

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

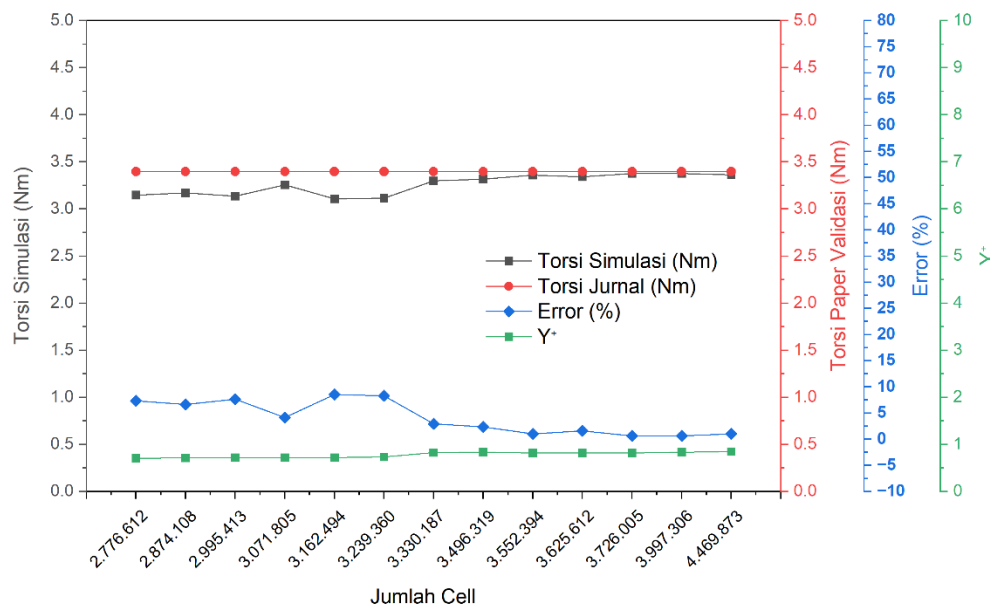
4.1 Validasi Penelitian

4.1.1 Simulasi Numerik Merujuk Pada Penelitian Maisuria et al. (2024)

Validasi dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang dibangun dalam penelitian ini dapat merepresentasikan fenomena aliran fluida secara akurat pada turbin air. Proses validasi dilakukan dengan cara membandingkan nilai torsi hasil simulasi dengan data rujukan dari penelitian Maisuria et al. (2024). Simulasi dinyatakan valid apabila menghasilkan nilai torsi dengan deviasi maksimum sebesar $\leq 5\%$ dari nilai torsi acuan, yaitu 3,39 Nm, sesuai metode validasi yang telah dijelaskan sebelumnya.

Sebagai tahapan awal, dilakukan *grid independence test* untuk memastikan bahwa perubahan jumlah sel (*number of cells*) tidak lagi memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai torsi yang dihasilkan. Pengujian grid independen dilakukan pada 13 variasi jumlah *mesh* dengan rentang 2,7 juta hingga 4,4 juta sel. Selain itu, parameter Y^+ dan *mass balance* turut dianalisis karena menjadi indikator kritical dalam validitas simulasi fluida berbasis turbulensi.

Dari hasil simulasi, diperoleh hasil bahwa variasi jumlah sel mempengaruhi nilai torsi pada tahap awal simulasi. Namun, setelah jumlah sel mencapai kisaran 3,5 – 4,0 juta, perubahan nilai torsi semakin kecil, yang menunjukkan bahwa simulasi telah mencapai kondisi *grid independent*.



Gambar 4.1 Hasil Simulasi Dengan Perbandingan Paper Validasi

Terlihat dalam Gambar 4.1 jika hasil simulasi mulai terlihat stabil pada jumlah *cell* 3,72 dan nilai torsi terbaik diperoleh hingga jumlah 3,99 juta, yang menghasilkan nilai simpangan 0,63%, lebih kecil dari batas toleransi 5% sehingga memenuhi kriteria validasi. Selain itu, parameter Y^+ berada pada rentang 0,7–0,8, yang sesuai dengan kriteria turbulensi SST $k-\omega$, di mana model tersebut ideal digunakan pada lapisan dinding dengan nilai Y^+ mendekati nilai 1 atau di bawah angka 10 (Knopp, 2006). Kondisi ini menunjukkan bahwa resolusi *mesh* pada *boundary layer* telah sesuai dan mampu menangkap fenomena viskos dengan baik. Nilai *mass imbalance* mendekati nol ($\approx 0,002-0,008$), sehingga neraca massa terpenuhi dan solusi konvergen secara matematis.

4.1.2 Perbandingan Model Turbulensi SST $k-\omega$ dan *Standard* $k-\epsilon$

Validasi terhadap hasil simulasi kemudian dilanjutkan dengan dengan membandingkan nilai torsi keluaran dari dua model turbulensi, yaitu SST $k-\omega$ dan

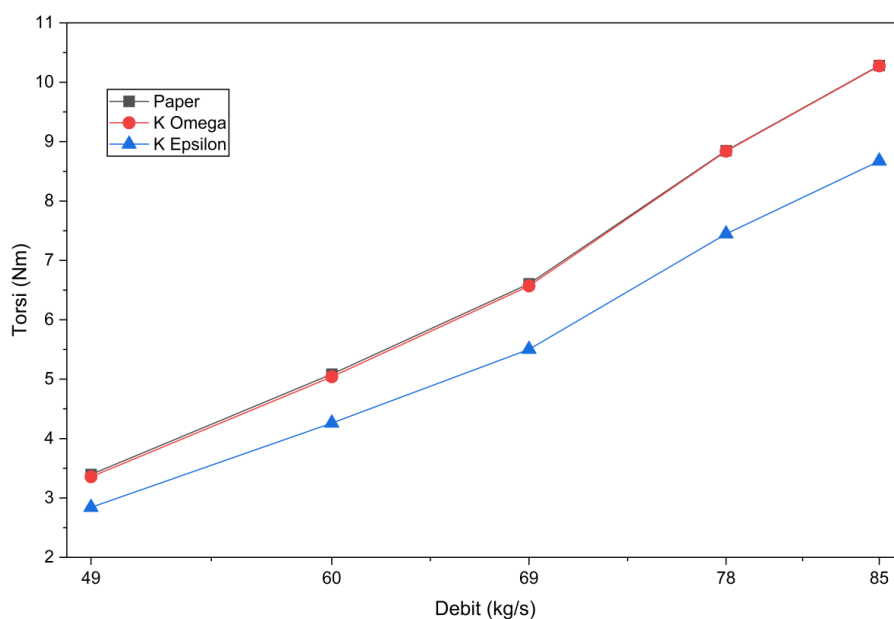
Standard k- ϵ , terhadap nilai torsi acuan dari penelitian Maisuria et al. (2024). Perbandingan dilakukan pada lima kondisi operasi turbin air *picohydro* dengan variasi *head* (1–3 m), debit (49–85 kg/s), dan kecepatan putar (1191–2063 RPM).

Berdasarkan hasil simulasi, kedua model turbulensi memberikan hasil simulasi yang konsisten dengan data referensi, namun dengan tingkat deviasi yang berbeda. Model turbulensi SST *k- ω* menghasilkan nilai torsi yang sangat mendekati hasil penelitian rujukan, dengan rata-rata *error* sebesar 0.56%. Hal ini menunjukkan tingkat akurasi yang sangat tinggi dan konvergensi numerik yang baik, terutama pada kondisi *head* yang lebih tinggi (2,5–3,0 m) di mana nilai *error* berada di bawah 0,2%.

Merujuk pada tulisan oleh Belhadad et al., (2023) model ini secara umum memiliki keunggulan dalam menangkap fenomena aliran dekat dinding (*near-wall region*) karena karakteristiknya yang sensitif terhadap gradien tekanan balik (*adverse pressure gradient*) dan nilai Y^+ yang berada dalam rentang 0,7–0,8. Kondisi tersebut sesuai dengan kriteria ideal model SST *k- ω* , yang secara teoretis optimal digunakan untuk lapisan viskos dengan $Y^+ < 10$ (Knopp, 2006). Oleh karena itu, hasil simulasi dengan model ini memberikan representasi yang realistis terhadap perilaku fluida di sekitar permukaan sudu turbin.

Sebaliknya, model turbulensi *Standard k- ϵ* menunjukkan nilai *error* rata-rata sebesar 16.15%, yang secara signifikan lebih besar dibandingkan dengan model SST *k- ω* . Perbedaan ini muncul karena model *k- ϵ* memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan lapisan batas dekat dinding, terutama pada aliran dengan gradien kecepatan yang tinggi dan efek viskos yang dominan di sekitar sudu turbin (Schmidt & Patankar, 1988). Model ini lebih stabil dan efisien secara

komputasi untuk memodelkan aliran di bagian luar domain fluida (*outer flow region*), di mana nilai Y^+ berada di atas 30. Dalam simulasi ini, model turbulensi *Standard k- ϵ* menghasilkan nilai Y^+ sebesar 37,8, yang berada dalam rentang 30–300. Rentang tersebut sesuai dengan kriteria ideal untuk penerapan fungsi dinding (wall function) pada model $k-\epsilon$, di mana asumsi aliran turbulen dianggap sudah memasuki zona log-law region, yakni daerah di mana efek viskos sudah tidak dominan, dan gaya geser turbulen menjadi faktor utama dalam transport momentum. Dengan demikian, nilai $Y^+ = 37,8$ menunjukkan bahwa simulasi telah memenuhi kondisi valid secara numerik dan fisis untuk model $k-\epsilon$. Visualisasi perbandingan model turbulensi tersebut ditunjukkan dalam Gambar 4.2 di bawah ini:



Gambar 4.2 Perbandingan Model Turbulensi

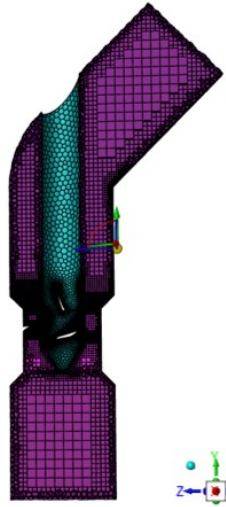
Dengan asumsi bahwa fluida dalam penelitian ini berada di luar bilah turbin (*outer domain*), maka penggunaan model turbulensi *Standard k- ϵ* dipilih sebagai model utama. Bhushan et al. (2021) dalam penelitian mereka menyatakan

jika model ini mampu memprediksi perilaku turbulensi di luar lapisan viskos dengan lebih efisien, meskipun akurasi terhadap parameter torsi relatif lebih rendah dibandingkan model SST $k-\omega$. Selain itu, model $k-\varepsilon$ juga menunjukkan stabilitas numerik yang lebih baik pada domain aliran besar dengan gradien tekanan rendah, serta konvergensi yang lebih cepat selama iterasi.

4.2 Variasi Jumlah Sudu

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh jumlah sudu terhadap performa turbin *low head* dengan parameter utama berupa torsi (Nm), daya hidrolis (W), daya mekanis (W), serta efisiensi turbin (%). Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent, dengan kondisi batas sebagaimana tercantum pada Tabel 3.4. Kondisi tersebut mencakup nilai gravitasi sebesar $-9,81 \text{ m/s}^2$, model turbulensi *Standard* $k-\varepsilon$ dengan *Standard Wall Function*, material fluida berupa air (*water liquid*), dan arah rotasi sumbu y . Kecepatan putar turbin ditetapkan pada 1500 rpm, dengan kondisi batas (*boundary condition*) berupa *pressure inlet* pada sisi masuk dengan tekanan total 15.648,93 Pa dan tekanan statis 14.982,28 Pa, serta *mass flow outlet* sebesar 24,955 kg/s di sisi keluaran. Intensitas turbulensi ditetapkan pada 3,5% dan diameter hidrolis saluran adalah 0,166 m.

4.2.1 Tiga Sudu

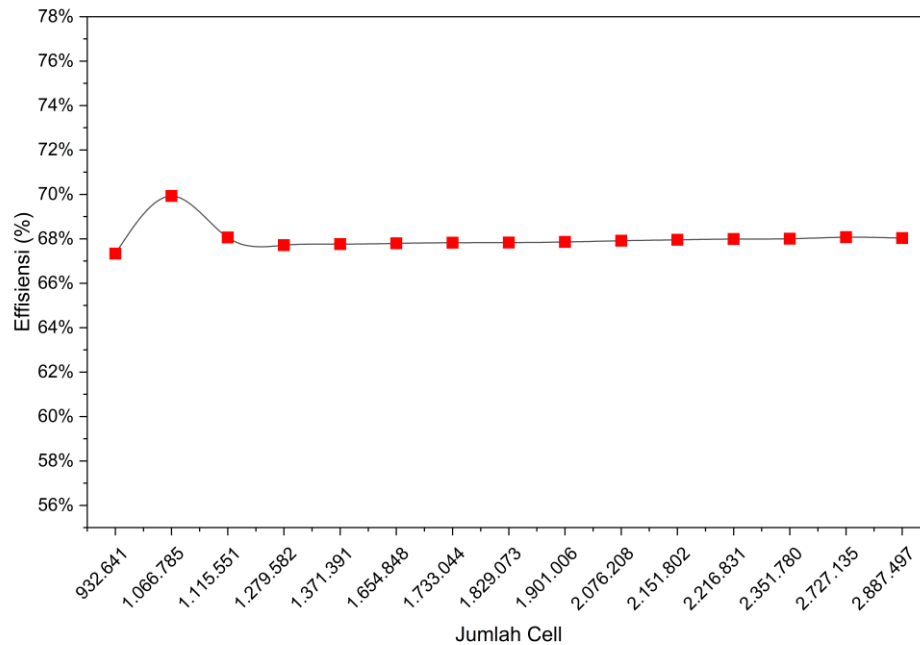


Gambar 4.3 Mesh Pada Turbin dengan 3 Bilah Runner

Pada konfigurasi tiga sudu, simulasi mencapai kondisi mulai stabil pada jumlah sel sebesar 1.279.582 dengan nilai $Y^+ \approx 31,95$. Visualisasi *meshing* menunjukkan distribusi elemen yang relatif seragam pada domain aliran dan di sekitar permukaan sudu, dengan kepadatan *mesh* yang cukup untuk menangkap gradien aliran utama tanpa menimbulkan beban komputasi berlebih. Nilai *skewness* rata-rata sebesar 0,00823 dan *orthogonal quality* rata-rata sebesar 0,91801 mengindikasikan kualitas *mesh* yang sangat baik, di mana sebagian besar elemen berada dalam rentang yang direkomendasikan untuk simulasi CFD. Dengan karakteristik ini, *mesh* pada konfigurasi tiga sudu dinilai mampu merepresentasikan fenomena aliran secara akurat dan stabil, khususnya untuk analisis aliran luar dengan model turbulensi *standard k-ε*.

