

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

SKRIPSI

Diajukan kepada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Yogyakarta
untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan Guna Memperoleh Gelar Sains



Oleh:

BAGAS PRIYAMBODO

NIM. 13306141033

**PROGRAM STUDI FISIKA
JURUSAN PENDIDIKAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA**

2018

PERSETUJUAN

Tugas Akhir Skripsi dengan Judul

RANCANG BANGUN ALAT UKUR KELAJUAN DAN ARAH (KECEPATAN)

ANGIN BERBASIS MIKROKONTROLER ARDUINO UNO

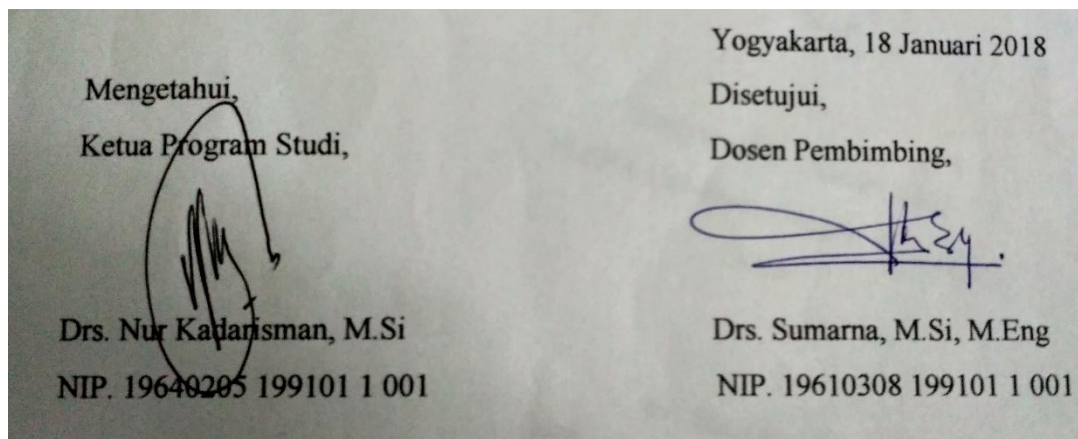
Disusun oleh:

Bagas Priyambodo

NIM 13306141033

telah memenuhi syarat dan disetujui oleh Dosen Pembimbing untuk dilaksanakan

Ujian Akhir Tugas Akhir Skripsi bagi yang bersangkutan.



SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Bagas Priyambodo

NIM : 13306141033

Program Studi : Fisika

Judul TAS : Rancang Bangun Alat Ukur Kelajuan dan Arah (Kecepatan)
Angin Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno

menyatakan bahwa karya skripsi ini benar-benar karya saya sendiri. Sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali sebagai acuan kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang telah lazim.

Yogyakarta, 18 Januari 2018

Yang menyatakan,



Bagas Priyambodo

NIM. 13306141033

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir Skripsi

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

Disusun oleh:



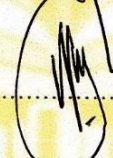
Bagas Priyambodo

NIM 13306141033

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji Tugas Akhir Skripsi Program Studi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Yogyakarta

Pada tanggal 18 Januari 2018

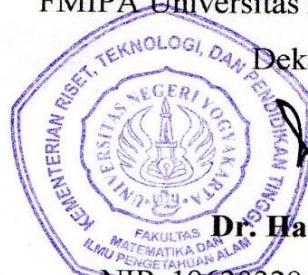
TIM PENGUJI

Nama/ Jabatan	Tanda Tangan	Tanggal
<u>Drs. Sumarna, M. Si., M. Eng.</u> Ketua Penguji/ Pembimbing		25 Januari 2018
<u>Laila Katriani, S.Si, M.Si</u> Sekretaris		24 Januari 2018
<u>Drs. Nur Kadarisman, M.Si</u> Penguji		25 Januari 2018

Yogyakarta, 29 Januari 2018

FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta

Dekan,



Dr. Hartono

NIP. 19620329 198702 1 002

MOTTO

“Jangan pikirkan kegagalan kemarin, hari ini sudah lain. Sukses pasti diraih selama semangat masih menyengat.”

PERSEMBAHAN

Karya tulis ilmiah ini kupersembahkan untuk:

- Bapak dan Ibu tercinta yang selalu memberikan dukungan dan doanya kepada diri penulis.
- Bapak Rifai dan Pak Gito yang telah membantu penulis dalam bentuk ide maupun menyediakan peralatan teknik yang dibutuhkan dalam merancang alat ini.
- Seluruh keluarga kelas Fisika B 2013 yang telah bersama-sama berjuang, sukses buat semuanya.

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

Oleh:

Bagas Priyambodo

NIM 13306141033

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 . Di antara *transmitter* dan *receiver* dipasang sebuah cakram dengan permukaan tak tembus cahaya. Pada bagian tengah permukaan cakram, dibuat 45 lubang dengan resolusi sudut 8⁰. 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 1.25⁰. 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

THE DESIGN OF SPEED AND DIRECTION (VELOCITY) MEASURING INSTRUMENTS BASED ON ARDUINO UNO MICROCONTROLLER

By:

Bagas Priyambodo

13306141033

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 . Between both the transmitter and receiver, were mounted an opaque surface disk. In the middle of the disk's surface, made 45 holes with the angle resolution of 8⁰. 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 1.25⁰. 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

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir skripsi dengan judul “**RANCANG BANGUN ALAT UKUR KELAJUAN DAN ARAH (KECEPATAN) ANGIN BERBASIS MIKROKONTROLER ARDUINO UNO**”. Penyusunan skripsi ini diajukan sebagai salah satu syarat menyelesaikan studi untuk memperoleh gelar Sarjana pada program studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu pengetahuan Alam Universitas Negeri Yogyakarta. Dalam penyelesaian skripsi ini, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Sutrisna Wibawa, M.Pd., selaku Rektor Universitas Negeri Yogyakarta yang telah memberikan dukungan terhadap fasilitas-fasilitas penunjang pada Program Studi Fisika.
2. Bapak Dr. Hartono, Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Yogyakarta beserta seluruh staf atas fasilitas dan segala bantuannya untuk memperlancar tugas akhir.
3. Bapak Yusman Wiyatmo, M.Si., Ketua Jurusan Pendidikan Fisika Universitas Negeri Yogyakarta yang telah memberikan arahan dan bimbingan.
4. Bapak Nur Kadarisman, M.Si., Kaprodi Fisika FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta yang telah memberikan izin dan arahannya dalam mengambil judul skripsi ini.

5. Bapak Drs. Sumarna, M.Si, M.Eng., selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan instruksi atau arahan, bimbingan, dan pengalamannya dari awal hingga akhir penyusunan skripsi ini.
6. Semua pihak yang ikut berkontribusi dalam perancangan alat maupun administrasi sehingga memperlancar pembuatan skripsi.

Penulis menyadari bahwa dalam pembuatan skripsi ini, masih terdapat banyak kekurangan sehingga penulis dengan senang hati menerima kritik dan saran terhadap skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis sendiri dan juga siapapun yang membacanya.

Yogyakarta, 18 Januari 2018

Penulis,



Bagas Priyambodo

NIM 13306141033

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERSETUJUAN.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
MOTTO.....	v
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii

BAB I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang.....	1
B. Identifikasi Masalah.....	3
C. Batasan Masalah.....	4
D. Rumusan Masalah.....	5
E. Tujuan Penelitian.....	5
F. Manfaat Penelitian.....	6

BAB II. KAJIAN PUSTAKA

A. Angin.....	7
B. Anemometer <i>Cup</i>	10
C. <i>LED</i>	13

D. Fotodioda.....	14
E. IC OpAmp Seri LM 324 Sebagai Komparator.....	15
F. <i>Wind Vane</i>.....	17
G. Arduino Uno.....	18
H. Rangkaian Sensor Berbasis <i>Shaft Encoder</i> Sebagai Pengukur Kelajuan Anguler.....	20
I. Resistivitas Bahan.....	27
J. Penguat Instrumentasi.....	28
K. Pengaruh Panjang Lengan <i>Cup</i> Anemometer.....	31

BAB III. METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian.....	37
B. Variabel Penelitian.....	37
1. Variabel Bebas.....	37
2. Variabel Terikat.....	37
3. Variabel Kontrol.....	37
C. Bahan dan Alat Penelitian.....	37
1. Bahan Penelitian.....	37
2. Peralatan Penelitian.....	39
D. Langkah Penelitian.....	39
1. Penelitian Tahap I.....	40
2. Penelitian Tahap II.....	45
E. Desain Alat.....	47
F. Teknik Analisis Data.....	48
G. Diagram Alir Penelitian.....	52

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Rancangan Sensor Pengukur Kelajuan Angin Berbasis <i>Shaft Encoder</i>.....	54
---	-----------

B. Pengaruh Variasi Panjang Lengan (Rotor) <i>Cup</i> Anemometer..	61
C. Hasil Karakterisasi dan Pengkalibrasian Anemometer.....	65
1. Sensitivitas dan Linearitas Anemometer.....	66
2. Jangkauan dan <i>Span</i> Laju Angin.....	67
3. Histerisis Anemometer.....	67
4. Pengkalibrasian Anemometer Buatan Peneliti Dengan Menggunakan Anemometer Kincir.....	69
D. Hasil Karakterisasi Sensor Arah Berbasis Resistivitas Kawat Nikrom dan Perancangan <i>Wind vane</i>.....	71
1. Karakterisasi Sensor Arah Berbasis Resistivitas Kawat Nikrom	71
2. Perancangan Alat Penunjuk Arah Angin (<i>Wind vane</i>).....	73
E. Hasil Rancangan Transmisi Data Menggunakan Modul WiFi ESP 8266.....	78

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan.....	84
B. Saran.....	85

DAFTAR PUSTAKA.....	86
----------------------------	-----------

LAMPIRAN-LAMPIRAN.....	87
-------------------------------	-----------

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Nilai faktor anemometer dengan variasi kelajuan angin dan panjang rotor <i>cup</i>	64
Tabel 2. Hasil pengukuran laju angin, U , dengan memvariasi tegangan kipas.....	68
Tabel 3. Hasil pengukuran kelajuan angin pada anemometer buatan, U , dan anemometer kalibrator, U_{cal}	69

DAFTAR GAMBAR

		Halaman
Gambar 1.	Garis-garis isobar yang melingkupi suatu daerah.....	8
Gambar 2.	Grafik hubungan rasio jari-jari <i>cup</i> dan panjang lengan <i>cup</i> dengan faktor anemometer K.....	12
Gambar 3.	Contoh grafik hubungan antara tegangan dan arus pada sebuah <i>datasheet LED</i>	14
Gambar 4.	Cara kerja fotodiode.....	15
Gambar 5.	OpAmp mode <i>open-loop gain</i> dengan tegangan masukan pada <i>pin non-inverting</i> dan OpAmp dengan tegangan masukan pada <i>pin inverting</i>	17
Gambar 6.	Contoh <i>wind vane</i>	18
Gambar 7.	Papan sirkuit arduino uno beserta IC mikrokontroler atmega 328 10 bit.....	19
Gambar 8.	Cakram <i>encoder</i> sumbu anemometer tampak dari samping... ..	20
Gambar 9.	Rangkaian <i>transmitter</i> cahaya.....	21
Gambar 10.	Fotodiode yang dihubungkan secara seri dengan resistor.....	24
Gambar 11.	Rangkaian komparator tegangan dengan IC OpAmp.....	26
Gambar 12.	Tumbukan elektron dengan atom-atom pada suatu bahan penghantar.....	28
Gambar 13.	Dua rangkaian penguat <i>non-inverting</i>	29
Gambar 14.	Rangkaian penguat diferensial dasar.....	30
Gambar 15.	Silinder berongga diputar pada porosnya.....	33
Gambar 16.	Kelajuan relatif <i>cup</i> anemometer sebagai fungsi sudut.....	34
Gambar 17.	Desain sistem anemometer, <i>wind vane</i> , dan <i>transceiver</i> WiFi.....	47
Gambar 18.	Rangkaian elektronik sensor pengukur kelajuan angin berbasis <i>shaft encoder</i> dan <i>schmitt trigger</i> sebagai <i>squaring circuit</i>	54
Gambar 19.	Desain fisik cakram berlubang dengan diameter 12 cm.....	55
Gambar 20.	Fluktuasi tegangan V_{R2}	56
Gambar 21.	Rangkaian komparator schmitt trigger.....	57

Gambar 22.	<i>Output</i> rangkaian komparator schmitt trigger.....	58
Gambar 23.	Rangkaian regulator tegangan.....	59
Gambar 24.	Grafik hubungan kelajuan angin yang terukur oleh <i>handheld</i> anemometer dan kelajuan anguler sumbu anemometer berdiameter <i>cup</i> 6.5 cm dengan variasi panjang lengan <i>cup</i> (rotor) 3.45 cm dan 7.45 cm.....	62
Gambar 25.	Grafik hubungan jumlah cacah pulsa per detik f dengan kelajuan angin U	66
Gambar 26.	Grafik hubungan antara tegangan sumber kipas angin V dan kelajuan angin U	68
Gambar 27.	Grafik kalibrasi kelajuan angin pada anemometer buatan peneliti, U , dengan kelajuan angin pada anemometer kalibrator, U_{cal}	70
Gambar 28.	Grafik hubungan antara sudut penunjuk arah angin dan resistansi kawat nikrom pada suhu lingkungan 25°C.....	71
Gambar 29.	Grafik hubungan antara sudut dan resistansi kawat nikrom diukur secara 2 arah (naik dan turun).....	72
Gambar 30.	Sensor penunjuk arah angin berbasis resistivitas kawat nikrom.....	73
Gambar 31.	Sumbu <i>wind vane</i> dan lengan penyinggung kawat.....	74
Gambar 32.	Rangkaian jembatan kelvin.....	75
Gambar 33.	Grafik hubungan antara titik sudut yang ditunjuk oleh <i>wind vane</i> dengan tegangan yang terukur pada titik A dan B jembatan kelvin.....	76
Gambar 34.	Skema rangkaian penguat instrumentasi dengan penguatan sebesar 10 kali.....	77
Gambar 35.	Diagram blok rangkaian <i>transceiver</i> WiFi menggunakan mikrokontroler arduino dan modul WiFi ESP 8266.....	78
Gambar 36.	<i>Software data logger</i>	79
Gambar 37.	Hasil perancangan anemometer dan <i>wind vane</i>	79
Gambar 38.	Rangkaian pembagi tegangan.....	81
Gambar 39.	Rangkaian <i>voltage shifter</i>	82
Gambar 40.	Pengkalibrasian anemometer.....	92
Gambar 41.	Anemometer kincir (<i>windmill</i>).....	92

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Perhitungan Variasi Panjang Lengan (Rotor) Cup Anemometer.....	88
Lampiran 2. Perhitungan Momen Gaya (Torsi) pada Sumbu Anemometer.....	89
Lampiran 3. Spesifikasi Teknis Anemometer dan <i>Wind Vane</i>	90
Lampiran 4. Dokumentasi Penelitian.....	92
Lampiran 5. Hasil Uji Coba Lapangan Anemometer dan <i>Wind vane</i> Selama 2 Hari.....	93

BAB I PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

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 ketidakakuratan 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.

B. Identifikasi Masalah

Berdasarkan pada latar belakang, terdapat beberapa permasalahan seperti berikut:

1. Anemometer dengan sensor berbasis *magnetic pulse counter* memiliki harga yang lebih tinggi dibandingkan dengan anemometer dengan sensor berbasis *shaft encoder*.
2. Panjang lengan *cup* anemometer mempengaruhi kinerja anemometer.
3. Sensor arah angin berbasis *disk encoder* memiliki kelemahan, yaitu resolusi sudut yang digunakan untuk menentukan arah hembusan angin mencapai 45° sehingga ketelitian penunjukkan arah hembusan angin menjadi berkurang. Namun faktanya, sebagian besar *wind vane* yang dijual dipasaran masih menggunakan sensor berbasis *disk encoder* yang hanya dapat mengenali 8 arah mata angin saja.
4. Penggunaan kabel yang panjang untuk mentransmisikan data hasil pengukuran instrumen pengukur kelajuan dan arah angin mudah terinduksi oleh fluktuasi medan magnet yang terdapat di lingkungan sekitar sehingga sinyal asli yang berasal dari instrumen dapat terdistorsi oleh tegangan induksi dan mengakibatkan kesalahan pembacaan pada perangkat perekam data.

C. Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah dalam penelitian tugas akhir ini adalah

1. Sensor pengukur kelajuan angin yang dirancang pada anemometer berbasis sensor *shaft encoder* tersusun dari rangkaian *optocoupler* dan cakram berlubang dengan jumlah lubang sebanyak 45 buah.

2. Membandingkan kinerja anemometer dengan panjang lengan *cup* anemometer yang berbeda.
3. Mencari pengganti sensor penunjuk arah angin berbasis *disk encoder* yang memiliki resolusi penunjukkan arah lebih tinggi.
4. Membuat pentransmisi data dari instrumen yang terbebas dari efek induksi yang diakibatkan oleh penggunaan kabel panjang pada lingkungan yang terdapat fluktuasi medan magnet.

D. Rumusan Masalah

Terdapat beberapa perumusan masalah dari penelitian rancang bangun anemometer ini, antara lain:

1. Bagaimanakah rancangan alat ukur kelajuan angin menggunakan sensor berbasis *shaft encoder*?
2. Berapakah panjang lengan (rotor) *cup* anemometer yang cocok untuk digunakan agar memiliki nilai faktor anemometer kecil?
3. Bagaimanakah rancangan alat penunjuk arah angin (*wind vane*) agar memiliki resolusi penunjukkan arah angin yang lebih tinggi dari sensor berbasis *disk encoder*?
4. Cara apakah yang efektif untuk mentransmisikan data dari instrumen tanpa terjadi efek induksi magnet?

E. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang dijabarkan, tujuan penelitian ini:

1. Merancang alat ukur kelajuan angin dengan sensor berbasis *shaft encoder*.
2. Menentukan panjang rotor *cup* anemometer yang memiliki nilai faktor anemometer kecil.
3. Mendesain *wind vane* dengan sensor berbasis resistivitas kawat nikrom.
4. Merancang pentransmisian data dari instrumen pengukur kelajuan dan arah angin secara nirkabel dengan memanfaatkan modul WiFi ke perangkat penerima.

F. Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diambil dari hasil penelitian ini antara lain:

1. Instrumen ini dapat digunakan untuk menyajikan informasi mengenai kelajuan dan arah angin di suatu tempat secara *real time* dan otomatis tanpa membutuhkan operator alat.
2. Informasi mengenai kelajuan dan arah angin yang dihimpun oleh *software data logger* dapat dimanfaatkan oleh pihak-pihak lain yang membutuhkan, contohnya BMKG dan penyedia layanan cuaca *online*.

BAB II

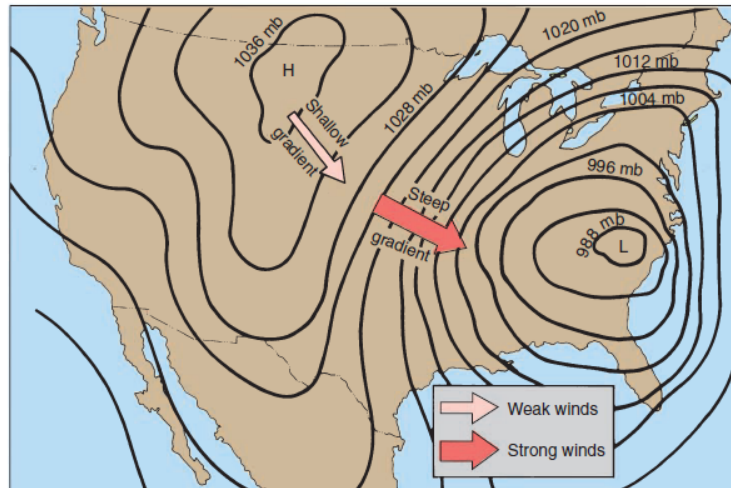
KAJIAN TEORI

A. Angin

Angin merupakan pergerakan fluida dalam bentuk gas atau udara akibat perbedaan tekanan di antara dua tempat. Angin terjadi ketika atmosfer bumi mencoba menyeimbangkan distribusi tekanan udara yang tidak merata di atas permukaan bumi. Perbedaan tekanan udara ini terbentuk akibat perbedaan suhu udara yang terjadi saat sinar matahari mengenai permukaan bumi dengan intensitas yang berbeda-beda. Tempat yang mendapatkan sinar matahari dengan intensitas tinggi mengalami kenaikan suhu udara, sedangkan tempat yang tertutup oleh awan atau berada pada sisi bumi yang gelap mendapatkan intensitas rendah dan mengalami penurunan suhu udara. Kenaikan suhu udara memicu pemuaian gas dan penurunan densitas gas sehingga tekanan gas menurun. Tekanan udara pada daerah yang memiliki suhu udara rendah lebih besar daripada tekanan udara pada daerah yang memiliki suhu udara tinggi. Agar terjadi kesetimbangan tekanan udara dan kalor di antara kedua tempat tersebut, maka terjadi aliran udara dari tempat yang memiliki tekanan tinggi menuju tempat yang memiliki tekanan rendah.

Kelajuan angin yang bervariasi disebabkan karena adanya faktor gradien tekanan udara di antara dua tempat. Gradien tekanan udara ini dihitung berdasarkan jarak antar dua pusat tekanan udara yang berbeda dan dipisahkan oleh garis-garis isobar. Semakin besar nilai gradien

tekanan udara, maka kelajuan angin semakin besar. Sebaliknya jika nilai gradien tekanan udara kecil, maka kelajuan angin mengecil.



Gambar 1. Garis-garis isobar yang melingkupi suatu daerah
(www.cengage.com, 118)

Gambar 1 menunjukkan garis-garis isobar yang melingkupi suatu wilayah. Setiap satu garis isobar menghubungkan daerah-daerah yang memiliki tekanan udara yang sama besar. Jika pada suatu daerah terdapat garis-garis isobar dengan jarak saling berdekatan, maka pada daerah tersebut terjadi hembusan angin yang kuat (*strong winds*). Sedangkan saat jarak antar garis-garis isobar saling berjauhan, maka terjadi hembusan angin yang lemah (*weak winds*).

Pada umumnya, arah hembusan angin sesuai dengan arah aliran udara. Selain itu, arah angin juga dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti ketinggian suatu benda yang menghalangi gerakan angin dan efek coriolis.

Efek coriolis adalah peristiwa pembelokan arah angin yang terjadi di daerah garis khatulistiwa akibat rotasi bumi.

Menurut jenis alirannya, pergerakan fluida dalam bentuk gas (angin) ini dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu

1. Fluida dengan Aliran Laminer

Aliran laminer merupakan aliran fluida dengan pola lintasan sejajar satu sama lain. Aliran ini sering juga disebut sebagai aliran *streamline* karena lintasan yang dilalui oleh fluida berhimpit dengan garis-garis khayal lintasan partikel fluida. Kelajuan setiap partikel fluida pada aliran laminer bernilai sama besar pada semua titik. Aliran laminer terjadi saat fluida dialirkan melalui sebuah pipa yang berdiameter sangat kecil (kapiler) dan berdinding tipis dengan kelajuan aliran fluida yang lambat. Contoh fluida dengan aliran laminer adalah peristiwa mengalirnya darah pada pembuluh darah dan asap rokok yang mengalir ke atas dan membentuk pola-pola lintasan garis lurus (www.britannica.com).

2. Fluida dengan Aliran Turbulen

Aliran turbulen merupakan fluida yang mengalir dengan arah aliran acak dan tidak dapat diprediksi serta kelajuannya berubah-ubah. Hampir semua jenis aliran fluida yang ada di dunia ini merupakan aliran turbulen.

B. Anemometer Cup

Berdasarkan sudut pandang industri tenaga angin, kehandalan anemometer *cup* bergantung pada fungsi transfer:

$$U = Af + B \quad (1)$$

di mana:

U = kelajuan angin (m/s)

A = gradien (m/pulsa)

f = frekuensi pulsa (Hz)

B = koefisien kalibrasi (*zero offset*) (m/s)

Persamaan linier di atas ditetapkan pada kuartal pertama abad 20 untuk anemometer bertipe Robinson yang menerangkan hubungan kelajuan angin dengan frekuensi *output* anemometer dan untuk mendapatkan persamaan tersebut harus melalui proses kalibrasi anemometer. Agar memiliki makna fisis, persamaan linear tersebut ditulis ulang dengan mengganti frekuensi *output* anemometer, f , dengan frekuensi rotasi anemometer, f_r , dan menambahkan parameter jumlah pulsa yang terhitung tiap 1 revolusi penuh, N_p , sehingga persamaan (1) menjadi

$$U = AN_p f_r + B \quad (2)$$

$$U = A_r f_r + B \quad (3)$$

di mana:

A_r = gradien (m /jumlah revolusi sumbu anemometer)

f_r = frekuensi rotasi sumbu anemometer (Hz)

N_p = jumlah pulsa tiap 1 revolusi penuh sumbu anemometer

Dengan mendefinisikan kelajuan angin yang terbaca pada anemometer lain dengan simbol U dan kelajuan anguler pada sensor rotasi anemometer dengan simbol S , maka didapatkan persamaan ideal hubungan antara kelajuan angin dan kelajuan anguler anemometer. Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$U = r_{rotor}S \quad (4)$$

di mana:

r_{rotor} = jari-jari atau panjang lengan (rotor) *cup* anemometer (m)

S = kelajuan anguler anemometer (rad/s)

U = kelajuan angin (m/s)

Namun pada praktiknya, nilai kelajuan angin tidak sama dengan hasil perkalian antara panjang rotor dan kelajuan anguler anemometer. Hal ini disebabkan karena faktor-faktor yang terdapat pada proses pembuatan anemometer seperti geometri rotor *cup*, ukuran dan bentuk *cup*, dan momen inersia total sumbu, *cup*, dan rotor.

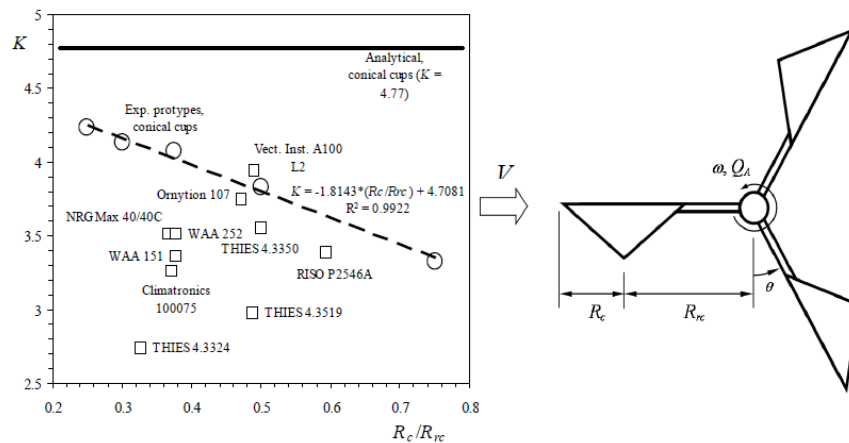
Solusinya, nilai kelajuan angin dan hasil perkalian antara panjang rotor dengan kelajuan anguler anemometer dinyatakan dalam bentuk perbandingan pada persamaan (5).

$$K = \frac{U}{r_{rotor}S} \quad (5)$$

di mana:

K = faktor anemometer

Pada gambar 2, ditunjukkan bahwa nilai faktor anemometer, K , untuk berbagai bentuk *cup* anemometer bergantung pada nilai perbandingan antara ukuran jari-jari *cup*, R_c , dengan panjang rotor anemometer, R_{rc} .



Gambar 2. Grafik hubungan rasio jari-jari *cup* dan panjang lengan *cup* dengan faktor anemometer K

(Santiago Pindado, 2014: 21421)

Nilai K bertambah ketika perbandingan antara R_c dan R_{rc} semakin kecil dan nilai K berkurang saat perbandingan keduanya semakin bertambah besar. Dengan kata lain, jika ukuran jari-jari *cup* anemometer semakin besar dengan panjang rotor tetap, maka nilai faktor anemometer, K , mengecil. Menurut (L. Kristensen, 1999: 60), anemometer dengan nilai K kecil (mendekati 1) memiliki kualitas yang baik apabila dibandingkan dengan anemometer yang memiliki harga K tinggi. Anemometer ideal memiliki nilai faktor anemometer 1 karena energi yang dibawa oleh angin dapat diubah sepenuhnya menjadi laju anguler sumbu anemometer. Secara matematis, hal ini ditunjukkan oleh perkalian antara panjang rotor

dan kelajuan anguler sumbu anemometer yang bernilai sama dengan kelajuan angin.

Dengan demikian, semakin tinggi nilai K , maka selisih kelajuan angin dan perkalian antara panjang rotor dengan kelajuan anguler anemometer semakin besar. Selisih antara kedua parameter yang membesar ditandai dengan melambatnya kelajuan anguler yang terukur pada kelajuan angin yang sama.

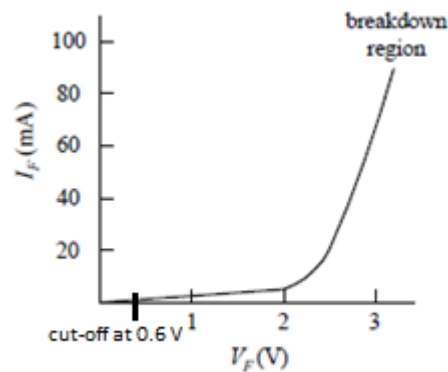
C. LED (*Light-Emitting Diode*)

LED merupakan komponen aktif yang terbuat dari bahan semikonduktor tipe-p dan tipe-n yang disambungkan menjadi satu. *LED* memiliki ciri-ciri dan fungsi yang sama dengan dioda pada umumnya, yaitu mempunyai 2 kaki yang masing-masing bernama anoda dan katoda. Jika kaki anoda diberi panjar maju (potensial positif) dan katoda diberi panjar mundur (negatif) dengan selisih potensial keduanya lebih besar dari 0.6 V (untuk semikonduktor jenis Silikon), maka zona deplesi yang terbentuk di antara sambungan p-n *LED* menghilang dan *hole* dari semikonduktor jenis p menyatu dengan elektron di semikonduktor jenis n. Proses bergabungnya elektron dan *hole* melepaskan energi dalam bentuk foton dengan panjang gelombang tertentu.

Intensitas cahaya yang dihasilkan oleh *LED* bergantung kepada pemberian tegangan maju di antara kedua kaki *LED* anoda dan katoda. Nilai tegangan panjar maju yang diberikan mempengaruhi jumlah

pembawa muatan, baik elektron dan *hole* yang bergabung. Semakin besar tegangan panjar maju yang diberikan, maka medan listrik yang terbentuk antara *p-n junction* menjadi bertambah kuat. Bertambah kuatnya medan listrik mengakibatkan jumlah elektron dan *hole* yang bergabung menjadi semakin banyak dan foton yang dihasilkan juga semakin banyak. Oleh karena itu, semakin banyak jumlah foton yang dihasilkan, maka intensitas cahaya yang dipancarkan semakin besar. Tegangan panjar maju maksimum yang dapat diberikan kepada sebuah *LED* bervariasi tergantung pada spesifikasi yang tercantum dalam *data sheet LED* (Paul Scherz, 2000: 196).

Grafik hubungan antara tegangan panjar maju dan arus yang mengalir pada sebuah *LED* dapat dilihat pada gambar 5.

