

RANCANG BANGUN ALAT UKUR KELAJUAN DAN ARAH (KECEPATAN) ANGIN BERBASIS MIKROKONTROLER ARDUINO UNO

The Design of Speed and Direction (Velocity) Measuring Instruments Based On Arduino Uno Microcontroller

Oleh:

Bagas Priyambodo¹⁾, Drs. Sumarna, M.Si, M.Eng²⁾
outsidercrw@gmail.com¹⁾, marnaelins@yahoo.co.id²⁾

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk merancang alat ukur kelajuan angin (anemometer) menggunakan sensor berbasis *shaft encoder*, merancang alat penunjuk arah angin menggunakan sensor resistif kawat nikelin, dan merancang alat transmisi data nirkabel ke sistem pengolah data. Perancangan alat ini terbagi menjadi 2 tahap, tahap pertama diawali dengan mendesain rangkaian elektronik untuk sensor kelajuan angin yang berupa rangkaian pembagi tegangan dan komparator *schmitt trigger* sebagai pengkondisi sinyal *input* sensor untuk mencegah efek *noise* sebelum masuk ke mikrokontroler. Sensor yang digunakan adalah *optocoupler*, yaitu berupa *transmitter* cahaya dengan menggunakan *LED* dan *receiver* menggunakan fotodiode yang dirangkai secara seri dengan tahanan sebesar 1 k Ω . Penelitian tahap kedua dimulai dengan mendesain *body* anemometer, sumbu dan memilih ukuran *cup* dan merancang *wind vane* beserta sensor resistif. Sensor resistif yang digunakan untuk *wind vane* ini adalah kawat nikelin dengan panjang total 65.34 cm yang dipasang melingkar pada permukaan papan kayu berbentuk lingkaran. Telah dirancang alat ukur kelajuan angin (anemometer) dan penunjuk arah angin (*wind vane*), yang terdiri dari rangkaian *optocoupler* dan komparator *schmitt trigger*, *cup* dengan jari-jari 3.25 cm, *bearing* dengan diameter 0.9 cm, dan sumbu anemometer dengan panjang 31 cm. Anemometer dengan panjang lengan *cup* 3.45 cm memiliki nilai faktor anemometer yang lebih kecil daripada anemometer dengan panjang lengan *cup* 7.45 cm. Sementara, penunjuk arah angin (*wind vane*) menggunakan sensor berbasis resistivitas kawat nikelin. Anemometer yang telah dirancang memiliki jangkauan pembacaan laju angin mulai dari 2 m/s hingga 19.6 m/s. Resolusi penunjukkan arah angin menggunakan sensor ini mencapai 1.25°. Hasil perancangan transmisi data secara nirkabel memanfaatkan jaringan WiFi berupa mikrokontroler arduino yang telah diprogram, rangkaian *voltage shifter*, rangkaian *voltage divider*, dan modul pemancar sinyal WiFi ESP 8266.

Kata kunci: Kelajuan dan arah angin, Anemometer, Arduino Uno

Abstract

This research aimed to design the wind measuring instrument (anemometer) using shaft encoder-based sensor, design the wind direction pointer instrument with resistive-based sensor using nickelin wire, and transmit the collected data from sensor to data recorder software wirelessly. The design of this instrument was divided into 2 stages, the first stage was started by designing the electronic circuit for the wind speed sensor which consisted of voltage divider circuit and schmitt trigger as the input signal conditioner of the sensor to prevent the noise effect from entering the microcontroller device. The sensor which used was optocoupler, made up of light transmitter using LED and the receiver using photodiode sensor which mounted in series with the resistor of 1 k Ω . The second stage of this research was commenced by designing the body of anemometer, the axis, and choosing the cup's size and designing the wind vane as well as its resistive sensor. The resistive sensor which used for this wind vane was nickelin wire with the total length of 65.34 cm and mounted around the top surface of the circle-shape board. Had been designed a wind speed measuring (anemometer) and wind direction pointer (wind vane) instrument, which made up of optocoupler and schmitt trigger comparator circuit, 3.45 cm cup's rotor length, bearing's diameter of 0.9 cm, and anemometer's axis with length of 31 cm. Anemometer which equipped with rotor length of 3.45 cm had smaller anemometer factor, K , than anemometer with rotor length of 7.45 cm. Meanwhile, a wind vane was made with nickelin wire as the sensor. The anemometer could measure the wind speed from 2 m/s to 19.6 m/s. The resolution of this sensor when pointing the wind direction was up to 1.25°. The results of designing the wireless data transmission over WiFi network were a programmed arduino microcontroller, voltage shifter circuit, voltage divider circuit, and ESP 8266 WiFi signal transmitter module.

Keywords: Wind speed and direction, Anemometer, Arduino Uno

PENDAHULUAN

Angin merupakan sebuah fenomena pergerakan massa udara yang dapat diamati efeknya dan dirasakan di kehidupan sehari-hari. Angin terjadi akibat adanya perbedaan tekanan udara di dua tempat yang berbeda sehingga terjadi aliran udara dari tempat yang memiliki tekanan udara lebih tinggi ke tempat yang memiliki tekanan udara lebih rendah. Cepat lambatnya kelajuan angin bergantung pada seberapa besar perbedaan tekanan di antara kedua tempat tersebut. Sebagian besar masyarakat secara kualitatif membedakan kelajuan angin hanya dengan melihat perbedaan pergerakan benda-benda disekitarnya seperti daun, bendera, dan lain-lain. Oleh karena itu, diperlukan suatu alat yang dapat mengukur kelajuan angin secara akurat dengan memanfaatkan besaran fisis kelajuan, yaitu anemometer. Anemometer *cup* telah ditemukan sejak abad ke-19 dengan desain pertama menggunakan 4 buah *cup*. Seiring berjalannya waktu, mulai dilakukan penelitian mengenai desain anemometer *cup*. Sehingga saat ini, berdasarkan hasil penelitian tersebut ditemukan desain anemometer *cup* yang efisien dalam mengubah kelajuan angin menjadi kelajuan rotasi sumbu anemometer yaitu model 3 *cup*. Sensor yang digunakan untuk mengubah besar kelajuan angin yang mengenai anemometer *cup* menjadi pulsa-pulsa tegangan listrik ini bermacam-macam, mulai dari sensor *magnetic pulse counter*, *shaft encoder* yang memanfaatkan rangkaian *optocoupler*, dan sebagainya. Sebagian besar anemometer yang ada di pasaran menggunakan sensor *magnetic pulse counter*, namun karena sensor ini harganya mahal maka mempengaruhi harga jual anemometer tersebut yang juga semakin tinggi. Oleh karena itu, peneliti mencoba menggunakan sensor berbasis *shaft encoder* yang biayanya relatif lebih murah dari sensor magnetik. Keunggulan lainnya apabila dibandingkan dengan sensor kelajuan angin berbasis sensor magnetik adalah tidak terpengaruh oleh medan magnet yang terdapat di sekitar sensor. Sensor kelajuan angin berbasis *shaft encoder* ini terdiri dari *LED* sebagai *transmitter* cahaya dan fotodiode sebagai *receiver* cahaya.

Dalam perancangan anemometer, ukuran panjang lengan (rotor) *cup* anemometer perlu diperhitungkan. Anemometer pabrikan pada umumnya memiliki ukuran panjang lengan (rotor) hampir sama dengan panjang jari-jari *cup*. Oleh karena itu, panjang lengan (rotor) *cup* anemometer perlu dikaji lebih dalam sehingga dapat diketahui manfaat dan kerugiannya.

Setelah pembuatan anemometer, belum tentu pengukuran kelajuan angin pada anemometer ini seragam dengan hasil pengukuran pada anemometer lain. Oleh karena itu, diperlukan anemometer lain yang sudah terkalibrasi dengan baik untuk mengecek

seberapa besar ketidak akuratan pengukuran kelajuan angin pada anemometer buatan peneliti ini.

Karena angin tidak hanya memiliki komponen kelajuan namun juga memiliki komponen arah hembusan, maka *wind vane* pun digunakan untuk menentukan arah hembusan angin. Sebagian besar *wind vane* yang dijual di pasaran menggunakan sensor arah angin dengan metode *disk encoder* yang juga memanfaatkan rangkaian *optocoupler*. Namun penggunaan *disk encoder* ini memiliki keterbatasan, yaitu resolusi sudutnya kecil. Sensor jenis ini hanya dapat mengenali 8 arah mata angin dengan resolusi sebesar 45° . Dengan menggunakan sensor resistif berupa kawat nikrom, diharapkan resolusi sudut menjadi lebih tinggi sehingga *wind vane* menjadi lebih teliti saat menunjukkan arah angin.

Perangkat anemometer dan *wind vane* biasanya ditempatkan pada tempat-tempat seperti menara ataupun *roof top* sehingga untuk memberi daya listrik sensor-sensor dan juga pentransmisi data hasil pembacaan sensor tersebut harus membentangkan kabel yang sangat panjang. Pentransmisi data dengan kabel yang panjang memiliki efek negatif, yaitu mudah mengalami induksi oleh fluktuasi medan magnet yang ada lingkungan sekitar. Akibatnya, muncul tegangan induksi pada kabel transmisi yang menyebabkan terdistorsinya sinyal asli yang berasal dari instrumen. Oleh karena itu, diperlukan metode lain untuk mentransmisikan data dari instrumen tanpa mengalami efek induksi magnet.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat Penelitian

Desain dan uji coba anemometer dan penunjuk arah angin ini dilaksanakan dari bulan Desember 2016 sampai dengan November 2017 bertempat di kediaman peneliti dan di laboratorium Elektronika Instrumentasi, Jurusan Pendidikan Fisika, FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta.

