

Kajian Lintasan Orbit pada Turbin Angin Savonius Tipe Rotor *U* dan *Helix* dengan Menggunakan *Software* MATLAB

Panji Waskito¹, Ali Syahputra Hasibuan²

¹Progam Studi S1 Teknik Mesin, Universitas Sumatera Utara
panjiwaskito81@yahoo.com

²Progam Studi S1 Teknik Mesin, Universitas Sumatera Utara
alisyahputrahasibuan@yahoo.co.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi eksperimental kajian lintasan orbit menggunakan matlab, dengan melakukan pengukuran pada poros turbin angin savanius tipe rotor *U* dan *Helix* dengan menggunakan *Laser Vibrometer*. Pengukuran dilakukan dengan 5 variasi kecepatan angin selama 100 detik, yaitu : 4 m/s, 4,5m/s, 5 m/s, 5,5m/s dan 6 m/s. Nilai *dispalacement* terendah sebesar -0,3712 mm pada kecepatan angin 5 m/s dan tertinggi 0,3711 mm pada kecepatan angin 5 m/s pada tipe rotor *U*. Nilai *velocity* terendah sebesar 0,1420 mm/s pada kecepatan angin 6 m/s dan nilai tertinggi 0,5435 mm/s pada kecepatan angin 4,5 m/s pada tipe rotor *Helix*. Nilai *acceleration* tertinggi sebesar -4,5378 mm/s² pada kecepatan angin 6 m/s dan nilai tertinggi 4,5304 mm/s² pada kecepatan angin 6 m/s pada tipe rotor *Helix*. Lintasan orbit *displacement*, *velocity* dan *acceleration* mengalami *misalignment* karena bentuk lintasan berbentuk elips pipih.

Kata Kunci: Turbin angin savanius, Vibrasi, *Displacement*, *Velocity*, *Acceleration*, Lintasan Orbit

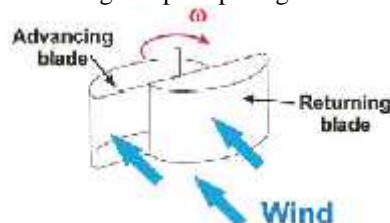
Abstract

This research aims to study the orbital trajectories experimental studies using matlab, to perform a measurements on the axis wind turbine rotor type savanius U and Helix by using Laser Vibrometer. Measurements were made with 5 variations of wind speed for 100 seconds, ie: 4 m / s, 4.5 m / s, 5 m / s, 5.5 m / s and 6 m / s. Lowest displacement value of -0.3712 mm at a wind speed of 5 m / s and the highest 0.3711 mm at a wind speed of 5 m / s on the type of rotor velocity U. value low of 0.1420 mm / s at a wind speed of 6 m / s and the highest value of 0.5435 mm / s at a wind speed of 4.5 m / s on the type of rotor Helix. The highest acceleration value of -4.5378 mm / s² at a wind speed of 6 m / s and the highest value of 4.5304 mm / s² at a wind speed of 6 m / s on the type of rotor Helix. Orbit trajectory displacement, velocity and acceleration experienced misalignment for flat ellipse shape.

Keywords: Wind turbine savonius, Vibration, Displacement, Velocity, Acceleration, Trajectory orbit

1. Pendahuluan

Salah satu jenis turbin angin sumbu vertikal (VAWT) yang dapat digunakan pada angin dengan kecepatan rendah adalah turbin angin Savonius. Turbin angin Savonius pertama kali diperkenalkan oleh insinyur Finlandia Sigurd J. Savonius pada tahun 1922. Turbin angin sumbu vertikal yang terdiri dari dua sudu berbentuk setengah silinder (atau elips) yang dirangkai sehingga membentuk „S“, satu sisi setengah silinder berbentuk cembung dan sisi lain berbentuk cekung yang dilalui angin seperti pada gambar 1.



Gambar 1. Prinsip rotor savonius

Berdasarkan prinsip aerodinamis, rotor turbin ini memanfaatkan gaya hambat (*drag*) saat

mengekstrak energi angin dari aliran angin yang melalui sudu turbin. Koefisien hambat permukaan cekung lebih besar dari pada permukaan cembung. Oleh sebab itu, sisi permukaan cekung setengah silinder yang dilalui angin akan memberikan gaya hambat yang lebih besar daripada sisi lain sehingga rotor berputar. Setiap turbin angin yang memanfaatkan potensi angin dengan gaya hambat memiliki efisiensi yang terbatas karena kecepatan sudu tidak dapat melebihi kecepatan angin yang melaluinya. Pada perkembangannya turbin *Savonius* ini banyak mengalami perubahan bentuk rotor, seperti yang terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Rotor tipe U dan Helix

Perbedaan dari tipe Helix dan U :

1. Putaran rotor helix lebih tinggi dari rotor tipe U
2. Daya yang dihasilkan oleh rotor helix savonius lebih baik dari rotor tipe U

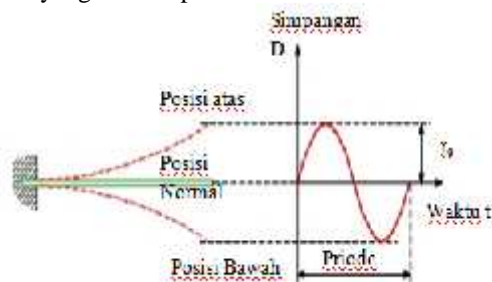
Semakin besar kecepatan angin semakin besar selisih daya yang di hasilkan

1.1 Analisa Getaran

Data getaran yang biasanya diperoleh dalam bentuk sinyal (*analog*) listrik yang kontinyu yang dihasilkan dari transducer, dimana masing-masing sinyal analog tersebut menunjukkan besar regangan, tegangan, gaya, atau parameter gerakan sesaat (*displacement, velocity, dan acceleration*) sebagai fungsi waktu. Sinyal yang demikian disebut sebagai *time history*. Suatu *sample* data didefinisikan sebagai *time history* dari pengukuran getaran tunggal $x(t)$ dalam durasi tertentu.

