

STUDI NUMERIK POLA ALIRAN ANGIN PADA PENGHALANG BERBENTUK BUKIT MENGUNAKAN PENDEKATAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

Dayang Samsul Hidayah^{b,*}, Yoga Satria Putra^a, Yudha Arman^b

^aProdi Geofisika, FMIPA Universitas Tanjungpura

^bProdi Fisika, FMIPA Universitas Tanjungpura

*Email : dayang_samsulhidayah@student.untan.ac.id

(Diterima 7 September 2022; Disetujui 19 Oktober 2022; Dipublikasikan 31 Oktober 2022)

Abstrak

Penelitian ini dilakukan untuk mendukung kajian optimalisasi pengembangan energi terbarukan khususnya tenaga bayu. Simulasi pada penelitian ini dibangun menggunakan perangkat lunak OpenFOAM dengan model turbulen *RANS K-Omega* dan menggunakan metode *finite volume*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mensimulasikan serta menganalisa profil kecepatan angin dan pola *streamlines* pada penghalang berbentuk bukit. Penelitian ini menggunakan 3 tahapan yaitu tahap validasi, analisis profil kecepatan angin, dan analisis *streamlines*. Simulasi profil kecepatan angin pada penghalang berbentuk bukit dilakukan menggunakan 5 variasi kemiringan sudut bukit yaitu sudut 15° , 30° , 45° , 60° , dan 75° . Berdasarkan analisis profil kecepatan angin, sudut 45° , 60° , dan 75° posisi (x) sebesar 50 m dengan ketinggian sekitar 5,55 m hingga 8,7 m telah menunjukkan kecepatan angin tertinggi. Analisis *streamlines* yang telah dilakukan, memperlihatkan bahwa penghalang dengan sudut landai (15° dan 30°) dapat membangkitkan pola aliran angin laminar, sedangkan penghalang dengan sudut curam (45° , 60° , dan 75°) dapat menghasilkan pola aliran angin turbulen yang ditandai dengan adanya pusaran angin.

Kata Kunci : OpenFOAM, profil kecepatan, *RANS K-Omega*, *Streamlines*.

1. Latar Belakang

Aplikasi ilmu mekanika fluida memiliki peran penting dalam bidang energi, salah satunya pada bidang energi terbarukan. Energi terbarukan contohnya pada energi angin. Energi angin merupakan salah satu energi alternatif ramah lingkungan yang dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik untuk memenuhi kebutuhan energi misalnya turbin angin. Kajian energi angin dapat menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamic* (CFD). CFD adalah ilmu komputasi yang menggunakan komputer untuk melakukan simulasi aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia, dan fenomena aliran lainnya dengan memecahkan persamaan Navier-Stokes secara numerik. Simulasi menggunakan CFD harus dapat menjelaskan fenomena aliran fluida yang bergerak [1]. Kelebihan CFD salah satunya adalah mampu membuat sebuah *prototipe* yang dapat dianalisa, dievaluasi, serta dioptimasi. *Prototipe* yang dimaksud dapat berupa suatu sistem contohnya blok mesin, pesawat terbang, terowongan angin, sistem perpipaan, dan lain sebagainya [2].

Kajian tentang energi angin dengan simulasi CFD telah dilakukan oleh beberapa peneliti yaitu Azmi dkk (2017), Mujiburrahman dan Heri Irwan (2018), Maulana (2019). Kemudian, Eksperimen aliran angin dengan penghalang berbentuk bukit menggunakan pendekatan CFD telah dilakukan

oleh Mouzaki dan Bergeles (1991), melakukan simulasi menggunakan persamaan Reynolds-Navier Stokes. Coelho dan Pereira (1992), melakukan simulasi pemisahan aliran menggunakan model turbulensi *k-omega* standar dan bilangan Reynolds rendah. Kim dkk (1997), melakukan simulasi menggunakan algoritma SIMPLEC dengan sistem grid non-ortogonal yang dipasang pada tubuh. Amahjour dan Khamlichi (2017), melakukan simulasi persamaan Navier-Stokes dengan perangkat lunak *COMSOL Multiphysics*.

Penelitian ini mengkaji tentang pola aliran angin melalui penghalang berbentuk bukit menggunakan metode pendekatan CFD dengan model turbulensi *k-Omega* yang tersedia dalam perangkat lunak OpenFOAM. Hasil simulasi yang diperoleh akan digunakan untuk menganalisis profil kecepatan angin pada berbagai lokasi yang dianggap sebagai tempat potensial untuk implementasi turbin angin.