Langkah Penelitian

Penelitian ini dibagi dalam dua tahapan, tahap I berupa perancangan sistem dan bentuk fisik anemometer, *wind vane*, dan integrasi modul *WiFi ESP 8266* dengan mikrokontroler arduino uno. Tahap II meliputi pengujian di dalam lingkungan lab dan menangani setiap anomali atau ketidaksesuaian hasil yang terdeteksi pada setiap blok sistem. Kemudian dilanjutkan dengan uji lapangan dengan periode pengujian selama 2 hari.

1. Penelitian tahap I

- a. Membuat skema dan merangkai komparator *schmitt trigger* menggunakan *IC LM324* dengan rangkaian berupa *optocoupler* yang tersusun dari *LED* sebagai *transmitter* dan fotodiode sebagai *receiver* kemudian mengukur

besar tegangan *output* rangkaian *receiver* cahaya yang dihasilkan dengan memfungsikannya sebagai *shaft encoder*.

- b. Membuat kode program pada Arduino IDE yang berfungsi membaca *input* pulsa tegangan dari rangkaian komparator menggunakan IC LM324. *Input non-inverting* dari salah satu *pin* LM324 ini terhubung secara paralel dengan resistor 560 Ω yang memiliki fungsi sebagai pembagi tegangan fotodiode pada rangkaian *optocoupler*.
- c. Membuat skema dan merangkai pembagi tegangan antara kawat *nichrome* dan resistor yang berfungsi untuk mengukur sudut yang terbentuk dari perubahan arah angin.
- d. Menghubungkan salah satu kaki *input non-inverting* dari LM324 secara paralel dengan kawat *nichrome* dan menguatkan perubahan tegangan yang terjadi pada kawat *nichrome* sehingga tegangan *ouputnya* dapat dibaca oleh *input* analog pada Arduino Uno.
- e. Membuat kode program dengan Arduino IDE untuk membaca *input* analog dari perubahan tegangan pada kawat *nichrome* yang telah dikuatkan oleh rangkaian *OpAmp*.
- f. Membuat pencatu daya dengan tegangan 3.3 V memanfaatkan IC LM317T untuk modul *WiFi* ESP8266 agar dapat bekerja.
- g. Membuat rangkaian *voltage upshifter* untuk *pin* TX ESP8266 karena *output* pulsa tegangan maksimum yang dapat dihasilkan hanya 3.3 V, sehingga dinaikkan menjadi 4.7 V dan dapat terbaca oleh *pin* RX Arduino Uno.
- h. Membuat rangkaian pembagi tegangan dengan resistor untuk *pin* TX Arduino Uno sebelum memasuki *pin* RX modul *WiFi* ESP8266 sehingga *output* hasil pembagian tegangan tersebut sebesar 3.3 V.

2. Penelitian Tahap II

- a. Melakukan pengujian jumlah pulsa tiap 1 periode putaran yang dihasilkan pada sistem anemometer. Jika jumlah pulsa terhitung sebanyak 45 atau sesuai dengan jumlah lubang yang dibuat pada cakram, maka dilanjutkan dengan pengujian sistem lain.
- b. Memvariasi panjang lengan *cup* anemometer dengan panjang awal 7.45 cm kemudian dibuat lebih pendek menjadi 3.45 cm kemudian mengobservasi efeknya terhadap kelajuan anguler sumbu anemometer. Peneliti langsung memilih untuk membuat panjang lengan tersebut menjadi 3.45 cm karena semakin kecil nilai perbandingan antara panjang lengan *cup* dengan jari-jari *cup*, maka efisiensi aerodinamis yang dihasilkan oleh anemometer akan meningkat (S. Pindado, 2013: 9).

- c. Mengkarakterisasi dan mengkalibrasi sistem anemometer untuk mendapatkan spesifikasi teknisnya.
- d. Mengukur resistensi kawat nikrom setiap interval sudut 5° yang telah terpasang pada dudukan sehingga didapatkan pola grafik perubahan resistensi kawat tersebut terhadap kenaikan sudut. Pengukuran resistensi dilakukan dengan menggunakan interval sudut karena pada dudukan kayu yang dibuat sudah diberi tanda nilai sudut dengan resolusi 5° sehingga mudah untuk menentukan titik sudut yang harus diukur selanjutnya. Kawat yang dipasang melingkar membuat pengukuran berdasarkan panjang kawat menjadi sulit dilakukan.
- e. Mengukur perubahan tegangan pada setiap titik sudut yang ditunjuk oleh pengontak *wind vane* dan kawat mulai dari 5° hingga 360° dengan interval pengukuran 5° . Jika sudah mengetahui gradien kenaikan sudut terhadap tegangan, ditunjukkan dengan nilai x volt/ 1° , kemudian parameter gradien atau sensitivitas hasil pengukuran tersebut digunakan sebagai acuan untuk menentukan besar penguatan tegangan. Nilai tegangan yang terukur perlu dikuatkan agar mencapai resolusi tegangan pada ADC mikrokontroler sehingga diharapkan ADC dapat mendeteksi perubahan tiap kenaikan sudut 1° .
- f. Membubuhkan parameter hasil karakterisasi maupun kalibrasi seperti nilai tegangan yang dibaca oleh ADC mengenai arah angin dan fungsi transfer hubungan pulsa, f , dengan kelajuan angin, U , pada program bernama “Anemometer Data Logger” sehingga program tersebut dapat menyajikan data mengenai kelajuan angin dan arah angin.

Teknik Analisis Data

Data yang diperoleh dari sistem anemometer ini berupa pulsa-pulsa tegangan dengan frekuensi tertentu. Pulsa-pulsa tegangan yang dihasilkan ini berasal dari rangkaian sensor berbasis *shaft encoder* yang terintegrasi pada sumbu anemometer dan rangkaian komparator *schmitt trigger*. *Output* sensor berbasis *shaft encoder* berupa fluktuasi tegangan DC akibat adanya hembusan angin yang memutar *cup* anemometer.

Fluktuasi tegangan DC tersebut dikondisikan dengan rangkaian komparator *schmitt trigger* agar fluktuasi tegangan tersebut dapat dibentuk menjadi pulsa-pulsa tegangan dengan frekuensi tertentu sesuai dengan besar kelajuan angin.

Penentuan tegangan referensi komparator *schmitt trigger* didasarkan pada nilai *output* tegangan yang terukur pada resistor yang terhubung secara seri dengan fotodiode. Resistor ini berfungsi sebagai

pembagi tegangan dengan ukuran nilai resistensi yang digunakan bergantung kepada rasio impedansi fotodiode terhadap nilai impedansi total rangkaian pembagi tegangan.

Apabila fotodiode mendeteksi cahaya dengan intensitas yang tinggi saat cahaya yang dipancarkan *transmitter* masuk melalui lubang pada cakram, maka nilai tegangan yang terdeteksi pada resistor pembagi tegangan meningkat hingga mencapai nilai tertentu dan ditetapkan menjadi nilai tegangan maksimal. Begitu pula saat intensitas cahaya yang diterima oleh fotodiode mengecil, maka tegangan yang terukur pada resistor ini mengecil dan nilai tegangan terkecil yang terukur ditetapkan sebagai tegangan minimal.

Berdasarkan hasil karakterisasi *output* tegangan maksimal dan minimal yang terukur pada rangkaian pembagi tegangan tersebut, tegangan referensi yang ditetapkan oleh peneliti dalam perancangan komparator ini bernilai sekitar 33% dari tegangan maksimal karena faktor letak lubang pada cakram yang kurang presisi dalam pembuatannya. Letak lubang yang tidak presisi ini menyebabkan tegangan maksimal yang terukur pada sensor setiap cahaya dari *transmitter* memasuki lubang tidak sama besar.

Ketika periode tegangan maksimal yang terukur oleh sensor pada suatu lubang di bawah tegangan maksimal tertinggi, maka tidak ada fluktuasi tegangan DC yang terabaikan oleh komparator karena tegangan referensinya masih di bawah nilai tegangan maksimal sehingga dapat meminimalisir "*undetected pulse*". Jika rangkaian pengondisi sinyal dari sensor ini sudah memiliki parameter yang tepat, maka jumlah pulsa-pulsa tegangan yang dihitung dalam satu periode putaran sumbu anemometer memiliki nilai 45, sesuai dengan jumlah lubang yang dibuat pada cakram.

Data berbentuk pulsa-pulsa tegangan ini kemudian dihitung dengan sintaks "*attach interrupt*" dan "*detach interrupt*" oleh mikrokontroler arduino uno. Jeda waktu untuk mengeksekusi kedua sintaks tersebut sebesar 1 detik agar *output* data yang diolah oleh mikrokontroler menjadi bentuk frekuensi.

Jeda waktu tidak mempengaruhi hasil pengukuran jika kelajuan angin yang terukur bernilai konstan karena seperti yang diketahui jika terdapat suatu benda bergerak dengan kelajuan konstan, maka nilai gradien antara jarak yang ditempuh terhadap waktu akan selalu menunjukkan nilai yang sama. Jeda waktu ini berpengaruh jika dalam waktu kurang dari 1 detik terjadi akselerasi ataupun deakselerasi hembusan angin yang menyebabkan kelajuan angin dalam interval 1 detik menjadi berbeda-beda namun tidak terdeteksi. Instrumen ini didesain untuk dapat mendeteksi akselerasi dan deakselerasi hembusan angin dengan interval 1 detik.

