

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Grid Independence Test Simulasi

Grid Independence Test merupakan tahap awal yang esensial dalam proses simulasi berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Uji ini bertujuan untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak bergantung secara signifikan terhadap ukuran *mesh* atau jumlah elemen yang digunakan dalam pemodelan domain. Dengan kata lain, perubahan hasil simulasi harus bersifat konvergen meskipun dilakukan pemadatan *mesh* lebih lanjut. Hal ini penting untuk menjamin bahwa solusi numerik stabil, akurat, dan efisien secara komputasi.

Evaluasi dilakukan dengan membandingkan beberapa konfigurasi *mesh* yang berbeda, menggunakan parameter seperti *skewness*, *orthogonal quality*, dan jumlah total elemen. Nilai-nilai ini menilai sejauh mana kualitas geometris elemen mempengaruhi kestabilan dan akurasi simulasi.

4.1.1 Set-up Mesh Grid Independence Test Simulasi

Pengaturan awal uji *Grid Independence Test* dilakukan dengan memvariasikan ukuran *mesh* dari *cell length* 9 mm hingga 6.5 mm. Setiap variasi dievaluasi berdasarkan parameter *skewness*, *orthogonal quality*, serta jumlah total elemen. Nilai *skewness* yang rendah dan *orthogonal quality* yang mendekati angka 1 menunjukkan bahwa kualitas elemen berada dalam kategori baik.

Dapat dilihat pada Tabel 4.1, seluruh konfigurasi *mesh* menunjukkan nilai rata-rata *skewness* di bawah 0.006 dan *orthogonal quality* di atas 0.92, yang mengindikasikan bahwa *mesh* memiliki kualitas geometris yang baik.

Tabel 4. 1 *Set-up Mesh Grid Independence Test Simulasi*

No	Keterangan										Number of Element
	Size Mesh [mm]		Cell Length [mm]		Skewness			Orthogonal Quality			
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Average	Min	Max	Average	
1	0.52734	9	0.52734	8.4375	1.1E-10	0.638	0.00587	0.054	1	0.928	7714356
2		8.5			1.8E-10	0.557	0.00580	0.051	1	0.929	7734999
3		8			1.9E-11	0.635	0.00583	0.051	1	0.929	7756413
4		7.5			1.8E-10	0.611	0.00585	0.053	1	0.930	7777093
5		7			8.5E-11	0.648	0.00581	0.053	1	0.930	7798704
6		6.5			2.5E-10	0.743	0.00581	0.054	1	0.931	7830116
7		6.5		4.22	2.5E-10	0.743	0.00580	0.051	1	0.931	7862780

Seiring penurunan ukuran *cell*, jumlah elemen meningkat, namun tidak terjadi perubahan signifikan pada parameter kualitas elemen. Hal ini menunjukkan bahwa solusi simulasi cenderung stabil dan tidak sensitif terhadap pemadatan *mesh* lebih lanjut.

4.1.2 Post Processing Grid Independence Test Simulasi

Tabel 4.2 menyajikan hasil Grid Independence Test yang dilakukan untuk mengevaluasi sensitivitas hasil simulasi CFD terhadap variasi jumlah elemen mesh. Berdasarkan data, nilai torsi yang diperoleh menunjukkan kestabilan dengan rentang yang sangat sempit, yaitu antara 6.3525 hingga 6.3583 Nm, meskipun jumlah elemen mesh meningkat dari 7.71 juta hingga 7.86 juta.