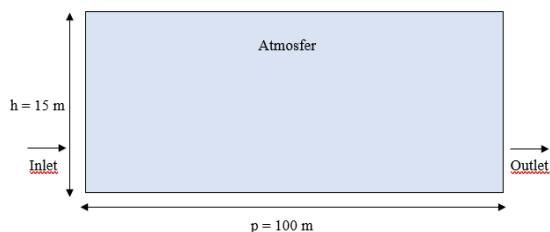
2. Metodologi

2.1 Membangun Domain Komputasi

Ada dua model domain yang dilakukan pada penelitian ini yaitu model domain untuk tahap validasi dan model domain untuk tahap analisis profil kecepatan angin. Membangun model domain ini terdapat pada bagian perangkat lunak

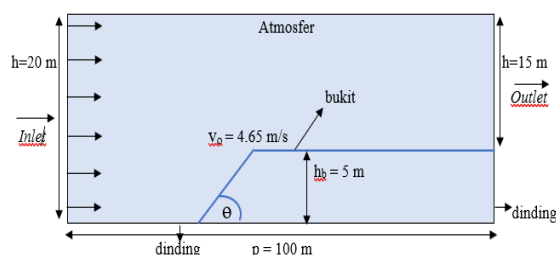
OpenFOAM di dalam folder *system* bagian file *blockMeshDict*.

Model domain komputasi untuk simulasi tahap validasi yang digunakan adalah sebuah bentuk persegi panjang. Ukuran yang digunakan pada simulasi tahap validasi ini yaitu dengan panjang (*p*) sebesar 100 m dan tinggi (*h*) sebesar 15 m. Bagian *inlet* adalah arah datangnya angin dan outlet arah keluarnya angin, sedangkan *atmosfer* adalah udara.



Gambar 1. Domain komputasi untuk tahap validasi

Domain komputasi untuk mensimulasikan pola aliran angin pada penghalang berbentuk bukit ini dibangun membentuk persegi panjang dengan di dalamnya terdapat penghalang berbentuk bukit dengan ukuran panjang (*p*) sebesar 100 m dan tinggi (*h*) sebesar 20 m, ketinggian bukit (*h_b*) sebesar 5 m. Pada bukit memiliki kemiringan sudut yang akan divariasikan sebesar 15°, 30°, 45°, 60°, dan 75°.



Gambar 2. Domain komputasi aliran angin pada geometri berbentuk bukit.

2.2 Tahap Validasi Domain

Validasi simulasi yang dilakukan adalah dengan menguji ukuran *simple grading*. Uji *simple grading* ini dibagi menjadi dua tipe yaitu reguler dan nonreguler. Pengujian *simple grading* ini bertujuan untuk mendapatkan nilai parameter numerik terbaik yang kemudian akan diterapkan pada simulasi analisis profil kecepatan angin pada penghalang berbentuk bukit. Hasil simulasi validasi dari data reguler dan nonreguler yang dilakukan pada perangkat lunak OpenFOAM ini akan dibandingkan dengan hasil perhitungan dari persamaan model analitik *power law model*. Persamaan model *power law* dinyatakan dengan [3]:

$$U(z) = U_s \left(\frac{z-d}{z_s} \right)^\alpha \tag{1}$$

dengan:

U(z) = kecepatan angin rata-rata (m/s)

z = ketinggian di atas tanah (m)

U_s = kecepatan angin rata-rata pada ketinggian referensi yang dipilih (m/s)

z_s = ketinggian referensi ABL (m)

d = perpindahan bidang nol (m)

α = eksponen yang berubah dengan kekasaran permukaan (tipe medan)

Tabel 1. Jenis medan dan panjang kekasaran

Jenis medan	Panjang kekasaran (m)
Medan yang datar	0.001-0.005
Medan terbuka	0.01-0.05
Medan pinggiran kota	0.1-0.5
Perkotaan padat	1-5

Sumber: Holmezz [3]

Setelah uji *simple grading*, kemudian menghitung nilai korelasi dan *error* dari simulasi untuk mendapatkan hasil model yang paling mendekati hasil perhitungan yang menggunakan persamaan analitik *power law*.

Nilai koefisien korelasi dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{(n(\sum x^2) - (\sum x)^2)(n(\sum y^2) - (\sum y)^2)}} \tag{2}$$

dengan *r* merupakan nilai indeks korelasi, *n* adalah jumlah data, *x* adalah nilai data yang diamati, dan *y* adalah nilai data acuan.

Selanjutnya, untuk mengetahui besar kesalahan hasil dari simulasi dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\%error = \left| \frac{u_A - u_E}{u_E} \right| \cdot 100\% \tag{3}$$

dengan *%error* sebagai persen kesalahan yang terjadi dari hasil simulasi, *u_A* adalah nilai data simulasi, dan *u_E* adalah nilai data perhitungan.

