



TESIS - TF185471

**PENGEMBANGAN MONITORING GETARAN
UNTUK EVALUASI KEANDALAN PADA SISTEM
TURBIN ANGIN SECARA *REAL-TIME***

**FIZANTI CAUSIA AGUISTI
NRP. 02311850010003**

**Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc.**

**PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA INSTRUMENTASI INDUSTRI
DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020**



THESIS - TF185471

**DEVELOPMENT OF VIBRATION MONITORING
FOR RELIABILITY EVALUATION IN WIND
TURBINE SYSTEMS REAL-TIME**

**FIZANTI CAUSIA AGUISTI
NRP. 02311850010003**

**Supervisor
Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc.**

**MASTER PROGRAM
INDUSTRIAL INSTRUMENTATION ENGINEERING
ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND SYSTEMS ENGINEERING
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2020**

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Fizanti Causia Aguisti

NRP : 02311850010003

Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S2 Teknik Fisika Bidang Minat Rekayasa
Instrumentasi Industri

Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)

Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tesis dengan judul "**Pengembangan Monitoring Getaran untuk Evaluasi Keandalan pada Sistem Turbin Angin secara *Real-Time***" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tesis ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 5 Agustus 2020

Yang membuat pernyataan,



Fizanti Causia Aguisti

NRP. 02311850010003

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

Telah disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (M.T.)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

FIZANTI CAUSIA AGUISTI

NRP: 02311850010003

Tanggal Ujian : 13 Juli 2020

Periode Wisuda : September 2020

Disetujui oleh :

Pembimbing:

1. Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc.
NIP. 19600901 198701 1 001

.....
Ali Musyafa'

Penguji:

2. Dr. Suyanto, S.T., M.T.
NIP. 19711113 195512 1 002
3. Dr. Dhany Arifianto, S.T., M.Eng
NIP. 19731007 199802 1 001

.....
Suyanto
.....
Dhany Arifianto 07/06 2020

Kepala Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem



Dr. Suyanto, S.T., M.T.
NIP. 19711113 195512 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

PENGEMBANGAN MONITORING GETARAN UNTUK EVALUASI KEANDALAN PADA SISTEM TURBIN ANGIN SECARA *REAL-TIME*

Nama Mahasiswa : Fizanti Causia Agusti
NRP : 02311850010003
Pembimbing : Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc.

ABSTRAK

Bilah turbin angin akan berputar karena pengaruh kecepatan angin. Perputaran bilah turbin angin dapat menimbulkan getaran. Getaran yang ditimbulkan dapat mempengaruhi kinerja dari sistem turbin angin, sehingga perlu dilakukan monitoring. Monitoring getaran dilakukan secara *real-time* pada sumbu x bilah turbin angin sebagai evaluasi keandalan. Getaran yang ditimbulkan akibat hubungan dengan kecepatan angin dapat diketahui atau dijelaskan dari perbedaan nilai kecepatan angin sebelum melalui bilah dengan nilai terkecil 5,4 m/s dan nilai terbesar 6,1 m/s, sedangkan sesudah melewati bilah dengan nilai terkecil 1,7 m/s dan nilai terbesar 2,7 m/s, berdasarkan nilai kecepatan angin tersebut didapatkan nilai daya angin sebelum melalui bilah dengan nilai terkecil 173,614 watt dan nilai terbesar 250,261 watt. Nilai daya angin yang ditangkap oleh turbin angin didapatkan dengan nilai terkecil 47,159 watt dan nilai terbesar 109,313 watt, sedangkan rugi daya angin dalam proses didapatkan dengan nilai terkecil 39,092 watt dan nilai terbesar 55,794 watt. Rugi daya angin tersebut salah satunya dapat berupa getaran yang timbul pada turbin angin, semakin tinggi kecepatan angin sebelum melewati bilah dan semakin kecil kecepatan angin setelah melewati bilah akan menyebabkan rugi daya angin semakin besar serta menghasilkan getaran pada turbin angin yang semakin besar pula. Getaran bilah yang ditimbulkan karena kecepatan angin yang tidak stabil dan adanya pengaruh beban pada salah satu bilah didapatkan nilai laju kegagalan (λ) sebesar 0,00013 dengan distribusi eksponensial. Dari nilai laju kegagalan (λ) tersebut, didapatkan nilai keandalan $R(t)$. Nilai keandalan $R(t)$ mengalami laju penurunan hingga mencapai yang telah ditentukan yaitu 55% atau 0,55. Nilai keandalan $R(t)$ berdasarkan getaran bilah pada sumbu x mengalami penurunan setelah 4540 hari atau setelah 12,4 tahun operasi. Berdasarkan hasil yang didapat, dibutuhkan penjadwalan secara berkala sebelum komponen mengalami penurunan nilai keandalan $R(t)$ atau sebelum 4540 hari atau 12,4 tahun operasi. Pengembangan sistem monitoring mendapatkan hasil secara *real-time*, dimana variabel yang di monitoring yaitu data getaran, kecepatan angin, dan kecepatan putar. Respon waktu yang dibutuhkan untuk mengirim data secara *online* yaitu 15 detik sedangkan untuk data secara *offline* yaitu setiap detik.

Kata kunci : Bilah, daya angin, getaran, keandalan, kecepatan angin, laju kegagalan, monitoring, *real time*, rugi daya, turbin angin.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DEVELOPMENT OF VIBRATION MONITORING FOR RELIABILITY EVALUATION IN WIND TURBINE SYSTEMS REAL-TIME

By : Fizanti Causia Agusti
Student Identity Number: 02311850010003
Supervisor : Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc.

ABSTRACT

The wind turbine blades will rotate due to the influence of wind speed. Rotating wind turbine blades can cause vibrations. The vibrations generated can affect the wind turbine system, so monitoring is necessary. Vibration monitoring is carried out in real-time at the x transition of turbine blades. After spacing with a value of 1.7 m / s and the largest value of 2.7 m / s, based on the value of wind speed, the value of wind power before being in the highest value is 173,614 watts and the largest value is 250,261 watts. The value of the wind power captured by the wind turbine is obtained with the best value of 47,159 watts and the largest value of 109,313 watts, while the wind power loss in the process is obtained with a value of 39,092 watts and the largest value of 55,794 watts. One of the losses in wind power can consist of vibrations arising in the wind turbine, the higher the wind speed before passing through the blades and the faster the wind speed after passing through the blades, the greater the wind power loss and the greater the vibration of the wind turbine. The vibration of the blades caused by the unstable wind speed and the effect of the load on one of the blades get the failure rate (λ) value of 0.00013 with an exponential distribution. From the failure rate (λ), the value of R (t) is obtained. The agreed value R (t) experiences a decrease rate until it reaches the predetermined value, namely 55% or 0.55. The value of R (t) based on the vibration on the x-axis decreased after 4540 days or after 12.4 years of operation. Based on the results obtained, regular scheduling is required before the component experiences a decrease in sign value (t) or before 4540 days or 12.4 years of operation. The development of the system obtains real-time results, where the monitored variables are vibration data, wind speed, and rotational speed. The response time needed to send data online is 15 seconds, while for offline data, it is every second.

Key words : Blades, wind power, vibration, reliability, wind speed, failure rate, power losses, monitoring, real time, wind turbines.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur atas karunia Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, serta shalawat dan salam kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW, atas terselesaikannya tesis dengan judul *“Pengembangan Monitoring Getaran untuk Evaluasi Keandalan pada Sistem Turbin Angin secara Realtime”*.

Berbagai motivasi dan bantuan materil maupun non-materil telah diterima penulis selama melaksanakan tesis. Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih terutama kepada:

1. Bapak Dr. Suyanto, S.T, M.T selaku Kepala Departemen Teknik Fisika.
2. Bapak Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc. selaku pembimbing tesis yang telah dengan ikhlas dan sabar dalam membimbing serta memberi pengarahan secara intensif dalam pengerjaan tesis sehingga tesis ini dapat terselesaikan dengan baik.
3. Bapak Agus Muhammad Hatta, S.T, M.Si, Ph.D selaku dosen wali yang telah memberikan motivasi dan bimbingan selama penulis menempuh pendidikan pascasarjana.
4. Kedua orang tua dan saudara-saudara keluarga Agusti yang senantiasa memberikan dukungan dan bantuan secara moril, materil, maupun spiritual.
5. Seluruh Dosen dan karyawan Pascasarjana Teknik Fisika FTI ITS.
6. Radian Indra, Muhammad Khamim Asy'ari , Kayi Mahdy Yattaqi, dan Moh. Berel Toriqi yang telah bersedia meluangkan waktunya untuk berdiskusi serta memeberi motivasi demi terselesaikannya tesis ini.
7. Alfi Firman yang bersedia meluangkan waktu untuk berdiskusi, memberikan motivasi, semangat, dan dukungan demi terselesaikannya tesis ini.
8. Fitria Zulfa, Shafira Shelly, dan Wardhani Putri yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberikan motivasi, semangat, dan dukungan demi terselesaikannya tesis ini.
9. Seluruh teman-teman angkatan 2018 Pascasarjana Teknik Fisika FTI ITS.

10. Dan semua pihak yang turut membantu dan memperlancar tesis ini, yang tidak dapat penulis sebutkan satu per-satu.

Penulis sepenuhnya menyadari bahwa laporan tesis ini tidak sempurna. Sehingga kritik dan saran yang membangun untuk kesempurnaan laporan tesis ini sangat diharapkan oleh penulis. Semoga laporan tesis ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca.

Surabaya, Juli 2020

Penulis

DAFTAR ISI

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
DAFTAR NOTASI/SIMBOL.....	xxi
BAB 1.....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Masalah.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
BAB 2.....	7
KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	7
2.1 Turbin Angin	7
2.1.1 Klasifikasi Turbin Angin	7
2.2 Sistem Kondisi Monitoring	11
2.2.1 Analisis Getaran	12
2.2.2 Evaluasi Keandalan	13
2.2.3 Laju Kegagalan (<i>Failure Rate</i>).....	15
2.2.4 Monitoring Secara <i>Real-time</i>	16
2.3 Peta Kendali Monitoring Turbin Angin.....	17
BAB 3.....	21
METODE PENELITIAN.....	21
3.1 Skema Pengembangan Monitoring Getaran Sistem Turbin Angin	21

3.2	Prosedur Penelitian.....	22
3.2.1	Pemilihan Komponen.....	23
3.2.2	Pengambilan Data Kecepatan Angin	26
3.2.3	Pengolahan Data Kecepatan Angin.....	27
3.2.4	Perancangan Sistem Monitoring	27
3.2.7	Kalibrasi Sensor	30
3.2.8	Pengujian Sistem Monitoring.....	31
3.2.9	Pengambilan Data Getaran Turbin Angin.....	31
3.2.10	Pengolahan Data Getaran Turbin Angin	32
3.2.11	Perhitungan Evaluasi Keandalan	33
3.2.12	Analisis Hasil dan Diskusi.....	33
3.2.13	Kesimpulan.....	33
3.2.14	Penyusunan Laporan Akhir	33
BAB 4	.....	35
HASIL DAN PEMBAHASAN	.....	35
4.1	Hasil Kecepatan Angin	35
4.2	Hasil Hubungan Kecepatan Angin dengan Kecepatan Putar.....	36
4.3	Hasil Kalibrasi Sensor	37
4.4	Hasil Pengujian Sistem Monitoring	46
4.5	Hasil Pengujian Getaran	48
4.6	Hasil Perhitungan Evaluasi Keandalan.....	49
BAB 5	.....	53
KESIMPULAN DAN SARAN	.....	53
5.1	Kesimpulan	53
5.2	Saran	54
DAFTAR PUSTAKA	.....	55
LAMPIRAN A	.....	59
Source Code Kalibrasi Sensor Accelerometer MPU6050	.....	59
LAMPIRAN B	.....	61
Source Code Arduino	.....	61
LAMPIRAN C	.....	67
Spesifikasi <i>Set-up</i> Turbin Angin	.....	67

LAMPIRAN D	69
Data Getaran Bilah TurbinAngin	69
LAMPIRAN E DATA KEANDALAN BILAH TURBIN ANGIN	75
BIODATA PENULIS	87

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Turbin angin berdasarkan kecepatan rotasi bilah (Wagner, 2017).....	8
Gambar 2. 2 Turbin angin berdasarkan arah rotor	8
Gambar 2. 3 Komponen dalam turbin angin (A.R. Jha, 2011)	10
Gambar 2. 4 plotting getaran terhadap gelombang (Scheffer & Girdhar, 2004) ..	13
Gambar 2. 5 Grafik distribusi eksponensial	15
Gambar 3.1 Ilustrasi monitoring getaran sistem turbin angin.....	21
Gambar 3. 2 Set-up monitoring getaran sistem turbin angin	21
Gambar 3.3 Alur penelitian.....	22
Gambar 3. 4 Sensor proximity (Braun, Wichert, Kuijper, & Fellner, 2015)	23
Gambar 3. 5 Sensor Anemometer	24
Gambar 3. 6 Modul sensor accelerometer MPU6050 (Gokdemir, 2017)	25
Gambar 3. 7 Orientasi arah getaran dan sensitivitas pada MPU6050 (Gokdemir, 2017)	25
Gambar 3.8 Set-up eksperimen turbin angin.....	28
Gambar 3. 9 Pemasangan modul IC sensor accelerometer	28
Gambar 3. 10 Modul accelerometer terhubung dengan Arduino.....	29
Gambar 3. 11 Blok diagram perancangan perangkat keras sistem monitoring dengan mikrokontroler dan thingspeak	29
Gambar 3. 12 Set-up eksperimen peletakan beban pada salah satu bilah turbin angin	32
Gambar 4. 1 Hubungan antara kecepatan angin dengan kecepatan putar	37
Gambar 4. 2 Set-up rancangan perangkat keras.....	46
Gambar 4. 3 Pemasangan sensor accelerometer MPU6050 (GY-521) di sumbu x nacelle	46
Gambar 4. 4 Hasil pengujian monitoring menggunakan thingspeak	47
Gambar 4. 5 Grafik rata-rata akselerasi terhadap penambahan beban.....	48
Gambar 4. 6 Grafik keandalan bilah turbin angin.....	51

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Peta kendali monitoring turbin angin.....	17
Tabel 4. 1 Hasil pengolahan data kecepatan angin	35
Tabel 4. 2 Data kalibrasi sensor accelerometer MPU6050 (GY-521) sumbu x....	37
Tabel 4. 3 Data kalibrasi sensor accelerometer MPU6050 (GY-521) sumbu y....	39
Tabel 4. 4 Data kalibrasi sensor accelerometer MPU6050 (GY-521) sumbu z ...	41
Tabel 4. 5 Data Kalibrasi Sensor Kecepatan Putar (Proximity).....	42
Tabel 4. 6 Data kalibrasi sensor anemometer	44
Tabel 4. 7 Hasil monitoring getaran nacelle dengan peletakan sensor pada sumbu vertikal didapatkan hasil keluaran sensor untuk sumbu x, y, z, kecepatan angin, dan kecepatan putar.....	47
Tabel 4. 8 Hasil Keandalan Sistem Turbin Angin	49

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR NOTASI/SIMBOL

$F(t)$	: Cumulative Distribution Function (CDF)	
$R(t)$	: Reliability Function	
$f(t)$	: Probability Density Function (PDF)	
P_w	: Daya angin sebelum melewati bilah	watt
ρ	: Massa jenis udara	kg/m ³
A	: Luas penampang	m ²
V_w, V_1	: Kecepatan angin sebelum melewati bilah turbin angin	m/s
C_P	: Koefisien daya turbin angin	
V_2	: Kecepatan angin setelah melewati bilah turbin angin	m/s
P_t	: Daya mekanik turbin angin (watt)	watt
L	: Rugi daya (watt)	watt
C_{Pmaks}	: Koefisien daya turbin angin maksimal	0,593
λ	: Laju kegagalan	
\bar{x}	: Rata-rata	
σ	: Standar deviasi	

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Angin merupakan salah satu sumber daya yang telah dimanfaatkan oleh masyarakat selama lebih dari 3000 tahun untuk pekerjaan mekanis dalam berbagai keperluan. Angin mulai mengalami penurunan pemanfaatan ketika terjadinya peristiwa revolusi industri yang menyebabkan penurunan dalam penggunaan energi angin dan lebih memilih menggunakan energi padat dan fosil yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar. Turbin angin ditemukan pertama pada tahun 1888 dan dibangun di Ohio yang digunakan untuk menghasilkan listrik. Kapasitas turbin angin mengalami peningkatan seiring dengan perkembangan zaman, beberapa negara maju memanfaatkan turbin angin sebagai sumber energi yang ramah lingkungan. Denmark tahun 1890 melakukan pembangunan turbin angin Poul La Cour. Turbin angin tersebut menghasilkan sekitar 3 MW, kapasitas yang terpasang di Denmark atau sekitar 3% dari konsumsi nasional (Poul la cour museum, 2019).

Perkembangan turbin angin yang lebih besar telah terlaksanakan selama 30 tahun terakhir dari mesin 50 kW sampai 6 mW (Perez, Marquez, Tobias, & Papaalias, 2013). Kapasitas turbin angin terus ditingkatkan dan dikembangkan sehingga menjadi salah satu alternatif energi baru terbarukan. Potensi energi angin yang dihasilkan Indonesia memiliki nilai rata-rata yang tidak besar, berdasarkan survei dan pengukuran data angin yang telah dilakukan sejak tahun 1979, banyak wilayah di Indonesia yang tidak prospektif terhadap turbin angin. Kecepatan angin rata-rata tahunan yang terdapat di Indonesia sebesar 3,4 sampai 4,5 meter per detik yang dapat menghasilkan energi antara 200 sampai 1000 kWh/m. Kapasitas turbin angin tersebut dapat dimanfaatkan di daerah-daerah pesisir yang sulit untuk dijangkau. Instalasi turbin angin cenderung lebih mudah dibandingkan dengan pemasangan jenis pembangkit lainnya.

Kemudahan instalasi dapat ditinjau dari komponen-komponen yang menyusun turbin angin. Komponen penyusun turbin angin saling berhubungan

sehingga kerja atau pergerakan komponen akan mempengaruhi antara satu dengan yang lainnya. Komponen penyusun turbin angin dibagi menjadi beberapa bagian diantaranya, sistem rotor yang terdiri dari bilah dan hub rotor, *nacelle* yang terdiri dari poros utama *gearbox*, generator, rem, bantalan, *nacelle frame*, *yaw* mekanisme, tambahan *crane*, sistem hidrolik, sistem pendinginan, tower, ekor dan pondasi. Bilah merupakan salah satu komponen penting penyusun turbin angin. Turbin angin secara umum memiliki tiga buah bilah atau lebih. Bilah pada turbin angin terhubung dengan rotor yang berfungsi untuk menerima energi kinetik dari angin dan merubahnya menjadi energi mekanik (gerak putar) pada poros penggerak atau rotor, sehingga dapat menggerakkan generator pada turbin angin yang akan menghasilkan energi listrik.

Gerak putar bilah turbin angin dapat menimbulkan getaran (Yang, Tavner, Crabtree, Feng, & Qiu, 2012). Getaran yang ditimbulkan merupakan salah satu aspek penting dalam sistem turbin angin yang perlu dilakukan monitoring. Getaran tersebut dapat mempengaruhi kinerja dari turbin angin, karena dapat mengalami kegagalan yang disebabkan oleh *unbalance*, *misalignment*, variasi beban, *clearance*, resonansi, *mechanical looseness*, kegagalan pada gigi, kegagalan pada *bearing*, masalah pada kelistrikan, gaya aerodinamis dan hidrolik, *oil wheel* dan *oil whip*. *Misalignment* terjadi apabila penyambungan poros yang tidak simetris dan besarnya tergantung dari ketidaksimetrisan penyambungannya. Variasi beban terjadi apabila beban terlalu berat. *Clearance* terjadi saat ada kelonggaran. Resonansi terjadi apabila beberapa komponen memiliki frekuensi yang sama besar dengan putaran mesin. *Mechanical looseness* terjadi apabila kerenggangan baut, kerenggangan *bearing*, kerekatan di pondasi, dan lain-lain (Berry, 2014).

Bilah turbin angin memiliki kompleksitas variabel beban dan kecepatan sehingga menjadi tantangan untuk menciptakan suatu sistem yang efektif. Diantara berbagai teknik, monitoring kondisi suatu komponen berdasarkan getaran yang diukur merupakan salah satu metode yang dapat diandalkan, karena tingkat getaran pada bilah turbin angin secara signifikan mempengaruhi tingkat keandalan sistem turbin angin secara keseluruhan (Escaler & Mebarki, 2018). Getaran dapat menjadi indikator yang tepat untuk monitoring kondisi operasi berbagai jenis komponen mekanis dan struktur. Analisis sinyal getaran dalam satuan waktu maupun frekuensi

dapat digunakan sebagai identifikasi awal kegagalan pada komponen (Guo & Infield, 2012). Getaran memiliki karakter yang umumnya merupakan respon dari suatu benda akibat pergerakan yang terjadi secara terus menerus. Getaran yang terjadi secara terus menerus menimbulkan tingkat akselerasi yang tidak stabil, dimana getaran tersebut dapat memberikan efek buruk seperti gangguan pada komponen lain serta menyebabkan penurunan nilai keandalan pada sistem turbin angin apabila getaran yang dihasilkan tidak sesuai standar.