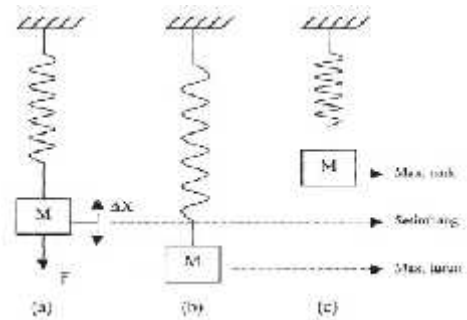
Getaran diartikan sebagai gerak osilatif disekitar posisi tertentu. Untuk getaran sebuah titik akibat operasi mesin, analisa getaran didasarkan pada peristiwa gerak osilatif yang periodik. Gerak periodik adalah suatu gerak gelombang yang berulang dalam selang waktu tertentu. Bentuk paling sederhana dari gerak periodik adalah gerak harmonik. Grafik gerak harmonik-periodik menampilkan perpindahan pada sumbu vertikal dan waktu pada sumbu horizontal.

Seperti yang terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Konsep Dasar Getaran.

Contoh sederhana fenomena getaran dapat dilihat pada sebuah pegas yang salah satu ujungnya dijepit dan ujung lainnya diberi massa M seperti gambar 4. berikut.

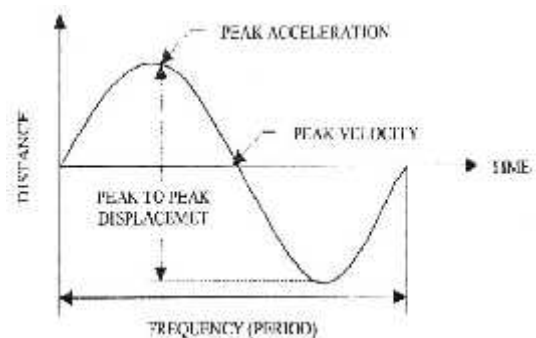


Gambar 4. Getaran pada sistim pegas-Massa sederhana

Mula-mula sistem dalam keadaan setimbang (gambar 4.a). Jika massa diberi gaya F maka massa akan turun sampai batas tertentu (gambar 4.b). Perpindahan maksimum posisi massa bergantung pada besarnya gaya F , massa dan kekuatan tarik pegas melawan gaya F tersebut. Jika gaya sebesar F tidak dikenakan lagi pada massa, maka massa akan ditarik ke atas oleh pegas karena tenaga potensial yang tersimpan dalam pegas (gambar 4.c). Massa akan kembali ke posisi kesetimbangan, selanjutnya bergerak ke atas sampai batas tertentu. Perpindahan maksimum ke atas dipengaruhi oleh kekuatan tarik pegas dan massa benda. Proses tersebut akan berulang sampai tidak ada pengaruh gaya luar pada sistem. Gerakan massa naik turun ini disebut *osilasi mekanis*. Berkaitan dengan getaran mesin (*machinery vibration*) didefinisikan sebagai gerakan bolak-balik dari mesin atau elemen mesin dari posisi setimbang.

1.2 Karakteristik Getaran

Kondisi mesin dan kerusakan mekanis dapat diketahui dengan mempelajari karakteristik getarannya. Pada suatu sistem pegas-massa, karakteristik getaran dapat dipelajari dengan membuat grafik pergerakan beban terhadap waktu, seperti terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Karakteristik Getaran.

Gerak beban dari posisi netralnya ke batas atas kemudian kembali ke posisi netral (kesetimbangan) dan bergerak lagi ke batas bawah kemudian kembali ke posisi kesetimbangan, menunjukkan gerakan satu siklus. Waktu untuk melakukan gerak satu

siklus ini disebut *periode*, sedangkan jumlah siklus yang dihasilkan dalam satu interval waktu tertentu disebut *frekuensi*. Dalam analisis getaran mesin, frekuensi lebih bermanfaat karena berhubungan dengan putaran (rpm) suatu mesin.

1.3 Frekuensi Getaran

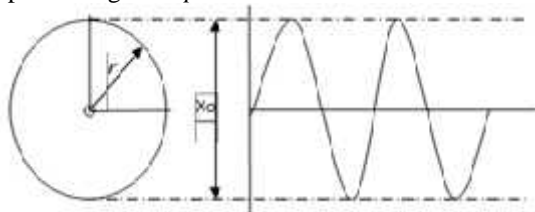
Frekuensi adalah jumlah siklus pada tiap satuan waktu. Besarnya dapat dinyatakan dengan siklus per detik (*cycles per second/cps*) atau siklus per menit (*cycles per minute/cpm*). Frekuensi getaran penting diketahui dalam analisis getaran mesin untuk menunjukkan masalah yang terjadi pada mesin tersebut. Dengan mengetahui frekuensi getaran, akan memungkinkan untuk dapat mengidentifikasi bagian mesin yang salah (*fault*) dan masalah yang terjadi.

Gaya yang menyebabkan getaran dihasilkan dari gerak berputar elemen mesin. Gaya tersebut berubah dalam besar dan arahnya sebagaimana elemen putar berubah posisinya terhadap titik netral. Akibatnya, getaran yang dihasilkan akan mempunyai frekuensi yang bergantung pada putaran elemen yang telah mengalami *trouble*. Oleh karena itu, dengan mengetahui frekuensi getaran akan dapat diidentifikasi bagian dari mesin yang bermasalah.

1.4 Amplitudo (Perpindahan, kecepatan, percepatan)

Perpindahan (*displacement*), kecepatan (*velocity*), dan percepatan (*acceleration*) diukur untuk menentukan besar dan kerasnya suatu getaran. Biasanya diwakili dengan pengukuran amplitudo getaran.

Gambar 1.6. adalah model amplitudo yang memperlihatkan hubungan dari gerakan poros yang berputar dengan *amplitude* r.



Gambar 6. Model Amplitudo

Perpindahan (*displacement*) adalah gerakan suatu titik dari suatu tempat ke tempat lain yang mengacu pada suatu titik tertentu yang tidak bergerak (tetap). Dalam pengukuran getaran mesin, sebagai standar digunakan jarak perpindahan puncak ke puncak (*peak to peak displacement*), seperti terlihat pada gambar 5. Contohnya adalah perpindahan poros karena gerak putarnya. Jika perpindahan poros terlalu besar sampai melebihi batas "*clearance*" bantalan akan mengakibatkan rusaknya bantalan.