2.3 Prosedur Analisis Hasil

Setelah mendapatkan hasil model yang terbaik dari validasi domain tersebut, selanjutnya digunakan untuk analisis profil kecepatan angin pada penghalang berbentuk bukit dengan melakukan 5 simulasi, yaitu simulasi pada sudut 15°, sudut 30°, sudut 45°, sudut 60°, dan sudut 75°. Hasil dari simulasi variasi sudut ini akan di

tampilkan dalam bentuk grafik yang mana grafik ini dikelompokkan menjadi 2 bagian yaitu grafik profil kecepatan angin pada titik kritis di setiap sudut, dan grafik profil kecepatan angin perposisi pada setiap sudut. Hasil grafik yang didapatkan akan terlihat dimana profil kecepatan angin yang tepat untuk peletakkan turbin angin tersebut.

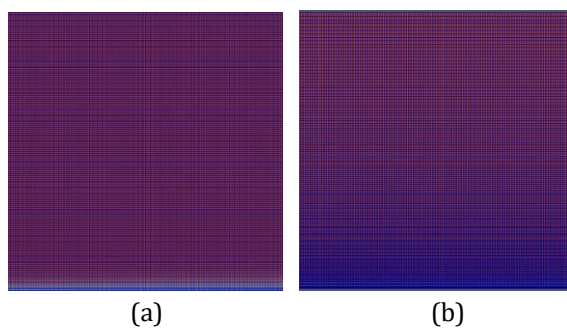
2.4 Analisis streamlines kecepatan

Analisis *streamlines* pada medan kecepatan dilakukan setelah analisis profil kecepatan angin selesai. *Streamlines* angin merupakan kondisi arus angin yang bertiup yang digambar berdasarkan garis singgung atau sejajar dengan data angin pada kawasan mereka berada [4]. Analisis *streamlines* dilakukan untuk melihat daerah belokan angin (*shearline*), daerah berkumpulnya angin (*konvergensi*), daerah terberainya angin (*divergensi*), daerah pusaran angin (*siklonik*), daerah pusaran angin keluar (*antisiklonik*), daerah angin teduh (*netral point*), dan sebagainya.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Validasi Simulasi Profil Kecepatan Angin

Tahapan validasi ini adalah membangun domain yang sederhana dengan memvariasikan ukuran *simple grading* menjadi reguler dan nonreguler. *Simple grading* yang digunakan untuk reguler yaitu (1 1 1) dan sedangkan untuk nonreguler adalah (1 5 1).

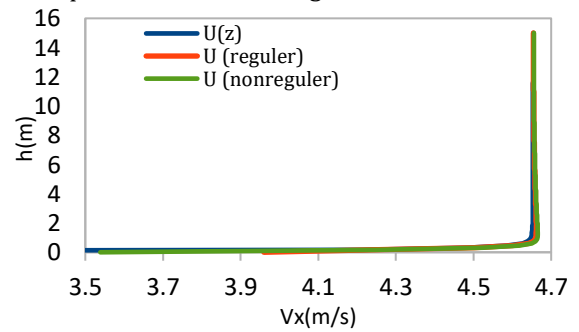


Gambar 3. Bentuk aliran angin pada *paraview* berdasarkan skema dari tipe (a) reguler dan (b) nonreguler

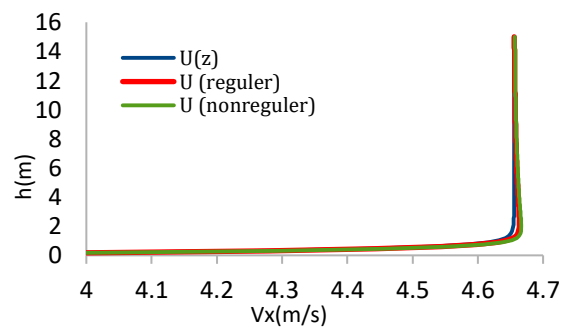
Tipe reguler, *grid* yang dihasilkan lebih kecil dan padat. Sedangkan ukuran *grid* tipe nonreguler terlihat lebih besar. Ukuran *grid* pada domain mempengaruhi keakuratan nilai *output* yang diinginkan. Semakin kecil ukuran *grid* pada domain maka hasil lebih akurat. Ukuran *grid* yang kecil berpengaruh terhadap tingkat kehalusan domain (*fine*). Penggunaan ukuran *grid* yang besar dapat mengurangi nilai *output* yang seharusnya.