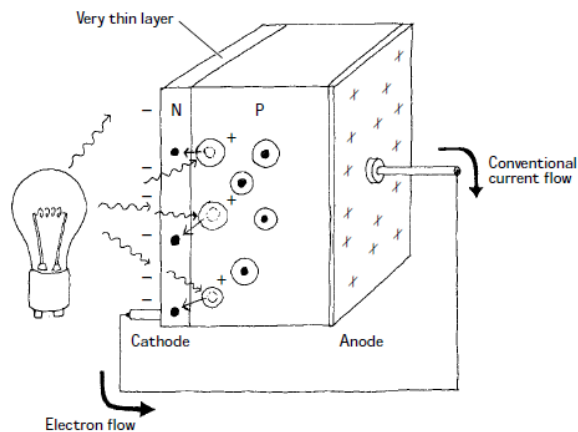


Gambar 3. Contoh grafik hubungan antara tegangan dan arus pada sebuah *datasheet LED* (Paul Scherz, 2000: 200)

D. Fotodioda

Fotodioda merupakan komponen aktif yang memiliki 2 kaki, masing-masing bernama anoda dan katoda. Fotodioda mempunyai

kemampuan untuk mengubah energi foton menjadi arus listrik secara langsung. Dalam aplikasinya, fotodiode diberikan perlakuan panjar mundur (kebalikan dari diode pada umumnya) agar dapat mengalirkan arus jika disinari cahaya. Saat keadaan gelap, tidak ada arus yang mengalir dari katoda menuju anoda. Tetapi, saat terdapat cahaya atau foton yang mengenai fotodiode, arus kecil yang muncul pada katoda memompa lebih banyak muatan-muatan pada potensial yang lebih tinggi (kutub positif) mengalir melalui katoda menuju anoda. Fotodiode mempunyai respons yang sangat cepat terhadap perubahan intensitas cahaya dan memiliki sensitivitas yang tinggi pada spektrum cahaya inframerah (Paul Scherz, 2000: 203).



Gambar 4. Cara kerja fotodiode
(Paul Scherz, 2000: 204)

E. IC OpAmp Seri LM 324 Sebagai Komparator

IC OpAmp memiliki fungsi utama sebagai penguat sinyal DC maupun AC sesuai dengan kebutuhan. IC OpAmp seri LM 324 memiliki

ciri fisik berupa 14 *pin*, *pin* 4 dan *pin* 11 masing-masing sebagai *input* V_{cc} dan V_{ee} , sementara *pin* lainnya berfungsi sebagai *input non-inverting*, *inverting*, dan *output*. Saat IC OpAmp LM 324 difungsikan sebagai komparator tegangan, salah satu *pin non-inverting* atau *inverting* dihubungkan ke sumber tegangan variabel atau rangkaian pembagi tegangan yang berfungsi sebagai tegangan referensi. Kemudian *pin* lainnya dihubungkan dengan tegangan masukan yang ingin dikomparasi. Contohnya jika tegangan referensi yang dihubungkan dengan *pin inverting* lebih kecil dibandingkan dengan tegangan masukan pada *pin non-inverting*, maka tegangan *output* yang dihasilkan bernilai mendekati tegangan V_{cc} , sedangkan ketika tegangan masukan yang diberikan kurang dari tegangan referensi, maka tegangan *output* yang dihasilkan mendekati tegangan V_{ee} . Karena impedansi antara *pin inverting* dan *non-inverting* sangat besar, maka dalam OpAmp ideal arus yang mengalir antara *pin non-inverting* dan *inverting* adalah 0 A.

Secara umum, persamaan hubungan antara tegangan *output* dan *input* pada IC OpAmp adalah

$$V_{out} = A_0(V_+ - V_-) \quad (6)$$

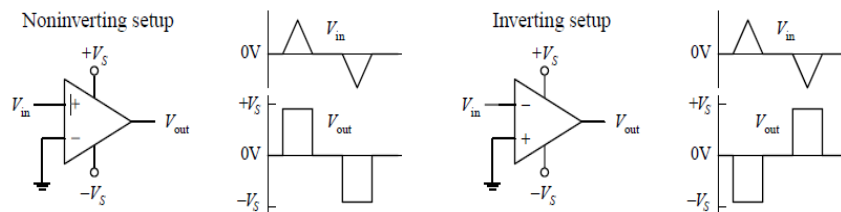
di mana:

A_0 = penguatan tegangan OpAmp pada kondisi *open-loop*

V_+ = tegangan masukan pada *pin non-inverting* (V)

V_- = tegangan masukan pada *pin inverting* (V)

Rangkaian pada gambar 5 disebut rangkaian komparator tegangan karena hasil perbandingan atau selisih tegangan *non-inverting* dan *inverting* dikuatkan dengan nilai penguatan tak berhingga sehingga nilai tegangan pada *pin output* OpAmp tersebut menjadi tak terhingga. Namun pada kenyataannya, nilai penguatan pada kondisi *loop* terbuka berkisar antara 10^4 hingga 10^6 . Tegangan *output* yang dihasilkan dari rangkaian OpAmp pada kondisi nyata yang memiliki penguatan *loop* terbuka saat $V_+ > V_-$ mendekati nilai tegangan catu daya (V_{cc}) yang diberikan pada IC OpAmp karena adanya tegangan saturasi pada komponen-komponen seperti *JFET* yang menyusun IC OpAmp tersebut. Sementara saat nilai $V_+ < V_-$, tegangan *output* yang dihasilkan bernilai mendekati sumber tegangan V_{ee} atau *ground* (Paul Scherz, 2000: 223).



Gambar 5. OpAmp mode *open-loop gain* dengan tegangan masukan pada *pin non-inverting* dan OpAmp dengan tegangan masukan pada *pin inverting* (Paul Scherz, 2000: 219)

F. *Wind vane*

Wind vane merupakan perangkat yang digunakan sebagai penunjuk arah hembusan angin (www.ambientweather.com). Perangkat ini berbentuk seperti anak panah dengan bagian kepala berfungsi sebagai

penunjuk arah angin dan ekor bersirip berfungsi sebagai penangkap hembusan angin. *Wind vane* biasanya ditempatkan pada lokasi yang tinggi seperti di atas bangunan untuk menghindari penghalang-penghalang hembusan angin.



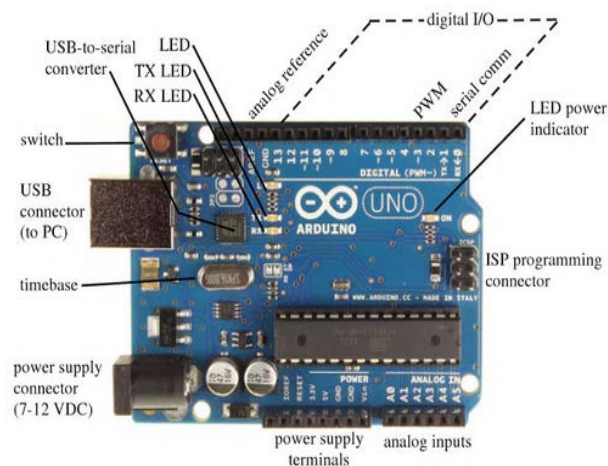
Gambar 6. Contoh *wind vane*
(www.google.com)

Sirip di bagian ekor *wind vane* berfungsi untuk menangkap angin yang datang. Ketika posisi sirip *wind vane* tidak searah dengan arah gerak angin, maka sirip akan terdorong oleh gaya aerodinamis yang dihasilkan oleh angin hingga posisi sirip dan anak panah sejajar dengan arah datang angin.

G. Arduino Uno

Arduino merupakan sebuah papan sirkuit elektronik dengan komponen utama sebuah IC mikrokontroler yang terdiri dari prosessor, RAM, dan EEPROM. Jenis IC mikrokontroler yang digunakan pada

papan Arduino Uno R3 ini adalah Atmel Atmega 328p 10 bit, memiliki *pin* sejumlah 28 buah. Untuk berkomunikasi antara IC mikrokontroler Atmega 328p dan PC, pada papan arduino telah dilengkapi dengan sebuah *USB*. IC mikrokontroler Atmega 328p dapat diprogram dengan PC induk dengan menggunakan perangkat lunak bernama *Integrated Development Environment (IDE)* yang berfungsi sebagai penulis bahasa pemrograman tingkat tinggi yang menerjemahkan menjadi bahasa mesin (*compiling*) sehingga IC mikrokontroler dapat membaca dan mengeksekusi program yang telah ditulis oleh seorang *programmer*. Selain itu, IC mikrokontroler ini juga dapat diprogram menggunakan ISP (*In Service Programming*). Perangkat lunak paling populer yang digunakan sebagai pemrogram IC mikrokontroler Atmega 328p pada papan arduino adalah Arduino IDE. Arduino IDE menggunakan pemrograman bahasa tingkat tinggi berupa C++ (Steven F., 2012: 3).

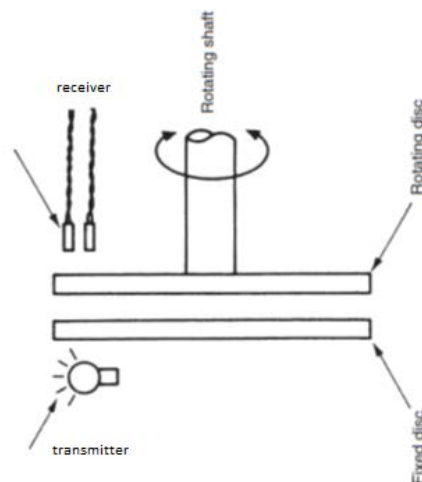


Gambar 7. Papan sirkuit arduino uno beserta IC mikrokontroler atmega 328 10 bit

(www.google.com)

H. Rangkaian Sensor Berbasis *Shaft Encoder* Sebagai Pengukur Kelajuan Anguler

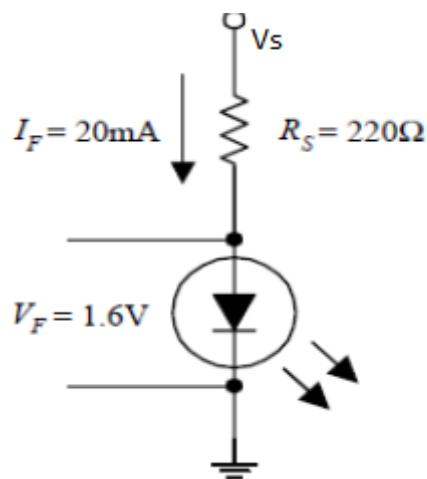
Pada sensor berbasis *shaft encoder*, rangkaian elektronik yang digunakan adalah rangkaian *optocoupler*. Namun, terdapat penambahan perangkat lain pada rangkaian *optocoupler* sehingga dapat digunakan untuk mengukur kelajuan rotasi anemometer berdasarkan perputaran sumbu anemometer. Perangkat lain yang digunakan bersama dengan *optocoupler* adalah sebuah *encoder* yang dibuat dari cakram atau *disk*. Pada bagian permukaan cakram *encoder*, dibuat sejumlah lubang dengan bentuk dan ukuran tertentu yang berfungsi sebagai jalan masuk cahaya. Cakram *encoder* ini dipasang pada sumbu anemometer sehingga saat sumbu anemometer bergerak memutar, maka cakram *encoder* ikut berputar.



Gambar 8. Cakram *encoder* sumbu anemometer tampak dari samping
(Alan. S, 2016: 602)

Rangkaian *optocoupler* yang terdiri dari *transmitter* dan *receiver* cahaya dipasang seperti pada gambar 8. Ketika cakram *encoder* berputar, intensitas cahaya dari *transmitter* yang diterima oleh *receiver* menjadi berfluktuasi pada *range* tertentu secara berulang-ulang. Hal ini disebabkan karena cakram *encoder* pada selang waktu tertentu dapat menutup atau melewatkan cahaya yang dipancarkan oleh *transmitter*.

Rangkaian yang digunakan sebagai *transmitter* cahaya pada sensor ini adalah sebuah *LED* yang dihubungkan secara seri dengan resistor sebagai pembatas arus listrik. Arus listrik yang mengalir pada *LED* harus dibatasi agar *LED* tidak *breakdown* atau rusak. Rangkaian *transmitter* dihubungkan dengan catu daya DC dengan nilai tegangan tertentu agar *LED* dapat menyala .



Gambar 9. Rangkaian *transmitter* cahaya
(Paul Scherz, 2000: 198)

Pada Gambar 9, *LED* diberi tegangan panjar maju sebesar 1.6 V dengan arus sebesar 20 mA. Pemberian tegangan panjar maju pada *LED*

tergantung pada intensitas cahaya yang ingin dihasilkan. Semakin besar tegangan panjar maju yang diberikan, maka intensitas cahaya yang dihasilkan semakin tinggi. Nilai resistor yang digunakan sebagai pembatas arus ditentukan dengan persamaan (9).

Dengan menggunakan hukum ohm, rangkaian *transmitter* pada gambar 9 dapat dijabarkan seperti berikut

$$V_s = V_F + V_R \quad (7)$$

Jika berdasarkan *data sheet* diketahui nilai V_F dan I_F LED, maka persamaan (7) ditulis ulang menjadi

$$V_s = V_F + I_F R_{limit} \quad (8)$$

di mana:

V_F = tegangan panjar maju (V)

I_F = arus panjar maju LED (A)

R_{limit} = besar resistor yang dipasang pada rangkaian (Ω)

V_s = tegangan sumber (V)

Persamaan (8) dapat disederhanakan menjadi

$$R_{limit} = \frac{V_s - V_F}{I_F} \quad (9)$$

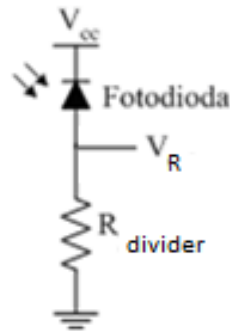
Agar resistor terpasang tidak rusak karena melebihi daya maksimum yang diperbolehkan, maka daya maksimum resistor yang diizinkan dapat ditentukan dengan

$$P_{max} = I_F^2 R_{limit} \quad (10)$$

di mana:

P_{max} = daya maksimum yang diperbolehkan (watt)

Rangkaian yang digunakan sebagai *receiver* cahaya terdiri dari sebuah fotodioda dan resistor yang dihubungkan secara seri. Resistor yang digunakan pada rangkaian *receiver* cahaya berfungsi sebagai pembagi tegangan sumber. Pemasangan kedua kaki fotodioda pada rangkaian *receiver* dilakukan secara terbalik atau *reverse bias*. Namun, fotodioda berbeda dengan dioda penyearah konvensional. Saat dioda konvensional diberi panjar mundur atau *reverse bias*, maka arus tidak mengalir sama sekali meskipun dalam praktiknya masih terdapat kebocoran arus dengan nilai yang kecil (mendekati nol). Sedangkan fotodioda dapat mengalirkan arus listrik dalam kondisi *reverse bias* jika diberi cahaya dengan intensitas tertentu. Pada kondisi gelap tanpa cahaya, fotodioda memiliki watak sama seperti dioda yang diberi perlakuan *reverse bias*. Saat fotodioda mendeteksi adanya cahaya, fotodioda berubah menjadi komponen resistif. Resistansi pada fotodioda bergantung kepada intensitas cahaya yang diterima. Semakin tinggi intensitas cahaya yang diterima fotodioda, maka resistansi fotodioda semakin kecil. Skema rangkaian *receiver* cahaya dapat dilihat pada gambar 10.