Kecepatan (*velocity*) merupakan perubahan jarak per satuan waktu. Kecepatan gerak mesin selalu dinyatakan dalam kecepatan puncak (*peak velocity*). Kecepatan puncak gerakan terjadi pada simpul gelombang. Dalam getaran, kecepatan merupakan parameter penting dan efektif, karena dari data

kecepatan akan dapat diketahui tingkat getaran yang terjadi.

Percepatan (*acceleration*) adalah perubahan kecepatan per satuan waktu. Percepatan berhubungan erat dengan gaya. Gaya yang menyebabkan getaran pada bantalan mesin atau bagian-bagian lain dapat ditentukan dari besarnya getaran.

Hubungan antara perpindahan dan waktu untuk gerak harmonik dapat dinyatakan secara matematik sebagai berikut :

$$X = A_0 \sin \omega t \dots \dots \dots (1)$$

Dimana perpindahan maksimum diekspresikan sebagai A_0 , yang juga disebut sebagai amplitudo, sedang ω adalah frekuensi angular yang umumnya dinyatakan dalam rad/det. Dalam analisa getaran dikenal pula definisi lain untuk frekuensi, yang diberi notasi f dan didefinisikan sebagai jumlah siklus per satuan waktu. Satuan yang umum digunakan untuk f adalah siklus per menit (cpm) atau siklus per detik (cps, Hz). Kecepatan dan percepatan gerak harmonik dapat diperoleh dengan differensiasi. Dengan menggunakan notasi titik untuk turunannya, maka didapat :

Kecepatan (*Velocity*) mm/s

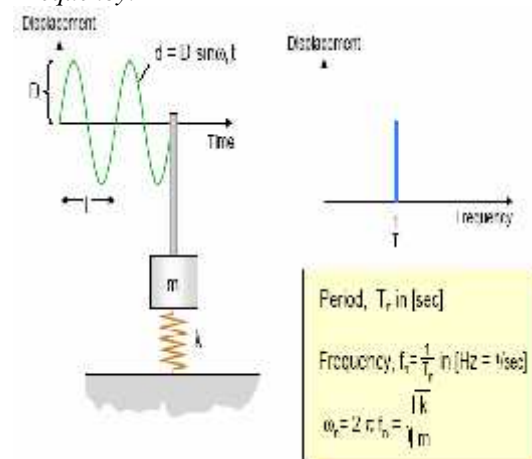
$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} = A_0 \omega \cos \omega t \dots \dots \dots (2)$$

Percepatan (*Acceleration*) mm/s²

$$\ddot{X} = \frac{d^2X}{dt^2} = -\omega^2 A_0 \sin \omega t \dots \dots \dots (3)$$

$$1g = 9,807m/s^2$$

Dengan amplitudo dapat terbaca indikasi beratnya kerusakan pada mesin dan dapat digunakan untuk mengukur beberapa masalah getaran. Bagaimanapun unit yang pasti mengacu pada respon getaran frekuensi. Gambar 7. menunjukkan *Displacement* dan *Frequency*.



Gambar 7. *Displacement* dan *Frequency* Perpindahan (*displacement*) mengindikasikan berapa jauh suatu objek bergetar, kecepatan (*velocity*) mengindikasikan berapa cepat objek bergetar dan percepatan (*acceleration*) suatu objek bergetar terkait dengan gaya penyebab getaran.

1.5 Metode Lintasan Orbit (Pola Lissajous)

Sebagai metode analisa tambahan kadang-kadang diterapkan analisa orbit (pola Lissajous) karena pada umumnya pada instalasi non-contact pickup untuk suatu pengukuran pada daerah bearing yang mendeteksi tingkat vibrasi pada arah axial.

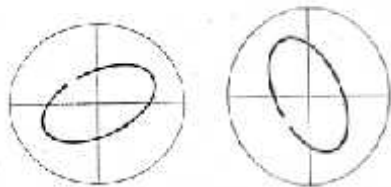
Sehingga rekomendasi pengukuran yang lengkap dengan arah vibrasi axial tidak dapat dilakukan. Untuk non-contact pick up pada umumnya dipasang permanen untuk mendeteksi vibrasi langsung pada shaft mesin-mesin yang penggunaannya cukup kritis, instalasinya berupa probe pada arah radial (horizontal dan vertikal) yang keduanya dipisahkan oleh sudut 90 derajat.

Di sini analisa orbit dapat dilakukan, sebagai tambahan untuk analisa spektrum. Para praktisi telah melakukan penelitian mengenai kegunaan metoda orbit (pola Lissajous) dan berhasil mendapat kesimpulan terhadap bentuk bentuk orbit dalam membantu untuk mengidentifikasi status yang tidak normal termasuk tidak seimbangan (*Unbalance*), tidak sesumbu (*misalignment*), *oil whirl* dan *oil whip*. Bentuk karakteristik pola Lissajous sebagai berikut:

1. Unbalance

Suatu keadaan *unbalance* pada rotary machine ditunjukkan oleh pola Lissajous sebagai vibrasi yang besar pada frekuensi 1 X RPM dengan menganggap bahwa vibrasi pada frekuensi yang lain sangat kecil dan tidak berarti.

Bentuknya dapat sedikit agak lonjong (elips) dan di dalam pola yang terbentuk akan terlihat satu bush spot yang menunjukkan bahwa vibrasi yang besar hanya terjadi pada frekuensi 1 X RPM. Gambar pola Lissajousnya diberikan di bawah ini

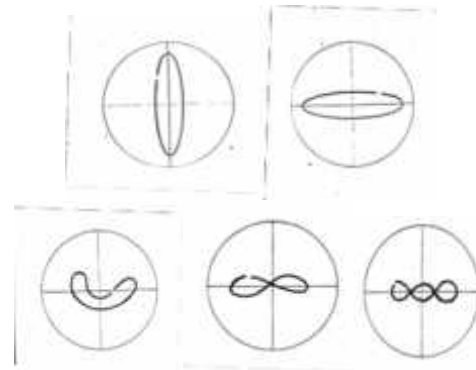


Gambar 8. Pola Lissajous pada rotary machine yang *unbalance*

2. Misalignment

Misalignment yang terjadi pada rotary machine akan menyebabkan vibrasi yang utama pada frekuensi 1 X RPM yaitu sekitar yang diikuti dengan munculnya vibrasi pada 2 X RPM, 3 X RPM, dan harmonik yang lebih tinggi lagi. Di dalam gambar pola Lissajousnya akan memberikan bentuk elips pipih seperti pisang atau bahkan bentuk pisang yang melengkung.