Selanjutnya, untuk mengetahui hasil yang lebih baik dalam validasi simulasi ini, akan dilakukan perhitungan data analitik

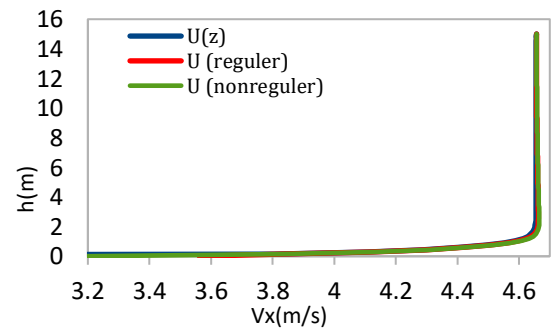
menggunakan persamaan *power law*. Hasil data analitik ini akan dibandingkan dengan data yang telah dihasilkan dari simulasi yang kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik.



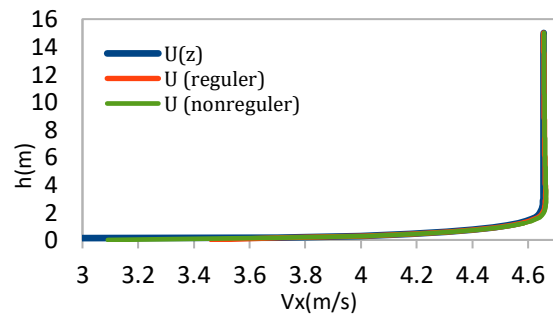
(a) pada $x = 20$ m



(b) pada $x = 40$ m



(c) pada $x = 60$ m



(d) pada $x = 80$ m

Gambar 4. Grafik Perbandingan kecepatan hasil simulasi numerik dan analitik pada *grid* tipe reguler dan nonreguler

Gambar 4 menunjukkan bahwa kedua tipe tersebut pada posisi (x) masing-masing 20 m, 40

m, 60 m dan 80 m menghasilkan model yang mendekati model analitik. Namun dari kedua tipe tersebut yang paling mendekati model analitik yaitu tipe reguler.

Selain itu, untuk membantu dalam menentukan tingkat akurasi suatu model dilakukan perhitungan nilai korelasi dan nilai *error*. Korelasi (r) merupakan metode yang digunakan untuk menganalisis kuat lemahnya hubungan antar dua variabel yaitu variabel bebas dan variabel terikat, yang mana variabel bebas dapat mempengaruhi variabel terikat [4].

Tabel 2. Nilai korelasi dan *error* untuk tipe reguler dan nonreguler

Tipe	Posisi (m)	Korelasi (r)	Error (%)
Reguler	20	0,964	3,6414
	40	0,985	3,5433
	60	0,921	3,5063
	80	0,914	3,3207
Rata-rata		0,946	3,5029
Nonreguler	20	0,887	3,66
	40	0,859	3,6092
	60	0,850	3,5726
	80	0,847	3,4227
Rata-rata		0,861	3,5661

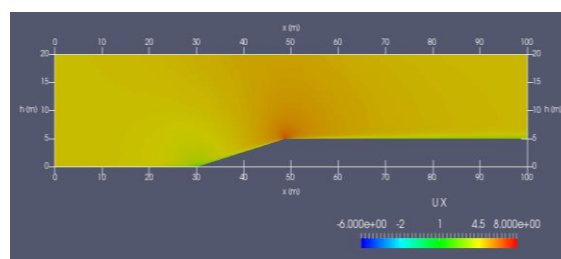
Tabel 2 menunjukkan bahwa, tipe reguler mendapatkan nilai korelasi rata-rata yaitu sebesar 0,946 dan *error* rata-rata sebesar 3,5029%. Kemudian pada tipe nonreguler, nilai korelasi rata yang diperoleh sebesar 0,861 dan nilai *error* rata-rata sebesar 3,5661 %.

Ketiga tahapan yang telah dilakukan untuk validasi profil kecepatan angin, maka disimpulkan bahwa pada grid tipe reguler mendapatkan nilai *output* yang lebih akurat sehingga menghasilkan hasil yang mendekati nilai perhitungan model analitik *power law*. Grid tipe reguler juga memiliki nilai rata-rata korelasi mendekati +1. Nilai yang mendekati +1 menunjukkan bahwa tingkat hubungan antar variabel sangat kuat [5]. Sehingga tipe yang digunakan untuk tahap analisis profil kecepatan angin menggunakan tipe reguler.