Getaran dan keandalan merupakan variabel yang perlu dilakukan monitoring pada sistem turbin angin. Penelitian ini dilakukan dengan memonitoring sistem turbin angin yang diberikan penambahan beban pada komponen bilah. Beban tersebut diasumsikan sebagai gangguan pada bilah turbin angin yang dapat menimbulkan kegagalan pada sistem turbin angin. Hasil yang didapatkan berupa data laju kegagalan yang dapat digunakan sebagai acuan untuk mengetahui nilai keandalan dari sistem turbin angin.

Sistem monitoring pada turbin angin telah banyak dilakukan sebelumnya. Sistem monitoring mengalami perkembangan seiring berkembangnya zaman. Perkembangan sistem monitoring dimulai dari sistem monitoring secara manual, sistem monitoring secara *offline* dan yang terbaru adalah sistem monitoring secara *online*. Penerapan sistem monitoring pada komponen penyusun turbin angin dibutuhkan untuk mengetahui kinerja komponen turbin angin. Hasil penerapan sistem monitoring digunakan untuk evaluasi sehingga dapat meningkatkan nilai efisiensi pada komponen penyusun turbin angin, salah satu cara monitoring dengan mempelajari sistem pemantauan dan pengendalian waktu nyata (*real-time*) untuk memonitoring turbin angin (A.S. & Mohan, 2017). Monitoring dapat dilakukan dengan kondisi *real time* dengan menggunakan monitoring sistem secara *offline* dan sistem monitoring secara *online*.

Monitoring secara *offline* yaitu monitoring yang dilakukan secara kontinyu saat produk telah selesai melewati suatu pemrosesan produk, dimana merupakan pemrosesan secara final atau yang kemudian masih akan di proses kembali. Monitoring secara *offline* dilakukan karena memiliki dua sebab. Pertama dilakukan karena kondisi yang tidak memungkinkan bagi produk untuk dimonitoring secara langsung saat tengah diproses dan kedua karena terdapat parameter-parameter yang

tidak terdeteksi sensor dan hanya dapat dimonitor secara langsung oleh manusia, sehingga tidak cukup apabila hanya dimonitoring oleh sensor. Monitoring secara *online* yaitu monitoring secara kontinyu yang dilakukan saat produk sedang dalam pengerjaan. Monitoring secara *online* dilakukan dengan meneruskan data dari sensor yang digunakan kemudian dengan menggunakan mikrokontroler data dikirimkan ke *cloud*, kemudian dapat ditampilkan pada PC atau *Handphone*. Beberapa contoh monitoring secara *online* yaitu sistem SCADA dan IoT (*Internet of Things*).

SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) merupakan suatu sistem monitoring dan kontrol proses dalam suatu infrastruktur yang terinstal secara fisik, sedangkan IoT merupakan suatu sistem komunikasi antar komponen dalam suatu infrastruktur yang terhubung dengan internet. SCADA mengacu pada sentralisasi sistem, sedangkan IoT mengacu pada desentralisasi sistem, sehingga saat salah satu bagian dalam sistem mengalami masalah, maka tidak mengganggu kinerja yang lain. IoT memungkinkan akses dari manapun dan kapanpun sedangkan SCADA hanya dapat diakses dalam suatu lokasi tertentu (IoT, 2018). Instalasi sistem SCADA sulit untuk diaplikasikan, perawatannya cukup rumit, lebih kompleks, dan menempati lebih banyak ruang instalasi. Keterbatasan yang dimiliki sistem SCADA dapat diatasi dengan menggunakan sistem pemantauan dan kontrol berbasis *Internet of Things* (IoT) (Kalyanraj, Prakash, & Sabareswar, 2016).

Pemanfaatan teknologi IoT (*Internet of Things*) dan *cloud computing* untuk turbin angin yang berdiri sendiri digunakan untuk memonitoring kinerja secara *real time*. Sebuah program yang dikembangkan untuk memperoleh data dari *data logger* dan *raspberry pi gateway* digunakan untuk mengirim data ke layanan *cloud* melalui internet. Pemantauan data secara waktu nyata (*real-time*) serta evaluasi kinerja dapat dilakukan di berbagai *platform* dengan pengiriman data interval 1 sampai 10 menit (Akyuz & Demircan, 2019). Penelitian ini bertujuan melakukan sistem monitoring getaran saat kondisi waktu nyata (*real-time*) dengan memanfaatkan sistem monitoring secara *offline* dan *online* yang dapat menyimpan dan menampilkan hasil data atau informasi yang telah didapatkan.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Bagaimana hubungan antara kecepatan angin dengan getaran pada sistem turbin angin?
- Bagaimana hasil analisis keandalan berdasarkan getaran sumbu x pada sistem turbin angin?
- Bagaimana hasil sistem monitoring pada sistem turbin angin secara *real-time*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini berdasarkan perumusan masalah adalah sebagai berikut:

- Mendapatkan hubungan antara kecepatan angin dengan getaran pada sistem turbin angin.
- Mendapatkan hasil analisa keandalan berdasarkan getaran sumbu x pada sistem turbin angin.
- Mendapatkan data monitoring pada sistem turbin angin secara *real-time*.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Turbin angin yang digunakan yaitu *set-up* eksperimen turbin angin.
- Komponen turbin angin yang dianalisis yaitu bilah pada sumbu horizontal (sumbu x).
- Metode yang digunakan untuk mendapatkan nilai laju kegagalan pada sistem turbin angin yaitu variasi pembebanan pada satu bilah.
- Getaran yang dianalisis yaitu akselerasi dari perputaran bilah yang diberikan beban pada salah satu bilah akibat kecepatan angin.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian pengembangan monitoring getaran untuk evaluasi keandalan pada sistem turbin angin secara *real-time* dimanfaatkan untuk berkontribusi dalam

pemanfaatan energi angin secara maksimal sebagai energi yang ramah lingkungan dan mengetahui keandalan sistem turbin angin secara *real time* atau waktu nyata berdasarkan getaran sumbu x bilah.

BAB 2

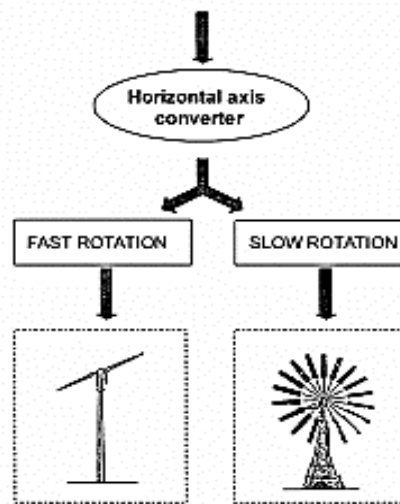
KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Turbin Angin

Turbin angin adalah kincir angin yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Turbin angin bekerja dengan cara mengubah energi mekanik yang dihasilkan akibat berputarnya bilah untuk dijadikan energi listrik. Perputaran bilah akan memancing rotor yang sudah tersambung dengan generator listrik yang kemudian akan dikonversikan menjadi energi listrik. Turbin angin dapat berputar karena adanya vektor dari gaya *lift* dan gaya *drag* yang dihasilkan akibat gaya aerodinamis dari penampang bilah turbin angin. Ketika sebuah penampang *airfoil* terkena angin dari arah depan, maka akan menghasilkan vektor gaya *lift* (L) dan *drag* (D). Perubahan gaya *lift* dan *drag* menyebabkan kecepatan bilah dan torsi poros akan berubah. Perubahan *pitch* bilah akan mempengaruhi kecepatan kincir (RPM) dari rotor karena adanya perubahan jumlah daya tiup angin yang diterima oleh bilah yang dikonversi menjadi kecepatan putar rotor (Asy'ari, 2018).

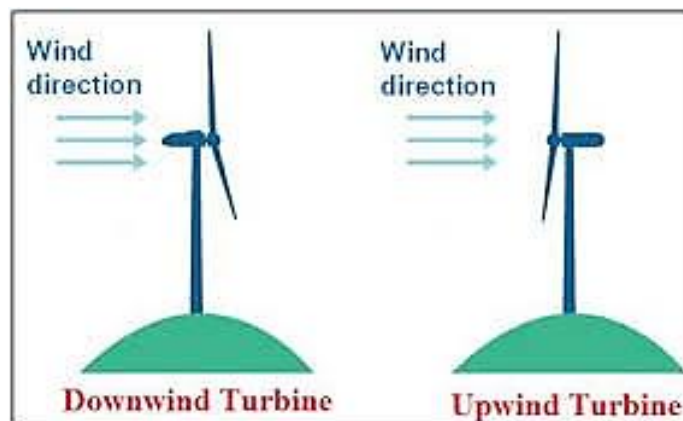
2.1.1 Klasifikasi Turbin Angin

Turbin angin dapat diklasifikasikan berdasarkan sumbunya, yaitu sumbu horizontal dan sumbu vertikal. Pembagian ini bertujuan untuk membedakan turbin angin berdasarkan bentuknya yang akan memudahkan pemilihan penggunaan turbin angin berdasarkan kelebihan dan kekurangan dari masing-masing jenis sumbu yang digunakan. Turbin angin jenis sumbu horizontal, dimana sumbu dari turbin akan sejajar dengan bumi yang mengakibatkan posisi dari bilah atau kincir angin yang digunakan akan lurus dengan arah angin. Tipe turbin angin ini memiliki kemampuan untuk menangkap kecepatan angin yang lebih efisien namun membutuhkan tiang penyangga yang cukup tinggi untuk mengakomodir bilah yang terpasang agar dapat terkena angin dengan maksimal. Turbin angin sumbu horizontal dapat juga dibagi menjadi dua klasifikasi yaitu berdasarkan kecepatan rotasi dari bilah dan dapat juga dibagi berdasarkan arah rotor (Wagner, 2017).



Gambar 2. 1 Turbin angin berdasarkan kecepatan rotasi bilah (Wagner, 2017)

Berdasarkan kecepatan rotasi bilah, turbin angin bersumbu horizontal dibagi menjadi *fast rotation* dan *slow rotation*. *Fast rotation* biasanya digunakan untuk jenis pembangkit, dan memiliki bilah yang lebih sedikit. *Slow rotation* seringkali digunakan di peternakan dan bilah yang digunakan juga lebih banyak, biasanya disebut juga dengan *wind mill*. Pengklasifikasian dari turbin angin sumbu horizontal berdasarkan arah rotor dibagi menjadi dua jenis yaitu *upwind* rotor dan *downwind* rotor. Jenis *upwind* rotor adalah jenis turbin angin yang memiliki rotor yang menghadap ke arah datangnya angin, sedangkan untuk jenis *downwind* rotor adalah jenis turbin angin yang memiliki rotor yang menghadap membelakangi arah datangnya angin.

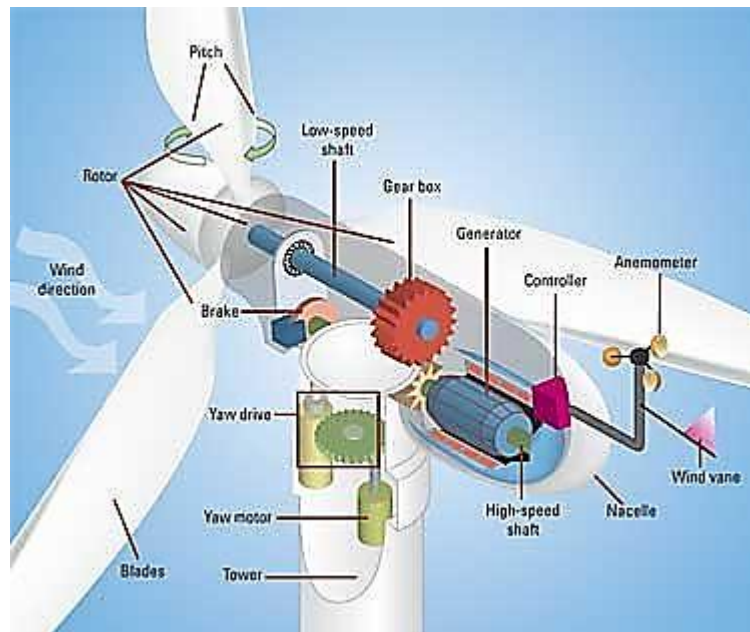


Gambar 2. 2 Turbin angin berdasarkan arah rotor

2.1.2 Komponen Turbin Angin

Turbin angin memiliki komponen yang saling berkesinambungan satu sama lain. Prinsip dasar kerja turbin angin yaitu mengubah energi mekanis dari angin menjadi energi putar pada bilah, selanjutnya putaran bilah digunakan untuk memutar generator yang kemudian akan menghasilkan listrik. Komponen turbin angin sumbu horizontal secara umum terdiri dari bilah, hub, generator, ekor, mekanisme yaw, dan tower. Bilah merupakan bagian dari sebuah turbin angin berupa pelat yang rata. Model bilah yang baik yaitu yang mendekati bentuk *streamline*. Hub merupakan bagian dari rotor yang berfungsi menghubungkan bilah dengan poros utama. Generator adalah alat yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Prinsip kerja generator yaitu menjadikan medan magnet yang ada disekitar konduktor mengalami fluktuasi, sehingga timbul tegangan listrik. Magnet yang berputar disebut rotor dan konduktor yang diam disebut stator.

Ekor merupakan salah satu komponen turbin angin sumbu horizontal. Ekor selalu bergerak menjauhi arah datangnya angin, dengan demikian pemasangan ekor dibagian belakang turbin angin mengakibatkan bagian rotor yang berada di muka turbin angin akan selalu mendekati arah datangnya angin (A.R. Jha, 2011). Mekanisme *yaw* merupakan tempat menempelnya generator dan ekor dengan kedudukan seperti engsel untuk mengarahkan turbin angin frontal terhadap arah datangnya angin. Turbin angin harus memiliki kebebasan bergerak menggeleng (*yawing*) untuk memastikan arah rotor selalu menghadap arah datangnya angin, sehingga perlu mekanisme yang mendukung kebebasan bergerak turbin angin. Tower merupakan tiang penyangga yang fungsi utamanya yaitu menopang rotor, *nacelle*, dan semua komponen turbin angin yang berada di atasnya.



Gambar 2. 3 Komponen dalam turbin angin (A.R. Jha, 2011)

2.1.3 Desain Turbin Angin

Desain dan konstruksi turbin angin berfungsi untuk memaksimalkan potensi dari angin sekitar, dengan cara menyesuaikan penggunaan jenis dari turbin angin yang akan digunakan. Desain dan konstruksi ini bertujuan untuk menghindari adanya ketidakcocokan dari kondisi di lapangan dengan kondisi dari turbin yang akan dipasang atau digunakan. Salah satu contohnya adalah jumlah dari bilah (umumnya memiliki jumlah antara 2 sampai 3 bilah) , arah dari rotor yang digunakan (*downwind* atau *upwind*), bahan dari bilah, metode pemasangan dari turbin, tipe pengendali daya yang digunakan, menggunakan *driver direct* generator atau *gearbox*. Untuk mendapatkan hasil yang optimal dari sebuah turbin angin perlu diperhatikan ciri-ciri berikut:

- a. Bentuk bilah seperti memuntir, sehingga gaya aerodinamis semakin baik.
- b. Untuk mendapatkan energi yang lebih baik, bilah dipasang langsung pada rotor.
- c. Untuk bilah yang ideal berjumlah tiga buah karena menghasilkan pembagian gaya dan keseimbangan yang lebih baik.

2.2 Sistem Kondisi Monitoring

Sistem kondisi monitoring merupakan bagian penting dalam menentukan keandalan. Kondisi monitoring adalah proses pemantauan atau alat yang digunakan untuk mendeteksi kesalahan dini, kegagalan, dan keausan mesin dengan tujuan untuk meminimalkan waktu henti dan biaya operasi dan pemeliharaan. *Condition monitoring* atau juga biasa disebut *automatic supervision* digunakan untuk *limit checking* dari beberapa variabel pada peralatan yang diidentifikasi, metode estimasi telah terintegrasi dengan kecerdasan komputer dalam mengolah data. Oleh karenanya, disebutkan bahwa mungkin metode ini merupakan metode deteksi kesalahan dan diagnosis terdepan yang dapat digunakan dalam mendeteksi kerusakan yang kecil sejak awal munculnya dan mendiagnosa penyebabnya (Isermann, 2011). Kondisi monitoring memiliki fungsi utama yaitu untuk memberikan indikasi yang dapat diandalkan mengenai adanya kesalahan dalam sistem turbin angin dan menunjukkan lokasi dan tingkat keparahan situasi. Fungsi kondisi monitoring dalam menunjukkan lokasi dan tingkat keparahan situasi sangat penting, karena parahnya kerusakan akan menjadi pemicu untuk penyelidikan lebih lanjut secara terperinci oleh teknisi pemantau dengan tujuan mendiagnosa kesalahan. Titik ini adalah hubungan antara kondisi monitoring dan sistem diagnostik dimana kondisi monitoring mengarah pada diagnosis. Komponen turbin angin memerlukan sistem monitoring, karena kecepatan angin yang tidak konstan menyebabkan perputaran bilah tidak konstan. Perputaran bilah yang tidak konstan dapat menyebabkan getaran pada komponen turbin angin dan dapat mengalami kegagalan selama operasi.

Sistem kondisi monitoring terdiri dari kombinasi sensor dan peralatan pemrosesan sinyal. Sistem kondisi monitoring memberikan indikasi kontinu dari komponen yang mengalami kegagalan berdasarkan kondisi yang ditimbulkan diantaranya analisa getaran, akustik, analisa oli, pengukuran regangan, dan termografi. Sistem kondisi monitoring dapat dilakukan secara *online* atau *offline*. Monitoring membutuhkan akuisisi data yang baik dan pemrosesan sinyal yang tepat, karena kesalahan dapat dideteksi saat komponen beroperasi dan tindakan yang tepat dapat direncanakan pada waktunya untuk mencegah kerusakan atau kegagalan komponen. Tugas pemeliharaan dapat direncanakan dan dijadwalkan

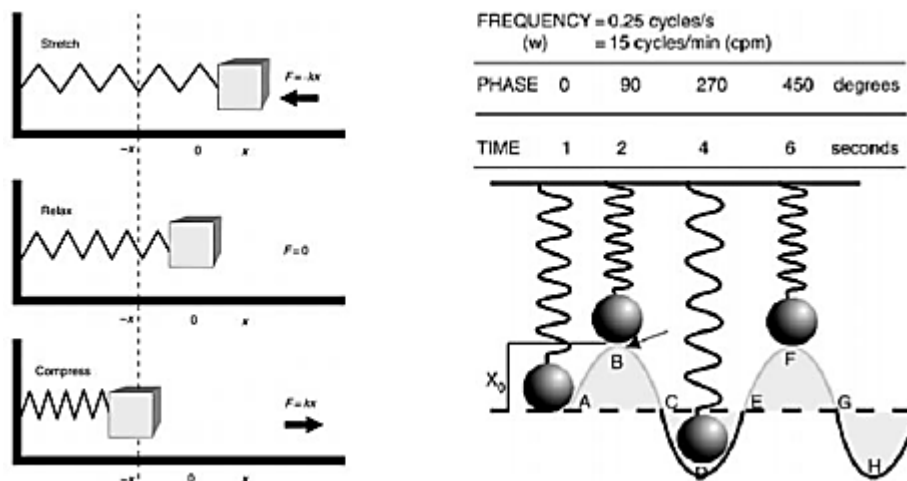
lebih efisien, menghasilkan peningkatan keandalan, ketersediaan, pemeliharaan, dan keselamatan sedangkan *downtime*, perawatan, dan biaya operasional dapat berkurang. Kondisi monitoring memiliki beberapa macam jenis teknik diantaranya yaitu analisis pemantauan getaran, inspeksi visual dan *non-destructive test*, analisa pemantauan performansi dan lainnya. Analisis pemantauan berbasis getaran merupakan teknik yang paling banyak diketahui dan paling banyak digunakan (Beebe, 2004). Metode ini tidak diragukan lagi sebagai teknik yang paling efektif dalam mendeteksi kerusakan pada permesinan rotasional (Scheffer & Girdhar, 2004).

2.2.1 Analisis Getaran

Kesalahan atau kegagalan pada komponen turbin angin sebagian besar menyebabkan getaran. Analisis getaran merupakan salah satu metode yang bermanfaat sebagai prediksi awal terhadap adanya masalah mekanikal, elektrik, dan proses pada komponen, mesin-mesin dan sistem proses yang kontinu. Analisis getaran saat ini menjadi metode yang sangat populer yang digunakan pada turbin angin, terutama pada komponen yang berputar untuk mendeteksi kesalahan atau kegagalan. Teknologi sensor yang diterapkan dipilih dengan mempertimbangkan rentang frekuensi dan kondisi operasi. Sensor kecepatan, akselerometer, transduser posisi, dan sensor energi digunakan untuk masing-masing rentang frekuensi rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi. Transformasi Fast Fourier merupakan teknik pemrosesan sinyal yang biasa digunakan dalam analisis getaran untuk mengubah sinyal domain waktu menjadi sinyal domain frekuensi. Sebagai teknik pemantauan, analisis getaran diterapkan pada komponen turbin angin seperti poros, bantalan, roda gigi, dan bilah. Getaran pada turbin angin dihasilkan dari kecepatan angin yang tidak konstan dan menyebabkan putaran pada bilah turbin angin tidak konstan. Kecepatan angin akan mengenai bilah dan memutar bilah. Kecepatan angin yang tidak konstan menyebabkan perputaran bilah tidak konstan dan membuat komponen turbin angin bergetar.