Hasil simulasi untuk konfigurasi tiga sudu menunjukkan kecenderungan nilai torsi yang relatif stabil, berkisar antara 3,47 hingga 3,58 Nm pada berbagai variasi jumlah *cell* (932.640 hingga 3.652.408). Nilai *mass balance* berada dalam

kisaran 0,00007–0,00028 kg/s, yang menandakan stabilitas sistem aliran dan konvergensi simulasi yang baik.



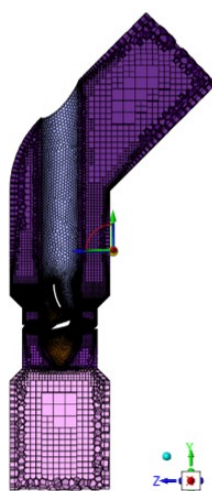
Gambar 4.4 Uji Grid 3 Sudu

Dari sisi kinerja hidrolis, daya turbin berkisar antara 810,95 hingga 831,14 W, sedangkan daya mekanis yang dihasilkan bervariasi antara 546,06 hingga 563,22 W. Nilai efisiensi turbin pada konfigurasi tiga sudu relatif konstan, berada di sekitar 67–68%, dengan titik optimum sebesar 68,07% pada jumlah cell 2.727.135 sebagaimana terlihat pada Gambar 4.4.

Capaian efisiensi ini menunjukkan bahwa pada kondisi operasi 1500 rpm dan *mass flow rate* 24,955 kg/s, konfigurasi tiga sudu mampu mengonversi energi hidrolis menjadi energi mekanis secara efisien. Pola aliran menunjukkan pembentukan *vortex* kecil di sekitar *trailing edge* sudu, namun tidak menimbulkan *pressure loss* signifikan. Oleh karena itu, tiga sudu dapat dikategorikan sebagai konfigurasi dengan efisiensi stabil, meskipun belum mencapai nilai puncak torsi

tertinggi di antara seluruh variasi. Menurut Peczkis et al. (2021), peningkatan jumlah sudu mampu meningkatkan luas interaksi antara fluida dan runner sehingga transfer momentum menjadi lebih besar. Namun, jumlah sudu yang berlebihan dapat meningkatkan hambatan aliran dan rugi-rugi hidrolis akibat bertambahnya gaya gesek serta resistansi aliran di dalam saluran antar sudu, yang pada akhirnya menurunkan efisiensi turbin.

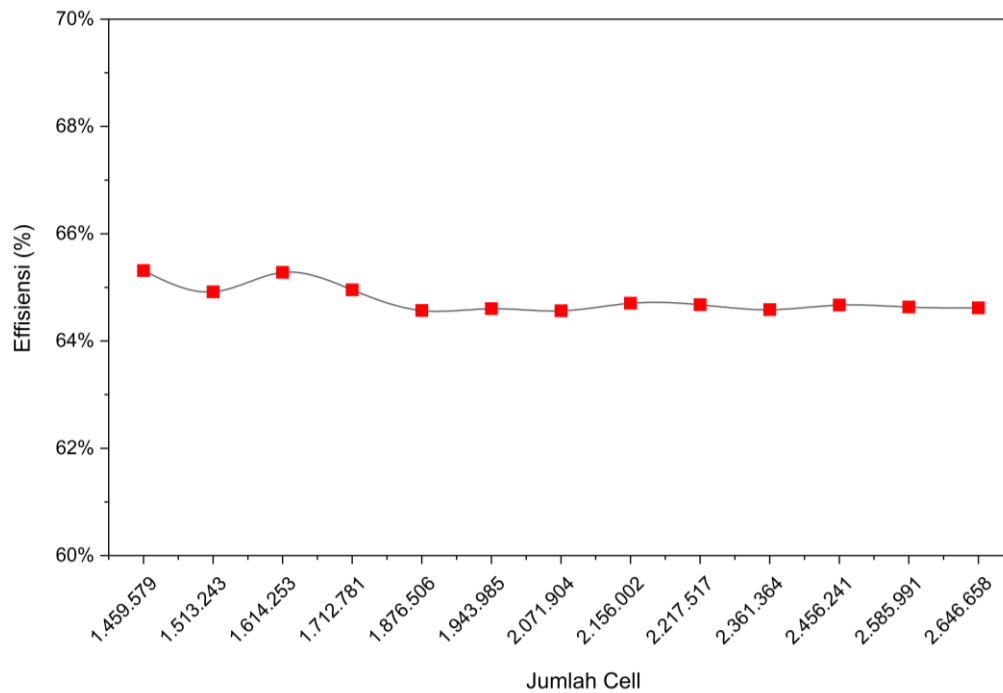
4.2.2 Empat Sudu



Gambar 4.5 Mesh Pada Turbin dengan 4 Bilah Runner

Konfigurasi empat sudu mencapai kondisi stabil pada jumlah sel yang lebih besar, yaitu 1.876.506 sel, dengan nilai $Y^+ \approx 288,83$. Peningkatan jumlah sel dibandingkan tiga sudu disebabkan oleh bertambahnya kompleksitas geometri dan interaksi aliran di antara sudu. Secara visual, *mesh* terlihat lebih rapat pada area sekitar *runner*, khususnya di *leading* dan *trailing edge* sudu. Nilai *skewness* rata-rata 0,00757 serta *orthogonal quality* rata-rata 0,924 menunjukkan kualitas elemen yang sangat baik dan konsisten. Kondisi ini menunjukkan bahwa *mesh* telah cukup halus untuk menangkap distribusi tekanan dan kecepatan secara lebih detail, tanpa menimbulkan distorsi elemen yang signifikan.

Konfigurasi empat sudu menunjukkan peningkatan torsi yang cukup signifikan dibandingkan tiga sudu. Berdasarkan hasil simulasi, nilai torsi rata-rata berada pada kisaran 5,91–6,01 Nm, dengan daya hidrolis berkisar 1.436–1.463 W dan daya mekanis antara 928–945 W. Efisiensi turbin empat sudu berada dalam rentang 64,49–65,31%.



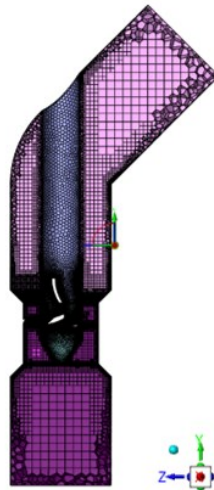
Gambar 4.6 Uji Grid 4 Sudu

Berdasarkan Gambar 4.6 di atas, kestabilan hasil simulasi diperoleh mulai dari jumlah cell 1.876.506, di mana nilai torsi mencapai 6,0052 Nm dan efisiensi sebesar 64,57%. Setelah titik ini, penambahan jumlah *cell* tidak menghasilkan perubahan signifikan terhadap parameter output, menandakan bahwa hasil sudah mencapai kondisi konvergen.

Secara hidrodinamik, peningkatan jumlah sudu dari tiga menjadi empat menyebabkan peningkatan area interaksi antara fluida dan permukaan sudu (Pradisha et al., 2023). Hal ini memperbesar torsi akibat gaya tangensial yang

dihasilkan oleh tekanan fluida. Namun, peningkatan jumlah sudu juga menimbulkan hambatan aliran (*flow blockage*) yang menyebabkan kenaikan kerugian energi akibat gesekan. Oleh karena itu, meskipun daya mekanis meningkat sekitar 70% dibandingkan tiga sudu, efisiensi total justru sedikit menurun karena meningkatnya kerugian energi turbulen di sekitar *trailing edge*. Pola ini sesuai dengan teori dasar turbin reaksi dalam penelitian Pietersz et al. (2013) di mana jumlah sudu optimum merupakan hasil kompromi antara peningkatan gaya tangensial dan peningkatan rugi gesekan akibat penambahan luas permukaan basah.

4.2.3 Lima Sudu

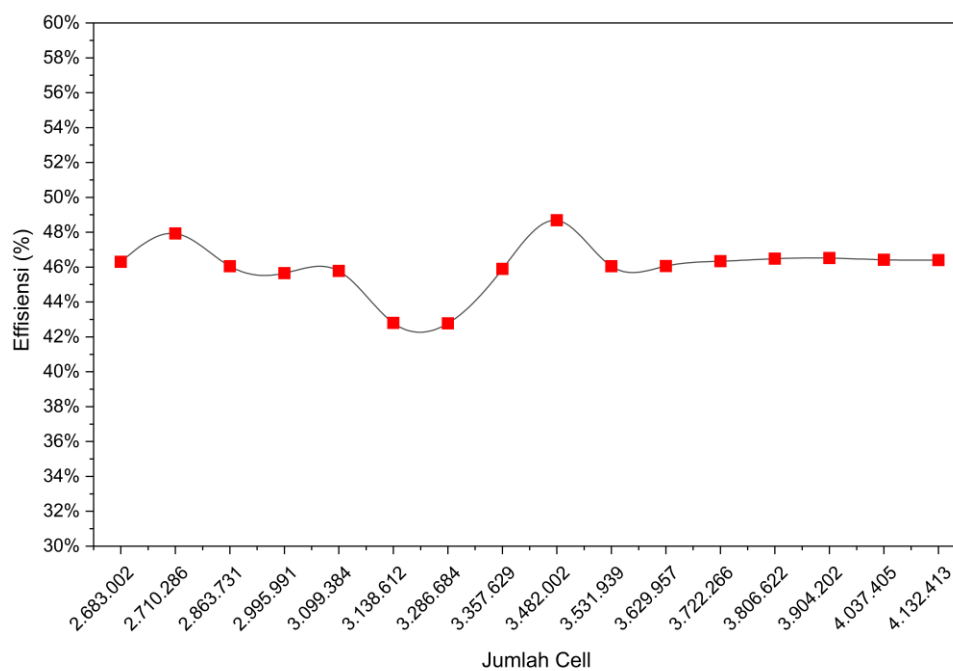


Gambar 4.7 Mesh Pada Turbin dengan 5 Bilah Runner

Pada konfigurasi lima sudu, jumlah sel meningkat signifikan hingga 3.531.939 sel, dengan nilai Y^+ sebesar 48,89. Peningkatan jumlah sel ini mencerminkan kebutuhan resolusi *mesh* yang lebih tinggi akibat bertambahnya jumlah sudu dan menyempitnya jalur aliran antar sudu. Visualisasi *meshing* memperlihatkan kepadatan elemen yang tinggi di sekitar permukaan *runner*, khususnya pada celah antar sudu yang menjadi lokasi potensial terjadinya gradien

aliran dan turbulensi. Meskipun nilai *skewness* maksimum mencapai 1,24209, nilai *skewness* rata-rata tetap rendah (0,00583) dan *orthogonal quality* rata-rata sebesar 0,93628, sehingga secara keseluruhan kualitas *mesh* masih berada dalam batas yang dapat diterima. Nilai Y^+ yang berada pada kisaran 30–50 menunjukkan bahwa *mesh* ini sesuai untuk pendekatan *wall function* pada model turbulensi *standard k- ϵ* , dan simulasi telah mencapai kondisi stabil pada tahap uji grid.

Pada konfigurasi lima sudu, karakteristik performa turbin menunjukkan pergeseran yang menarik. Nilai torsi rata-rata meningkat signifikan menjadi 7,42–7,63 Nm, yang menunjukkan peningkatan momen putar hingga lebih dari 25% dibandingkan konfigurasi empat sudu. Namun, peningkatan torsi ini tidak diikuti oleh kenaikan efisiensi yang linier. Daya hidrolis berada pada kisaran 2.230,20–2.611,56 W, dengan daya mekanis sekitar 1.166,76–1.197,36 W. Efisiensi bervariasi antara 42,78–48,68%.