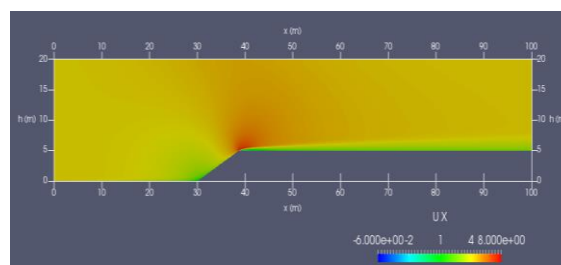
3.2 Analisis Profil Kecepatan Angin

Analisis profil kecepatan angin dilakukan untuk mengkaji profil kecepatan angin pada batas-batas penghalang berbentuk bukit. Simulasi pada analisis profil kecepatan angin ini menggunakan 5 variasi sudut yaitu sudut 15⁰, sudut 30⁰, sudut 45⁰, sudut 60⁰, dan sudut 75⁰.

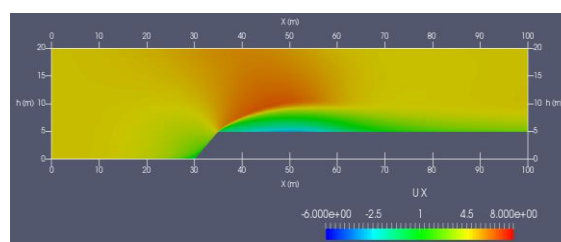
Karakteristik angin yang dapat dimanfaatkan untuk memutar PLTB adalah angin yang mengalir secara teratur (laminar) dengan kecepatan antara 4 m/s hingga 25 m/s. Angin dengan kecepatan 4 m/s dianggap sebagai kecepatan minimal angin agar dapat memutar turbin dengan kapasitas pembangkit listrik yang kecil, sedangkan kecepatan angin 25 m/s merupakan kecepatan maksimum angin yang tidak mengganggu kekuatan struktur turbin angin [6]. Hasil simulasi dari ke 5 variasi sudut tersebut yang ditampilkan oleh *paraview* dapat dilihat pada Gambar 5. Hasil simulasi pada Gambar 4.3 diambil pada *time* ke 300 saat simulasi terakhir berhenti.



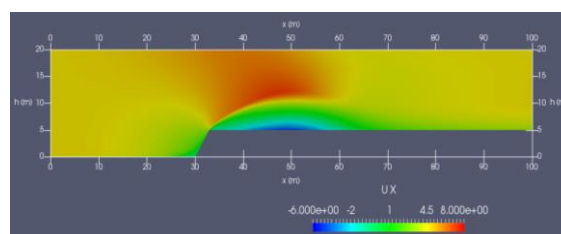
(a) sudut 15⁰



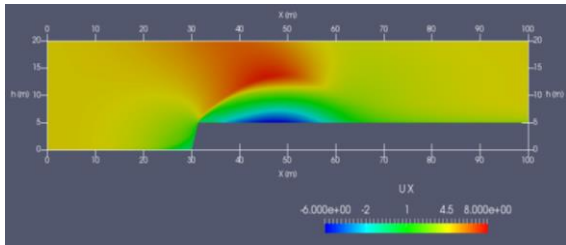
(b) sudut 30⁰



(c) sudut 45⁰



(d) sudut 60⁰

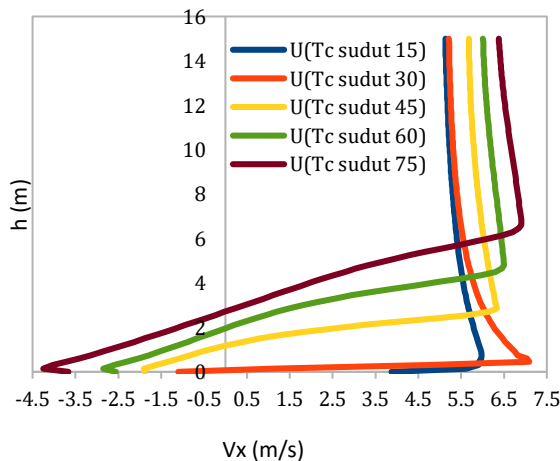


(e) sudut 75°

Gambar 5. Medan distribusi kecepatan angin dengan sudut yang berbeda.