Secara natural pada setiap benda yang bergerak akan menghasilkan getaran. Getaran merupakan hasil dari pergerakan suatu mesin atau komponen-komponennya yang bergerak mundur dan maju dari posisi mulanya. Pada setiap

permesinan terdapat tiga sifat mendasar; massa (M), kekakuan (k) dan redaman (C) yang saling terkait untuk menentukan bagaimana mesin akan beraksi terhadap kekuatan yang menyebabkan getaran. Seperti halnya pada Gambar 2. dengan menerapkan gaya F ke massa, massa bergerak ke kiri, menekan pegas. Ketika massa dilepaskan, massa akan bergerak kembali ke posisi netralnya dan kemudian bergerak lebih jauh ke kanan sampai ketegangan k pegas menghentikan massa. Massa kemudian berbalik dan mulai bergerak ke kiri lagi. Gerakan ini secara teoritis dapat terus berlanjut tanpa henti jika tidak ada redaman C dalam sistem dan tidak ada efek eksternal seperti gesekan (Scheffer & Girdhar, 2004).



Gambar 2. 4 plotting getaran terhadap gelombang (Scheffer & Girdhar, 2004)

2.2.2 Evaluasi Keandalan

Keandalan merupakan kemungkinan dari suatu komponen atau sistem untuk dapat beroperasi atau melaksanakan fungsinya. Fungsi tersebut telah ditetapkan pada kondisi pengoperasian tertentu dan dalam lingkungan tertentu untuk periode waktu yang telah ditentukan. Evaluasi keandalan dilakukan untuk mengurangi kegagalan kerja komponen atau dapat melaksanakan fungsinya selama periode waktu (t) atau lebih. Evaluasi keandalan dapat membantu dalam memperkirakan peluang sebuah sistem atau komponen untuk dapat melaksanakan fungsinya dalam jangka waktu tertentu dan dalam kondisi tertentu pula. Sistem atau komponen dapat beroperasi walaupun tidak dapat memenuhi fungsinya secara

maksimal. Ada beberapa hal yang harus diperhatikan dalam evaluasi keandalan, diantaranya sebagai berikut.

- a. Kegagalan dari komponen maupun sistem harus jelas dan dapat diobservasi.
- b. Waktu kegagalan dapat diidentifikasi.
- c. Saat kondisi normal, performansinya dapat diobservasi dengan jelas.

Metode evaluasi keandalan yang dilakukan yaitu evaluasi kuantitatif. Evaluasi kuantitatif dapat dibedakan menjadi evaluasi secara analisis (statik) dan evaluasi dengan metode simulasi. Fungsi keandalan adalah fungsi matematik yang menyatakan hubungan keandalan dengan waktu. Nilai fungsi keandalan merupakan nilai probabilitas, maka nilai fungsi keandalan (R) bernilai $0 \leq R \leq 1$. Fungsi keandalan di notasikan sebagai $R(t)$ dari sistem jika dipakai selama t satuan waktu. Probabilitas sistem dapat berfungsi dengan baik selama pemakaian $[0,t]$. parameter yang akan diukur di dalam pengolahan data yaitu laju kegagalan komponen. Parameter tersebut merupakan variabel random yang dapat didefinisikan secara kontinu. Perhitungan nilai keandalan dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut (Ebeling, 1997):

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_0^{\infty} f(t)dt \quad (2.1)$$

Perhitungan evaluasi keandalan berdasarkan analisis getaran ditentukan dengan menggunakan perputaran bilah turbin angin. Perputaran bilah dapat mengalami kegagalan selama pengoperasian turbin angin. Ketidaksetimbangan bilah dapat berasal dari kesalahan toleransi pembuatan dan konstruksi, lapisan es atau deformasi plastis karena kelelahan. Asimetris aerodinamis dapat disebabkan oleh kecepatan angin yang tinggi dan kesalahan sistem kontrol. Kesalahan dalam mekanisme untuk mengontrol sudut *pitch* dapat menyebabkan satu bilah berbeda dengan bilah yang lainnya, sehingga menimbulkan torsi yang tidak seimbang pada poros putar, yang mengarah ke asimetris aerodinamis. karena kecepatan angin yang tidak konstan menyebabkan perputaran bilah tidak konstan. Perputaran bilah yang tidak konstan dapat menyebabkan getaran pada komponen turbin angin dan dapat mengalami kegagalan selama operasi. Laju kegagalan (λ) sistem turbin angin didapatkan dari pengujian pembebanan salah satu bilah turbin angin.

2.2.3 Laju Kegagalan (*Failure Rate*)

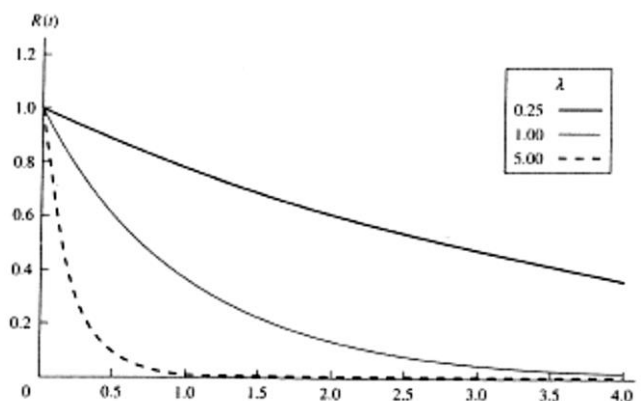
Laju kegagalan atau biasa disebut dengan *failure rate* merupakan banyaknya terjadi kegagalan per satuan waktu. Laju kegagalan dinyatakan sebagai perbandingan antara banyaknya kegagalan yang terjadi dalam selang waktu tertentu dengan total waktu operasi suatu komponen atau sistem. Laju kegagalan dapat dihitung dengan persamaan 2.2 dan 2.3.

$$\lambda = \frac{f}{T} \quad (2.2)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.3)$$

Laju kegagalan memiliki beberapa distribusi salah satunya distribusi eksponensial. Probability Density Function (PDF) distribusi eksponensial ditunjukkan pada persamaan 2.4.

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda(t-\gamma)}, t > 0, \lambda > 0, t \geq 0 \quad (2.4)$$



Gambar 2. 5 Grafik distribusi eksponensial

Jika distribusi waktu antar kegagalan suatu sistem mengikuti distribusi eksponensial, maka:

- a. Fungsi keandalan distribusi eksponensial

$$R(t) = e^{-\lambda(t\gamma)} \quad (2.5)$$

- b. Laju kegagalan distribusi eksponensial

$$\lambda(t) = \lambda \quad (2.6)$$

- c. Waktu rata-rata kegagalan distribusi eksponensial

$$MTTF = \gamma + \frac{1}{\lambda} \quad (2.7)$$

2.2.4 Monitoring Secara *Real-time*

Sistem monitoring mengalami perkembangan seiring berkembangnya zaman. Perkembangan sistem monitoring dimulai dari sistem monitoring secara manual, sistem monitoring secara *offline* dan yang terbaru adalah sistem monitoring secara *online*. Penerapan sistem monitoring pada komponen penyusun turbin angin dibutuhkan untuk mengetahui kinerja komponen turbin angin. Penerapan sistem monitoring digunakan untuk meningkatkan nilai efisiensi pada komponen penyusun turbin angin, salah satu cara monitoring dengan mempelajari sistem pemantauan dan pengendalian waktu nyata (*real-time*) untuk memonitoring turbin angin (A.S. & Mohan, 2017). Monitoring dapat dilakukan dengan kondisi *real time* dengan menggunakan monitoring sistem secara *offline* dan sistem monitoring secara *online*.

Monitoring secara *offline* yaitu monitoring yang dilakukan secara kontinyu saat produk telah selesai melewati suatu pemrosesan produk, dimana merupakan pemrosesan secara final atau yang kemudian masih akan di proses kembali. Monitoring secara *offline* dilakukan karena memiliki dua sebab. Pertama dilakukan karena kondisi yang tidak memungkinkan bagi produk untuk dimonitoring secara langsung saat sedang diproses dan kedua karena terdapat parameter-parameter yang tidak terdeteksi sensor dan hanya dapat dimonitor secara langsung oleh manusia, sehingga tidak cukup apabila hanya dimonitoring oleh sensor. Monitoring secara *online* yaitu monitoring secara kontinyu yang dilakukan saat produk sedang dalam pengerjaan. Monitoring secara *online* dilakukan dengan meneruskan data dari sensor yang digunakan kemudian dengan menggunakan mikrokontroler data dikirimkan ke *cloud*, kemudian dapat ditampilkan pada PC atau *Handphone*.

2.3 Peta Kendali Monitoring Turbin Angin

Tabel 2. 1 Peta kendali monitoring turbin angin

Tahun	Peneliti	Aplikasi	Jenis Penerapan	Keterangan	Hasil
2016	D Kalyanraj, S. Lenin Prakash, S. Sabareswar (Kalyanraj, Prakash, & Sabareswar, 2016)	Pemanfaatan sensor getaran, sistem pemantauan dan kontrol turbin angin berbasis IoT	Eksperimen	Keluaran sensor dihubungkan dengan pengontrol mikro Arduino (memproses sinyal analog) dan Raspberry Pi (mengimplementasikan teknologi IoT). Menggunakan modul getaran SW-420 berbasis pada comparator KM393 dan sensor IR yang digunakan untuk menghitung kecepatan turbin angin	Jika kecepatan meningkat diluar batas minimum, sensor getaran mulai menghitung. Jika perhitungan melebihi nilai ambang batas, akan menghentikan daya dengan mematikan turbin angin. Sistem kontrol turbin angin diadopsi berdasarkan tingkat getaran turbin
2018	Edison Prabhu, K. Sanoofar (Prabhu & A.N., 2018)	Pemantauan turbin angin secara <i>realtime</i> menggunakan pendekatan berbasis IoT	Eksperimen	Penggunaan sensor suhu, sensor getaran, sensor gaya, dan sensor torsi yang terpasang pada turbin angin dan modul RFID. Data yang dikumpulkan oleh sensor diterima oleh server pusat. Implementasi menggunakan Wi-Fi untuk menghubungkan sensor dan server, sedangkan RF terhubung ke server dengan menggunakan cara komunikasi RF dan koneksi 4G digunakan untuk mengakses server oleh ponsel pintar. Status <i>realtime</i> turbin angin dilacak dengan bantuan data yang dikumpulkan oleh sensor sehingga turbin selalu dibawah pemantauan 24x7.	Pemantauan turbin angin sangat efektif, efisien, dan menarik. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa sensitivitas sistem dalam kondisi kesalahan sangat tinggi, jika data penginderaan melewati nilai batas yang telah ditentukan, sistem segera memperingati pengguna dengan informasi tentang kesalahan divisualisasikan dilayar dan membuat alarm.

Tabel 2. 2 Lanjutan

Tahun	Peneliti	Aplikasi	Jenis Penerapan	Keterangan	Hasil
2018	Vishal Kumar Singh, Rishav, Dr Mallikarjun B.C, Uttam Kumar Ray (Singh, Rishav, B.C., & Ray, 2018)	Sistem pemantauan windmill berbasis IoT	Eksperimen	Raspberri Pi 3 digunakan untuk pengontrol sistem utama, Sensor DHT 11 digunakan untuk menangkap suhu dan kelembaban, sensor ADXL345 digunakan untuk mengukur getaran kincir angin, sensor ADC (ADS1115) merupakan converter analog ke digital, relay digunakan untuk mengaktifkan atau menonaktifkan kincir angin , dan dashboarf data merupakan alat manajemen informasi yang secara visual melacakm menganalisism dan menampilkan data yang diinginkan. MQTT merupakan protokol pengiriman pesan yang memberikan client jaringan sumber daya dengan cara sederhana untuk mendistribusikan informasi	Percobaan dilakukan dengan menggunakan prototype kecil kincir angin dan data sensor ditabulasi dalam dashboard secara realtime. Sistem yang telah dirancang untuk memantau berbagai bagian turbin angin menggunakan sensor yang berbeda dan mengendalikan kincir angin sesuai dengan data yang diterima. Dapat menyediakan dashboard secara realtime yang dapat diakses darimana saja
2019	Lina Alhmoud & Hussein Al-Zoubi (Alhmoud & Al-Zoubi, 2019)	Analisa keandalan turbin angin menggunakan IoT, perhitungan reliabilitas dan estimasi masa pakai	Eksperimen	Memperkirakan model keandalan PMSG menggunakan layanan web “Thingspeak” mathwork.	Operator dapat memastikan perkembangan strategi pemeliharaan, mengurangi ketidakpastian, menjaga keandalan dan ketersediaan sistem, dan meningkatkan produksi energi tahunan secara <i>realtime</i>

Tabel 2. 3 Lanjutan

Tahun	Peneliti	Aplikasi	Jenis Penerapan	Keterangan	Hasil
2019	Ersin Akyuz, Batin Demircan (Akyuz & Demircan, 2019)	Pemanfaatan Teknologi IoT dan <i>cloud computing</i>	Eksperimen	Memperoleh data dari logger dan raspberry pi gateway untuk mengirim data ke layanan <i>cloud</i> melalui internet	Sistem yang dirancang fleksibel dan tidak mahal untuk pemantauan data realtime dan penyimpanan data cloud. Analisa data sensor <i>realtime</i> menyediakan keputusan lebih cepat yang dapat menghindari kerusakan pada sistem dan meningkatkan output energi total, pengiriman data interval 1 dan 10 menit

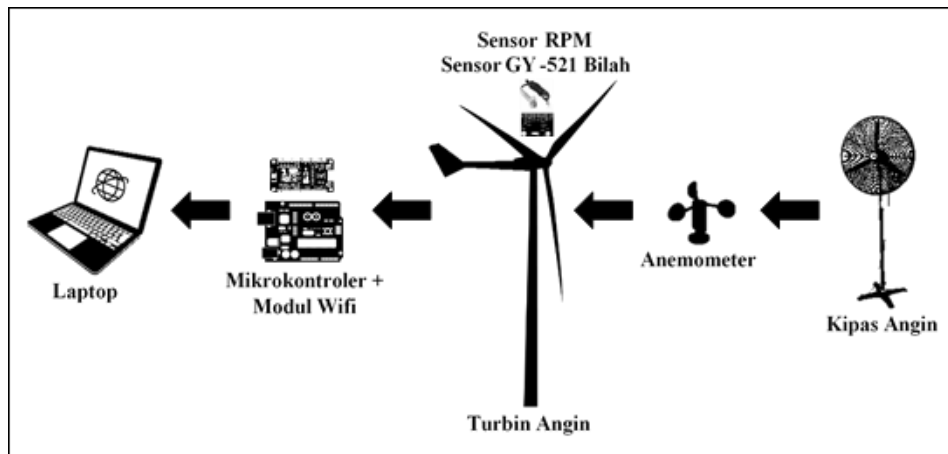
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Skema Pengembangan Monitoring Getaran Sistem Turbin Angin

Monitoring getaran sistem turbin angin sebagai evaluasi keandalan dapat diilustrasikan oleh skema berikut.



Gambar 3.1 Ilustrasi monitoring getaran sistem turbin angin



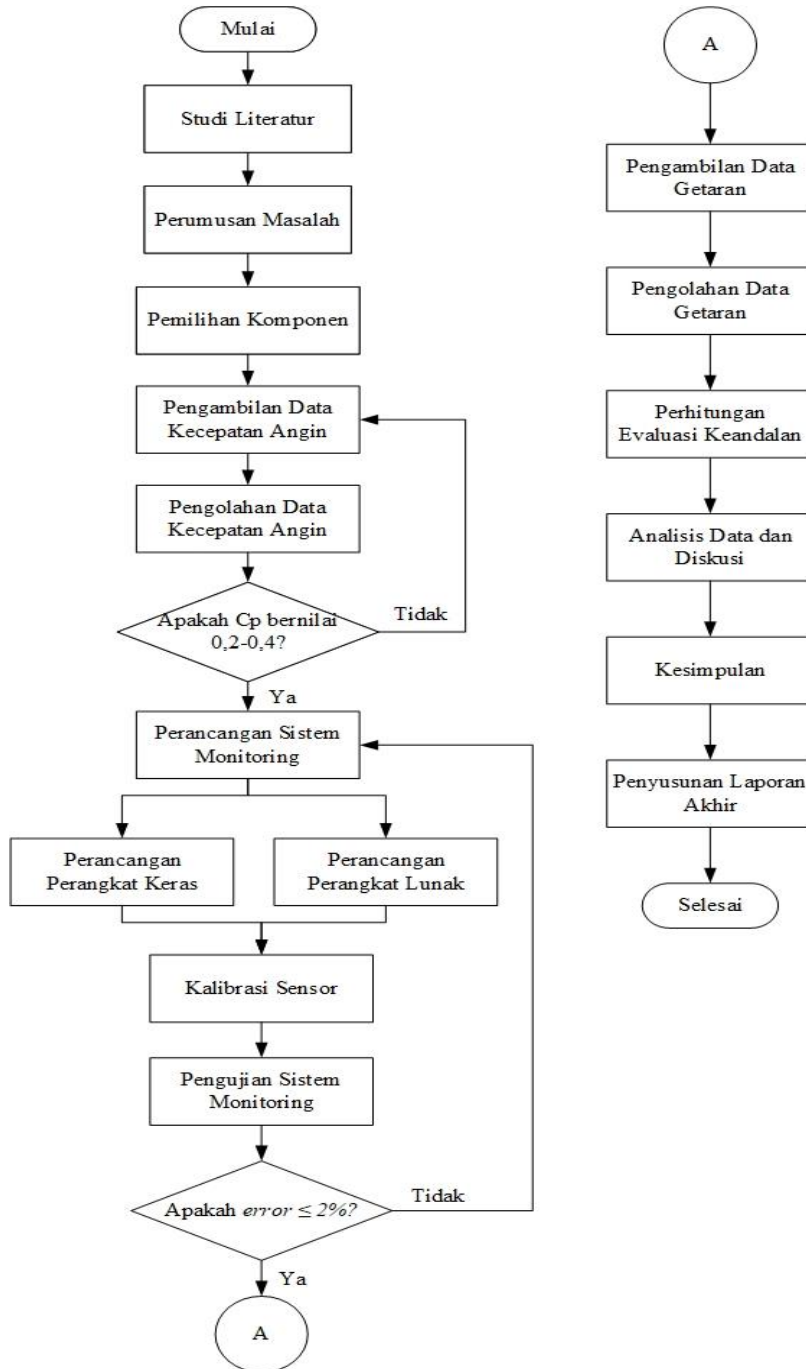
Gambar 3. 2 *Set-up* monitoring getaran sistem turbin angin

Gambar 3.1 dan gambar 3.2 merupakan skema pengembangan monitoring getaran pada sistem turbin angin. Kipas angin digunakan sebagai alat bantu untuk memutar sensor anemometer dan bilah turbin angin. Turbin angin dipasang beberapa sensor yaitu sensor *proximity* dan sensor *accelerometer* pada sumbu horizontal. Seluruh sensor terhubung langsung ke mikrokontroler dan diteruskan ke

cloud. Cloud digunakan untuk menyimpan hasil yang diinginkan diantaranya data kecepatan angin, kecepatan putar, dan getaran.

3.2 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian meliputi tahap-tahap yang dilakukan selama penelitian hingga akhir pembuatan laporan. Prosedur penelitian ini dapat digambarkan oleh alur penelitian berikut.



Gambar 3.3 Alur penelitian

Tahap pertama penelitian ini adalah studi literatur. Studi literatur diperlukan untuk menunjang keberhasilan penelitian. Studi literatur yang dilakukan meliputi turbin angin, monitoring getaran pada sistem turbin angin, dan monitoring keandalan berdasarkan analisis getaran. Tahap kedua yang dilakukan yaitu perumusan masalah. Perumusan masalah dilakukan untuk menjadi penentu bahasan yang akan dilakukan dalam penelitian kali ini. Tahapan ini berisi pernyataan yang akan dicarikan jawabannya melalui pengumpulan data dan digunakan untuk menjawab tujuan pada penelitian ini, kemudian dilanjutkan ke pemilihan komponen.

3.2.1 Pemilihan Komponen

Pemilihan komponen digunakan untuk mendapatkan sistem yang baik dalam memonitoring getaran pada sistem turbin angin, berikut komponen yang digunakan pada penelitian ini diantaranya:

a. Sensor Kecepatan Putar

Sensor *proximity* merupakan alat ukur yang digunakan untuk mendeteksi perubahan jarak suatu perangkat. Perubahan jarak suatu perangkat pada sebuah komponen listrik sangat berpengaruh terhadap daya yang didapat. Daya yang didapat oleh sensor *proximity* akan menghasilkan medan listrik yang lebih besar, hal ini dapat memberikan toleransi posisi yang cukup besar. Cakupan medan listrik yang biasanya dapat dideteksi oleh sensor *proximity* mencapai 30-150 cm diatas material tebal yang tidak konduktif (Braun, Wichert, Kuijper, & Fellner, 2015).