Gambar 10. Fotodioda yang dihubungkan secara seri dengan resistor (www.google.com)

Secara matematis, hubungan antara tegangan sumber, tegangan pada fotodioda, dan tegangan pada resistor dituliskan sebagai berikut.

$$V_s = V_{foto} + V_R \quad (11)$$

di mana:

V_s = tegangan sumber (V)

V_{foto} = tegangan fotodioda (V)

V_R = tegangan resistor (V)

Karena fotodioda berwatak seperti komponen resistif saat menerima cahaya, persamaan (11) diubah menjadi

$$V_s = I_{foto}R_{foto} + V_R \quad (12)$$

di mana:

I_{foto} = arus yang mengalir pada fotodioda (A)

R_{foto} = resistansi fotodioda (Ω)

Persamaan (12) ditulis ulang menjadi

$$V_R = V_s - I_{foto}R_{foto} \quad (13)$$

Saat fotodiode menerima cahaya dengan intensitas yang tinggi dari rangkaian *transmitter*, maka resistansi fotodiode mengecil hingga mendekati nol ($R_{foto} \approx 0 \Omega$). Akibatnya, persamaan (13) menjadi

$$V_R = V_s - I_{foto}(0)$$

$$V_R \approx V_s \quad (14)$$

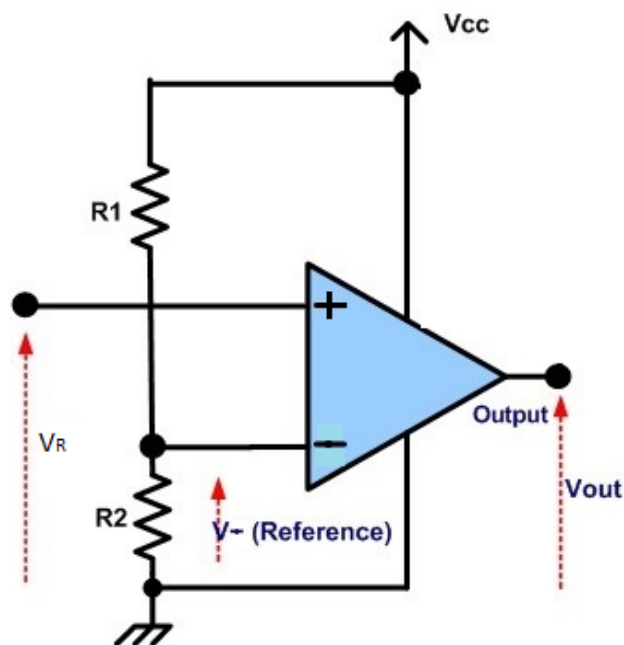
Namun, saat fotodiode menerima cahaya dengan intensitas yang rendah dari *transmitter*, resistansi fotodiode menjadi mendekati tak berhingga ($R_{foto} \approx \infty$). Oleh karena itu, persamaan (13) diubah menjadi

$$V_R = V_s - I_{foto}(\infty)$$

$$V_R \approx 0 \quad (15)$$

Tegangan yang terukur pada resistor pembagi tegangan, V_R , pada rangkaian *receiver* cahaya digunakan sebagai *output* sensor kelajuan angular berbasis *shaft encoder* ini. Tegangan V_R berfluktuasi ketika sumbu anemometer bergerak karena intensitas cahaya yang diterima oleh fotodiode berubah-ubah. Intensitas cahaya yang berubah-ubah ini disebabkan karena cahaya yang dipancarkan oleh *transmitter* terkadang mampu mencapai *receiver* tanpa terhalang (saat melalui lubang pada cakram) dan terkadang cahaya dari *transmitter* tertutup oleh permukaan cakram sehingga intensitas cahaya yang diterima *receiver* mengecil.

Fluktuasi tegangan V_R dikondisikan dengan rangkaian komparator sehingga *output* yang dihasilkan menjadi pulsa-pulsa tegangan. Rangkaian komparator bekerja dengan membandingkan tegangan V_R dengan tegangan referensi (V_{ref}) yang telah ditetapkan oleh pembuatnya. Komponen yang digunakan sebagai rangkaian komparator tegangan ini adalah IC OpAmp.



Gambar 11. Rangkaian komparator tegangan dengan IC OpAmp
(www.google.com)

Pada gambar 11, ditunjukkan bahwa tegangan V_R dijadikan sebagai *input* pada kaki *non-inverting* IC OpAmp sedangkan tegangan referensi, V_{ref} , dijadikan *input* pada kaki *inverting*. Saat tegangan V_R berada di bawah tegangan referensi ($V_R < V_{ref}$), maka tegangan *ouput* yang dihasilkan

bernilai nol (*ground*). Sebaliknya, jika tegangan V_R bernilai lebih besar dari tegangan referensi ($V_R > V_{ref}$), maka *output* yang dihasilkan bernilai V_{CC} .

I. Resistivitas Bahan

Resistivitas merupakan besaran fisis yang menyatakan seberapa besar kemampuan suatu bahan dalam menahan laju aliran arus listrik, terutama gerakan elektron sehingga arus listrik yang mengalir pada bahan tersebut berkurang dan menimbulkan beda potensial pada kedua ujung bahan yang dialiri arus listrik tersebut. Satuan resistivitas adalah ohm yang biasanya disimbolkan dalam bentuk Ω (Paul Scherz, 2000: 94).

Resistansi bahan terjadi saat elektron-elektron yang mengalir pada suatu bahan konduktor menabrak atom-atom penyusun bahan konduktor tersebut sehingga atom-atom yang tertabrak bervibrasi dan elektron penabrak berhenti ataupun melambat. Vibrasi atom-atom ini dalam skala besar melepaskan energi berupa panas.

Besar resistansi yang dihasilkan oleh suatu bahan hanya bergantung pada geometri dan hambatan jenisnya. Secara matematis, resistansi dapat dihitung dengan persamaan

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{16}$$

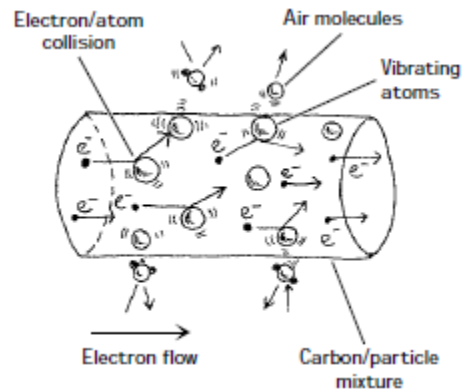
di mana:

R = resistansi bahan (Ω)

ρ = hambatan jenis bahan (Ωm)

A = luas penampang melintang bahan (m^2)

l = panjang bahan (m)



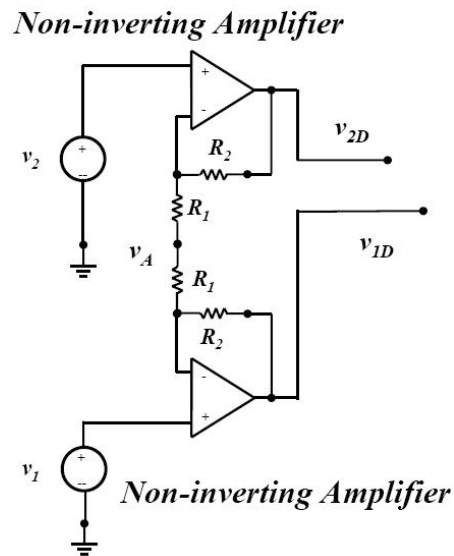
Gambar 12. Tumbukan elektron dengan atom-atom pada suatu bahan penghantar
(Paul Scherz, 2000: 94)

J. Penguat Instrumentasi

Penguat instrumentasi merupakan gabungan dari penguat diferensial dasar dan rangkaian penguat penyangga yang memiliki impedansi masukan sangat besar serta nilai penguatannya dapat diubah dengan mudah tanpa mempengaruhi kemampuannya dalam menyingkirkan sinyal *CMRR* (instrumentasi.lecture.ub.ac.id). Rangkaian penguat penyangga ini tersusun atas 2 rangkaian penguat *non-inverting* dengan besar penguatan seperti berikut

$$V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (17)$$

Pada gambar 13, terdapat 2 penguat *non-inverting* dengan masing-masing penguat memiliki *input* tegangan yang berbeda, yaitu V_1 dan V_2 .



Gambar 13. Dua rangkaian penguat *non-inverting*
(instrumentasi.lecture.ub.ac.id)

Secara matematis, rangkaian penguat pada gambar 13 dapat dijabarkan seperti berikut.

Karena arus yang mengalir pada R_1 dan R_2 sama besar, maka

$$\frac{V_{1D} - V_1}{R_2} = \frac{V_1 - V_A}{R_1} \quad (18)$$

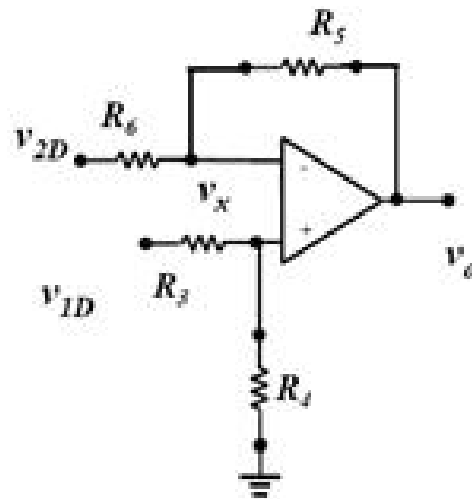
Setelah memodifikasi persamaan (18), didapatkan

$$V_{1D} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_1 - \frac{R_2}{R_1} V_A \quad (19)$$

Dengan cara yang sama, nilai V_{2D} adalah

$$V_{2D} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_A \quad (20)$$

Setelah mengetahui persamaan tegangan V_{1D} dan V_{2D} , maka selanjutnya adalah menganalisis rangkaian penguat diferensial dasar seperti yang ditunjukkan pada gambar 14.



Gambar 14. Rangkaian penguat diferensial dasar
(instrumentasi.lecture.ub.ac.id)

Pada gambar 14, V_x merupakan titik *virtual ground* dari rangkaian penguat diferensial dasar. Dengan menganalisis rangkaian penguat diferensial tersebut, didapatkan hubungan V_{2D} dengan V_o seperti berikut

$$\frac{V_{2D} - V_x}{R_6} = \frac{V_x - V_o}{R_5} \quad (21)$$

$$\frac{V_{2D}}{R_6} - V_x \left(\frac{R_5 + R_6}{R_5 R_6} \right) = - \frac{V_o}{R_5} \quad (22)$$

Tegangan pada *pin non-inverting* penguat diferensial tersebut sama dengan tegangan pada *pin inverting*nya yaitu V_x yang juga berfungsi sebagai *virtual ground*. Sehingga persamaan hubungan antara V_{1D} dan V_x menjadi

$$V_x = \left(\frac{R_4}{R_3+R_4} \right) V_{1D} \quad (23)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (23) kedalam persamaan (22), maka persamaan (22) berubah menjadi

$$\frac{V_{2D}}{R_6} - \left(\frac{R_4}{R_3+R_4} \right) \left(\frac{R_5+R_6}{R_5R_6} \right) V_{1D} = -\frac{V_o}{R_5} \quad (24)$$

$$V_o = \frac{R_5}{R_6} (V_{1D} \left(\frac{R_5+R_6}{R_5} \right) \left(\frac{R_4}{R_3+R_4} \right) - V_{2D}) \quad (25)$$

Bila rangkaian penguat tersebut dalam keadaan setimbang, yaitu dengan membuat nilai $R_6 = R_3$ dan $R_5=R_4$, maka persamaan (25) menjadi

$$V_o = \frac{R_5}{R_6} (V_{1D} - V_{2D}) \quad (26)$$

K. Pengaruh Panjang Lengan *Cup* Anemometer

Anemometer *cup* memiliki lengan yang berfungsi untuk menghubungkan *cup* dengan sumbu rotasinya sehingga ketika terdapat hembusan angin yang mengenai *cup* anemometer tersebut, maka menimbulkan gaya sekaligus menciptakan torsi pada sumbu poros anemometer. Torsi atau momen gaya yang timbul tersebut kemudian menciptakan gerak melingkar atau rotasi terhadap sumbu anemometer. Resultan momen gaya ini bernilai sama dengan perkalian antara momen inersia dari sumbu dan lengan anemometer dan percepatan anguler sumbu anemometer. Secara matematis, dituliskan sebagai berikut

$$\Sigma\tau_{sumbu} = \Sigma I\alpha \quad (27)$$

di mana:

$\Sigma\tau$ = jumlah torsi pada sumbu anemometer (N.m)

ΣI = momen inersia sumbu anemometer dan lengannya (kg.m²)

α = percepatan angular sumbu anemometer (m.s⁻²)

Torsi-torsi pada arah mendatar yang terjadi pada sumbu anemometer disumbang oleh gaya yang ditimbulkan oleh angin pada ketiga *cup* dan gesekan pada *bearing*. Selain itu, besarnya nilai torsi ini juga bergantung pada panjang lengan anemometer. Sedangkan momen inersia (momen kelembaman) yang menyebabkan sumbu anemometer mempertahankan keadaan diamnya dari perubahan kedudukan akibat gerak rotasi bergantung kepada massa jenis dan jarak antara pusat rotasi dan ujung dari sumbu anemometer. Karena sumbu anemometer ini berbentuk silinder dengan bagian tengah berongga, maka persamaan hukum inersia yang berlaku untuk sumbu anemometer yang diputar melalui sumbu porosnya adalah

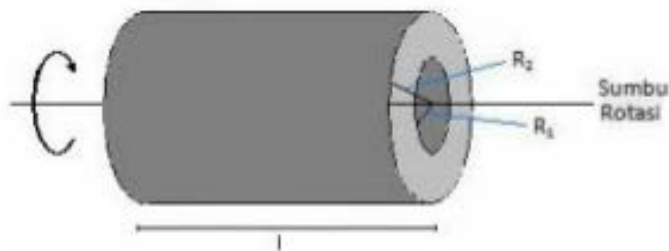
$$I_{sumbu} = \frac{1}{2}M(R_1^2 + R_2^2) \quad (28)$$

di mana:

M = massa sumbu anemometer (kg)

R_1 = jari-jari dalam yang diukur dari pusat rotasi hingga permukaan bagian dalam sumbu anemometer (m)

R_2 = jari-jari luar yang diukur dari pusat rotasi hingga permukaan terluar sumbu anemometer (m)



Gambar 15. Silinder berongga diputar pada porosnya

(SlideShare.net)

Sedangkan momen inersia pada cakram yang berfungsi sebagai *shaft encoder* dengan pusat rotasi pada pusat jari-jarinya adalah

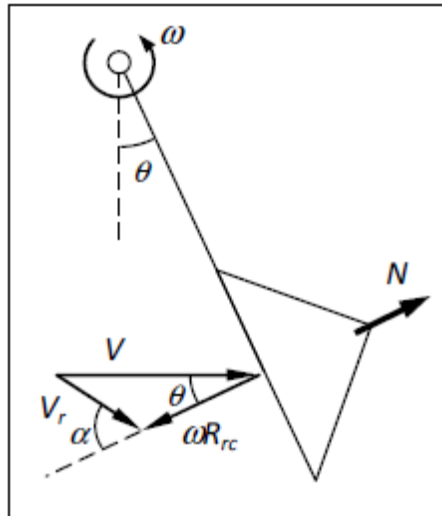
$$I_{cakram} = \frac{1}{2} M_{cakram} R_{cakram}^2 \quad (29)$$

di mana:

R_{cakram} = jari-jari luar cakram (m)

Untuk momen inersia yang terdapat pada setiap lengan anemometer, dapat dihitung menggunakan persamaan berikut

$$I_{lengan} = \frac{1}{3} ml^2 \quad (30)$$



Gambar 16. Kelajuan relatif *cup* anemometer sebagai fungsi sudut
(Santiago Pindado, 2014: 21427)

Mengacu pada teori mengenai dinamika pada *cup* anemometer, kelajuan relatif, v_r , angin berubah-ubah tergantung pada posisi *cup* terhadap arah kecepatan angin, U , yang dituliskan sebagai fungsi sudut.

$$v_{relative}(\theta) = \sqrt{U^2 + (\omega R_{lengan})^2 - 2U\omega R_{lengan} \cos(\theta)} \quad (31)$$

di mana:

U = kelajuan angin (m/s)

ω = kelajuan anguler sumbu anemometer (rad/s)

R_{lengan} = panjang lengan anemometer (m)