Terlihat dari Gambar 4.3, pada sudut 15° kecepatan angin terbesar terletak pada awal puncak bukit (titik kritis) dengan $x = 50$ m. Pada sudut 30° kecepatan angin terbesar terletak pada titik kritis $x = 40$ m. Kemudian pada sudut 45°, kecepatan angin terbesar terletak pada $x = 40$ m sampai $x = 50$ m pada ketinggian 3 m dari permukaan tanah. Selanjutnya pada sudut 60° diperoleh kecepatan angin terbesar terletak pada $x = 40$ m sampai $x = 50$ m dengan ketinggian 4,8 m. Sedangkan untuk sudut 75°, diperoleh kecepatan angin terbesar terletak pada $x = 40$ m sampai $x = 50$ m dengan ketinggian 6,75 m dari permukaan tanah. Profil kecepatan angin tertinggi dapat dilihat adanya warna merah pada tampilan *paraview* yang menunjukkan bahwa kecepatan angin berkisar antara 6 m/s sampai 8 m/s. Sedangkan untuk profil kecepatan terendah ditandai adanya warna biru pekat dengan kecepatan anginnya berkisar antara -6 m/s sampai -3 m/s.

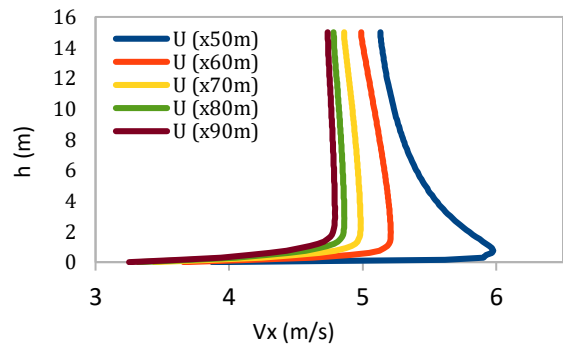
Selain itu, pada tahap penelitian ini terdapat 2 grafik dalam menentukan profil kecepatan angin untuk membantu penyajian data yaitu grafik profil kecepatan angin pada titik kritis disetiap sudut, dan grafik profil kecepatan angin perposisi pada setiap sudut.



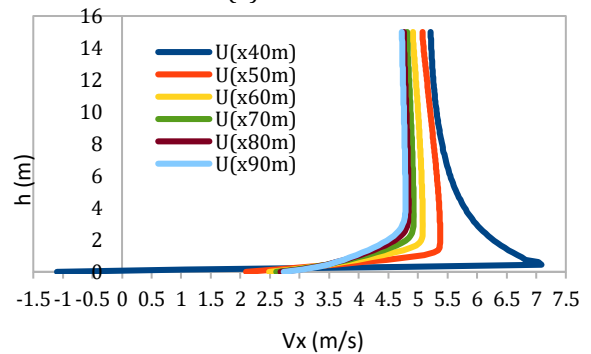
Gambar 6. Profil kecepatan angin pada titik kritis di setiap sudut

Berdasarkan Gambar 6, profil kecepatan angin tertinggi pada sudut 15° sebesar 6 m/s dengan ketinggian 0,75 m. Pada sudut 30°, profil kecepatan angin tertinggi sebesar 7 m/s dengan ketinggian 0,45 m. Profil kecepatan angin tertinggi pada Sudut 45° adalah 6,3 m/s pada ketinggian 2,85 m. Kemudian pada sudut 60° diperoleh profil kecepatan angin tertinggi sebesar 6,5 m/s di ketinggian 4,8 m. Selanjutnya, untuk sudut 75° profil kecepatan angin tertinggi sebesar 6,9 m/s pada ketinggian 6,75 m.

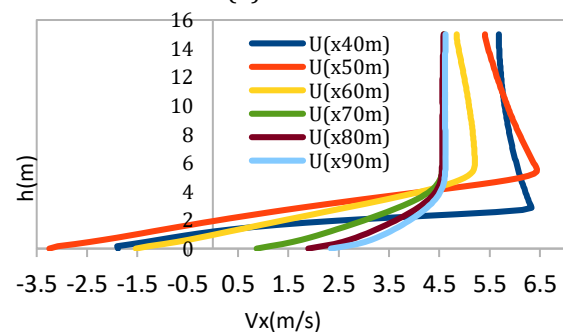
Mengacu pada penelitian Emadi (2016) yang menggunakan ketinggian turbin angin minimum sebesar 4 m dan artikel indonesiare (2021) kecepatan untuk memutar turbin sebesar 4 m/s hingga 25 m/s, maka disimpulkan bahwa profil kecepatan angin yang tepat untuk peletakkan turbin angin terdapat pada titik kritis sudut 60° dan sudut 75°. Titik kritis untuk sudut 60° dan sudut 75° terletak pada $x = 40$ m.