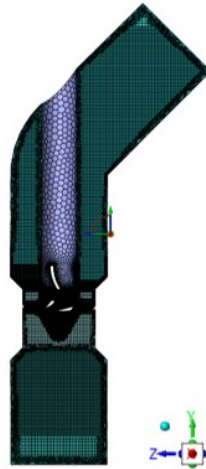


Gambar 4.8 Uji Grid 5 Sudu

Terlihat dalam Gambar 4.8 di atas bahwa nilai kestabilan simulasi diperoleh pada jumlah *cell* 3.531.939, dengan torsi 7,6052 Nm dan efisiensi 46,05%. Setelah titik ini, nilai *output* relatif konstan, menandakan bahwa domain aliran telah mencapai keseimbangan numerik. Menariknya, meskipun lima sudu menghasilkan daya hidrolis tertinggi di antara semua konfigurasi, efisiensinya menurun dibandingkan turbin tiga atau empat sudu. Fenomena ini disebabkan oleh meningkatnya interaksi antar sudu yang menyebabkan pembentukan daerah turbulen di *inter-blade passage* (Misbahudin et al., 2011). Dari aspek tekanan menunjukkan bahwa tekanan statis di sisi belakang sudu meningkat, menyebabkan kehilangan energi yang lebih besar pada fluida. Dengan kata lain, peningkatan jumlah sudu memperbesar gaya dorong total, namun sebagian energi hilang akibat peningkatan rugi tekan (*pressure drop*).

Kondisi efisiensi tertinggi pada lima sudu tercapai pada *cell count* 4.291.917, yaitu sebesar 53,63%, yang sekaligus menandakan titik keseimbangan terbaik antara gaya angkat (*lift*) dan gaya hambat (*drag*) pada permukaan sudu. Dengan demikian, lima sudu memberikan peningkatan torsi yang signifikan namun efisiensi totalnya lebih rendah akibat rugi hidrolis yang meningkat. Fenomena ini sejalan dengan hasil penelitian Peczkis et al. (2021) yang menyatakan bahwa peningkatan jumlah sudu dapat meningkatkan transfer momentum dan torsi, namun pada saat yang sama memperbesar blockage effect, drag loss, secondary flow, dan dissipasi energi turbulen sehingga efisiensi hidrolis cenderung menurun setelah melewati jumlah sudu optimum.

4.2.4 Enam Sudu



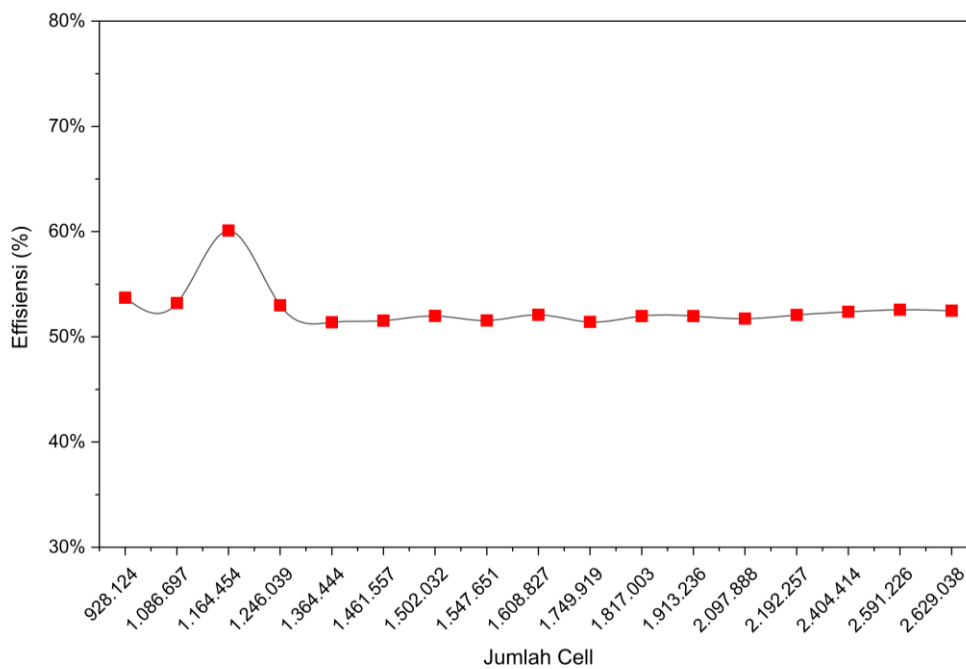
Gambar 4.9 Mesh Pada Turbin dengan 6 Bilah Runner

Konfigurasi enam sudu mencapai kondisi stabil pada jumlah sel sebesar 1.364.444, dengan nilai $Y^+ \approx 35,12$. Meskipun jumlah sudu lebih banyak, jumlah sel yang lebih rendah dibandingkan lima sudu menunjukkan adanya kompromi antara kepadatan *mesh* dan efisiensi komputasi. Visualisasi *mesh* menunjukkan distribusi elemen yang cukup merata di sekitar *blade runner*, dengan kepadatan yang memadai untuk menangkap karakteristik aliran utama. Nilai *skewness* rata-rata 0,00942 dan *orthogonal quality* rata-rata 0,94105 mengindikasikan kualitas *mesh* yang baik dan stabil. Dengan nilai Y^+ yang berada dalam rentang ideal untuk *standard k-ε*, *mesh* pada konfigurasi enam sudu dinilai layak dan valid untuk simulasi pada domain aliran luar.

Konfigurasi enam sudu merupakan varian dengan jumlah bilah terbanyak yang diuji. Hasil simulasi menunjukkan peningkatan signifikan pada nilai torsi, yaitu berkisar 13,83–14,18 Nm, atau hampir dua kali lipat dari konfigurasi lima sudu. Daya hidrolis yang dihasilkan berada pada kisaran 4.148–4.234 W, dengan daya mekanis sekitar 2.173–2.228 W. Nilai efisiensi turbin enam sudu berkisar

antara 51,38–60,10%, dengan titik optimum pada jumlah *cell* 1.164.454, di mana efisiensi mencapai 60,10%.

Pietersz et al. (2013) dalam penelitian yang mereka lakukan menyatakan jika peningkatan jumlah sudu memperluas area tangkapan energi fluida dan meningkatkan gaya tangensial total yang bekerja pada rotor. Namun, hasil simulasi juga memperlihatkan bahwa pada jumlah sudu yang tinggi, pola aliran menjadi semakin kompleks, dengan munculnya daerah stagnasi di antara sudu. Fenomena ini menyebabkan rugi gesekan tambahan yang dapat menurunkan efisiensi bila jumlah sudu terus ditambah.



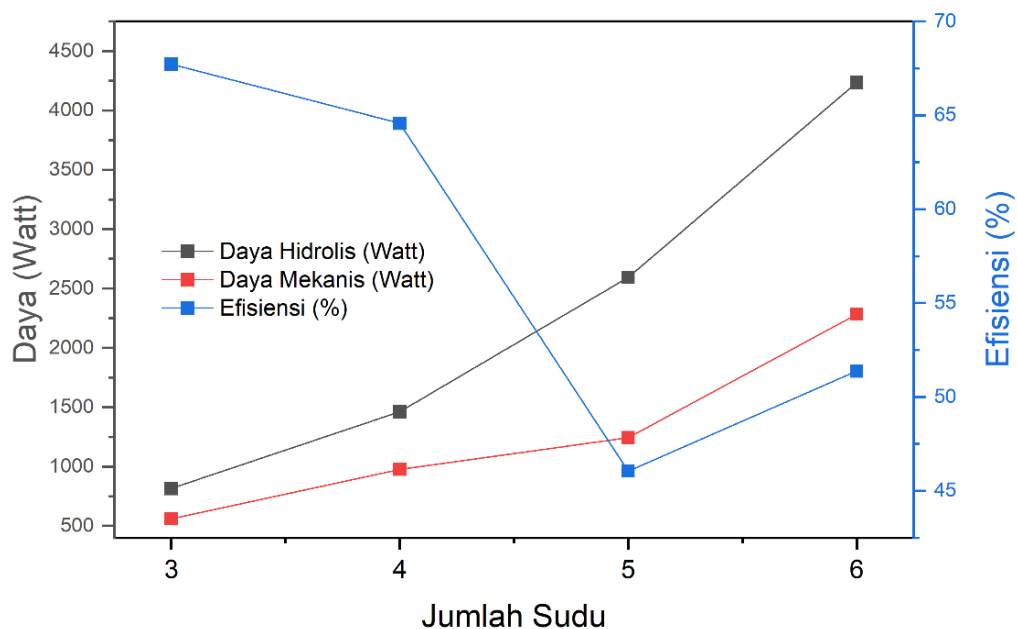
Gambar 4.10 Uji Grid 6 Sudu

Gambar 4.10 di atas menunjukkan bahwa stabilitas hasil simulasi untuk enam sudu tercapai pada jumlah *cell* 1.364.444, dengan nilai torsi 13,8448 Nm, daya hidrolis 4.234,31 W, daya mekanis 2.175,61 W, dan efisiensi 51,38%. Nilai

mass balance mendekati nol (0,000695 kg/s), menandakan bahwa sistem aliran berada dalam keseimbangan numerik yang baik.

Turbin enam sudu memiliki torsi tertinggi dibandingkan konfigurasi lainnya, namun efisiensinya sedikit lebih rendah dibandingkan konfigurasi tiga sudu. Hasil ini konsisten dengan penelitian Efriyasika et al. (2021), bahwa peningkatan jumlah sudu meningkatkan *loading* pada turbin, tetapi juga memperbesar rugi energi akibat meningkatnya viskositas dan gesekan permukaan.

4.2.5 Pengaruh Variasi Sudu Terhadap Kinerja Turbin



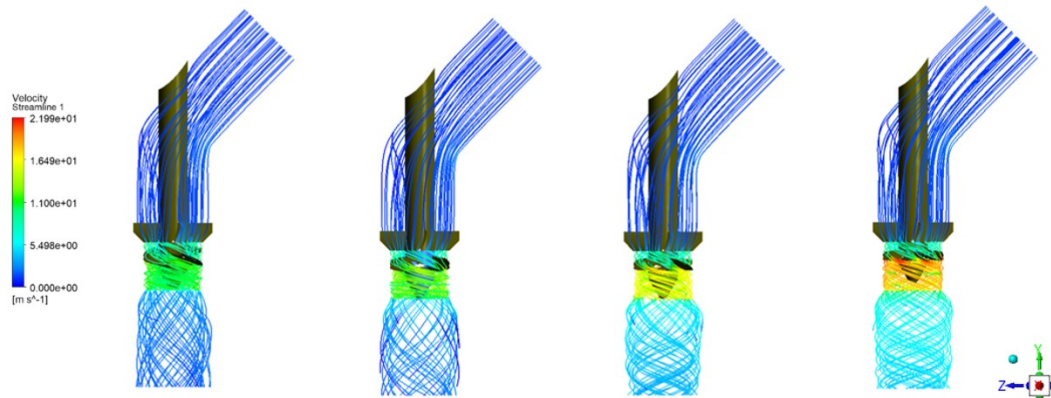
Gambar 4.11 Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Efisiensi Turbin

Berdasarkan grafik dalam Gambar 4.11, terlihat bahwa variasi jumlah sudu memberikan pengaruh signifikan terhadap daya dan efisiensi turbin. Konfigurasi tiga sudu menunjukkan efisiensi tertinggi yaitu 67,72%, meskipun daya mekanis yang dihasilkan tidak sebesar konfigurasi sudu lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa jumlah sudu yang lebih sedikit mampu meminimalkan *losses* akibat

turbulensi dan gesekan fluida pada permukaan sudu, sehingga energi kinetik fluida dapat dikonversi lebih efektif menjadi energi mekanik. Pada konfigurasi empat sudu, daya mekanis meningkat cukup signifikan, namun efisiensinya mengalami sedikit penurunan menjadi 64,57%. Penurunan ini menunjukkan bahwa penambahan sudu mulai meningkatkan *drag* dan menyebabkan gangguan aliran sehingga sebagian energi fluida tidak sepenuhnya dimanfaatkan.

Konfigurasi lima sudu menghasilkan efisiensi terendah yaitu 46,05%, meskipun daya hidrolis dan daya mekanis berada pada kisaran tinggi. Penambahan sudu secara berlebihan menyebabkan peningkatan interaksi antar jalur aliran, munculnya turbulensi sekunder, dan *hydraulic losses* yang lebih besar. Adapun konfigurasi enam sudu menghasilkan daya tertinggi, namun efisiensi hanya mencapai 51,38%, menunjukkan bahwa meskipun energi fluida lebih banyak tertangkap oleh sudu, efektivitas konversinya tetap menurun karena tingginya kerugian energi pada aliran internal.

Hal ini mengindikasikan bahwa jumlah sudu yang lebih sedikit mampu meminimalkan losses akibat turbulensi dan gesekan fluida pada permukaan sudu, sehingga energi kinetik fluida dapat dikonversi lebih efektif menjadi energi mekanik (Dixon, 1998). Penambahan sudu secara berlebihan menyebabkan peningkatan interaksi antar jalur aliran, munculnya turbulensi sekunder, dan *hydraulic losses* yang lebih besar. Pada penelitian ini, konfigurasi tiga sudu merupakan yang paling efisien, sementara sudu lima dan enam menunjukkan fenomena *overloaded blade effect*, yaitu kondisi dimana jumlah sudu yang terlalu banyak justru menurunkan kinerja turbin (Dixon, 1998).