θ = sudut yang dibentuk antara kelajuan angin, U , dan ωR_{lengan}

Jika persamaan (28), (29), dan (30) dimasukkan kedalam persamaan (31) dengan mengabaikan gaya gesek pada *bearing*, f_k , maka didapatkan

$$\Sigma \tau_{sumbu} = \Sigma I \alpha$$

$$\begin{aligned} (F_{cup\ 1} l + F_{cup\ 2} l + F_{cup\ 3} l) &= \left(\frac{1}{2} M_{sumbu} (R_1 + R_2) + \right. \\ &\left. \frac{1}{2} M_{cakram} R_{cakram}^2 + 3 \frac{1}{3} M_{lengan} l^2 \right) \alpha \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{2} \rho_{air} A_{cup\ 1} C_d v_{relative\ 1}(\theta)^2 + \frac{1}{2} \rho_{air} A_{cup\ 2} C_d v_{relative\ 2}(\theta + 120^\circ)^2 + \right. \\ \left. \frac{1}{2} \rho_{air} A_{cup\ 3} C_d v_{relative\ 3}(\theta + 240^\circ)^2 \right) l &= \left(\frac{1}{2} M_{sumbu} (R_1 + R_2) + \right. \\ &\left. \frac{1}{2} M_{cakram} R_{cakram}^2 + M_{lengan} l^2 \right) \alpha \end{aligned} \quad (33)$$

Berdasarkan persamaan (31), nilai percepatan sudut sumbu anemometer dapat dituliskan sebagai

$$\alpha =$$

$$\frac{l \left(\frac{1}{2} C_d \rho_{air} A_{cup\ 1} v_{relative\ 1}(\theta)^2 + \frac{1}{2} C_d \rho_{air} A_{cup\ 2} v_{relative\ 2}(\theta + 120^\circ)^2 + \frac{1}{2} C_d \rho_{air} A_{cup\ 3} v_{relative\ 3}(\theta + 240^\circ)^2 \right)}{\frac{1}{2} M_{sumbu} (R_1 + R_2) + \frac{1}{2} M_{cakram} R_{cakram}^2 + M_{lengan} l^2} \quad (34)$$

di mana:

$$\rho_{air} = \text{massa jenis udara (1 kg/m}^3\text{)}$$

$$A_{cup} = \text{luas penampang } cup \text{ anemometer yang menghadap sumber hembusan angin (m}^2\text{)}$$

$$v_{relative} = \text{kelajuan relatif } cup \text{ anemometer (m/s)}$$

l = panjang lengan anemometer (m)

α = percepatan sudut sumbu anemometer (m/s^2)

M_{lengan} = massa lengan (kg)

M_{sumbu} = massa sumbu anemometer (kg)

Dari persamaan (34) di atas, diketahui bahwa percepatan angular sumbu anemometer sebanding dengan luas penampang *cup* dan panjang lengan anemometer. Namun, jika lengan yang digunakan memiliki massa yang besar, maka momen inersia sistem anemometer menjadi semakin besar dan mengakibatkan percepatan angular sumbu anemometer menjadi berkurang. Percepatan angular yang berkurang menyebabkan kelajuan angular sumbu anemometer menjadi melambat. Hal ini dapat dianalogikan seperti pemain balet yang merentangkan kedua tangan agar putaran tubuhnya semakin pelan (D. Lindley, 1975: 1137).

BAB III

METODE PENELITIAN

A. 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.

B. Variabel Penelitian

1. Variabel bebas
 - a. Kelajuan dan arah angin
 - b. Panjang lengan (rotor) *cup* anemometer
2. Variabel terikat
 - a. Frekuensi rotasi (kelajuan angin)
 - b. Nilai sudut yang ditunjukkan *wind vane* (arah angin)
3. Variabel kontrol
 - a. Ukuran dan jumlah *cup*
 - b. *Span* sudut *shaft encoder*

C. Bahan dan Alat Penelitian

1. Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:
 - a. 2 buah bola plastik diameter 6.5 cm.

- b. 3 buah aluminium silinder berdiameter 0.8 cm dan panjang 15 cm, 2 buah aluminium silinder berdiameter 2.3 cm dan panjang 18 cm, dan 2 buah aluminium silinder berdiameter 0.8 cm dan panjang 31 cm.
- c. Kabel serabut sepanjang 25 m.
- d. Papan Arduino Uno dengan chip mikrokontroler ATmega 328.
- e. Kawat niklin *nichrome* diameter 0.5 mm.
- f. Papan kayu ukuran 30 cm x 30 cm dibentuk bulat dengan diameter 26 cm.
- g. 2 buah *PCB IC* berlubang.
- h. Kabel penghubung atau *jumper*.
- i. 1 buah *LED* diameter 3 mm.
- j. 1 buah fotodiode diameter 3 mm.
- k. *IC* regulator tegangan LM7805, LM7809, dan LM317T masing-masing 1 buah.
- l. 1 buah modul pemancar atau penerima *WiFi* ESP8266.
- m. Sejumlah resistor dengan toleransi 1% hingga 5%.
- n. 3 buah diode zener 4.9 V dan 1 buah diode 1N4007.
- o. *Electrolite Condensator* dengan kapasitansi masing-masing 2200uF, 1uF, dan 100nF.
- p. 2 buah *IC* LM324.
- q. 1 buah kaleng cat plastik bekas.
- r. *Accu* kering berkapasitas 7.2Ah dengan *output* tegangan 12 VDC.
- s. 1 roll timah solder.

- t. Lem bakar, alteco, dan *sealler*.
- u. 5 buah *bearing* dengan diameter dalam 0.9 cm.
- v. 1 buah transistor daya jenis PNP BD140.
- w. Poros besi dengan panjang 16 cm

2. Peralatan Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

- a. Gergaji besi
- b. Kipas Angin
- c. Pemotong Alumunium
- d. Tang potong
- e. Multimeter
- f. Solder
- g. Bor
- h. Gunting
- i. Las listrik
- j. Mesin bubut
- k. *Software* Arduino IDE 1.6.8

3. 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 outputnya 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.
- i. Membuat kode program dengan Arduino IDE untuk melakukan komunikasi dengan modul *WiFi* ESP8266 sehingga data yang telah diolah dapat ditransmisikan ke perangkat lainnya.
- j. Mendesain tinggi, panjang lengan, dan diameter aluminium yang digunakan untuk membuat anemometer.
- k. Menyiapkan 2 buah bola plastik berdiameter 6.5 cm dan masing-masing bola dibelah menjadi 2 bagian.
- l. Memasang 2 *bearing* dengan diameter dalam berukuran 0.9 cm pada aluminium berbentuk silinder dengan diameter 2.4 cm dan jarak antara 2 *bearing* sebesar 18 cm.

- m. Memasang sebuah aluminium dengan panjang 35 cm berbentuk silinder berdiameter 0.8 cm kedalam lubang *bearing* yang digunakan untuk poros anemometer.
- n. Membuat 3 lengan anemometer dengan bahan aluminium dan berbentuk silinder dengan panjang masing-masing 15 cm kemudian memasang potongan bola plastik yang digunakan sebagai *cup* anemometer pada lengan anemometer.
- o. Membuat 45 lubang pada cakram *compact disk* berdiameter 12 cm dengan *span* antar lubang sebesar 8°.
- p. Memasang cakram *compact disk* pada ujung bawah poros anemometer dengan lem.
- q. Memotong kaleng cat plastik dengan *cutter* hingga menjadi 2 bagian kemudian bagian alas dari salah satu potongan diberi lubang di bagian tengah.
- r. Memasang penyangga triplek yang telah terpasang lampu *LED* yang menghadap kebawah pada permukaan alas potongan kaleng cat plastik.
- s. Memasukkan poros bagian atas anemometer melalui lubang yang telah dibuat pada tengah permukaan alas potongan kaleng cat plastik hingga poros bawah dan memastikan lubang-lubang yang telah dibuat terletak tepat dibawah lampu *LED*.
- t. Memasang penyangga poros anemometer pada bagian luar kaleng cat plastik kemudian mengeratkannya dengan beberapa buah sekrup.

- u. Memasang sensor fotodioda dan rangkaian pembagi tegangan pada papan triplek kemudian memasangnya menghadap keatas tepat berada dibawah salah satu lubang pada cakram *compact disk* dan lampu *LED*. Jarak antara lampu *LED*, lubang cakram *compact disk*, dan fotodioda adalah 2 cm.
- v. Memasang tiga lengan *cup* anemometer pada bagian atas poros anemometer dengan selisih sudut antar lengan 120° .
- w. Menghubungkan kabel pencatu daya dengan *LED* yang berfungsi sebagai *transmitter*. Catu daya ini menghasilkan tegangan *output* sebesar 5 VDC.
- x. Menghubungkan kabel pencatu daya dengan fotodioda dan pembagi tegangan kemudian menghubungkan bagian anoda fotodioda dengan kabel *input non-inverting*. Catu daya yang digunakan satu sumber dengan pencatu daya *LED transmitter*.
- y. Mengkalibrasi tegangan referensi pada *IC LM324* yang didasarkan pada hasil karakterisasi *response time* fotodioda agar dapat membandingkan nilai tegangan *non-inverting (input dari sensor)* dengan tegangan *inverting*. Tegangan *inverting* hasil kalibrasi ini telah didapatkan dengan nilai 2.5 VDC sehingga ketika nilai tegangan *non-inverting* berada di bawah nilai tegangan *inverting* maka *pin* ouput dari *IC LM324* menghasilkan nilai 0 VDC (*grounded*), sedangkan ketika nilai tegangan *non-inverting* berada di atas nilai tegangan *inverting* maka *pin output IC LM324* menghasilkan nilai 3.6 VDC. Nilai tegangan *output* tidak dapat bernilai sama dengan tegangan pencatu *IC LM324*, yaitu sebesar 5 VDC

karena adanya tegangan saturasi (nilai tegangan hasil penguatan tak hingga).

- z. Menghubungkan *pin output* dari IC LM324 dengan *pin* digital nomor 2 pada papan Arduino Uno yang berfungsi sebagai *pin interrupt*.
- aa. Membubut papan kayu dengan bentuk persegi dan tebal 0.7 cm hingga berubah menjadi bentuk lingkaran dengan diameter 26 cm.
- bb. Membuat sebuah uliran di sekeliling papan kayu yang telah dibentuk lingkaran sebagai jalur kawat.
- cc. Memasang kawat *nichrome* pada ulir papan kayu berbentuk lingkaran kemudian merekatkannya dengan lem alteco.
- dd. Memotong sebagian kawat jika kedua ujung kawat bertemu kemudian menghubungkannya dengan kabel menuju rangkaian pembagi tegangan dengan resistor yang berada pada *PCB*.
- ee. Menghilangkan noda lem dengan kertas abrasif pada kawat *nichrome* yang telah merekat kuat pada papan kayu kemudian memasang kabel penghubung dari kawat *nichrome* menuju rangkaian penguat.
- ff. Membuat poros dan penyangga dengan menggunakan aluminium berbentuk silinder berdiameter 0.8 cm yang berfungsi sebagai penggerak perangkat konduktif yang menghubungkan kawat *nichrome* dan rangkaian pembagi tegangan.
- gg. Memasang 3 buah *bearing* dengan diameter *bearing* dalam sebesar 0.9 cm, 2 terletak dibagian penyangga poros atas dan sisanya di bawah. Jarak

antara 2 *bearing* penyangga poros atas adalah sebesar 18 cm dan tinggi keseluruhan poros penunjuk arah *wind vane* adalah sebesar 31 cm.

- hh. Memasukkan poros besi sepanjang 16 cm di antara 2 buah *bearing* bagian tengah dan bawah kemudian memasang lengan konduktif pada poros besi sepanjang 13 cm dan melilit poros besi dengan kawat tembaga agar dapat terhubung dengan rangkaian pembagi tegangan.
- ii. Memasang aluminium berbentuk silinder sepanjang 29 cm dengan diameter 0.7 cm pada bagian paling atas dari poros besi kemudian memasang panah penunjuk arah angin pada bagian atas aluminium tersebut.

2. Penelitian Tahap II

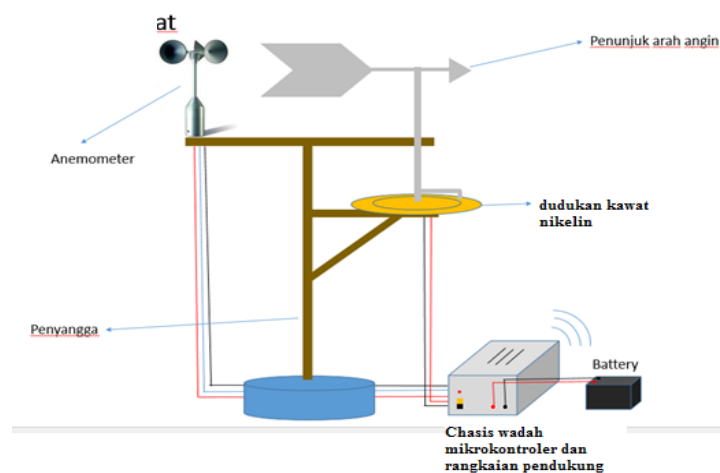
- a. Melakukan pengujian jumlah pulsa tiap 1 periode putaran yang dihasilkan pada sistem anemometer. Jika jumlah pulsa terhitung sebanyak 45 atau sesuai dengan jumlah lubang yang dibuat pada cakram, maka dilanjutkan dengan pengujian sistem lain.
- b. Memvariasi panjang lengan *cup* anemometer dengan 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 padaudukan sehingga didapatkan pola grafik perubahan resistensi kawat tersebut terhadap kenaikan sudut. Pengukuran resistensi dilakukan dengan menggunakan interval sudut karena padaudukan 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.

- g. Menguji coba anemometer dan *wind vane* secara bersamaan dengan angin yang dihembuskan dengan kelajuan dan arah tertentu.
- h. Mengidentifikasi data mengenai kelajuan dan arah angin yang dikoleksi oleh program “*Anemometer Data Logger*” saat kedua instrumen tersebut bekerja bersamaan.
- i. Jika terdapat permasalahan yang muncul saat proses pengujian di dalam lab, maka peneliti mencoba menghilangkan atau meminimalisir permasalahan tersebut sebelum diuji di lapangan.
- j. Melakukan pengujian kedua instrumen tersebut di lingkungan terbuka selama 2 hari berturut-turut. Pengujian dilakukan selama 1 hingga 2 jam setiap harinya dengan interval pengambilan data setiap 15 detik sekali.

4. Desain Alat



Gambar 17. Desain sistem anemometer, *wind vane*, dan *transceiver WiFi*

5. 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 *ouput* 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.

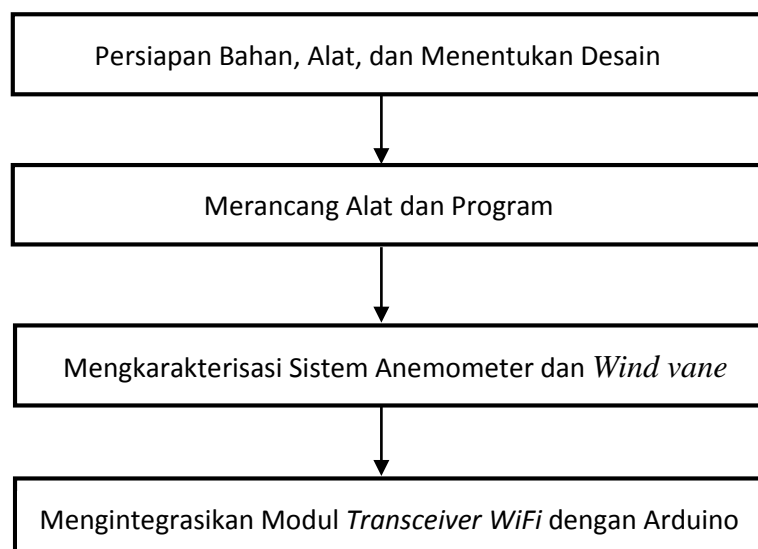
Variasi sudut yang dilakukan dengan interval kenaikan 5° mulai dari sudut 5° hingga 360° . Dengan mempertimbangkan perubahan tegangan yang terukur dari hasil variasi sudut dan resolusi ADC mikrokontroler, maka besarnya penguatan tegangan dapat ditentukan. IC mikrokontroler arduino uno ATmega 328p 10 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 2^{10} 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.