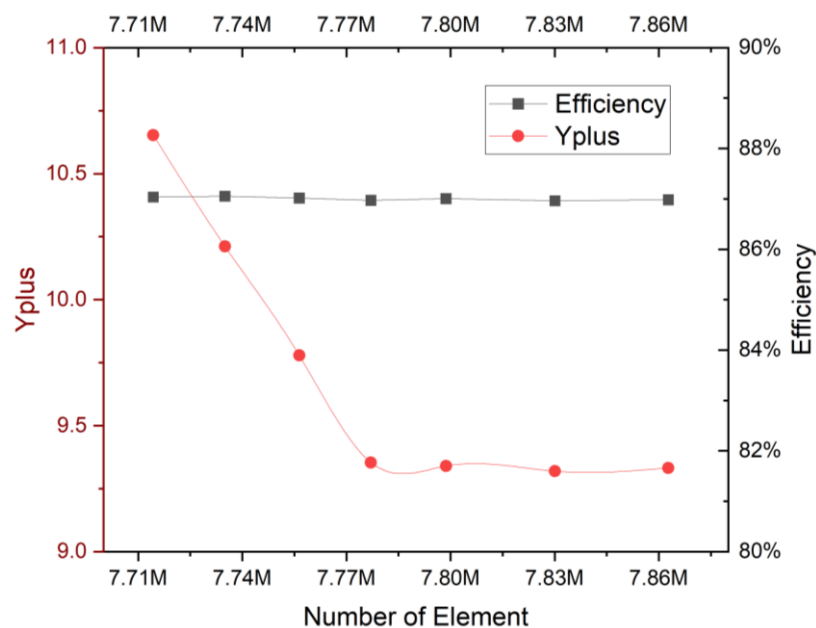
Tabel 4. 2 *Grid Independence Simulasi*

Number of Cells	Torque Simulation	Konservasi Massa
7714356	6.3525	0.002386%
7734999	6.3541	0.001875%
7756413	6.3583	0.002489%
7777093	6.3553	0.002220%
7798704	6.3537	0.002273%
7830116	6.3538	0.002326%
7862780	6.3553	0.002093%

Selain itu, parameter konservasi massa ditampilkan sebagai indikator validitas solusi numerik. Dalam metode CFD, konservasi massa merupakan

penerapan langsung dari hukum kekekalan massa yang menyatakan bahwa massa tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan dalam sistem tertutup. Nilai kesalahan konservasi massa yang ditunjukkan pada tabel berada pada orde 10^{-3} %, yang dapat dianggap sangat kecil. Dengan demikian, hal ini membuktikan bahwa solver CFD mampu menjaga keseimbangan aliran massa di seluruh domain komputasi, serta memperkuat keandalan dan validitas fisik dari hasil simulasi yang diperoleh.

Hasil ini konsisten dengan tren yang ditampilkan pada Gambar 4.1 bahwa hasil *post-processing* dari *Grid Independence Test* menunjukkan tren stabil pada parameter *efficiency* dan penurunan signifikan pada *Yplus* seiring bertambahnya jumlah elemen. Nilai *efficiency* cenderung konstan di kisaran 86–87%, sedangkan *Yplus* turun drastis hingga mencapai kestabilan di angka sekitar 9.2 setelah jumlah elemen melebihi 7.77 juta.



Gambar 4. 1 *Grid Independence* Simulasi

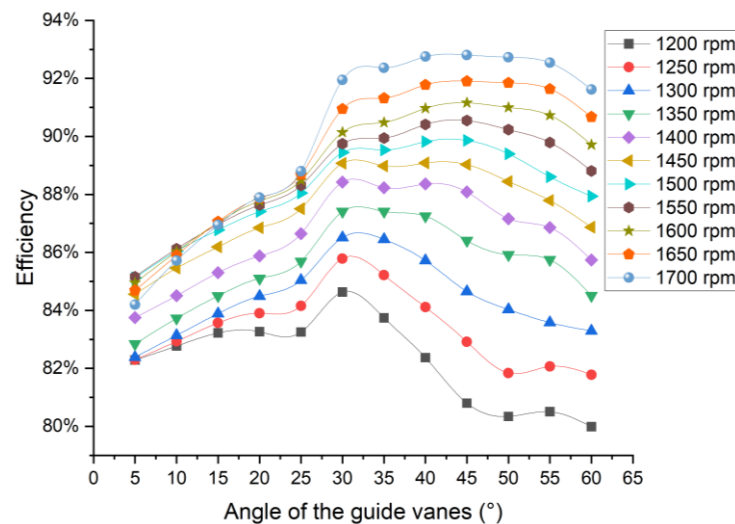
Dari grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa penambahan jumlah elemen di atas 7.77 juta tidak lagi memberikan perubahan berarti pada hasil simulasi. Oleh karena itu, konfigurasi *mesh* dengan jumlah elemen tersebut dianggap telah