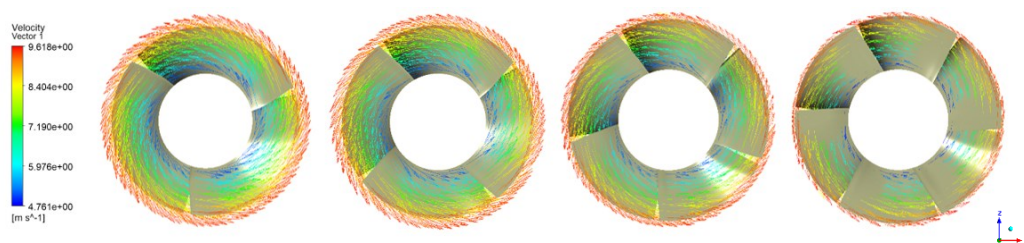


Gambar 4.12 Visualisasi Velocity Streamline untuk 3, 4, 5, dan 6 Sudu Pada Debit 25 l/s dan RPM 1500

Visualisasi *velocity* streamline pada Gambar 4.12 menampilkan pola lintasan aliran fluida pada keseluruhan domain, dengan legenda kecepatan berkisar dari 0 hingga ± 21 m/s. Pada konfigurasi tiga sudu, streamline tampak terdistribusi secara merata dan mengikuti geometri *runner* tanpa pembelokan ekstrem. Warna dominan biru–hijau menunjukkan kecepatan sedang yang relatif seragam, mengindikasikan aliran yang stabil dengan tingkat separasi dan vorteks yang minimal. Kondisi ini mencerminkan rendahnya kerugian energi hidrodinamis dan selaras dengan efisiensi tertinggi yang dicapai, yaitu 67,72%.

Pada konfigurasi empat sudu, streamline menunjukkan peningkatan kerapatan di sekitar runner dengan munculnya zona kecepatan lebih tinggi (hijau–kuning). Hal ini menandakan meningkatnya interaksi fluida–sudu yang berkontribusi pada peningkatan daya mekanis, meskipun mulai terlihat pembelokan aliran yang lebih tajam. Menurut Dixon (1998), peningkatan jumlah sudu dapat meningkatkan transfer momentum dari fluida ke runner karena luas bidang interaksi yang lebih besar, sehingga energi kinetik fluida lebih efektif ditransmisikan menjadi torsi. Namun demikian, peningkatan interaksi aliran juga dapat menyebabkan gradien tekanan yang lebih besar dan awal terbentuknya rugi-

rugi hidrolis akibat perubahan arah aliran yang semakin kompleks. Pada lima sudu, streamline menjadi semakin rapat dan tidak beraturan, dengan indikasi terbentuknya vorteks di daerah antar sudu akibat penyempitan jalur aliran. Fenomena ini mencerminkan peningkatan turbulensi dan *losses*, yang berkontribusi pada penurunan efisiensi hingga 46,05%. Sementara itu, pada enam sudu, meskipun energi fluida yang masuk ke *runner* meningkat, streamline memperlihatkan pola sirkulasi kompleks di bagian hilir yang menunjukkan terjadinya dissipasi energi yang signifikan.

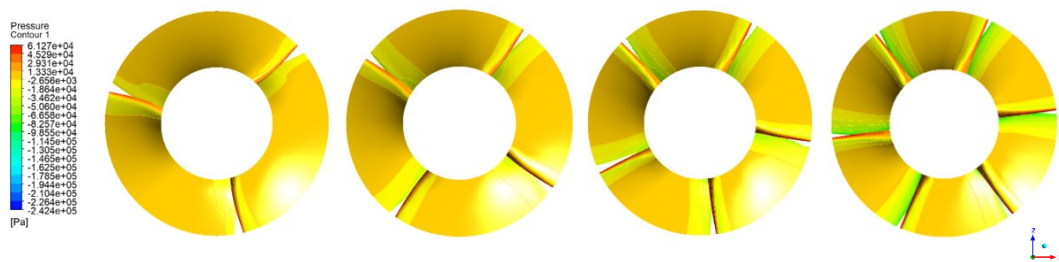


Gambar 4.13 Visualisasi Velocity Vektor Untuk 3, 4, 5, dan 6 Sudu Pada Debit 25 l/s dan RPM 1500

Merujuk pada Gambar 4.13, visualisasi *velocity* vector ditampilkan secara lokal pada bagian *blade runner*, dengan kecepatan berkisar antara $\pm 4,8$ hingga $\pm 9,6$ m/s. Pada konfigurasi tiga sudu, vektor kecepatan memiliki arah yang relatif seragam dan sejajar dengan arah rotasi *runner*. Panjang vektor yang konsisten menunjukkan distribusi momentum fluida yang efektif, sehingga torsi dapat dihasilkan dengan efisien.

Peningkatan magnitudo vektor pada beberapa bagian blade menunjukkan bahwa kecepatan relatif fluida dan transfer momentum lokal meningkat. Kondisi tersebut umumnya berkorelasi dengan peningkatan blade loading yang menghasilkan torsi lebih besar pada runner. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi jumlah sudu berpengaruh signifikan terhadap distribusi kecepatan,

tekanan, torsi, dan daya keluaran karena perubahan mekanisme transfer momentum antara fluida dan sudu (Lu et al., 2024). Pada konfigurasi lima sudu, vektor kecepatan memperlihatkan fluktuasi arah yang lebih signifikan serta pemendekan vektor di beberapa zona, yang mengindikasikan adanya *blocking effect* dan penurunan kecepatan efektif akibat interaksi antar aliran. Pada enam sudu, meskipun vektor menunjukkan magnitudo tinggi di dekat permukaan sudu, arah aliran menjadi semakin tidak seragam, menandakan bahwa sebagian energi kinetik fluida terdisipasi menjadi turbulensi daripada dikonversi menjadi energi mekanik.



Gambar 4.14 Visualisasi Kontur Tekanan Untuk 3, 4, 5, dan 6 Sudu Pada Debit 25 l/s dan RPM 1500

Kontur tekanan pada *blade runner* dalam Gambar 4.14 divisualisasikan dengan tekanan berkisar dari $-2,24 \times 10^5$ Pa hingga $6,13 \times 10^4$ Pa. Pada konfigurasi tiga sudu, distribusi tekanan menunjukkan perbedaan yang jelas dan relatif merata antara sisi tekanan (*pressure side*) dan sisi hisap (*suction side*). Gradien tekanan yang stabil ini menghasilkan gaya hidrodinamis yang efektif untuk menghasilkan torsi dengan kerugian minimal.

Pada empat sudu, nilai tekanan maksimum meningkat dan gradien tekanan menjadi lebih tajam, yang berkontribusi terhadap peningkatan daya mekanis. Namun, distribusi tekanan mulai menunjukkan ketidakteraturan di beberapa area *blade*. Pada lima sudu, kontur tekanan memperlihatkan konsentrasi tekanan tinggi

yang terlokalisasi serta zona tekanan rendah yang tidak merata, mengindikasikan ketidakseimbangan beban hidrodinamis dan meningkatnya losses. Pada enam sudu, meskipun tekanan maksimum paling tinggi dan menghasilkan daya terbesar, distribusi tekanan menjadi sangat tidak homogen, yang berpotensi menimbulkan fluktuasi gaya dan meningkatkan rugi-rugi energi akibat turbulensi dan gesekan (Maulana et al., 2024).

Berdasarkan visualisasi tersebut, dapat disimpulkan bahwa jumlah sudu sangat mempengaruhi karakteristik aliran, distribusi kecepatan, dan tekanan pada *runner*. Visualisasi streamline pada domain utuh menunjukkan bahwa semakin banyak sudu, aliran cenderung semakin kompleks dan tidak stabil. Sementara itu, visualisasi vektor dan kontur tekanan pada *blade runner* memperlihatkan bahwa peningkatan jumlah sudu memang meningkatkan torsi dan daya, tetapi juga memperbesar kerugian energi akibat turbulensi dan interaksi antar sudu. Oleh karena itu, konfigurasi tiga sudu memberikan keseimbangan terbaik antara keteraturan aliran, distribusi tekanan yang efektif, dan efisiensi konversi energi tertinggi.

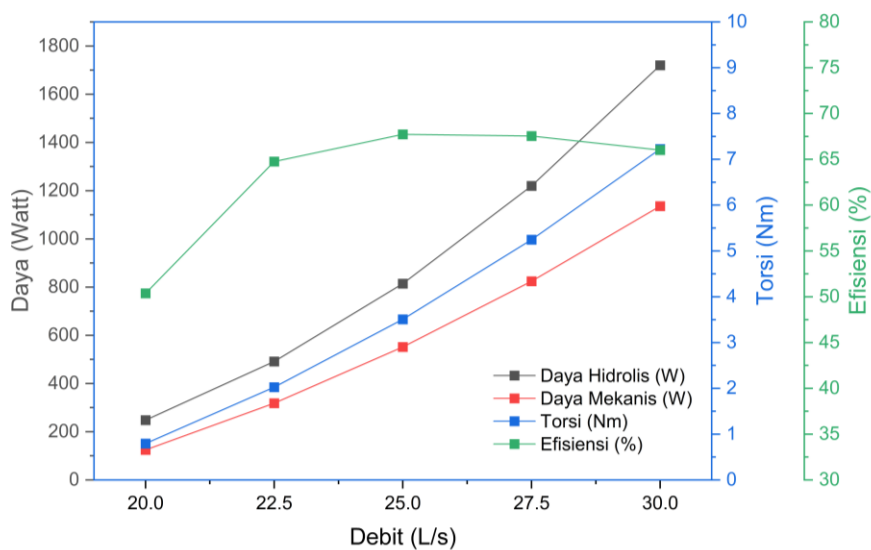
4.3 Variasi Debit

Variasi debit berpengaruh langsung terhadap karakteristik aliran yang memasuki *runner* turbin. Secara umum, Assefa & Tesfay (2025) dalam penelitian mereka menyatakan bahwa peningkatan debit menyebabkan kenaikan *head* simulasi, torsi, dan daya yang dihasilkan. Namun, peningkatan debit tidak selalu menghasilkan efisiensi maksimum karena terdapat batas optimum di mana energi fluida dapat dikonversi paling efektif menjadi energi mekanis. Pada subbab ini

diberikan analisis performa turbin untuk debit 20–30 L/s dengan variasi jumlah sudu tiga, empat, lima dan enam.

4.3.1 Variasi Debit Pada Tiga Sudu

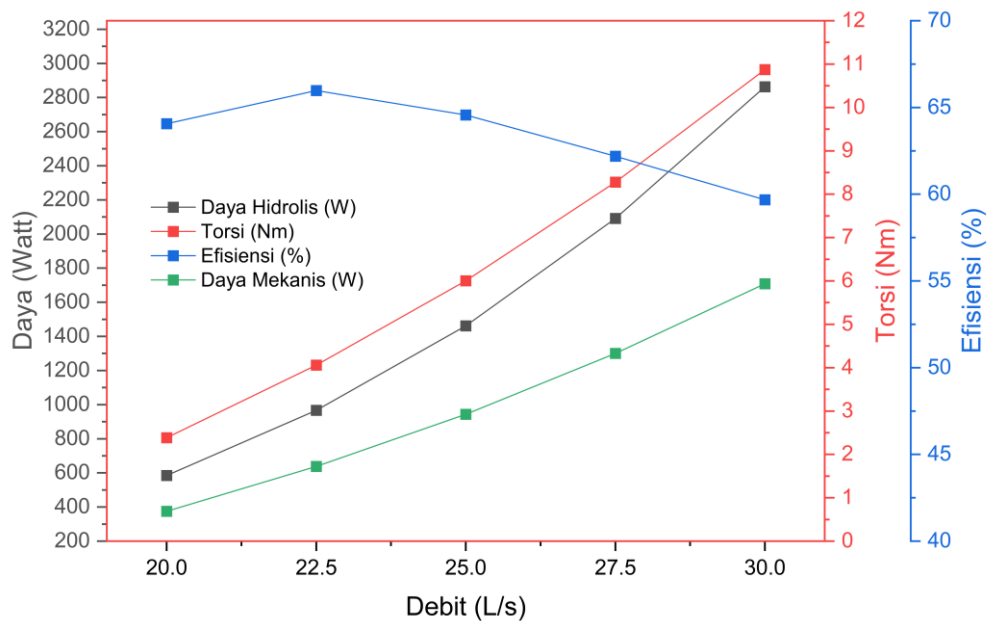
Pada konfigurasi tiga sudu, peningkatan debit dari 20 hingga 30 L/s menghasilkan tren peningkatan daya hidrolis dan daya mekanis secara signifikan. Debit 25 L/s menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 67,72%, dengan daya mekanis 551,34 W. Ketika debit meningkat melewati titik optimal tersebut (27,5–30 L/s), efisiensi sedikit menurun meskipun daya masih meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa pada tiga sudu, debit 25–27,5 L/s merupakan daerah operasi optimum, sedangkan debit terlalu besar menyebabkan peningkatan *losses* akibat turbulensi di antara sudu. Karakter ini menunjukkan bahwa tiga sudu sangat efektif pada debit menengah, karena ruang antar sudu yang lebih lebar memungkinkan aliran tetap stabil dan minim terperangkap (*flow separation* rendah) (Bouterra et al., 2024). Grafik hasil simulasi variasi debit pada *runner* dengan tiga sudu ditampilkan dalam Gambar 4.15 di bawah ini:



Gambar 4.15 Pengaruh Variasi Debit Pada Geometri 3 Sudu

4.3.2 Variasi Debit Pada Empat Sudu

Pada konfigurasi empat sudu, pola kenaikan daya juga terjadi secara berurutan dari debit rendah ke debit tinggi. Namun, berbeda dengan tiga sudu, efisiensi empat sudu tidak mengalami puncak setinggi konfigurasi sebelumnya. Efisiensi maksimum terjadi pada debit 22,5 L/s sebesar 65,98%, sedangkan pada debit 25 L/s efisiensi sedikit turun menjadi 64,57%, dan turun terus hingga 59,68% pada debit 30 L/s. Hal ini mengindikasikan bahwa pada empat sudu, debit optimum berada pada debit rendah hingga menengah. Ketika debit terlalu besar, jumlah sudu yang lebih banyak menyebabkan aliran menjadi lebih padat sehingga potensi *head loss* dan *secondary flow* meningkat (Chaulagain et al., 2024). Fenomena tersebut sejalan dengan karakteristik turbin hidraulik yang umumnya memiliki *best efficiency point* (BEP) pada rentang debit tertentu. Ketika debit melebihi kondisi optimum, peningkatan kecepatan aliran dapat memperbesar rugi-rugi hidrolis akibat turbulensi, separasi aliran, dan dissipasi energi sehingga efisiensi mulai mengalami penurunan meskipun daya yang dihasilkan terus meningkat (C. Yang et al., 2021). Hasil simulasi pengaruh variasi debit pada *runner* dengan empat sudu dapat dilihat dalam Gambar 4.16 di bawah ini