Gambar 3. 4 Sensor *proximity* (Braun, Wichert, Kuijper, & Fellner, 2015)

b. Sensor Anemometer

Sensor anemometer merupakan alat pengukur kecepatan angin yang banyak digunakan dalam bidang meteorologi dan geofisika atau stasiun prakiraan cuaca. Sensor anemometer menggunakan sensor kecepatan (RPM/ *Rotation Per Minute*) atau (RPS/*Rotation Per Second*) yang dipasang pada motor yang berputar. Kecepatan angin dihasilkan dari hembusan angin dan nilai kecepatan angin dapat diketahui saat mengenai sisi-sisi yang berputar pada sensor anemometer. Kecepatan angin tersebut menghasilkan arus listrik yang nilainya sama dengan kecepatannya.



Gambar 3. 5 Sensor Anemometer

c. Sensor Accelerometer MPU6050 (GY-521)

Sensor *accelerometer* merupakan sebuah sensor yang digunakan untuk mengukur percepatan suatu objek, baik statis maupun dinamis. Sensor *accelerometer* bekerja berdasarkan hukum fisika. Sensor *accelerometer* secara statis melakukan pengukuran terhadap percepatan atau perpindahan pada objek yang bergerak. Sensor *accelerometer* terdiri dari sumbu x, y, dan z dengan orientasi yang berbeda-beda untuk setiap sumbu. Sensor MPU6050 merupakan sensor *accelerometer* yang mampu mengukur 3 arah getaran sekaligus. Sensor ini termasuk ke dalam IC MEMS (*Micro Electrical Mechanical System*) yaitu suatu IC yang terdiri dari sistem mekanikal dalam ukuran kecil disertai dengan sistem elektronis didalamnya. Sensor *accelerometer* menggunakan prinsip kapasitor untuk

mendeteksi percepatan pada massa di dalamnya. Berikut spesifikasi IC sensor *accelerometer* MPU6050 (Gokdemir, 2017):

MPU6050 modules (three-axis gyroscope + three-axis accelerometer)

Power supply : 3-5 v (internal low dropout regulator)

Communication modes : standard IIC communications protocol

Chip built-in 16bit AD converter, 16-bit data output

Gyroscope range : 250, 500, 1000, 2000/s

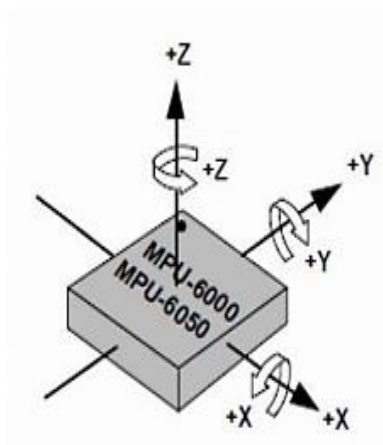
Acceleration range : 2, 4, 8, 16g

IC sensor *accelerometer* dikemas dalam bentuk *board* yang ditunjukkan pada gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Modul sensor accelerometer MPU6050 (Gokdemir, 2017)

Orientasi arah getaran dan respon dari sensor MPU6050 ditunjukkan pada gambar 3.3 yaitu arah x, arah y, dan arah z.



Gambar 3. 7 Orientasi arah getaran dan sensitivitas pada MPU6050 (Gokdemir, 2017)

d. Mikrokontroler

Mikrokontroler merupakan sistem komputer yang ringkas karena dapat menggantikan fungsi komputer dalam pengendalian kerja dengan desain yang jauh lebih ringkas. Mikrokontroler hanya bisa digunakan untuk suatu aplikasi tertentu saja karena program kontrol disimpan pada ROM yang ukurannya relatif besar. RAM hanya digunakan untuk tempat penyimpanan sementara, termasuk *register* yang digunakan pada mikrokontroler. Arduino adalah sebuah *platform* komputasi fisik yang bersifat *open source* dengan *board input* dan *output* yang sederhana (0/1). Arduino memiliki lingkup pengembangan bahasa pengolahan yang dapat dihubungkan dengan *software* dan *hardware* lainnya sehingga dapat mendeteksi dan merespon situasi dan kondisi lingkungan dan menampilkan pada PC. Arduino tersusun dari dua bagian utama yaitu Arduino *board* dan Arduino IDE (*Integrated Development Environment*). Arduino *board* berupa *hardware* yang digunakan ketika menyusun rangkaian.

Arduino IDE merupakan *software* yang digunakan untuk pengolahan pada PC. IDE digunakan untuk membuat gambaran program komputer yang di *upload* ke Arduino *board*. Gambaran program digunakan untuk menentukan pekerjaan yang harus dilakukan oleh Arduino *board*. *Board* Arduino nano memiliki kelebihan yaitu memuat semua yang dibutuhkan untuk menunjang mikrokontroler, mudah menghubungkannya ke sebuah komputer dengan sebuah kabel USB atau memberikan *supply* dengan sebuah adaptor AC ke DC atau menggunakan baterai untuk memulainya. Arduino UNO juga bisa digabungkan bersama modul dengan protokol yang berbeda-beda, sedangkan Arduino IDE merupakan salah satu *software* khusus yang dapat digunakan untuk memprogram mikrokontroler. *Software* ini memungkinkan pengguna untuk menambah dan mengurangi *library* yang ada.

3.2.2 Pengambilan Data Kecepatan Angin

Pengambilan data kecepatan angin dilakukan sebelum angin melewati bilah dan sesudah angin melewati bilah dengan menggunakan alat ukur

anemometer. Pengambilan data dilakukan dengan jarak yang sama antara didepan bilah dan di belakang bilah.

3.2.3 Pengolahan Data Kecepatan Angin

Data kecepatan angin yang sudah didapat, kemudian diolah untuk mendapatkan beberapa nilai diantaranya nilai daya angin, nilai koefisien daya turbin angin, nilai daya mekanik turbin angin, dan nilai rugi daya turbin angin dengan masing-masing persamaan sebagai berikut:

- a. Daya angin sebelum melewati bilah

$$P_w = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V_w^3 \quad (3.1)$$

- b. Koefisien daya turbin angin

$$C_p = 4 \times \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times \left(1 - \frac{V_1 - V_2}{V_1}\right)^2 \quad (3.2)$$

- c. Daya mekanik turbin angin

$$P_t = \omega_t \times T_t \quad (3.3)$$

$$P_t = P_w \times C_p(V_w, \omega_t) \quad (3.4)$$

- d. Rugi daya turbin angin

$$L = (C_{p \text{ maks}} - C_{p \text{ perhitungan}}) \times P_w \quad (3.5)$$

Dimana:

$$C_{p \text{ maks}} = 0,593$$

3.2.4 Perancangan Sistem Monitoring

Perancangan sistem secara umum terdapat tiga bagian penyusun yaitu bagian *input*, proses, dan *output*. Tiga bagian ini yang akan menyusun keberhasilan sistem agar bekerja sesuai dengan yang diharapkan. Tiga bagian penyusun yang dibuat memiliki fungsinya masing-masing. *Input* berfungsi untuk menerima masukan dari parameter yang diukur. Input pada sistem monitoring ini yaitu kecepatan angin. Proses berfungsi untuk mengontrol sistem. Proses pada sistem monitoring ini yaitu mikrokontroler dapat mengukur parameter lingkungan menggunakan sensor dan mengirim ke *cloud*. *Output* berfungsi sebagai indikator dan keluaran yang akan diamati dan diukur. Output pada sistem monitoring ini yaitu dapat menampilkan data getaran, kecepatan angin, dan kecepatan putar. Perancangan sistem dilakukan untuk pengimplementasian pada monitoring getaran

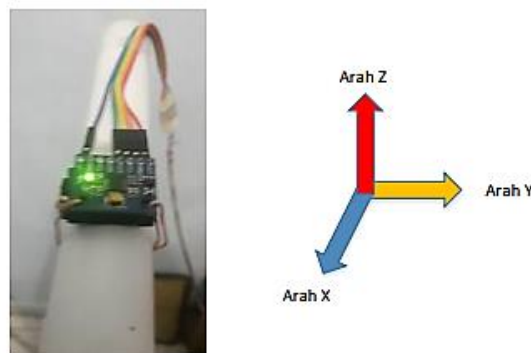
pada sistem turbin angin sebagai evaluasi keandalan, berikut merupakan gambar dari turbin angin:



Gambar 3.8 *Set-up* eksperimen turbin angin

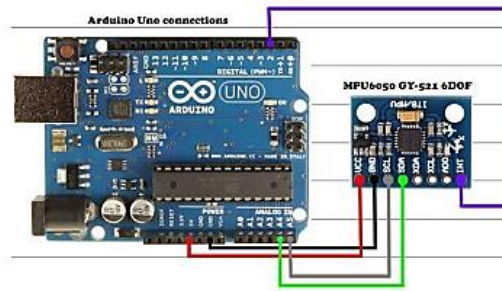
3.2.5 Perancangan Perangkat Keras

Modul IC sensor *accelerometer* dipasang pada struktur yang akan diukur getarannya seperti gambar 3.9.



Gambar 3. 9 Pemasangan modul IC sensor accelerometer

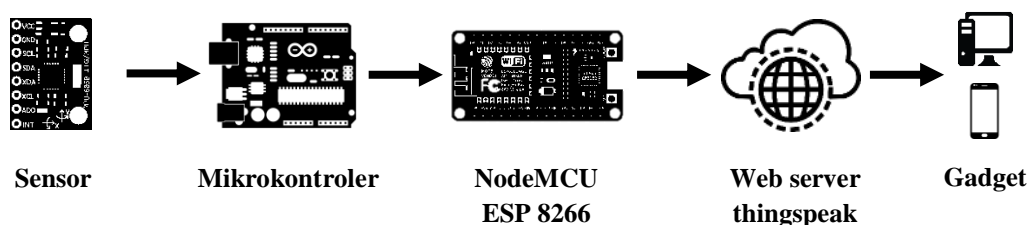
Pemasangan modul sensor digunakan untuk menentukan arah getaran yang akan diukur. Modul sensor akan di letakkan di atas *set-up* eksperimen turbin angin yang digunakan. Pemasangan modul sensor diletakkan pada sumbu horizontal. Peletakan modul sensor berada di komponen yang dekat dengan bilah dan *bearing* turbin angin, karena getaran yang dianalisis yaitu pengaruh perputaran bilah yang disebabkan kecepatan angin. Modul IC sensor *accelerometer* dihubungkan dengan Arduino seperti gambar 3.10.



Gambar 3. 10 Modul accelerometer terhubung dengan Arduino

Pembuatan infrastruktur *channel* dengan platform *thingspeak*. Mikrokontroler berfungsi sebagai *publisher* dan *thingspeak* berfungsi sebagai *web server*. Untuk membangun sistem monitoring ada tiga langkah yang harus dilakukan diantaranya:

- a. Menyiapkan sisi *client*. Dalam hal ini adalah mikrokontroler, agar dapat mengukur parameter lingkungan menggunakan sensor dan mengirim ke *web server*.
- b. Menyiapkan sisi *web server* yaitu *thingspeak* agar dapat menerima data dari mikrokontroler, menyiapkan data, dan menampilkan dalam bentuk grafik. Dalam perancangan sistem monitoring perangkat keras mikrokontroler yang digunakan yaitu Arduino NodeMCU.
- c. Menyiapkan sisi *web subscriber*. Dalam hal ini *smartphone* dan PC agar dapat memonitor data sensor secara interaktif.



Gambar 3. 11 Blok diagram perancangan perangkat keras sistem monitoring dengan mikrokontroler dan *thingspeak*

3.2.6 Perancangan Perangkat Lunak

Listing program merupakan susunan dari beberapa struktur data atau *computer codes*. Susunan tersebut dapat disusun menjadi semacam perintah *programming* yang digunakan dalam menyusun sebuah perintah *software*. *Listing program* ditampilkan pada lampiran.

3.2.7 Kalibrasi Sensor

Kalibrasi sensor bertujuan untuk mengetahui nilai ketidakpastian hasil pengukuran. Kalibrasi sensor dilakukan pada sensor accelerometer, *proximity*, dan anemometer.

A. Kalibrasi Sensor Accelerometer MPU6050

- a. Dilakukan pengukuran dan pencatatan sensor accelerometer MPU 6050 dan sensor accelerometer yang terkalibrasi terhadap getaran pompa untuk sumbu x.
- b. Dilakukan pengukuran dan pencatatan sensor accelerometer MPU 6050 dan sensor accelerometer yang terkalibrasi terhadap getaran pompa untuk sumbu y.
- c. Dilakukan pengukuran dan pencatatan sensor accelerometer MPU 6050 dan sensor accelerometer yang terkalibrasi terhadap getaran pompa untuk sumbu z.
- d. Dihitung nilai U_{A1} , U_{A2} , U_{B1} , U_{exp} setiap sumbunya.

B. Kalibrasi Sensor Kecepatan Putar

- a. Dilakukan pengukuran dan pencatatan dengan sensor kecepatan putar (*proximity*) dan tachometer terhadap kecepatan putar sebanyak lima kali pada kecepatan kipas angin di nomor tiga.
- b. Dilakukan pengukuran dan pencatatan dengan sensor kecepatan putar (*proximity*) dan tachometer terhadap kecepatan putar sebanyak sepuluh kali pada kecepatan kipas angin di rentang dua dan tiga.
- c. Dihitung nilai U_{A1} , U_{A2} , U_{B1} , dan U_{exp}

C. Kalibrasi Sensor Anemometer

- a. Dilakukan pengukuran dan pencatatan dengan sensor anemometer dan digital anemometer terhadap kecepatan angin sebanyak lima kali pada kecepatan kipas angin di nomor tiga.
- b. Dilakukan pengukuran dan pencatatan dengan sensor anemometer dan digital anemometer terhadap kecepatan angin sebanyak sepuluh kali pada kecepatan kipas angin di rentang dua dan tiga.
- c. Dihitung nilai U_{A1} , U_{A2} , U_{B1} , dan U_{exp}

3.2.8 Pengujian Sistem Monitoring

Pengujian hasil rancangan perangkat keras dilakukan untuk mengetahui performansi tanggapan sistem. Pengujian dilakukan dengan prosedur sebagai berikut:

- a. Dirangkai rangkaian sensor dengan Arduino dan disambungkan pada *power supply*.
- b. Dijalankan program untuk sistem.
- c. Dilihat nilai getaran, kecepatan angin, dan kecepatan putar melalui *serial monitor* dan *thingspeak*.

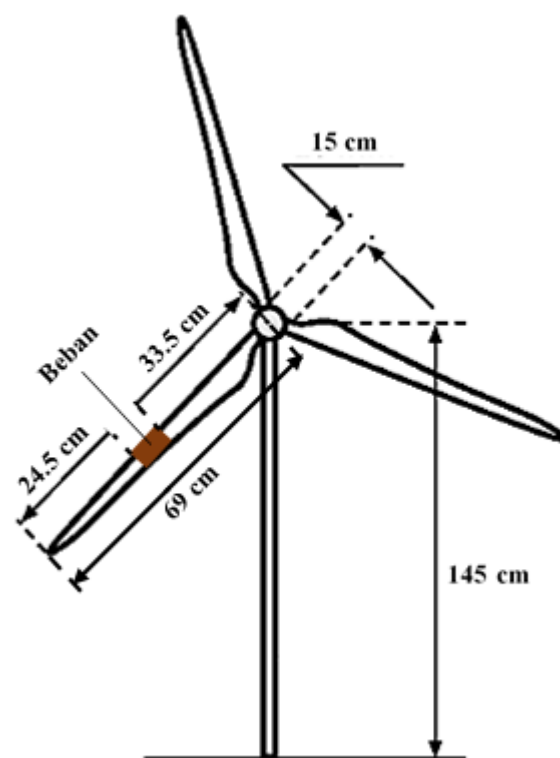
Pengujian sistem monitoring dikatakan berhasil apabila $error \leq 2\%$, dimana perkembangan teknologi kontrol, ketika teknologi berbasis pneumatik terjadi pada tahun 1930an, teknologi kontrol membatasi *error steady state* sebesar 5%. Perkembangan di tahun 1960 saat maraknya teknologi bergeser ke elektronika *Transistor Transistor Logic (TTL)* yang diimplementasi pada sistem kontrol membatasi *error steady state* sebesar 2%, ketika teknologi bergeser ke chip, namun strategi kontrol sudah mengimplementasi sistem digital. Alat ukur saat ini telah membatasi nilai akurasi lebih kecil 0.1%, yang terjadi pada tahun 1980an (Ogata, 2009).

3.2.9 Pengambilan Data Getaran Turbin Angin

Pengambilan data getaran turbin angin dilakukan secara *offline* dengan *serial monitor* dan online menggunakan *thingspeak* yang dapat di monitoring menggunakan handphone atau pc. Pengambilan data dilakukan selama ± 60 menit atau satu jam. Langkah-langkah dalam pengambilan data getaran sebagai berikut:

- a. Ambil data getaran turbin angin yang diakibatkan oleh perputaran bilah pada sumbu x dengan kondisi bilah normal.
- b. Ambil data getaran turbin angin yang diakibatkan oleh perputaran bilah pada sumbu x dengan memberikan beban pada ujung salah satu bilah seberat 5 gram.
- c. Ambil data getaran turbin angin yang diakibatkan oleh perputaran bilah pada sumbu x dengan memberikan beban pada ujung salah satu bilah seberat 10 gram.

- d. Ambil data getaran turbin angin yang diakibatkan oleh perputaran bilah pada sumbu x dengan memberikan beban pada ujung salah satu bilah seberat 20 gram.



Gambar 3. 12 *Set-up* eksperimen peletakan beban pada salah satu bilah turbin angin

3.2.10 Pengolahan Data Getaran Turbin Angin

Pengolahan data getaran turbin angin dilakukan untuk mendapatkan nilai laju kegagalan yang digunakan untuk perhitungan evaluasi keandalan sistem turbin angin. Langkah-langkah dalam pengolahan data getaran sebagai berikut:

- a. Dilakukan *export* data getaran dari *thingspeak* untuk setiap kondisi bilah normal, diberikan beban 5 gram, diberikan beban 10 gram, dan diberikan beban 20 gram.
- b. Dilakukan perhitungan rata-rata nilai getaran untuk setiap kondisi bilah, diberikan beban 5 gram, diberikan beban 10 gram, dan diberikan beban 10 gram. Perhitungan rata-rata dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.6)$$

- c. Dilakukan plot data ke sebuah grafik dengan kondisi penambahan beban pada bilah terhadap rata-rata nilai getaran.
- d. Didapatkan distribusi statistika pada plot data.
- e. Dari distribusi ststistika, maka didapatkan nilai y , R^2 dan laju kegagalan dari grafik penambahan beban terhadap rata-rata nilai akselerasi getaran turbin angina.

3.2.11 Perhitungan Evaluasi Keandalan

Perhitungan evaluasi keandalan turbin angin dilakukan dengan menggunakan nilai laju kegagalan yang didapatkan dari grafik penambahan beban terhadap rata-rata nilai akselerasi getaran. Perhitungan evaluasi keandalan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (3.7)$$

3.2.12 Analisis Hasil dan Diskusi

Analisis hasil dan diskusi dilakukan dengan melihat hasil yang telah didapat dan dari analisis kuantitatif yang telah dilakukan, kemudian ditarik kesimpulan.

3.2.13 Kesimpulan

Kesimpulan merupakan gagasan yang didapat dari hasil analisis dan diskusi pada penelitian ini.

3.2.14 Penyusunan Laporan Akhir

Tahap terakhir dalam penelitian ini adalah penulisan laporan. Laporan berisi rangkaian kegiatan selama penelitian dan hasil penelitian. Laporan ditulis sebagai bentuk tanggung jawab dari penulis. Penulisan laporan mengikuti standar dan sistematika penulisan yang digunakan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan ini akan membahas mengenai hasil dan analisis dari penelitian yang telah dilakukan. Penelitian ini mengembangkan monitoring getaran untuk evaluasi keandalan pada sistem turbin angin dengan memonitor diantaranya kecepatan putar, kecepatan angin, getaran bilah turbin angin pada sumbu x.

4.1 Hasil Kecepatan Angin

Penelitian ini dilakukan dengan mencari atau menghitung daya angin yang dihasilkan dari energi angin yang bergerak dengan nilai kecepatan angin tertentu, daya angin yang ditangkap turbin angin serta losses daya angin yang terjadi. Langkah awal dilakukan dengan mencatat nilai kecepatan angin sebelum dan sesudah melewati bilah. Nilai kecepatan angin rata-rata yang didapatkan sebesar 5,75 m/s sebelum melewati bilah dan 2,24 m/s setelah melewati bilah. Berdasarkan persamaan energi kinetik ($Ek = \frac{1}{2}mv^2$), maka dapat diketahui energi angin dan rata-rata nilai daya angin sebesar 210,61 watt. Kemudian, didapatkan rata-rata nilai daya angin yang ditangkap oleh turbin angin yaitu setelah mengenai bilah sebesar 78,39 watt. Sedangkan rata-rata nilai daya angin yang hilang atau losses karena turbin angin bekerja maksimum pada nilai koefisien daya turbin angin (C_p) 0,593 yaitu 46,5 watt. Hasil kecepatan angin yang didapat, dapat dilihat pada tabel 4.1 sebagai berikut:

Tabel 4. 1 Hasil pengolahan data kecepatan angin

V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	P_w (watt)	C_p	P_t (watt)	$Losses$ (watt)
5,4	1,7	173,614	0,272	47,159	55,794
5,5	2	183,439	0,337	61,744	47,036
5,6	2,1	193,628	0,352	68,072	46,749
5,7	2,18	204,187	0,361	73,777	47,306
5,8	2,3	215,123	0,380	81,656	45,912
5,9	2,4	226,443	0,393	88,911	45,370
6	2,5	238,154	0,405	96,474	44,751
6,1	2,7	250,261	0,437	109,313	39,092

Salah satu perhitungan pengolahan data secara manual sebagai berikut:

Nilai kecepatan angin sebelum melewati bilah sebesar 5,8 m/s, dengan menggunakan persamaan 3.1 didapatkan nilai daya angin sebelum melewati bilah sebagai berikut.