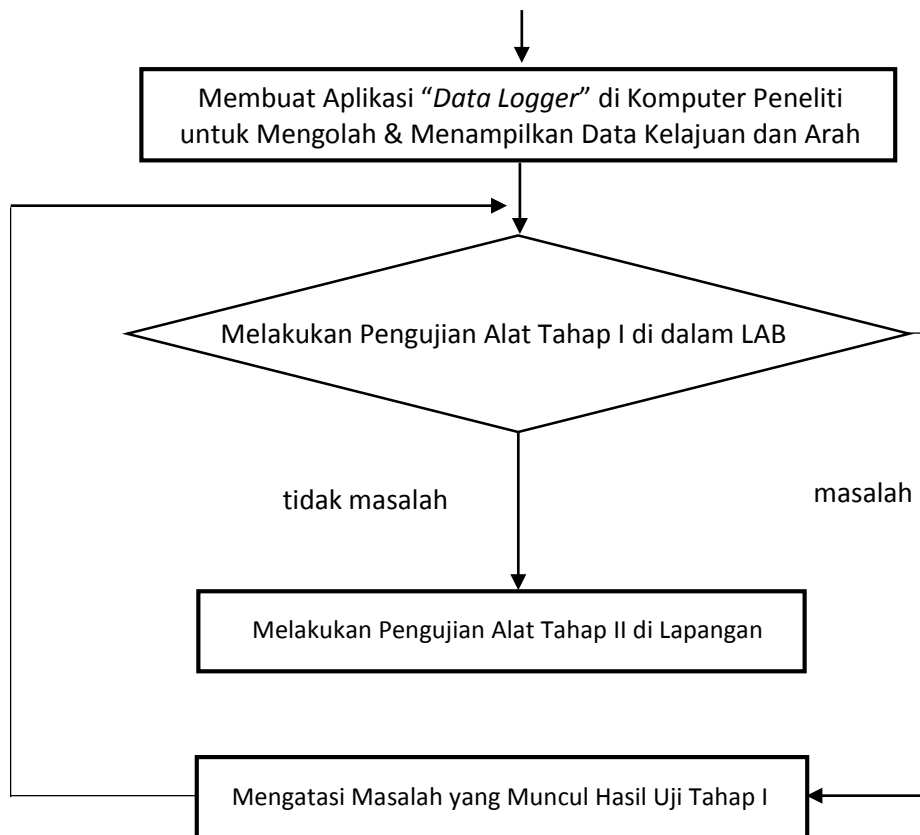
Rangkaian penguat tegangan yang digunakan berjenis penguat instrumentasi dengan IC OpAmp bertipe LM324. Semakin besar penguatan yang diberikan maka ADC dapat mendeteksi perubahan sudut yang lebih kecil dari 5° . Namun penguatan yang diberikan juga harus dibatasi agar efek *noise* yang ikut dikuatkan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

6. Diagram Alir Penelitian

Langkah-langkah penelitian ini ditunjukkan melalui diagram alir tahapan penelitian di bawah:





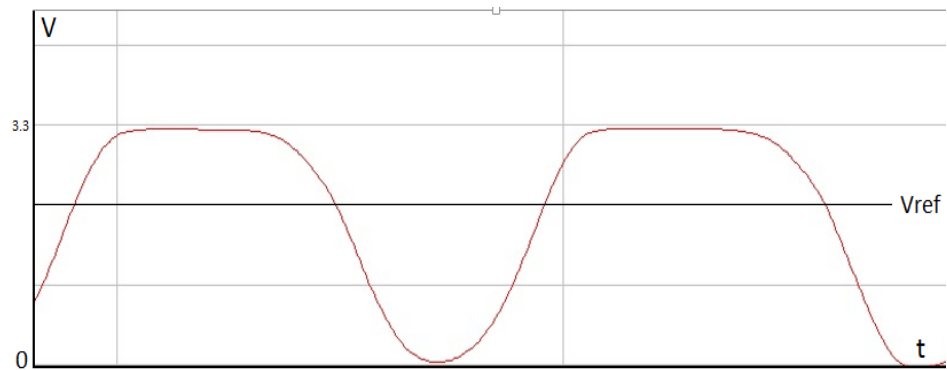
intensitas cahaya dari *LED* yang diterima oleh fotodioda mengalami fluktuasi saat cakram berputar.



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 fotodioda mengecil dan resistansi fotodioda membesar. Akibatnya, tegangan V_{R2} menjadi mengecil. Namun, saat cahaya dari *LED* masuk melalui lubang pada cakram dan mengenai fotodioda, intensitas cahaya yang diterima fotodioda menjadi lebih besar dibandingkan saat cahaya terhalang oleh cakram. Resistansi fotodioda yang membesar mengakibatkan tegangan yang terukur pada V_{R2} membesar. Fluktuasi intensitas cahaya akibat rotasi sumbu anemometer menyebabkan fluktuasi tegangan V_{R2} .

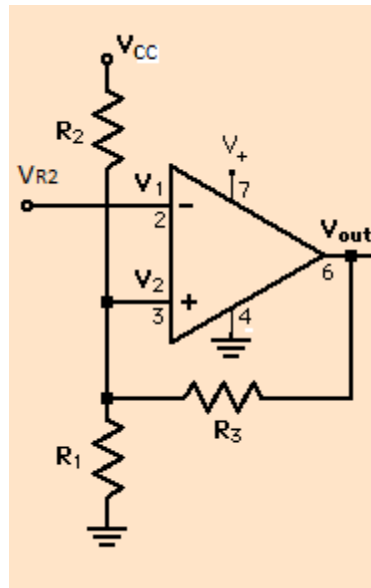
Tegangan yang terukur pada V_{R2} berfluktuasi mulai dari 0.06 V hingga 3.3 V.



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* ($V_{out} = 0 \text{ V}$) 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

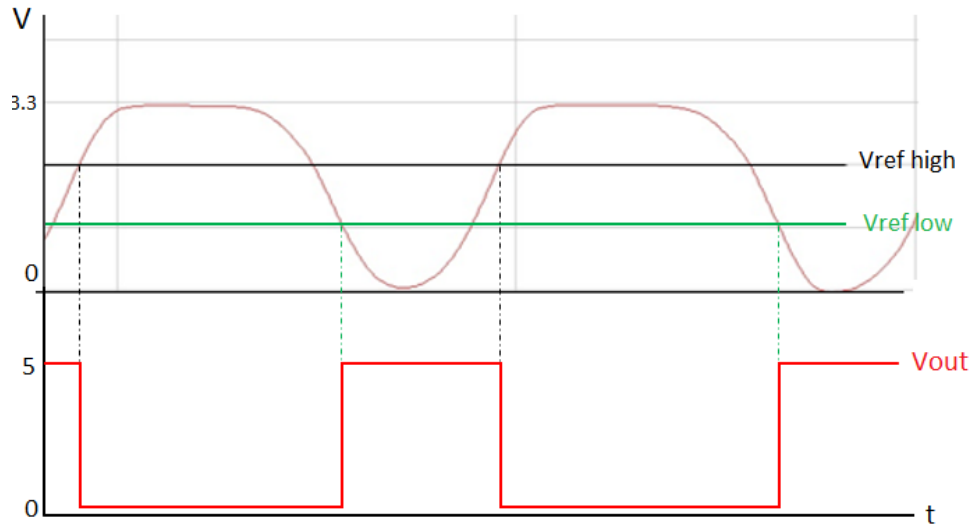
Sedangkan saat *output* komparator pada kondisi *high* ($V_{out} = V_{cc}$), persamaan (35) menjadi

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

di mana:

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

R_{p23} = resistansi paralel R_2 dan R_3

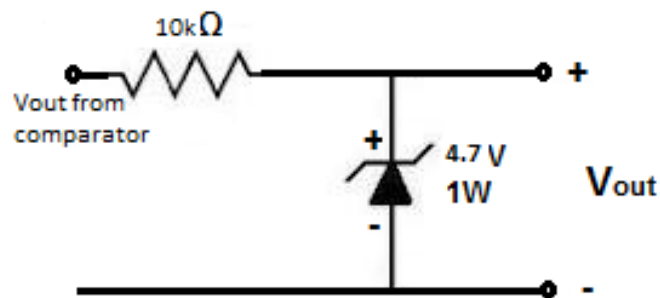


Gambar 22. *Output* rangkaian komparator schmitt trigger

$V_{ref\ high}$ 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

$$\begin{aligned} I_Z &= \frac{7.6-4.7}{10^4} \\ &= 0.29\ mA \end{aligned} \quad (39)$$

Arus maksimal yang diizinkan untuk mengalir pada dioda zener adalah

$$P_{max\ zener} = I_{Z\ max} V_Z$$

$$I_{Z\ max} = \frac{P_{max}}{V_Z}$$

$$= \frac{1}{4.7}$$

$$= 212 \text{ mA} \quad (40)$$

di mana:

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

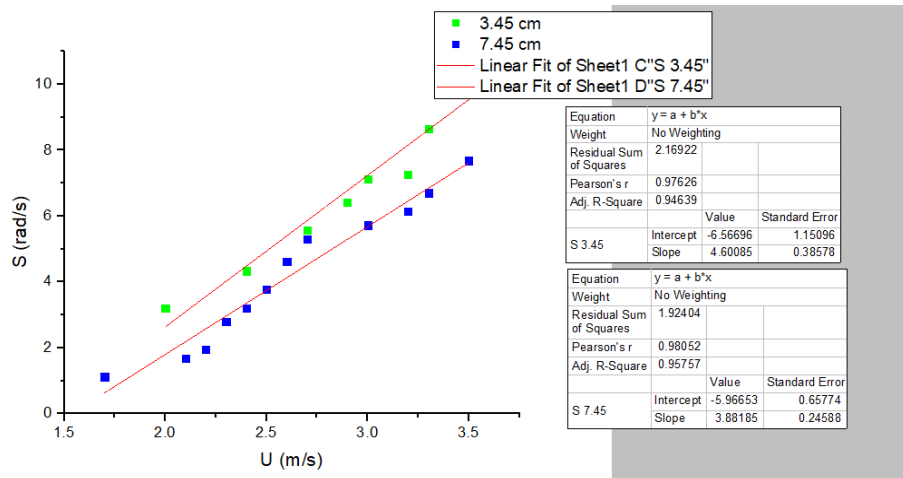
$I_{z \text{ max}}$ = arus maksimal yang diizinkan (A)

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 berosilasi 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.

Tabel 1. Nilai faktor anemometer dengan variasi kelajuan angin dan panjang rotor *cup*

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

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.

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

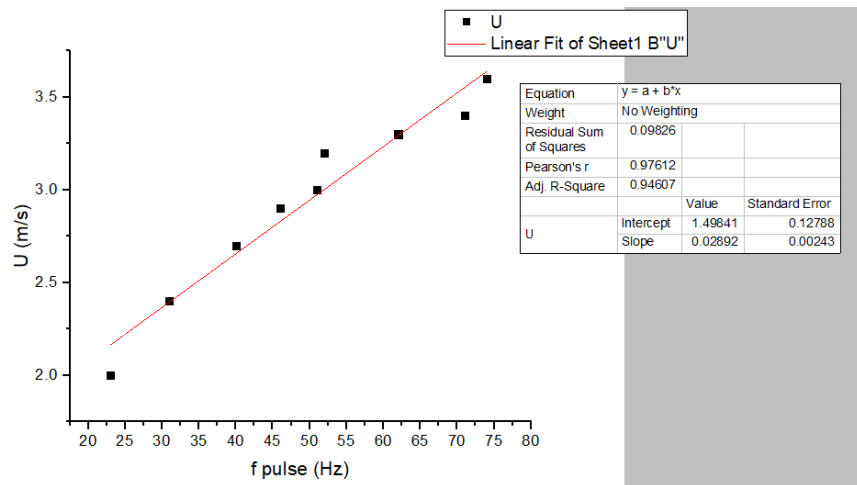
C. Hasil Karakterisasi dan Pengkalibrasian Anemometer

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 laminar (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 $U(f) = 0.0313(f - 23) + 2$.



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

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 $U(f_r) = 1.41f_r + 1.28$.

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.

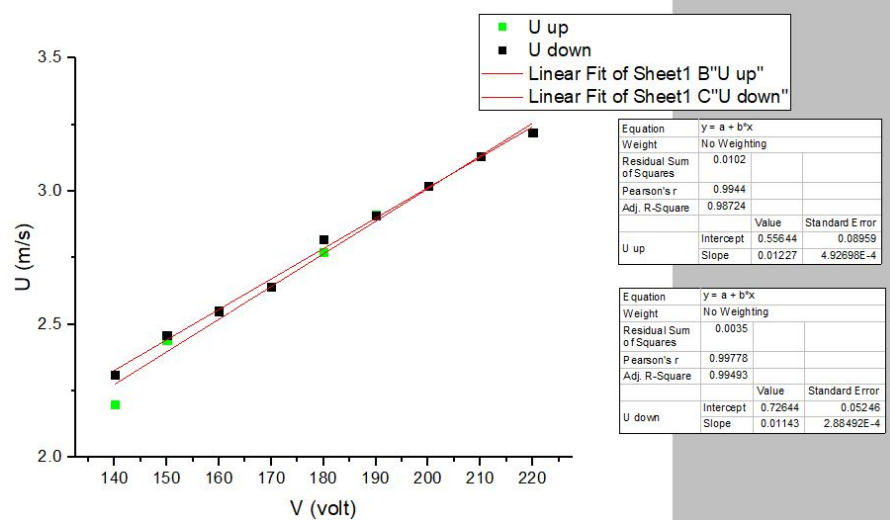
3. Histeresis Anemometer

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



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

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 histerisis.

4. Pengkalibrasian Anemometer Buatan Peneliti Dengan Menggunakan Anemometer Kincir

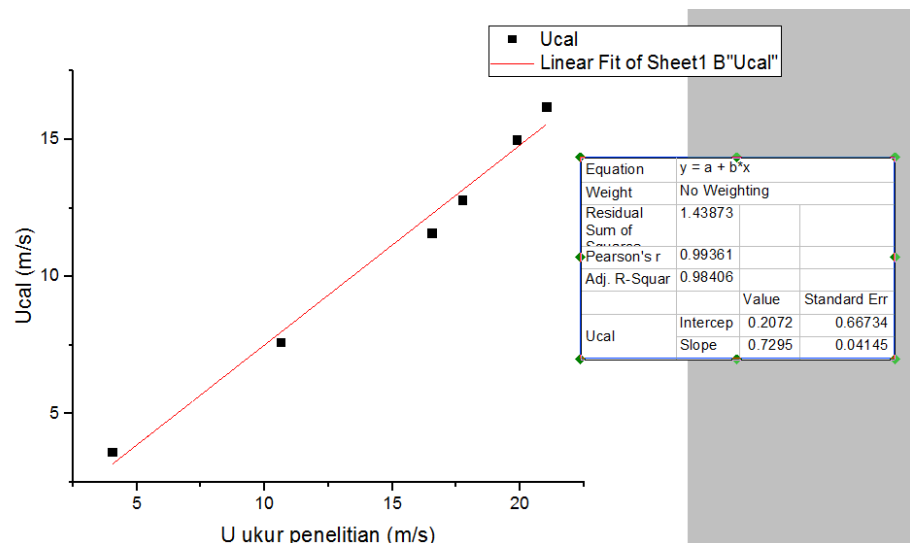
Karena faktor anemometer, K , pada anemometer hasil perancangan tidak bernilai satu (tidak ideal), yang ditandai dengan perkalian antara panjang rotor *cup* dengan laju anguler sumbu tidak bernilai sama dengan laju angin ($U \neq \omega_{sumbu} R_{rotor}$), maka anemometer ini harus dikalibrasi dengan 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.