Frekuensi hasil pengolahan pulsa-pulsa tegangan oleh mikrokontroler dikirimkan secara nirkabel dengan memanfaatkan jaringan *WiFi* menuju perangkat perekam data (*data logger*) berupa komputer yang

telah dilengkapi dengan *WiFi card* sehingga dapat terhubung dengan instrumen. Di dalam komputer tersebut terdapat program yang berisi sintaks-sintaks persamaan matematis hubungan antara frekuensi dan kelajuan angin, sehingga berdasarkan persamaan matematis tersebut, kelajuan angin yang terukur oleh anemometer dapat diketahui.

Data yang diperoleh dari variasi besar sudut yang ditunjuk oleh *wind vane* adalah perubahan nilai resistivitas kawat nikrom. Rangkaian yang digunakan untuk mengubah perubahan resistivitas menjadi perubahan tegangan sehingga dapat terbaca oleh ADC mikrokontroler adalah jembatan Kelvin. Dengan mengintegrasikan sensor resistif ke salah satu rangkaian pembagi tegangan rangkaian ini, tegangan yang terukur pada 2 buah pembagi tegangan mengalami perubahan jika sudut yang ditunjuk oleh *wind vane* berubah.

Variasi sudut yang dilakukan dengan interval kenaikan 5° mulai dari sudut 5° hingga 360°. Dengan mempertimbangkan perubahan tegangan yang terukur dari hasil variasi sudut dan resolusi ADC mikrokontroler, maka besarnya penguatan tegangan dapat ditentukan. IC mikrokontroler arduino uno ATmega 328p 10 bit memiliki resolusi ADC sekitar 4.88 mV. Resolusi ADC sebesar 4.88 mV dihitung dengan membagi *span* tegangan minimal dan maksimal yang dapat dibaca oleh ADC, yaitu sebesar 5 V dengan jumlah *integer* yang dihasilkan oleh ADC 10 bit sebesar 2¹⁰ atau 1024. Sehingga, misalnya terjadi perubahan sudut sebesar 5° dan beda tegangan yang terukur kurang dari 4.88 mV, maka beda tegangan tersebut dapat dikuatkan terlebih dahulu hingga bernilai sama dengan resolusi ADC tersebut atau lebih tinggi agar ADC dapat mengkonversinya menjadi *integer* dengan nilai yang berbeda dengan kondisi sebelum terjadi perubahan sudut.

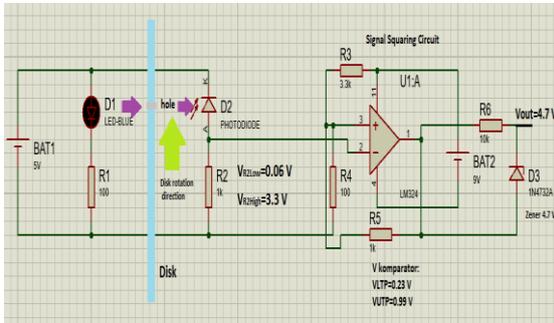
Rangkaian penguat tegangan yang digunakan berjenis penguat instrumentasi dengan IC OpAmp bertipe LM324. Semakin besar penguatan yang diberikan maka ADC dapat mendeteksi perubahan sudut yang lebih kecil dari 5°. Namun penguatan yang diberikan juga harus dibatasi agar efek *noise* yang ikut dikuatkan tidak mempengaruhi hasil pengukuran.

Tegangan hasil penguatan tersebut kemudian dibaca oleh ADC mikrokontroler dan diubah menjadi bilangan bulat yang berada dalam rentang nilai mulai dari 0 hingga 1023. Bilangan bulat (*integer*) tersebut kemudian dikonversi menjadi arah angin dengan membuat *range* bilangan bulat yang terbaca oleh ADC tiap *span* sudut 45° pada arah tertentu (dengan asumsi peneliti membagi arah mata angin menjadi 8 arah). Alokasi *range* sudut yang ditetapkan oleh peneliti untuk masing-masing arah antara lain untuk arah utara, 0°-45°, arah timur laut 45°-90°, dan seterusnya.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

A. Rancangan Sensor Pengukur Kelajuan Angin Berbasis *Shaft Encoder*

Berikut ini merupakan rancangan rangkaian elektronik sensor pengukur kelajuan angin berbasis *shaft encoder*.



Gambar 18. Rangkaian elektronik sensor pengukur kelajuan angin berbasis *shaft encoder* dan *schmitt trigger* sebagai *squaring circuit*.

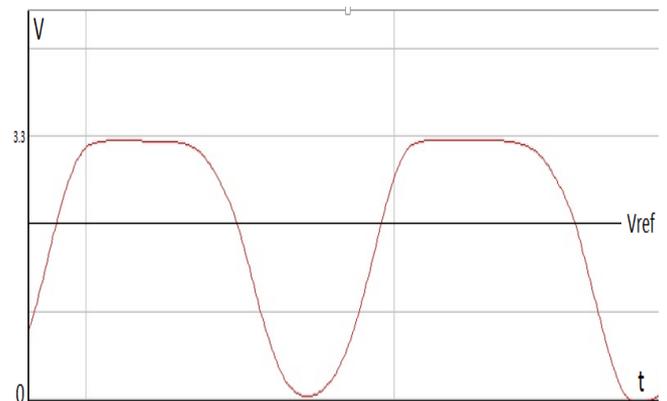
Berdasarkan gambar 18, diketahui bahwa rangkaian *optocoupler* tersusun dari rangkaian *transmitter* dan *receiver* yang ditempatkan pada posisi saling berhadapan satu sama lain dengan jarak 1 cm. Pada rangkaian *transmitter*, *LED* digunakan sebagai sumber cahaya dan pada rangkaian *receiver*, fotodiode digunakan sebagai sensor cahaya. Ruang kosong di antara rangkaian *transmitter* dan *receiver*, terpasang cakram berlubang dengan posisi tegak lurus terhadap *LED* dan fotodiode. Letak lubang-lubang tersebut tepat berada di depan *LED* dan fotodiode sehingga intensitas cahaya dari *LED* yang diterima oleh fotodiode mengalami fluktuasi saat cakram berputar.



Gambar 19. Desain fisik cakram berlubang dengan diameter 12 cm

Cakram yang digunakan memiliki jumlah lubang sebanyak 45 buah dengan letak lubang sejauh 4.5 cm dari pusat cakram. Setiap lubang memiliki diameter 2.5 mm. Saat cahaya dari *LED* terhalang oleh permukaan cakram, intensitas cahaya yang diterima oleh fotodiode mengecil dan resistansi fotodiode membesar. Akibatnya, tegangan V_{R2} menjadi

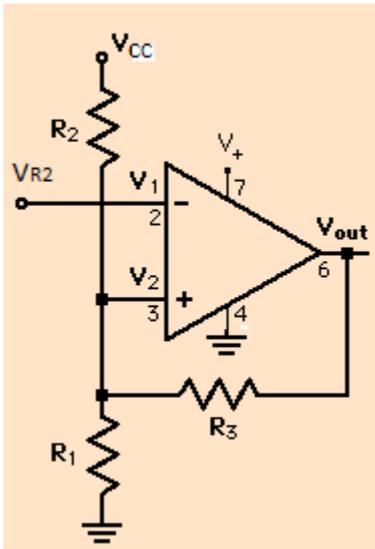
mengecil. Namun, saat cahaya dari *LED* masuk melalui lubang pada cakram dan mengenai fotodiode, intensitas cahaya yang diterima fotodiode menjadi lebih besar dibandingkan saat cahaya terhalang oleh cakram. Resistansi fotodiode yang membesar mengakibatkan tegangan yang terukur pada V_{R2} membesar. Fluktuasi intensitas cahaya akibat rotasi sumbu anemometer menyebabkan fluktuasi tegangan V_{R2} . Tegangan yang terukur pada V_{R2} berfluktuasi mulai dari 0.06 V hingga 3.3 V.



Gambar 20. Fluktuasi tegangan V_{R2}

Untuk meminimalisir hal-hal yang tidak diinginkan seperti riak-riak tegangan (*ripple voltage*) pada V_{R2} , rangkaian komparator dimodifikasi dengan menambahkan sebuah *feedback* dari *output* komparator pada tegangan referensi. Rangkaian komparator ini disebut dengan komparator schmitt trigger. Rangkaian komparator schmitt trigger yang digunakan merupakan komparator tipe *inverting* karena *input* dimasukkan pada *pin inverting* pada IC OpAmp.

Komparator schmitt trigger memiliki dua buah tegangan referensi, yaitu $V_{ref\ low}$ dan $V_{ref\ high}$. $V_{ref\ low}$ merupakan tegangan referensi saat kondisi *output* komparator bernilai *low*, sedangkan $V_{ref\ high}$ adalah tegangan referensi saat kondisi *output* komparator bernilai *high*.