Dimana:

$$\rho = 1,2 \text{ m/s}^2$$

$$A = \pi r^2$$

$$A = 3,14 \times 0,765^2 = 1,837 \text{ m}^2$$

Maka didapatkan nilai daya angin sebesar

$$P_w = \frac{1}{2} \times 1,2 \text{ m/s}^2 \times 1,837 \text{ m}^2 \times 5,8 \text{ m/s}^3 = 215,12 \text{ watt}$$

Perhitungan nilai koefisien daya turbin angin (C_p) dengan menggunakan persamaan 3.2 didapatkan hasil sebagai berikut:

$$V_1 = 5,8 \text{ m/s}$$

$$V_2 = 2,4 \text{ m/s}$$

Didapatkan nilai C_p sebagai berikut

$$C_p = 4 \times \frac{5,8-2,4}{5,8} \times \left(1 - \frac{5,8-2,4}{5,8}\right)^2 = 0,38$$

Perhitungan nilai daya mekanik turbin angin dengan menggunakan persamaan 3.4 didapatkan hasil sebagai berikut:

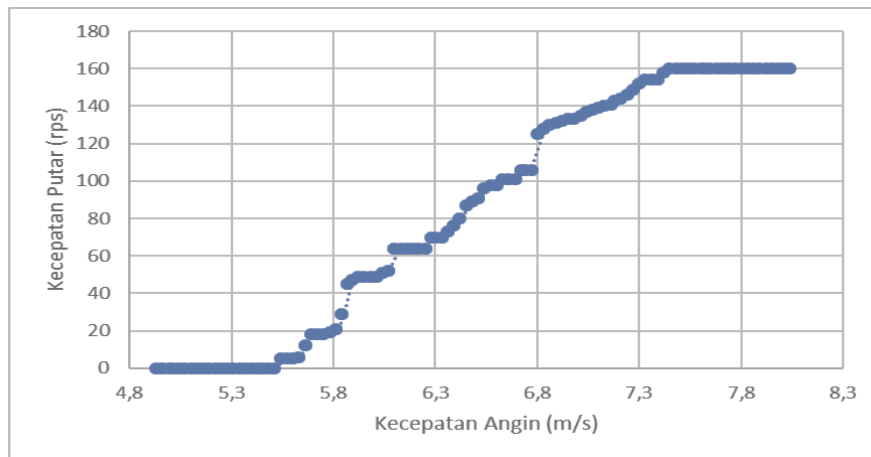
$$P_t = 215,12 \times 0,38 = 81,74 \text{ watt}$$

Perhitungan nilai *losses* turbin angin dengan menggunakan persamaan 3.5 didapatkan hasil sebagai berikut:

$$L = (0,593 - 0,38) \times 215,12 = 45,82 \text{ watt}$$

4.2 Hasil Hubungan Kecepatan Angin dengan Kecepatan Putar

Penelitian ini melakukan monitoring kecepatan angin dan kecepatan putar, untuk mengetahui hubungan antara keduanya dengan monitoring getaran. Hasil hubungan kecepatan angin dengan kecepatan putar sebagai berikut



Gambar 4. 1 Hubungan antara kecepatan angin dengan kecepatan putar

Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa kecepatan putar akan bertambah seiring dengan bertambahnya kecepatan angin, dengan perubahan yang berbeda pada setiap kenaikan. Kecepatan putar akan mencapai 160 rps, ketika nilai dari kecepatan putar tidak akan mengalami kenaikan walaupun kecepatan angin tetap bertambah, terjadi akibat adanya limit atau batas kecepatan putar dari komponen turbin angin yang digunakan, sehingga akan mengakibatkan kecepatan putar tetap stabil.

4.3 Hasil Kalibrasi Sensor

Kalibrasi sensor dilakukan untuk mengetahui nilai ketidakpastian hasil pengukuran. Hasil kalibrasi pada sensor accelerometer, *proximity*, dan anemometer sebagai berikut:

A. Hasil Kalibrasi Sensor Accelerometer MPU6050 (GY-521)

Tabel 4. 2 Data kalibrasi sensor accelerometer MPU6050 (GY-521) sumbu x

No.	Pembacaan standar (<i>accelerometer</i>) Hz	Pembacaan alat (<i>accelerometer</i>) Hz	Koreksi Hz
1	0,078	0,065	0,013
2	0,107	0,095	0,012
3	0,108	0,089	0,019
4	0,126	0,131	-0,005
5	0,133	0,125	0,008
6	0,136	0,121	0,015
7	0,143	0,131	0,012
8	0,187	0,163	0,024
9	0,674	0,685	-0,011

Tabel 4. 2 Lanjutan

No.	Pembacaan standar (<i>accelerometer</i>) Hz	Pembacaan alat (<i>accelerometer</i>) Hz	Koreksi Hz
10	0,774	0,751	0,023
Jumlah	2,464	2,356	0,108
Rata-Rata	0,246	0,236	0,011
Standar Deviasi	0,254	0,256	0,011

Analisis ketidakpastian tipe A

Standar deviasi (σ) = 0,254

Ketidakpastian hasil pengukuran (U_{A1}):

$$U_{A1} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$U_{A1} = 0,0036$$

Derajat kebebasan (V_1) = 9

Ketidakpastian hasil pengukuran (U_{A2}):

$$U_{A2} = \sqrt{\frac{SSR}{n-2}}$$

$$U_{A2} = \sqrt{\frac{0,0011144}{10-2}}$$

$$U_{A2} = 0,0118$$

Derajat kebebasan (V_2) = 9

Analisis ketidakpastian tipe B

Ketidakpastian resolusi (U_{B1}) :

$$U_{B1} = \frac{\frac{1}{2}Resolusi}{\sqrt{3}}$$

$$U_{B1} = 0,000288$$

Ketidakpastian alat standar (U_{B2}) :

$$U_{B2} = 0$$

Ketidakpastian gabungan (U_C) :

$$U_C = \left(\sum_{k=1}^n C_n U_n \right)^{\frac{1}{2}} \quad ; C_1 \dots \dots \dots C_n = 1$$

$$U_C = 0,012$$

Derajat kebebasan efektif (V_{eff}) :

$$V_{eff} = \frac{(U_C)^4}{\sum_{k=1}^n \frac{(U_n)^4}{V_n}}$$

$$V_{eff} = 10,52$$

Pendekatan atau pembulatan $V_{eff} = 11$

$$k = 2,201$$

Ketidakpastian diperluasan (U_{95}) :

$$U_{95} = k \cdot U_c$$

$$U_{95} = 0,0271$$

Nilai rata-rata pembacaan alat yang didapat sebesar 0,236 Hz dan nilai ketidakpastian diperluasan (U_{95}) didapat sebesar 0,0271. Nilai *uncertainty* yang didapat sebesar

$$Uncertainty = \frac{0,0271}{0,236} = 0,115 \%$$

Maka, nilai U_{terbesar} 0,115 % terjadi pada pengukuran kalibrasi pada sumbu x.

Tabel 4. 3 Data kalibrasi sensor accelerometer MPU6050 (GY-521) sumbu y

No.	Pembacaan alat (<i>accelerometer</i>) Hz	Pembacaan Standart (<i>accelerometer</i>) Hz	Koreksi Hz
1	0,264	0,235	0,029
2	0,266	0,256	0,010
3	0,267	0,260	0,007
4	0,269	0,251	0,018
5	0,269	0,254	0,015
6	0,271	0,262	0,009
7	0,271	0,269	0,002
8	0,272	0,259	0,013
9	0,273	0,282	-0,009
10	0,273	0,291	-0,018
Jumlah	2,696	2,619	0,077
Rata-Rata	0,270	0,262	0,008
Standar Deviasi	0,003	0,016	0,014

Analisis ketidakpastian tipe A

Standar deviasi (σ) = 0,003

Ketidakpastian hasil pengukuran (U_{A1}):

$$U_{A1} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$U_{A1} = 0,0043$$

Derajat kebebasan (V_1) = 9

Ketidakpastian hasil pengukuran (U_{A2}):

$$U_{A2} = \sqrt{\frac{SSR}{n-2}}$$

$$U_{A2} = \sqrt{\frac{0,000081}{10-2}}$$

$$U_{A2} = 0,01005$$

Derajat kebebasan (V_2) = 9

Analisis ketidakpastian tipe B

Ketidakpastian resolusi (U_{B1}) :

$$U_{B1} = \frac{\frac{1}{2} \text{Resolusi}}{\sqrt{3}}$$

$$U_{B1} = 0,000288$$

Ketidakpastian alat standar (U_{B2}) :

$$U_{B2} = 0$$

Ketidakpastian gabungan (U_C) :

$$U_C = \left(\sum_{k=1}^n C_n U_n \right)^{\frac{1}{2}} \quad ; C_1 \dots \dots \dots C_n = 1$$

$$U_C = 0,01093$$

Derajat kebebasan efektif (V_{eff}) :

$$V_{eff} = \frac{(U_C)^4}{\sum_{k=1}^n \frac{(U_n)^4}{V_n}}$$

$$V_{eff} = 11,72$$

Pendekatan atau pembulatan $V_{eff} = 12$

$$k = 2,179$$

Ketidakpastian diperluas (U_{95}) :

$$U_{95} = k \cdot U_C$$

$$U_{95} = 0,0238$$

Nilai rata-rata pembacaan alat yang didapat sebesar 0,262 Hz dan nilai ketidakpastian diperluas (U_{95}) didapat sebesar 0,0238. Nilai *uncertainty* yang didapat sebesar

$$\text{Uncertainty} = \frac{0,0238}{0,262} \times 100 \% = 0,091 \%$$

Maka, nilai ketidakpastian pengukuran pada sumbu y sebesar 0,091 %

Tabel 4. 4 Data kalibrasi sensor accelerometer MPU6050 (GY-521) sumbu z .

No.	Pembacaan standar (<i>accelerometer</i>) Hz	Pembacaan alat (<i>accelerometer</i>) Hz	Koreksi Hz
1	0,273	0,2770	-0,0040
2	0,273	0,2610	0,0116
3	0,272	0,2510	0,0212
4	0,271	0,2730	-0,0017
5	0,271	0,2630	0,0079
6	0,269	0,2710	-0,0016
7	0,269	0,2570	0,0122
8	0,267	0,2610	0,0060
9	0,266	0,2710	-0,0049
10	0,264	0,2720	-0,0077
Jumlah	2,696	2,6570	0,0389
Rata-Rata	0,270	0,2657	0,0039
Standar Deviasi	0,003	0,0083	0,0093

Analisis ketidakpastian tipe A

Standar deviasi (σ) = 0,003

Ketidakpastian hasil pengukuran (U_{A1}):

$$U_{A1} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$U_{A1} = 0,00294$$

Derajat kebebasan (V_1) = 9

Ketidakpastian hasil pengukuran (U_{A2}):

$$U_{A2} = \sqrt{\frac{SSR}{n-2}}$$

$$U_{A2} = \sqrt{\frac{0,000597}{10-2}}$$

$$U_{A2} = 0,00864$$

Derajat kebebasan (V_2) = 9

Analisis ketidakpastian tipe B

Ketidakpastian resolusi (U_{B1}):

$$U_{B1} = \frac{\frac{1}{2} \text{Resolusi}}{\sqrt{3}}$$

$$U_{B1} = 0,000288$$

Ketidakpastian alat standar (U_{B2}):

$$U_{B2} = 0$$

Ketidakpastian gabungan (U_C) :

$$U_C = (\sum_{k=1}^n C_n U_n)^{\frac{1}{2}} \quad ; C_1 \dots \dots \dots C_n = 1$$

$$U_C = 0,0091$$

Derajat kebebasan efektof (V_{eff}) :

$$V_{eff} = \frac{(U_C)^4}{\sum_{k=1}^n \frac{(U_n)^4}{V_n}}$$

$$V_{eff} = 10,90$$

Pendekatan atau pembulatan $V_{eff} = 11$

$$k = 2,201$$

Ketidakpastian diperluasn (U_{95}) :

$$U_{95} = k \cdot U_C$$

$$U_{95} = 0,0201$$

Nilai rata-rata pembacaan alat yang didapat sebesar 0,2657 Hz dan nilai ketidakpastian diperluasan (U_{95}) didapat sebesar 0,0201. Nilai *uncertainty* yang didapat sebesar

$$Uncertainty = \frac{0,0201}{0,2657} \times 100 \% = 0,075 \%$$

Maka, nilai ketidakpastian pengukuran pada sumbu z sebesar 0,075 %.

B. Hasil Kalibrasi Sensor Kecepatan Putar (*Proximity*)

Tabel 4. 5 Data Kalibrasi Sensor Kecepatan Putar (*Proximity*)

No.	Pembacaan alat <i>Proximity</i> rps	Pembacaan Standart <i>Proximity</i> rps	Koreksi rps
1	386,54	387,7	1,16
2	386,54	387,7	1,16
3	386,54	387,7	1,16
4	389,25	387,7	-1,55
5	386,54	387,7	1,16
6	389,25	387,7	-1,55
7	389,25	387,7	-1,55
8	386,54	387,7	1,16
9	386,54	387,7	1,16
10	389,25	387,7	-1,55
Jumlah	3876,24	3877	0,76

Tabel 4. 5 Lanjutan

No.	Pembacaan alat <i>Proximity</i> rps	Pembacaan Standart <i>Proximity</i> rps	Koreksi rps
Rata-rata	387,624	387,7	0,076
Standar Deviasi	1,399	6,0E-14	1,399

Analisis ketidakpastian tipe A

Standar deviasi (σ) = 1,399

Ketidakpastian hasil pengukuran (U_{A1}):

$$U_{A1} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$U_{A1} = 0,4425$$

Derajat kebebasan (V_1) = 9

Ketidakpastian hasil pengukuran (U_{A2}):

$$U_{A2} = \sqrt{\frac{SSR}{n-2}}$$

$$U_{A2} = \sqrt{\frac{17,62}{10-2}}$$

$$U_{A2} = 1,484$$

Derajat kebebasan (V_2) = 9

Analisis ketidakpastian tipe B

Ketidakpastian resolusi (U_{B1}):

$$U_{B1} = \frac{\frac{1}{2}Resolusi}{\sqrt{3}}$$

$$U_{B1} = 0,0028$$

Ketidakpastian alat standar (U_{B2}):

$$U_{B2} = 0$$

Ketidakpastian gabungan (U_C):

$$U_C = (\sum_{k=1}^n C_n U_n)^{\frac{1}{2}} \quad ; C_1 \dots \dots \dots C_n = 1$$

$$U_C = 1,548$$

Derajat kebebasan efektif (V_{eff}):

$$V_{eff} = \frac{(U_C)^4}{\sum_{k=1}^n \frac{(U_n)^4}{V_n}}$$

$$V_{eff} = 10,48$$

Pendekatan atau pembulatan $V_{eff} = 11$

$$k = 2,201$$

Ketidakpastian diperluas (U_{95}) :

$$U_{95} = k \times U_c$$

$$U_{95} = 3,409$$

Nilai rata-rata pembacaan alat yang didapat sebesar 387,624 rps dan nilai ketidakpastian diperluas (U_{95}) didapat sebesar 3,409. Nilai *uncertainty* yang didapat sebesar

$$Uncertainty = \frac{3,409}{387,624} \times 100 \% = 0,88 \%$$

Maka, nilai ketidakpastian pengukuran pada *proximity* sebesar 0,88 %.

C. Hasil Kalibrasi Sensor Anemometer

Tabel 4. 6 Data kalibrasi sensor anemometer

No.	Pembacaan alat (Anemometer) m/s	Pembacaan Standart (Digital Anemometer) m/s	Koreksi m/s
1	5,28	5,5	0,22
2	5,92	5,5	-0,42
3	5,22	5,6	0,38
4	5,4	5,8	0,4
5	6,3	6,2	-0,1
6	7,04	6,4	-0,64
7	6,83	6,4	-0,43
8	6,86	6,5	-0,36
9	6,22	6,6	0,38
10	7,1	6,6	-0,5
Jumlah	62,17	61,1	-1,07
Rata-rata	6,217	6,11	-0,107
Standar Deviasi	0,73641851	0,46056	0,414086679

Analisis ketidakpastian tipe A

Standar deviasi (σ) = 0,460

Ketidakpastian hasil pengukuran (U_{A1}):

$$U_{A1} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$U_{A1} = 0,1309$$

Derajat kebebasan (V_1) = 9

Ketidakpastian hasil pengukuran (U_{A2}):

$$U_{A2} = \sqrt{\frac{SSR}{n-2}}$$

$$U_{A2} = \sqrt{\frac{1,276}{10-2}}$$

$$U_{A2} = 0,259$$

Derajat kebebasan (V_2) = 9

Analisis ketidakpastian tipe B

Ketidakpastian resolusi (U_{B1}) :

$$U_{B1} = \frac{\frac{1}{2} \text{Resolusi}}{\sqrt{3}}$$

$$U_{B1} = 0,0288$$

Ketidakpastian alat standar (U_{B2}) :

$$U_{B2} = 0$$

Ketidakpastian gabungan (U_C) :

$$U_C = (\sum_{k=1}^n C_n U_n)^{\frac{1}{2}} \quad ; C_1 \dots \dots \dots C_n = 1$$

$$U_C = 0,2917$$

Derajat kebebasan efektif (V_{eff}) :

$$V_{eff} = \frac{(U_C)^4}{\sum_{k=1}^n \frac{(U_n)^4}{V_n}}$$

$$V_{eff} = 12,61$$

Pendekatan atau pembulatan $V_{eff} = 13$

$$k = 2,16$$

Ketidakpastian diperluas (U_{95}) :

$$U_{95} = k \times U_C$$

$$U_{95} = 0,6302$$

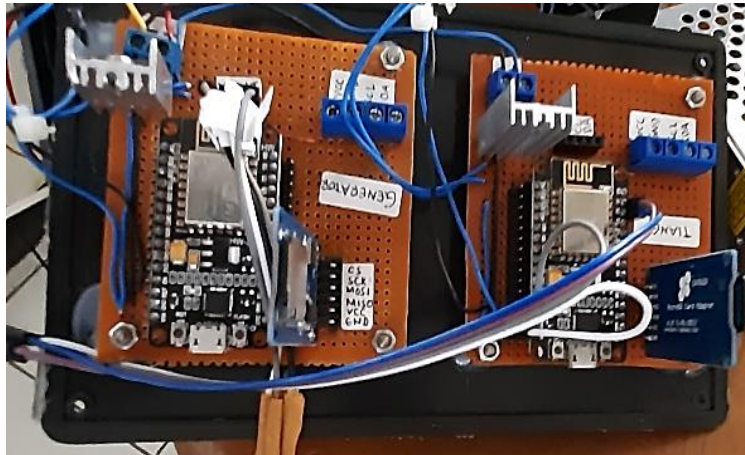
Nilai rata-rata pembacaan alat yang didapat sebesar 6,217 m/s dan nilai ketidakpastian diperluas (U_{95}) didapat sebesar 0,6302. Nilai *uncertainty* yang didapat sebesar

$$Uncertainty = \frac{0,6302}{6,217} \times 100 \% = 0,10 \%$$

Maka, nilai ketidakpastian pengukuran pada anemometer sebesar 0,101%.

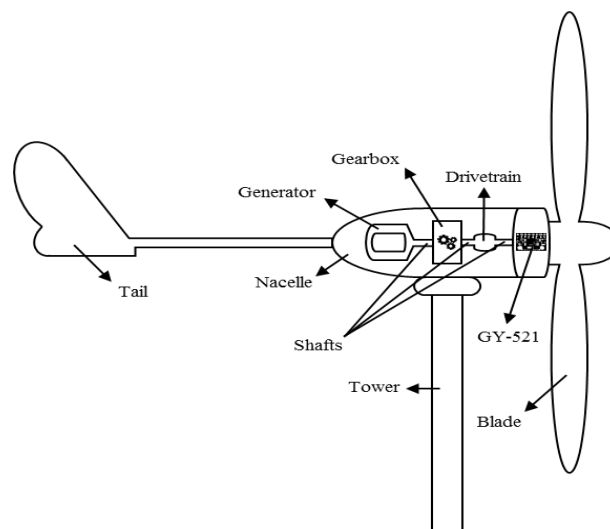
4.4 Hasil Pengujian Sistem Monitoring

Pengujian sistem monitoring dilakukan dengan pengujian hasil rancangan perangkat keras. Pengujian dilakukan untuk mengetahui performansi tanggapan sistem. Hasil pengujian sistem monitoring sebagai berikut:



Gambar 4. 2 *Set-up* rancangan perangkat keras

Gambar 4.2 merupakan rangkaian sensor dengan Arduino yang disambungkan pada *power supply*. Sensor yang digunakan pada perancangan ini diantaranya sensor *proximity*, sensor anemometer, dan sensor accelerometer MPU6050 (GY-521). Sensor accelerometer MPU6050 (GY-521) diletakkan di *nacelle* pada sumbu x dekat dengan bilah dan *bearing* dapat dilihat pada gambar gambar 4.3.