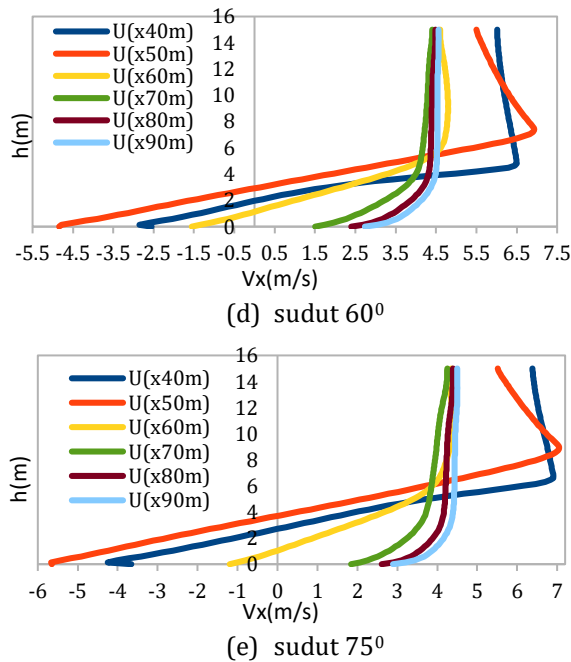
(a) sudut 15°



(b) sudut 30°



(c) sudut 45°

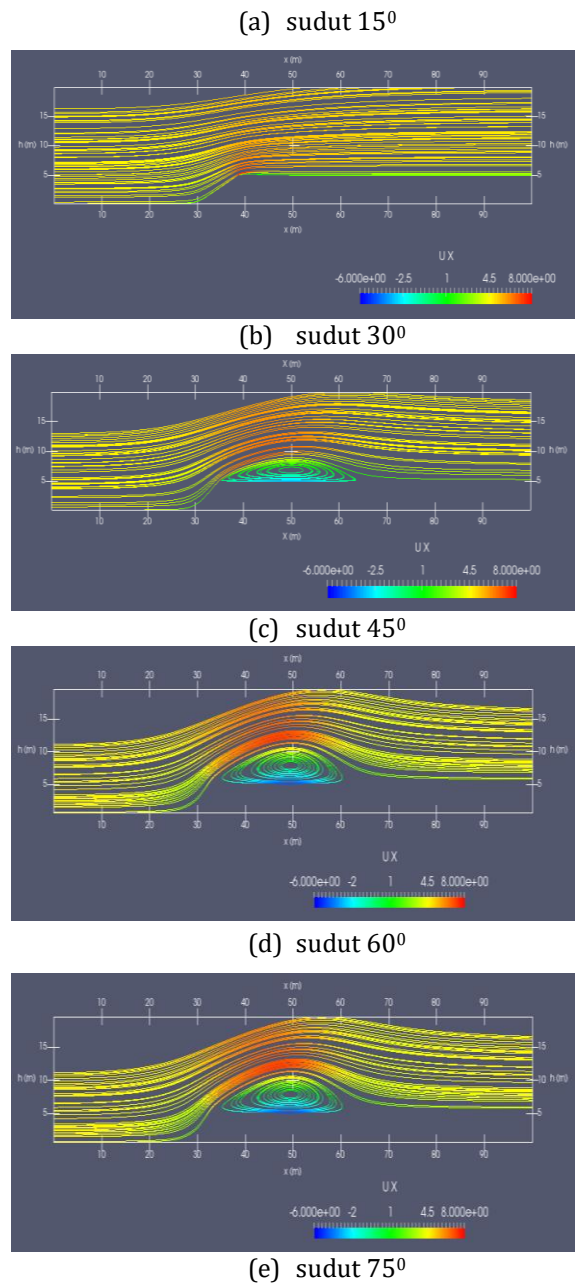
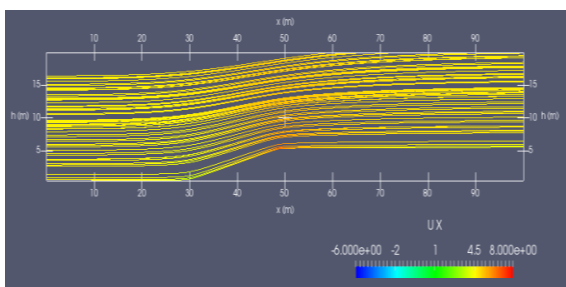


Gambar 7. Profil kecepatan angin perposisi pada setiap sudut

Berdasarkan Gambar 7, Sudut 15° diperoleh kecepatan tertinggi sebesar 6 m/s pada ketinggian 0,75 m di posisi $x = 50$ m. Sudut 30° diperoleh kecepatan tertinggi sebesar 6,8 m/s pada ketinggian 0,75 m di posisi $x = 40$ m. Sudut 45° diperoleh kecepatan tertinggi sebesar 6,4 m/s pada ketinggian 5,55 m di posisi $x = 50$ m. Kemudian kecepatan tertinggi pada sudut 60° sebesar 6,9 m/s pada ketinggian 7,35 m di posisi $x = 50$ m. Selanjutnya untuk sudut 75°, kecepatan tertinggi diperoleh sebesar 7 m/s pada ketinggian 8,7 m di posisi $x = 50$ m. Sehingga dapat disimpulkan bahwa ketiga sudut yaitu sudut 45°, sudut 60°, dan sudut 75° terlihat bahwa pada posisi $x = 50$ m dengan ketinggian sekitar 5,55 m hingga 8,7 m memiliki profil kecepatan angin tertinggi.

3.3 Analisis Pola Arus Angin (Streamlines)

Streamlines adalah sembarang garis yang digambarkan dalam aliran, dimana garis singgung pada setiap titik dalam garis tersebut dinyatakan dalam arah kecepatan alirannya. Tampilan streamlines kecepatan angin dari kelima sudut dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Streamlines kecepatan angin dengan sudut yang berbeda.

Terlihat pada Gambar 8, sudut 15° dan sudut 30° menunjukkan pola streamlines yang laminar. Hal ini menandakan bahwa pada sudut tersebut angin tidak dipengaruhi oleh gaya gradient tekanan, gaya coriolis, dan gaya gesek. Sedangkan pada sudut 45°, sudut 60°, dan sudut 75° terlihat bahwa pola streamlines menghasilkan pola aliran angin turbulen yang ditandai dengan adanya pusaran angin. Aliran turbulen ini karena adanya efek geser yang disebabkan oleh lepasnya aliran angin di atas perubahan kemiringan tanah yang mendadak. Aliran angin yang terlepas ditandai

dengan adanya turbulensi yang tinggi di dekat puncak bukit.

4. Kesimpulan

Simulasi pendekatan komputasi dinamika fluida dengan perangkat lunak OpenFOAM telah berhasil mensimulasikan aliran angin pada penghalang berbentuk bukit. Simulasi ini dilakukan dengan tiga tahapan yaitu memvalidasi simulasi model dengan menguji *simple grading* tipe reguler dan nonreguler, menganalisis profil kecepatan angin, dan menganalisis *streamlines* medan kecepatan. Tahapan validasi simulasi model diperoleh tipe reguler yang mendekati model analitik dengan nilai korelasi rata-rata 0,946 yang mendekati +1 dan *error* sebesar 3,5029 %. Simulasi Geometri domain yang digunakan pada tahap validasi yaitu panjang 100 m dan tinggi 15 m sedangkan simulasi untuk menganalisis profil kecepatan angin menggunakan ukuran domain dengan panjang 100 m, tinggi domain 20 m, dan tinggi bukit 5 m. simulasi ini menggunakan variasi 5 sudut yaitu sudut 15° , 30° , 45° , 60° , dan 75° dengan kecepatan awal $4,65 \text{ m/s}^2$. Berdasarkan analisis profil kecepatan angin, ketinggian antara 5,55 m hingga 8,7 m pada posisi $x = 50 \text{ m}$ dengan sudut 45° , 60° , dan 75° telah menghasilkan distribusi kecepatan tertinggi. Hal ini dapat diindikasikan sebagai posisi terbaik untuk meletakkan sistem kincir angin sebagai turbin dari pembangkit listrik tenaga angin (bayu). Pada sudut landai (15° dan 30°), analisis pola *streamlines* menunjukkan pola aliran angin yang laminar sedangkan untuk sudut yang curam (45° , 60° , dan 75°) menunjukkan adanya pusaran angin yang terjadi karena adanya aliran angin turbulen.

Daftar Pustaka

- [1] Tuakia, F., 2008, Dasar-Dasar CFD Menggunakan FLUENT, Erlangga, Jakarta.
- [2] Sun, D., 2007, *Computational Fluid Dynamics in Food Processing*, CRC Press, USA
- [3] Holmes, J.D. (2001) *Wind Loading of Structures*, Spoon Press, London.
- [4] Irianto, A., 2006, Statistik: Konsep Dasar dan Aplikasi, Kencana, Jakarta.
- [5] Sugiyono, 2014, Metode Penelitian Pendidikan Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D, Bandung, Alfabeta.
- [6] Emadi, D.A., 2016, Desain Maximum Power Point Tracking Untuk Turbin Angin Menggunakan Modified Perturb & Observe (P&O) Berdasarkan Prediksi Kecepatan Angin. ITS. Surabaya.