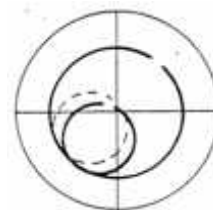
Bentuk elips pipih selain memberikan kemungkinan vibrasi yang disebabkan oleh keadaan misalignment, tetapi juga dapat disebabkan oleh kerusakan bearing atau kemungkinan terjadinya resonansi.



Gambar 9. Pola Lissajous pada rotary machine yang *misalignment*

3. Oil Whirl

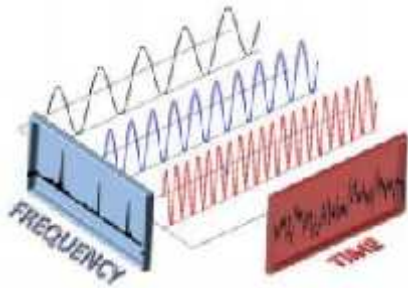
Misalignment akan menyebabkan vibrasi yang utama pada frekuensi di bawah 1 X RPM. Di dalam gambar pola Lissajousnya akan memberikan bentuk dua buah lingkaran atau elips yang ditandai dengan adanya dua buah blank spot. Bahkan karena kejadian *oil whirl* yang di bawah 1 X RPM tidak persis 1/2 X RPM, maka lingkaran atau elips yang lebih kecil akan bergerak dan ditandai dengan bergeraknya blank spot yang ada pada lingkaran atau elips yang kecil.



Gambar 10. Pola Lissajous pada rotary machine yang *oil whirl*.

1.6 Analisa Vibrasi dengan FFT

Analisa fourier terbagi atas dua yakni deret fourier untuk sinyal periodik dan transformasi fourier untuk sinyal aperiodik. Setiap sinyal periodik dapat dinyatakan oleh jumlahan atas komponen-komponen sinyal sinusoidal dengan frekuensi berbeda (*distinct*). Jika ada sebuah fungsi $f(t)$ yang kontinu periodik dengan periode T , bernilai tunggal terbatas dalam suatu interval terbatas, memiliki diskontinuitas yang terbatas jumlahnya dalam interval tersebut dan dapat diintegrasikan secara mutlak, maka $f(t)$ dapat dinyatakan dengan deret fourier. Dengan menggunakan software komputer, komputasi FFT menjadi lebih mudah dan cepat. Contoh sederhana FFT pada matlab sebuah fungsi $f(t)$ dari time domain menjadi frequency domain diperlihatkan pada Gambar



Gambar 11. Hasil FFT dari Data Vibrasi
 FFT merupakan elemen pemrosesan sinyal pada pengukuran vibrasi. Pada pengukuran vibrasi ada empat tahapan untuk merubah sinyal vibrasi menjadi spektrumnya. Algoritma FFT untuk analisa vibrasi tersebut adalah sebagai berikut:

- Pengambilan data vibrasi dari transduser yang dihubungkan dengan sistem akuisisi.
- Sistem akuisisi menghasilkan spektrum yang menunjukkan perbandingan waktu dengan percepatan.
- Hasil spektrum diolah menggunakan software lain dengan menggunakan Fast Fourier Transform.
- Hasil pengolahan menggunakan FFT akan berupa grafik perbandingan frekuensi dengan amplitudo yang menunjukkan jenis kerusakan dan tingkat kerusakan mesin.

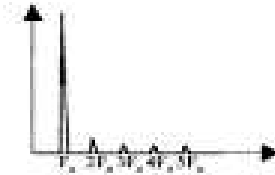
1.7 Diagnosa Kerusakan Mesin Melalui Spektrum Analysis

Setiap bagian dari pompa atau mesin berputar mempunyai tingkat vibrasi yang berbeda tergantung pada letaknya dan gaya yang diterima. Tingkat vibrasi inilah yang bisa dijadikan sebagai pendeteksi keadaan dari suatu kondisi mesin apakah ada kerusakan atau tidak. Kerusakan umum yang biasa terjadi pada pompa dan mesin-mesin berputar adalah ketidakseimbangan atau unbalance, misalignment, kerusakan bearing dan mechanical looseness. Kerusakan-kerusakan tersebut dapat dideteksi dari spektrum vibrasi. Kerusakan – kerusakan yang sering terjadi pada mesin berputar yaitu :

a. Unbalance

Unbalance adalah kondisi dimana pusat massa tidak sesuai dengan sumbu rotasi sehingga rotor mengalami gaya vibrasi terhadap bearing yang menghasilkan gaya sentrifugal. Ada beberapa faktor yang menyebabkan terjadinya unbalance yakni: kesalahan saat proses pemesinan dan assembly, eksentrisitas komponen, adanya kotoran saat pengecoran, korosi dan keausan, distorsi geometri karena beban termal dan beban mekanik serta penumpukan material. Karakteristik dari unbalance ini dapat diketahui dengan adanya amplitudo yang tinggi pada 1 x RPM, seperti yang ditunjukkan gambar. Tetapi adanya amplitudo pada 1x RPM tidak selalu Unbalance, tanda lainnya adalah rasio amplitudo antara pengukuran arah horizontal dan vertikal kecil ($H/V < 3$). Ketika pada kondisi dominan unbalance, maka getaran radial (Horizontal dan Vertikal) akan

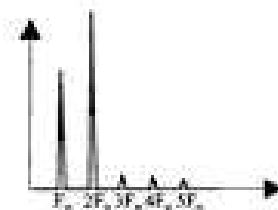
secara normal jauh lebih tinggi dibandingkan axial. Pada pompa normal, getaran horizontal lebih tinggi dari vertical. Amplitudo di 1x RPM secara normal 80% dari amplitudo keseluruhan ketika masalah dipastikan unbalance.