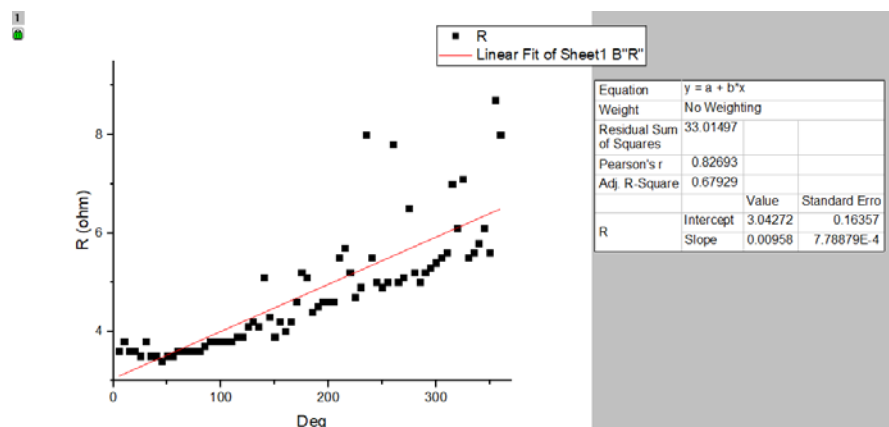
D. Hasil Karakterisasi Sensor Arah Berbasis Resistivitas Kawat Nikrom dan Perancangan *Wind vane*

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° .

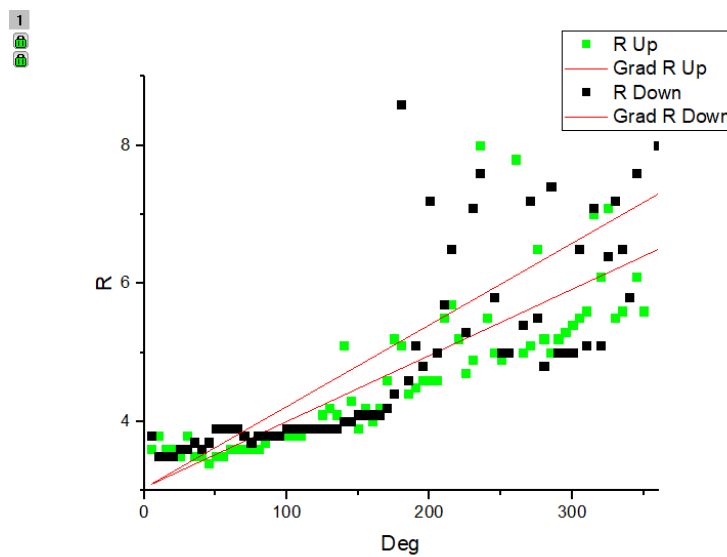


Gambar 28. Grafik hubungan antara sudut penunjuk arah angin dan resistansi kawat nikrom pada suhu lingkungan 25°C

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.

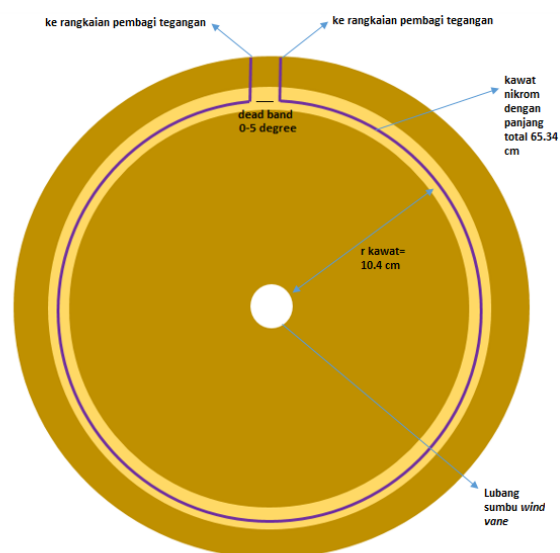


Gambar 29. Grafik hubungan antara sudut dan resistansi kawat nikrom diukur secara 2 arah (naik dan turun)

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.

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

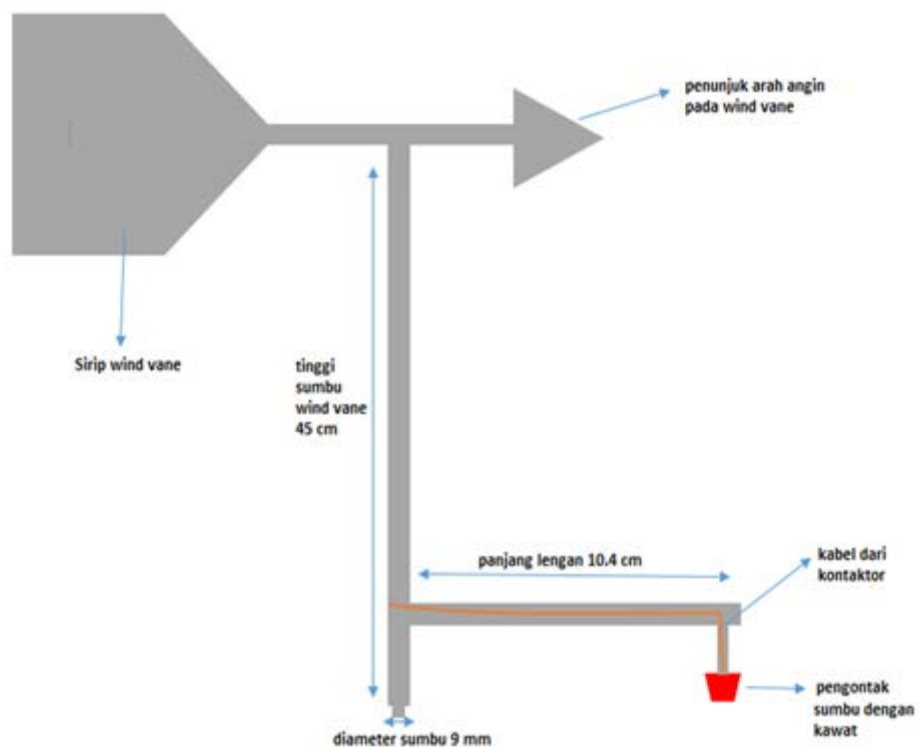
Dengan memanfaatkan kayu yang sudah dibentuk menjadi silinder tipis, peneliti menempelkan kawat nikrom secara melingkar pada permukaan atasnya. Desain alat ini dapat dilihat pada gambar 30.



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.

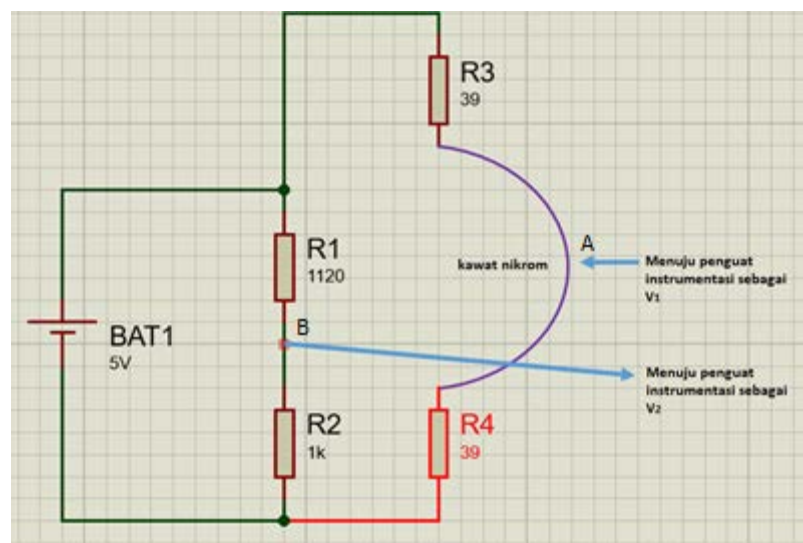
Hasil perancangan sumbu *wind vane* dan lengan yang berfungsi sebagai penyanggung kawat dapat dilihat pada gambar 31.



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

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

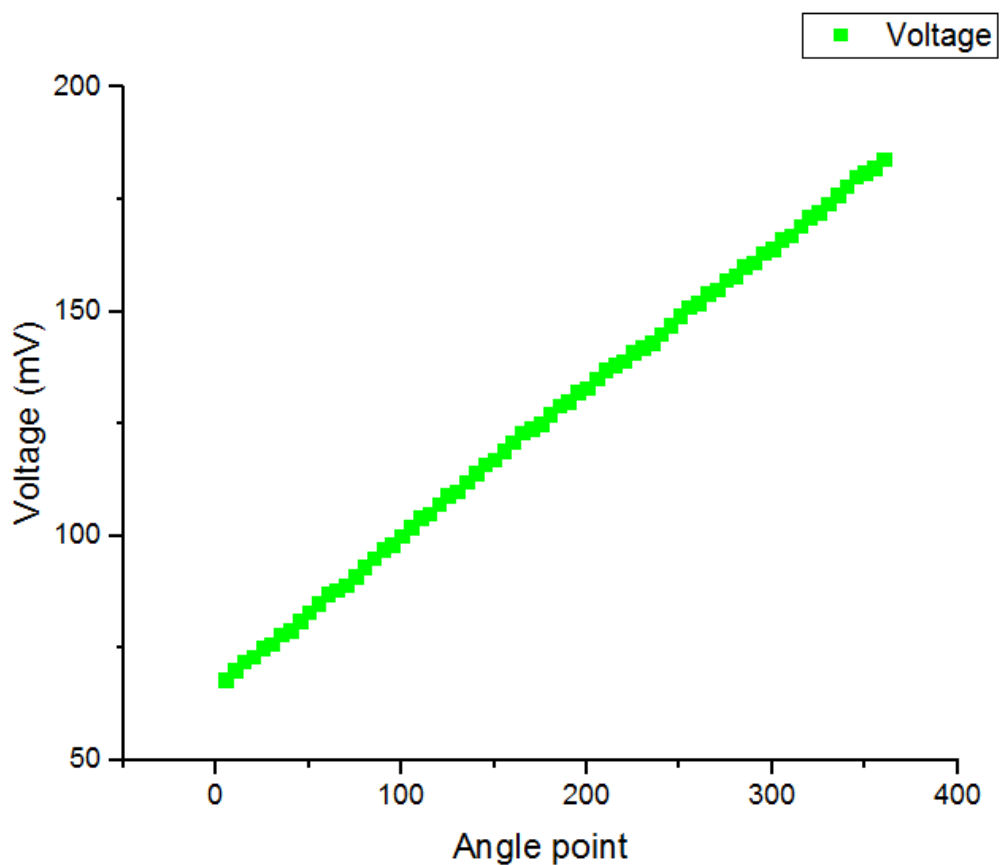
penyinggung kawat. Kabel yang dihubungkan dengan penyinggung kawat berfungsi untuk mengukur tegangan kawat pada posisi tertentu dan hasil pengukuran tegangan tersebut kemudian dijadikan *input* pada rangkaian penguat instrumentasi. Rangkaian elektronik yang berfungsi mengkonversi perubahan resistansi 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

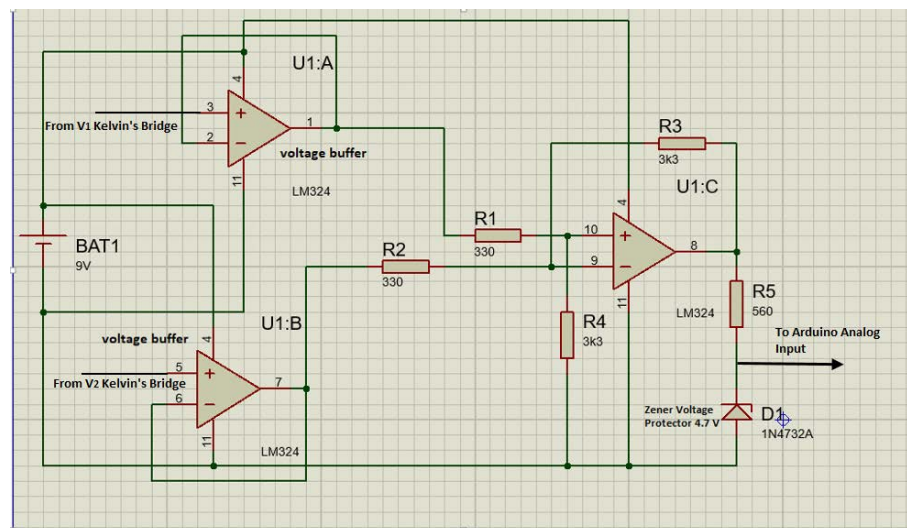
antara titik A dan B ketika *wind vane* menunjuk titik sudut 5° pada papan (sebagai acuan titik nol) sebesar 68 mV. Setelah dilakukan pengukuran tegangan antara titik A dan B hingga mencapai sudut 360° , diketahui bahwa pola kenaikan sudut terhadap kenaikan tegangan membentuk kurva linier. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 33.



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

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.



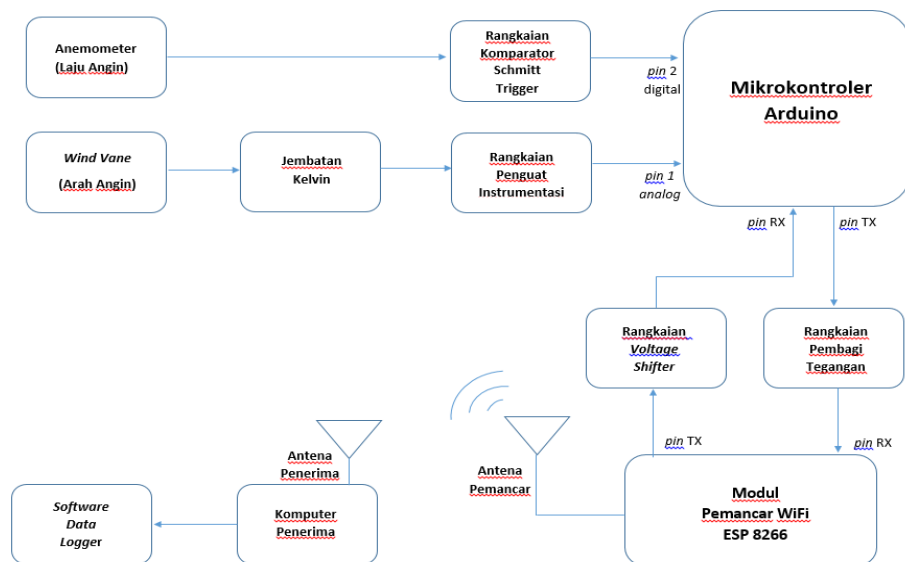
Gambar 34. Skema rangkaian penguat instrumentasi dengan penguatan sebesar 10 kali

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° .

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

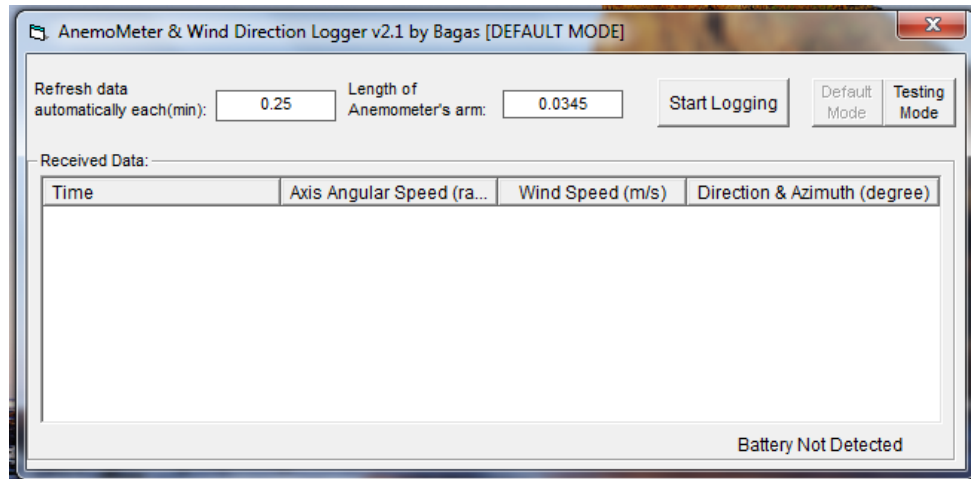
Hasil perancangan transmisi data kelajuan dan arah angin menggunakan WiFi dapat dilihat pada gambar 35.



