000	*Dead zone*
3,053	3,189	4,45%
3,997	4,044	1,18%
5,03	5,006	0,48%
6,118	6,021	1,58%
7,018	7,042	0,34%
8,02	8,230	2,62%
9,022	9,091	0,76%
9,824	10,118	3,00%
11,1	10,956	1,30%
12,06	12,095	0,29%

Hasil validasi menunjukkan performa yang memuaskan dengan karakteristik *error* pada rentang operasional 3,05-12,06 m/s. Pada rentang ini, *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) sistem adalah 1,60%, yang mengindikasikan tingkat konsistensi pengukuran yang tinggi. *Error* maksimum yang tercatat adalah 4,45%, sementara *error* minimum hanya 0,29%.

5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Sistem *cup* anemometer berbasis 3D *printing* yang dikembangkan telah berhasil menunjukkan performa yang sangat baik, memenuhi standar akurasi industri HVAC (±10%). Alat ini memiliki koefisien determinasi (R 2) sebesar 0,998, mengindikasikan korelasi yang sangat kuat antara kecepatan referensi dan output anemometer. Tingkat konsistensi pengukuran tinggi, dibuktikan dengan Mean Absolute Percentage *Error* (MAPE) sebesar 1,60%, dan *error* maksimum hanya 4,45%, jauh di bawah batas toleransi yang ditetapkan. Sistem ini beroperasi secara andal dalam rentang kecepatan 3,05 hingga 12,06 m/s, menjadikannya sesuai untuk sebagian besar aplikasi HVAC

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diterapkan untuk peneliti yang akan mengembangkan penelitian mengenai topik ini, yaitu sebagai berikut:

1. Mengoptimasi desain bearing dan rotor guna mengurangi *dead zone* di bawah 3 m/s.
2. Mengeksplorasi material alternatif dengan ketahanan mekanik dan temperatur lebih baik dari PLA+.
3. Mengembangkan sistem kompensasi temperatur untuk menjaga akurasi di berbagai kondisi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bandung yang telah memfasilitasi selama proses pembelajaran.

DAFTAR PUSTAKA

1. Pratama C, Tarigan N, Silitonga N, Sitorus IJ. Commissioning Test of a New Production Facility for Separation Radioisotope Phosphorus-32 (32P) and Purification 32P with Ion Exchange. 2023.
2. Tarigan N, Silitonga N, Sitorus IJ. Analisis Volume Udara yang Dibutuhkan Blower dalam Pemindahan Tepung Tapioka dari Unit Dryer ke Unit Shifter. *IRA J Tek Mesin Apl (IRAJTMA)*. 2025;4(1):8–13. https://doi.org/10.56862/irajtma.v4i1.178.
3. Sugeng S, Nizar TN, Jatmiko DA, Hartono R, Kerlooza YY. Kalibrasi Sensor Monitoring Cuaca pada Area Lokal untuk Meningkatkan Akurasi pada Sensor Biaya Rendah. *Komputika*. 2024;13(2):277–87. https://doi.org/10.34010/komputika.v13i2.13949.
4. Ardi S, Arifianto MJF, Prasetyani L, Nugroho W, Ponco A. Feasibility Study: Pengembangan Platform Inovatif untuk Monitoring dan Audit Energi sebagai Solusi Digital dalam Meningkatkan Efisiensi Pengelolaan Energi pada Bangunan Gedung.
5. Rahmayanti D, Khamaludin K, Nanda RA. *GREEN-TECHNOLOGY*. 2023. Accessed Jul. 07, 2025. Available from: https://www.researchgate.net/publication/388381704
6. Hilmy F, Mawarsih E, Firmansyah R. Pelatihan Proses Slicing Untuk Menentukan Parameter Optimal Dalam Proses 3D Printing (Additive Manufacturing). *JURPIKAT*. 2025;6(2):1059–67. https://doi.org/10.37339/jurpikat.v6i2.2271.
7. Duapadang N. Analisis Kenyamanan Termal Ruang Studio Desain [Thesis]. Makassar: Universitas Hasanuddin; 2020.
8. Kristensen L. The Perennial Cup Anemometer. 1999.
9. Gutarra JS, Gastelo-Roque JA, Sulluchuco J. A cup anemometer using 3D additive manufacturing. In: *Proc IEEE INTERCON 2020*. 2020. https://doi.org/10.1109/INTERCON50315.2020.9220193.
10. Mukherjee T. Special issue: The science and technology of 3D printing. *Materials (Basel)*. 2021 Nov 1. https://doi.org/10.3390/ma14216261.
11. Saputra MJ, Suryono RR. Implementasi Teknologi Irigasi Tetes pada Tanaman Jagung Menggunakan Sensor Soil Moisture dan Mikrokontroler ESP32. *MALCOM*. 2024;5(1):111–8. https://doi.org/10.57152/malcom.v5i1.1642.
12. Muflih M, Atmojo AY. Sistem Akuisisi Data Pengujian Kinerja Daya Turbin Angin Menggunakan Fasilitas Terowongan Angin. *J Tek Mesin dan Transportasi (JTMT)*. 2013;9(1). https://doi.org/10.26905/jtmt.v9i1.4588.
13. Roibas-Millan E, Cubas J, Pindado S. Studies on cup anemometer performances carried out at IDR/UPM Institute: Past and present research. *Energies*. 2017 Nov 1. https://doi.org/10.3390/en10111860.
14. Ari A. Rancang Bangun Anemometer Analog. 2011.