Gambar 12. Pola Spektrum Vibrasi Unbalance
 Sumber: <http://digilib.its.ac.id/public/ITS-paper-20098-Presentation.pdf>

b. Misalignment

Ketidaklurusan (misalignment) terjadi ketika frekuensi shaft yang berputar satu kali putaran atau dapat juga terjadi dua dan tiga kali putaran. Normalnya disebabkan adanya getaran yang tinggi pada axial dan radial, tetapi tidak selalu tinggi pada axial saja, khususnya saat kondisi parallel offset lebih mendominasi dibandingkan Angular misalignment. Menghasilkan getaran lebih besar dari keadaan normal di 2x RPM dimana dapat terjadi bukan hanya di arah axial tapi juga di radial.



Gambar 13. Pola Spektrum Vibrasi Misalignment
 Sumber: <http://digilib.its.ac.id/public/ITS-paper-20098-Presentation.pdf>

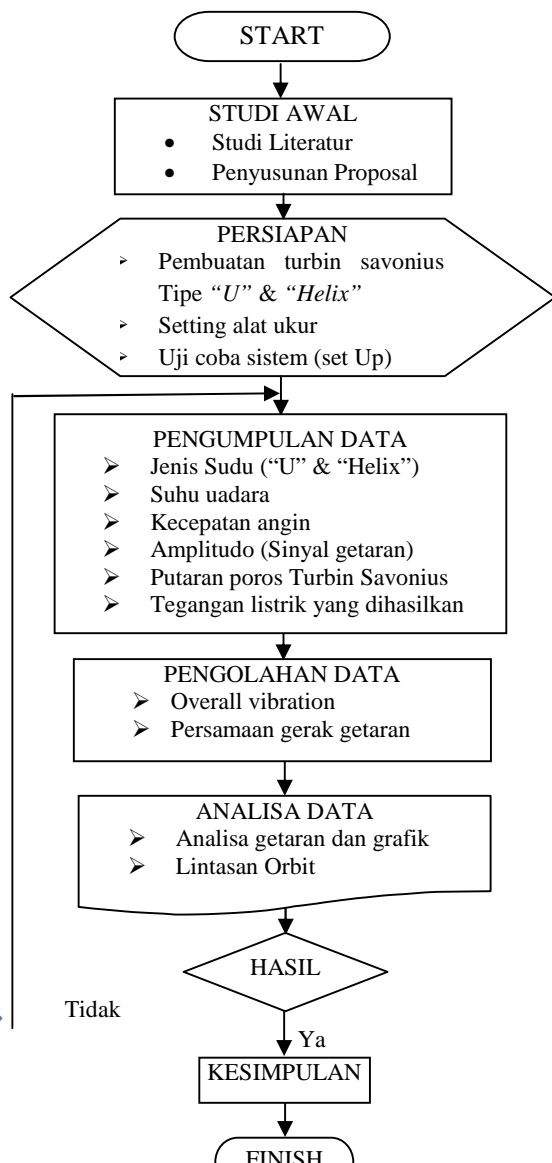
2. Metode

Metode yang dilakukan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental. Kegiatannya meliputi:

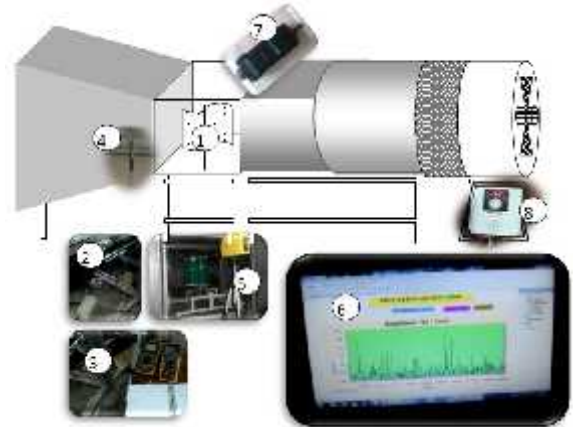
1. Pengambilan data 5 variasi, masing-masing variasi kecepatan angin akan dilakukan pencatatan 5 kali yaitu pada selang waktu 20, 40, 60, 80, 100 detik, hal ini guna memperoleh rata-rata getaran putaran poros (rpm), rata-rata tegangan (V), dan rata-rata arus (A).
2. Pengambilan data dilakukan dengan melakukan 5 variasi putaran *electro motor* pada *wind tunnel* guna memperoleh 5 variasi kecepatan angin pada kedua tipe turbin tersebut, dan penyetalan putaran menggunakan alat *inverter* yang ada pada *wind tunnel*.

3. Mendapatkan *amplitude poros turbine*, maka data yang akan diambil meliputi kecepatan angin, tegangan serta arus listrik, getaran pada poros turbin, dan pengamatan grafik amplitude-vs-time (*Displacemen, Velocity dan Acceleration*) yang terjadi.

Secara garis besar pelaksanaan penelitian seperti terlihat pada diagram alir dibawah ini.



Gambar 14. Prosedur Penelitian
2.1 Metode Pengumpulan Data



Gambar 15. Prosedur Pengambilan Data
 Berikut ini langkah –langkah pengambilan data yang dilakukan :

1. Letakkan turbin angin savonius pada *test suction wind tunnel*.



Gambar 16. Turbin angin savonius pada *test suction wind tunnel*.

2. Pasang kabel pada generator ke lampu LED.



Gambar 17. Pemasangan kabel pada generator ke lampu LED.

3. Pasang kabel multimeter.



Gambar 18. Pemasangan kabel multitester.

4. Setel posisi anemometer.



Gambar 19. Posisi anemometer

5. Setel posisi vibrometer laser pada posisi yang tepat (lampu laser berwarna merah tepat kena ujung poros bagian atas turbin angin, hal ini untuk pengambilan data.



Gambar 20. Posisi vibrometer

6. Pastikan vibrometer terhubung dengan labjack dan laptop, hal ini untuk melihat grafik.



Gambar 21. Memastikan vibrometer berfungsi

7. Atur posisi untuk pengambilan kecepatan putar poros turbin angin dengan menggunakan tachometer.



Gambar 22. Posisi tachometer

8. Jalankan *Windtunnel* melalui *inverter*.
9. Siapkan alat tulis dan kamera *digital*.

10. Setel kecepatan angin sampai turbin angin yang akan di uji mulai bergerak dan berputar, untuk selanjutnya naikan kecepatan dengan bertahap sesuai kebutuhan penelitian, dalam penelitian ini diperlukan 5 variasi kecepatan angin (4 m/s, 4,5 m/s, 5 m/s, 5,5 m/s, dan 6 m/s).