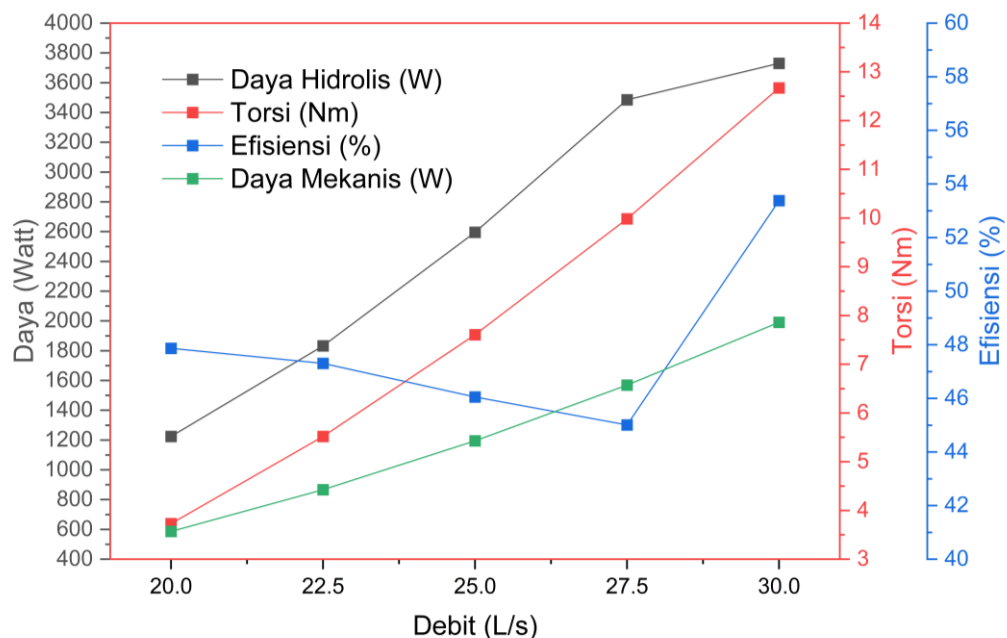


Gambar 4.16 Pengaruh Variasi Debit Pada Geometri 4 Sudu

4.3.3 Variasi Debit Pada Lima Sudu

Konfigurasi lima sudu memiliki tren efisiensi yang berbeda dibanding tiga dan empat sudu. Pada konfigurasi ini, efisiensi berada pada level yang relatif rendah di seluruh rentang debit, dengan nilai maksimum hanya 53,38% pada debit 30 L/s. Pada debit di bawahnya (20–27,5 L/s), efisiensi berada pada kisaran 45–48%. Karena jumlah sudu lebih banyak, interaksi fluida–sudu menjadi semakin intens sehingga memperbesar blade loading dan meningkatkan kemungkinan terjadinya gangguan aliran pada daerah antar sudu (*inter-blade passage*). Kondisi tersebut dapat memicu peningkatan rugi-rugi hidrolis berupa turbulensi, drag, secondary flow, serta tekanan balik (*backflow effect*) yang menyebabkan sebagian energi fluida terdisipasi sebelum dikonversi menjadi energi mekanis (Dixon, 1998). Selain itu, penambahan jumlah sudu menyebabkan luas permukaan basah (*wetted surface area*) semakin besar sehingga rugi-rugi gesek juga meningkat.

Fenomena serupa dilaporkan oleh Lu et al., (2024) yang menunjukkan bahwa peningkatan jumlah sudu dapat meningkatkan torsi dan daya keluaran, tetapi pada kondisi tertentu justru menurunkan efisiensi akibat meningkatnya losses dan ketidakseragaman distribusi aliran. Oleh karena itu, konfigurasi lima sudu cenderung bekerja lebih baik pada debit besar karena energi fluida yang tersedia lebih tinggi untuk mengatasi kerugian tersebut, namun tetap tidak mampu mencapai efisiensi setara konfigurasi tiga maupun empat sudu. Gambar 4.17 di bawah ini menampilkan pengaruh variasi debit pada konfigurasi lima sudu:

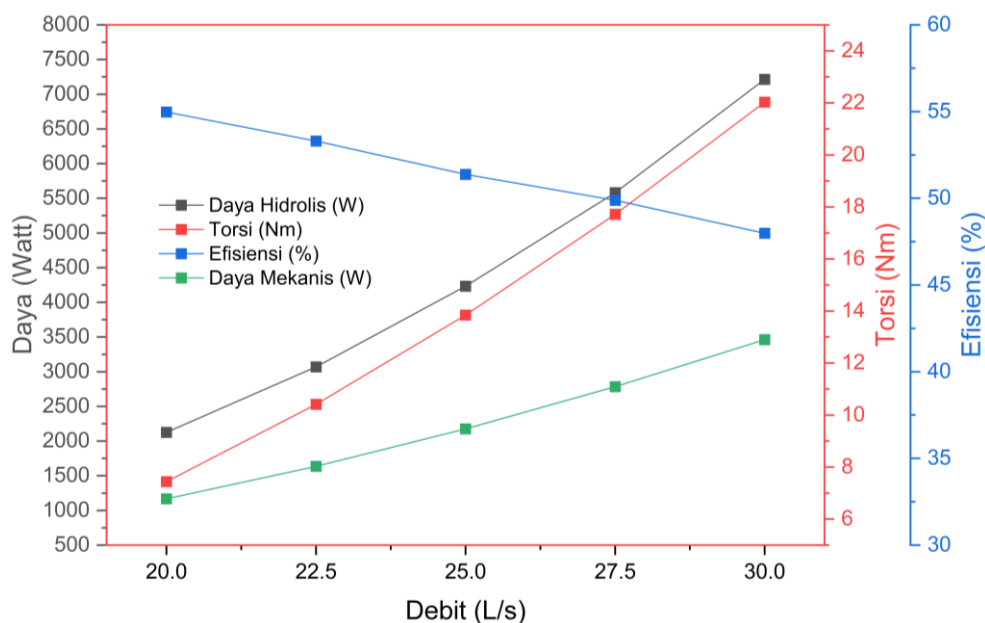


Gambar 4.17 Pengaruh Variasi Debit Pada Geometri 5 Sudu

4.3.4 Variasi Debit Pada Enam Sudu

Pada konfigurasi enam sudu, daya yang dihasilkan merupakan yang tertinggi dibanding seluruh variasi, terutama pada debit besar. Namun, efisiensinya bersifat menurun seiring bertambahnya debit. Efisiensi maksimum terjadi pada debit 20 L/s sebesar 54,98%, dan semakin turun hingga 47,99% pada

debit 30 L/s. Hal ini senada dengan penelitian oleh Neipp & Riedelbauch (2025) yang menyatakan bahwa jumlah sudu yang banyak mempersempit jalur aliran, menyebabkan energi fluida terlalu banyak hilang akibat tekanan balik, *flow recirculation*, dan gesekan permukaan (*wall shear*). Selain itu, pada debit tinggi terjadi peningkatan kecepatan relatif fluida yang dapat memicu pembentukan vorteks dan turbulensi yang lebih intens di antara sudu, sehingga sebagian energi terdisipasi sebelum mencapai runner secara efektif (Trivedi et al., 2016). Fenomena tersebut menjelaskan mengapa meskipun daya keluaran terus meningkat, efisiensi justru mengalami penurunan pada debit yang lebih besar. Berdasarkan hasil simulasi, konfigurasi enam sudu menunjukkan performa terbaik pada debit rendah hingga menengah. Pada kondisi tersebut, aliran masih mampu melewati celah antar sudu secara relatif stabil sehingga rugi-rugi hidrolis dapat diminimalkan. Sebaliknya, pada debit yang lebih tinggi, peningkatan losses akibat interaksi aliran yang semakin kompleks menyebabkan efektivitas konversi energi menurun. Hasil simulasi variasi debit pada konfigurasi enam sudu dapat dilihat pada Gambar 4.18 di bawah ini:



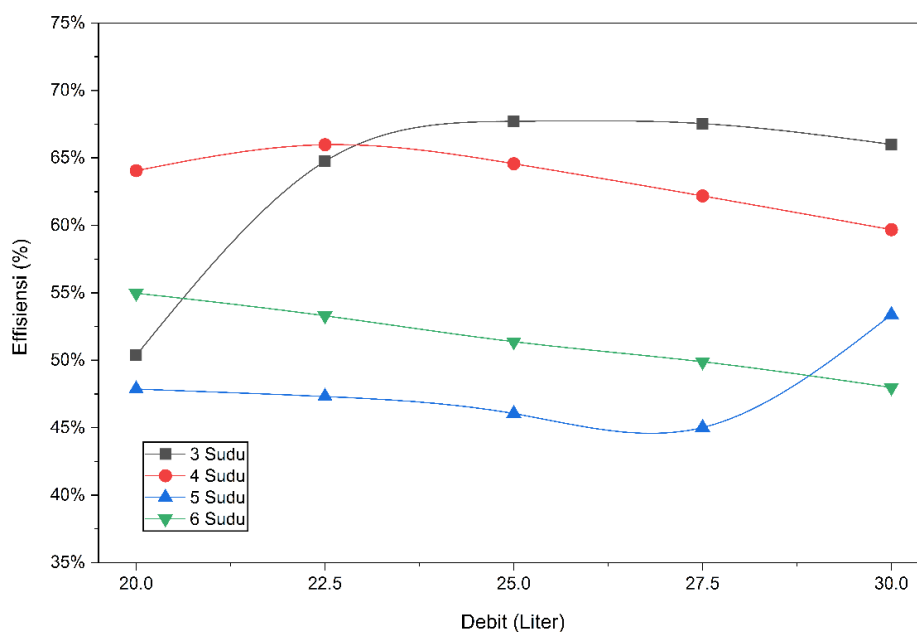
Gambar 4.18 Pengaruh Variasi Debit Pada Geometri 6 Sudu

4.3.5 Pengaruh Debit Terhadap Efisiensi Turbin Dengan Variasi Jumlah Sudu

Data pada grafik-grafik sebelumnya menunjukkan bahwa debit memiliki pengaruh langsung terhadap efisiensi turbin pada setiap variasi jumlah sudu. Untuk tiga sudu, efisiensi meningkat hingga mencapai nilai maksimum pada debit 25–27,5 L/s (67,72% dan 67,54%), sebelum sedikit menurun pada debit 30 L/s. Hal ini menandakan bahwa tiga sudu bekerja paling optimal pada debit menengah. Pada empat sudu, efisiensi tertinggi terjadi pada debit 22,5 L/s sebesar 65,98%, kemudian menurun secara bertahap pada debit yang lebih besar. Ini menunjukkan bahwa empat sudu memiliki debit optimum yang lebih rendah dibanding konfigurasi tiga sudu. Fenomena adanya debit optimum pada turbin air merupakan karakteristik umum yang terjadi akibat keseimbangan antara transfer momentum fluida dan kerugian hidrolis. Ketika debit melebihi kondisi desain,

peningkatan turbulensi dan flow separation menyebabkan efisiensi mulai menurun (Dixon, 1998).

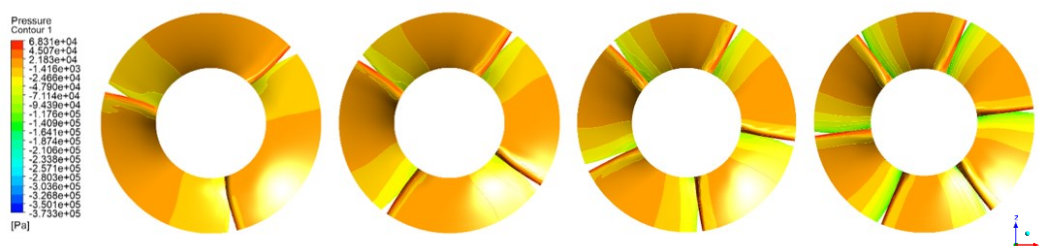
Konfigurasi lima sudu menunjukkan efisiensi yang relatif rendah pada semua variasi debit, dengan nilai tertinggi hanya 53,38% pada debit 30 L/s. Banyaknya sudu meningkatkan *drag* dan *losses*, sehingga debit besar hanya sedikit memperbaiki efisiensi. Sementara itu, enam sudu memiliki efisiensi tertinggi pada debit rendah (20 L/s = 54,98%), namun terus menurun seiring bertambahnya debit. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah sudu yang banyak hanya cocok untuk kondisi aliran kecil. Penambahan jumlah sudu memang meningkatkan kemampuan runner menangkap energi fluida, tetapi pada jumlah tertentu dapat meningkatkan blockage ratio, skin-friction loss, dan interaksi antar sudu yang menyebabkan efisiensi menurun pada debit tinggi (Round, 2004).



