

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perancangan Kondisi Simulasi pada VP VAWT disetiap kondisi 0° hingga 180° sudut Azimuth

Pada bagian ini, akan diuraikan secara rinci mengenai tahapan perancangan dan pengaturan parameter untuk simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Perancangan ini bertujuan untuk menganalisis performa aerodinamika turbin angin sumbu vertikal dengan mekanisme *variable pitch* (VP VAWT) pada berbagai posisi sudut azimuth.

4.1.1 Pendefinisian Kecepatan Angin dan Kemampuan Putar Turbin

Langkah awal dalam simulasi adalah mendefinisikan parameter operasional utama, yaitu kecepatan angin yang masuk ke dalam domain (*velocity inlet*) dan kecepatan putar turbin (*rotational speed*). Kecepatan angin diatur pada nilai tertentu untuk merepresentasikan kondisi lingkungan yang diuji, sementara kecepatan putar turbin ditentukan berdasarkan nilai *Tip Speed Ratio* (TSR) yang diinginkan untuk mengevaluasi kinerjanya.

4.1.2 Pendefinisian Name Selection

Selanjutnya, dilakukan proses *Name Selection* pada geometri turbin dan domain fluida. Proses ini berfungsi untuk memberi nama pada setiap batas geometri yang penting, seperti sisi masuk (*inlet*), sisi keluar (*outlet*), bilah turbin (*wing*), serta

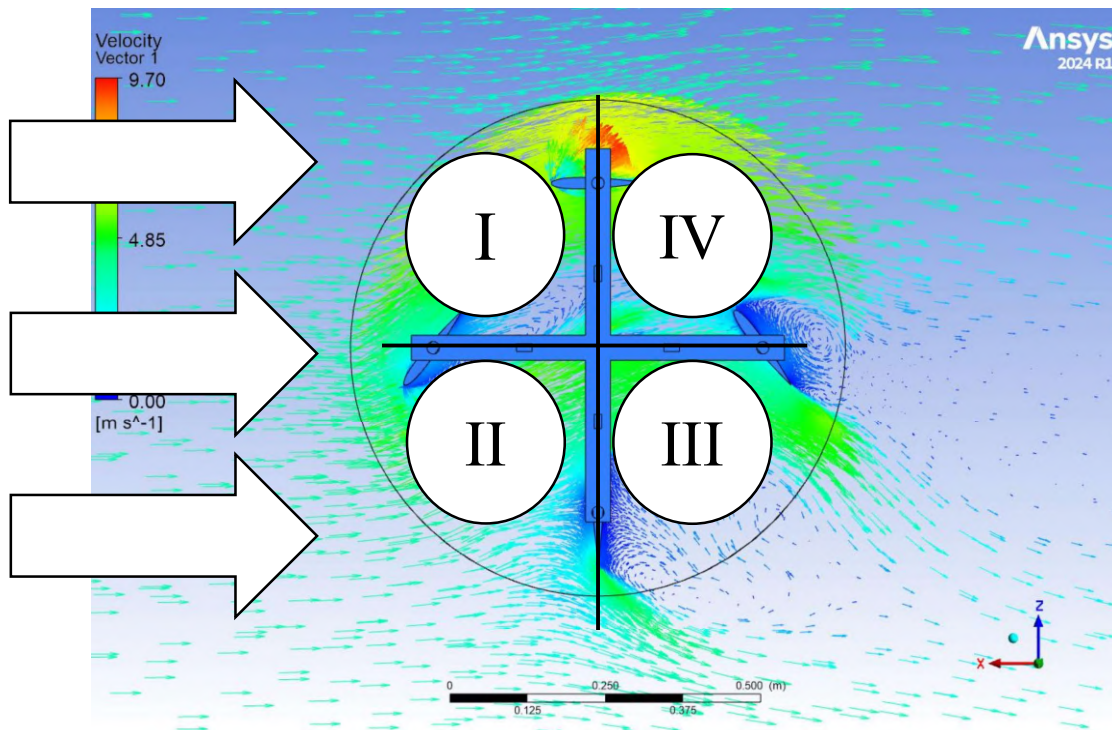
dinding domain. Penamaan ini krusial agar dapat diterapkan kondisi batas (*boundary conditions*) yang spesifik dan akurat pada setiap bagian tersebut.

4.1.3 Pendefinisian Area Rotating dan Area Static

Untuk mensimulasikan gerakan turbin, domain komputasi dibagi menjadi dua zona: area putar (*rotating domain*) dan area statis (*static domain*). Area putar adalah domain silinder yang melingkupi bilah turbin dan berotasi sesuai kecepatan putar yang telah ditentukan, sedangkan area statis adalah domain luar yang diam untuk merepresentasikan aliran udara bebas. Interaksi antara kedua area ini dihubungkan oleh sebuah bidang antarmuka (*interface*).

4.1.4 Pendefinisian Letak Kuadran

Untuk menganalisis kinerja turbin secara menyeluruh, analisis dilakukan berdasarkan letak kuadran yang ditentukan oleh sudut azimuth. Sudut azimuth merepresentasikan posisi angular dari bilah turbin selama satu putaran penuh (360°). Pendefinisian ini memungkinkan evaluasi gaya aerodinamika pada bilah saat berada di posisi upwind Kuadran I dan IV (bergerak melawan angin) maupun downwind Kuadran II dan III (bergerak searah angin) dalam setiap kuadran putarannya.



Gambar 4. 1 Pendefinisian letak kuadran

4.2 Meshing

4.2.1 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 0°

4.2.1.1 *Orthogonal Quality*

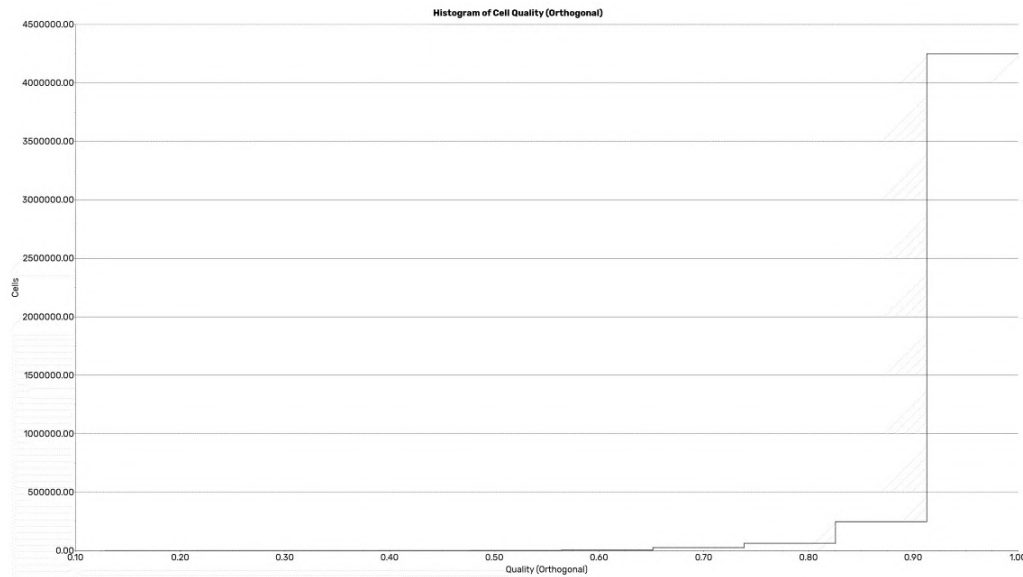
Kualitas *mesh* berdasarkan parameter *orthogonal quality* tergolong sangat memuaskan. Nilai *orthogonal quality* minimum sebesar 0.12829261. Didukung dengan nilai rata-rata yang sangat tinggi, yaitu 0.96660757, ini mengonfirmasi bahwa sel-sel pada domain memiliki ortogonalitas yang baik. Kualitas ini sangat mendukung tercapainya hasil simulasi dengan akurasi yang tinggi.

```

Meshing>
-----|
Minimum = 0.12829261, Maximum = 0.99999996, Average = 0.96660757.
Counts: (133 378 563 818 1827 4885 26043 63629 248098 4249240)
Total counts in bounds: 4595614

```

Gambar 4. 2 Hasil orthogonal quality mesh VP VAWT ϕ azimuth 0°



Gambar 4. 3 Histogram orthogonal quality mesh VP VAWT ϕ azimuth 0°

4.2.1.2 Skewness

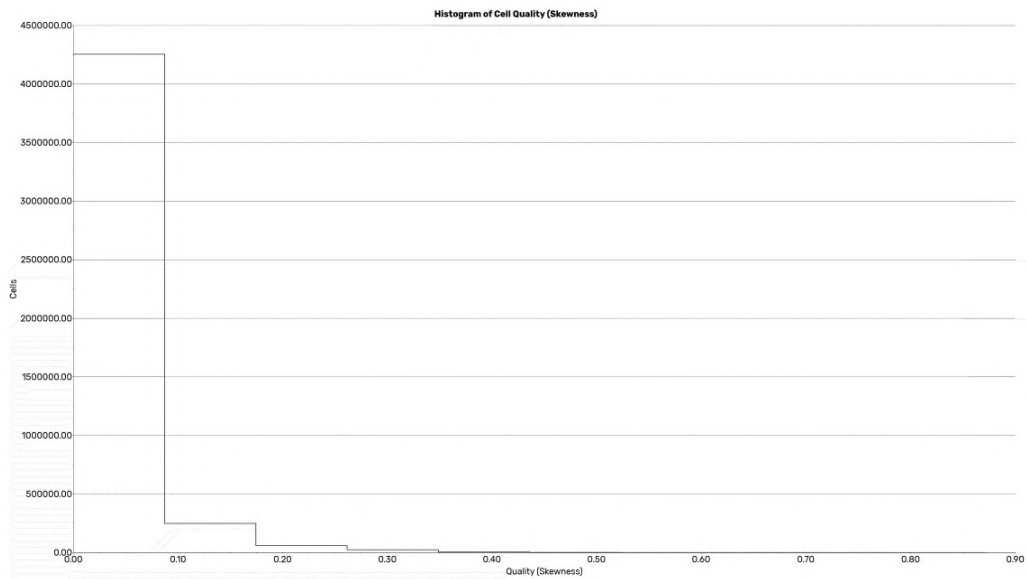
Analisis menunjukkan bahwa kualitas *mesh* yang dihasilkan sangat baik. Nilai *skewness* maksimum yang diperoleh sebesar 0.87170739. Selain itu, nilai *skewness* rata-rata yang sangat rendah, yaitu 0.032394167, mengindikasikan bahwa sebagian besar elemen *mesh* memiliki bentuk yang mendekati ideal. Kondisi ini menunjukkan bahwa *mesh* layak dan andal untuk digunakan dalam tahap simulasi selanjutnya.

```

Meshing>
-----
Minimum = 7.6586056e-09, Maximum = 0.87170739, Average = 0.032394167.
Counts: (4253856 249095 59357 25176 4689 1705 743 497 363 133)
Total counts in bounds: 4595614

```

Gambar 4. 4 Hasil skewness mesh VP VAWT ϕ azimuth 0°



Gambar 4. 5 Histogram skewness mesh VP VAWT ϕ azimuth 0°

4.2.2 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 20°

4.2.2.1 *Orthogonal Quality*

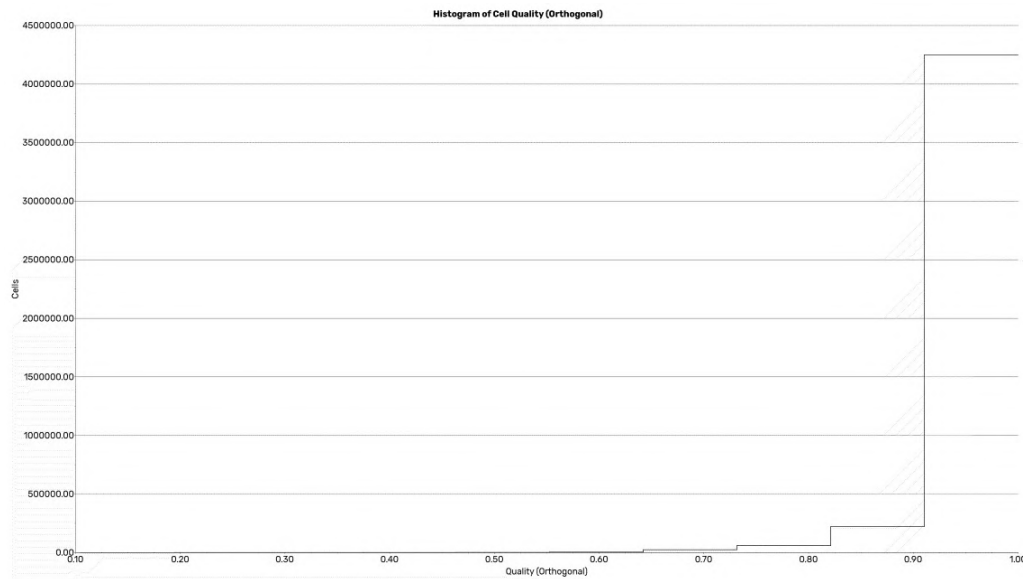
Kualitas *mesh* berdasarkan parameter *orthogonal quality* tergolong sangat memuaskan. Nilai *orthogonal quality* minimum sebesar 0.10508196. Didukung dengan nilai rata-rata yang sangat tinggi, yaitu 0.96701566, ini mengonfirmasi bahwa sel-sel pada domain memiliki ortogonalitas yang baik. Kualitas ini sangat mendukung tercapainya hasil simulasi dengan akurasi yang tinggi.

```

Meshing>
-----
Minimum = 0.10508196, Maximum = 0.99999996, Average = 0.96701566.
Counts: (20 273 359 649 1437 4199 24236 59730 221871 4249595)
Total counts in bounds: 4562369

```

Gambar 4. 6 Hasil orthogonal quality mesh VP VAWT ϕ azimuth 20°



Gambar 4. 7 Histogram orthogonal quality mesh VP VAWT ϕ azimuth 20°

4.2.2.2 Skewness

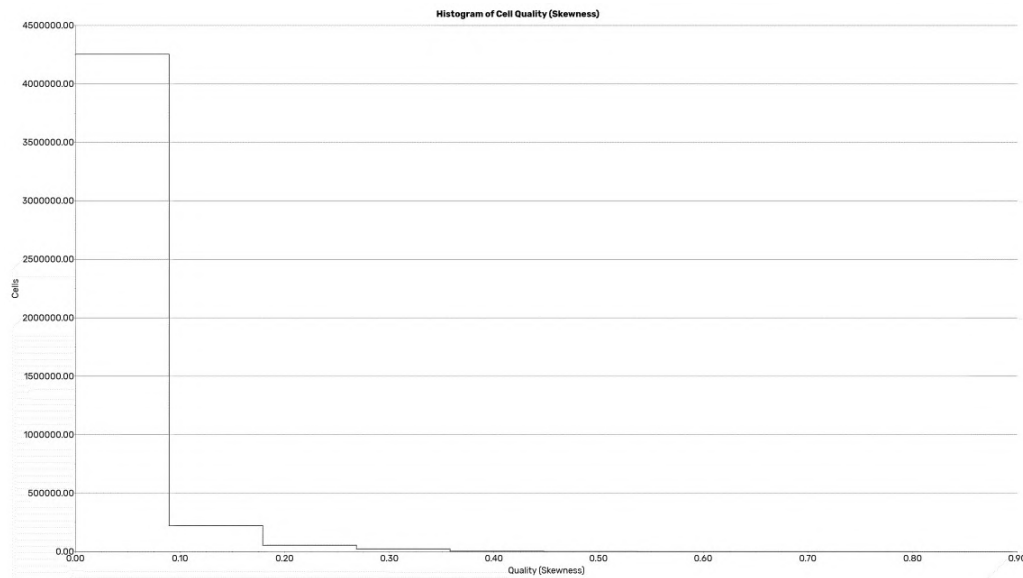
Analisis menunjukkan bahwa kualitas *mesh* yang dihasilkan sangat baik. Nilai *skewness* maksimum yang diperoleh sebesar 0.89491804. Selain itu, nilai *skewness* rata-rata yang sangat rendah, yaitu 0.032018813, mengindikasikan bahwa sebagian besar elemen *mesh* memiliki bentuk yang mendekati ideal. Kondisi ini menunjukkan bahwa *mesh* layak dan andal untuk digunakan dalam tahap simulasi selanjutnya.

```

Meshing>
-----
Minimum = 6.7021165e-09, Maximum = 0.89491804, Average = 0.032018813.
Counts: (4253816 222879 55527 23489 4063 1352 604 350 270 20)
Total counts in bounds: 4562370

```

Gambar 4. 8 Hasil skewness mesh VP VAWT ϕ azimuth 20°



Gambar 4. 9 Histogram skewness mesh VP VAWT ϕ azimuth 20°

4.2.3 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 40°

4.2.3.1 *Orthogonal Quality*

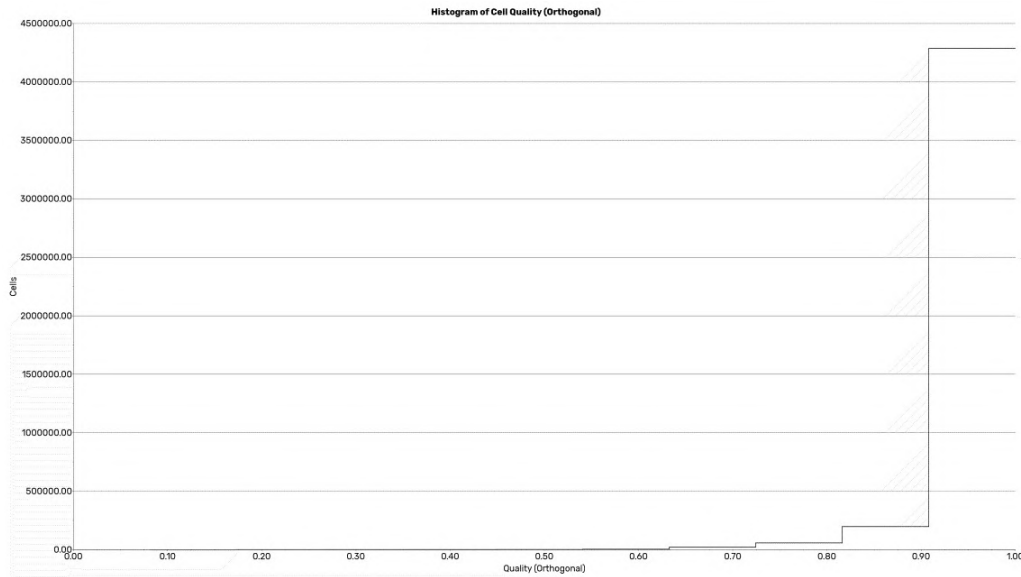
Kualitas *mesh* berdasarkan parameter *orthogonal quality* tergolong sangat memuaskan. Nilai *orthogonal quality* minimum sebesar 0.08167078. Didukung dengan nilai rata-rata yang sangat tinggi, yaitu 0.96736124, ini mengonfirmasi bahwa sel-sel pada domain memiliki ortogonalitas yang baik. Kualitas ini sangat mendukung tercapainya hasil simulasi dengan akurasi yang tinggi.

```

-----
Minimum = 0.08167078, Maximum = 0.99999997, Average = 0.96736124.
Counts: (18 299 509 811 1441 3838 21262 58085 197868 4287373)
Total counts in bounds: 4571504