Gambar 23. Chanel penyetelan

11. Catat data kecepatan angin, arus, tegangan listrik, suhu udara, kecepatan poros turbin, tekanan udara dan juga getaran yang terjadi di poros turbin.

12. Lakukan pengulangan pengambilan data sesuai dengan langkah 9, 10, dan 11 untuk type turbin berikutnya sehingga didapat data yang akurat.

3. Hasil dan Pembahasan

Akibat dari variasi kecepatan angin maka mengakibatkan terjadinya variasi pada puncak amplitude pada turbin angin savonius tipe rotor *U* dan *Helix*. Tabel 3.1. memperlihatkan hasil perhitungan yang telah dilakukan dan diperoleh masing-masing

puncak atas serta puncak bawah getaran pada *displacement*, *velocity*, dan pada *Acceleration*.

Tabel 1. Variasi Puncak Amplitudo Tipe Rotor

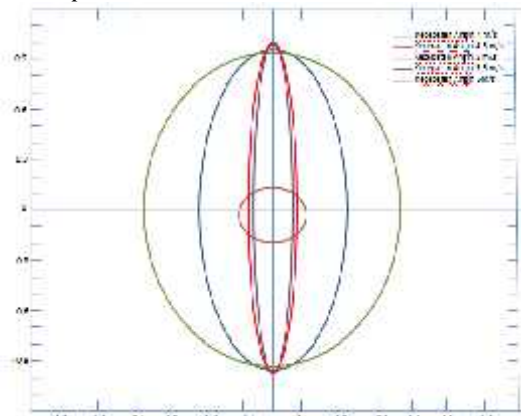
Tabel 2. Variasi Puncak Amplitudo Tipe Rotor Helix					Kecepatan Angin	Puncak	<i>Displacement</i> (mm)	<i>Velocity</i> (mm/s)	<i>Acceleration</i> (mm/s ²)
4 m/s	Batas atas	0.2408	0.5273	1.0978	4 m/s	Batas atas	0,2042	0,4213	0,7741
	Batas bawah	-0.2407	0.1666	-1.0976		Batas bawah	-0,2043	0,3380	-0,7742
4,5 m/s	Batas atas	0.1683	0.5435	0.9921	4,5 m/s	Batas atas	0,1139	0,4231	0,5608
	Batas bawah	-0.1683	0.1791	-0.9924		Batas bawah	-0,1133	0,3272	-0,5580
5 m/s	Batas atas	0.2366	0.5196	2.1206	5 m/s	Batas atas	0,3711	0,4255	2,7485
	Batas bawah	-0.2374	0.1594	-2.1273		Batas bawah	-0,3712	0,3182	-2,7489
5,5 m/s	Batas atas	0.0963	0.5429	1.1349	5,5 m/s	Batas atas	0,0745	0,4171	0,7945
	Batas bawah	-0.0963	0.1654	-1.1349		Batas bawah	-0,0744	0,2433	-0,7938
6 m/s	Batas atas	0.3338	0.5279	4.5304	6 m/s	Batas atas	0,0809	0,4231	1,0116
	Batas bawah	-0.3343	0.1420	-4.5378		Batas bawah	-0,0809	0,3727	-1,0124

Analisa lintasan Orbit pada Turbin Angin Savonius Tipe Rotor U

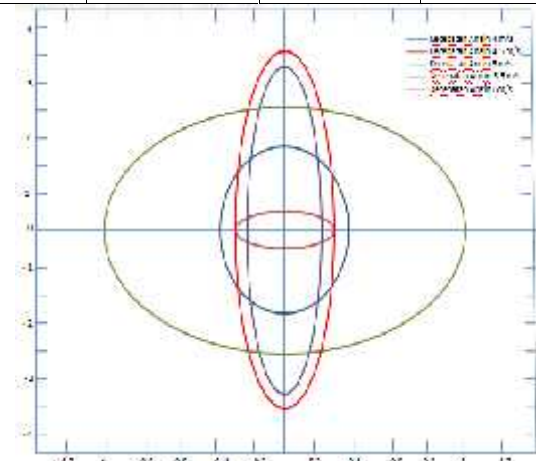
Dengan menggunakan sintaks "ezplot('0.2043*sin(1.9468*t)', '0.9792*cos(1.9468*t)', [0:20:10 0]),".

Berikut adalah bentuk lintasan yang dihasilkan:

1. *Displacement*

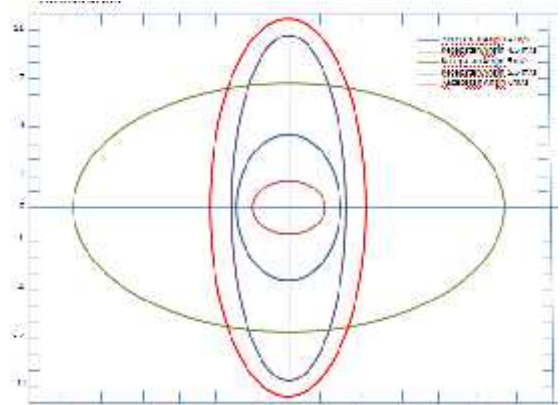


Gambar 24. Lintasan orbit *displacement* getaran pada kelima kecepatan angin



Gambar 25. Lintasan orbit *velocity* getaran pada kelima kecepatan angin

3. *Acceleration*

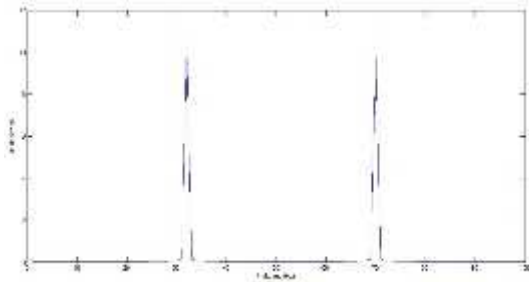


Gambar 26. Lintasan orbit *acceleration* getaran pada kelima kecepatan angin

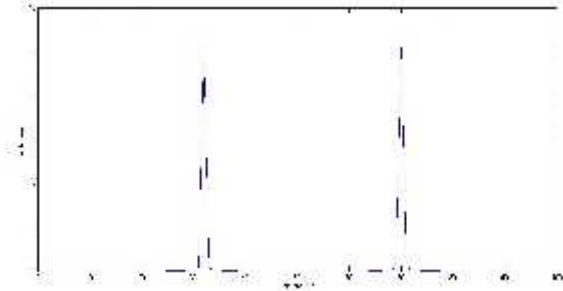
Dari ketiga gambar lintasan orbit diatas didapat turbin angin mengalami keadaan misalignment dikarenakan pola yang dihasilkan pada lintasan orbit berbentuk elips pipih.