Gambar 21. Rangkaian komparator schmitt trigger

Berdasarkan gambar 21, besar tegangan referensi pada saat keadaan *output* komparator bernilai *low* ($V_{out} = 0$ V) adalah

$$V_{ref\ low} = \frac{V_{cc}}{R_{p13} + R_2} R_{p13} \quad (35)$$

di mana:

$V_{ref\ low}$ = tegangan referensi saat *output* komparator bernilai *low*

R_{p13} = resistansi paralel dari R_1 dan R_3

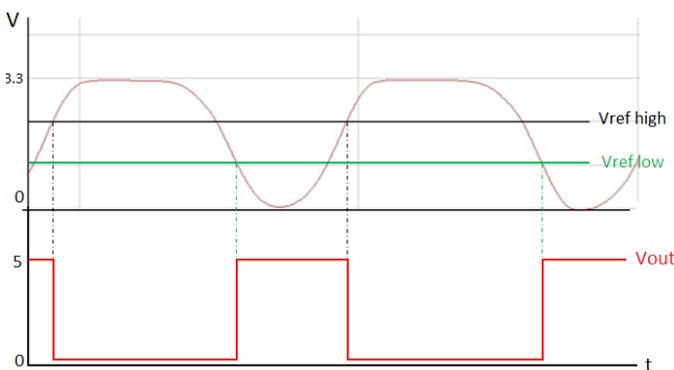
Sedangkan saat *output* komparator pada kondisi *high* ($V_{out} = V_{cc}$), persamaan (35) menjadi

$$V_{ref\ high} = \frac{V_{cc}}{R_{p23} + R_1} R_1 \quad (36)$$

di mana:

$V_{ref\ high}$ = tegangan referensi saat *output* komparator bernilai *high*

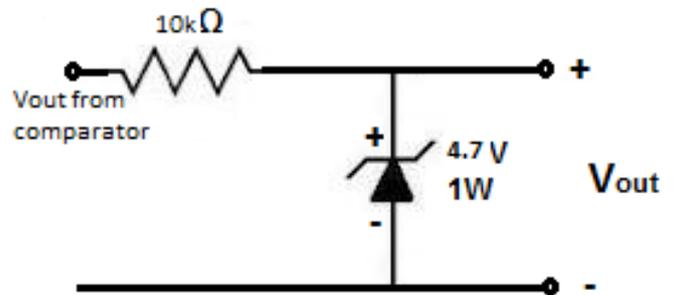
R_{p23} = resistansi paralel R_2 dan R_3



Gambar 22. *Output* rangkaian komparator schmitt trigger

$V_{ref\ high}$ pada rangkaian komparator schmitt trigger yang dibuat adalah sebesar 0.99 V, sedangkan $V_{ref\ low}$ sebesar 0.23 V. Pada gambar 22, saat kondisi *output* komparator bernilai *high* dan tegangan V_{R2} mencapai $V_{ref\ high}$, maka kondisi *output* berubah menjadi *low* dan tegangan referensi berubah menjadi $V_{ref\ low}$. Sedangkan saat kondisi *output* komparator bernilai *low* dan tegangan V_{R2} mencapai $V_{ref\ low}$, maka *output* komparator schmitt trigger berubah menjadi *high* dan tegangan referensi berubah menjadi $V_{ref\ high}$. Jika rangkaian komparator schmitt trigger telah bekerja dengan baik, maka pulsa-pulsa tegangan *output*, V_{out} , yang dihitung oleh *counter* mikrokontroler arduino selama satu periode putaran sumbu anemometer menghasilkan jumlah yang sama dengan lubang yang dibuat pada cakram, yaitu sebanyak 45 buah.

Tegangan *output* yang dihasilkan rangkaian komparator schmitt trigger adalah 7.6 V saat kondisi *high* dan 0.01 V saat kondisi *low*. Karena mikrokontroler arduino hanya dapat menerima tegangan *input* dengan *range* 0 V hingga 5 V, maka mikrokontroler arduino memerlukan rangkaian regulator tegangan agar tidak mengalami *overload* saat menerima tegangan *output* komparator schmitt trigger. Rangkaian regulator tegangan ini terdiri dari sebuah resistor dan sebuah dioda zener yang dipasang secara seri.



Gambar 23. Rangkaian regulator tegangan

Resistor pada rangkaian regulator tegangan seperti yang ditunjukkan pada gambar 23 berfungsi sebagai pembatas arus yang melewati dioda zener. Arus yang mengalir pada rangkaian regulator tegangan saat tegangan *output* komparator schmitt trigger bernilai 7.6 V ditentukan dengan persamaan (38).

$$V_{out\ high} = V_R + V_Z \quad (37)$$

Persamaan (37) disusun ulang menjadi

$$V_R = V_{out\ high} - V_Z$$

$$I_z R = V_{out\ high} - V_z$$

$$I_z = \frac{V_{out\ high} - V_z}{R} \quad (38)$$

di mana:

I_z = arus yang mengalir pada dioda zener (A)

$V_{out\ high}$ = tegangan *output* komparator schmitt trigger saat kondisi *high* (V)

R = ukuran resistansi resistor (Ω)

Dengan memasukkan nilai tegangan *breakdown* dioda zener, ukuran resistor yang digunakan, dan $V_{out\ high}$ komparator maka arus yang mengalir pada dioda zener, I_z , adalah

$$I_z = \frac{7.6 - 4.7}{10^4} = 0.29\ mA \quad (39)$$

Arus maksimal yang diizinkan untuk mengalir pada dioda zener adalah

$$P_{max\ zener} = I_{z\ max} V_z$$

$$I_{z\ max} = \frac{P_{max}}{V_z} = \frac{1}{4.7} = 212\ mA \quad (40)$$

di mana:

$P_{max\ zener}$ = daya maksimal dioda zener (W)

$I_{z\ max}$ = arus maksimal yang diizinkan (A)

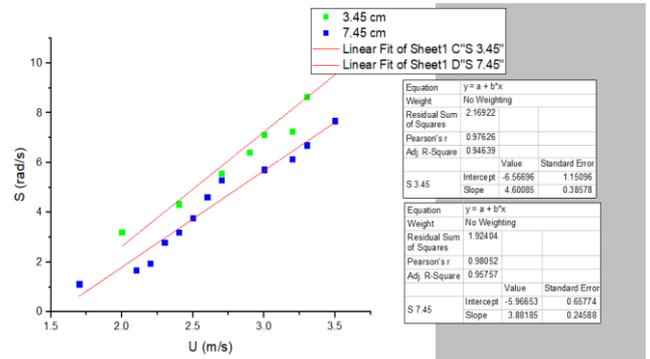
Tegangan *output* regulator tegangan ini sesuai dengan tegangan *breakdown* dioda zener, yaitu sebesar 4.7 V sehingga mikrokontroler arduino tidak mengalami kerusakan akibat *overload* tegangan.

B. Pengaruh Variasi Panjang Lengan (Rotor) Cup Anemometer

Setelah dilakukan variasi panjang lengan *cup* anemometer sebesar 3.45 cm dan 7.45 cm, terjadi perbedaan kelajuan anguler sumbu anemometer saat diuji menggunakan hembusan angin dengan kelajuan yang sama.

Pada gambar 24, kelajuan anguler, S , anemometer dengan panjang rotor 3.45 cm lebih cepat daripada anemometer dengan panjang rotor 7.45 cm pada kelajuan angin, U , yang sama. Hal ini ditunjukkan dengan nilai gradien grafik hubungan kelajuan angin,

U , dengan kelajuan anguler, S , untuk panjang rotor 3.45 cm yang lebih besar daripada nilai gradien grafik untuk panjang rotor 7.45 cm.



Gambar 24. Grafik hubungan kelajuan angin yang terukur oleh *handheld* anemometer dan kelajuan anguler sumbu anemometer berdiameter *cup* 6.5 cm dengan variasi panjang lengan *cup* (rotor) 3.45 cm dan 7.45 cm

Berdasarkan perhitungan momen inersia yang terdapat pada lampiran 1, diketahui bahwa dengan mengurangi panjang rotor sebesar 4 cm, maka momen inersia total tiap rotor *cup* anemometer tersebut menjadi 21.6 % dari momen inersia awalnya. Tanpa mengubah diameter *cup*, maka gaya seret (*drag force*) yang dihasilkan oleh angin tidak berubah. Namun, akibat berkurangnya panjang rotor *cup*, besar momen gaya sumbu anemometer yang dihasilkan berkurang.

Mengacu perhitungan momen gaya (torsi) sumbu anemometer pada lampiran 2, maka momen gaya akhir untuk panjang rotor 3.45 cm (τ_{akhir}) menjadi sebesar 46.3 % momen gaya awalnya (τ_{awal}).

Berkurangnya momen gaya pada sumbu anemometer menyebabkan batas minimal (*threshold*) *starting angular speed* atau kelajuan anguler awal anemometer mengalami kenaikan. Akibatnya, *range* atau jangkauan kelajuan angin yang dapat dideteksi oleh anemometer *cup* dengan panjang rotor 3.45 cm menjadi lebih sempit jika dibandingkan dengan anemometer *cup* dengan panjang rotor 7.45 cm. Di sisi lain, anemometer *cup* dengan panjang rotor yang pendek memiliki keuntungan. Menurut (Santiago Pindado, 2013: 3), kelajuan anguler sumbu anemometer, ω , dipengaruhi oleh panjang rotor *cup*. Hal ini menyebabkan kelajuan anguler sumbu anemometer tidak bernilai konstan selama satu periode putaran pada kelajuan angin yang sama. Kelajuan anguler sumbu anemometer beresilasi seperti gelombang dan secara matematis dijabarkan dalam bentuk deret fourier pada persamaan (41).

$$\omega(t) = \omega_0 + \omega_1 \sin(\omega_0 t + \varphi_1) + \omega_3 \sin(3\omega_0 t + \varphi_3) \quad (41)$$

di mana:

$\omega(t)$ = kelajuan anguler sumbu anemometer sebagai fungsi waktu (rad/s)

ω_0 = konstanta kelajuan anguler suku nol sumbu anemometer (rad/s)

ω_1 = konstanta harmonik kelajuan anguler sumbu anemometer suku pertama (rad/s)

ω_3 = konstanta harmonik kelajuan anguler sumbu anemometer suku ketiga (rad/s)

ϕ_1 = beda fase suku harmonik pertama

ϕ_3 = beda fase suku harmonik ketiga

Pada persamaan (41), panjang rotor *cup* anemometer mempengaruhi konstanta harmonik suku ketiga. Semakin panjang rotor *cup*, maka nilai konstanta harmonik ketiga, ω_3 , semakin besar dan menyebabkan amplitudo osilasi kelajuan anguler semakin tinggi. Amplitudo osilasi kelajuan anguler yang tinggi menyebabkan kelajuan anguler rata-rata pada satu periode putaran sumbu anemometer menjadi berkurang.