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*

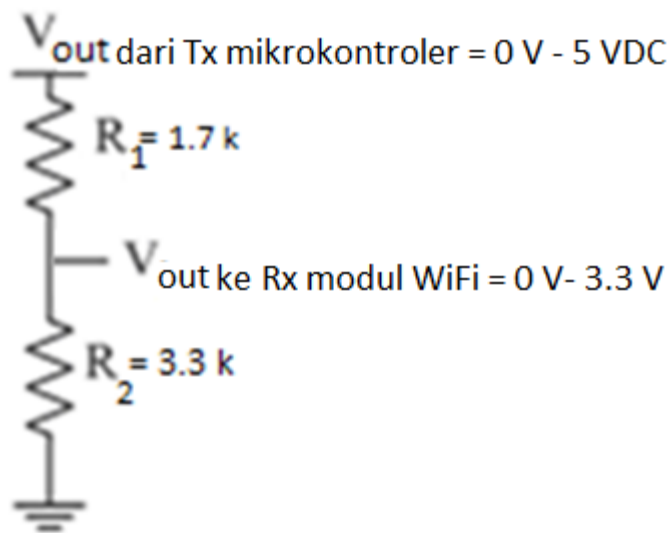
Keterangan gambar 37:

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.

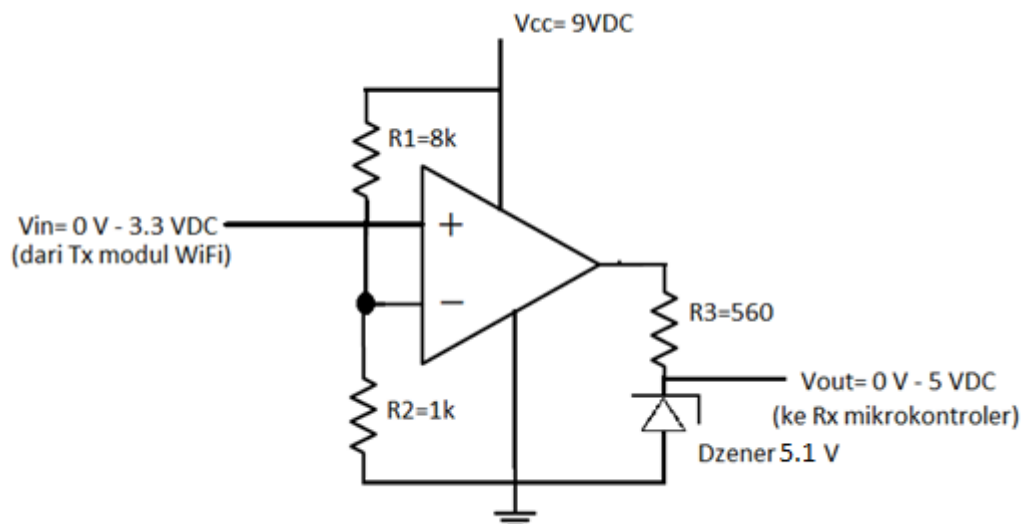


Gambar 38. Rangkaian pembagi tegangan

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*.

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 $560\ \Omega$ dan dioda zener dengan *breakdown voltage* $5.1\ \text{V}$ yang dirangkai secara seri. Saat amplitudo pulsa tegangan yang dihasilkan *output* rangkaian komparator bernilai $9\ \text{V}$, maka dioda zener meregulasi tegangan tersebut menjadi sekitar $5.1\ \text{V}$.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan mengenai instrumen pengukur kelajuan dan arah angin, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

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.

B. 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.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Perhitungan Variasi Panjang Lengan (Rotor) Cup Anemometer

Dengan memperpendek ketiga lengan *cup* sebesar 4 cm, maka momen inersia masing-masing lengan *cup* tersebut menjadi

$$I_2 = \frac{1}{3}m(l_1 - 0.04)^2 \quad (42)$$

$$\text{Jika } I_1 = \frac{1}{3}ml_1^2,$$

maka

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{(l_1 - 0.04)^2}{l_1^2} I_1 \\ &= \frac{(0.0745 - 0.04)^2}{0.0745^2} I_1 \\ &= 0.216 I_1 \end{aligned} \quad (43)$$

Sehingga total momen inersia ketiga lengan *cup* anemometer tersebut menjadi

$$\begin{aligned} I_{\text{Lengan totalbaru}} &= 3I_2 \\ &= 0.65 I_1 \end{aligned} \quad (44)$$

Lampiran 2. Perhitungan Momen Gaya (Torsi) pada Sumbu Anemometer

Momen gaya awal, τ_{awal} , pada sumbu anemometer dengan panjang rotor *cup* 7.45 cm adalah

$$\tau_{awal} = F_{drag} l_{awal} \quad (45)$$

$$= \left(\frac{1}{2} \rho_{air} A_{cup} v_{relative}^2(\theta)\right) l_{awal}$$

$$= 0.0745 \left(\frac{1}{2} \rho_{air} A_{cup} v_{relative}^2(\theta)\right) \quad (46)$$

dan momen gaya akhir untuk panjang rotor 3.45 cm adalah

$$\tau_{akhir} = \left(\frac{1}{2} \rho_{air} A_{cup} v_{relative}^2(\theta)\right) (l_{awal} - 0.04) \quad (47)$$

$$= 0.0345 \left(\frac{1}{2} \rho_{air} A_{cup} v_{relative}^2(\theta)\right)$$

$$= 0.463 \tau_{awal} \quad (48)$$

Lampiran 3. Spesifikasi Teknis Anemometer dan *Wind Vane*

1. Spesifikasi Umum

A. Tipe Sensor

Kelajuan Angin *Shaft encoder*

Arah Angin Sensor resistif (Kawat Nikrom)

B. Panjang Kabel Terpasang 2 m

C. Diameter Cup Anemometer 6.5 cm

D. Panjang Lengan Anemometer 3.45 cm

E. Tegangan Ouput Sensor Cahaya 3.3 V (*Highest*); 0.06 V (*Lowest*)

F. Tegangan Referensi *Schmitt Trigger* *UT*:0.99 V; *LT*:0.23 V

G. Jumlah Pulsa Tiap 1 Revolusi Cakram 45

H. Resolusi Sudut Minimum Tiap Pulsa 8°

I. Panjang Sumbu Anemometer 30 cm

J. Tegangan Kerja Sistem Anemometer 10-14.5 V

K. Jangkauan Kelajuan Angin 2-19.6 m/s

L. Material Sumbu Anemometer Aluminium

M. Material Lengan Cup Anemometer Aluminium

N. Material Cup Anemometer Plastik

O. Bentuk Cup Anemometer *Sphere*

P. Material Penunjuk Arah Angin Plat Aluminium

Q. Resolusi *Wind Vane* 5°

R. Massa Total Anemometer 511.4 gr

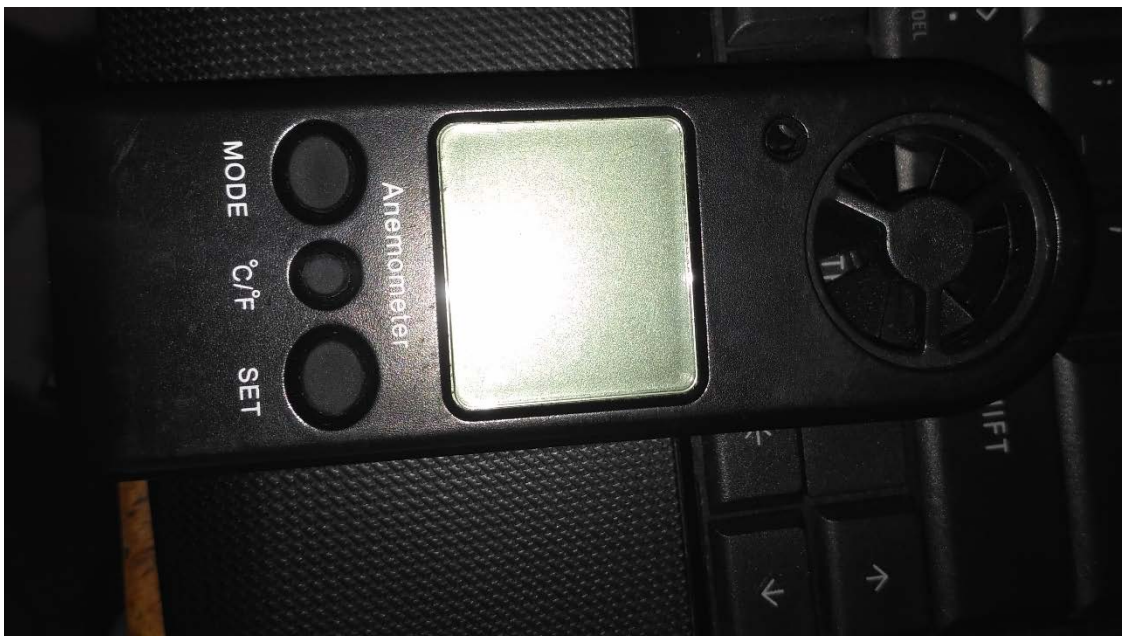
S. Area *Dead Band* Sensor Arah Angin 0°-5°

T. Dimensi Sirip *Wind Vane*30cmx30cm

Lampiran 4. Dokumentasi Penelitian



Gambar 40. Pengkalibrasian anemometer



Gambar 41. Anemometer kincir (*windmill*)

Lampiran 5. Hasil Uji Coba Lapangan Anemometer dan *Wind vane* Selama 2 Hari

1. Hasil Pengetesan Hari Pertama, Tanggal 2 November 2017

11/2/2017 11:03:38 AM 951	0	0	Error, Unknown Direction
11/2/2017 11:03:53 AM	0	0	W, 271.2 deg from N
11/2/2017 11:04:08 AM N	.14	2.06	W, 273.8 deg from N
11/2/2017 11:04:23 AM N	.14	2.06	W, 248.8 deg from N
11/2/2017 11:04:38 AM	0	0	S, 193.8 deg from N
11/2/2017 11:04:53 AM from N	1.12	2.22	SW, 230.8 deg from N
11/2/2017 11:05:08 AM N	.28	2.08	S, 198.8 deg from N
11/2/2017 11:05:23 AM	0	0	W, 272.5 deg from N
11/2/2017 11:05:38 AM 951	0	0	Error, Unknown Direction
11/2/2017 11:05:53 AM N	.7	2.15	SW, 207.6 deg from N
11/2/2017 11:06:08 AM from N	2.37	2.42	SW, 241.1 deg from N
11/2/2017 11:06:23 AM	0	0	SW, 232.1 deg from N
11/2/2017 11:06:38 AM Direction 951	1.68	2.31	Error, Unknown Direction 951
11/2/2017 11:06:53 AM	0	0	SW, 243.6 deg from N
11/2/2017 11:07:08 AM	0	0	W, 250 deg from N
11/2/2017 11:07:23 AM	0	0	W, 252.5 deg from N
11/2/2017 11:07:38 AM	0	0	SW, 243.6 deg from N
11/2/2017 11:07:53 AM	0	0	W, 257.5 deg from N
11/2/2017 11:08:08 AM 951	0	0	Error, Unknown Direction
11/2/2017 11:08:23 AM	0	0	SW, 211.5 deg from N

11/2/2017 11:08:41 AM 951	0	0	Error, Unknown Direction
11/2/2017 11:08:57 AM	0	0	W, 251.2 deg from N
11/2/2017 11:09:13 AM	0	0	SW, 225.6 deg from N
11/2/2017 11:09:29 AM	0	0	SW, 214.1 deg from N
11/2/2017 11:09:44 AM	0	0	SW, 235.9 deg from N
11/2/2017 11:09:59 AM	0	0	N,-13.1 deg from N
11/2/2017 11:10:14 AM	0	0	SW, 237.2 deg from N
11/2/2017 11:10:29 AM	0	0	SW, 237.2 deg from N
11/2/2017 11:10:44 AM from N	27.92	6.49	SW, 230.8 deg
11/2/2017 11:10:59 AM 952	0	0	Error, Unknown Direction
11/2/2017 11:11:14 AM	0	0	SW, 221.8 deg from N
11/2/2017 11:11:29 AM	0	0	S, 188.8 deg from N
11/2/2017 11:11:44 AM	0	0	SW, 220.5 deg from N
11/2/2017 11:11:59 AM N	.14	2.06	SW, 241.1 deg from
11/2/2017 11:12:14 AM	0	0	SW, 243.6 deg from N
11/2/2017 11:12:29 AM	0	0	W, 263.8 deg from N
11/2/2017 11:12:44 AM	0	0	W, 267.5 deg from N
11/2/2017 11:12:59 AM	0	0	W, 280 deg from N
11/2/2017 11:13:14 AM N	.42	2.11	SW, 235.9 deg from
11/2/2017 11:13:29 AM	0	0	SW, 247.5 deg from N
11/2/2017 11:13:44 AM	0	0	NW, 314.4 deg from N

2. Hasil Pengetesan Hari Kedua, Tanggal 3 November 2017

<Time>	Angular velocity(rad/s)	Translational velocity(m/s)	Direction(Degree)
11/3/2017 9:44:15 AM	.28	2.08	N,-9.7 deg from N
11/3/2017 9:44:30 AM	0	0	N, 22.5 deg from N
11/3/2017 9:44:46 AM	0	0	N, 22.5 deg from N
11/3/2017 9:45:01 AM	0	0	NE, 23.5 deg from N
11/3/2017 9:45:16 AM	0	0	N, 19.2 deg from N
11/3/2017 9:45:31 AM 955	0	0	Error, Unknown Direction
11/3/2017 9:45:46 AM Direction 955	1.4	2.26	Error, Unknown
11/3/2017 9:46:01 AM Direction 955	.56	2.13	Error, Unknown
11/3/2017 9:46:16 AM 956	0	0	Error, Unknown Direction
11/3/2017 9:46:31 AM 956	0	0	Error, Unknown Direction
11/3/2017 9:46:46 AM	0	0	W, 257.5 deg from N
11/3/2017 9:47:01 AM	0	0	SW, 246.2 deg from N
11/3/2017 9:47:16 AM	0	0	W, 286.2 deg from N
11/3/2017 9:47:31 AM	0	0	W, 255 deg from N
11/3/2017 9:47:46 AM	0	0	W, 252.5 deg from N
11/3/2017 9:48:01 AM	0	0	SW, 243.6 deg from N
11/3/2017 9:48:16 AM	0	0	W, 250 deg from N
11/3/2017 9:48:32 AM	0	0	W, 285 deg from N
11/3/2017 9:48:47 AM	0	0	SW, 217.9 deg from N
11/3/2017 9:49:02 AM N	.28	2.08	W, 277.5 deg from
11/3/2017 9:49:17 AM	0	0	W, 248.8 deg from N
11/3/2017 9:49:32 AM	0	0	SW, 242.4 deg from N
11/3/2017 9:49:47 AM	.7	2.15	W, 276.2 deg from N
11/3/2017 9:50:02 AM N	.28	2.08	W, 252.5 deg from

11/3/2017 9:50:17 AM N	3.63	2.62	W, 252.5 deg from
11/3/2017 9:50:32 AM	2.23	2.4	W, 260 deg from N
11/3/2017 9:50:47 AM N	1.4	2.26	NW, 304.7 deg from
11/3/2017 9:51:02 AM	0	0	W, 257.5 deg from N
11/3/2017 9:51:17 AM	0	0	SW, 243.6 deg from N
11/3/2017 9:51:32 AM N	.14	2.06	SW, 225.6 deg from
11/3/2017 9:51:47 AM N	.28	2.08	SW, 220.5 deg from