```

Gambar 4. 10 Hasil orthogonal quality mesh VP VAWT ϕ azimuth 40°



Gambar 4. 11 Histogram orthogonal quality mesh VP VAWT ϕ azimuth 40°

4.2.3.2 Skewness

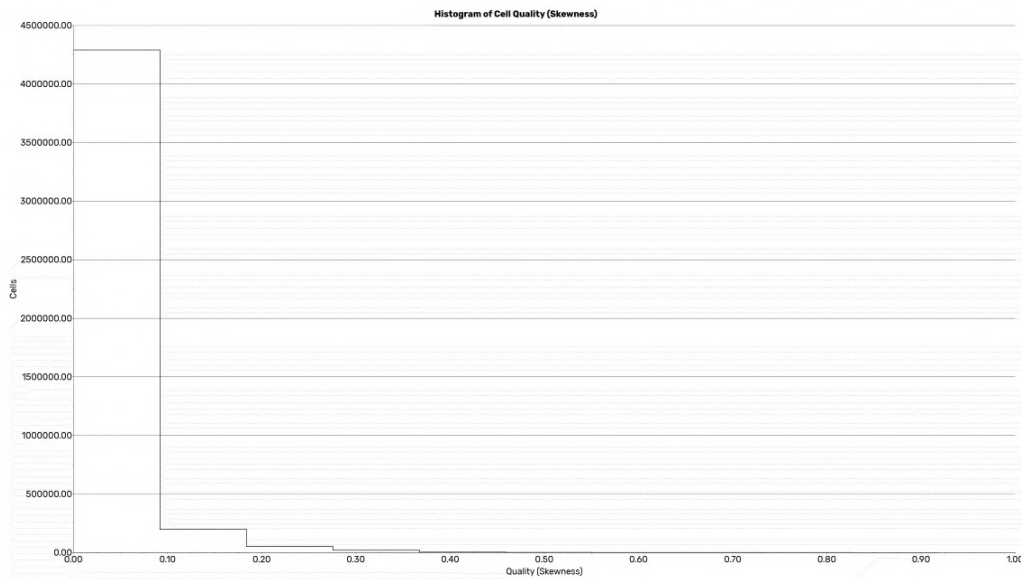
Analisis menunjukkan bahwa kualitas *mesh* yang dihasilkan sangat baik. Nilai *skewness* maksimum yang diperoleh sebesar 0.91832922. Selain itu, nilai *skewness* rata-rata yang sangat rendah, yaitu 0.031700504, mengindikasikan bahwa sebagian besar elemen *mesh* memiliki bentuk yang mendekati ideal. Kondisi ini menunjukkan bahwa *mesh* layak dan andal untuk digunakan dalam tahap simulasi selanjutnya.


```

Meshing>
-----
Minimum = 1.0085083e-08, Maximum = 0.91832922, Average = 0.031700504.
Counts: (4291272 199602 53576 20604 3640 1317 714 464 296 18)
Total counts in bounds: 4571503

```

Gambar 4. 12 Hasil skewness mesh VP VAWT ϕ azimuth 40°



Gambar 4. 13 Histogram skewness mesh VP VAWT ϕ azimuth 40°

4.2.4 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 60°

4.2.4.1 *Orthogonal Quality*

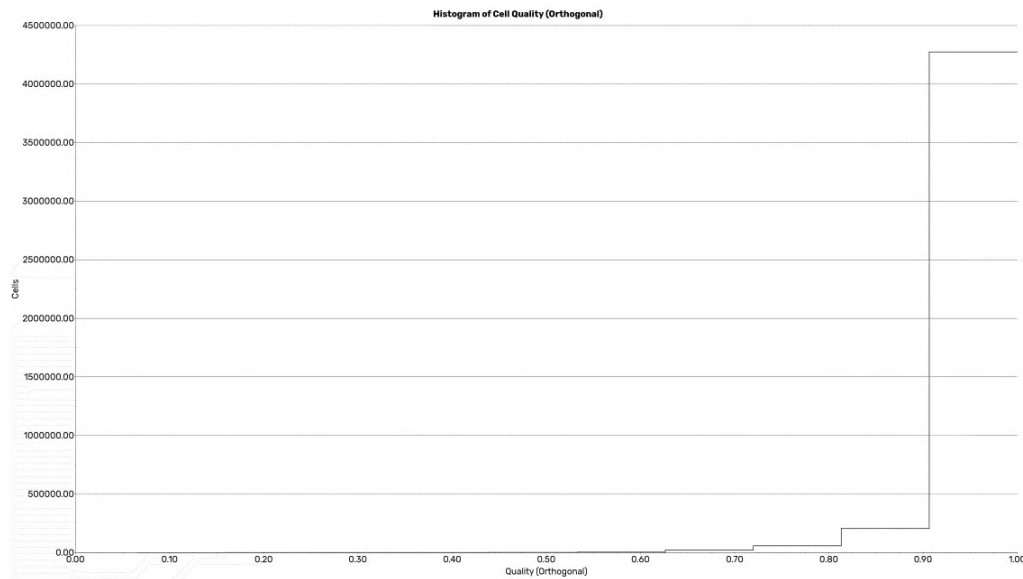
Kualitas *mesh* berdasarkan parameter *orthogonal quality* tergolong sangat memuaskan. Nilai *orthogonal quality* minimum sebesar 0.065835952. Didukung dengan nilai rata-rata yang sangat tinggi, yaitu 0.9668133, ini mengonfirmasi bahwa sel-sel pada domain memiliki ortogonalitas yang baik. Kualitas ini sangat mendukung tercapainya hasil simulasi dengan akurasi yang tinggi.

```

Meshing>
-----
Minimum = 0.065835952, Maximum = 0.999999996, Average = 0.9668133.
Counts: (9 253 417 693 1337 3593 20867 58278 207397 4274010)
Total counts in bounds: 4566854

```

Gambar 4. 14 Hasil orthogonal quality mesh VP VAWT ϕ azimuth 60°



Gambar 4. 15 Histogram orthogonal quality mesh VP VAWT ϕ azimuth 60°

4.2.4.2 Skewness

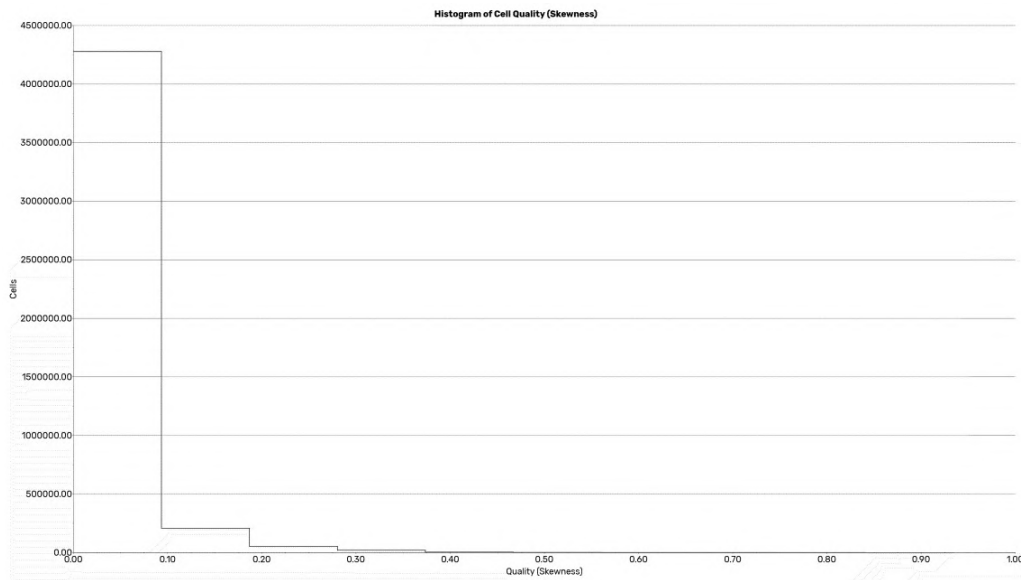
Analisis menunjukkan bahwa kualitas *mesh* yang dihasilkan sangat baik. Nilai *skewness* maksimum yang diperoleh sebesar 0.93416405. Selain itu, nilai *skewness* rata-rata yang sangat rendah, yaitu 0.032213617, mengindikasikan bahwa sebagian besar elemen *mesh* memiliki bentuk yang mendekati ideal. Kondisi ini menunjukkan bahwa *mesh* layak dan andal untuk digunakan dalam tahap simulasi selanjutnya.

```

Meshing>
-----
Minimum = 7.7754969e-09, Maximum = 0.93416405, Average = 0.032213617.
Counts: (4278028 208465 54196 20207 3469 1215 627 387 252 9)
Total counts in bounds: 4566855

```

Gambar 4. 16 Hasil skewness mesh VP VAWT ϕ azimuth 60°



Gambar 4. 17 Histogram skewness mesh VP VAWT ϕ azimuth 60°

4.2.5 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 80°

4.2.5.1 *Orthogonal Quality*

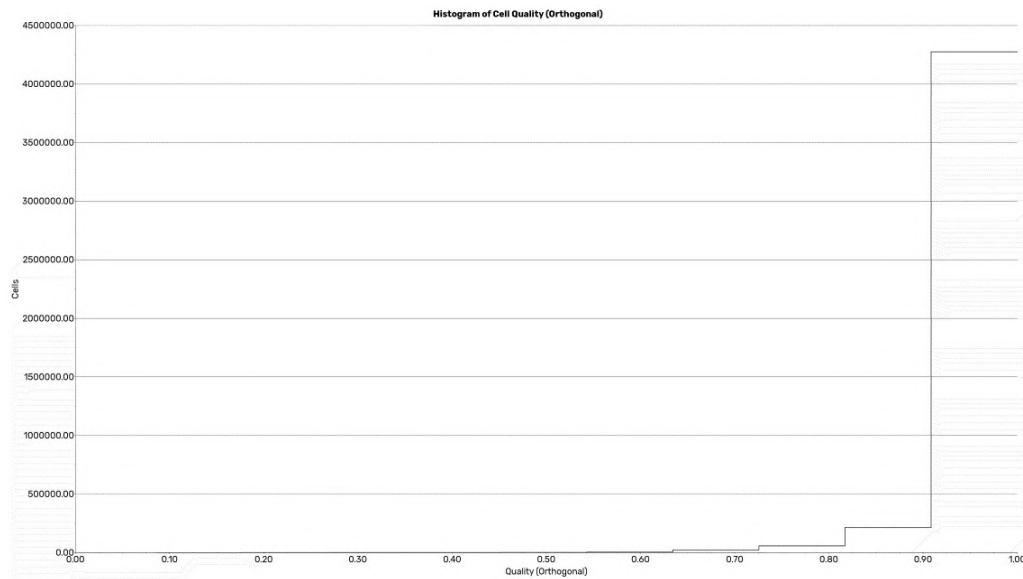
Kualitas *mesh* berdasarkan parameter *orthogonal quality* tergolong sangat memuaskan. Nilai *orthogonal quality* minimum sebesar 0.085698182. Didukung dengan nilai rata-rata yang sangat tinggi, yaitu 0.96703283, ini mengonfirmasi bahwa sel-sel pada domain memiliki ortogonalitas yang baik. Kualitas ini sangat mendukung tercapainya hasil simulasi dengan akurasi yang tinggi.

```

Meshing>
-----
Minimum = 0.085698182, Maximum = 0.99999997, Average = 0.96703283.
Counts: (17 272 394 657 1324 3794 22480 57684 214713 4275603)
Total counts in bounds: 4576938

```

Gambar 4. 18 Hasil orthogonal quality mesh VP VAWT ϕ azimuth 80°



Gambar 4. 19 Histogram orthogonal quality mesh VP VAWT ϕ azimuth 80°

4.2.5.2 Skewness

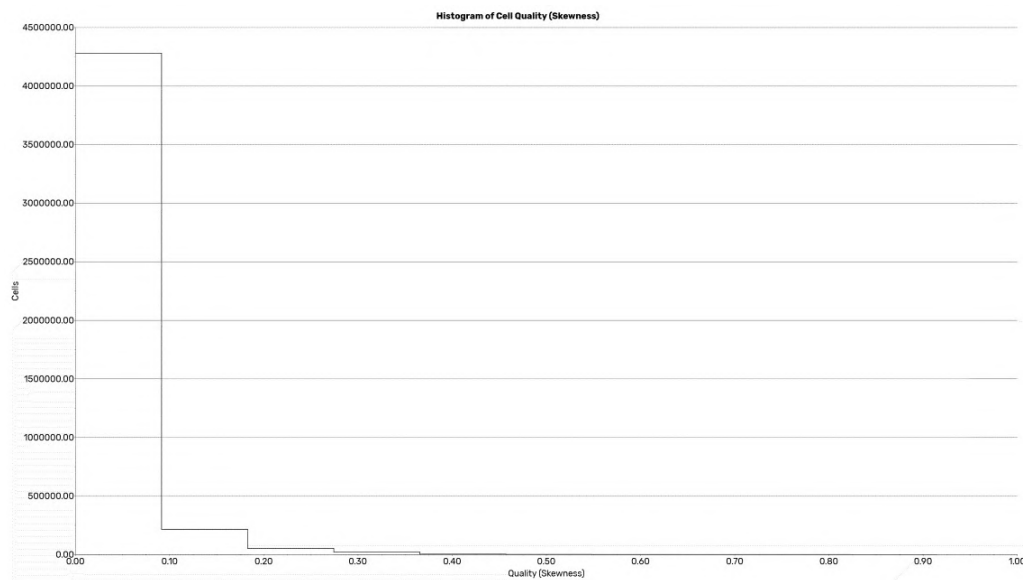
Analisis menunjukkan bahwa kualitas *mesh* yang dihasilkan sangat baik. Nilai *skewness* maksimum yang diperoleh sebesar 0.91430182. Selain itu, nilai *skewness* rata-rata yang sangat rendah, yaitu 0.032004583, mengindikasikan bahwa sebagian besar elemen *mesh* memiliki bentuk yang mendekati ideal. Kondisi ini menunjukkan bahwa *mesh* layak dan andal untuk digunakan dalam tahap simulasi selanjutnya.

```

Meshing>
-----
Minimum = 7.3350623e-09, Maximum = 0.91430182, Average = 0.032004583.
Counts: (4279621 216028 53364 21803 3647 1235 592 364 268 17)
Total counts in bounds: 4576939

```

Gambar 4. 20 Hasil skewness mesh VP VAWT ϕ azimuth 80°



Gambar 4. 21 Histogram skewness mesh VP VAWT ϕ azimuth 80°

4.2.6 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 100°

4.2.6.1 Orthogonal Quality

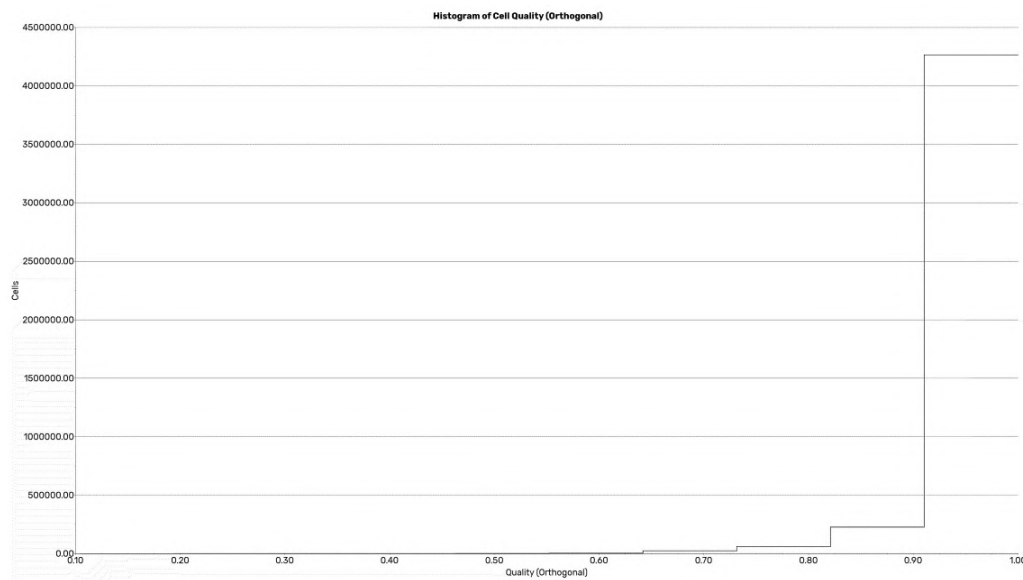
Kualitas *mesh* berdasarkan parameter *orthogonal quality* tergolong sangat memuaskan. Nilai *orthogonal quality* minimum sebesar 0.10457121. Didukung dengan nilai rata-rata yang sangat tinggi, yaitu 0.96684989, ini mengonfirmasi bahwa sel-sel pada domain memiliki ortogonalitas yang baik. Kualitas ini sangat mendukung tercapainya hasil simulasi dengan akurasi yang tinggi.

```

Meshing>
-----
Minimum = 0.10457121, Maximum = 0.999999996, Average = 0.96684989.
Counts: (20 361 410 676 1571 4390 24228 60778 227356 4265226)
Total counts in bounds: 4585016

```

Gambar 4. 22 Hasil orthogonal quality mesh VP VAWT ϕ azimuth 100°



Gambar 4. 23 Histogram orthogonal quality mesh VP VAWT ϕ azimuth 100°

4.2.6.2 Skewness

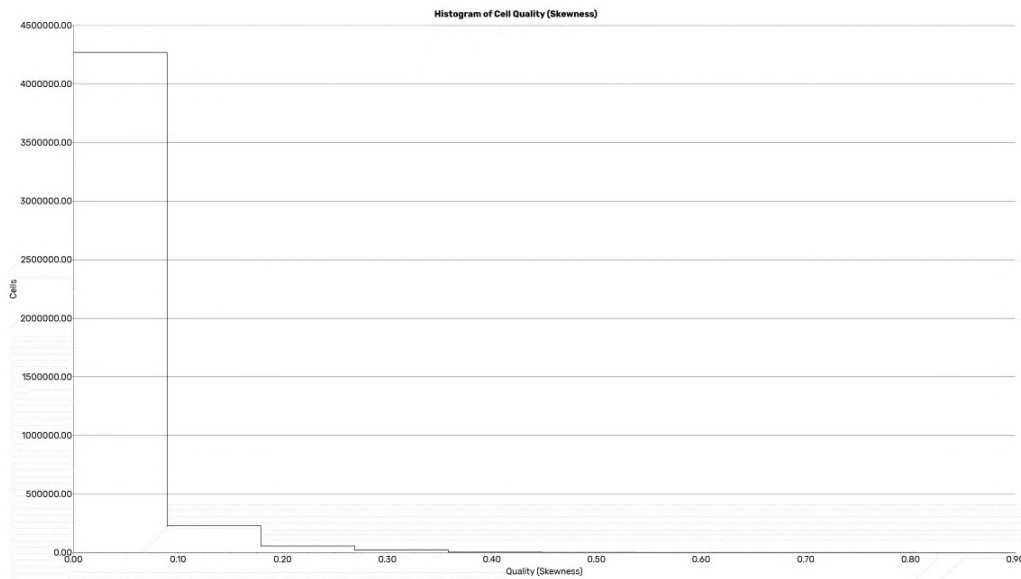
Analisis menunjukkan bahwa kualitas *mesh* yang dihasilkan sangat baik. Nilai *skewness* maksimum yang diperoleh sebesar 0.89542879. Selain itu, nilai *skewness* rata-rata yang sangat rendah, yaitu 0.032167299, mengindikasikan bahwa sebagian besar elemen *mesh* memiliki bentuk yang mendekati ideal. Kondisi ini menunjukkan bahwa *mesh* layak dan andal untuk digunakan dalam tahap simulasi selanjutnya.

```

Meshing>
-----
Minimum = 6.5717268e-09, Maximum = 0.89542879, Average = 0.032167229.
Counts: (4269464 228486 56538 23449 4244 1456 625 378 356 20)
Total counts in bounds: 4585016

```

Gambar 4. 24 Hasil skewness mesh VP VAWT ϕ azimuth 100°



Gambar 4. 25 Histogram skewness mesh VP VAWT ϕ azimuth 100°

4.2.7 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 120°

4.2.7.1 *Orthogonal Quality*

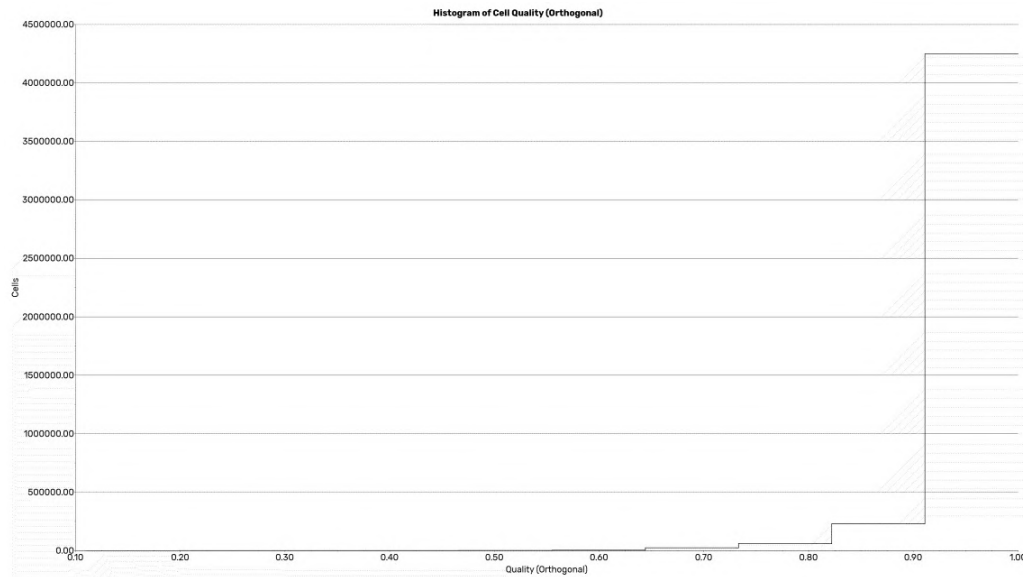
Kualitas *mesh* berdasarkan parameter *orthogonal quality* tergolong sangat memuaskan. Nilai *orthogonal quality* minimum sebesar 0.1104438. Didukung dengan nilai rata-rata yang sangat tinggi, yaitu 0.96687419, ini mengonfirmasi bahwa sel-sel pada domain memiliki ortogonalitas yang baik. Kualitas ini sangat mendukung tercapainya hasil simulasi dengan akurasi yang tinggi.

```

Meshing>
-----
Minimum = 0.1104438, Maximum = 0.99999996, Average = 0.96687419.
Counts: (29 209 368 609 1495 4292 24117 60760 230222 4250080)
Total counts in bounds: 4572181