Berkurangnya kelajuan anguler rata-rata mengakibatkan faktor anemometer, K , menjadi semakin besar. Hal ini dapat dilihat pada tabel 1.

Selain karena pengaruh panjang rotor *cup*, faktor anemometer juga dipengaruhi oleh besar kelajuan angin. Pada tabel 1 dapat dilihat bahwa semakin kencang laju angin, maka nilai faktor anemometer semakin mengecil. Hal ini berlaku untuk panjang rotor 3.45 cm dan 7.45 cm.

Tabel 1. Nilai faktor anemometer dengan variasi

Rotor 3.45 cm			Rotor 7.45 cm		
U (m/s)	S (rad/s)	K (U/rS)	U (m/s)	S (rad/s)	K (U/rS)
2	3.21	18.05951	1.7	1.12	20.37392
2.4	4.33	16.06587	2.1	1.68	16.77852
2.7	5.58	14.02525	2.2	1.95	15.14369
2.9	6.42	13.09314	2.3	2.79	11.06541
3	7.12	12.21299	2.4	3.21	10.03575
3.2	7.26	12.77598	2.5	3.77	8.901073
3.3	8.66	11.04529	2.6	4.61	7.570353
3.4	9.9	9.954619	2.7	5.31	6.825162
3.6	10.34	10.09167	3	5.72	7.03994

kelajuan angin dan panjang rotor *cup*

Anemometer dengan nilai faktor anemometer yang kecil merupakan anemometer yang baik ($K \approx 1$). Kecilya nilai faktor anemometer menandakan

anemometer memiliki efisiensi aerodinamis yang tinggi karena dapat mengubah sebagian besar energi yang dibawa oleh angin menjadi putaran sumbu anemometer. Anemometer hasil perancangan menunjukkan nilai faktor anemometer yang masih tergolong besar apabila dibandingkan dengan faktor anemometer beberapa jenis anemometer pada gambar 2. Oleh karena itu, anemometer hasil perancangan ini masih kurang baik.

C. Hasil Karakterisasi dan Pengkalibrasian Anemometer

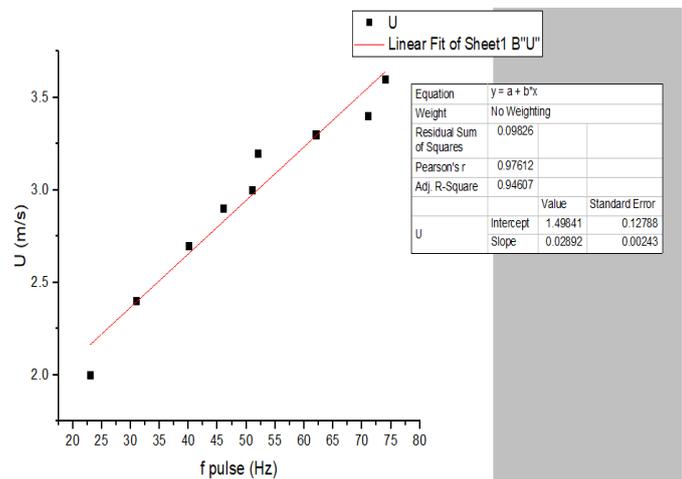
Setelah mendapatkan desain akhir anemometer *cup* ini, didapatkan beberapa spesifikasi teknis umum melalui berbagai pengujian seperti berikut

1. Sensitivitas dan Linearitas Anemometer

Dengan memvariasi kelajuan angin pada sumber angin yang mendekati laminer (mempunyai kelajuan konstan) mulai dari 2 m/s hingga 3.6 m/s dan menetapkan panjang lengan *cup* sebesar 3.45 cm, diperoleh grafik hubungan antara jumlah cacah pulsa tiap detik (frekuensi pulsa) dengan kelajuan angin, U .

Berdasarkan grafik hasil karakterisasi pada gambar 25, diketahui bahwa kecenderungan kenaikan cacah pulsa dengan kenaikan kelajuan angin, U , membentuk kurva linear sehingga didapatkan nilai sensitivitas anemometer atau koefisien kalibrasi berdasarkan hubungan frekuensi pulsa dan kelajuan angin adalah sebesar 0.0313 m/pulsa. Persamaan linear ideal hubungan antara keduanya adalah $U(f) = 0.0313(f - 23) + 2$.

Fungsi transfer dari sensor kelajuan ini juga merupakan fungsi linear yang dituliskan sebagai $U(f_r) = 0.0313(Nf_r - 23) + 2$, dimana N merupakan jumlah lubang yang terdapat pada cakram dan f_r adalah frekuensi rotasi sumbu anemometer yang nilainya bergantung pada kelajuan angin, U , panjang rotor, R , serta faktor anemometer, K . Jumlah lubang N yang dibuat pada cakram adalah 45 buah dengan jarak antar lubang 8° sehingga persamaan fungsi transfer tersebut menjadi $U(f_r) = 1.41f_r + 1.28$.



Gambar 25. Grafik hubungan jumlah cacah pulsa per detik f dengan kelajuan angin U

2. Jangkauan dan *Span* Laju Angin

Jangkauan kelajuan angin yang dapat dideteksi oleh anemometer *cup* ini mulai dari 2 m/s hingga 19.6 m/s sehingga *span* kelajuan angin adalah sebesar 17.6 m/s.

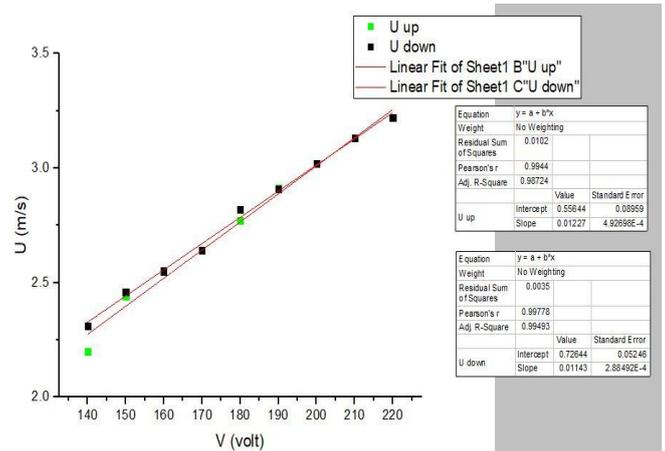
3. Histeresis Anemometer

Berdasarkan pengujian yang dilakukan dengan variasi tegangan sumber pada kipas angin, didapatkan grafik hubungan antara tegangan sumber, V , dengan kelajuan angin, U . Variasi tegangan sumber yang diberikan adalah secara 2 arah, yaitu tahap pertama mulai dari 140 hingga 220 V dengan langkah 10 V kemudian dari 220 V hingga 140 V dengan langkah yang sama.

Tabel 2. Hasil pengukuran laju angin, U , dengan memvariasi tegangan kipas

V kipas (Volt)	U naik (m/s)	U turun (m/s)
140	2.2	2.31
150	2.44	2.46
160	2.55	2.55
170	2.64	2.64
180	2.77	2.82
190	2.91	2.91
200	3.02	3.02
210	3.13	3.13
220	3.22	3.22

Berdasarkan grafik pada gambar 26, nilai kelajuan angin, U , meningkat secara linear sebanding dengan kenaikan tegangan yang diberikan. Sedangkan ketika tegangan diturunkan dengan jumlah langkah yang sama seperti saat dinaikkan, pola yang dihasilkan tetap cenderung linear sehingga dapat disimpulkan bahwa anemometer ini tidak memiliki histeresis.



Gambar 26. Grafik hubungan antara tegangan sumber kipas angin V dan kelajuan angin U

4. Pengkalibrasian Anemometer Buatan Peneliti Dengan Menggunakan Anemometer Kincir

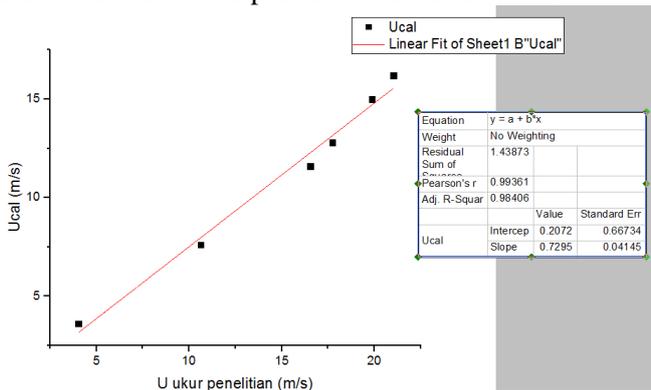
Karena faktor anemometer, K , pada anemometer hasil perancangan tidak bernilai satu (tidak ideal), yang ditandai dengan perkalian antara panjang rotor *cup* dengan laju anguler sumbu tidak bernilai sama dengan laju angin ($U \neq \omega_{sumbu} R_{rotor}$), maka anemometer ini harus dikalibrasi dengan anemometer lain. Pengkalibrasian dilakukan menggunakan anemometer berjenis kincir sebagai kalibratornya. Proses pengkalibrasian dilakukan dengan memvariasi kelajuan angin yang dihembuskan pada kedua anemometer. Setiap variasi laju angin menggunakan *blower*, anemometer buatan menunjukkan hasil pengukuran sebesar U , sedangkan anemometer kincir yang digunakan sebagai kalibrator menunjukkan nilai U_{cal} .