Klarifikasi FFT

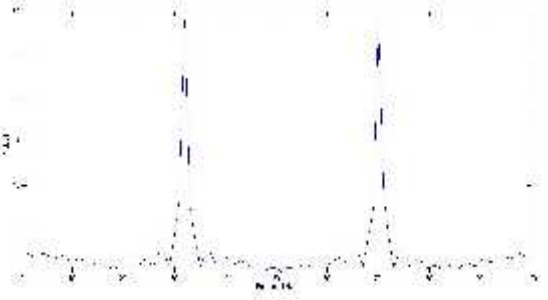
Berikut adalah klarifikasi dari fenomena lintasan orbit yang terjadi dengan FFT yang dilakukan rekan tim pengukuran getaran dari turbin angin.



Gambar 27. FFT displacement pada kecepatan angin 4 m/s



Gambar 28. FFT velocity pada kecepatan angin 4 m/s



Gambar 29. FFT acceleration pada kecepatan angin 4 m/s

Bentuk grafik dari pengolahan domain waktu ke domain frekuensi pada gambar di atas dapat disimpulkan bahwa mengalami keadaan *misalignment* karena terjadi 2xRPM. Dengan demikian bentuk lintasan orbit pada pengukuran getaran lima variasi kecepatan angin menyatakan kejadian *misalignment*.

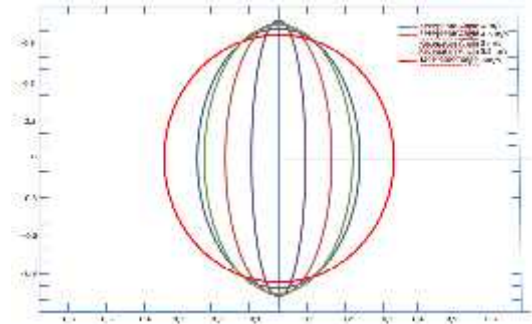
Analisa lintasan Orbit pada Turbin Angin Savonius Tipe Rotor Helix

1. Lintasan orbit *Displacement*

Untuk mendapatkan bentuk lintasan orbit maka ditulis sintaks penulisan sebagai berikut :
`ezplot('0.2408*sin(2.1352*t)', '0.9697*cos(2.1352*t)', [0:20:100]),`

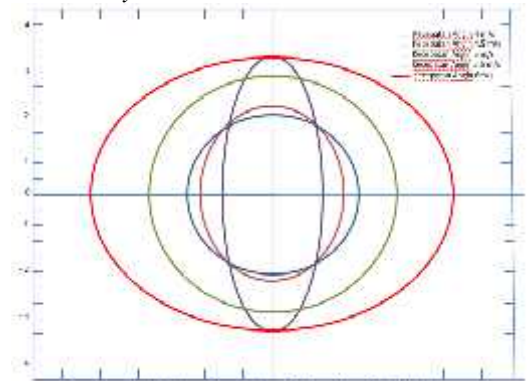
Berikut adalah bentuk lintasan yang dihasilkan:

1. *Displacement*



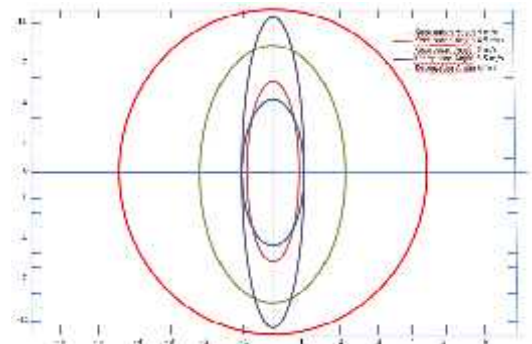
Gambar 30. Lintasan orbit displacement pada kelima kecepatan angin

2. *Velocity*



Gambar 31. Lintasan orbit velocity pada kelima kecepatan angin

3. *Acceleration*

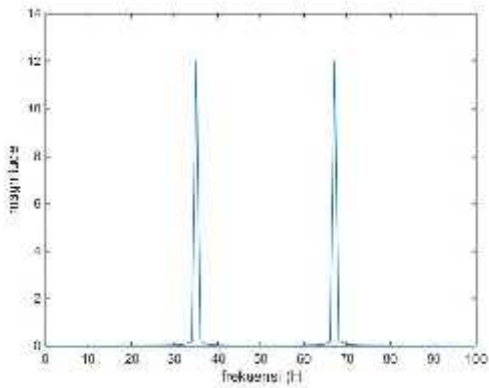


Gambar 32. Lintasan orbit acceleration pada kelima kecepatan angin

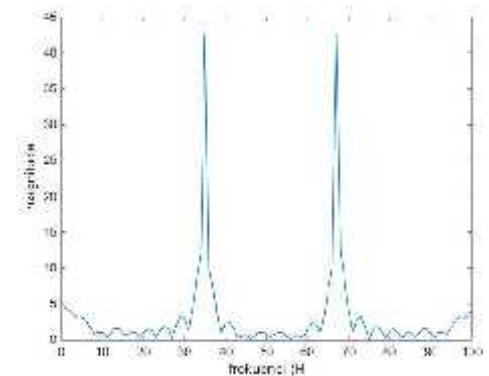
Dari ketiga bentuk lintasan orbit pada gambar mengindikasikan terjadinya *misalignment*, seperti yang di tunjukkan bab 2 gambar 9 dimana gambar tersebut juga menunjukkan terjadinya *misalignment*.