Gambar 4.19 Pengaruh Laju Aliran Terhadap Efisiensi Turbin

Merujuk pada Gambar 4.19 di atas, variasi debit dan jumlah sudu memiliki hubungan yang erat dalam menentukan performa turbin, di mana keseimbangan

antara debit dan jumlah sudu menjadi faktor kunci untuk mencapai efisiensi maksimum. Kinerja optimum turbin dicapai ketika geometri runner, jumlah sudu, dan debit operasi berada pada kondisi yang saling sesuai sehingga kehilangan energi akibat turbulensi, separasi aliran, dan recirculation dapat diminimalkan (Yildiz & Vrugt, 2019).

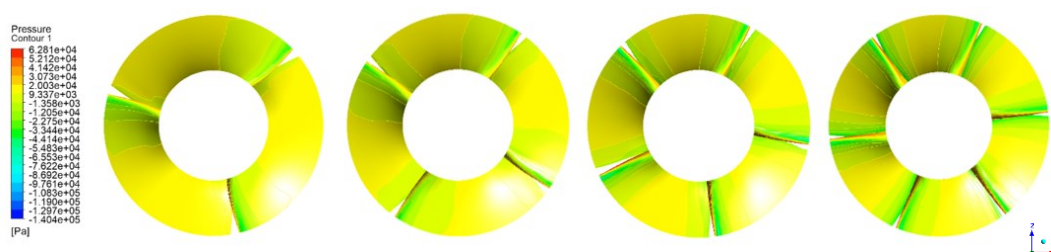


Gambar 4.20 Visualisasi Kontur Tekanan Untuk 3, 4, 5, dan 6 Sudu Pada Debit 30 l/s dan RPM 1500

Visualisasi kontur tekanan pada Gambar 4.20 menampilkan distribusi tekanan statis pada *blade runner* dengan debit 30 L/s dan kecepatan putar 1500 RPM, dengan tekanan berkisar dari sekitar $-2,2 \times 10^5$ Pa (biru) hingga $\pm 6,1 \times 10^4$ Pa (merah). Pada konfigurasi tiga sudu, distribusi tekanan relatif homogen dengan gradien tekanan yang jelas antara sisi tekanan dan sisi hisap sudu. Kondisi ini menunjukkan mekanisme konversi energi fluida yang masih efektif meskipun debit tinggi, yang tercermin dari efisiensi yang tetap berada pada kisaran tinggi (66,01%). Distribusi tekanan yang seragam antara pressure side dan suction side menghasilkan gaya hidrodinamis yang lebih stabil sehingga meningkatkan efisiensi konversi energi pada runner turbin (Cimbala & Cengel, 2018).

Pada empat sudu, area tekanan tinggi mulai terkonsentrasi di beberapa bagian leading edge sudu, menunjukkan peningkatan beban hidrodinamis lokal. Pada lima sudu, kontur tekanan memperlihatkan distribusi yang semakin tidak

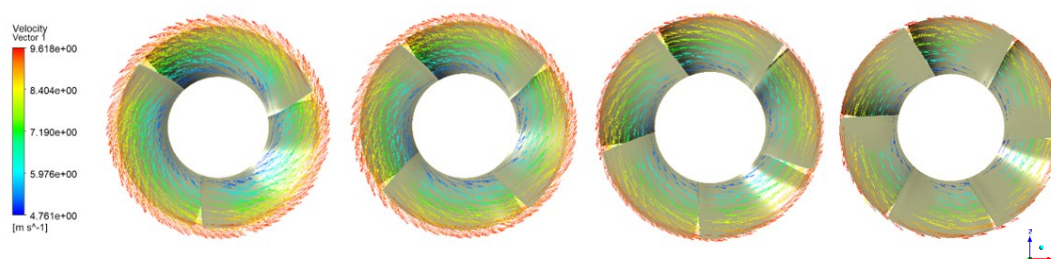
merata dengan zona tekanan rendah dan tinggi yang berdekatan, menandakan terjadinya interaksi aliran yang kompleks dan peningkatan losses. Sementara itu, pada enam sudu, meskipun tekanan maksimum meningkat akibat debit besar, ketidakhomogenan distribusi tekanan semakin jelas, yang mengindikasikan ketidakefisienan konversi energi akibat turbulensi dan gesekan yang tinggi. Distribusi tekanan yang tidak homogen pada runner sering dikaitkan dengan peningkatan secondary flow, recirculation zone, dan hydraulic loss yang menyebabkan penurunan efisiensi turbin (Zhou et al., 2019).



Gambar 4.21 Visualisasi Kontur Tekanan Untuk 3, 4, 5, dan 6 Sudu Pada Debit 20 l/s dan RPM 1500

Pada debit yang lebih rendah (20 L/s) seperti nampak pada gambar 4.21, kontur tekanan menunjukkan nilai tekanan yang secara umum lebih rendah, dengan legenda yang sama, namun distribusinya lebih stabil. Untuk tiga sudu, perbedaan tekanan antar sisi sudu masih cukup signifikan dan terdistribusi merata, meskipun energi fluida yang tersedia lebih kecil. Pada empat sudu, distribusi tekanan tampak paling seragam dibanding konfigurasi lain, yang selaras dengan efisiensi tertinggi konfigurasi ini pada debit rendah–menengah (64,06%). Pada lima dan enam sudu, tekanan fluida terlihat kurang optimal dalam membebani sudu, ditandai dengan area tekanan rendah yang luas. Hal ini menunjukkan bahwa pada debit kecil, jumlah sudu yang banyak menyebabkan fluida tidak mampu mengisi seluruh jalur aliran secara efektif, sehingga gaya hidrodinamis yang

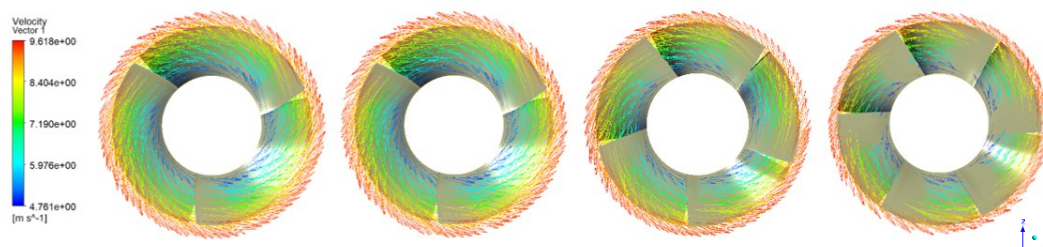
dihasilkan menurun. Pada debit rendah, energi kinetik fluida yang tersedia menjadi lebih kecil sehingga tidak seluruh permukaan sudu dapat dimanfaatkan secara optimal. Kondisi ini menyebabkan penurunan gaya hidrodinamis dan berkurangnya kemampuan runner menghasilkan torsi (Nechleba, 1957).



Gambar 4.22 Visualisasi Velocity Vektor Untuk 3, 4, 5, dan 6 Sudu Pada Debit 30 l/s dan RPM 1500

Visualisasi vektor kecepatan pada debit 30 l/s sebagaimana ditampilkan dalam Gambar 4.22 di atas, menunjukkan arah dan magnitudo kecepatan fluida di sekitar *blade runner* dengan kecepatan berkisar antara $\pm 4,8$ m/s hingga $\pm 9,6$ m/s. Pada tiga sudu, vektor kecepatan tampak panjang dan relatif seragam mengikuti arah rotasi *runner*, menunjukkan distribusi momentum yang efektif. Kondisi ini mendukung efisiensi tinggi pada debit besar. Pada empat sudu, magnitudo vektor meningkat di beberapa area, namun mulai terlihat variasi arah aliran. Pada lima sudu, vektor kecepatan menunjukkan fluktuasi arah yang signifikan dan pemendekan vektor di area antar sudu, mengindikasikan terjadinya *flow interference* dan *blocking effect*. Pada enam sudu, meskipun magnitudo kecepatan tinggi masih terlihat, arah vektor menjadi semakin tidak seragam, yang menunjukkan bahwa sebagian besar energi kinetik fluida terdisipasi sebagai turbulensi. Ketidakteraturan arah vektor kecepatan dan munculnya zona kecepatan rendah merupakan indikasi terjadinya *flow interference*, *flow separation*, dan

dissipasi energi turbulen yang meningkatkan kerugian hidrolis pada runner turbin (Wilcox, 2006).



Gambar 4.23 Visualisasi Velocity Vektor Untuk 3, 4, 5, dan 6 Sudu Pada Debit 20 l/s dan RPM 1500

Visualisasi vektor kecepatan pada Gambar 4.23 untuk debit 20 L/s dan kecepatan putar 1500 RPM menunjukkan distribusi magnitudo kecepatan fluida yang relatif lebih rendah dibandingkan kondisi debit 30 L/s, dengan legenda kecepatan berkisar antara $\pm 4,8$ m/s (biru) hingga $\pm 9,6$ m/s (merah). Pada konfigurasi tiga sudu, sebagian besar vektor berada pada rentang 6,0–7,5 m/s (warna hijau–kuning muda) dan terdistribusi secara relatif seragam mengikuti arah rotasi *runner*. Pola ini menunjukkan bahwa energi kinetik fluida masih cukup untuk menghasilkan transfer momentum yang efektif, sehingga aliran dapat dimanfaatkan secara optimal meskipun debit berada pada kondisi rendah. Distribusi vektor yang seragam menunjukkan transfer momentum yang efektif antara fluida dan sudu, sehingga energi kinetik dapat dikonversi menjadi energi mekanik secara lebih efisien (Dixon, 1998).

Pada konfigurasi empat sudu, vektor kecepatan memperlihatkan distribusi yang paling seimbang, dengan dominasi magnitudo pada kisaran 6,5–8,0 m/s. Arah vektor yang konsisten dan minim fluktuasi mengindikasikan bahwa interaksi antara fluida dan sudu berlangsung secara efisien. Kondisi ini menjelaskan mengapa konfigurasi empat sudu masih mampu mempertahankan efisiensi relatif

tinggi pada debit 20 L/s, yaitu sebesar 64,06%, sebagaimana ditunjukkan pada data kuantitatif. Distribusi kecepatan yang merata dan minim fluktuasi arah aliran menunjukkan kondisi hidrodinamika yang lebih stabil, yang umumnya berkorelasi dengan peningkatan efisiensi turbin (Round, 2004).

Sebaliknya, pada konfigurasi lima sudu, sebagian besar vektor kecepatan mengalami pemendekan dengan magnitudo dominan berada di bawah 6,0 m/s, serta menunjukkan variasi arah aliran yang lebih besar. Fenomena ini menandakan terjadinya *flow interference* antar sudu akibat keterbatasan energi fluida untuk mengisi seluruh jalur aliran. Pada enam sudu, kondisi ini semakin jelas, ditandai dengan munculnya zona kecepatan rendah (biru-hijau) dan pola sirkulasi lokal di sekitar *runner*. Hal tersebut menunjukkan bahwa energi kinetik fluida pada debit 20 L/s tidak cukup untuk membebani seluruh sudu secara efektif, sehingga sebagian energi terdisipasi sebagai turbulensi dan tidak berkontribusi pada pembentukan torsi. Penyempitan jalur aliran akibat penambahan jumlah sudu dapat menyebabkan *blockage effect*, *flow interference*, dan *recirculation* yang mengurangi transfer momentum efektif ke *runner* serta meningkatkan dissipasi energi turbulen (Bohl & Elmendorf, 2019).

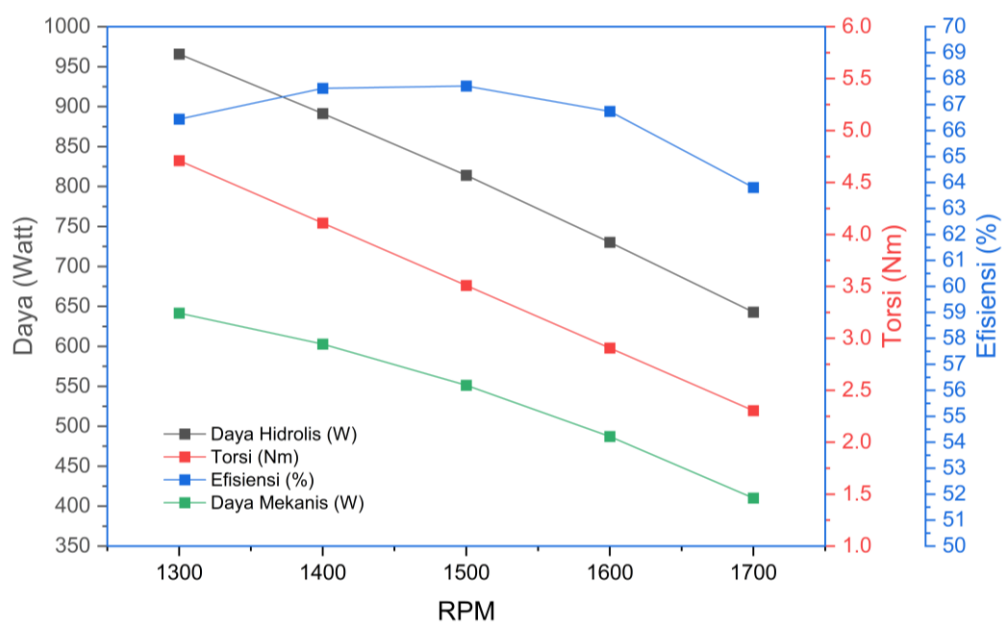
4.4 Variasi Kecepatan Putar *Runner*

Variasi kecepatan putar (*runner speed*) merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi karakteristik kinerja turbin air. Perubahan kecepatan rotasi akan mempengaruhi interaksi antara fluida dan sudu, khususnya pada distribusi energi kinetik, gaya tangensial pada *runner*, serta besarnya torsi yang

dihasilkan. Pada penelitian ini, variasi kecepatan dianalisis pada debit tetap 25 L/s dengan rentang putaran 1300–1700 RPM untuk empat konfigurasi jumlah sudu.