```

Gambar 4. 26 Hasil orthogonal quality mesh VP VAWT ϕ azimuth 120°



Gambar 4. 27 Histogram orthogonal quality mesh VP VAWT ϕ azimuth 120°

4.2.7.2 Skewness

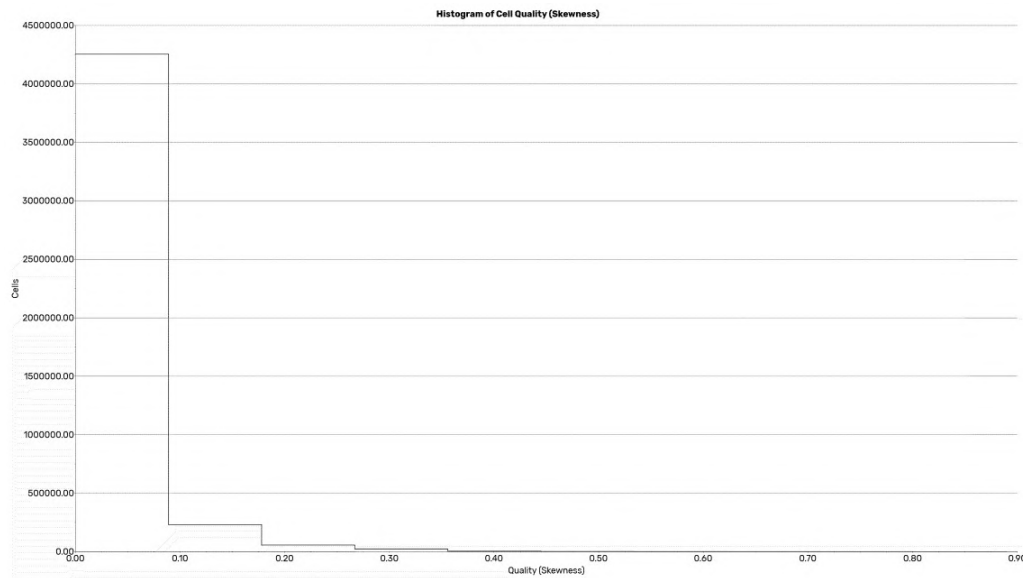
Analisis menunjukkan bahwa kualitas *mesh* yang dihasilkan sangat baik. Nilai *skewness* maksimum yang diperoleh sebesar 0.8895562. Selain itu, nilai *skewness* rata-rata yang sangat rendah, yaitu 0.032160763, mengindikasikan bahwa sebagian besar elemen *mesh* memiliki bentuk yang mendekati ideal. Kondisi ini menunjukkan bahwa *mesh* layak dan andal untuk digunakan dalam tahap simulasi selanjutnya.


```

Meshing>
-----
Minimum = 1.4068473e-08, Maximum = 0.8895562, Average = 0.032160763.
Counts: (4254389 231227 56441 23436 4120 1415 564 353 206 29)
Total counts in bounds: 4572180

```

Gambar 4. 28 Hasil skewness mesh VP VAWT ϕ azimuth 120°



Gambar 4. 29 Histogram skewness mesh VP VAWT ϕ azimuth 120°

4.2.8 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 140°

4.2.8.1 *Orthogonal Quality*

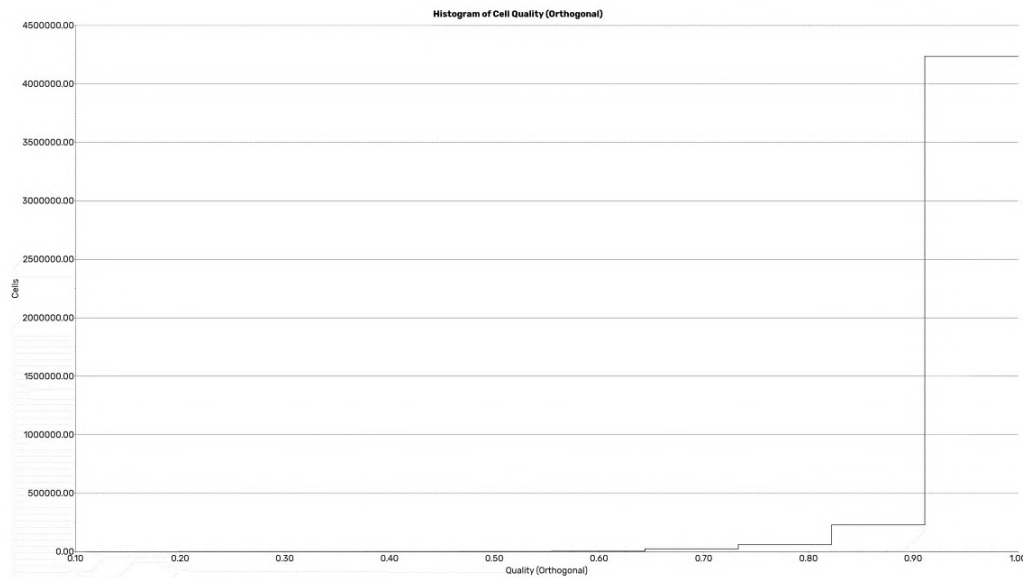
Kualitas *mesh* berdasarkan parameter *orthogonal quality* tergolong sangat memuaskan. Nilai *orthogonal quality* minimum sebesar 0.10950627. Didukung dengan nilai rata-rata yang sangat tinggi, yaitu 0.96679653, ini mengonfirmasi bahwa sel-sel pada domain memiliki ortogonalitas yang baik. Kualitas ini sangat mendukung tercapainya hasil simulasi dengan akurasi yang tinggi.

```

Meshing>
-----
Minimum = 0.10950627, Maximum = 0.99999996, Average = 0.96679653.
Counts: (27 393 506 820 1672 4574 23834 61309 228827 4235830)
Total counts in bounds: 4557792

```

Gambar 4. 30 Hasil orthogonal quality mesh VP VAWT ϕ azimuth 140°



Gambar 4. 31 Histogram orthogonal quality mesh VP VAWT ϕ azimuth 140°

4.2.8.2 Skewness

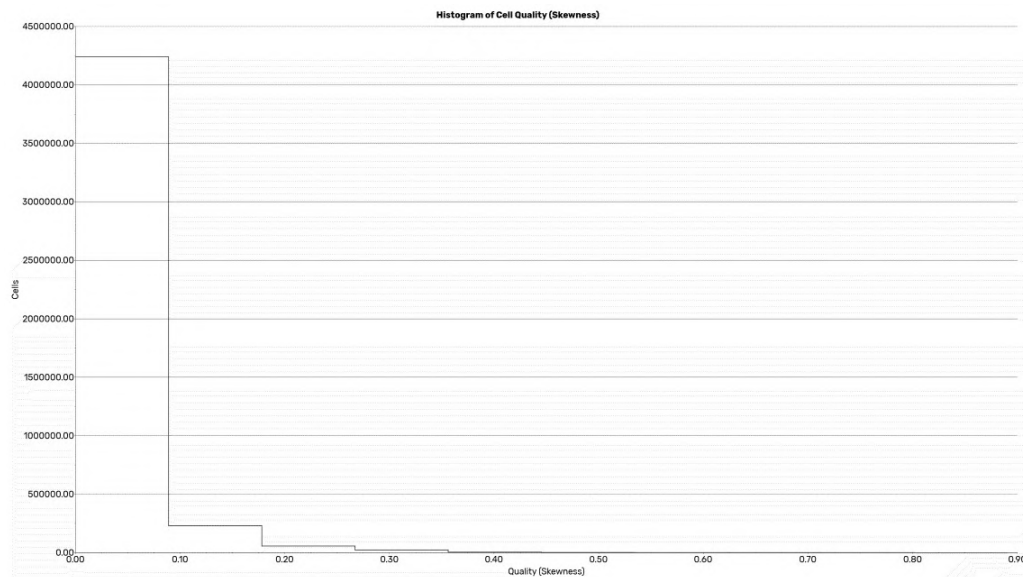
Analisis menunjukkan bahwa kualitas *mesh* yang dihasilkan sangat baik. Nilai *skewness* maksimum yang diperoleh sebesar 0.89049373. Selain itu, nilai *skewness* rata-rata yang sangat rendah, yaitu 0.032203745, mengindikasikan bahwa sebagian besar elemen *mesh* memiliki bentuk yang mendekati ideal. Kondisi ini menunjukkan bahwa *mesh* layak dan andal untuk digunakan dalam tahap simulasi selanjutnya.

```

Meshing>
-----
Minimum = 6.3335055e-09, Maximum = 0.89049373, Average = 0.032203745.
Counts: (4240077 230043 57018 23101 4398 1559 731 463 375 27)
Total counts in bounds: 4557792

```

Gambar 4. 32 Hasil skewness mesh VP VAWT ϕ azimuth 140°



Gambar 4. 33 Histogram skewness mesh VP VAWT ϕ azimuth 140°

4.2.9 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 160°

4.2.9.1 Orthogonal Quality

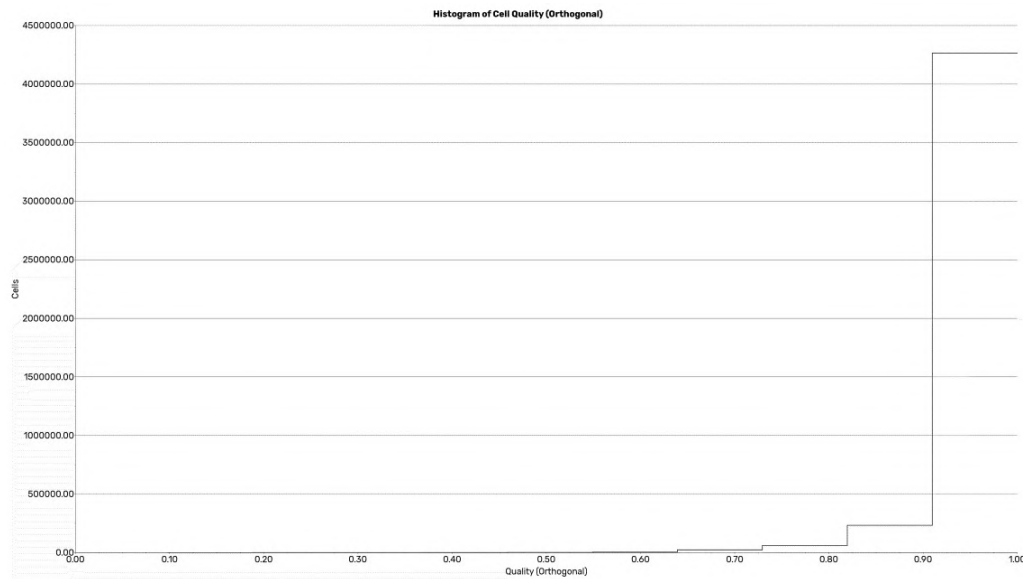
Kualitas *mesh* berdasarkan parameter *orthogonal quality* tergolong sangat memuaskan. Nilai *orthogonal quality* minimum sebesar 0.097837205. Didukung dengan nilai rata-rata yang sangat tinggi, yaitu 0.96659605, ini mengonfirmasi bahwa sel-sel pada domain memiliki ortogonalitas yang baik. Kualitas ini sangat mendukung tercapainya hasil simulasi dengan akurasi yang tinggi.

```

Meshing>
-----
Minimum = 0.097837205, Maximum = 0.999999997, Average = 0.96659605.
Counts: (26 234 331 566 1336 3927 23496 61502 233326 4264173)
Total counts in bounds: 4588917

```

Gambar 4. 34 Hasil orthogonal quality mesh VP VAWT ϕ azimuth 160°



Gambar 4. 35 Histogram orthogonal quality mesh VP VAWT ϕ azimuth 160°

4.2.9.2 Skewness

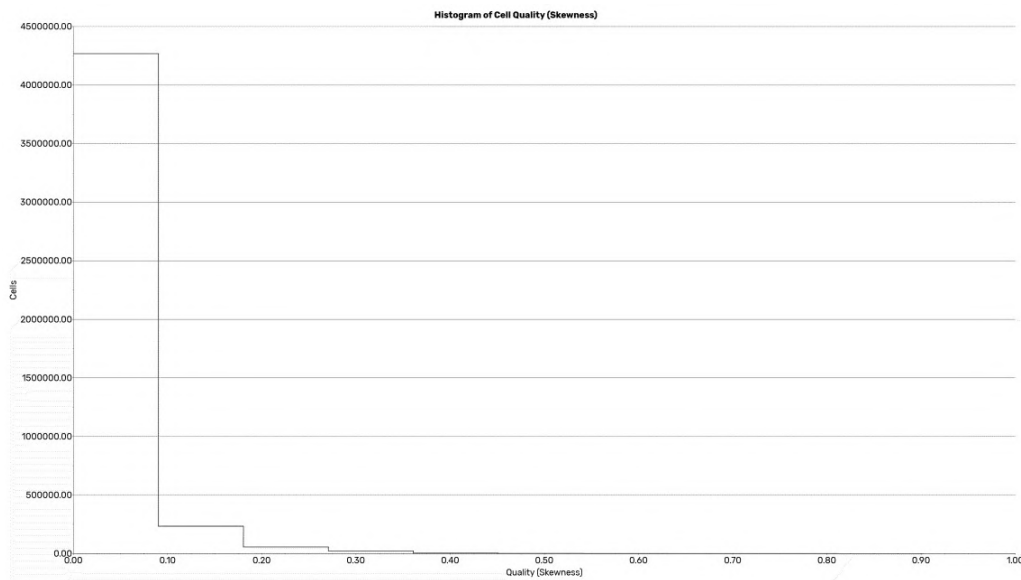
Analisis menunjukkan bahwa kualitas *mesh* yang dihasilkan sangat baik. Nilai *skewness* maksimum yang diperoleh sebesar 0.90216279. Selain itu, nilai *skewness* rata-rata yang sangat rendah, yaitu 0.032389567, mengindikasikan bahwa sebagian besar elemen *mesh* memiliki bentuk yang mendekati ideal. Kondisi ini menunjukkan bahwa *mesh* layak dan andal untuk digunakan dalam tahap simulasi selanjutnya.

```

Meshing>
-----
Minimum = 9.0005119e-09, Maximum = 0.90216279, Average = 0.032389567.
Counts: (4268456 234366 57175 22739 3822 1266 522 315 230 26)
Total counts in bounds: 4588917

```

Gambar 4. 36 Hasil skewness mesh VP VAWT ϕ azimuth 160°



Gambar 4. 37 Histogram skewness mesh VP VAWT ϕ azimuth 160°

4.2.10 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 180°

4.2.10.1 Orthogonal Quality

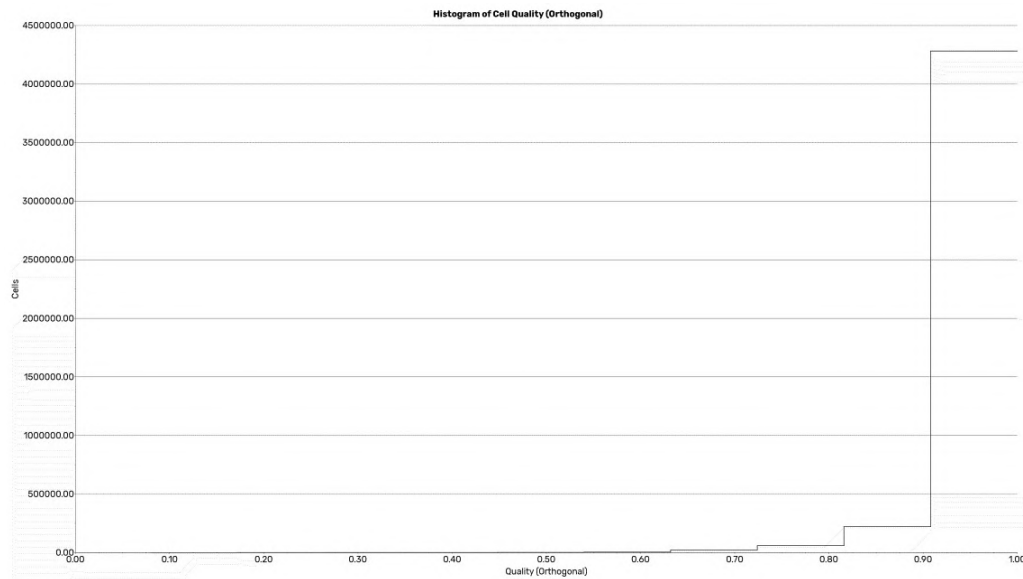
Kualitas *mesh* berdasarkan parameter *orthogonal quality* tergolong sangat memuaskan. Nilai *orthogonal quality* minimum sebesar 0.079852045. Didukung dengan nilai rata-rata yang sangat tinggi, yaitu 0.96664556, ini mengonfirmasi bahwa sel-sel pada domain memiliki ortogonalitas yang baik. Kualitas ini sangat mendukung tercapainya hasil simulasi dengan akurasi yang tinggi.

```

Meshing>
-----
Minimum = 0.079852045, Maximum = 0.999999996, Average = 0.96664556.
Counts: (16 308 461 758 1421 3700 22113 59560 222411 4282491)
Total counts in bounds: 4593239

```

Gambar 4. 38 Hasil orthogonal quality mesh VP VAWT ϕ azimuth 180°



Gambar 4. 39 Histogram orthogonal quality mesh VP VAWT ϕ azimuth 180°

4.2.10.2 Skewness

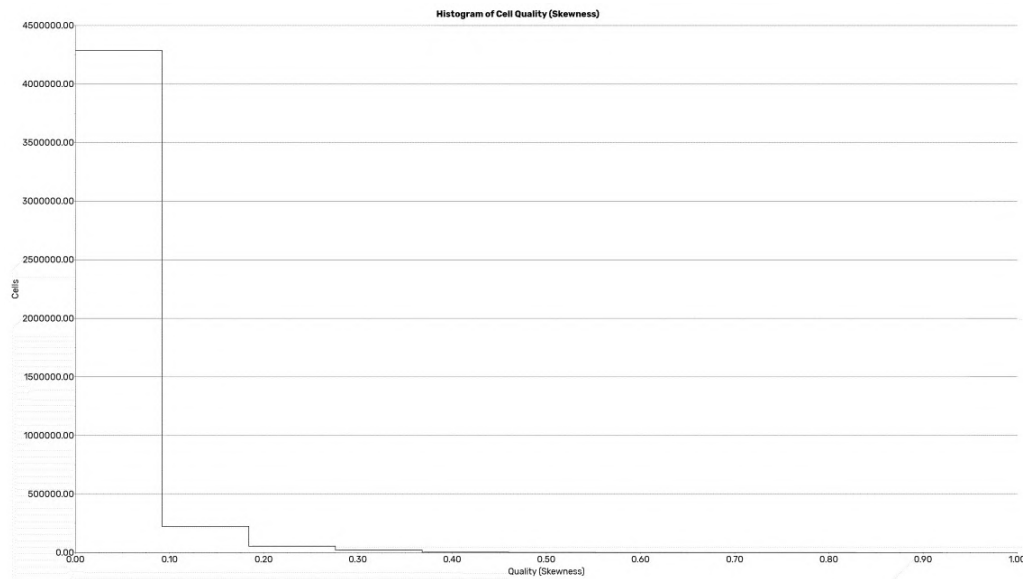
Analisis menunjukkan bahwa kualitas *mesh* yang dihasilkan sangat baik. Nilai *skewness* maksimum yang diperoleh sebesar 0.92014795. Selain itu, nilai *skewness* rata-rata yang sangat rendah, yaitu 0.032356222, mengindikasikan bahwa sebagian besar elemen *mesh* memiliki bentuk yang mendekati ideal. Kondisi ini menunjukkan bahwa *mesh* layak dan andal untuk digunakan dalam tahap simulasi selanjutnya.

```

Meshing>
-----
Minimum = 1.0306855e-08, Maximum = 0.92014795, Average = 0.032356222.
Counts: (4286622 223608 55294 21442 3595 1270 668 421 303 16)
Total counts in bounds: 4593239

```

Gambar 4. 40 Hasil skewness mesh VP VAWT ϕ azimuth 180°



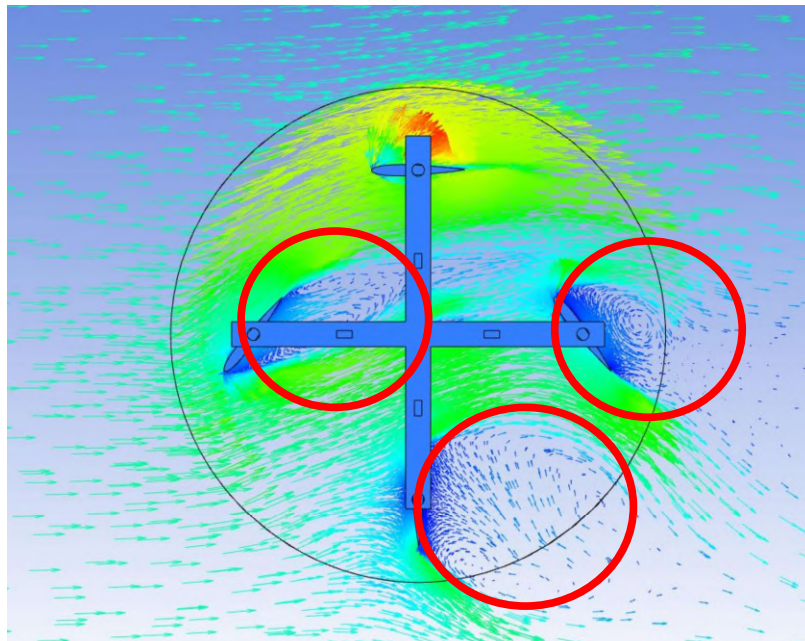
Gambar 4. 41 Histogram skewness mesh VP VAWT ϕ azimuth 180°

4.3 Aliran Vortex

4.3.1 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 0°

Gambar 4. 42 juga secara jelas memperlihatkan fenomena pelepasan aliran pusaran atau vorteks (vortex shedding). Fenomena ini paling dominan teramati pada bilah transisi dari Kuadran I menuju Kuadran II, Terjadi juga pada bilah Kuadran III dan pada bilah transisi dari Kuadran III menuju Kuadran IV, di mana sebuah

struktur vorteks yang koheren terlihat terlepas dari ujung bilah (blade tip) yang sedang bergerak maju melawan arah angin. Terbentuknya tip vortex ini dipicu oleh perbedaan tekanan yang sangat tinggi antara sisi hadap (pressure side) dan sisi isap (suction side) bilah. Aliran dari zona bertekanan tinggi cenderung "meluap" ke zona bertekanan rendah di sekitar ujung bilah, menciptakan aliran berputar yang kemudian terlepas ke aliran jejak (wake). Pelepasan vorteks ini merupakan salah satu sumber utama rugi-rugi aerodinamis (aerodynamic losses) pada turbin.

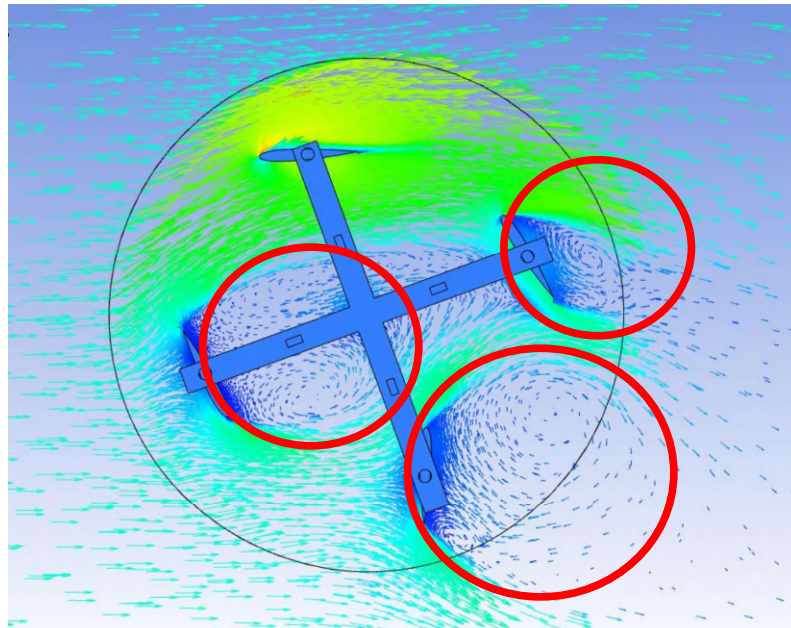


Gambar 4. 42 Aliran vortex VP VAWT ϕ azimuth 0°

4.3.2 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 20°

Gambar 4. 43 juga secara jelas memperlihatkan fenomena pelepasan aliran pusaran atau vorteks (vortex shedding). Fenomena ini paling dominan teramati pada bilah transisi dari Kuadran I menuju Kuadran II, Terjadi juga pada bilah Kuadran

III dan pada bilah transisi dari Kuadran III menuju Kuadran IV, di mana sebuah struktur vorteks yang koheren terlihat terlepas dari ujung bilah (blade tip) yang sedang bergerak maju melawan arah angin. Terbentuknya tip vortex ini dipicu oleh perbedaan tekanan yang sangat tinggi antara sisi hadap (pressure side) dan sisi isap (suction side) bilah. Aliran dari zona bertekanan tinggi cenderung "meluap" ke zona bertekanan rendah di sekitar ujung bilah, menciptakan aliran berputar yang kemudian terlepas ke aliran jejak (wake). Pelepasan vorteks ini merupakan salah satu sumber utama rugi-rugi aerodinamis (aerodynamic losses) pada turbin.

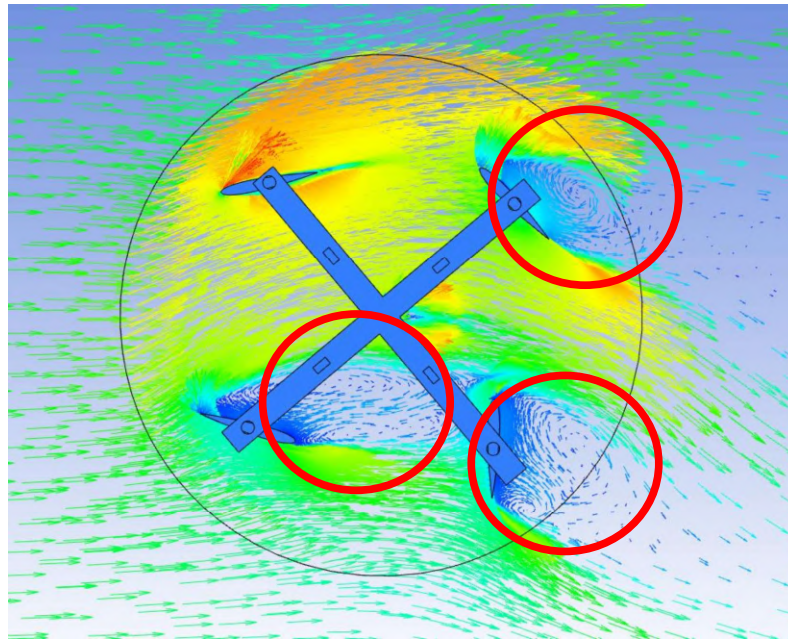


Gambar 4. 43 Aliran vortex VP VAWT ϕ azimuth 20°

4.3.3 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 40°

Gambar 4. 44 juga secara jelas memperlihatkan fenomena pelepasan aliran pusaran atau vorteks (vortex shedding). Fenomena ini paling dominan teramati pada

bilah Kuadran II, Kuadran III dan Kuadran IV, di mana sebuah struktur vorteks yang koheren terlihat terlepas dari ujung bilah (blade tip) yang sedang bergerak maju melawan arah angin. Terbentuknya tip vortex ini dipicu oleh perbedaan tekanan yang sangat tinggi antara sisi hadap (pressure side) dan sisi isap (suction side) bilah. Aliran dari zona bertekanan tinggi cenderung "meluap" ke zona bertekanan rendah di sekitar ujung bilah, menciptakan aliran berputar yang kemudian terlepas ke aliran jejak (wake). Pelepasan vorteks ini merupakan salah satu sumber utama rugi-rugi aerodinamis (aerodynamic losses) pada turbin.

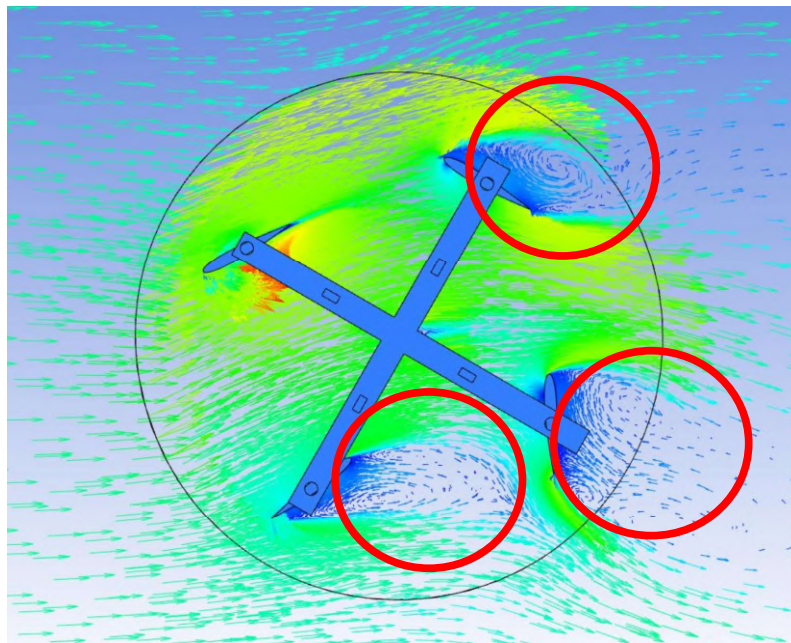


Gambar 4. 44 Aliran vortex VP VAWT ϕ azimuth 40°

4.3.4 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 60°

Gambar 4. 45 juga secara jelas memperlihatkan fenomena pelepasan aliran pusaran atau vorteks (vortex shedding). Fenomena ini paling dominan teramati pada

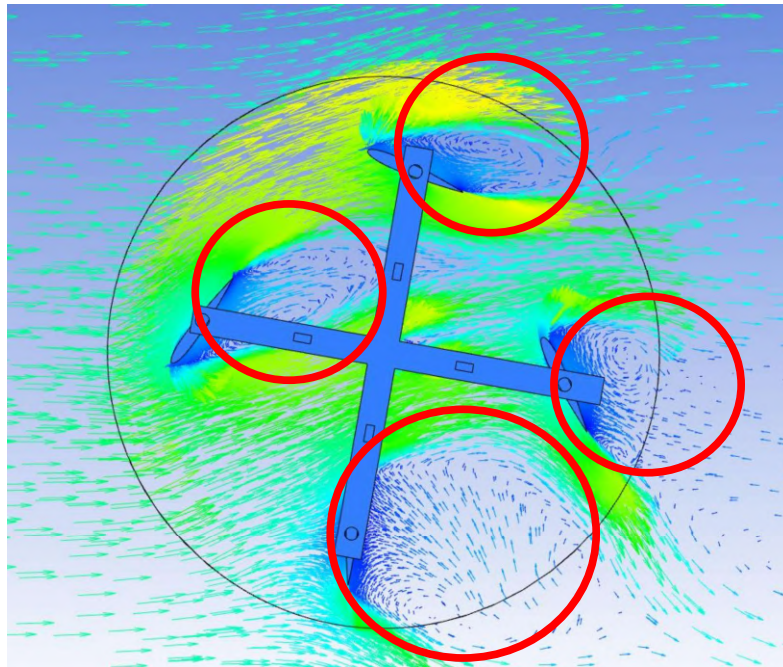
bilah transisi dari Kuadran II menuju Kuadran III, Terjadi juga pada bilah Kuadran III dan Kuadran IV, di mana sebuah struktur vorteks yang koheren terlihat terlepas dari ujung bilah (blade tip) yang sedang bergerak maju melawan arah angin. Terbentuknya tip vortex ini dipicu oleh perbedaan tekanan yang sangat tinggi antara sisi hadap (pressure side) dan sisi isap (suction side) bilah. Aliran dari zona bertekanan tinggi cenderung "meluap" ke zona bertekanan rendah di sekitar ujung bilah, menciptakan aliran berputar yang kemudian terlepas ke aliran jejak (wake). Pelepasan vorteks ini merupakan salah satu sumber utama rugi-rugi aerodinamis (aerodynamic losses) pada turbin.



Gambar 4. 45 Aliran vortex VP VAWT ϕ azimuth 60°

4.3.5 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 80°

Gambar 4. 46 juga secara jelas memperlihatkan fenomena pelepasan aliran pusaran atau vorteks (vortex shedding). Fenomena ini paling dominan teramati pada bilah transisi dari Kuadran II menuju Kuadran III, Terjadi juga pada bilah transisi dari Kuadran III menuju Kuadran IV dan pada bilah Kuadran I dan Kuadran IV, di mana sebuah struktur vorteks yang koheren terlihat terlepas dari ujung bilah (blade tip) yang sedang bergerak maju melawan arah angin. Terbentuknya tip vortex ini dipicu oleh perbedaan tekanan yang sangat tinggi antara sisi hadap (pressure side) dan sisi isap (suction side) bilah. Aliran dari zona bertekanan tinggi cenderung "meluap" ke zona bertekanan rendah di sekitar ujung bilah, menciptakan aliran berputar yang kemudian terlepas ke aliran jejak (wake). Pelepasan vorteks ini merupakan salah satu sumber utama rugi-rugi aerodinamis (aerodynamic losses) pada turbin.

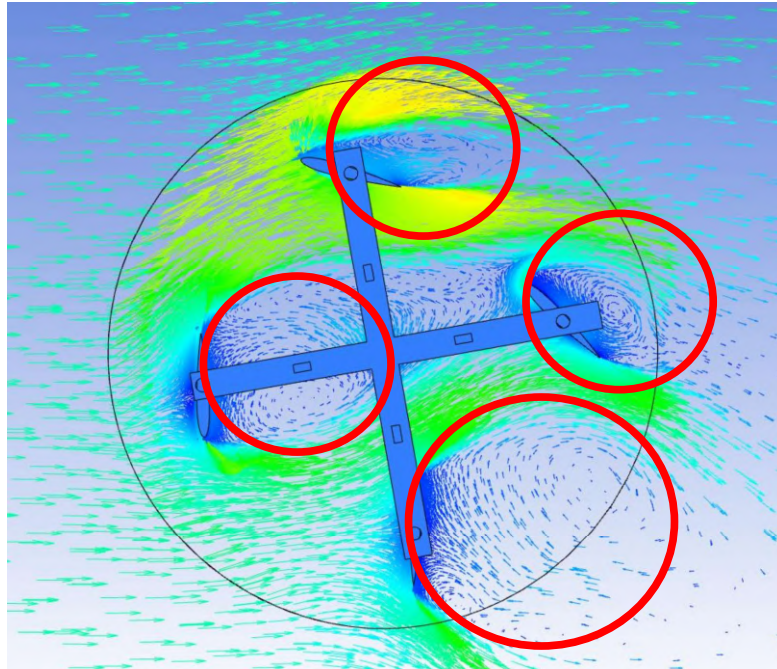


Gambar 4. 46 Aliran vortex VP VAWT ϕ azimuth 80°

4.3.6 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 100°

Gambar 4. 47 juga secara jelas memperlihatkan fenomena pelepasan aliran pusaran atau vorteks (vortex shedding). Fenomena ini paling dominan teramati pada bilah transisi dari Kuadran IV menuju Kuadran I, Terjadi juga pada bilah transisi dari Kuadran I menuju Kuadran II, bilah transisi dari Kuadran III menuju Kuadran IV dan pada bilah Kuadran III di mana sebuah struktur vorteks yang koheren terlihat terlepas dari ujung bilah (blade tip) yang sedang bergerak maju melawan arah angin. Terbentuknya tip vortex ini dipicu oleh perbedaan tekanan yang sangat tinggi antara sisi hadap (pressure side) dan sisi isap (suction side) bilah. Aliran dari zona bertekanan tinggi cenderung "meluap" ke zona bertekanan rendah di sekitar ujung bilah, menciptakan aliran berputar yang kemudian terlepas ke aliran jejak (wake).

Pelepasan vorteks ini merupakan salah satu sumber utama rugi-rugi aerodinamis (aerodynamic losses) pada turbin.

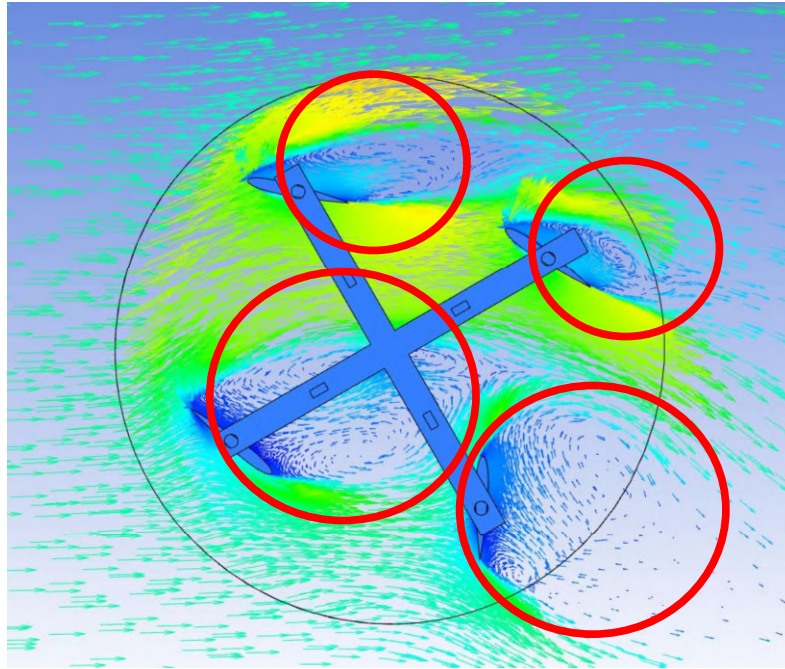


Gambar 4. 47 Aliran vortex VP VAWT ϕ azimuth 100°

4.3.7 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 120°

Gambar 4. 48 juga secara jelas memperlihatkan fenomena pelepasan aliran pusaran atau vorteks (vortex shedding). Fenomena ini paling dominan teramati di setiap bilah pada setiap Kuadran, di mana sebuah struktur vorteks yang koheren terlihat terlepas dari ujung bilah (blade tip) yang sedang bergerak maju melawan arah angin. Terbentuknya tip vortex ini dipicu oleh perbedaan tekanan yang sangat tinggi antara sisi hadap (pressure side) dan sisi isap (suction side) bilah. Aliran dari zona bertekanan tinggi cenderung "meluap" ke zona bertekanan rendah di sekitar ujung bilah, menciptakan aliran berputar yang kemudian terlepas ke aliran jejak

(wake). Pelepasan vorteks ini merupakan salah satu sumber utama rugi-rugi aerodinamis (aerodynamic losses) pada turbin.

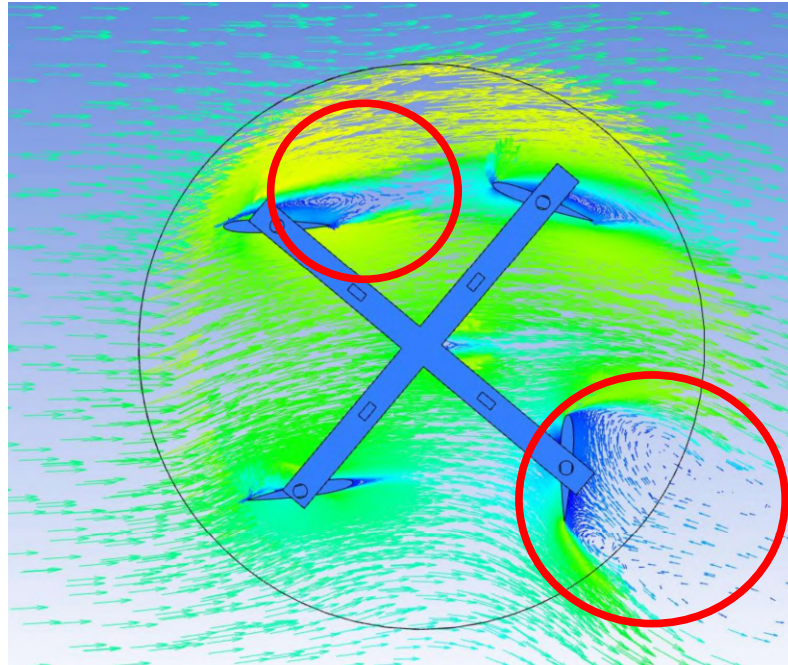


Gambar 4. 48 Aliran vortex VP VAWT ϕ azimuth 120°

4.3.8 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 140°

Gambar 4. 49 juga secara jelas memperlihatkan fenomena pelepasan aliran pusaran atau vorteks (vortex shedding). Fenomena ini paling dominan teramati pada bilah Kuadran I dan Kuadran III, di mana sebuah struktur vorteks yang koheren terlihat terlepas dari ujung bilah (blade tip) yang sedang bergerak maju melawan arah angin. Terbentuknya tip vortex ini dipicu oleh perbedaan tekanan yang sangat tinggi antara sisi hadap (pressure side) dan sisi isap (suction side) bilah. Aliran dari zona bertekanan tinggi cenderung "meluap" ke zona bertekanan rendah di sekitar ujung bilah, menciptakan aliran berputar yang kemudian terlepas ke aliran jejak

(wake). Pelepasan vorteks ini merupakan salah satu sumber utama rugi-rugi aerodinamis (aerodynamic losses) pada turbin.

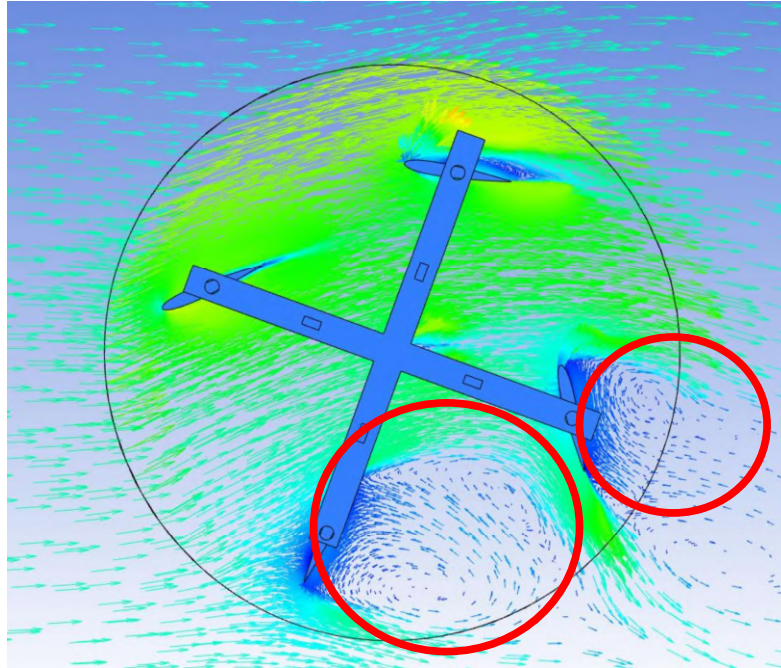


Gambar 4. 49 Aliran vortex VP VAWT ϕ azimuth 140°

4.3.9 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 160°

Gambar 4. 50 juga secara jelas memperlihatkan fenomena pelepasan aliran pusaran atau vorteks (vortex shedding). Fenomena ini paling dominan teramati pada bilah transisi dari Kuadran II menuju Kuadran III, Terjadi juga pada bilah Kuadran III, di mana sebuah struktur vorteks yang koheren terlihat terlepas dari ujung bilah (blade tip) yang sedang bergerak maju melawan arah angin. Terbentuknya tip vortex ini dipicu oleh perbedaan tekanan yang sangat tinggi antara sisi hadap (pressure side) dan sisi isap (suction side) bilah. Aliran dari zona bertekanan tinggi cenderung "meluap" ke zona bertekanan rendah di sekitar ujung bilah, menciptakan

aliran berputar yang kemudian terlepas ke aliran jejak (wake). Pelepasan vorteks ini merupakan salah satu sumber utama rugi-rugi aerodinamis (aerodynamic losses) pada turbin.

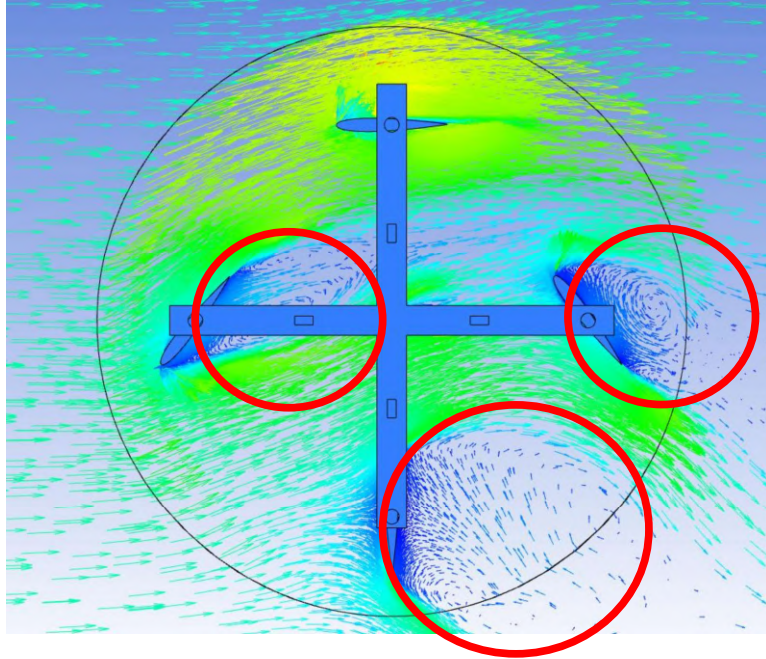


Gambar 4. 50 Aliran vortex VP VAWT ϕ azimuth 160°

4.3.10 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 180°

Gambar 4. 51 juga secara jelas memperlihatkan fenomena pelepasan aliran pusaran atau vorteks (vortex shedding). Fenomena ini paling dominan teramati pada bilah transisi dari Kuadran I menuju Kuadran II, Terjadi juga pada bilah transisi dari Kuadran III menuju Kuadran IV dan pada bilah Kuadran III, di mana sebuah struktur vorteks yang koheren terlihat terlepas dari ujung bilah (blade tip) yang sedang bergerak maju melawan arah angin. Terbentuknya tip vortex ini dipicu oleh perbedaan tekanan yang sangat tinggi antara sisi hadap (pressure side) dan sisi isap

(suction side) bilah. Aliran dari zona bertekanan tinggi cenderung "meluap" ke zona bertekanan rendah di sekitar ujung bilah, menciptakan aliran berputar yang kemudian terlepas ke aliran jejak (wake). Pelepasan vorteks ini merupakan salah satu sumber utama rugi-rugi aerodinamis (aerodynamic losses) pada turbin.

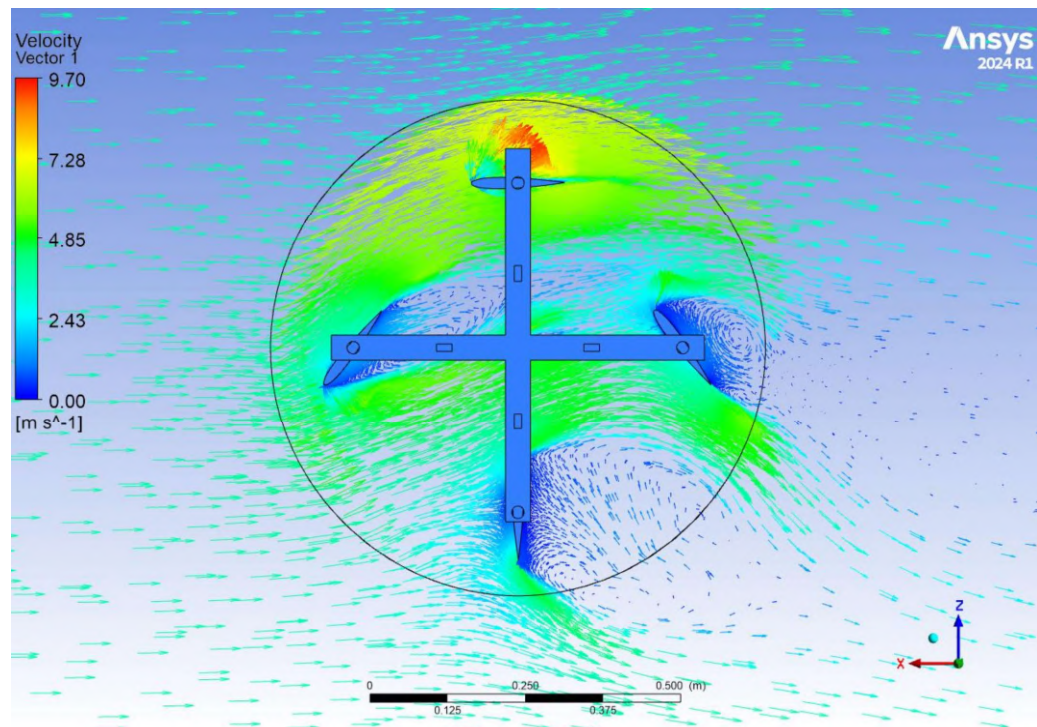


Gambar 4. 51 Aliran vortex VP VAWT ϕ azimuth 180°

4.4 Profil Kontur Kecepatan Angin

4.4.1 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 0°

Gambar 4. 52 menyajikan visualisasi vektor kecepatan aliran udara di sekitar bilah turbin angin yang berputar berlawanan arah jarum jam (counter-clockwise), dengan arah aliran angin datang dari sisi kiri. Analisis pada keempat kuadran menunjukkan perbedaan karakteristik aliran yang signifikan sebagai dampak dari interaksi antara angin dan bilah yang berputar. Kecepatan aliran maksimum mencapai 9.7 m/s, yang ditunjukkan oleh vektor berwarna merah. Fenomena ini teramati secara dominan diantara Kuadran I dan Kuadran IV, di mana bilah turbin bergerak maju melawan arah angin (advancing blade). Kecepatan relatif yang tinggi antara bilah dan angin pada kuadran ini menyebabkan akselerasi aliran udara secara signifikan di sekitar ujung bilah. Sebaliknya, kecepatan aliran minimum mendekati 0.00 m/s, yang divisualisasikan dengan vektor berwarna biru tua. Zona kecepatan terendah ini paling jelas terlihat pada area wake (aliran jejak) di belakang turbin, yang mencakup setiap Kuadran. Penurunan kecepatan drastis ini terjadi karena energi angin telah diekstraksi oleh bilah turbin pada sisi depan serta adanya efek halangan dari struktur turbin. Perbedaan kecepatan yang tajam antara sisi advancing (Kuadran I & IV) dan sisi retreating (Kuadran II & III) ini merupakan karakteristik fundamental dari cara kerja turbin angin sumbu vertikal.

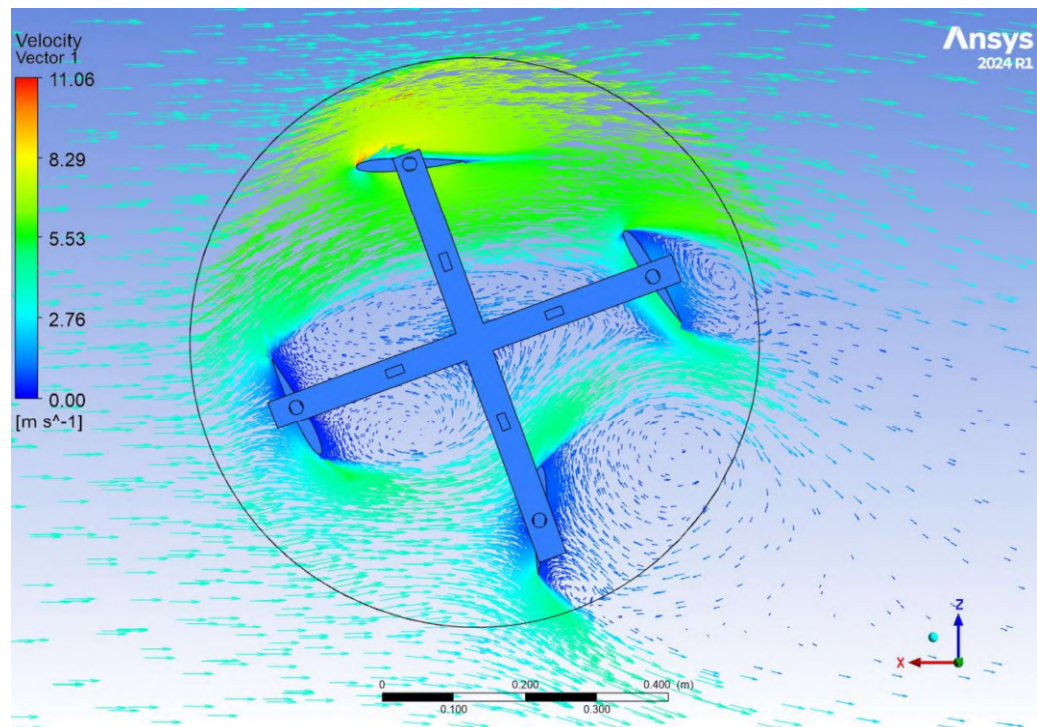


Gambar 4. 52 Profil kontur kecepatan udara VP VAWT ϕ azimuth 0°

4.4.2 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 20°

Gambar 4. 53 menyajikan visualisasi vektor kecepatan aliran udara di sekitar bilah turbin angin yang berputar berlawanan arah jarum jam (counter-clockwise), dengan arah aliran angin datang dari sisi kiri. Analisis pada keempat kuadran menunjukkan perbedaan karakteristik aliran yang signifikan sebagai dampak dari interaksi antara angin dan bilah yang berputar. Kecepatan aliran maksimum mencapai 11.06 m/s, yang ditunjukkan oleh vektor berwarna merah. Fenomena ini teramati secara dominan pada Kuadran I, di mana bilah turbin bergerak maju melawan arah angin (advancing blade). Kecepatan relatif yang tinggi antara bilah dan angin pada kuadran ini menyebabkan akselerasi aliran udara secara signifikan

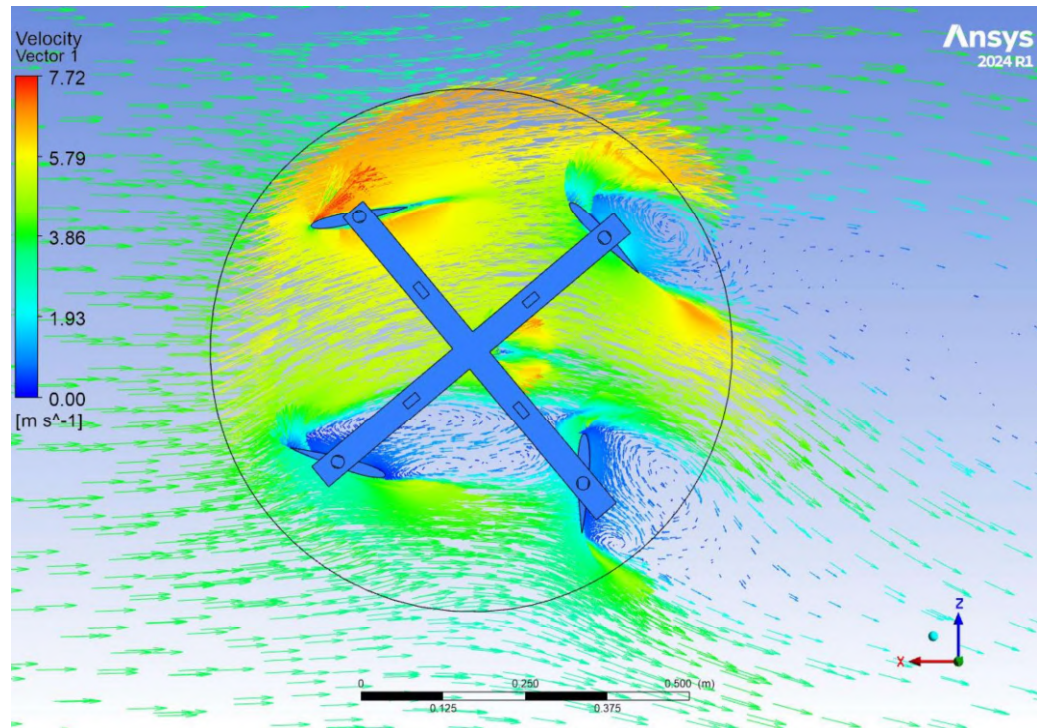
di sekitar ujung bilah. Sebaliknya, kecepatan aliran minimum mendekati 0.00 m/s, yang divisualisasikan dengan vektor berwarna biru tua. Zona kecepatan terendah ini paling jelas terlihat pada area wake (aliran jejak) di belakang turbin, yang mencakup wilayah Kuadran I, Kuadran II dan III. Penurunan kecepatan drastis ini terjadi karena energi angin telah diekstraksi oleh bilah turbin pada sisi depan serta adanya efek halangan dari struktur turbin. Perbedaan kecepatan yang tajam antara sisi advancing (Kuadran I & IV) dan sisi retreating (Kuadran II & III) ini merupakan karakteristik fundamental dari cara kerja turbin angin sumbu vertikal.



Gambar 4. 53 Profil kontur kecepatan udara VP VAWT ϕ azimuth 20°

4.4.3 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 40°

Gambar 4. 54 menyajikan visualisasi vektor kecepatan aliran udara di sekitar bilah turbin angin yang berputar berlawanan arah jarum jam (counter-clockwise), dengan arah aliran angin datang dari sisi kiri. Analisis pada keempat kuadran menunjukkan perbedaan karakteristik aliran yang signifikan sebagai dampak dari interaksi antara angin dan bilah yang berputar. Kecepatan aliran maksimum mencapai 7.72 m/s, yang ditunjukkan oleh vektor berwarna merah. Fenomena ini teramati secara dominan pada Kuadran I dan Kuadran IV, di mana bilah turbin bergerak maju melawan arah angin (advancing blade). Kecepatan relatif yang tinggi antara bilah dan angin pada kuadran ini menyebabkan akselerasi aliran udara secara signifikan di sekitar ujung bilah. Sebaliknya, kecepatan aliran minimum mendekati 0.00 m/s, yang divisualisasikan dengan vektor berwarna biru tua. Zona kecepatan terendah ini paling jelas terlihat pada area wake (aliran jejak) di belakang turbin, yang mencakup wilayah Kuadran II, Kuadran III dan IV. Penurunan kecepatan drastis ini terjadi karena energi angin telah diekstraksi oleh bilah turbin pada sisi depan serta adanya efek halangan dari struktur turbin. Perbedaan kecepatan yang tajam antara sisi advancing (Kuadran I & IV) dan sisi retreating (Kuadran II & III) ini merupakan karakteristik fundamental dari cara kerja turbin angin sumbu vertikal.

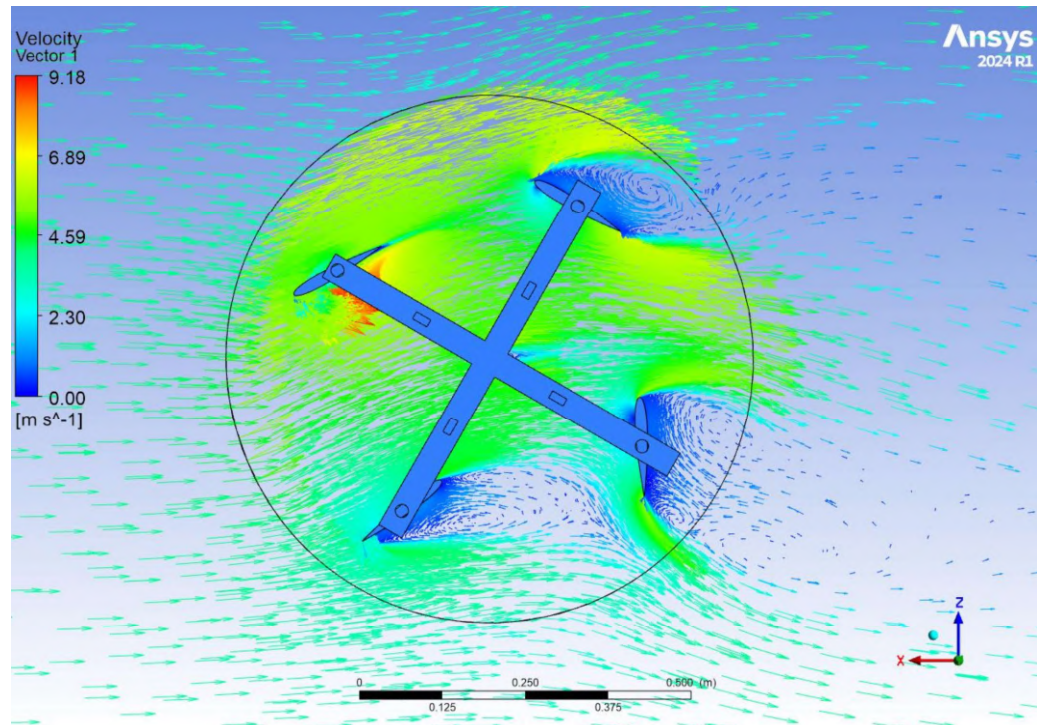


Gambar 4. 54 Profil kontur kecepatan udara VP VAWT ϕ azimuth 40°

4.4.4 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 60°

Gambar 4. 55 menyajikan visualisasi vektor kecepatan aliran udara di sekitar bilah turbin angin yang berputar berlawanan arah jarum jam (counter-clockwise), dengan arah aliran angin datang dari sisi kiri. Analisis pada keempat kuadran menunjukkan perbedaan karakteristik aliran yang signifikan sebagai dampak dari interaksi antara angin dan bilah yang berputar. Kecepatan aliran maksimum mencapai 9.18 m/s, yang ditunjukkan oleh vektor berwarna merah. Fenomena ini teramati secara dominan pada Kuadran I, di mana bilah turbin bergerak maju melawan arah angin (advancing blade). Kecepatan relatif yang tinggi antara bilah dan angin pada kuadran ini menyebabkan akselerasi aliran udara secara signifikan

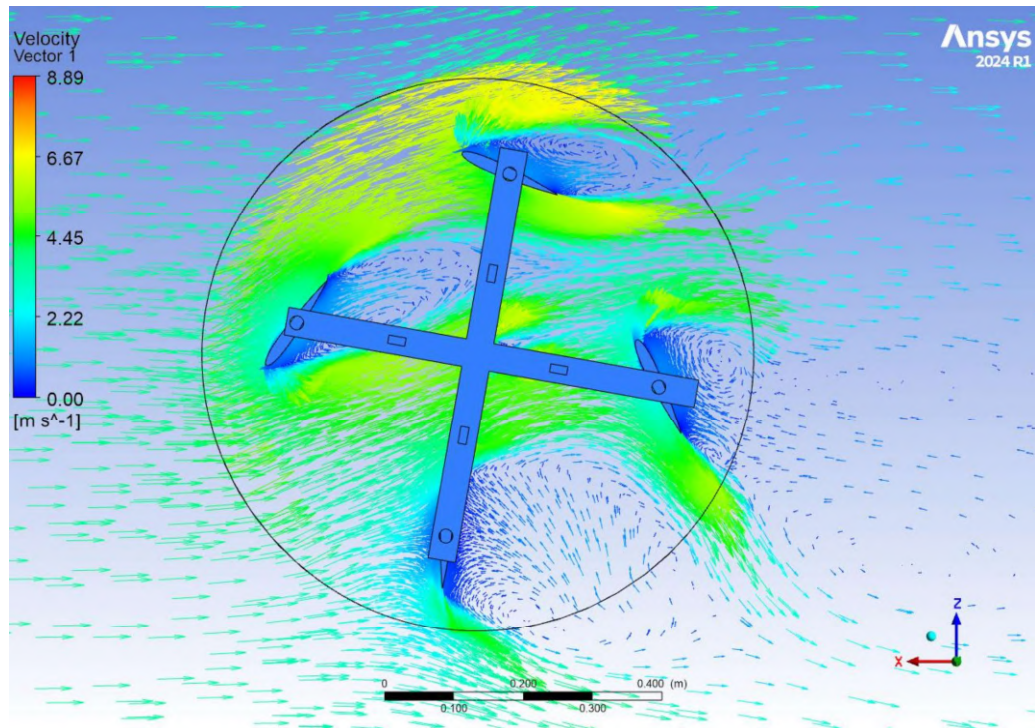
di sekitar ujung bilah. Sebaliknya, kecepatan aliran minimum mendekati 0.00 m/s, yang divisualisasikan dengan vektor berwarna biru tua. Zona kecepatan terendah ini paling jelas terlihat pada area wake (aliran jejak) di belakang turbin, yang mencakup wilayah Kuadran II, Kuadran III dan IV. Penurunan kecepatan drastis ini terjadi karena energi angin telah diekstraksi oleh bilah turbin pada sisi depan serta adanya efek halangan dari struktur turbin. Perbedaan kecepatan yang tajam antara sisi advancing (Kuadran I & IV) dan sisi retreating (Kuadran II & III) ini merupakan karakteristik fundamental dari cara kerja turbin angin sumbu vertikal.



Gambar 4. 55 Profil kontur kecepatan udara VP VAWT ϕ azimuth 60°

4.4.5 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 80°

Gambar 4. 56 menyajikan visualisasi vektor kecepatan aliran udara di sekitar bilah turbin angin yang berputar berlawanan arah jarum jam (counter-clockwise), dengan arah aliran angin datang dari sisi kiri. Analisis pada keempat kuadran menunjukkan perbedaan karakteristik aliran yang signifikan sebagai dampak dari interaksi antara angin dan bilah yang berputar. Kecepatan aliran maksimum mencapai 8.89 m/s, yang ditunjukkan oleh vektor berwarna merah. Fenomena ini teramati secara dominan pada Kuadran IV, di mana bilah turbin bergerak maju melawan arah angin (advancing blade). Kecepatan relatif yang tinggi antara bilah dan angin pada kuadran ini menyebabkan akselerasi aliran udara secara signifikan di sekitar ujung bilah. Sebaliknya, kecepatan aliran minimum mendekati 0.00 m/s, yang divisualisasikan dengan vektor berwarna biru tua. Zona kecepatan terendah ini paling jelas terlihat pada area wake (aliran jejak) di belakang turbin, yang mencakup setiap wilayah Kuadran. Penurunan kecepatan drastis ini terjadi karena energi angin telah diekstraksi oleh bilah turbin pada sisi depan serta adanya efek halangan dari struktur turbin. Perbedaan kecepatan yang tajam antara sisi advancing (Kuadran I & IV) dan sisi retreating (Kuadran II & III) ini merupakan karakteristik fundamental dari cara kerja turbin angin sumbu vertikal.

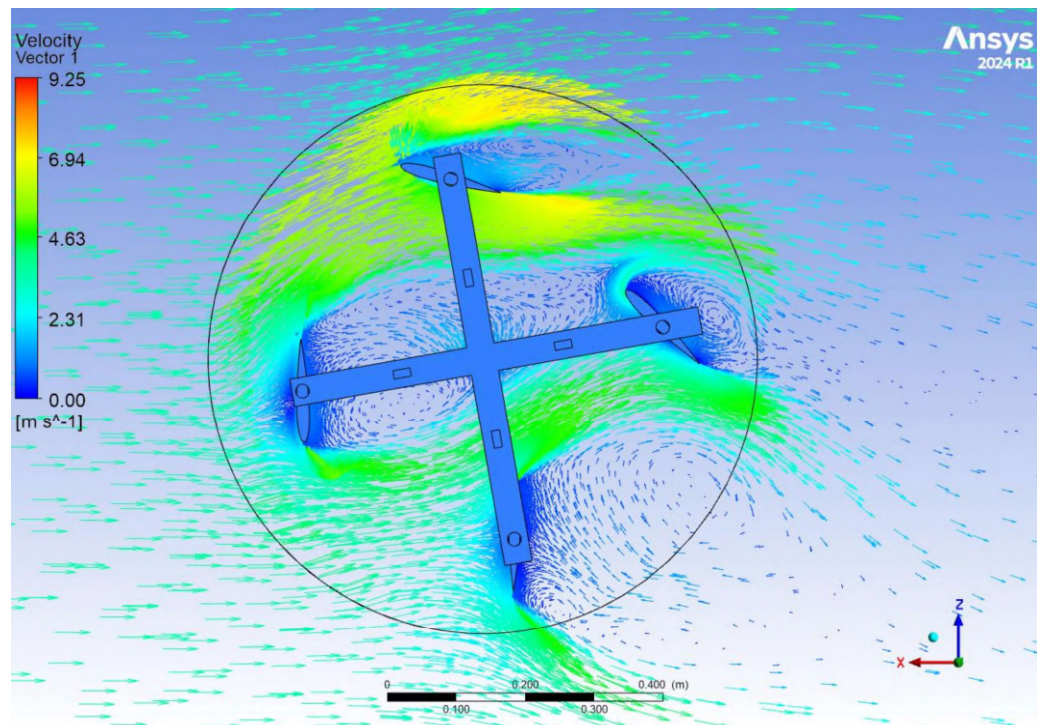


Gambar 4. 56 Profil kontur kecepatan udara VP VAWT ϕ azimuth 80°

4.4.6 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 100°

Gambar 4. 57 menyajikan visualisasi vektor kecepatan aliran udara di sekitar bilah turbin angin yang berputar berlawanan arah jarum jam (counter-clockwise), dengan arah aliran angin datang dari sisi kiri. Analisis pada keempat kuadran menunjukkan perbedaan karakteristik aliran yang signifikan sebagai dampak dari interaksi antara angin dan bilah yang berputar. Kecepatan aliran maksimum mencapai 9.25 m/s, yang ditunjukkan oleh vektor berwarna merah. Fenomena ini teramati secara dominan pada Kuadran I, di mana bilah turbin bergerak maju melawan arah angin (advancing blade). Kecepatan relatif yang tinggi antara bilah dan angin pada kuadran ini menyebabkan akselerasi aliran udara secara signifikan

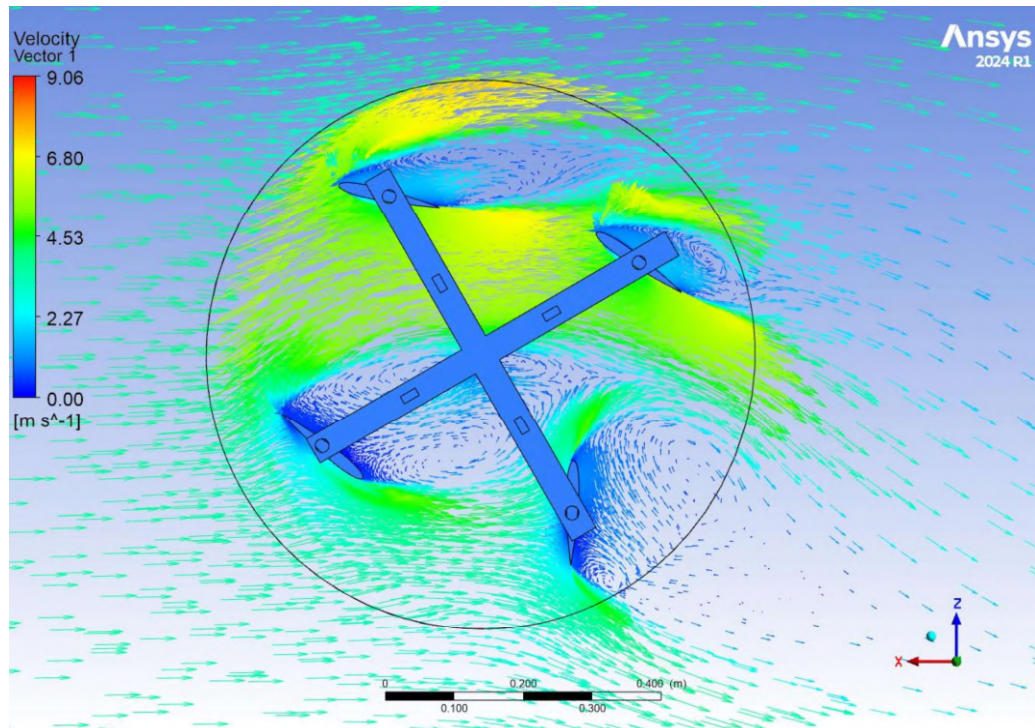
di sekitar ujung bilah. Sebaliknya, kecepatan aliran minimum mendekati 0.00 m/s, yang divisualisasikan dengan vektor berwarna biru tua. Zona kecepatan terendah ini paling jelas terlihat pada area wake (aliran jejak) di belakang turbin, yang mencakup setiap wilayah Kuadran. Penurunan kecepatan drastis ini terjadi karena energi angin telah diekstraksi oleh bilah turbin pada sisi depan serta adanya efek halangan dari struktur turbin. Perbedaan kecepatan yang tajam antara sisi advancing (Kuadran I & IV) dan sisi retreating (Kuadran II & III) ini merupakan karakteristik fundamental dari cara kerja turbin angin sumbu vertikal.



Gambar 4. 57 Profil kontur kecepatan udara VP VAWT ϕ azimuth 100°

4.4.7 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 120°

Gambar 4. 58 menyajikan visualisasi vektor kecepatan aliran udara di sekitar bilah turbin angin yang berputar berlawanan arah jarum jam (counter-clockwise), dengan arah aliran angin datang dari sisi kiri. Analisis pada keempat kuadran menunjukkan perbedaan karakteristik aliran yang signifikan sebagai dampak dari interaksi antara angin dan bilah yang berputar. Kecepatan aliran maksimum mencapai 9.06 m/s, yang ditunjukkan oleh vektor berwarna merah. Fenomena ini teramati secara dominan pada Kuadran I, di mana bilah turbin bergerak maju melawan arah angin (advancing blade). Kecepatan relatif yang tinggi antara bilah dan angin pada kuadran ini menyebabkan akselerasi aliran udara secara signifikan di sekitar ujung bilah. Sebaliknya, kecepatan aliran minimum mendekati 0.00 m/s, yang divisualisasikan dengan vektor berwarna biru tua. Zona kecepatan terendah ini paling jelas terlihat pada area wake (aliran jejak) di belakang turbin, yang mencakup setiap wilayah Kuadran. Penurunan kecepatan drastis ini terjadi karena energi angin telah diekstraksi oleh bilah turbin pada sisi depan serta adanya efek halangan dari struktur turbin. Perbedaan kecepatan yang tajam antara sisi advancing (Kuadran I & IV) dan sisi retreating (Kuadran II & III) ini merupakan karakteristik fundamental dari cara kerja turbin angin sumbu vertikal.

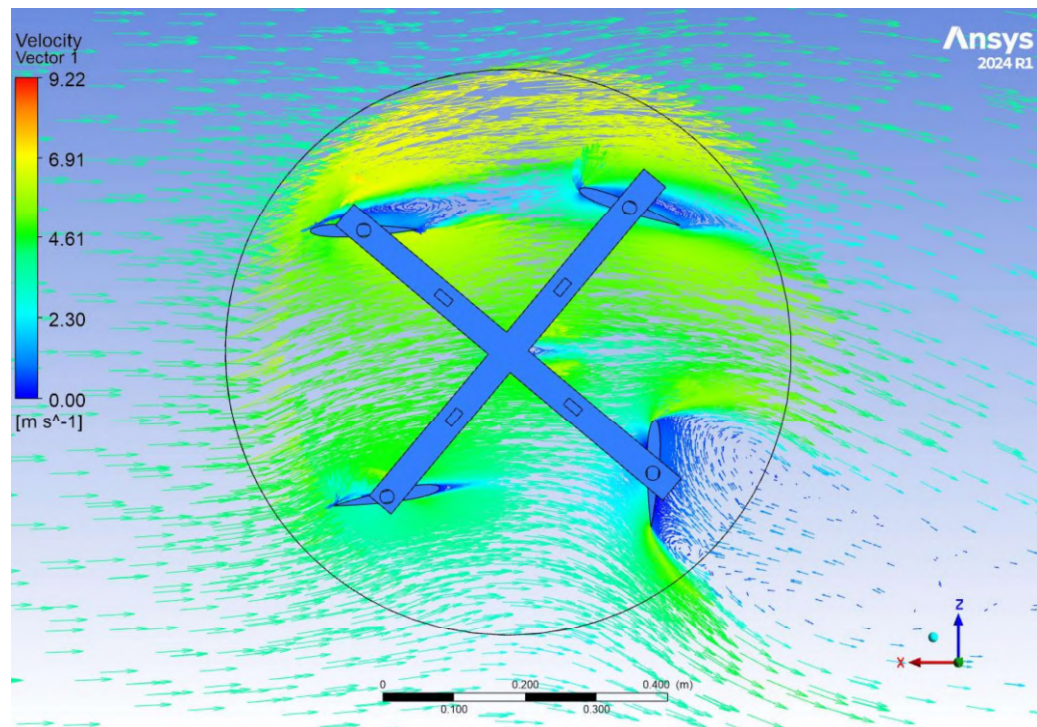


Gambar 4. 58 Profil kontur kecepatan udara VP VAWT ϕ azimuth 120°

4.4.8 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 140°

Gambar 4. 59 menyajikan visualisasi vektor kecepatan aliran udara di sekitar bilah turbin angin yang berputar berlawanan arah jarum jam (counter-clockwise), dengan arah aliran angin datang dari sisi kiri. Analisis pada keempat kuadran menunjukkan perbedaan karakteristik aliran yang signifikan sebagai dampak dari interaksi antara angin dan bilah yang berputar. Kecepatan aliran maksimum mencapai 9.22 m/s, yang ditunjukkan oleh vektor berwarna merah. Fenomena ini teramati secara dominan pada Kuadran I, di mana bilah turbin bergerak maju melawan arah angin (advancing blade). Kecepatan relatif yang tinggi antara bilah dan angin pada kuadran ini menyebabkan akselerasi aliran udara secara signifikan

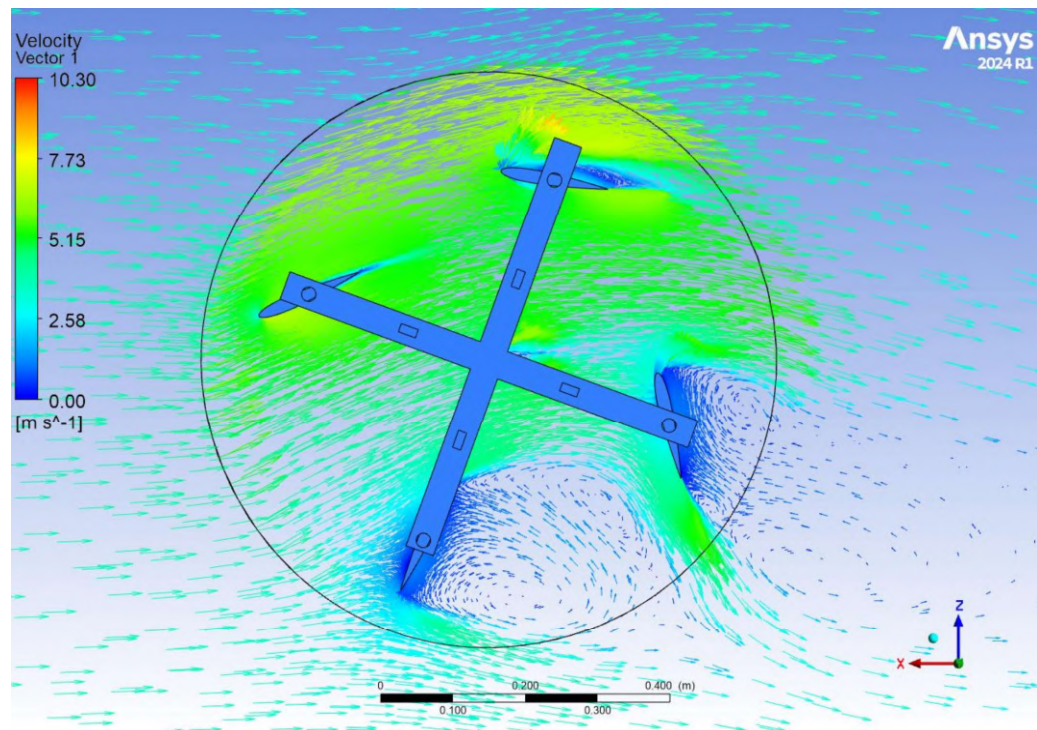
di sekitar ujung bilah. Sebaliknya, kecepatan aliran minimum mendekati 0.00 m/s, yang divisualisasikan dengan vektor berwarna biru tua. Zona kecepatan terendah ini paling jelas terlihat pada area wake (aliran jejak) di belakang turbin, yang mencakup wilayah Kuadran I dan III. Penurunan kecepatan drastis ini terjadi karena energi angin telah diekstraksi oleh bilah turbin pada sisi depan serta adanya efek halangan dari struktur turbin. Perbedaan kecepatan yang tajam antara sisi advancing (Kuadran I & IV) dan sisi retreating (Kuadran II & III) ini merupakan karakteristik fundamental dari cara kerja turbin angin sumbu vertikal.



Gambar 4. 59 Profil kontur kecepatan udara VP VAWT ϕ azimuth 140°

4.4.9 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 160°

Gambar 4. 60 menyajikan visualisasi vektor kecepatan aliran udara di sekitar turbin angin yang berputar berlawanan arah jarum jam (counter-clockwise), dengan arah aliran angin datang dari sisi kiri. Analisis pada keempat kuadran menunjukkan perbedaan karakteristik aliran yang signifikan sebagai dampak dari interaksi antara angin dan bilah yang berputar. Kecepatan aliran maksimum mencapai 10.30 m/s, yang ditunjukkan oleh vektor berwarna merah. Fenomena ini teramati secara dominan pada Kuadran IV, di mana bilah turbin bergerak maju melawan arah angin (advancing blade). Kecepatan relatif yang tinggi antara bilah dan angin pada kuadran ini menyebabkan akselerasi aliran udara secara signifikan di sekitar ujung bilah. Sebaliknya, kecepatan aliran minimum mendekati 0.00 m/s, yang divisualisasikan dengan vektor berwarna biru tua. Zona kecepatan terendah ini paling jelas terlihat pada area wake (aliran jejak) di belakang turbin, yang mencakup wilayah Kuadran II dan III. Penurunan kecepatan drastis ini terjadi karena energi angin telah diekstraksi oleh bilah turbin pada sisi depan serta adanya efek halangan dari struktur turbin. Perbedaan kecepatan yang tajam antara sisi advancing (Kuadran I & IV) dan sisi retreating (Kuadran II & III) ini merupakan karakteristik fundamental dari cara kerja turbin angin sumbu vertikal.

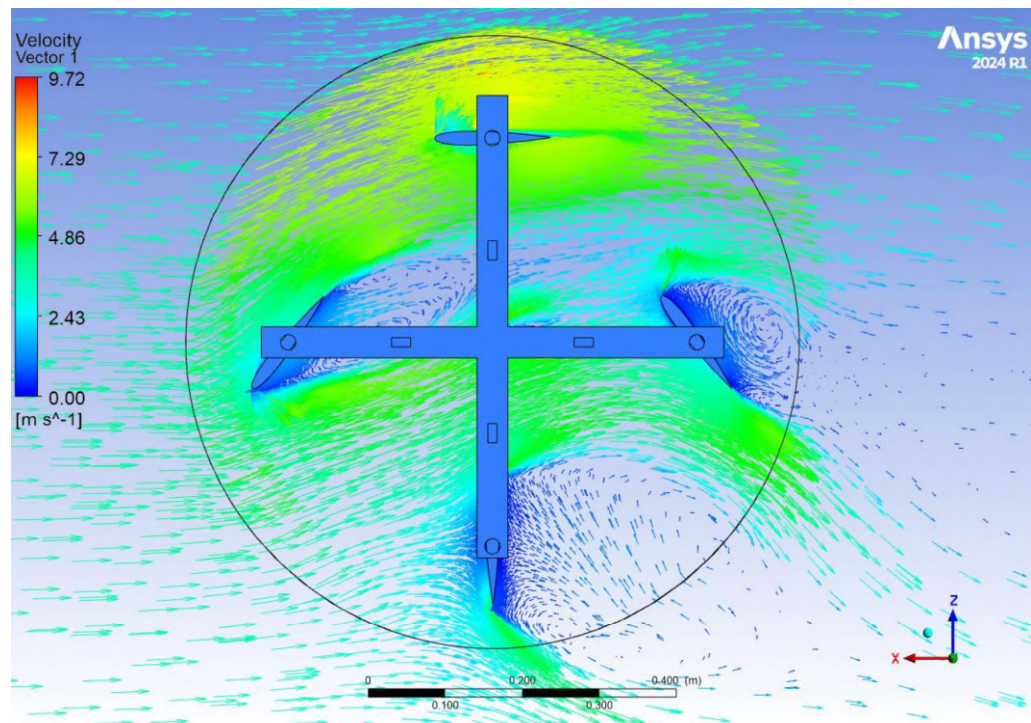


Gambar 4. 60 Profil kontur kecepatan udara VP VAWT ϕ azimuth 160°

4.4.10 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 180°

Gambar 4. 61 menyajikan visualisasi vektor kecepatan aliran udara di sekitar bilah turbin angin yang berputar berlawanan arah jarum jam (counter-clockwise), dengan arah aliran angin datang dari sisi kiri. Analisis pada keempat kuadran menunjukkan perbedaan karakteristik aliran yang signifikan sebagai dampak dari interaksi antara angin dan bilah yang berputar. Kecepatan aliran maksimum mencapai 9.72 m/s, yang ditunjukkan oleh vektor berwarna merah. Fenomena ini teramati secara dominan diantara Kuadran I dan Kuadran IV, di mana bilah turbin bergerak maju melawan arah angin (advancing blade). Kecepatan relatif yang tinggi antara bilah dan angin pada kuadran ini menyebabkan akselerasi aliran udara secara

signifikan di sekitar ujung bilah. Sebaliknya, kecepatan aliran minimum mendekati 0.00 m/s, yang divisualisasikan dengan vektor berwarna biru tua. Zona kecepatan terendah ini paling jelas terlihat pada area wake (aliran jejak) di belakang turbin, yang mencakup wilayah Kuadran III dan IV. Penurunan kecepatan drastis ini terjadi karena energi angin telah diekstraksi oleh bilah turbin pada sisi depan serta adanya efek halangan dari struktur turbin. Perbedaan kecepatan yang tajam antara sisi advancing (Kuadran I & IV) dan sisi retreating (Kuadran II & III) ini merupakan karakteristik fundamental dari cara kerja turbin angin sumbu vertikal.

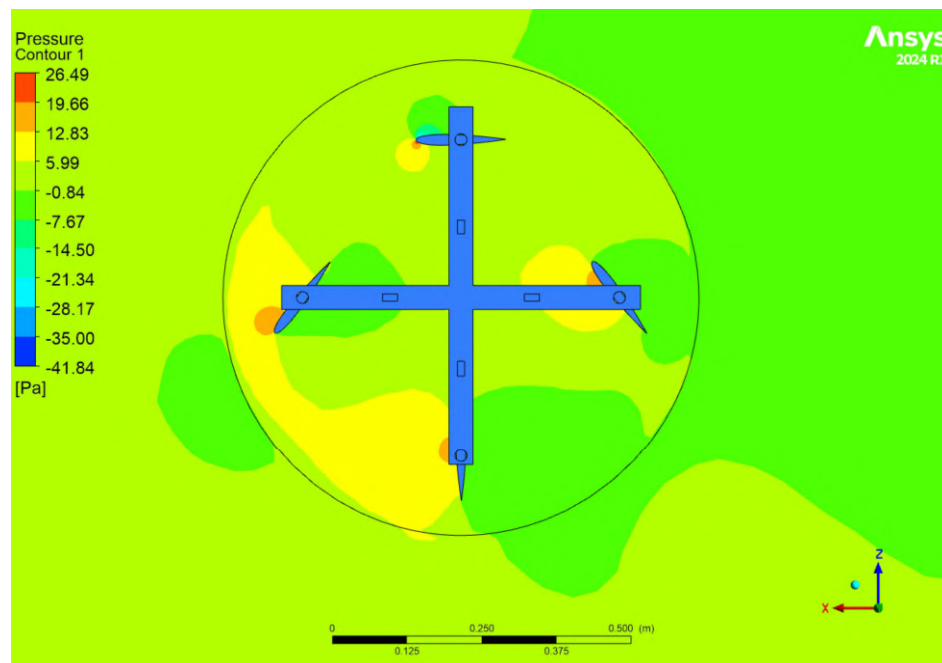


Gambar 4. 61 Profil kontur kecepatan udara VP VAWT ϕ azimuth 180°

4.5 Profil Kontur Tekanan

4.5.1 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 0°

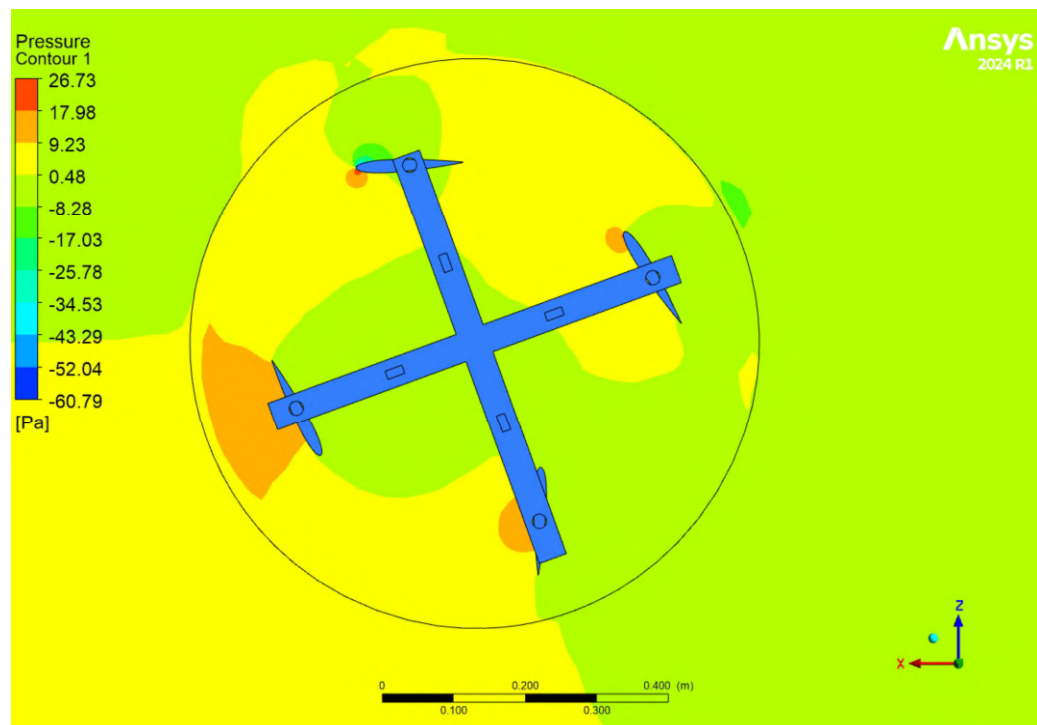
Gambar 4. 62 memetakan distribusi medan tekanan statis pada bilah turbin. Tekanan statis maksimum (26.49 Pa) teridentifikasi pada sisi hadap (pressure side) di setiap bilah. Lokasi ini bertepatan dengan titik stagnasi pada bilah sisi advancing, di mana energi kinetik aliran terkonversi menjadi tekanan. Sementara itu, tekanan rendah (-7.67 Pa) terbentuk pada sisi isap (suction side) di setiap bilah. Fenomena ini merupakan konsekuensi dari percepatan aliran lokal, sesuai dengan Prinsip Bernoulli. Gradien tekanan yang tajam antara pressure side dan suction side inilah yang membangkitkan gaya aerodinamis, menghasilkan torsi untuk menggerakkan rotasi turbin.



Gambar 4. 62 Profil kontur tekanan VP VAWT ϕ azimuth 0°

4.5.2 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 20°

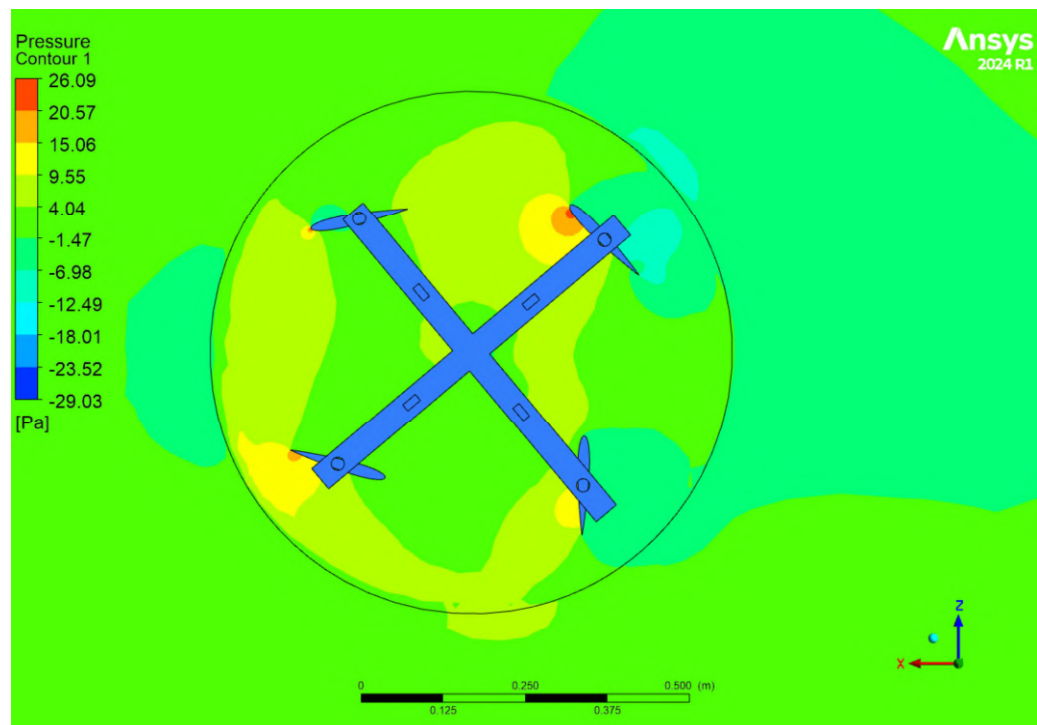
Gambar 4. 63 memetakan distribusi medan tekanan statis pada bilah turbin. Tekanan statis maksimum (26.72 Pa) teridentifikasi pada sisi hadap (pressure side) di setiap bilah. Lokasi ini bertepatan dengan titik stagnasi pada bilah sisi advancing, di mana energi kinetik aliran terkonversi menjadi tekanan. Sementara itu, tekanan rendah (-8.28 Pa) terbentuk pada sisi isap (suction side) di setiap bilah. Fenomena ini merupakan konsekuensi dari percepatan aliran lokal, sesuai dengan Prinsip Bernoulli. Gradien tekanan yang tajam antara pressure side dan suction side inilah yang membangkitkan gaya aerodinamis, menghasilkan torsi untuk menggerakkan rotasi turbin.



Gambar 4. 63 Profil kontur tekanan VP VAWT ϕ azimuth 20°

4.5.3 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 40°

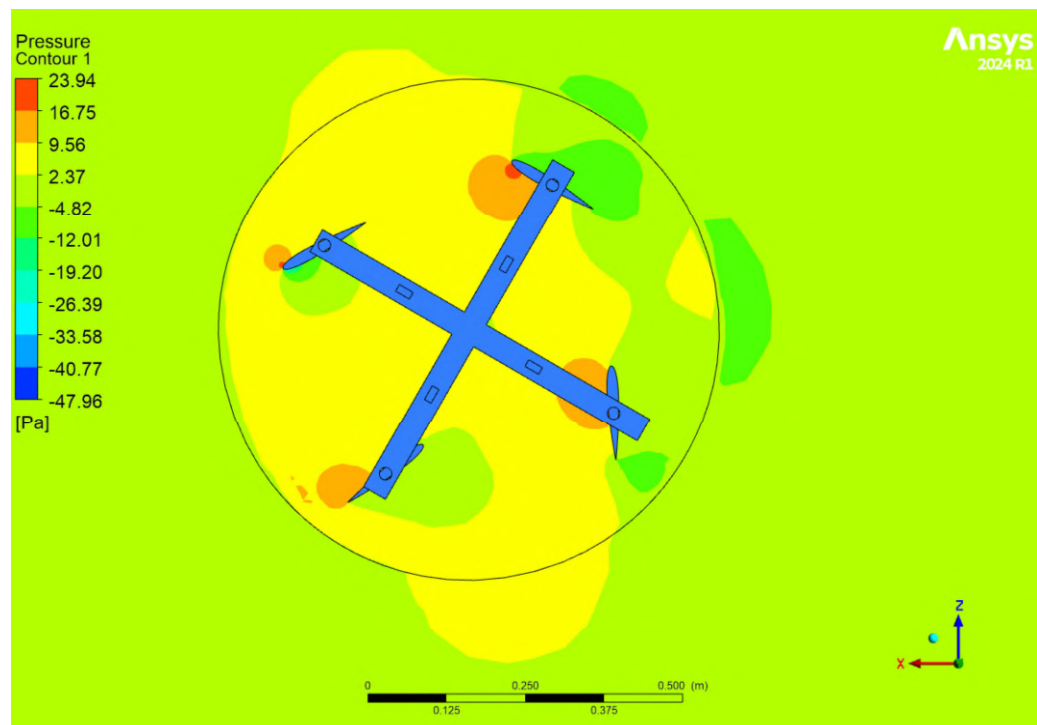
Gambar 4. 64 memetakan distribusi medan tekanan statis pada bilah turbin. Tekanan statis maksimum (26.09 Pa) teridentifikasi pada sisi hadap (pressure side) di setiap bilah. Lokasi ini bertepatan dengan titik stagnasi pada bilah sisi advancing, di mana energi kinetik aliran terkonversi menjadi tekanan. Sementara itu, tekanan rendah (-6.98 Pa) terbentuk pada sisi isap (suction side) di setiap bilah. Fenomena ini merupakan konsekuensi dari percepatan aliran lokal, sesuai dengan Prinsip Bernoulli. Gradien tekanan yang tajam antara pressure side dan suction side inilah yang membangkitkan gaya aerodinamis, menghasilkan torsi untuk menggerakkan rotasi turbin.



Gambar 4. 64 Profil kontur tekanan VP VAWT ϕ azimuth 40°

4.5.4 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 60°

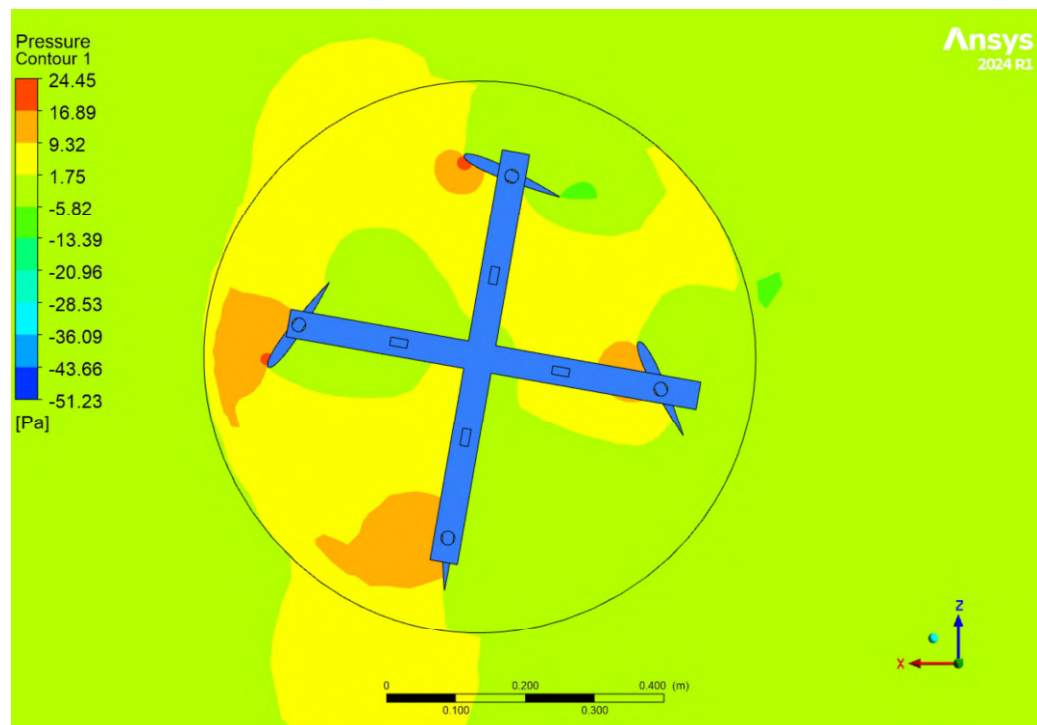
Gambar 4. 65 memetakan distribusi medan tekanan statis pada bilah turbin. Tekanan statis maksimum (23.94 Pa) teridentifikasi pada sisi hadap (pressure side) di setiap bilah. Lokasi ini bertepatan dengan titik stagnasi pada bilah sisi advancing, di mana energi kinetik aliran terkonversi menjadi tekanan. Sementara itu, tekanan rendah (-4.82 Pa) terbentuk pada sisi isap (suction side) di setiap bilah. Fenomena ini merupakan konsekuensi dari percepatan aliran lokal, sesuai dengan Prinsip Bernoulli. Gradien tekanan yang tajam antara pressure side dan suction side inilah yang membangkitkan gaya aerodinamis, menghasilkan torsi untuk menggerakkan rotasi turbin.



Gambar 4. 65 Profil kontur tekanan VP VAWT ϕ azimuth 60°

4.5.5 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 80°

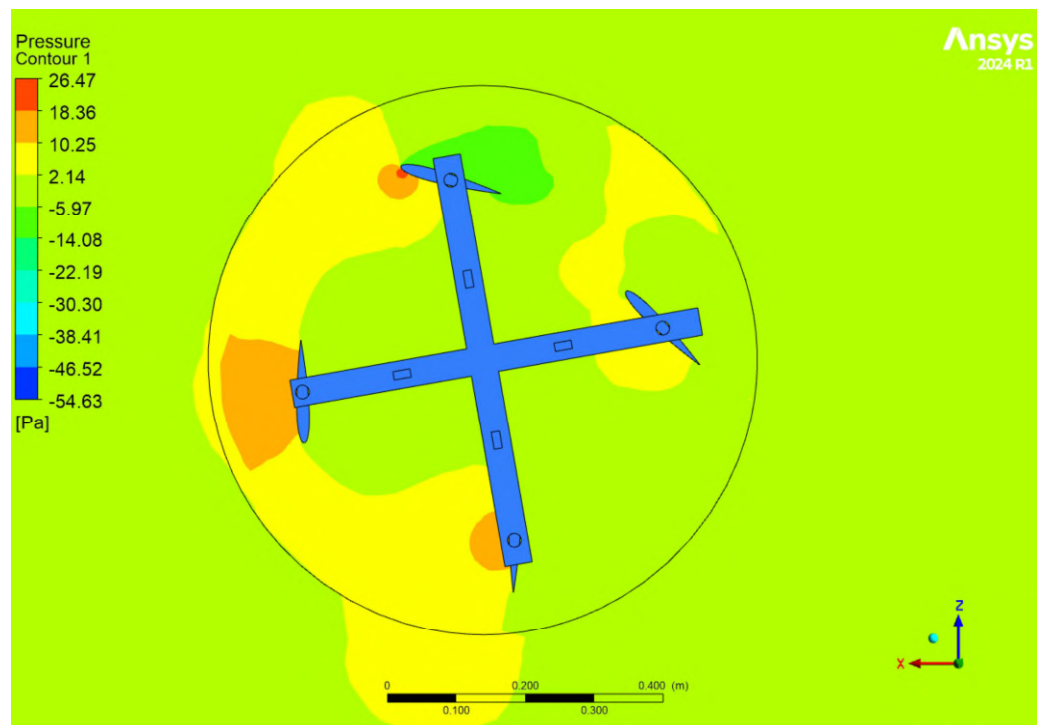
Gambar 4. 66 memetakan distribusi medan tekanan statis pada bilah turbin. Tekanan statis maksimum (24.45 Pa) teridentifikasi pada sisi hadap (pressure side) di setiap bilah. Lokasi ini bertepatan dengan titik stagnasi pada bilah sisi advancing, di mana energi kinetik aliran terkonversi menjadi tekanan. Sementara itu, tekanan rendah (-5.82 Pa) terbentuk pada sisi isap (suction side) di setiap bilah. Fenomena ini merupakan konsekuensi dari percepatan aliran lokal, sesuai dengan Prinsip Bernoulli. Gradien tekanan yang tajam antara pressure side dan suction side inilah yang membangkitkan gaya aerodinamis, menghasilkan torsi untuk menggerakkan rotasi turbin.



Gambar 4. 66 Profil kontur tekanan VP VAWT ϕ azimuth 80°

4.5.6 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 100°

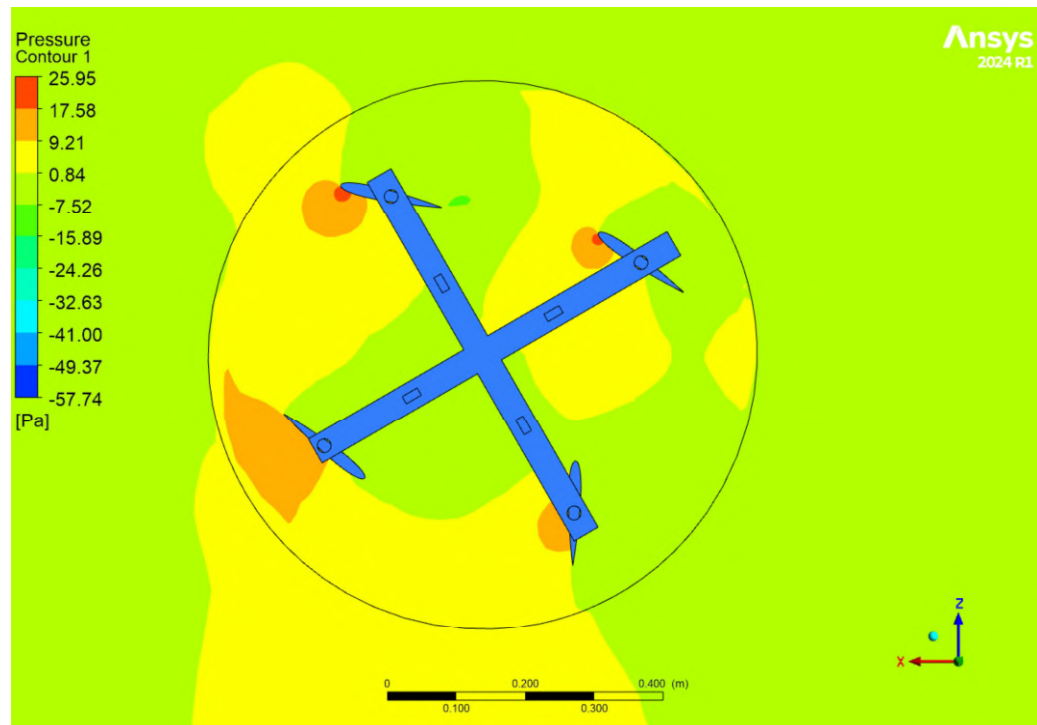
Gambar 4. 67 memetakan distribusi medan tekanan statis pada bilah turbin. Tekanan statis maksimum (26.47 Pa) teridentifikasi pada sisi hadap (pressure side) di setiap bilah. Lokasi ini bertepatan dengan titik stagnasi pada bilah sisi advancing, di mana energi kinetik aliran terkonversi menjadi tekanan. Sementara itu, tekanan rendah (-5.97 Pa) terbentuk pada sisi isap (suction side) di setiap bilah. Fenomena ini merupakan konsekuensi dari percepatan aliran lokal, sesuai dengan Prinsip Bernoulli. Gradien tekanan yang tajam antara pressure side dan suction side inilah yang membangkitkan gaya aerodinamis, menghasilkan torsi untuk menggerakkan rotasi turbin.



Gambar 4. 67 Profil kontur tekanan VP VAWT ϕ azimuth 100°

4.5.7 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 120°

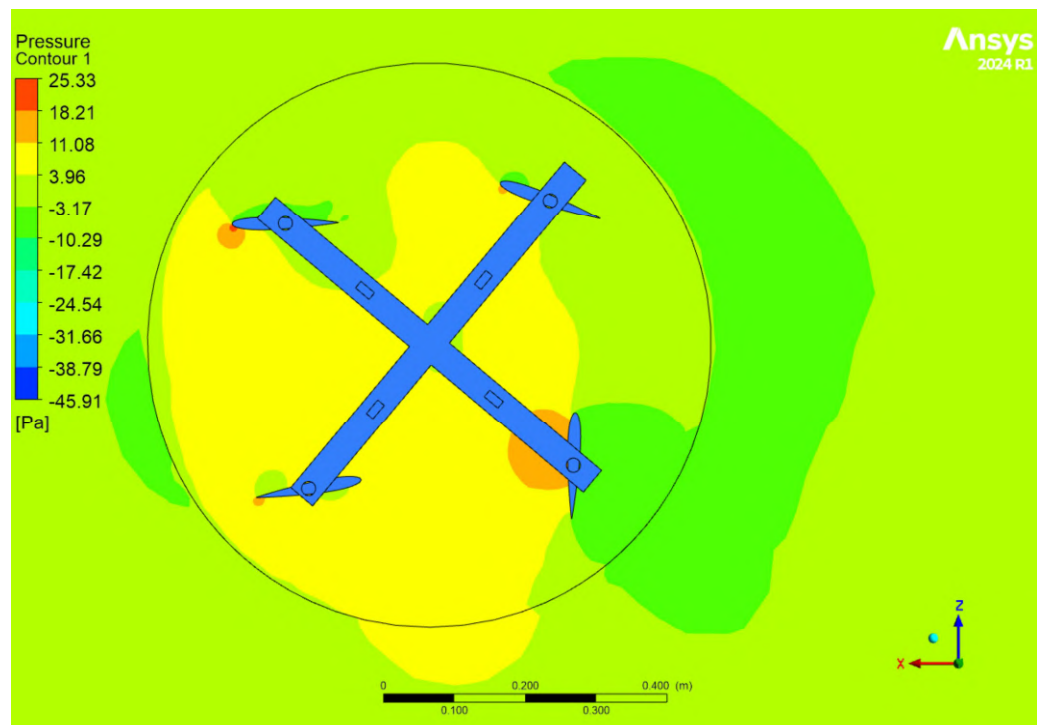
Gambar 4. 68 memetakan distribusi medan tekanan statis pada bilah turbin. Tekanan statis maksimum (25.95 Pa) teridentifikasi pada sisi hadap (pressure side) di setiap bilah. Lokasi ini bertepatan dengan titik stagnasi pada bilah sisi advancing, di mana energi kinetik aliran terkonversi menjadi tekanan. Sementara itu, tekanan rendah (-7.52 Pa) terbentuk pada sisi isap (suction side) di setiap bilah. Fenomena ini merupakan konsekuensi dari percepatan aliran lokal, sesuai dengan Prinsip Bernoulli. Gradien tekanan yang tajam antara pressure side dan suction side inilah yang membangkitkan gaya aerodinamis, menghasilkan torsi untuk menggerakkan rotasi turbin.



Gambar 4. 68 Profil kontur tekanan VP VAWT ϕ azimuth 120°

4.5.8 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 140°

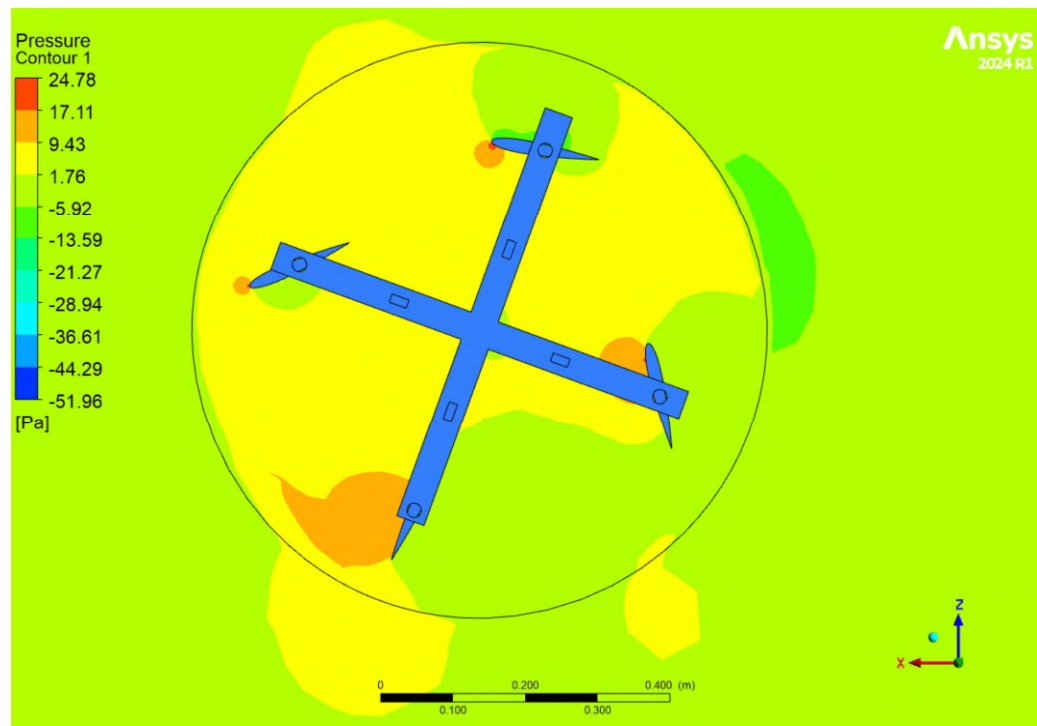
Gambar 4. 69 memetakan distribusi medan tekanan statis pada bilah turbin. Tekanan statis maksimum (25.33 Pa) teridentifikasi pada sisi hadap (pressure side) di setiap bilah. Lokasi ini bertepatan dengan titik stagnasi pada bilah sisi advancing, di mana energi kinetik aliran terkonversi menjadi tekanan. Sementara itu, tekanan rendah (-3.17 Pa) terbentuk pada sisi isap (suction side) di setiap bilah. Fenomena ini merupakan konsekuensi dari percepatan aliran lokal, sesuai dengan Prinsip Bernoulli. Gradien tekanan yang tajam antara pressure side dan suction side inilah yang membangkitkan gaya aerodinamis, menghasilkan torsi untuk menggerakkan rotasi turbin.



Gambar 4. 69 Profil kontur tekanan VP VAWT ϕ azimuth 140°

4.5.9 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 160°

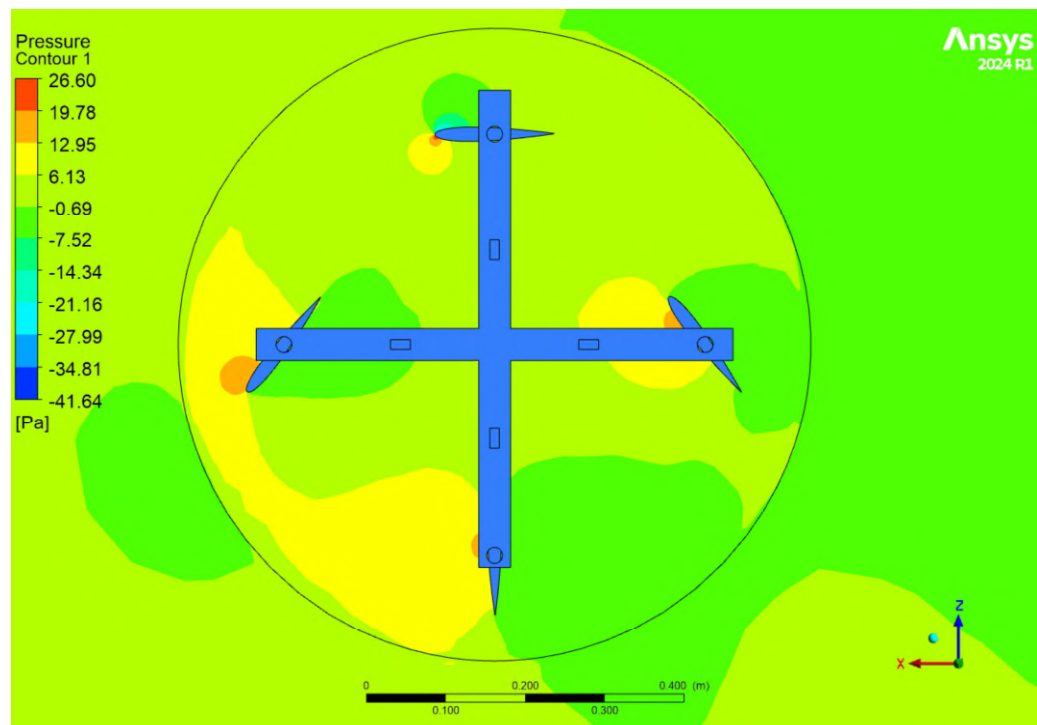
Gambar 4. 70 memetakan distribusi medan tekanan statis pada bilah turbin. Tekanan statis maksimum (24.78 Pa) teridentifikasi pada sisi hadap (pressure side) di setiap bilah. Lokasi ini bertepatan dengan titik stagnasi pada bilah sisi advancing, di mana energi kinetik aliran terkonversi menjadi tekanan. Sementara itu, tekanan rendah (-5.92 Pa) terbentuk pada sisi isap (suction side) di setiap bilah. Fenomena ini merupakan konsekuensi dari percepatan aliran lokal, sesuai dengan Prinsip Bernoulli. Gradien tekanan yang tajam antara pressure side dan suction side inilah yang membangkitkan gaya aerodinamis, menghasilkan torsi untuk menggerakkan rotasi turbin.



Gambar 4. 70 Profil kontur tekanan VP VAWT ϕ azimuth 160°

4.5.10 Geometri VP VAWT ϕ Azimuth 180°

Gambar 4. 71 memetakan distribusi medan tekanan statis pada bilah turbin. Tekanan statis maksimum (26.60 Pa) teridentifikasi pada sisi hadap (pressure side) di setiap bilah. Lokasi ini bertepatan dengan titik stagnasi pada bilah sisi advancing, di mana energi kinetik aliran terkonversi menjadi tekanan. Sementara itu, tekanan rendah (-7.52 Pa) terbentuk pada sisi isap (suction side) di setiap bilah. Fenomena ini merupakan konsekuensi dari percepatan aliran lokal, sesuai dengan Prinsip Bernoulli. Gradien tekanan yang tajam antara pressure side dan suction side inilah yang membangkitkan gaya aerodinamis, menghasilkan torsi untuk menggerakkan rotasi turbin.



Gambar 4. 71 Profil kontur tekanan VP VAWT ϕ azimuth 180°

4.6 Nilai Kecepatan dan Tekanan Angin disetiap 20° kondisi 0° hingga 180°

ϕ Azimuth

Untuk menganalisis pengaruh perubahan sudut azimuth (ϕ) terhadap performa turbin, disajikan data hasil simulasi CFD pada Tabel 4.1. Tabel ini merangkum nilai kecepatan aliran dan tekanan yang terekam pada rentang 0° hingga 180° dengan interval pengamatan setiap 20°. Berdasarkan rekapitulasi data, kecepatan maksimum aliran teridentifikasi sebesar 11.06 m/s pada saat sudu turbin berada di sudut azimuth $\phi = 20^\circ$. Nilai tekanan maksimum terpantau sebesar 26.72 Pa pada sudut azimuth $\phi = 20^\circ$, yang umumnya berlokasi di sisi tekanan (*pressure side*) sudu. Sementara itu, tekanan minimum diobservasi sebesar -8.28 Pa pada posisi $\phi = 20^\circ$, yang merepresentasikan area sisi isap (*suction side*).

Tabel 4.1 Tabel nilai kecepatan dan tekanan angin disetiap 20° kondisi 0° hingga 180° ϕ azimuth

Kondisi ϕ azimuth	Kecepatan Maksimum	Kecepatan Minimum	Tekanan Maksimum	Tekanan Minimum
0°	9.7 m/s	0 m/s	26.49 Pa	-7.67 Pa
20°	11.06 m/s	0 m/s	26.72 Pa	-8.28 Pa
40°	7.72 m/s	0 m/s	26.09 Pa	-6.98 Pa
60°	9.18 m/s	0 m/s	23.94 Pa	-4.82 Pa
80°	8.89 m/s	0 m/s	24.45 Pa	-5.82 Pa
100°	9.25 m/s	0 m/s	26.47 Pa	-5.97 Pa
120°	9.06 m/s	0 m/s	25.95 Pa	-7.52 Pa
140°	9.22 m/s	0 m/s	25.33 Pa	-3.17 Pa
160°	10.30 m/s	0 m/s	24.78 Pa	-5.92 Pa
180°	9.72 m/s	0 m/s	26.60 Pa	-7.52 Pa

4.7 Kontur Kecepatan Tertinggi

Kecepatan aliran tertinggi pada kontur mencapai 11.06 m/s, jauh melebihi kecepatan inlet 3,7 m/s. Fenomena ini valid dan disebabkan oleh kombinasi dua efek aerodinamis. Pertama, kecepatan relatif yang tinggi terbentuk dari penjumlahan kecepatan angin dengan kecepatan rotasi bilah. Kedua, aliran berkecepatan tinggi ini dipercepat lebih lanjut oleh Efek Venturi saat melewati permukaan lengkung airfoil (suction side). Percepatan aliran ini menciptakan

perbedaan tekanan yang menghasilkan gaya angkat dan torsi. Dengan demikian, kecepatan puncak yang teramati bukanlah anomali, melainkan bukti bahwa simulasi berhasil menangkap prinsip kerja fundamental turbin.