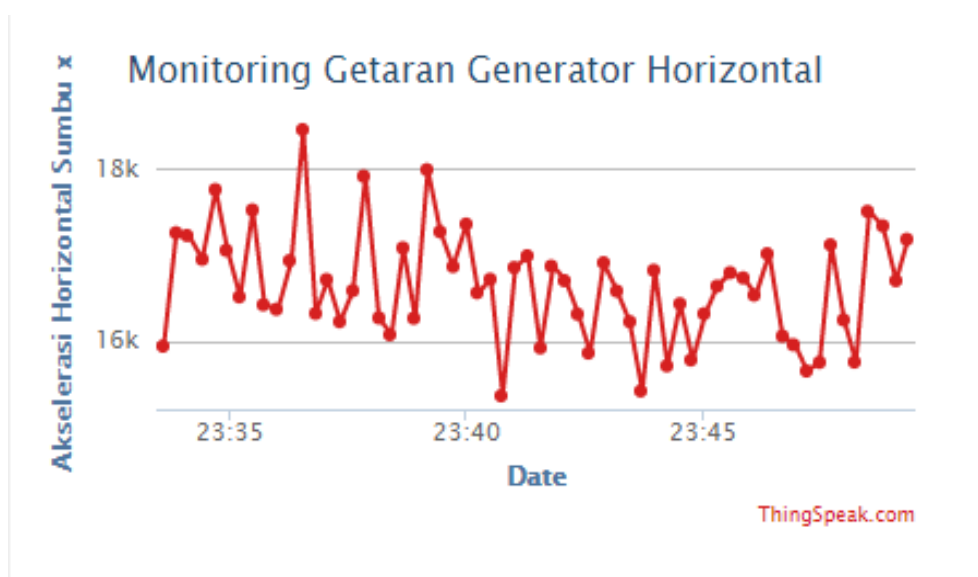
Gambar 4. 3 Pemasangan sensor accelerometer MPU6050 (GY-521) di sumbu x *nacelle*

Rancangan yang sudah ada kemudian di jalankan dengan program yang sudah dibuat dan didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 4. 7 Hasil monitoring getaran *nacelle* dengan peletakan sensor pada sumbu vertikal didapatkan hasil keluaran sensor untuk sumbu x, y, z, kecepatan angin, dan kecepatan putar

Sumbu X g/s	Sumbu Y g/s	Sumbu Z g/s	Kecepatan Angin m/s	Kecepatan Putar rps
804.00	-328.00	17100.00	7,57	60
1048.00	-1000.00	17716.00	7,30	59
1292.00	388.00	15992.00	7,21	58
312.00	-92.00	17120.00	7,33	54
1172.00	-480.00	16996.00	7,54	54
548.00	-324.00	18004.00	8,01	55
848.00	-924.00	17768.00	7,45	55
1084.00	-472.00	17264.00	7,24	55
732.00	-280.00	17488.00	7,27	53
1424.00	280.00	17724.00	7,10	53
636.00	-240.00	16628.00	7,01	54
768.00	-1024.00	16712.00	7,01	56

Pengujian dilakukan untuk melihat hasil sistem monitoring yang sudah dibuat dapat berjalan sesuai keinginan. Hasil pengujian sistem monitoring secara *real time* dengan menggunakan *thingspeak* sebagai berikut:

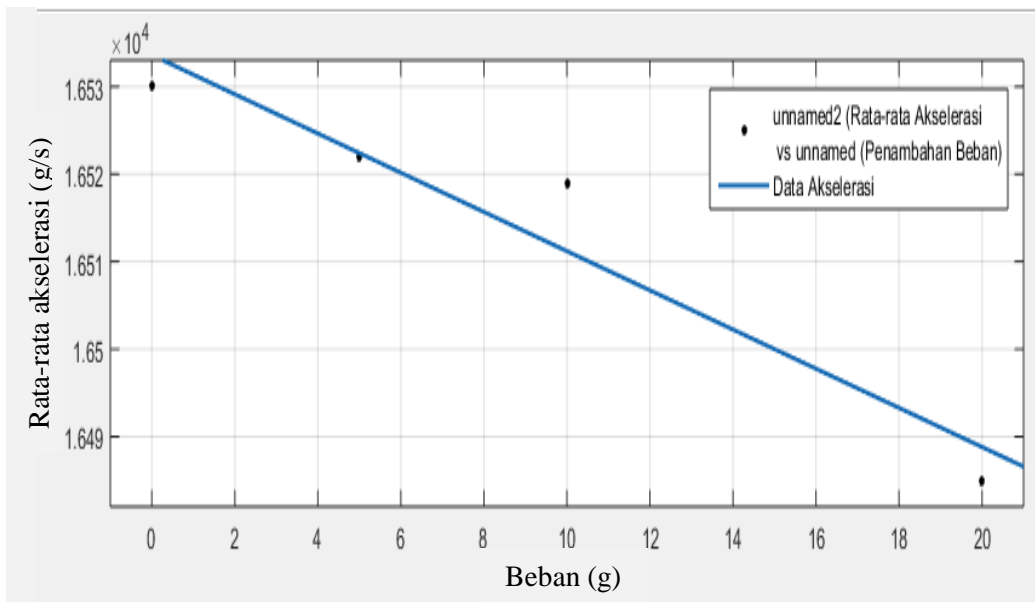


Gambar 4. 4 Hasil pengujian monitoring menggunakan *thingspeak*

Gambar 4.4 merupakan hasil grafik monitoring getaran pada bilah turbin angin terhadap sumbu x yang dapat dilihat pada *thingspeak*. Grafik diatas menunjukkan bahwa dalam rentang waktu 5 menit teradapat 20 data yang dapat *direcord*. Sistem akan *merecord* data getaran yang dihasilkan oleh bilah turbin angin setiap 15 detik sekali. Pengujian sistem juga sudah dapat berjalan untuk mengetahui hasil grafik dari kecepatan angin dan kecepatan putar. Hasil pengujian dapat dikatakan baik, karena respon yang diperoleh dari hasil dapat diolah untuk evaluasi keandalan sistem turbin angin.

4.5 Hasil Pengujian Getaran

Pengujian getaran turbin angin dilakukan dengan menggunakan sensor *accelerometer* GY-521 yang diletakkan di *nacelle* yang letaknya tepat dibelakang bilah turbin angin pada sumbu x seperti gambar 4.3. Peletakan sensor di *nacelle*, dikarenakan pengaruh kecepatan angin dengan meninjau bilah turbin angin. Pengambilan data getaran dilakukan selama ± 1 jam dengan memberikan variasi beban pada salah satu bilah. Variasi beban tersebut yaitu 0 gram atau normal, 5 gram, 10 gram, dan 20 gram. Dari hasil yang didapat, kemudian di plot ke grafik dengan ketentuan pembebanan pada bilah terhadap rata-rata akselerasi getaran.



Gambar 4. 5 Grafik rata-rata akselerasi terhadap penambahan beban

Gambar 4.5 merupakan hasil plot grafik data getaran bilah turbin angin dengan menggunakan *curve fitting* pada *software* MATLAB R2015a. Gambar 4.5 menunjukkan hasil dimana bilah normal (0 gram) memiliki rata-rata akselerasi sebesar 16530 g/s. Bilah dengan beban 5 gram memiliki rata-rata akselerasi sebesar 16522 g/s. Bilah dengan beban 10 gram memiliki rata-rata akselerasi sebesar 16519 g/s. Terakhir bilah dengan beban 20 gram memiliki rata-rata akselerasi sebesar 16485 g/s.

Dari grafik tersebut didapatkan bahwa fungsi yang didapatkan dari data akselerasi getaran yaitu fungsi eksponensial. Dari fungsi eksponensial tersebut didapatkan nilai e^x dengan nilai x sebesar 0,00013. Nilai x tersebut yang akan digunakan sebagai nilai laju kegagalan (λ) untuk melakukan perhitungan evaluasi keandalan. Perhitungan evaluasi keandalan dilakukan untuk menentukan probabilitas kegagalan dari suatu komponen yang mengalami pembebanan. Nilai keandalan pada suatu komponen akan mengalami penurunan selama periode waktu (t), karena kegagalan dari komponen tidak diketahui dan tidak dapat diobservasi, waktu kegagalan tidak dapat diidentifikasi, dan saat kondisi normal, performansi tidak dapat diobservasi dengan baik.

4.6 Hasil Perhitungan Evaluasi Keandalan

Dari data akselerasi getaran yang sudah di dapat, didapatkan nilai laju kegagalan (λ) sebesar 0,00013. Dengan menggunakan persamaan 3.7 persamaan keandalan distribusi eksponensial, didapatkan nilai keandalan pada sistem turbin angin sebagai berikut.

Tabel 4. 8 Hasil Keandalan Sistem Turbin Angin

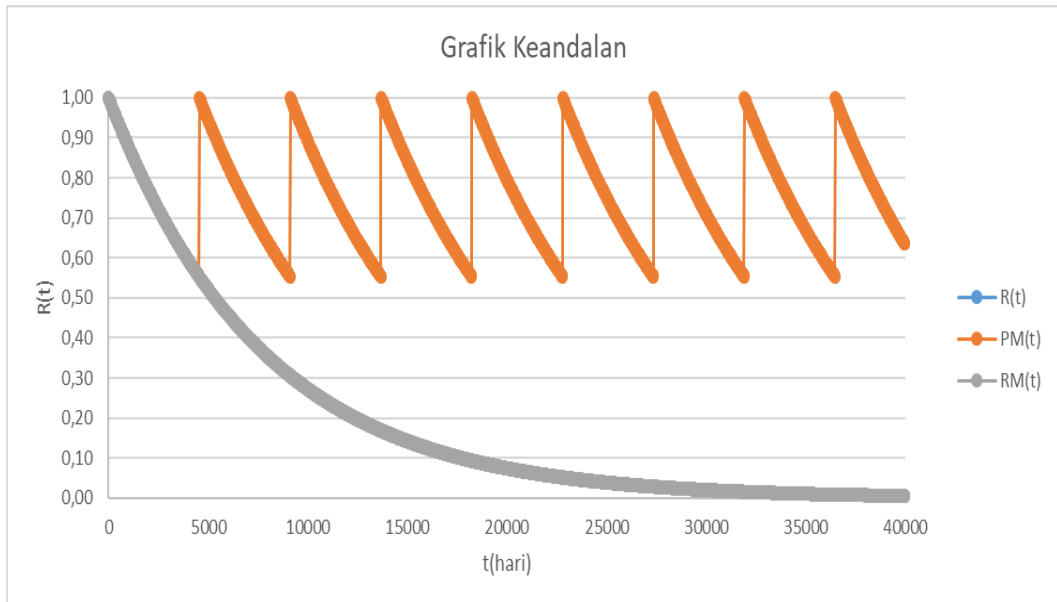
t (hari)	R(t)	t(hari)	PM(t)	t(hari)	RM(t)
0	1,00	0	1,00	0	1,00
20	1,00	20	1,00	20	1,00
40	0,99	40	0,99	40	0,99
60	0,99	60	0,99	60	0,99
80	0,99	80	0,99	80	0,99
100	0,99	100	0,99	100	0,99
120	0,98	120	0,98	120	0,98
140	0,98	140	0,98	140	0,98
160	0,98	160	0,98	160	0,98
180	0,98	180	0,98	180	0,98

Tabel 4. 8 Lanjutan

t (hari)	R(t)	t(hari)	PM(t)	t(hari)	RM(t)
200	0,97	200	0,97	200	0,97
220	0,97	220	0,97	220	0,97
240	0,97	240	0,97	240	0,97
260	0,97	260	0,97	260	0,97
280	0,96	280	0,96	280	0,96
300	0,96	300	0,96	300	0,96
320	0,96	320	0,96	320	0,96
340	0,96	340	0,96	340	0,96
360	0,95	360	0,95	360	0,95
380	0,95	380	0,95	380	0,95
...
4520	0,56	4520	0,56	4520	0,56
4540	0,55	4540	0,55	4540	0,55
4560	0,55	0	1,00	4560	0,55
4580	0,55	20	1,00	4580	0,55
4600	0,55	40	0,99	4600	0,55
4620	0,55	60	0,99	4620	0,55
4640	0,55	80	0,99	4640	0,55
...
9400	0,29	280	0,96	9400	0,29
9420	0,29	300	0,96	9420	0,29
9440	0,29	320	0,96	9440	0,29
9460	0,29	340	0,96	9460	0,29

Dari tabel diatas, dapat dilihat pada kolom R(t). Nilai keandalan R(t) akan mengalami penurunan selama periode waktu (t). keandalan R(t) sistem turbin angin mengalami penurunan karena pengaruh kecepatan angin yang memutar bilah. Nilai keandalan mengalami penurunan menuju 55% atau 0,55 setelah beroperasi selama 4540 hari operasi. 4540 hari operasi sama dengan 12,4 tahun operasi. Hasil penurunan tersebut dapat dilihat pada gambar 4.6 dengan keterangan pada garis R(t). Garis dengan keterangan PM(t) atau *preventive maintenance* merupakan tindakan proaktif atau upaya pemeliharaan yang dilakukan sebelum terjadi kerusakan. *Preventive maintenance* diimplementasikan untuk menjaga komponen agar tetap menjalankan fungsinya dengan baik. *Preventive maintenance* dikategorikan ke dalam *scheduled restoration task* atau *scheduled discard task*. *Scheduled restoration task* meliputi jadwal kegiatan secara periodic untuk mengganti komponen yang sudah ada sehingga komponen dapat kembali

melakukan fungsi kerjanya secara maksimal dan lebih akurat sebelum mengalami kegagalan fungsi. *Scheduled discard task* merupakan kegiatan penggantian komponen dengan komponen yang baru pada interval waktu tertentu tanpa memperhatikan kondisi komponen pada saat itu.



Gambar 4. 6 Grafik keandalan bilah turbin angin

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, kesimpulan yang dapat diambil dengan mengacu pada tujuan penelitian adalah sebagai berikut:

- Hubungan antara kecepatan angin dengan getaran dapat diketahui atau dijelaskan dari perbedaan nilai kecepatan angin sebelum melalui bilah dengan nilai terkecil 5,4 m/s dan nilai terbesar 6,1 m/s, sedangkan sesudah melewati bilah dengan nilai terkecil 1,7 m/s dan nilai terbesar 2,7 m/s, berdasarkan nilai kecepatan angin tersebut didapatkan nilai daya angin sebelum melalui bilah dengan nilai terkecil 173,614 watt dan nilai terbesar 250,261 watt. Nilai daya angin yang ditangkap oleh turbin angin didapatkan dengan nilai terkecil 47,159 watt dan nilai terbesar 109,313 watt, sedangkan rugi daya angin dalam proses didapatkan dengan nilai terkecil 39,092 watt dan nilai terbesar 55,794 watt. Rugi daya angin tersebut salah satunya dapat berupa getaran yang timbul pada turbin angin, semakin tinggi kecepatan angin sebelum melewati bilah dan semakin kecil kecepatan angin setelah melewati bilah akan menyebabkan rugi daya angin semakin besar serta menghasilkan getaran pada turbin angin yang semakin besar pula.
- Nilai keandalan $R(t)$ mengalami laju penurunan hingga mencapai yang telah ditentukan yaitu sebesar 55% atau 0,55. Rata-rata nilai keandalan $R(t)$ berdasarkan getaran bilah pada sumbu x didapatkan penurunan setelah 12,5 tahun atau 4540 hari operasi. Berdasarkan hasil yang didapat, dibutuhkan penjadwalan secara berkala sebelum komponen mengalami penurunan nilai $R(t)$ atau sebelum 12,5 tahun atau 4540 hari operasi.
- Sistem monitoring digunakan untuk memonitor dan mendapatkan data secara *real-time*, dimana variabel yang dapat di monitoring yaitu getaran, kecepatan angin, dan kecepatan putar. Sistem monitoring secara

offline dapat mengirimkan data secara *real-time* setiap detiknya ketampilan PC dengan menggunakan tampilan pada *serial monitor software* Arduino, sedangkan sistem monitoring secara *online* dapat mengirimkan data secara *real-time* setiap 15 detik ke *thingspeak* dan *thingview*.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebaiknya dilanjutkan sampai ke pengembangan monitoring yang ditinjau dari struktur, motor, atau keseluruhan komponen turbin angin dan dilakukan evaluasi *availability*, *maintainability*, dan dilakukan pada skala besar.

DAFTAR PUSTAKA

- A.R. Jha. (2011). *Wind Turbine Technology*. United States of America: CRC Press.
- A.S., F., & Mohan, R. (2017). IoT Based Wind Turbine Monitoring, Fault Diagnosis and Control Using UART. *International Journal of Advance Research in Management, Architecture, Technology, and Engineering*, 72-76.
- Akyuz, E., & Demircan, B. (2019). IoT and Cloud Based Remote Monitoring of Wind Turbine. *Celal Bayar University Journal of Science*, 337-342.
- Alhmoud, L., & Al-Zoubi, H. (2019). IoT Application in Wind Energy Conversion Systems. *DE GRUYTER*, 490-499.
- Ali M. (2004). Pembelajaran Perancangan Sistem Kontrol PID dengan Software Matlab. *Jurnal Edukasi@Elektro*, 1-8.
- Asy'ari, M. K. (2018). Rancang bangun dc-dc buck converter berbasis pengendali logika fuzzy tipe-2 pada prototype turbin angin skala kecil.
- Bakhtiar, S., Tahir, S., & Hasni, R. (2013). Analisa Pengendalian Kuliatas dengan Menggunakan Metode Statistical Quality Control (SQC). *Malikussaleh Insustrial Engineering Journal*, 29-36.
- Beebe, R. (2004). *Predictive Mintenance of Pumps Using Condition Monitoring*. Elsevier Science.
- Berry, J. (2014). How To Implement An Effective Condition Monitoring Using Vibration Analysis.
- Braun, A., Wichert, R., Kuijper, A., & Fellner, D. W. (2015). Capacitive Proximity Sensing in Smart Environments. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*.
- Chen, J., & Georgakis, C. (2013). Tuned Rolling-Ball Dampers for Vibration Control. *Journal of Sound and Vibration* 332, 5271-5282.
- Ebeling, C. (1997). *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. Waveland Pr Inc.
- Escaler, X., & Mebarki, T. (2018). Full-Scale Wind Turbine Vibration Signature Analysis. *MDPI*, 6(63).

- Gaspersz, V. (1998). *Statistical Process Control, Penerapan Teknik-Teknik Statistikal Dalam Manajemen Bisnis*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.
- Gokdemir, V. (2017). Development and Application of Failure Monitoring System Using the Vibration and Location Information of Balises in Railway Signaling. *Journal of Engineerin and Science*, 01-11.
- Gowri, P., Deepika, D., & Krithika, S. (2017). A Case Study on Simple Harmonic Motion and Its Application. *International Journal of Latest Engineering and Management Research*, 55-64.
- Guo, P., & Infield, D. (2012). Wind Turbine Tower Vibration Modeling and Monitoring by the Nonlinear State Estimation Technique (NSET). *MDPI*, 5279-5293.
- Heizer, J., & Render, B. (2005). *Manajemen Operasi*. Jakarta: Salemba Empat.
- Hubeis, M. (1997). Menuju Industri Kecil Profesional di Era Globalisasi melalui Pemberdayaan Manajemen Industri. *Fakultas Teknologi Pertanian. Institut Pertanian Bogor*.
- IoT, E. (2018, June 21). *EnviraIoT*. Retrieved from enviraiot: enviraiot.com/scada-vs-iot/
- Isermann, R. (2011). *Fault-Diagnosis Applications*. Springer.
- Kalyanraj, D., Prakash, S., & Sabareswar, S. (2016). Wind Turbine Monitoring and Control System Using Internet of Things. *IEEE*.
- Montgomery, D. (1996). *Statistical Quality Control, Third Edition*. New York.
- Ogata, K. (2009). *Modern Control Engineering*. Pearson.
- Perez, J., Marquez, F., Tobias, A., & Papaelias, M. (2013). Wind Turbine Reliability Analysis. *Renewable and Sustainable Energy*, 463-472.
- Poul la cour museum*. (2019). Retrieved May 19, 2019, from www.poullacour.dk
- Prabhu, E., & A.N., S. (2018). Implementation of IoT for Real Time Monitoring and Fault. *IJRTER*.
- Rao, S. (2011). *Mechanical Vibration*. Miami: Pearson Education.
- Ryan, T. (1989). *Statistical Methode for Quality Improvement*. New York.