Klarifikasi FFT

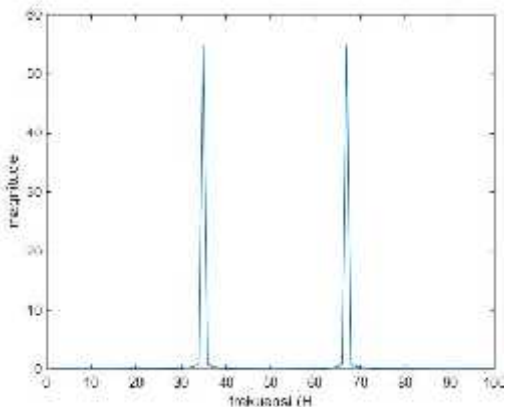
Berikut adalah klarifikasi dari fenomena lintasan orbit yang terjadi dengan FFT yang dilakukan rekan tim pengukuran getaran dari turbin angin.



Gambar 33. FFT *displacement* pada kecepatan angin 4 m/s



Gambar 34. FFT *velocity* pada kecepatan angin 4 m/s



Gambar 35. FFT *acceleration* pada kecepatan angin 4 m/s

Dari bentuk grafik dari pengolahan domain waktu ke domain frekuensi pada gambar dapat disimpulkan bahwa mengalami keadaan *misalignment* karena terjadi dua kali RPM berdasarkan gambar 13. Dengan demikian bentuk lintasan orbit pada pengukuran getaran lima variasi kecepatan angin menyatakan kejadian *misalignment*.

4. Kesimpulan

1. *Displacement* getaran pada 5 (lima) variasi kecepatan angin Tipe-U pada 5 (lima) variasi kecepatan angin, *amplitude displacement relative* stabil dengan puncak atas gelombang getaran terjadi pada kecepatan angin 5 m/s dengan *amplitude* sebesar 0,3711 mm. Untuk *velocity* mempunyai *amplitude* yang cenderung naik dengan puncak atas gelombang getaran terjadi

pada kecepatan angin 5 m/s dengan *amplitude* sebesar 0,4255 mm/s. Dan untuk *acceleration* mempunyai *amplitude* yang sama cenderung naik dengan puncak atas gelombang getaran terjadi pada kecepatan angin 5 m/s dengan *amplitude* sebesar 2,7485 mm/s².

2. *Displacement* getaran Turbin angin Savanius tipe rotor *helix* pada 5 (lima) variasi kecepatan angin, *amplitude displacement* cenderung stabil dengan puncak atas gelombang getaran terjadi pada kecepatan angin 6 m/s dan mempunyai *amplitude* sebesar 0,3338 mm. Untuk *velocity* mempunyai *amplitude relative* stabil dengan puncak atas gelombang getaran terjadi pada kecepatan angin 4,5 m/s dan *amplitude* sebesar 0,5435 mm/s. Untuk *acceleration* mempunyai *amplitude relative* stabil dengan puncak atas gelombang getaran terjadi pada kecepatan angin 6 m/s dan *amplitude* sebesar 4,5304 mm/s².
3. Berdasarkan lintasan orbit dan grafik FFT pada turbin angin savonius tipe rotor U dan Helix didapat pada kecepatan 4, 4,5, 5, 5,5 dan 6 m/s sama –sama mengalami keadaan *misalignment* dikarenakan berbentuk elips pipih dan pola getaran 2x RPM.
4. Lintasan orbit pada turbin angin savonius tipe rotor U *displacement* tertinggi berada pada kecepatan angin 5,5 m/s, lintasan orbit terkecil pada kecepatan angin 4,5 m/s, dan lintasan orbit terlebar pada kecepatan angin 5 m/s. Untuk *velocity* tertinggi berada pada kecepatan angin 6 m/s, lintasan orbit terkecil pada kecepatan angin 4,5 m/s, dan lintasan orbit terlebar pada kecepatan angin 5 m/s. Dan untuk *acceleration* tertinggi berada pada kecepatan angin 6 m/s, lintasan orbit terkecil pada kecepatan angin 4,5 m/s, dan lintasan orbit terlebar pada kecepatan angin 5 m/s.
5. Lintasan orbit pada turbin angin savonius tipe rotor Helix *displacement* tertinggi berada pada kecepatan angin 5,5 m/s, lintasan orbit terkecil pada kecepatan angin 6 m/s, dan lintasan orbit terlebar pada kecepatan angin 6 m/s. Untuk *velocity* tertinggi berada pada kecepatan angin 5,5 m/s, lintasan orbit terkecil pada kecepatan angin 4 m/s, dan lintasan orbit terlebar pada kecepatan angin 6 m/s. Dan untuk *acceleration* tertinggi berada pada kecepatan angin 6 m/s, lintasan orbit terkecil pada kecepatan angin 4 m/s, dan lintasan orbit terlebar pada kecepatan angin 6 m/s.

6. Semakin tinggi kecepatan angin yang mendorong sudu rotor dari turbin maka semakin cepat putaran poros yang terjadi, semakin besar kecepatan sudutnya, dan semakin besar arus dan tegangan yang didapat.

Daftar Pustaka

- Mohamed, M.H. Ahmed. 2010. Dissertation : *Design Optimization of Savonius and Well Turbines*. Germany. Universitas Magderburg
- ITS, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri. Diktat *Fundamentals of Vibration*,
- Fedák, Viliam. *Analysis of Balancing of Unbalanced Rotors and Long Shafts using GUI MATLAB*.
- Aji, Kunto. *Deteksi Kerusakan Bantalan Gelinding Pada Pompa Sentripugal Dengan Analisis Sinyal Getaran*. 2007. Surakarta, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret.
- Scheffer, C. dan Girdhar P. *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*. Netherlands, IDC Technologies. 2004.
- <https://id.scribd.com/doc/149898344/Makalah-Mekanika-Getaran-Hendi-Saputra-docx>
- Dionisius Andy Kristanto, Muhammad Qomaruz Zaman. *Vibrasi dan Jenis Kerusakan Pompa Air*. 2014. Surabaya, Jurusan Teknik Fisika Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember.