

# ANALISIS MODEL TURBIN ANGIN HORIZONTAL DENGAN SUSUNAN *IN-LINE* MENGGUNAKAN METODE *PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY*

Kamaludin Ahmad<sup>1,a\*\*\*\*</sup>, Ismail<sup>2,b\*</sup>, dan Dr. Ramon Trisno<sup>3,c\*</sup>

<sup>1,2,3</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila, Jakarta

**ABSTRAK.** Penelitian turbin angin horizontal yang disusun masih sangat minim dilakukan di Indonesia, sehingga penelitian turbin angin horizontal dengan susunan *in-line* harus dilakukan untuk menghasilkan energi yang maksimal dan memanfaatkan lahan yang ada di Indonesia secara optimal. Metode penelitian yang dilakukan adalah eksperimen pengujian dan *particle image velocimetry* menggunakan turbin angin horizontal tipe sudu NACA 4421 dengan variasi susunan *in-line* (1D – 3D) terhadap variasi kecepatan angin (1 – 5 m/s). Penelitian ini dilakukan menggunakan *wind tunnel* untuk mengetahui karakteristik aliran setelah terjadi tumbukan dengan turbin. Hasil penelitian ini menunjukkan kontur kecepatan aliran dan intensitas turbulensi pada setiap variasi kecepatan memiliki pola yang hampir sama, perbedaan kontur terjadi ketika adanya perbedaan jarak antar turbin pada variasi susunan. Fluktuasi profil kecepatan aliran dan intensitas turbulensi yang terjadi dipengaruhi oleh kecepatan angin yang diterima dan jarak susunan turbin yang digunakan. Karakteristik aliran paling baik dan dapat menghasilkan performa paling optimal turbin angin horizontal dengan susunan *in-line* diperoleh pada variasi kecepatan 5 m/s dengan jarak 3D.

**Kata kunci**—Turbin Angin Horizontal; *In-Line*; Wind tunnel; Particle Image Velocimetry.

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Angin adalah salah satu sumber energi terbarukan yang dikembangkan saat ini. Energi angin termasuk energi terbarukan yang didefinisikan sebagai energi yang secara cepat dapat diproduksi kembali melalui proses alam. Beberapa kelebihan dari energi terbarukan seperti angin adalah sumbernya relatif mudah didapat, dapat diperoleh dengan gratis, minim limbah, tidak mempengaruhi suhu bumi secara global, dan tidak terpengaruh oleh kenaikan harga bahan bakar [1].

Energi angin adalah salah satu jenis sumber energi terbarukan yang potensial sebagai sumber energi komplementer bahan bakar fosil untuk menghasilkan energi listrik melalui proses konversi dengan teknologi turbin angin. Potensi energi angin yang terdapat di Indonesia memiliki *range* sebesar 1 m/s hingga 5 m/s [2], di mana dengan kecepatan angin 1 m/s hingga 5 m/s dapat juga digunakan untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) berskala kecil (10 kW) dan energi angin juga dapat digunakan untuk penelitian atau pengujian aerodinamik pada terowongan angin. Komponen utama pemanfaatan energi angin pada pembangkit listrik ataupun terowongan angin adalah turbin. Jenis-jenis turbin angin dibagi dalam dua kategori, yaitu turbin angin sumbu horizontal (HAWT) dan turbin angin sumbu vertikal (VAWT). Pengaplikasian turbin angin horizontal masih terdapat banyak kendala, salah satunya tempat untuk membuat susunan turbin angin, karena menurut H. Wilson penyusunan secara seri (*single turbine*) masih kurang optimal dalam pemanfaatan lahannya [3].

Penyusunan konfigurasi turbin seharusnya berjauhan dengan turbin, agar turbulensi yang dihasilkan berkurang atau bisa menjadi tidak ada. Ivan Mustakerof menyatakan dalam penelitiannya bahwa susunan turbin angin horizontal mempengaruhi daya dari turbin, semakin jauh jarak susunan semakin baik performansi dari turbin, yang diakibatkan intensitas turbulensi berkurang perlu diketahui bahwa intensitas turbulensi menjadi penyebab olakan (*wake*) yang dapat menurunkan performansi turbin [4].

\*\*\*\* Corresponding author: <sup>a</sup>[kamaludinahmad.ka12@gmail.com](mailto:kamaludinahmad.ka12@gmail.com), <sup>b</sup>[ismail@univpancasila.ac.id](mailto:ismail@univpancasila.ac.id), <sup>c</sup>[ramon\\_t@univpancasila.ac.id](mailto:ramon_t@univpancasila.ac.id)

Penelitian ini akan membahas pengaruh susunan *in-line* turbin angin horizontal terhadap karakteristik aliran udara menggunakan metode *Particle Image Velocimetry* (PIV). Susunan *In-line* turbin yang disusun secara sejajar. Turbin angin yang disusun akan dianalisis menggunakan metode PIV. *Particle Image Velocimetry* (PIV) adalah metode optik untuk mendapatkan informasi vektor kecepatan aliran dengan menggunakan prinsip perpindahan partikel terhadap waktu yang sebelumnya sengaja ditambahkan pada aliran. Aliran yang telah ditambahkan *seeding particle* akan disinari dengan laser untuk mendapatkan efek *freezing*, disaat yang sama kamera menangkap posisi partikel pada aliran tersebut. Menggunakan perhitungan perpindahan partikel terhadap waktu pengambilan antar gambar satu dengan yang lain maka didapatkan informasi kecepatan [5]. Metode ini mulai berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir, namun penelitian yang menggunakan metode PIV masi kurang berkembang dikalangan lembaga penelitian dan universitas di Indonesia dikarenakan mahalnya peralatan lengkap eksperimen PIV.

Kurangnya penelitian tentang aliran fluida menggunakan metode PIV di Indonesia maka penulis akan melakukan penelitian tentang turbin angin horizontal dengan judul “Analisis Model Turbin Angin Horizontal Dengan Susunan *In-line* Menggunakan Metode *Particle Image Velocimetry*” dan diharapkan dapat memahami perbandingan jarak susunan terbaik terhadap performansi turbin angin horizontal serta mengetahui karakteristik aliran udara di dalam terowongan angin.

#### Tujuan

Tujuan penelitian berisi sasaran yang ingin dicapai dalam penelitian yaitu untuk menganalisis karakteristik aliran fluida udara setelah melewati turbin angin horizontal dengan susunan *in-line* menggunakan metode *particle image velocimetry*.

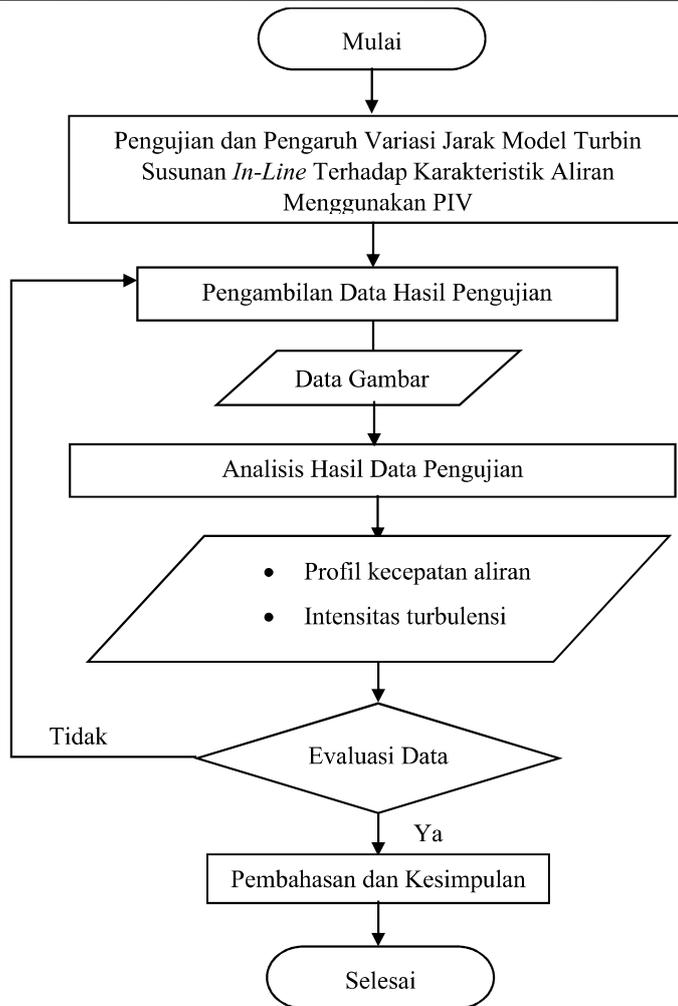
#### Cakupan Penelitian

Cakupan penelitian diperlukan agar penelitian lebih terarah dan menghindari pembahasan menjadi luas. Cakupan dalam penelitian ini adalah:

1. Desain turbin angin yang dianalisis adalah turbin angin horizontal.
2. Kecepatan angin antara 1 - 5 m/s dengan arah sejajar terhadap rotor turbin.
3. Jarak antar turbin yang disusun adalah sebesar 1D, 2D, dan 3D (D = diameter rotor turbin).
4. Sumber fluida adalah angin yang berasal dari fan pada terowongan angin yang diberikan partikel asap dari smoke generator.
5. Analisis dilakukan dalam kondisi operasional menggunakan metode *particle image velocimetry*.
6. Parameter pengujian yang dicari adalah profil kecepatan aliran dan intensitas turbulensi.

#### METODE

Kegiatan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah pengujian dan pengambilan data menggunakan metode *particle image velocimetry*, lalu analisis data. Pengujian dilakukan pada model eksperimen terowongan angin yang sudah dilengkapi sistem PIV untuk mengetahui performansi turbin berdasarkan variabel bebas dan terikat. Variabel bebas yang dimaksud adalah variabel yang tidak dipengaruhi variabel lain yaitu susunan *in-line* turbin dan variasi kecepatan angin berdasarkan potensi kecepatan angin di Indonesia (1 m/s, 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s, dan 5 m/s). Variabel terikat adalah variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas yaitu karakteristik aliran udara seperti profil kecepatan aliran dan intensitas turbulensi. Tahapan-tahapan proses kegiatan yang dilakukan dalam penelitian ini digambarkan melalui diagram alir penelitian pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram alir penelitian

Tahap pertama adalah proses pengujian secara visual pada model turbin angin horizontal pada susunan *in-line* dengan pengaruh variasi jarak turbin terhadap karakteristik aliran pada terowongan angin dengan menggunakan bantuan sistem PIV yang ada di laboratorium universitas pancasila.

Tahap kedua merupakan proses pengambilan data dengan menggunakan bantuan alat ukur *anemometer* dan sistem PIV ketika proses pengujian berlangsung. Data yang didapat selanjutnya akan diolah menggunakan *software* openPIV.

Tahap ketiga merupakan proses analisis data hasil pengujian, untuk mengetahui karakteristik profil kecepatan dan intensitas turbulensi aliran yang terjadi saat pengujian akibat pengaruh variasi kecepatan dan jarak turbin horizontal pada susunan *in-line*.

Tahap keempat adalah tahap evaluasi untuk memastikan data hasil pengujian sesuai dengan apa yang diharapkan atau tidak ada data yang *error* ketika proses pengujian menggunakan PIV. Apabila terdapat data hasil pengujian yang *error* (tidak terbaca oleh *software*) pada sistem PIV, maka kembali ke tahap pengujian dan pengecekan ulang posisi komponen sistem PIV.

Data hasil pengujian yang telah dievaluasi selanjutnya dibahas dan akan didapatkan kesimpulan pada penelitian ini.

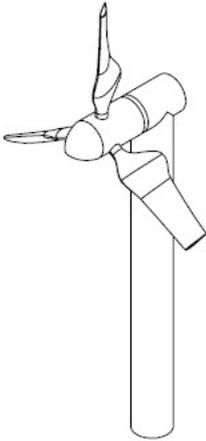
#### Desain dan Variasi Jarak Antar Turbin Horizontal Susunan In-Line

Turbin yang digunakan pada perancangan ini adalah turbin jenis sudu NACA 4421 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 yang dibuat dengan bantuan *software SolidWork*. NACA 4421 merupakan NACA seri 4 Digit

yang termasuk dari macam-macam jenis *airfoil*. Sementara untuk spesifikasi detail mengenai model turbin yang digunakan pada perancangan ini dapat dilihat pada Tabel 1.

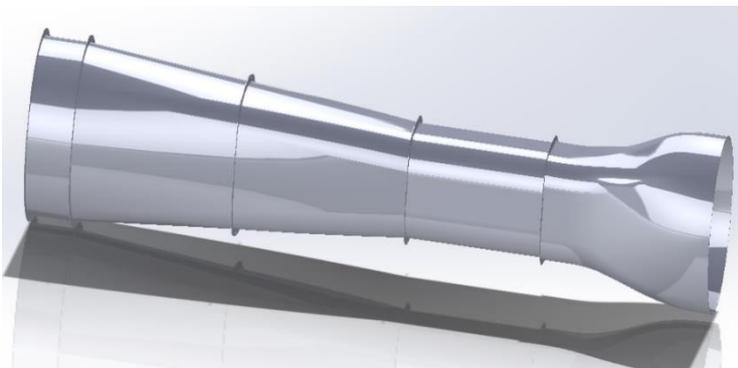
Tabel 1 Spesifikasi turbin horizontal

Diameter rotor	260 mm
Jumlah sudu	3
Tipe sudu	NACA 4421
Tinggi tiang	375 mm
Diameter tiang	35 mm



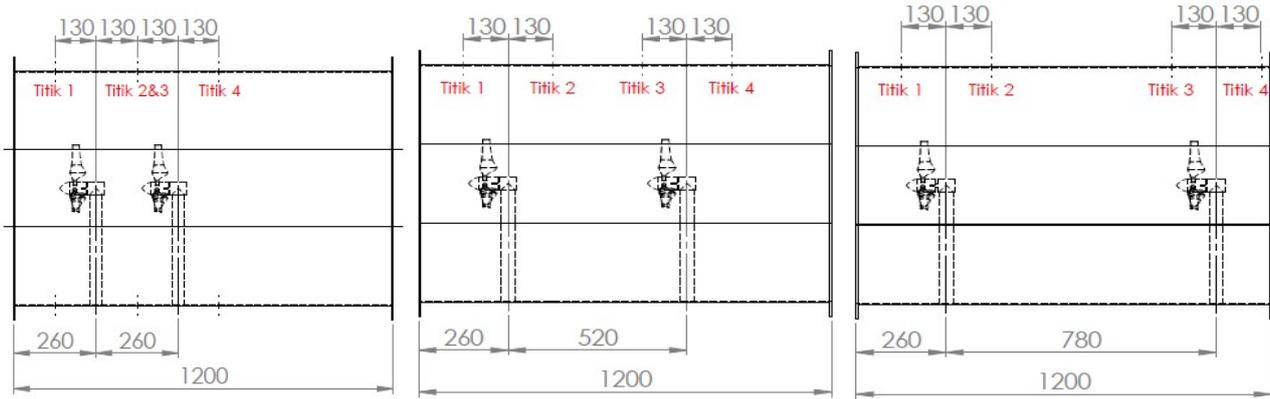
Gambar 2 Turbin horizontal

Pengujian nantinya akan dilakukan di dalam ruang uji terowongan angin yang ada di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Pancasila. Dimensi terowongan angin akan menentukan jarak antar turbin angin. Desain terowongan angin di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Pancasila dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Terowongan angin

Jarak turbin pertama dengan bagian depan *test section* sebesar 260 mm. Jarak turbin dengan dinding terowongan angin adalah 260 mm, jarak *center* turbin angin dengan terowongan angin adalah 375 mm dan jarak antara turbin pertama dengan turbin kedua adalah 1D, 2D, dan 3D (D memiliki arti diameter rotor turbin). Kondisi susunan *in-line* 1D sampai 3D dapat dilihat pada Gambar 4.



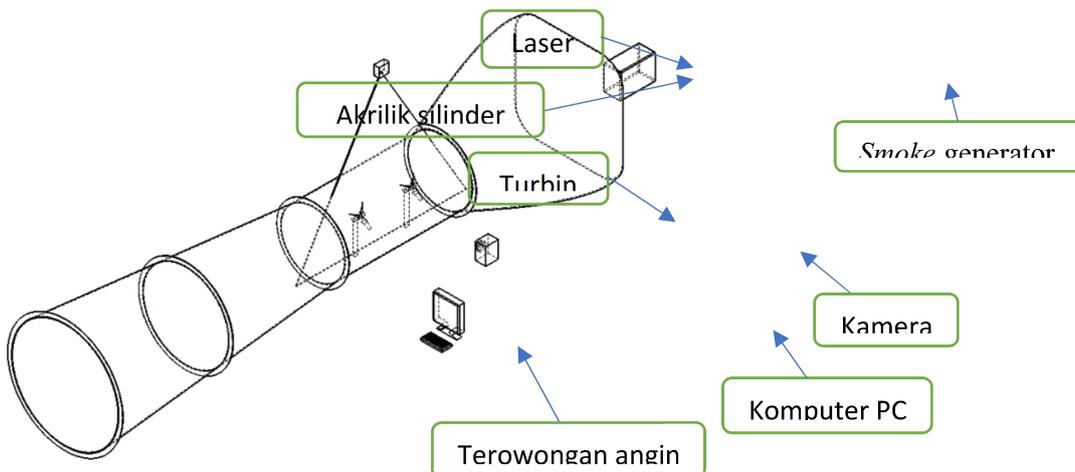
a.

b.

c.

Gambar 4 Pandangan samping susunan *in-line* (a) 1D; (b) 2D; (c) 3D

Setelah penentuan susunan turbin angin horizontal, tahapan selanjutnya pada metode penelitian adalah pengujian dan pengambilan data menggunakan sistem PIV yang sudah terintegrasi dengan terowongan angin sebagai sumber energi angin dengan variasi kecepatan angin 1 m/s sampai 5 m/s. Proses pengujian merupakan suatu proses yang bertujuan untuk memastikan suatu fungsi sistem bekerja dengan baik dan mencari kesalahan yang mungkin terjadi pada sistem. Proses pengujian turbin angin horizontal ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik aliran udara setelah melewati turbin angin horizontal dan membandingkan hasil eksperimen pengukuran actual dengan hasil metode PIV. Skema system PIV untuk pengujian dan pengambilan data dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Skema pengujian menggunakan sistem PIV

Komponen-komponen yang digunakan dalam pengujian dan pengambilan data adalah:

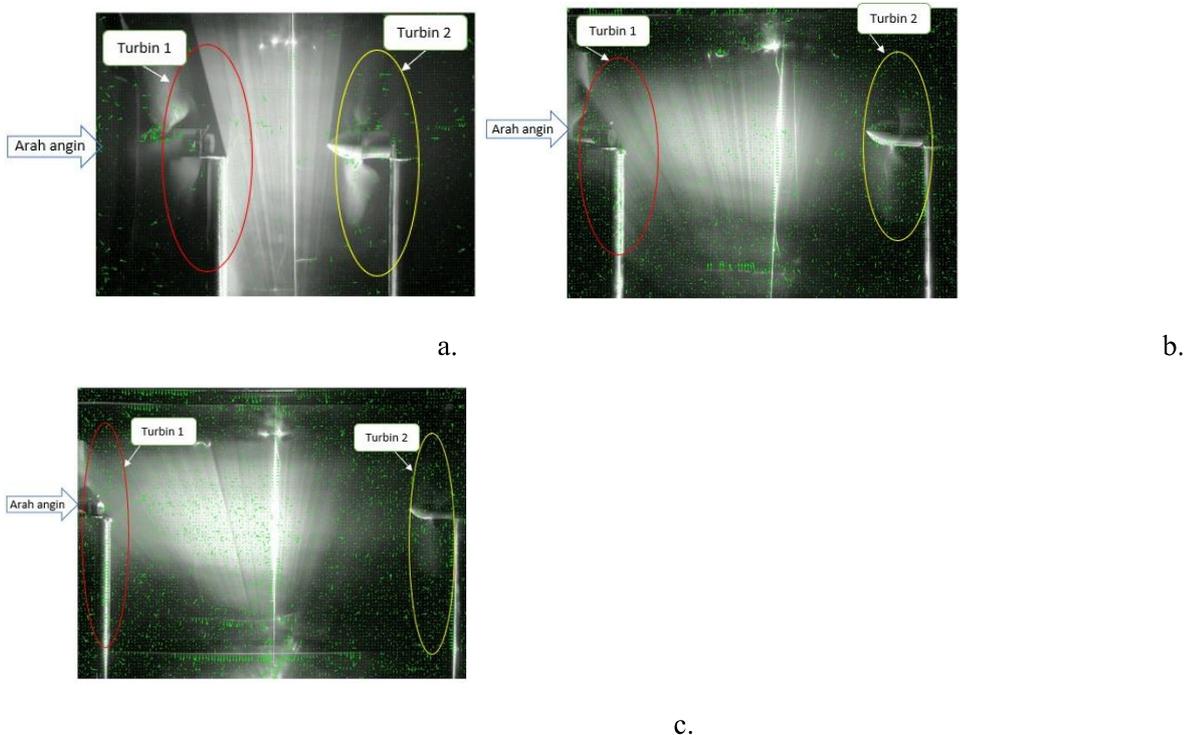
1. Terowongan angin
2. *Axial fan*
3. Turbin angin horizontal
4. Laser
5. Pembias laser
6. *Smoke generator*
7. *Seeder/Tracer particle*
8. Kamera kecepatan tinggi
9. Komputer
10. *Thermo-anemometer*

## HASIL

Hasil pengujian didapatkan data berupa kecepatan angin didepan turbin dan kecepatan angin setelah melewati turbin horizontal, serta data video dan gambar aliran udara berpartikel yang melewati turbin angin yang nantinya akan divisualisasikan menggunakan *particle image velocimetry* dengan *software* MATLAB yang didalamnya terdapat *software* khusus berbentuk *script* yaitu *OpenPIV* dan *OpenPIV Spatial and Temporal Analysis Toolbox*. Data yang dibahas adalah karakteristik alirannya yang meliputi profil kecepatan aliran, intensitas turbulensi yang terjadi setelah melewati turbin angin horizontal susunan *in-line* dengan variasi jarak 1D, 2D, 3D dan kecepatan 1m/s – 5m/s menggunakan metode PIV.

Data gambar yang didapatkan saat pengujian secara eksperimen menggunakan metode *particle image velocimetry* akan diolah menjadi data vektor menggunakan *script* *OpenPIV* yang nantinya akan diolah lagi menjadi data kontur menggunakan *script* *OpenPIV Spatial and Temporal Analysis Toolbox* sehingga dapat

menampilkan besaran profil kecepatan dan intensitas turbulensi yang terdapat pada sisi daerah aliran di antara 2 turbin. Nilai profil kecepatan aliran nantinya ditampilkan dalam bentuk grafik  $x/h$  terhadap  $u/U_0$ , sedangkan nilai intensitas turbulensi nantinya ditampilkan dalam bentuk grafik  $x/h$  terhadap  $u_{rms}/U_0$ .  $x/h$  adalah perbandingan antara panjang *grid* gambar dengan tinggi turbin.

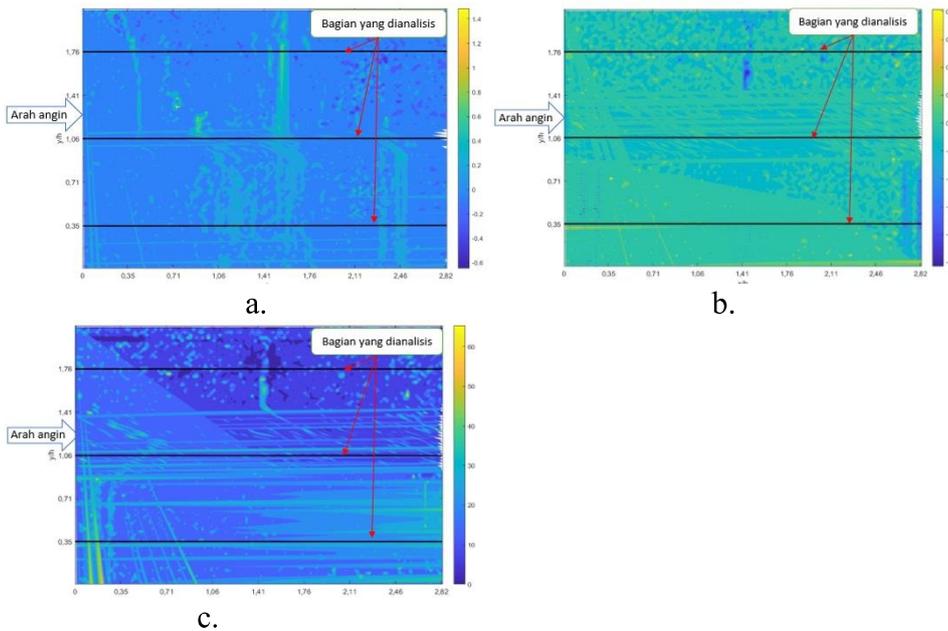


Gambar 6 Vektor aliran angin susunan *in-line* (a) 1D; (b) 2D; (c) 3D menggunakan PIV

Gambar 6 memperlihatkan vektor arah aliran angin *in-line* 1D, 2D dan 3D pada daerah aliran di antara 2 turbin dengan kecepatan 3 m/s sampai 5 m/s. Vektor arah aliran masing-masing variasi kecepatan memiliki pola yang sama pada setiap variasi jarak antar turbin, di mana arah aliran yang digambarkan dalam bentuk panah bergerak ke segala arah yang dapat mempengaruhi fluktuasi kecepatan angin dan putaran turbin yang terjadi.

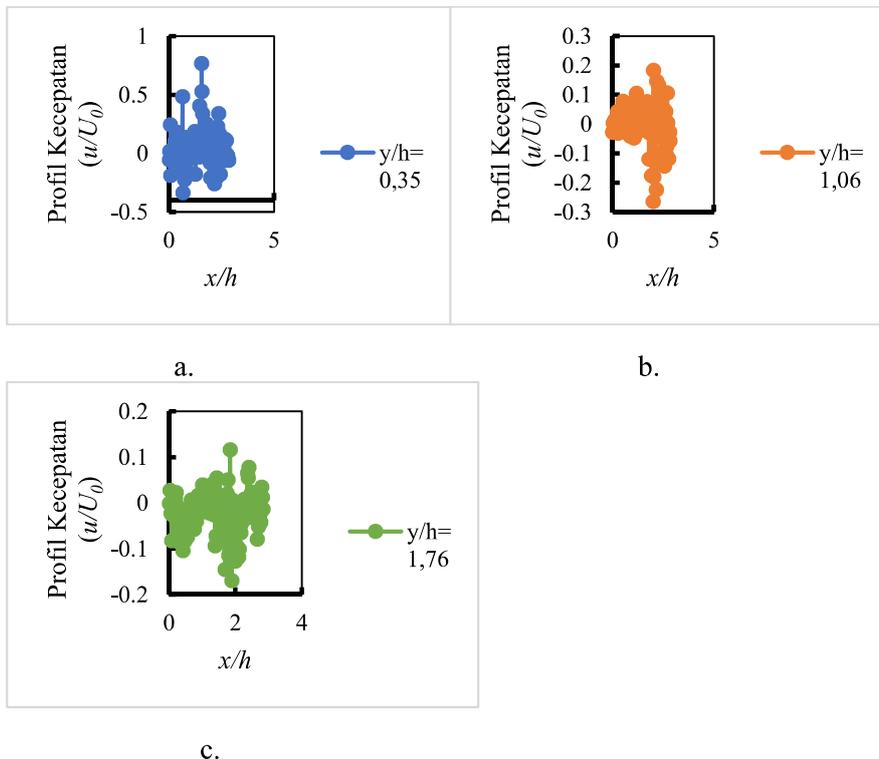
### Profil Kecepatan Aliran

Data vektor yang didapatkan akan diolah menjadi data kontur kecepatan aliran seperti pada Gambar 7 yang memperlihatkan kontur profil kecepatan angin *in-line* 1D, 2D dan 3D pada daerah aliran di antara 2 turbin dengan kecepatan 3 m/s hingga 5 m/s.



Gambar 7 Kontur profil kecepatan angin susunan *in-line* (a) 1D; (b) 2D; (c) 3D menggunakan PIV

Kontur profil kecepatan angin susunan *in-line* pada masing – masing variasi kecepatan dan jarak memiliki pola kontur yang hampir sama, perbedaan terletak pada nilai profil kecepatan aliran yang diperoleh sepanjang garis  $x/h$  pada posisi  $y/h = 0,35$ ;  $y/h = 1,06$ ;  $y/h = 1,76$  yang digambarkan dengan garis hitam. Berikut ini adalah contoh grafik profil kecepatan angin pada daerah aliran diantara 2 turbin dengan susunan *in-line* 1D, 2D dan 3D yang dapat dilihat pada Gambar 8.

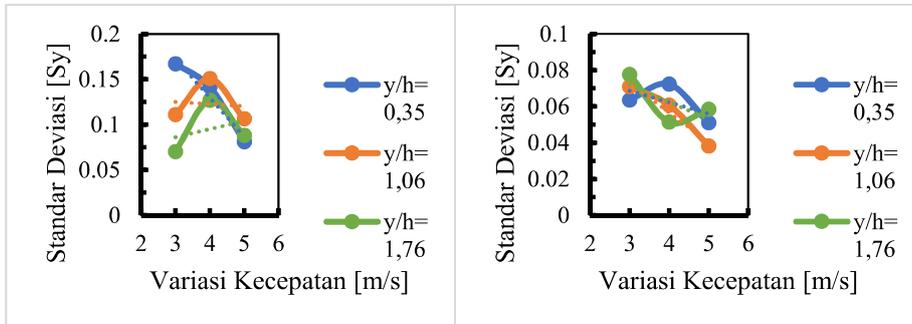


Gambar 8 Grafik profil kecepatan angin susunan *in-line* (a)  $y/h = 0,35$ ; (b)  $y/h = 1,06$ ; (c)  $y/h = 1,76$  menggunakan PIV

Gambar 8 menunjukkan bahwa pada setiap bagian  $y/h$  memiliki nilai negatif, hal ini menandakan bahwa adanya aliran balik (berlawanan dengan arah aliran) yang terjadi pada daerah aliran. Grafik diatas juga menunjukkan terjadinya fluktuasi kecepatan aliran, besaran dari fluktuasi aliran tersebut dapat dinyatakan

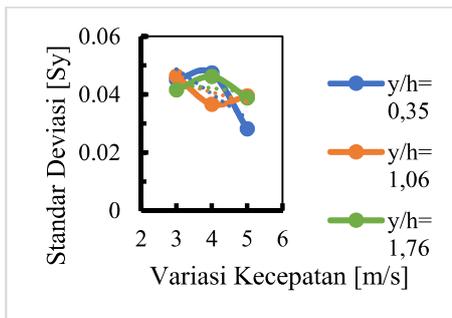
dalam bentuk nilai standar deviasi. Standar deviasi adalah nilai statistik yang dimanfaatkan untuk menentukan sebuah sebaran data dalam suatu sampel, serta seberapa dekat titik data individu ke *mean* atau rata-rata nilai sampelnya. Standar deviasi dapat dicari menggunakan *software Microsoft Excel* dengan persamaan (1) dibawah ini.

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{(n - 1)}} \quad (1)$$



a.

b.



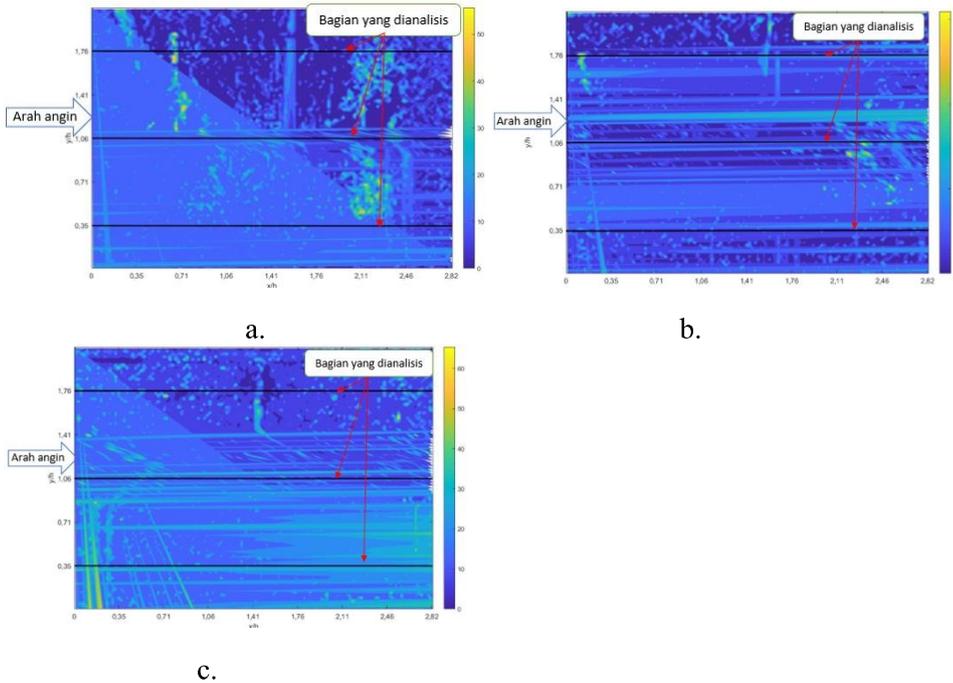
c.

Gambar 9 Grafik perbandingan kecepatan angin terhadap nilai standar deviasi profil kecepatan angin susunan *in-line* (a) 1D; (b) 2D; (c) 3D menggunakan PIV

Gambar 9 menunjukkan nilai standar deviasi pada setiap posisi *y/h* selalu berubah-ubah terhadap peningkatan variasi kecepatan, hal ini dikarenakan olakan (*wake*) yang berasal dari putaran turbin 1 yang memiliki nilai intensitas turbulensi yang tinggi. Nilai standar deviasi cenderung memiliki tren menurun seiring meningkatnya kecepatan angin, meskipun ada kenaikan pada variasi kecepatan tertentu sehingga semakin menurun nilai standar deviasi profil kecepatan, maka kecepatan aliran yang mengenai turbin 2 lebih stabil dan putaran turbin 2 akan lebih stabil juga. Hal ini dapat dibuktikan dengan membandingkan pada penelitian Dimas Wildan Wibowo pada tahun 2019 [6], dimana peneliti melakukan pengukuran turbin yang membuktikan bahwa meningkatnya variasi kecepatan angin dapat meningkatkan putaran turbin.

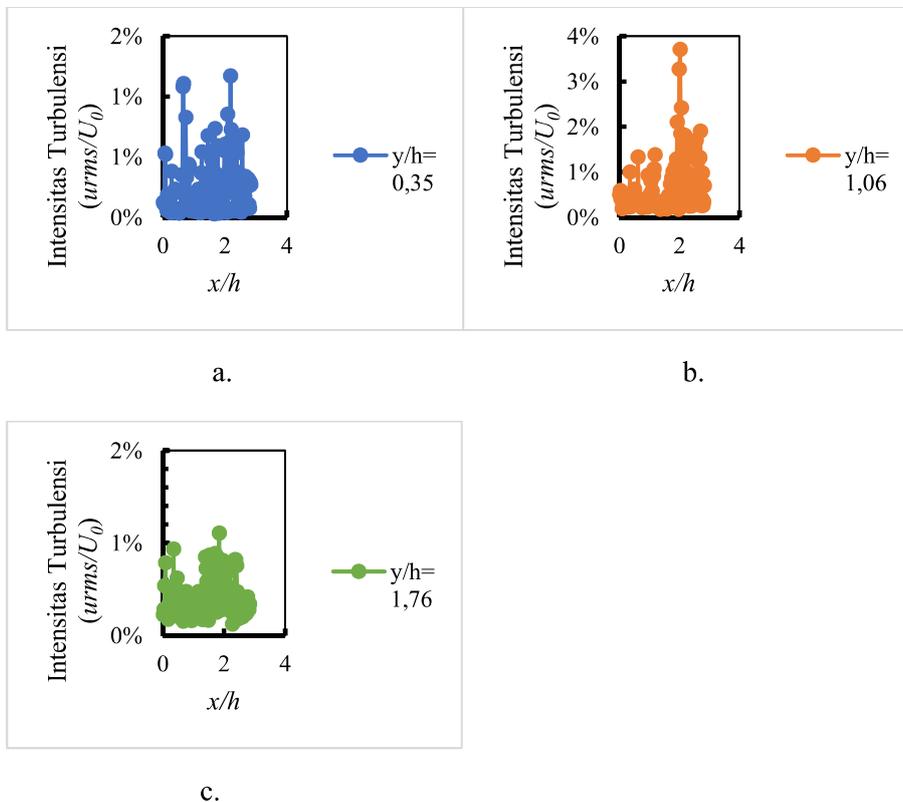
#### Intensitas Turbulensi

Data vektor yang didapatkan diolah menjadi data kontur intensitas turbulensi seperti pada Gambar 10 yang memperlihatkan kontur intensitas turbulensi *in-line* 1D, 2D dan 3D pada daerah aliran di antara 2 turbin dengan kecepatan 2 m/s hingga 5 m/s.

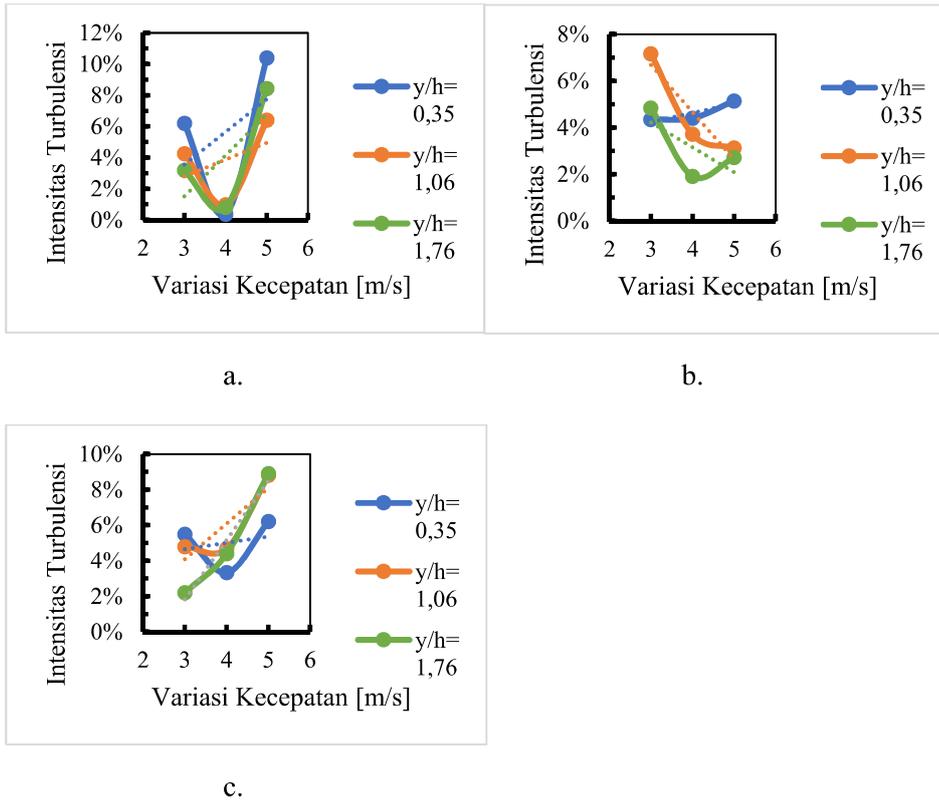


Gambar 10 Kontur intensitas turbulensi susunan *in-line* (a) 1D; (b) 2D; (c) 3D menggunakan PIV

Kontur intensitas turbulensi susunan *in-line* pada masing – masing variasi kecepatan dan jarak memiliki pola kontur yang hampir sama, perbedaan terletak pada nilai profil kecepatan aliran yang diperoleh sepanjang garis  $x/h$  pada posisi  $y/h = 0,35$ ;  $y/h = 1,06$ ;  $y/h = 1,76$  yang digambarkan dengan garis hitam. Berikut ini adalah contoh grafik profil kecepatan angin pada daerah aliran diantara 2 turbin dengan susunan *in-line* 1D, 2D dan 3D yang dapat dilihat pada Gambar 11.



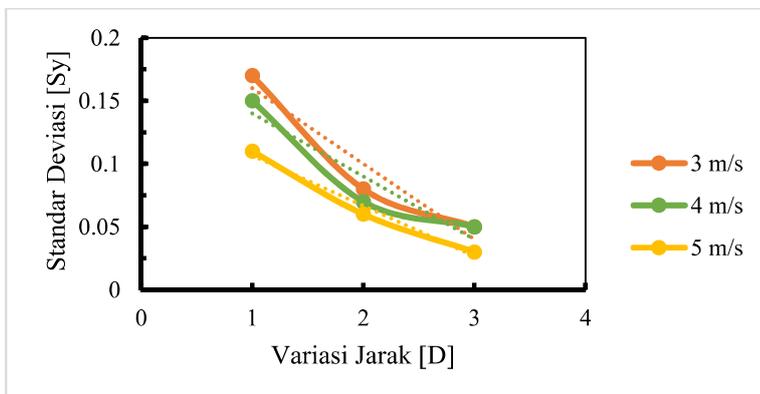
Gambar 11 Grafik intensitas turbulensi susunan *in-line* (a)  $y/h = 0,35$ ; (b)  $y/h = 1,06$ ; (c)  $y/h = 1,76$  menggunakan PIV



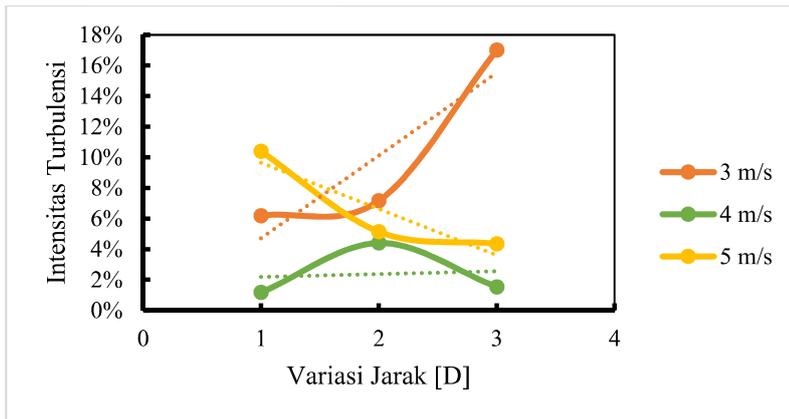
Gambar 12 Grafik perbandingan kecepatan angin terhadap intensitas turbulensi tertinggi susunan *in-line* (a) 1D; (b) 2D; (c) 3D menggunakan PIV

Gambar 12 menunjukkan kondisi intensitas turbulensi pada sumbu y/h dengan tren yang selalu berubah-ubah terhadap peningkatan variasi kecepatan dan jarak susunan antar turbin, hal ini dikarenakan olakan (*wake*) yang berasal dari putaran turbin 1.

Analisis lebih lanjut dilakukan untuk menentukan jarak antar turbin paling baik agar mendapatkan performa turbin yang optimal, dengan mengambil data standar deviasi profil kecepatan dan intensitas turbulensi tertinggi di antara posisi titik y/h= 0,35; y/h= 1,06; dan y/h= 1,76 pada setiap variasi kecepatan 3 m/s, 4 m/s dan 5 m/s yang nantinya dibandingkan dengan setiap jarak susunan turbin yaitu 1D, 2D, dan 3D dapat dilihat pada Gambar 13 dan Gambar 14.



Gambar 13 Grafik perbandingan variasi jarak susunan turbin terhadap standar deviasi profil kecepatan angin pada setiap variasi kecepatan menggunakan PIV



Gambar 14 Grafik perbandingan variasi jarak susunan turbin terhadap intensitas turbulensi pada setiap variasi kecepatan menggunakan PIV

Gambar 13 menunjukkan bahwa nilai standar deviasi profil kecepatan pada setiap variasi kecepatan selalu berubah-ubah terhadap peningkatan jarak susunan antar turbin, hal ini dikarenakan olakan (*wake*) yang berasal dari putaran turbin 1 yang memiliki intensitas turbulensi yang tinggi. Nilai standar deviasi profil kecepatan cenderung memiliki tren menurun seiring dengan meningkatnya variasi kecepatan dan jarak susunan turbin, sehingga semakin rendah nilai standar deviasi profil kecepatan, maka fluktuasi kecepatan aliran yang terjadi juga semakin rendah dan stabil. Aliran yang stabil akan berdampak pada kinerja turbin yang lebih optimal dan berputar lebih cepat. Hasil ini pun diperkuat dengan penelitian Dimas Wildan Wibowo pada tahun 2019 [6], dimana peneliti melakukan pengukuran putaran turbin dan membuktikan bahwa meningkatnya jarak susunan antar turbin dapat meningkatkan putaran turbin.

Gambar 14 menunjukkan bahwa posisi intensitas turbulensi tertinggi pada setiap variasi kecepatan selalu berubah-ubah terhadap peningkatan jarak susunan turbin, hal ini dikarenakan olakan (*wake*) yang berasal dari putaran turbin 1. Intensitas turbulensi pada setiap variasi kecepatan cenderung memiliki tren meningkat seiring dengan meningkatnya jarak susunan turbin, meskipun pada variasi kecepatan tertentu intensitas turbulensi mengalami penurunan karena jarak susunan turbin.

Hasil keseluruhan dari penelitian ini menunjukkan bahwa meningkatnya variasi kecepatan angin dan variasi jarak susunan turbin dapat mempengaruhi profil kecepatan aliran dan intensitas turbulensi yang menjadi fluktuatif. Berdasarkan grafik perbandingan diatas dapat dilihat bahwa aliran paling stabil dan menghasilkan performa turbin yang paling optimal terjadi pada susunan jarak 3D kecepatan 5 m/s.

## KESIMPULAN

1. Hasil pengujian dengan metode *particle image velocimetry* memperlihatkan profil kecepatan angin dan intensitas turbulensi setelah melewati turbin pada setiap variasi kecepatan memiliki kontur yang hampir sama, perbedaan bentuk kontur terjadi pada saat variasi jarak susunan antar turbin yang disebabkan karena menurunkan fluktuasi nilai profil kecepatan aliran dan meningkatkan intensitas turbulensi yang terjadi.
2. Hasil keseluruhan dari penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan variasi kecepatan dan variasi jarak susunan pada model turbin angin horizontal 3 (tiga) sudu yang memiliki spesifikasi diameter 260mm; tinggi 375mm; jenis sudu NACA 4421 dapat mempengaruhi perubahan profil kecepatan aliran, intensitas turbulensi, dan putaran turbin yang terjadi. Performa turbin paling optimal dengan profil kecepatan paling baik terjadi pada susunan turbin *in-line* jarak susunan 3D dengan kecepatan angin 5 m/s.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. A. Frisco, "Uji Eksperimental Model Turbin Angin Darrieus Tipe H 2 Tingkat Dengan Kombinasi 3 Bilah Naca 0018 Dan 2 Bilah Savonius Per Tingkat," J. Tek. Mesin, vol. 1, no. 01, pp. 126–131, 2015.
- [2] Razivky, "Perancangan Pembuatan Dan Pengujian Model Turbin Angin Sumbu Horizontal 3 Sudu," Universitas Pancasila, 2017.

- [3] D. Wilson, S. Cussat-Blanc, K. Veeramachaneni, U.-M. O'Reilly, and H. Luga, "A continuous developmental model for wind farm layout optimization," pp. 745–752, 2014.
- [4] A. A. Azmi, "Simulasi Numerik Wake Effect Terhadap Performa Turbin Angin Pada Ladang Angin Susunan Non-Staggered Far Wake Dan Near Wake," Dep. Tek. Mesin Dan Ind. Fak. Tek. Univ. Gadjah Mada Yogyakarta, 2017.
- [5] N. Setiadji, "Studi PIV Pengaruh Kontrol Aktif Synthetic Jet pada model bluff body," 2012.
- [6] W. W. Dimas, "Eksperimental Model Turbin Angin Horizontal Dengan Susunan In-Line" 2019.