- Salhaoui, M., Arioua, M., Guerrero-Gonzalez, A., & Garcia-Cascales, M. (2018). An IoT Control System for Wind Turbine Power Generation. *Springer Nature*, 469-479.
- Scheffer, C., & Girdhar, P. (2004). *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*. Newnes.
- Singh, V. K., Rishav, B.C., D., & Ray, U. K. (2018). IoT based Windmill Monitoring System. *IJERT*.
- Stewart, G., & Lackner, M. (2014). The Impact of Passive Tuned Mass Dampers and Wind-Wave Misalignment on Offshore Wind Turbine Loads. *Engineering Structures*, 54-61.
- Tepfteta. (2019). *Energi dan Listrik Pertanian*. Bogor: IPB.
- Wagner, H.-J. (2017). Introduction to wind energy system. *EPJ Web*.
- Yang, W., Tavner, P. J., Crabtree, C. J., Feng, Y., & Qiu, Y. (2012). Wind Turbine Condition Monitoring: Technical and Commercial Challenges. *John Wiley & Sons*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN A

Source Code Kalibrasi Sensor Accelerometer MPU6050

```
#include <Wire.h>
#include <MPU6050.h>
MPU6050 mpu;

byte degree[8] = {
  0b00000,
  0b00110,
  0b01111,
  0b00110,
  0b00000,
  0b00000,
  0b00000,
  0b00000
};

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL,WAKTU,X,Y,Z");
  Serial.println("RESETTIMER");

  while(!mpu.begin(MPU6050_SCALE_2000DPS, MPU6050_RANGE_2G))
  {
    Serial.println("tidak ada sensor MPU6050 yang terpasang!");
    delay(500);
  }
}
```

```

//Kalibrasi gyrometer
mpu.calibrateGyro();
mpu.setThreshold(3);
}

void loop()
{
//untuk pembacaan accelerometer
Vector rawAccel = mpu.readRawAccel();
Serial.print ("DATA,TIME,"); //deklarasi waktu dan data
Serial.print(rawAccel.XAxis);
Serial.print(",");
Serial.print(rawAccel.YAxis);
Serial.print(",");
Serial.println(rawAccel.ZAxis);
delay(1000);
}

```

LAMPIRAN B

Source Code Arduino

```
SoftwareSerial serial(D1,D2);//RX pin D1 dan TX pin D2
String data;
long set = 100;
int Index1,Index2,Index3,Index4,Index5,Index6,Index7,Index8;
float data_1, data_2, data_3,data_4, data_5, data_6,data_7, total;
String      secondValue,      thirdValue,      fourthValue,      fifthValue,
firstValue,sixValue,sevenValue;
//inisialisasiRelay
#include "ThingSpeak.h"
#define SECRET_SSID "MySSID" // replace MySSID with your WiFi network
name
#define SECRET_PASS "MyPassword" // replace MyPassword with your WiFi
password
#define SECRET_CH_ID 000000 // replace 0000000 with your channel number
#define SECRET_WRITE_APIKEY "XYZ" // replace XYZ with your channel
write API Key
#include <ESP8266WiFi.h>

char ssid[] = "cps1234"; // your network SSID (name)
char pass[] = "radian123"; // your network password
int keyIndex = 0; // your network key Index number (needed only for WEP)
WiFiClient client;

unsigned long myChannelNumber = 973601;
const char * myWriteAPIKey = "MCPHWCQVA2HDBIYX";
#define INTERVAL 1000

int number1 = 0;
int number2 = 0;
```

```

int number3 = 0;
int number4 = 0;
int number5 = 0;
int number6 = 0;

String myStatus = "";

#include <SPI.h>
#include <SD.h>
File myFile;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Buka file di kartu microSD");
  if (!SD.begin(2)) { //tergantung di pin chipselect yang digunakan
    Serial.println("Gagal baca microSD!");
    return;
  }
  Serial.println("Sukses baca kartu microSD!");
  myFile = SD.open("coba.txt", FILE_WRITE); //menulis File coba.txt
  // jika file sudah berhasil dibuka maka tulis data dimulai
  if (myFile) {
    Serial.println("mencoba nulis data di file coba.txt");
    myFile.println("X||Y||Z||kecepatan Angin||RPM");
    // tutup file
    myFile.close();
    Serial.println("SELESAI!");
  } else {
    // jika gagal print error
    Serial.println("GAGAL TULIS coba.txt");
  }
  Serial.println("X||Y||Z||kecepatan Angin||RPM");
}

```

```

WiFi.mode(WIFI_STA);
ThingSpeak.begin(client); // Initialize ThingSpeak
}

void loop() {

// Connect or reconnect to WiFi
if(WiFi.status() != WL_CONNECTED){
  Serial.print("Attempting to connect to SSID: ");
  Serial.print(SECRET_SSID);
  while(WiFi.status() != WL_CONNECTED){
    WiFi.begin(ssid, pass); // Connect to WPA/WPA2 network. Change this line if
using open or WEP network
    Serial.println(".");
    delay(5000);
  }
  Serial.print("\nConnected.");
}

  while (serial.available()>0){
delay(10);
char c = serial.read();
data+=c;
}

if (data.length()>0){
Serial.print(data);
  Index1 = data.indexOf(',');
  Index2 = data.indexOf(',', Index1+1);
  Index3 = data.indexOf(',', Index2+1);
  Index4 = data.indexOf(',', Index3+1);
}
}

```

```

Index5 = data.indexOf(',', Index4+1);
Index6 = data.indexOf(',', Index5+1);
Index7 = data.indexOf(',', Index6+1);
Index8 = data.indexOf(',', Index7+1);
secondValue = data.substring(Index1+1, Index2);
thirdValue = data.substring(Index2+1, Index3);
fourthValue = data.substring(Index3+1, Index4);
fifthValue = data.substring(Index4+1, Index5);
firstValue = data.substring(Index5+1, Index6);
sixValue = data.substring(Index6+1, Index7);
sevenValue = data.substring(Index7+1, Index8);

```

```

data_1=secondValue.toFloat(); //cara singkat mengubah string ke number
data_2=thirdValue.toFloat(); //cara singkat mengubah string ke number
data_3=fourthValue.toFloat(); //cara singkat mengubah string ke number
data_4=fifthValue.toFloat(); //cara singkat mengubah string ke number
data_5=firstValue.toFloat(); //cara singkat mengubah string ke number
data_6=sixValue.toFloat(); //cara singkat mengubah string ke number
data_7=sevenValue.toFloat(); //cara singkat mengubah string ke number

```

```
// Connect or reconnect to WiFi
```

```

Serial.print(data_1);
Serial.print("\n");
Serial.print(data_2);
Serial.print("\n");
Serial.print(data_3);
Serial.print("\n");
Serial.print(data_4);
Serial.print("\n");
Serial.print(data_5);

```

```

myFile = SD.open("coba.txt", FILE_WRITE); //menulis File coba.txt
// jika file sudah berhasil dibuka maka tulis data dimulai

```



```

if (myFile) {
    myFile.print(data_1);
    myFile.print("\n");
    myFile.print(data_2);
    myFile.print("\n");
    myFile.print(data_3);
    myFile.print("\n");
    myFile.print(data_4);
    myFile.print("\n");
    myFile.print(data_5);
    myFile.close();
    Serial.print("\n||SELESAI||");
} else {
    // jika gagal print error
    Serial.println("GAGAL TULIS coba.txt");
}

// set the fields with the values
ThingSpeak.setField(1, data_1);
ThingSpeak.setField(2, data_2);
ThingSpeak.setField(3, data_3);
ThingSpeak.setField(4, data_4);
ThingSpeak.setField(5, data_5);
ThingSpeak.setField(6, number3);
ThingSpeak.setField(7, number4);
ThingSpeak.setField(8, number5);

// write to the ThingSpeak channel
int x = ThingSpeak.writeFields(myChannelNumber, myWriteAPIKey);
if(x == 200){
    Serial.println("Channel update successful.");
}
else{

```

```
    Serial.println("Problem updating channel. HTTP error code " + String(x));  
  }  
  data="";  
  }  
}
```

LAMPIRAN C
Spesifikasi *Set-up* Turbin Angin

Parameter	Spesifikasi
Daya	600 w
Daya maksimum	610 w
Tegangan	24 V
Kecepatan angin (<i>start-up</i>)	2,5 m/s
Kecepatan angin	11 – 13 m/s
Kecepatan angin (<i>survival</i>)	45 m/s
Berat	11,9 kg
Diameter rotor	1,55 m
Jumlah bilah	3 buah
Bahan bilah	Fiber nilon
Generator	PMSG AC 3 fasa
Suhu operasi	-40 °C – 80°C

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN D

Data Getaran Bilah Turbin Angin

Data Ke-	Normal	5 Gram	10 Gram	20 Gram
1	16304	16260	16684	16644
2	16012	16808	15548	17176
3	15976	16684	15720	16420
4	16656	16356	16436	15988
5	16456	16504	16988	16324
6	16448	16416	15932	16544
7	16204	16500	16680	16328
8	15928	16420	15940	16500
9	16840	16564	17748	16560
10	16808	16264	16580	16292
11	16436	16580	16144	16656
12	16052	16784	16088	16464
13	16004	16588	16616	16484
14	16436	16564	16316	16484
15	16832	16400	17388	16388
16	16884	16528	17576	15640
17	15888	16532	16900	16848
18	17400	16616	16556	17176
19	17808	16620	15996	16640
20	15688	16748	16540	16124
21	15632	16408	16160	16112
22	15872	16284	16668	16232
23	16748	16544	15984	16276
24	16052	16368	15924	16408
25	15528	16492	16544	16224
26	16312	15868	16328	16484
27	17756	16788	16084	16392
28	18176	16468	16476	16500
29	16236	16404	16824	16520
30	16328	16448	15752	16460
31	16308	16440	15600	16432
32	17584	16288	16236	16612
33	15908	16544	16812	16284
34	16688	16444	16892	16656
35	15720	16476	17572	16248
36	16136	16784	16692	16848
37	16000	16520	16020	17144
38	16788	16600	16024	16676

Data Ke-	Normal	5 Gram	10 Gram	20 Gram
39	16052	16444	17320	16412
40	16672	16308	16748	16460
41	17188	16592	17068	16564
42	17508	16600	16052	16504
43	16396	16504	16436	16364
44	16248	16176	16524	16516
45	18568	16828	16468	16444
46	17896	16792	16404	16784
47	17056	16728	15276	16360
48	16112	16624	17200	16792
49	16768	16312	16284	16484
50	16044	16596	16132	16452
51	17748	16552	16264	16232
52	16372	16412	15336	16416
53	16192	16224	16640	16292
54	16128	16528	16996	16644
55	16612	16476	16568	16612
56	16528	16356	16400	16592
57	16488	16600	17040	16516
58	15784	16372	15584	16524
59	16972	16404	16788	16784
60	18200	16708	15888	16364
61	17568	16772	15724	16040
62	15640	16752	16096	16708
63	16680	16488	15792	16556
64	17360	16332	17832	16360
65	16748	16736	16788	16492
66	16412	16524	17068	16536
67	16880	16516	16320	16608
68	16896	16696	17100	16404
69	17104	16356	16832	15628
70	16412	16336	17372	16436
71	17076	16692	17692	15936
72	16096	16596	16904	17192
73	15680	16432	16996	16168
74	16188	16556	16684	16664
75	16644	16552	15948	16876
76	16628	16264	16444	16360
77	15988	16320	16660	16484
78	15232	16484	16412	16460
79	16112	16796	17028	16492

Data Ke-	Normal	5 Gram	10 Gram	20 Gram
80	16028	16732	16856	16552
81	16520	16480	15356	16604
82	15880	16404	15836	16544
83	16600	16576	16088	16556
84	16268	16492	16412	16544
85	16520	16428	16856	16644
86	15708	16432	16024	16108
87	17232	16348	16228	16276
88	16260	16496	16088	16236
89	16620	16524	17368	16784
90	16928	16644	16808	16580
91	16804	16500	16176	16468
92	16552	16504	15964	16636
93	16608	16652	17272	16572
94	15772	17048	15780	16516
95	16808	16432	16200	16488
96	15472	16472	17528	16604
97	15672	16576	16012	16644
98	17048	16440	16284	16308
99	16784	16600	16480	16364
100	16840	16728	16416	16268
101	16888	16436	16432	16800
102	15928	16660	16304	16540
103	16320	16456	17100	16664
104	16272	16320	17372	16356
105	16292	16540	16692	16384
106	16856	16792	16404	16552
107	17520	16528	16716	16384
108	16936	16368	17020	16472
109	16192	16460	17240	16196
110	14992	16568	16456	16768
111	16464	16516	16680	16264
112	16628	17464	15388	16424
113	16448	16968	15812	16480
114	16484	16360	15908	16360
115	16680	16332	17376	16500
116	16676	16240	17548	16580
117	17100	16680	17604	16644
118	15532	16336	17220	16392
119	16328	16484	17388	16464
120	16704	16380	16308	16388

Data Ke-	Normal	5 Gram	10 Gram	20 Gram
121	16432	16396	16152	16636
122	17004	16296	16280	16800
123	16504	16540	16244	16840
124	15528	16512	15600	16544
125	16252	16568	16204	16408
126	16300	16404	16760	16812
127	16372	16468	16824	16468
128	15880	16100	16720	16292
129	17460	16404	16640	16444
130	16576	16544	15392	16608
131	15716	16748	17004	16464
132	16336	16616	15244	16576
133	17080	16536	15428	16504
134	16588	16496	16820	16384
135	16984	16604	16064	16648
136	17316	16344	15896	16968
137	16764	16228	16668	16176
138	15656	16600	16648	16728
139	16108	16588	16588	16216
140	16132	16588	16328	16536
141	15972	16332	16464	16596
142	17148	16428	16456	16336
143	17912	16716	15788	16604
144	17140	16124	16780	16620
145	15724	16372	16792	16456
146	16932	16716	16660	16684
147	16156	16744	16648	16496
148	16128	16516	16244	16688
149	17176	16624	15676	16704
150	15856	16512	15928	16580
151	16560	16360	16788	16580
152	16568	16472	16992	16460
153	16064	16512	16536	16456
154	16344	16964	17432	16568
155	16248	16116	17172	16496
156	16936	16380	16496	16704
157	16364	16236	16624	16396
158	16864	16476	17400	16708
159	16128	16428	17228	16192
160	17144	16492	16136	16356
161	16776	16404	16836	16548

Data Ke-	Normal	5 Gram	10 Gram	20 Gram
162	16520	16856	16664	16476
163	16644	17056	16800	16484
164	15280	16564	16392	16656
165	16000	16880	15888	16592
166	16764	17068	16416	16464
167	16264	16560	16152	16400
168	16624	16452	15132	16388
169	16772	16424	17680	16516
170	16608	16532	16436	16412
171	16068	16720	16940	16576
172	16304	16072	17416	16020
173	16416	16500	16604	16200
174	16368	16568	16520	16408
175	17772	16400	17244	16808
176	16336	16232	15972	16696
177	16440	16500	17432	16184
178	17012	16440	16352	16580
179	15964	16172	15932	16648
180	16884	16900	16100	16544
181	16296	16612	17528	16256
182	16828	16588	16968	16468
183	16476	16448	16408	16540
184	15524	16624	15596	16556
185	16720	16504	15640	16328
186	16624	16696	16116	16540
187	20735	16248	16228	16168
188	16568	16236	16588	16788
189	16332	16820	15916	16488
190	17124	16360	16172	16660
191	16504	16804	16476	16048
192	16880	16460	16744	16380
193	17052	16564	17020	16336
194	16180	16668	15820	16404
195	16744	16444	17856	16540
196	15764	16432	16244	16476
197	15016	16448	16452	16236
198	16156	16592	15608	16500
199	16760	16336	17008	16448
200	17292	16496	15976	16572
201	17780	16476	16232	16448
202	16956	16388	17236	16376

Data Ke-	Normal	5 Gram	10 Gram	20 Gram
203	17480	16676	17224	16484
204	16768	16464	17860	16768
205	16504	16800	16756	16480
206	16136	16468	16572	16356
207	16808	16564	16476	16404
208	17240	16444	16152	16532
209	16872	16456	16240	16552
210	15552	16324	15372	15884
211	17080	16136	15940	16808
212	17520	16864	15928	16412
213	16736	16596	16476	16604
214	16640	16488	15840	16460
215	16012	16484	18200	16316
216	16864	16452	17436	16516
217	15840	16364	17776	16572
218	15744	16848	16916	15932
219	14812	17032	16004	16440
220	15052	16848	16572	16548
221	17072	16396	17748	16348
222	17012	16680	15568	16388
223	15960	16520	17832	16588
224	16356	16456	16596	16476
225	16468	16440	16784	16508
226	16308	16500	16632	16380
227	16520	16904	15928	16440
228	16296	16800	16544	16492
229	15424	16604	15840	16496
230	17152	16488	16988	16696
231	16584	16460	16128	16484
232	17736	16348	16484	16748

LAMPIRAN E
DATA KEANDALAN BILAH TURBIN ANGIN

t (hari)	R(t)	t(hari)	PM(t)	t(hari)	RM(t)
0	1,00	0	1,00	0	1,00
20	1,00	20	1,00	20	1,00
40	0,99	40	0,99	40	0,99
60	0,99	60	0,99	60	0,99
80	0,99	80	0,99	80	0,99
100	0,99	100	0,99	100	0,99
120	0,98	120	0,98	120	0,98
140	0,98	140	0,98	140	0,98
160	0,98	160	0,98	160	0,98
180	0,98	180	0,98	180	0,98
200	0,97	200	0,97	200	0,97
220	0,97	220	0,97	220	0,97
240	0,97	240	0,97	240	0,97
260	0,97	260	0,97	260	0,97
280	0,96	280	0,96	280	0,96
300	0,96	300	0,96	300	0,96
320	0,96	320	0,96	320	0,96
340	0,96	340	0,96	340	0,96
360	0,95	360	0,95	360	0,95
380	0,95	380	0,95	380	0,95
400	0,95	400	0,95	400	0,95
420	0,95	420	0,95	420	0,95
440	0,94	440	0,94	440	0,94
460	0,94	460	0,94	460	0,94
480	0,94	480	0,94	480	0,94
500	0,94	500	0,94	500	0,94
520	0,93	520	0,93	520	0,93
540	0,93	540	0,93	540	0,93
560	0,93	560	0,93	560	0,93
580	0,93	580	0,93	580	0,93
600	0,92	600	0,92	600	0,92
620	0,92	620	0,92	620	0,92
640	0,92	640	0,92	640	0,92
660	0,92	660	0,92	660	0,92
680	0,92	680	0,92	680	0,92
700	0,91	700	0,91	700	0,91
720	0,91	720	0,91	720	0,91
740	0,91	740	0,91	740	0,91
760	0,91	760	0,91	760	0,91

t (hari)	R(t)	t(hari)	PM(t)	t(hari)	RM(t)
780	0,90	780	0,90	780	0,90
800	0,90	800	0,90	800	0,90
820	0,90	820	0,90	820	0,90
840	0,90	840	0,90	840	0,90
860	0,89	860	0,89	860	0,89
880	0,89	880	0,89	880	0,89
900	0,89	900	0,89	900	0,89
920	0,89	920	0,89	920	0,89
940	0,88	940	0,88	940	0,88
960	0,88	960	0,88	960	0,88
980	0,88	980	0,88	980	0,88
1000	0,88	1000	0,88	1000	0,88
1020	0,88	1020	0,88	1020	0,88
1040	0,87	1040	0,87	1040	0,87
1060	0,87	1060	0,87	1060	0,87
1080	0,87	1080	0,87	1080	0,87
1100	0,87	1100	0,87	1100	0,87
1120	0,86	1120	0,86	1120	0,86
1140	0,86	1140	0,86	1140	0,86
1160	0,86	1160	0,86	1160	0,86
1180	0,86	1180	0,86	1180	0,86
1200	0,86	1200	0,86	1200	0,86
1220	0,85	1220	0,85	1220	0,85
1240	0,85	1240	0,85	1240	0,85
1260	0,85	1260	0,85	1260	0,85
1280	0,85	1280	0,85	1280	0,85
1300	0,84	1300	0,84	1300	0,84
1320	0,84	1320	0,84	1320	0,84
1340	0,84	1340	0,84	1340	0,84
1360	0,84	1360	0,84	1360	0,84
1380	0,84	1380	0,84	1380	0,84
1400	0,83	1400	0,83	1400	0,83
1420	0,83	1420	0,83	1420	0,83
1440	0,83	1440	0,83	1440	0,83
1460	0,83	1460	0,83	1460	0,83
1480	0,82	1480	0,82	1480	0,82
1500	0,82	1500	0,82	1500	0,82
1520	0,82	1520	0,82	1520	0,82
1540	0,82	1540	0,82	1540	0,82
1560	0,82	1560	0,82	1560	0,82
1580	0,81	1580	0,81	1580	0,81

t (hari)	R(t)	t(hari)	PM(t)	t(hari)	RM(t)
1600	0,81	1600	0,81	1600	0,81
1620	0,81	1620	0,81	1620	0,81
1640	0,81	1640	0,81	1640	0,81
1660	0,81	1660	0,81	1660	0,81
1680	0,80	1680	0,80	1680	0,80
1700	0,80	1700	0,80	1700	0,80
1720	0,80	1720	0,80	1720	0,80
1740	0,80	1740	0,80	1740	0,80
1760	0,80	1760	0,80	1760	0,80
1780	0,79	1780	0,79	1780	0,79
1800	0,79	1800	0,79	1800	0,79
1820	0,79	1820	0,79	1820	0,79
1840	0,79	1840	0,79	1840	0,79
1860	0,79	1860	0,79	1860	0,79
1880	0,78	1880	0,78	1880	0,78
1900	0,78	1900	0,78	1900	0,78
1920	0,78	1920	0,78	1920	0,78
1940	0,78	1940	0,78	1940	0,78
1960	0,78	1960	0,78	1960	0,78
1980	0,77	1980	0,77	1980	0,77
2000	0,77	2000	0,77	2000	0,77
2020	0,77	2020	0,77	2020	0,77
2040	0,77	2040	0,77	2040	0,77
2060	0,77	2060	0,77	2060	0,77
2080	0,76	2080	0,76	2080	0,76
2100	0,76	2100	0,76	2100	0,76
2120	0,76	2120	0,76	2120	0,76
2140	0,76	2140	0,76	2140	0,76
2160	0,76	2160	0,76	2160	0,76
2180	0,75	2180	0,75	2180	0,75
2200	0,75	2200	0,75	2200	0,75
2220	0,75	2220	0,75	2220	0,75
2240	0,75	2240	0,75	2240	0,75
2260	0,75	2260	0,75	2260	0,75
2280	0,74	2280	0,74	2280	0,74
2300	0,74	2300	0,74	2300	0,74
2320	0,74	2320	0,74	2320	0,74
2340	0,74	2340	0,74	2340	0,74
2360	0,74	2360	0,74	2360	0,74
2380	0,73	2380	0,73	2380	0,73
2400	0,73	2400	0,73	2400	0,73