Tabel 3. Hasil pengukuran kelajuan angin pada anemometer buatan, U , dan anemometer kalibrator, U_{cal}

Anemometer buatan peneliti (m/s)	Anemometer kalibrator (m/s)	Deviasi (m/s)
4.03	3.6	± 0.43
10.64	7.6	± 3.04
16.55	11.6	± 4.95
17.74	12.8	± 4.94
19.87	15	± 4.87
21.03	16.2	± 4.83

Dari tabel 3 dapat dilihat bahwa deviasi hasil pengukuran kelajuan angin antara anemometer buatan peneliti dan kalibrator terlalu besar pada kelajuan angin di atas 3.6 m/s (mengacu pada anemometer kalibrator), maka dibuat persamaan matematis yang menyatakan hubungan kelajuan angin yang terukur pada anemometer buatan peneliti terhadap

anemometer kalibrator. Hal ini dilakukan agar deviasi hasil pengukuran laju angin antara anemometer kalibrator dan buatan peneliti tidak terlalu besar.



Gambar 27. Grafik kalibrasi kelajuan angin pada anemometer buatan peneliti, U , dengan kelajuan angin pada anemometer kalibrator, U_{cal}

Berdasarkan grafik kalibrasi pada gambar 27, didapatkan persamaan matematis hubungan U dan U_{cal} dengan bentuk $U_{cal}(U) = 0.7295U + 0.2072$. Anemometer hasil perancangan mulai berputar saat kelajuan angin yang terukur pada anemometer kalibrator sebesar 2 m/s. Kelajuan angin di saat sumbu anemometer mulai berputar disebut sebagai *starting speed* anemometer.

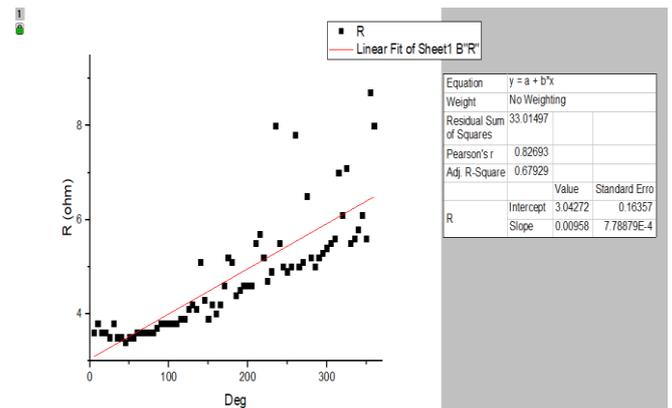
D. Hasil Karakterisasi Sensor Arah Berbasis Resistivitas Kawat Nikrom dan Perancangan *Wind vane*

1. Karakterisasi Sensor Arah Berbasis Resistivitas Kawat Nikrom

Kawat nikrom merupakan kawat yang terbuat dari beberapa campuran logam seperti nikel, aluminium, dan besi sehingga memiliki nilai hambatan jenis yang berbeda dengan masing-masing logam penyusunnya. Kawat yang digunakan pada sensor arah angin ini memiliki diameter 0.5 mm dan panjangnya 65.34 cm. Hasil karakterisasi kawat nikrom ini antara lain sebagai berikut:

a. Sensitivitas, Linearitas, dan Area *Dead Band* Sensor Resistif Kawat Nikrom

Berikut merupakan grafik hubungan sudut dan resistansi kawat nikrom dengan interval kenaikan sudut sebesar 5° .

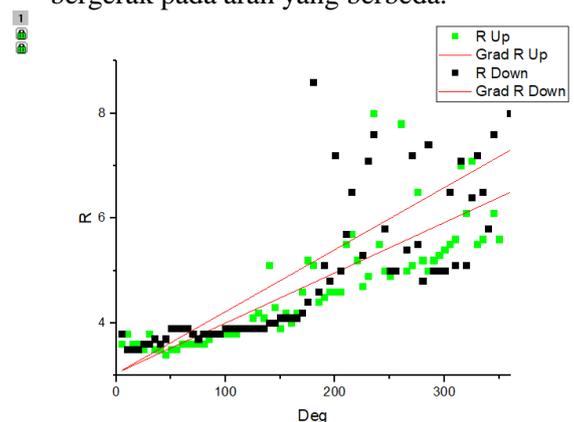


Gambar 28. Grafik hubungan antara sudut penunjuk arah angin dan resistansi kawat nikrom pada suhu lingkungan 25°C

Berdasarkan grafik pada gambar 28, diketahui bahwa nilai sensitivitas kawat nikrom berdiameter 0.5 mm tersebut adalah $0.00958 \Omega/1^\circ$. Selain itu, bentuk pola data-data tersebut cenderung berbentuk linear. Persamaan matematis hubungan antara sudut yang dibentuk oleh penunjuk arah mata angin dan resistansi pada sensor arah angin tersebut adalah $R(\theta) = 0.00958\theta + 3.0427$. Terdapat area dimana sensor arah ini tidak dapat menunjukkan arah sama sekali karena adanya gumpalan lem yang digunakan untuk merekatkan ujung kawat pada permukaan kayu. Area tersebut terletak pada sudut 0° hingga 5° .

b. Histerisis Sensor Resistif Kawat Nikrom

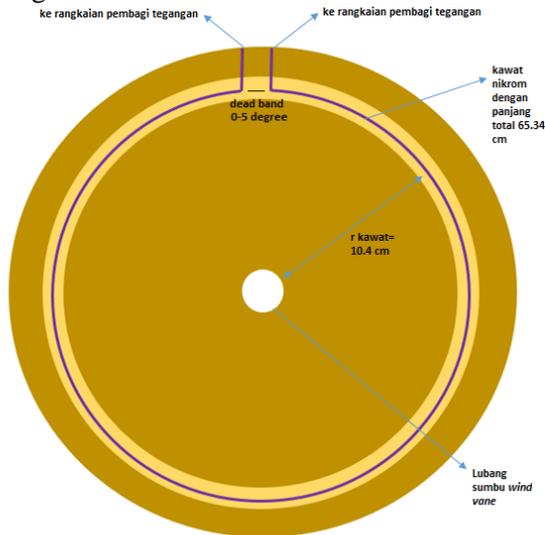
Keberadaan histerisis pada sensor resistif kawat nikrom ini dapat dilihat pada gambar 29. Pengukuran resistansi dengan variasi kenaikan sudut sebesar 5° pada gambar 29 menunjukkan bahwa ketika dilakukan pengukuran dengan 2 arah yang berbeda, yaitu arah naik dari titik sudut 5° hingga 360° dan arah sebaliknya dari 360° hingga 5° terjadi penyimpangan nilai resistansi. Penyimpangan nilai resistansi yang terukur pada kawat nikrom ini merupakan tanda terjadinya peristiwa histerisis. Hal ini diakibatkan oleh perbedaan luas penampang pengontak yang menyinggung kawat saat bergerak pada arah yang berbeda.



Gambar 29. Grafik hubungan antara sudut dan resistansi kawat nikrom diukur secara 2 arah (naik dan turun)

2. Perancangan Alat Penunjuk Arah Angin (*Wind vane*)

Dengan memanfaatkan kayu yang sudah dibentuk menjadi silinder tipis, peneliti menempelkan kawat nikrom secara melingkar pada permukaan atasnya. Desain alat ini dapat dilihat pada gambar 30.

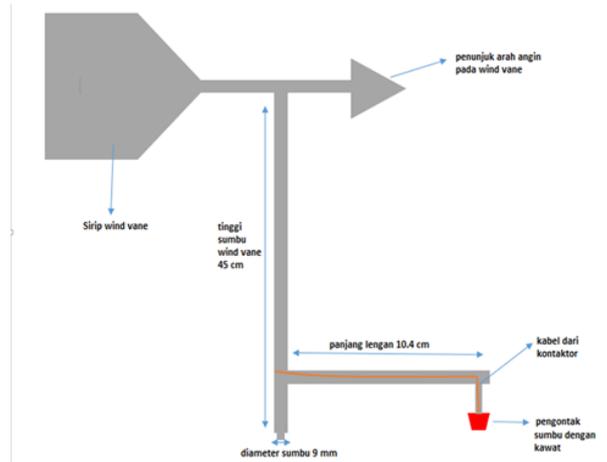


Gambar 30. Sensor penunjuk arah angin berbasis resistivitas kawat nikrom

Agar persinggungan dengan kawat nikrom menjadi lebih kuat ketika *wind vane* bergerak mengikuti arah hembusan angin, maka di sekeliling kawat nikrom yang dipasang pada kayu tersebut diberi celah dengan lebar 0.5 cm dan kedalamannya 0.2 cm.

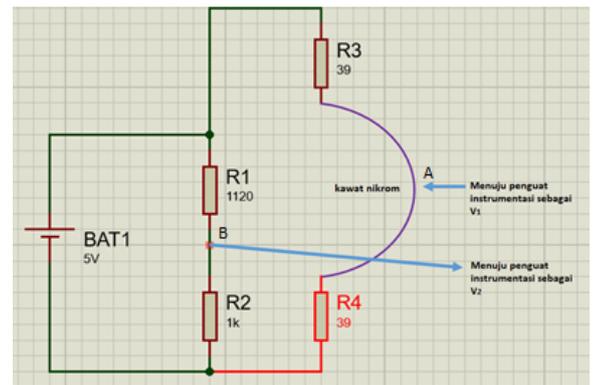
Hasil perancangan sumbu *wind vane* dan lengan yang berfungsi sebagai penyinggung kawat dapat dilihat pada gambar 31.

Ujung bawah dari sumbu *wind vane* tersebut dihubungkan dengan *bearing* yang sudah dipasang pada kayu berbentuk silinder sehingga sumbu *wind vane* dapat berputar mengikuti arah angin saat terjadi hembusan. Sirip *wind vane* memiliki bidang yang luas agar dapat menghasilkan momen gaya yang dapat menggerakkan lengan penyinggung kawat.



Gambar 31. Sumbu *wind vane* dan lengan penyinggung kawat

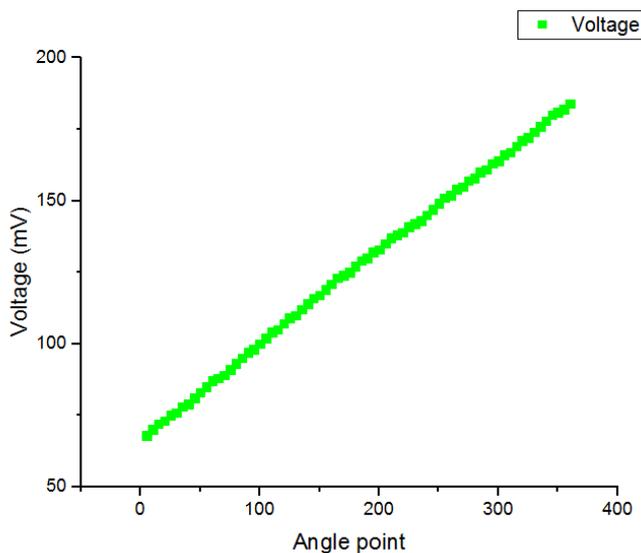
Kabel yang dihubungkan dengan penyinggung kawat berfungsi untuk mengukur tegangan kawat pada posisi tertentu dan hasil pengukuran tegangan tersebut kemudian dijadikan *input* pada rangkaian penguat instrumentasi. Rangkaian elektronik yang berfungsi mengkonversi perubahan resistansi pada kawat nikrom menjadi perubahan tegangan adalah rangkaian jembatan kelvin. Jembatan kelvin merupakan pengembangan lebih lanjut dari jembatan wheatstone. Jembatan jenis ini digunakan karena lebih peka mendeteksi perubahan resistansi yang sangat kecil bila dibandingkan dengan jembatan wheatstone.



Gambar 32. Rangkaian jembatan kelvin

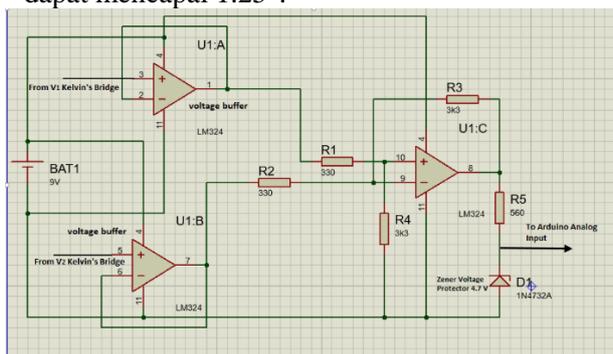
Dengan menetapkan ukuran resistor yang dipasang pada rangkaian jembatan kelvin seperti yang tertera pada gambar 32, hasil pengukuran tegangan antara titik A dan B menunjukkan kenaikan sebesar 1 mV hingga 2 mV tiap kenaikan sudut 5° . Tegangan *offset* yang terukur antara titik A dan B ketika *wind vane* menunjuk titik sudut 5° pada papan (sebagai acuan titik nol) sebesar 68 mV. Setelah dilakukan pengukuran tegangan antara titik A dan B hingga mencapai sudut 360° , diketahui bahwa pola kenaikan sudut

terhadap kenaikan tegangan membentuk kurva linier. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 33. Berdasarkan grafik pada gambar 33, maka tegangan yang terukur pada titik A dan B jembatan kelvin perlu dikuatkan sehingga dapat memperbaiki resolusinya. Penguatan tegangan yang digunakan sebesar 10 kali. Setelah dikuatkan sebesar 10 kali, resolusi tegangan antara titik A dan B jembatan kelvin yang sebelumnya bernilai 1 mV hingga 2 mV, kini meningkat menjadi 10 mV hingga 20 mV setiap kenaikan sudut 5°. Jenis penguat yang digunakan adalah penguat instrumentasi. Rangkaian penguat instrumentasi ini dapat dilihat pada gambar 34.



Gambar 33. Grafik hubungan antara titik sudut yang ditunjuk oleh *wind vane* dengan tegangan yang terukur pada titik A dan B jembatan kelvin

Setelah dikuatkan, tegangan antara titik A dan B jembatan kelvin dijadikan sebagai *input* pada ADC mikrokontroler arduino. Karena ADC pada IC ATmega 328p 10 bit memiliki resolusi 5 mV, maka setiap kenaikan sudut 5° pada *wind vane* menghasilkan pertambahan nilai *integer* mulai dari 2 hingga 4. Dengan nilai *integer* sebesar 4, ketelitian penunjukkan titik sudut pada *wind vane* dapat mencapai 1.25°.

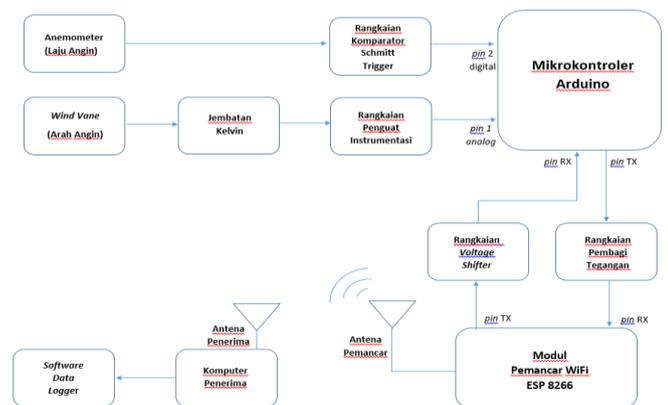


Gambar 34. Skema rangkaian penguat instrumentasi dengan penguatan sebesar 10 kali

Nilai *integer* tersebut kemudian ditransmisikan secara nirkabel menuju perangkat penerima dan diolah menggunakan *software "data logger"* sehingga dapat menampilkan sudut dan arah yang ditunjuk oleh *wind vane* pada layar. Di dalam *software "data logger"*, terdapat persamaan linier hubungan antara nilai *integer* dan titik sudut yang ditunjuk oleh *wind vane* yang dibuat berdasarkan kurva kalibrasi pada gambar 33.

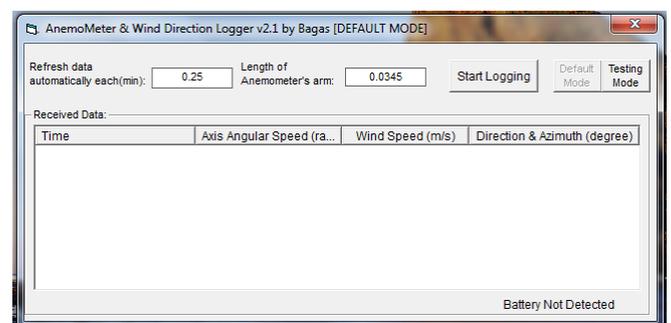
E. Hasil Rancangan Transmisi Data Menggunakan Modul WiFi ESP 8266

Hasil perancangan transmisi data kelajuan dan arah angin menggunakan WiFi dapat dilihat pada gambar 35.



Gambar 35. Diagram blok transmisi data mengenai kelajuan dan arah angin ke perangkat penerima menggunakan WiFi

Modul pemancar WiFi ESP 8266 terhubung dengan komputer penerima yang memiliki konektivitas WiFi secara nirkabel. Di dalam komputer penerima, terdapat *software data logger* yang berfungsi untuk menampilkan dan mengumpulkan data kelajuan dan arah angin.



Gambar 36. Software data logger



Gambar 37. Hasil perancangan anemometer dan *wind vane*

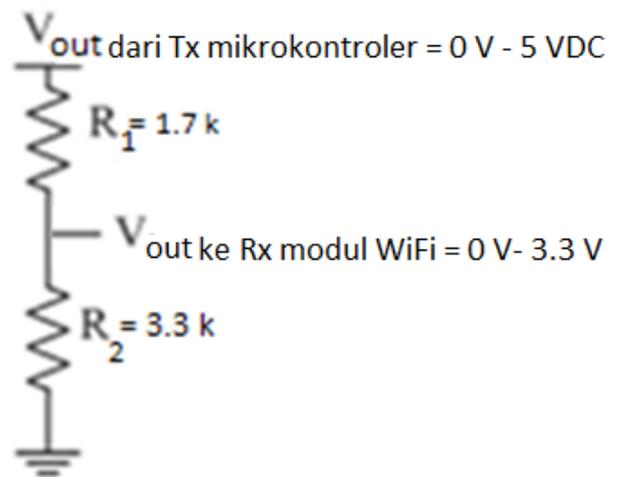
Keterangan gambar 37:

1. *Wind vane* (Penunjuk arah angin)
2. *Cup* anemometer
3. *Body* anemometer
4. Penyangga anemometer dan *wind vane*
5. Papan berbentuk lingkaran sebagai dudukan sensor resistif kawat nikelin
6. Kotak berisi rangkaian elektronik

Modul WiFi pada komputer penerima dan modul pemancar WiFi ESP8266 bekerja pada pita frekuensi 2.4 GHz, dengan *bandwidth* maksimal sebesar 1 Mbps. Jangkauan modul pemancar WiFi ESP 8266 dalam kondisi cuaca cerah dan tanpa ada penghalang dapat mencapai 40 meter. Agar dapat bekerja, modul *WiFi* ini perlu diberi catu daya sebesar 3.3 VDC.