4.4.1 Variasi RPM Pada Tiga Sudu

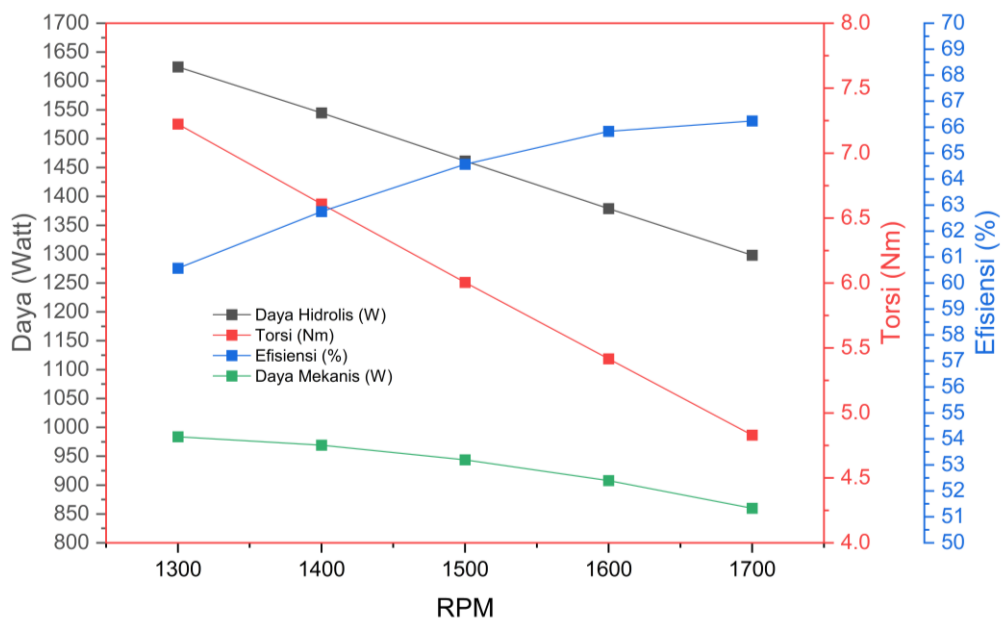
Variasi kecepatan pada turbin tiga sudu menunjukkan pola efisiensi yang meningkat hingga titik optimal sebelum kembali menurun. Efisiensi tertinggi dicapai pada 1500 RPM sebesar 67,72%, dengan daya mekanis 551,34 W dan torsi 3,509 Nm. Pada kecepatan rendah (1300 RPM), torsi yang dihasilkan cukup tinggi (4,711 Nm), namun efisiensi masih berada pada 66,44% karena energi fluida belum sepenuhnya termanfaatkan secara optimal. Sebaliknya, pada kecepatan tinggi (1700 RPM), efisiensi turun menjadi 63,81% akibat meningkatnya kehilangan energi (*losses*) karena turbulensi dan *slip factor* (Li et al., 2022). Hal ini menunjukkan bahwa untuk tiga sudu, titik operasi paling efisien berada pada putaran menengah. Pengaruh variasi RPM pada geometri tiga sudu ditampilkan dalam Gambar 4.24 di bawah ini:



Gambar 4.24 Pengaruh Variasi RPM Pada Geometri 3 Sudu

4.4.2 Variasi RPM Pada Empat Sudu

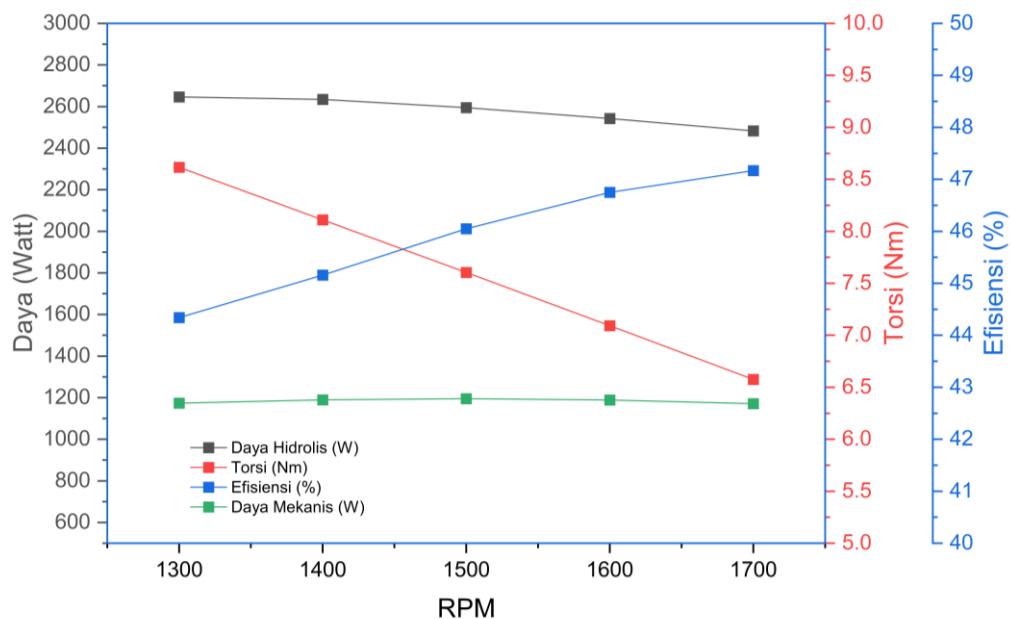
Turbin empat sudu juga menunjukkan tren peningkatan efisiensi terhadap kenaikan RPM. Efisiensi tertinggi diperoleh pada 1700 RPM sebesar 66,24%, dengan daya mekanis 860,00 W. Meskipun efisiensinya sedikit di bawah tiga sudu pada RPM rendah, turbin empat sudu memperlihatkan kestabilan efisiensi pada seluruh rentang putaran. Merujuk pada penelitian oleh Yang et al. (2023), pola ini mengindikasikan bahwa jumlah sudu yang lebih banyak memberikan distribusi energi fluida yang lebih merata pada kecepatan tinggi, sehingga cocok untuk kondisi operasi dengan RPM lebih besar. Namun, pada RPM rendah, empat sudu masih menghasilkan kerugian energi yang lebih besar dibanding tiga sudu karena *drag* yang lebih tinggi. Hasil simulasi variasi RPM pada empat sudu ditampilkan dalam Gambar 4.25 di bawah ini:



Gambar 4.25 Pengaruh Variasi RPM Pada Geometri 4 Sudu

4.4.3 Variasi RPM Pada Lima Sudu

Konfigurasi lima sudu menghasilkan efisiensi yang paling rendah dibanding konfigurasi lainnya. Rentang efisiensi berada pada 44,34–47,17%, dengan nilai tertinggi pada 1700 RPM. Daya mekanis hanya mencapai 1.171,17 W, meskipun torsi awal tergolong tinggi (8,616 Nm pada 1300 RPM). Fenomena ini terjadi akibat banyaknya sudu yang memicu *blocking effect*, sehingga aliran fluida tidak berkembang secara optimal. Semakin tinggi RPM, efisiensi memang sedikit meningkat, namun tetap berada pada kelas efisiensi rendah karena *losses* dominan terjadi pada permukaan sudu (Ain et al., 2025). Gambar 4.26 di bawah akan menampilkan pengaruh variasi RPM pada lima sudu:

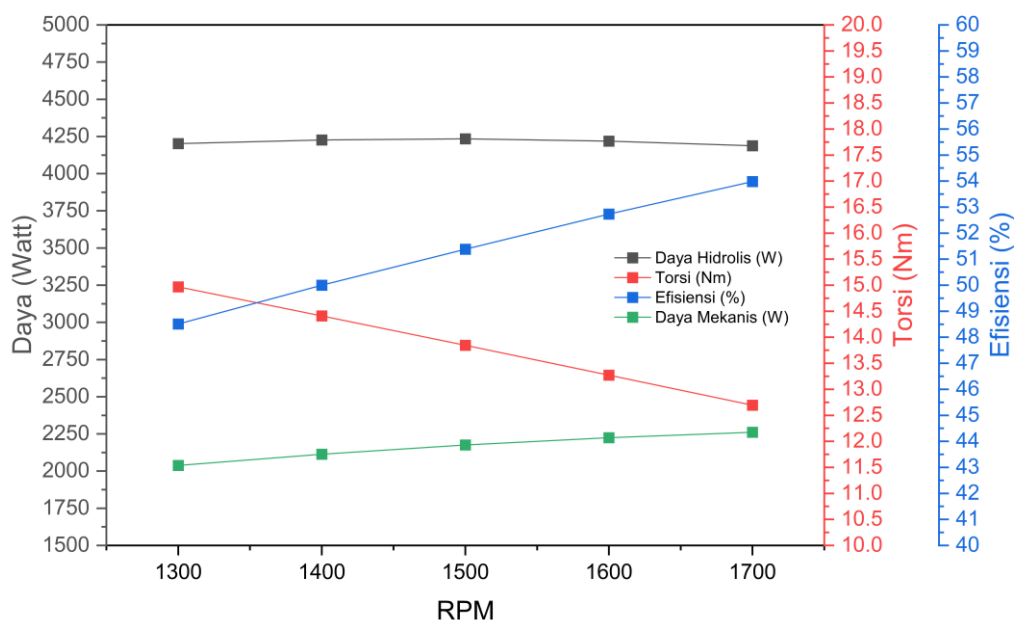


Gambar 4.26 Pengaruh Variasi RPM Pada Geometri 5 Sudu

4.4.4 Variasi RPM Pada Enam Sudu

Pada konfigurasi enam sudu, efisiensi menunjukkan peningkatan konsisten seiring kenaikan RPM. Efisiensi tertinggi dicapai pada 1700 RPM sebesar

53,98%, sedangkan nilai terendah tercatat pada 1300 RPM sebesar 48,51%. Meskipun daya mekanis yang dihasilkan adalah yang terbesar di antara semua konfigurasi (mencapai 2.260,98 W pada 1700 RPM), efisiensi tetap tidak melampaui turbin tiga dan empat sudu. Hal ini menegaskan bahwa penambahan sudu meningkatkan kemampuan menangkap energi fluida, tetapi juga meningkatkan *hydraulic losses* terutama akibat turbulensi sekunder di dalam saluran antar sudu (Ke et al., 2024). Gambar 4.27 di bawah akan menampilkan pengaruh variasi RPM pada geometri enam sudu:



Gambar 4.27 Pengaruh Variasi RPM Pada Geometri 6 Sudu

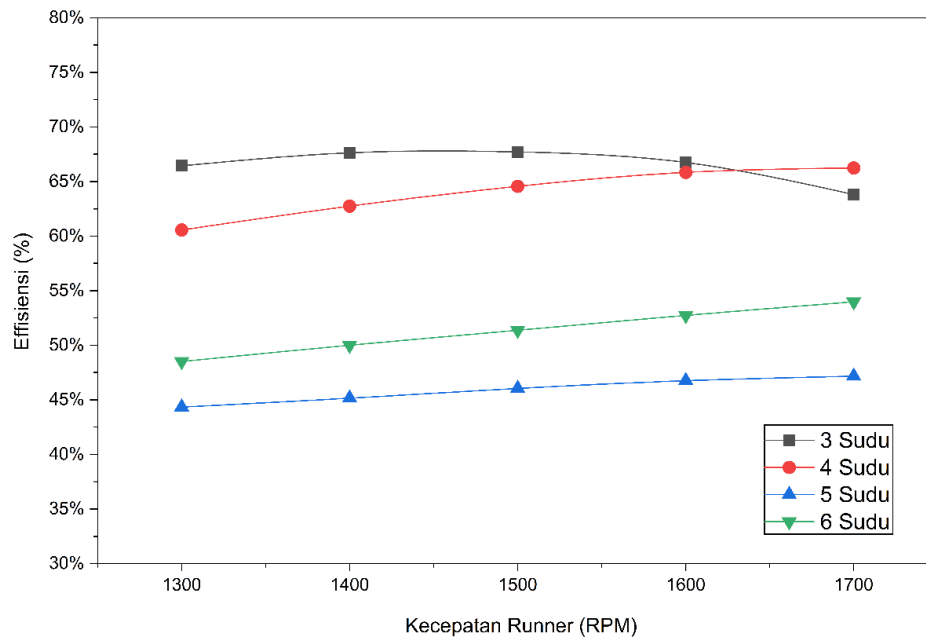
4.4.5 Pengaruh Kecepatan *Runner* terhadap Efisiensi dengan Variasi Sudu

Analisis pengaruh kecepatan putar *runner* terhadap efisiensi turbin menunjukkan bahwa setiap konfigurasi jumlah sudu memiliki kecenderungan karakteristik kinerja yang berbeda terhadap perubahan putaran. Pada konfigurasi tiga sudu, efisiensi tertinggi dicapai pada 1500 RPM sebesar 67,718%, kemudian mengalami penurunan ketika putaran dinaikkan hingga 1700 RPM (63,815%).

Hal ini mengindikasikan bahwa jumlah sudu yang sedikit bekerja paling optimal pada putaran menengah, karena aliran fluida tidak mengalami *flow separation* yang berlebihan (Abdallah et al., 2025). Pada empat sudu, efisiensi meningkat stabil seiring kenaikan kecepatan, dan mencapai nilai tertinggi pada 1700 RPM (66,243%). Pola ini menunjukkan bahwa konfigurasi empat sudu lebih adaptif terhadap putaran tinggi, dengan jalur aliran yang relatif stabil di antara sudu. Fenomena ini sejalan dengan teori turbomachinery yang menyatakan bahwa setiap runner memiliki kecepatan spesifik optimum, sehingga perubahan kecepatan putar akan memengaruhi sudut masuk aliran, distribusi tekanan, dan kemampuan sudu dalam mengekstraksi energi fluida. Ketika putaran melebihi kondisi optimum, peningkatan losses akibat flow separation dan secondary flow dapat menyebabkan penurunan efisiensi (Round, 2004).

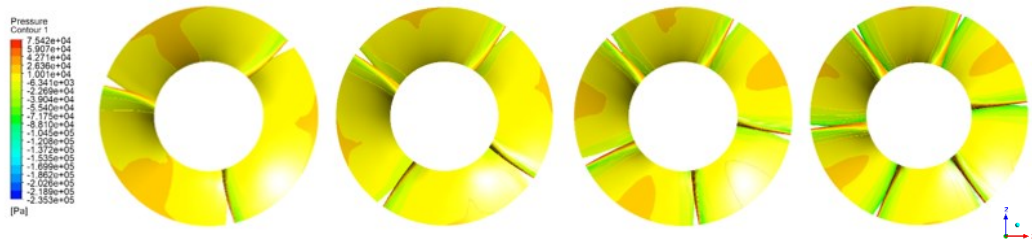
Berbeda dengan itu, lima sudu menunjukkan efisiensi yang paling rendah pada seluruh rentang uji, dengan nilai berkisar 44,343–47,167%. Hal ini dipengaruhi oleh *blocking effect* yang membuat aliran fluida kehilangan energi akibat turbulensi di celah antar sudu yang terlalu sempit. Meskipun efisiensi meningkat sedikit pada putaran tinggi, peningkatannya tidak signifikan. Sementara itu, turbin enam sudu memperlihatkan tren efisiensi yang terus meningkat seiring bertambahnya putaran, di mana efisiensi tertinggi tercapai pada 1700 RPM sebesar 53,984%. Meskipun daya mekanis yang dihasilkan enam sudu lebih tinggi, efisiensinya tetap berada di bawah tiga dan empat sudu karena kerugian energi akibat turbulensi sekunder masih dominan. Penambahan jumlah sudu meningkatkan luas permukaan kontak antara fluida dan runner sehingga torsi meningkat, namun pada saat yang sama memperbesar losses akibat skin friction,

blockage effect, dan interaksi antar aliran pada inter-blade passage. Akibatnya peningkatan daya tidak selalu diikuti oleh peningkatan efisiensi (Nechleba, 1957).



Gambar 4.28 Pengaruh Kecepatan Putar Runner Terhadap Efisiensi Turbin

Melihat pada Gambar 4.28 di atas, maka pemilihan jumlah sudu harus mempertimbangkan kecepatan operasi turbin. Jika turbin diproyeksikan beroperasi pada kecepatan menengah, tiga sudu menjadi pilihan terbaik. Namun, untuk kecepatan tinggi, empat sudu menawarkan stabilitas dan efisiensi yang lebih unggul. Hasil ini menunjukkan bahwa jumlah sudu optimum tidak hanya ditentukan oleh geometri runner, tetapi juga harus disesuaikan dengan kondisi operasi, terutama debit dan kecepatan putar. Kesesuaian antara kecepatan runner dan karakteristik aliran menjadi faktor utama dalam memaksimalkan efisiensi turbin (Dixon, 1998).



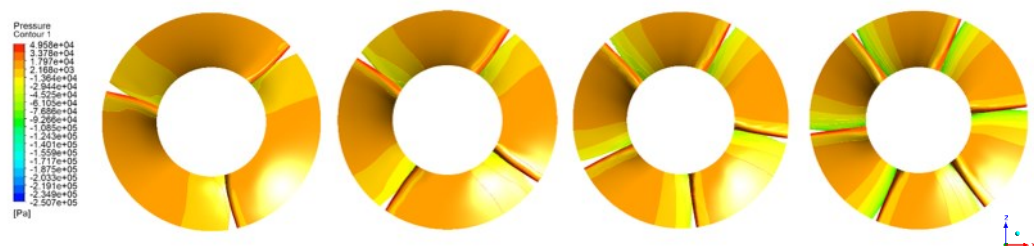
Gambar 4.29 Visualisasi Kontur Tekanan Untuk 3, 4, 5, dan 6 Sudu Pada Debit 25 l/s dan RPM 1700

Visualisasi kontur tekanan pada Gambar 4.29 menunjukkan distribusi tekanan statis fluida secara lokal pada *blade runner* pada kondisi kecepatan putar 1700 RPM dan debit 25 L/s. Rentang tekanan berada pada kisaran $-3,6 \times 10^5$ Pa (biru) hingga $\pm 1,6 \times 10^5$ Pa (merah). Pada konfigurasi tiga sudu, gradien tekanan antara sisi tekan (*pressure side*) dan sisi hisap (*suction side*) terlihat jelas dan relatif merata di sepanjang permukaan sudu. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putar masih mampu meningkatkan gaya hidrodinamis tanpa menimbulkan ketidakteraturan aliran yang berlebihan, meskipun mulai terjadi peningkatan losses yang tercermin dari penurunan efisiensi pada putaran ini. Gradien tekanan yang jelas antara *pressure side* dan *suction side* merupakan indikator terjadinya transfer energi yang efektif dari fluida menuju runner, yang berkontribusi terhadap pembentukan torsi dan daya mekanis (Cengel & Cimbala, 2018).

Pada konfigurasi empat sudu, zona tekanan tinggi terdistribusi lebih seragam pada bagian *leading edge* sudu. Distribusi tekanan yang lebih homogen ini mengindikasikan pembebanan sudu yang lebih seimbang, sehingga konfigurasi ini mampu mempertahankan bahkan meningkatkan efisiensi hingga mencapai nilai maksimum 66,243% pada 1700 RPM. Distribusi tekanan yang homogen menunjukkan pembebanan hidrodinamis yang lebih merata pada seluruh

permukaan sudu sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya fluktuasi gaya dan rugi-rugi hidrolis lokal (Zhou et al., 2019).

Sebaliknya, pada lima sudu, kontur tekanan menunjukkan konsentrasi tekanan tinggi yang terlokalisasi serta area tekanan rendah yang berdekatan, menandakan ketidakseimbangan beban dan meningkatnya rugi-rugi hidrodinamis. Pada enam sudu, meskipun tekanan maksimum paling tinggi, distribusi tekanan menjadi semakin tidak homogen, yang mengindikasikan dominasi turbulensi sekunder dan gesekan antar sudu. Ketidakteraturan distribusi tekanan pada runner umumnya berkaitan dengan meningkatnya secondary flow, recirculation zone, dan dissipasi energi turbulen yang menyebabkan penurunan efisiensi turbin (Zhang et al., 2022).

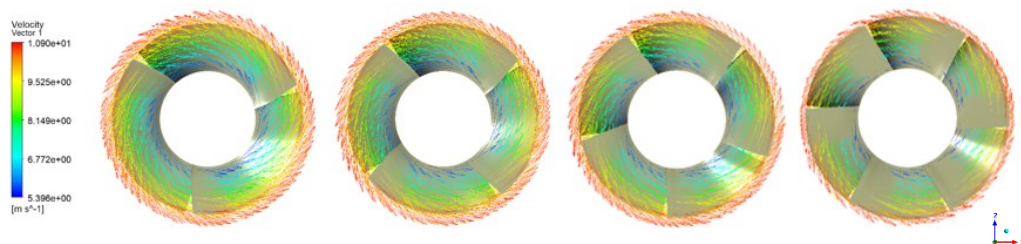


Gambar 4.30 Visualisasi Kontur Tekanan Untuk 3, 4, 5, dan 6 Sudu Pada Debit 25 l/s dan RPM 1300

Pada kondisi kecepatan putar 1300 RPM sebagaimana ditampilkan dalam Gambar 4.30 di atas, kontur tekanan pada *blade runner* memperlihatkan nilai tekanan yang lebih rendah secara keseluruhan dengan gradien tekanan yang lebih landai. Pada konfigurasi tiga sudu, perbedaan tekanan antara sisi tekan dan sisi hisap masih cukup jelas dan terdistribusi merata, menunjukkan bahwa pada putaran rendah energi fluida masih dapat dikonversi secara efisien. Hal ini selaras dengan efisiensi yang relatif tinggi, yaitu 66,437%. Pada putaran yang lebih

rendah, gaya sentrifugal dan perubahan momentum fluida juga menurun sehingga distribusi tekanan pada sudu menjadi lebih landai dibandingkan kondisi putaran tinggi (Nechleba, 1957).

Pada konfigurasi empat sudu, distribusi tekanan tampak cukup stabil namun belum optimal, karena gaya inersia fluida pada putaran rendah belum sepenuhnya mampu membebani seluruh sudu secara efektif. Pada lima dan enam sudu, area tekanan rendah menjadi lebih dominan pada sebagian besar permukaan sudu. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada putaran rendah, energi kinetik fluida tidak mencukupi untuk mengatasi resistansi akibat banyaknya sudu, sehingga kinerja turbin menurun secara signifikan (Ain et al., 2025).



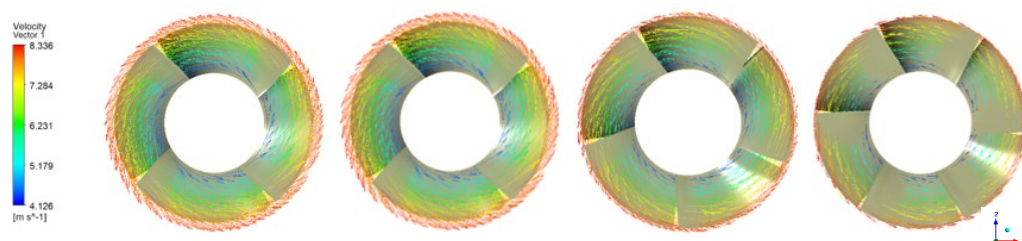
Gambar 4.31 Visualisasi Velocity Vektor Untuk 3, 4, 5, dan 6 Sudu Pada Debit 25 l/s dan RPM 1700

Visualisasi vektor kecepatan pada Gambar 4.31 menggambarkan arah dan magnitudo kecepatan fluida di sekitar *blade runner* pada kondisi 1700 RPM, dengan legenda kecepatan berkisar antara $\pm 3,3$ m/s (biru) hingga $\pm 10,0$ m/s (merah). Pada konfigurasi tiga sudu, vektor kecepatan relatif panjang dan terarah mengikuti arah rotasi *runner*, dengan magnitudo dominan pada kisaran 7–9 m/s. Hal ini menunjukkan transfer momentum yang efektif meskipun mulai muncul fluktuasi arah aliran akibat kecepatan tinggi. Panjang vektor kecepatan yang relatif besar menunjukkan tingginya momentum fluida yang tersedia untuk

dikonversi menjadi energi mekanik melalui interaksi dengan sudu runner (Dixon, 1998).

Pada konfigurasi empat sudu, distribusi vektor kecepatan terlihat paling seragam, dengan arah aliran yang konsisten dan magnitudo yang relatif merata di sekitar sudu. Kondisi ini menjelaskan mengapa konfigurasi empat sudu menunjukkan peningkatan efisiensi pada putaran tinggi. Distribusi kecepatan yang seragam merupakan indikator kualitas aliran yang baik karena mengurangi terjadinya *flow separation* dan daerah resirkulasi yang dapat meningkatkan kerugian energi (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Sebaliknya, pada lima sudu, vektor kecepatan memperlihatkan variasi arah yang signifikan serta pemendekan vektor di beberapa zona, menandakan terjadinya *flow interference* dan peningkatan turbulensi lokal. Pada enam sudu, meskipun magnitudo kecepatan relatif tinggi di dekat sudu, arah aliran menjadi semakin tidak seragam, sehingga sebagian energi kinetik fluida terdisipasi dan tidak berkontribusi optimal terhadap pembentukan torsi. Variasi arah vektor yang besar dan pemendekan vektor merupakan indikasi meningkatnya turbulensi lokal serta *flow interference* antar sudu, yang menyebabkan sebagian energi kinetik terdisipasi menjadi energi turbulen (Wilcox, 2006).



Gambar 4.32 Visualisasi Velocity Vektor Untuk 3, 4, 5, dan 6 Sudu Pada Debit

25 l/s dan RPM 1300

Pada 1300 RPM sebagaimana yang divisualisasikan dalam Gambar 4.32 di atas, vektor kecepatan pada *blade runner* menunjukkan magnitudo yang lebih rendah, dengan dominasi nilai pada kisaran 5–7 m/s. Untuk tiga sudu, vektor kecepatan masih terdistribusi cukup merata dan searah, mencerminkan kondisi operasi yang stabil dan efisien. Pada empat sudu, distribusi kecepatan tampak seimbang meskipun magnitudonya lebih rendah dibandingkan putaran tinggi. Pada putaran rendah, kecepatan relatif fluida terhadap runner juga menurun sehingga magnitudo vektor kecepatan cenderung lebih kecil dibandingkan kondisi putaran tinggi (Nechleba, 1957).

Sebaliknya, pada lima dan enam sudu, vektor kecepatan menunjukkan pemendekan yang signifikan dan munculnya pola sirkulasi lokal di antara sudu. Fenomena ini mengindikasikan bahwa pada putaran rendah, energi fluida tidak cukup untuk menggerakkan seluruh sudu secara efektif, sehingga terjadi peningkatan losses dan penurunan efisiensi (Kadhim et al., 2025).