t (hari)	R(t)	t(hari)	PM(t)	t(hari)	RM(t)
2420	0,73	2420	0,73	2420	0,73
2440	0,73	2440	0,73	2440	0,73
2460	0,73	2460	0,73	2460	0,73
2480	0,72	2480	0,72	2480	0,72
2500	0,72	2500	0,72	2500	0,72
2520	0,72	2520	0,72	2520	0,72
2540	0,72	2540	0,72	2540	0,72
2560	0,72	2560	0,72	2560	0,72
2580	0,72	2580	0,72	2580	0,72
2600	0,71	2600	0,71	2600	0,71
2620	0,71	2620	0,71	2620	0,71
2640	0,71	2640	0,71	2640	0,71
2660	0,71	2660	0,71	2660	0,71
2680	0,71	2680	0,71	2680	0,71
2700	0,70	2700	0,70	2700	0,70
2720	0,70	2720	0,70	2720	0,70
2740	0,70	2740	0,70	2740	0,70
2760	0,70	2760	0,70	2760	0,70
2780	0,70	2780	0,70	2780	0,70
2800	0,69	2800	0,69	2800	0,69
2820	0,69	2820	0,69	2820	0,69
2840	0,69	2840	0,69	2840	0,69
2860	0,69	2860	0,69	2860	0,69
2880	0,69	2880	0,69	2880	0,69
2900	0,69	2900	0,69	2900	0,69
2920	0,68	2920	0,68	2920	0,68
2940	0,68	2940	0,68	2940	0,68
2960	0,68	2960	0,68	2960	0,68
2980	0,68	2980	0,68	2980	0,68
3000	0,68	3000	0,68	3000	0,68
3020	0,68	3020	0,68	3020	0,68
3040	0,67	3040	0,67	3040	0,67
3060	0,67	3060	0,67	3060	0,67
3080	0,67	3080	0,67	3080	0,67
3100	0,67	3100	0,67	3100	0,67
3120	0,67	3120	0,67	3120	0,67
3140	0,66	3140	0,66	3140	0,66
3160	0,66	3160	0,66	3160	0,66
3180	0,66	3180	0,66	3180	0,66
3200	0,66	3200	0,66	3200	0,66

t (hari)	R(t)	t(hari)	PM(t)	t(hari)	RM(t)
3220	0,66	3220	0,66	3220	0,66
3240	0,66	3240	0,66	3240	0,66
3260	0,65	3260	0,65	3260	0,65
3280	0,65	3280	0,65	3280	0,65
3300	0,65	3300	0,65	3300	0,65
3320	0,65	3320	0,65	3320	0,65
3340	0,65	3340	0,65	3340	0,65
3360	0,65	3360	0,65	3360	0,65
3380	0,64	3380	0,64	3380	0,64
3400	0,64	3400	0,64	3400	0,64
3420	0,64	3420	0,64	3420	0,64
3440	0,64	3440	0,64	3440	0,64
3460	0,64	3460	0,64	3460	0,64
3480	0,64	3480	0,64	3480	0,64
3500	0,63	3500	0,63	3500	0,63
3520	0,63	3520	0,63	3520	0,63
3540	0,63	3540	0,63	3540	0,63
3560	0,63	3560	0,63	3560	0,63
3580	0,63	3580	0,63	3580	0,63
3600	0,63	3600	0,63	3600	0,63
3620	0,62	3620	0,62	3620	0,62
3640	0,62	3640	0,62	3640	0,62
3660	0,62	3660	0,62	3660	0,62
3680	0,62	3680	0,62	3680	0,62
3700	0,62	3700	0,62	3700	0,62
3720	0,62	3720	0,62	3720	0,62
3740	0,61	3740	0,61	3740	0,61
3760	0,61	3760	0,61	3760	0,61
3780	0,61	3780	0,61	3780	0,61
3800	0,61	3800	0,61	3800	0,61
3820	0,61	3820	0,61	3820	0,61
3840	0,61	3840	0,61	3840	0,61
3860	0,61	3860	0,61	3860	0,61
3880	0,60	3880	0,60	3880	0,60
3900	0,60	3900	0,60	3900	0,60
3920	0,60	3920	0,60	3920	0,60
3940	0,60	3940	0,60	3940	0,60
3960	0,60	3960	0,60	3960	0,60
3980	0,60	3980	0,60	3980	0,60
4000	0,59	4000	0,59	4000	0,59
4020	0,59	4020	0,59	4020	0,59

t (hari)	R(t)	t(hari)	PM(t)	t(hari)	RM(t)
4040	0,59	4040	0,59	4040	0,59
4060	0,59	4060	0,59	4060	0,59
4080	0,59	4080	0,59	4080	0,59
4100	0,59	4100	0,59	4100	0,59
4120	0,59	4120	0,59	4120	0,59
4140	0,58	4140	0,58	4140	0,58
4160	0,58	4160	0,58	4160	0,58
4180	0,58	4180	0,58	4180	0,58
4200	0,58	4200	0,58	4200	0,58
4220	0,58	4220	0,58	4220	0,58
4240	0,58	4240	0,58	4240	0,58
4260	0,57	4260	0,57	4260	0,57
4280	0,57	4280	0,57	4280	0,57
4300	0,57	4300	0,57	4300	0,57
4320	0,57	4320	0,57	4320	0,57
4340	0,57	4340	0,57	4340	0,57
4360	0,57	4360	0,57	4360	0,57
4380	0,57	4380	0,57	4380	0,57
4400	0,56	4400	0,56	4400	0,56
4420	0,56	4420	0,56	4420	0,56
4440	0,56	4440	0,56	4440	0,56
4460	0,56	4460	0,56	4460	0,56
4480	0,56	4480	0,56	4480	0,56
4500	0,56	4500	0,56	4500	0,56
4520	0,56	4520	0,56	4520	0,56
4540	0,55	4540	0,55	4540	0,55
4560	0,55	0	1,00	4560	0,55
4580	0,55	20	1,00	4580	0,55
4600	0,55	40	0,99	4600	0,55
4620	0,55	60	0,99	4620	0,55
4640	0,55	80	0,99	4640	0,55
4660	0,55	100	0,99	4660	0,55
4680	0,54	120	0,98	4680	0,54
4700	0,54	140	0,98	4700	0,54
4720	0,54	160	0,98	4720	0,54
4740	0,54	180	0,98	4740	0,54
4760	0,54	200	0,97	4760	0,54
4780	0,54	220	0,97	4780	0,54
4800	0,54	240	0,97	4800	0,54
4820	0,53	260	0,97	4820	0,53
4840	0,53	280	0,96	4840	0,53

t (hari)	R(t)	t(hari)	PM(t)	t(hari)	RM(t)
4860	0,53	300	0,96	4860	0,53
4880	0,53	320	0,96	4880	0,53
4900	0,53	340	0,96	4900	0,53
4920	0,53	360	0,95	4920	0,53
4940	0,53	380	0,95	4940	0,53
4960	0,52	400	0,95	4960	0,52
4980	0,52	420	0,95	4980	0,52
5000	0,52	440	0,94	5000	0,52
5020	0,52	460	0,94	5020	0,52
5040	0,52	480	0,94	5040	0,52
5060	0,52	500	0,94	5060	0,52
5080	0,52	520	0,93	5080	0,52
5100	0,52	540	0,93	5100	0,52
5120	0,51	560	0,93	5120	0,51
5140	0,51	580	0,93	5140	0,51
5160	0,51	600	0,92	5160	0,51
5180	0,51	620	0,92	5180	0,51
5200	0,51	640	0,92	5200	0,51
5220	0,51	660	0,92	5220	0,51
5240	0,51	680	0,92	5240	0,51
5260	0,50	700	0,91	5260	0,50
5280	0,50	720	0,91	5280	0,50
5300	0,50	740	0,91	5300	0,50
5320	0,50	760	0,91	5320	0,50
5340	0,50	780	0,90	5340	0,50
5360	0,50	800	0,90	5360	0,50
5380	0,50	820	0,90	5380	0,50
5400	0,50	840	0,90	5400	0,50
5420	0,49	860	0,89	5420	0,49
5440	0,49	880	0,89	5440	0,49
5460	0,49	900	0,89	5460	0,49
5480	0,49	920	0,89	5480	0,49
5500	0,49	940	0,88	5500	0,49
5520	0,49	960	0,88	5520	0,49
5540	0,49	980	0,88	5540	0,49
5560	0,49	1000	0,88	5560	0,49
5580	0,48	1020	0,88	5580	0,48
5600	0,48	1040	0,87	5600	0,48
5620	0,48	1060	0,87	5620	0,48
5640	0,48	1080	0,87	5640	0,48
5660	0,48	1100	0,87	5660	0,48

t (hari)	R(t)	t(hari)	PM(t)	t(hari)	RM(t)
5680	0,48	1120	0,86	5680	0,48
5700	0,48	1140	0,86	5700	0,48
5720	0,48	1160	0,86	5720	0,48
5740	0,47	1180	0,86	5740	0,47
5760	0,47	1200	0,86	5760	0,47
5800	0,47	1240	0,85	5800	0,47
5820	0,47	1260	0,85	5820	0,47
5840	0,47	1280	0,85	5840	0,47
5860	0,47	1300	0,84	5860	0,47
5880	0,47	1320	0,84	5880	0,47
5900	0,46	1340	0,84	5900	0,46
5920	0,46	1360	0,84	5920	0,46
5940	0,46	1380	0,84	5940	0,46
5960	0,46	1400	0,83	5960	0,46
5980	0,46	1420	0,83	5980	0,46
6000	0,46	1440	0,83	6000	0,46
6020	0,46	1460	0,83	6020	0,46
6040	0,46	1480	0,82	6040	0,46
6060	0,45	1500	0,82	6060	0,45
6080	0,45	1520	0,82	6080	0,45
6100	0,45	1540	0,82	6100	0,45
6120	0,45	1560	0,82	6120	0,45
6140	0,45	1580	0,81	6140	0,45
6160	0,45	1600	0,81	6160	0,45
6180	0,45	1620	0,81	6180	0,45
6200	0,45	1640	0,81	6200	0,45
6220	0,45	1660	0,81	6220	0,45
6240	0,44	1680	0,80	6240	0,44
6260	0,44	1700	0,80	6260	0,44
6280	0,44	1720	0,80	6280	0,44
6300	0,44	1740	0,80	6300	0,44
6320	0,44	1760	0,80	6320	0,44
6340	0,44	1780	0,79	6340	0,44
6360	0,44	1800	0,79	6360	0,44
6380	0,44	1820	0,79	6380	0,44
6400	0,44	1840	0,79	6400	0,44
6420	0,43	1860	0,79	6420	0,43
6440	0,43	1880	0,78	6440	0,43
6460	0,43	1900	0,78	6460	0,43
6480	0,43	1920	0,78	6480	0,43
6500	0,43	1940	0,78	6500	0,43

t (hari)	R(t)	t(hari)	PM(t)	t(hari)	RM(t)
6520	0,43	1960	0,78	6520	0,43
6540	0,43	1980	0,77	6540	0,43
6560	0,43	2000	0,77	6560	0,43
6580	0,43	2020	0,77	6580	0,43
6600	0,42	2040	0,77	6600	0,42
6620	0,42	2060	0,77	6620	0,42
6640	0,42	2080	0,76	6640	0,42
6660	0,42	2100	0,76	6660	0,42
6680	0,42	2120	0,76	6680	0,42
6700	0,42	2140	0,76	6700	0,42
6720	0,42	2160	0,76	6720	0,42
6740	0,42	2180	0,75	6740	0,42
6760	0,42	2200	0,75	6760	0,42
6780	0,41	2220	0,75	6780	0,41
6800	0,41	2240	0,75	6800	0,41
6820	0,41	2260	0,75	6820	0,41
6840	0,41	2280	0,74	6840	0,41
6860	0,41	2300	0,74	6860	0,41
6880	0,41	2320	0,74	6880	0,41
6900	0,41	2340	0,74	6900	0,41
6920	0,41	2360	0,74	6920	0,41
6940	0,41	2380	0,73	6940	0,41
6960	0,40	2400	0,73	6960	0,40
6980	0,40	2420	0,73	6980	0,40
7000	0,40	2440	0,73	7000	0,40
7020	0,40	2460	0,73	7020	0,40
7040	0,40	2480	0,72	7040	0,40
7060	0,40	2500	0,72	7060	0,40
7080	0,40	2520	0,72	7080	0,40
7100	0,40	2540	0,72	7100	0,40
7120	0,40	2560	0,72	7120	0,40
7140	0,40	2580	0,72	7140	0,40
7160	0,39	2600	0,71	7160	0,39
7180	0,39	2620	0,71	7180	0,39
7200	0,39	2640	0,71	7200	0,39
7220	0,39	2660	0,71	7220	0,39
7240	0,39	2680	0,71	7240	0,39
7260	0,39	2700	0,70	7260	0,39
7280	0,39	2720	0,70	7280	0,39
7300	0,39	2740	0,70	7300	0,39
7320	0,39	2760	0,70	7320	0,39

t (hari)	R(t)	t(hari)	PM(t)	t(hari)	RM(t)
7340	0,39	2780	0,70	7340	0,39
7360	0,38	2800	0,69	7360	0,38
7380	0,38	2820	0,69	7380	0,38
7400	0,38	2840	0,69	7400	0,38
7420	0,38	2860	0,69	7420	0,38
7440	0,38	2880	0,69	7440	0,38
7460	0,38	2900	0,69	7460	0,38
7480	0,38	2920	0,68	7480	0,38
7500	0,38	2940	0,68	7500	0,38
7520	0,38	2960	0,68	7520	0,38
7540	0,38	2980	0,68	7540	0,38
7560	0,37	3000	0,68	7560	0,37
7580	0,37	3020	0,68	7580	0,37
7600	0,37	3040	0,67	7600	0,37
7620	0,37	3060	0,67	7620	0,37
7640	0,37	3080	0,67	7640	0,37
7660	0,37	3100	0,67	7660	0,37
7680	0,37	3120	0,67	7680	0,37
7700	0,37	3140	0,66	7700	0,37
7720	0,37	3160	0,66	7720	0,37
7740	0,37	3180	0,66	7740	0,37
7760	0,36	3200	0,66	7760	0,36
7780	0,36	3220	0,66	7780	0,36
7800	0,36	3240	0,66	7800	0,36
7820	0,36	3260	0,65	7820	0,36
7840	0,36	3280	0,65	7840	0,36
7860	0,36	3300	0,65	7860	0,36
7880	0,36	3320	0,65	7880	0,36
7900	0,36	3340	0,65	7900	0,36
7920	0,36	3360	0,65	7920	0,36
7940	0,36	3380	0,64	7940	0,36
7960	0,36	3400	0,64	7960	0,36
7980	0,35	3420	0,64	7980	0,35
8000	0,35	3440	0,64	8000	0,35
8020	0,35	3460	0,64	8020	0,35
8040	0,35	3480	0,64	8040	0,35
8060	0,35	3500	0,63	8060	0,35
8080	0,35	3520	0,63	8080	0,35
8100	0,35	3540	0,63	8100	0,35
8120	0,35	3560	0,63	8120	0,35
8140	0,35	3580	0,63	8140	0,35

t (hari)	R(t)	t(hari)	PM(t)	t(hari)	RM(t)
8160	0,35	3600	0,63	8160	0,35
8180	0,35	3620	0,62	8180	0,35
8200	0,34	3640	0,62	8200	0,34
8220	0,34	3660	0,62	8220	0,34
8240	0,34	3680	0,62	8240	0,34
8260	0,34	3700	0,62	8260	0,34
8280	0,34	3720	0,62	8280	0,34
8300	0,34	3740	0,61	8300	0,34
8320	0,34	3760	0,61	8320	0,34
8340	0,34	3780	0,61	8340	0,34
8360	0,34	3800	0,61	8360	0,34
8380	0,34	3820	0,61	8380	0,34
8400	0,34	3840	0,61	8400	0,34
8420	0,33	3860	0,61	8420	0,33
8440	0,33	3880	0,60	8440	0,33
8460	0,33	3900	0,60	8460	0,33
8480	0,33	3920	0,60	8480	0,33
8500	0,33	3940	0,60	8500	0,33
8520	0,33	3960	0,60	8520	0,33
8540	0,33	3980	0,60	8540	0,33
8560	0,33	4000	0,59	8560	0,33
8580	0,33	4020	0,59	8580	0,33
8600	0,33	4040	0,59	8600	0,33
8620	0,33	4060	0,59	8620	0,33
8640	0,33	4080	0,59	8640	0,33
8660	0,32	4100	0,59	8660	0,32
8680	0,32	4120	0,59	8680	0,32
8700	0,32	4140	0,58	8700	0,32
8720	0,32	4160	0,58	8720	0,32
8740	0,32	4180	0,58	8740	0,32
8760	0,32	4200	0,58	8760	0,32
8780	0,32	4220	0,58	8780	0,32
8800	0,32	4240	0,58	8800	0,32
8820	0,32	4260	0,57	8820	0,32
8840	0,32	4280	0,57	8840	0,32
8860	0,32	4300	0,57	8860	0,32
8880	0,32	4320	0,57	8880	0,32
8900	0,31	4340	0,57	8900	0,31
8920	0,31	4360	0,57	8920	0,31
8940	0,31	4380	0,57	8940	0,31
8960	0,31	4400	0,56	8960	0,31

t (hari)	R(t)	t(hari)	PM(t)	t(hari)	RM(t)
8980	0,31	4420	0,56	8980	0,31
9000	0,31	4440	0,56	9000	0,31
9020	0,31	4460	0,56	9020	0,31
9040	0,31	4480	0,56	9040	0,31
9060	0,31	4500	0,56	9060	0,31
9080	0,31	4520	0,56	9080	0,31
9100	0,31	4540	0,55	9100	0,31
9120	0,31	0	1,00	9120	0,31
9140	0,30	20	1,00	9140	0,30
9160	0,30	40	0,99	9160	0,30
9180	0,30	60	0,99	9180	0,30
9200	0,30	80	0,99	9200	0,30
9220	0,30	100	0,99	9220	0,30
9240	0,30	120	0,98	9240	0,30
9260	0,30	140	0,98	9260	0,30
9280	0,30	160	0,98	9280	0,30
9300	0,30	180	0,98	9300	0,30
9320	0,30	200	0,97	9320	0,30
9340	0,30	220	0,97	9340	0,30
9360	0,30	240	0,97	9360	0,30
9380	0,30	260	0,97	9380	0,30
9400	0,29	280	0,96	9400	0,29
9420	0,29	300	0,96	9420	0,29
9440	0,29	320	0,96	9440	0,29
9460	0,29	340	0,96	9460	0,29
9480	0,29	360	0,95	9480	0,29
9500	0,29	380	0,95	9500	0,29
9520	0,29	400	0,95	9520	0,29
9540	0,29	420	0,95	9540	0,29
9560	0,29	440	0,94	9560	0,29
9580	0,29	460	0,94	9580	0,29
9600	0,29	480	0,94	9600	0,29
9620	0,29	500	0,94	9620	0,29
9640	0,29	520	0,93	9640	0,29
9660	0,28	540	0,93	9660	0,28
9680	0,28	560	0,93	9680	0,28
9700	0,28	580	0,93	9700	0,28
9720	0,28	600	0,92	9720	0,28
9740	0,28	620	0,92	9740	0,28
9760	0,28	640	0,92	9760	0,28
9780	0,28	660	0,92	9780	0,28

BIODATA PENULIS



Fizanti Causia Agusti, lahir di Denpasar pada tanggal 12 Februari 1996. Memulai Sekolah Dasar pada tahun 2002 di SDS Tadika Puri Cabang Klender, kemudian melanjutkan sekolah di SMP Labschool Rawamangun hingga tahun 2011. Di jenjang Sekolah Menengah Atas penulis bersekolah di SMA Labschool Rawamangun. Tahun 2014 penulis melanjutkan pendidikan di Departemen Teknik Fisika Fakultas Teknologi Industri ITS. Selama berstatus sebagai mahasiswa sarjana, penulis aktif di Laboratorium Rekayasa Bahan. Pada tahun 2017 penulis melaksanakan kerja praktik di PT. GMF AeroAsia. Penulis menyelesaikan pendidikan program sarjana pada Maret 2018. Pada tahun 2018, penulis melanjutkan pendidikan magister di Departemen Teknik Fisika bidang Rekayasa Instrumentasi Industri melalui program beasiswa BPP-DN DIKTI *Fresh Graduate*. Penulis dapat dihubungi melalui email fizantia@gmail.com.