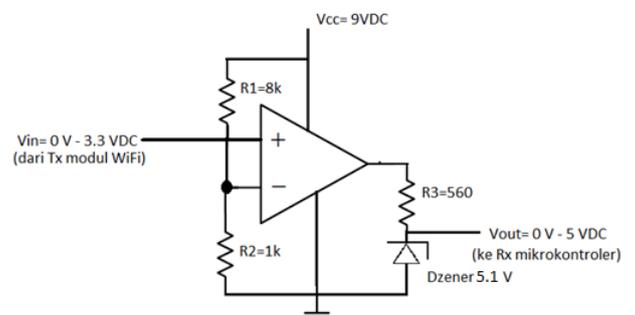
Karena mikrokontroler arduino dan modul pemancar WiFi ESP 8266 berkomunikasi secara *serial*, maka diperlukan 2 *line* (jalur) yang masing-masing berfungsi sebagai *transmit* (TX) dan *receive* (RX). Pulsa-pulsa tegangan yang dimodulasikan oleh mikrokontroler arduino melalui *pin* TX memiliki *baud rate* sebesar 9600 bps dengan amplitudo pulsa tegangan sebesar 5 V. *Baud rate* modul WiFi ESP 8266 disesuaikan dengan *baud rate* mikrokontroler arduino agar tidak terjadi kesalahan saat proses transmisi data. Untuk menyesuaikan *baud rate* ini, modul ESP 8266 dihubungkan dengan mikrokontroler arduino dan komputer sehingga dapat diatur ulang menggunakan *software* arduino IDE. Modul WiFi ESP 8266 hanya dapat menerima pulsa-pulsa tegangan dengan amplitudo maksimal 3.3 V sehingga saat mikrokontroler arduino mentransmisikan data dalam bentuk pulsa-pulsa tegangan dengan amplitudo 5 V, diperlukan rangkaian pembagi tegangan agar amplitudo pulsa-pulsa tegangan tersebut teregulasi

menjadi 3.3 V. Rangkaian pembagi tegangan terdiri dari 2 buah resistor yang dipasang secara seri. Begitu pula saat proses transmisi data dari modul WiFi menuju mikrokontroler arduino, pulsa-pulsa tegangan yang dihasilkan oleh modul WiFi harus dinaikkan amplitudonya hingga mencapai 5 V agar sesuai dengan *logic level* mikrokontroler arduino uno. *Logic level* mikrokontroler arduino berada pada rentang 0 V hingga 5 V, sedangkan *logic level* modul ESP 8266 berada pada rentang 0 V hingga 3.3 V. Amplitudo pulsa-pulsa tegangan yang transmisikan melalui *pin* Tx modul WiFi dinaikkan menggunakan rangkaian *voltage shifter*.



Gambar 38. Rangkaian pembagi tegangan

Rangkaian *voltage shifter* (penaik tegangan) tersusun dari sebuah rangkaian komparator tegangan dan regulator tegangan. Pulsa-pulsa tegangan dengan amplitudo 0 V – 3.3 V yang berasal dari Tx modul WiFi ESP8266 dijadikan sebagai *input* pada rangkaian komparator. Tegangan referensi yang digunakan pada rangkaian komparator ini sebesar 1 V. Saat amplitudo pulsa tegangan *input* bernilai 3.3 V, maka komparator tersebut menghasilkan tegangan *output* mendekati *Vcc*, yaitu sebesar 9 V. Sedangkan ketika amplitudo pulsa tegangan *input* bernilai 0 V, rangkaian komparator menghasilkan tegangan sebesar 0 V.



Gambar 39. Rangkaian *voltage shifter*

Agar tegangan *output* komparator sesuai dengan *logic level* mikrokontroler arduino, *output* rangkaian komparator tersebut dihubungkan dengan rangkaian regulator tegangan. Rangkaian regulator tegangan ini

terdiri dari sebuah resistor berukuran 560 Ω dan dioda zener dengan *breakdown voltage* 5.1 V yang dirangkai secara seri. Saat amplitudo pulsa tegangan yang dihasilkan *output* rangkaian komparator bernilai 9 V, maka dioda zener meregulasi tegangan tersebut menjadi sekitar 5.1 V.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Telah dirancang alat ukur kelajuan angin (anemometer) yang terdiri dari rangkaian *optocoupler* dan komparator schmitt trigger, *cup* dengan jari-jari 3.25 cm, lengan *cup* dengan panjang 3.45 cm, *bearing* dengan diameter 0.9 cm, dan sumbu anemometer dengan panjang 31 cm.
2. Anemometer dengan panjang lengan *cup* 3.45 cm memiliki nilai faktor anemometer, *K*, yang lebih kecil daripada anemometer dengan panjang lengan *cup* 7.45 cm.
3. Telah dirancang alat penunjuk arah angin (*wind vane*) dengan menggunakan sensor resistif kawat nikelin berdiameter 0.5 mm yang memiliki sensitivitas sebesar 0.00958 $\Omega/1^\circ$. Dengan menggunakan sensor ini, resolusi penunjukkan arah angin mencapai 1.25°.
4. Hasil perancangan transmisi data secara nirkabel memanfaatkan jaringan WiFi berupa perangkat mikrokontroler arduino yang telah diprogram menggunakan *software* arduino IDE, rangkaian *voltage shifter*, rangkaian *voltage divider*, dan modul pemancar sinyal WiFi ESP 8266. Pada perangkat penerima, terdapat *software data logger* yang berfungsi untuk merekam laju dan arah angin.

Saran

1. Perlu adanya pengadaan peralatan penunjang penelitian seperti *wind tunnel* dan ruangan khusus untuk pengujian anemometer sehingga akurasi pengkalibrasian dapat meningkat.
2. Kedepannya, penggunaan material dalam perancangan *wind tunnel* diusahakan tidak menggunakan bahan yang sensitif terhadap suhu dan air seperti kayu karena bentuk fisiknya mudah sekali terdeformasi jika ditempatkan pada area yang memiliki perbedaan suhu antara siang dan malam yang sangat ekstrim.

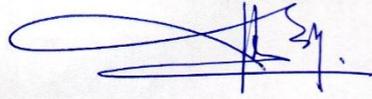
DAFTAR PUSTAKA

- Alejandro Martinez. (2016). *Deviations of Cup Anemometer Rotational Speed due to Steady State Harmonic Acceleration of the Rotor*. Jurnal, Polytechnic University of Madrid.
- Anonim. (2014). *Wind*. Diakses dari www.cengage.com pada tanggal 12 April 2017 pukul 17.00 WIB
- Anonim. (2016). *Laminar and Turbulent Flows*. Diakses dari www.britannica.com pada tanggal 1 September 2017 pukul 11.00 WIB.
- Anonim. (2014). Penguat Instrumentasi. Diakses dari instrumentasi.lecture.ub.ac.id pada tanggal 7 Juni 2017 pukul 21.00 WIB.
- Carl Ostridge. (2015). *What your Anemometer Calibration Really Means*.
- Colin Mitchell. (2013). *Measuring the Air Speed Created in a Wind Tunnel*. Jurnal, Pomona College.
- Espressif Systems. (2016). *ESP8266 Wi-Fi Channel Selection Guidelines*.
- Lindley. (1975). *The Design and Performance of A 6-Cup Anemometer*. Jurnal, University of Canterbury.
- L. Kristensen. (1999). *The Perrenial Cup Anemometer*. Jurnal, Riso National Laboratory.
- Measnet. (2009). *Anemometer Calibration Procedure*. Measnet Institute.
- Raymond, S. (1999). *Wind Speed Measurement and Use Of Cup Anemometry*. Denmark: Danish Technical University.
- Santiago, P. (2015). *A Principle to Monitor Performance and Maintenance Status of Rotating Meteorological Sensors*. Jurnal, Polytechnic University of Madrid.
- Santiago Pindado. (2014). *The Cup Anemometer, A Fundamental Meteorological Instrument for the Wind Energy Industry*. Jurnal, Instituto Universitario de Microgravedad.
- Steven, F. (2012). *Arduino Uno: Processing for Everyone*. Laramiye: Morgan & Claypool Publishers.
- Paul Scherz. (2000). *Practical Electronics for Inventors*. New York: Mc Graw-Hill.
- Tan Wee Chon. (2012). *Development of Low Wind Speed Anemometer*. Jurnal, Universiti Malaysia Perlis.

Yogyakarta, 25 Januari 2018

Mengetahui

Dosen Pembimbing

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'S. Sumarna', written over a horizontal line.

Drs. Sumarna, M.Si, M.Eng

NIP. 19610308 199101 1 001