mencapai kondisi *grid independence*, dengan keseimbangan antara akurasi hasil dan efisiensi komputasi.

4.2 Variasi Sudut Sudu Pengarah (*Guide vane*)

Sudut guide vane (GV) merupakan salah satu parameter penting yang memengaruhi kinerja turbin Kaplan karena berfungsi mengatur arah aliran fluida sebelum memasuki runner. Perubahan sudut GV menentukan kesesuaian arah kecepatan fluida dengan sudu masuk runner, yang pada gilirannya memengaruhi besarnya gaya tangensial dan efisiensi turbin.

Pada variasi putaran, tren efisiensi menunjukkan peningkatan dari sudut GV kecil hingga mencapai puncak pada sudut tertentu. Kecenderungan ini dapat dilihat pada Gambar 4.2, di mana kurva efisiensi meningkat seiring bertambahnya sudut GV.

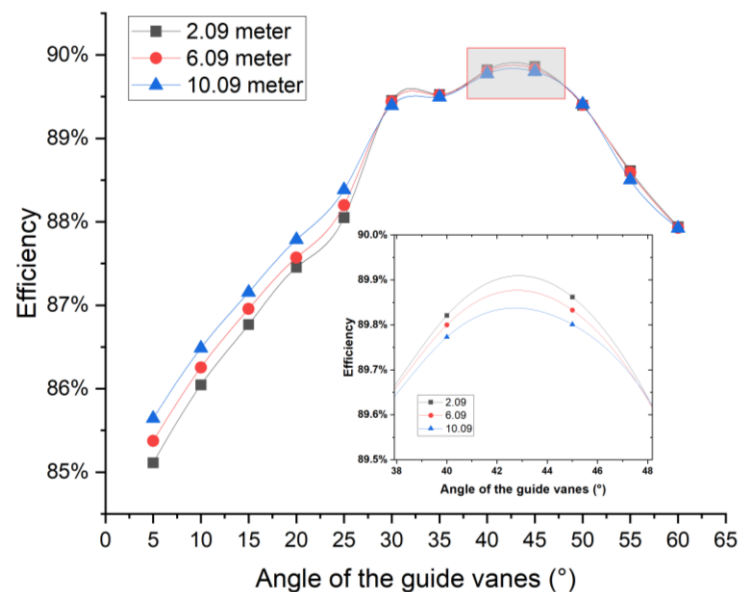


Gambar 4. 2 Grafik Efisiensi Variasi Sudut *Guide vane* pada Variasi Putaran

Secara lebih terperinci, pada putaran rendah 1200 rpm efisiensi meningkat dari 82,29% pada GV 5° hingga mencapai puncak 84,63% pada GV 30°, lalu menurun kembali setelah GV 35°. Pola serupa terjadi pada 1400 rpm: efisiensi

tertinggi berada di GV 30° sebesar 88,42%, kemudian relatif mendatar pada 35°–40° ($\pm 88,23$ –88,36%) dan menurun setelahnya. Pada 1500 rpm, titik optimum mulai bergeser ke GV 40°–45° dengan efisiensi puncak $\approx 89,86\%$ pada GV 45°. Kondisi terbaik diperoleh pada 1700 rpm, ketika GV 45° menghasilkan efisiensi maksimum 92,81%, nilai tertinggi dari seluruh simulasi. Temuan ini menunjukkan bahwa pada putaran rendah sudut optimum berada di sekitar GV 30°, sedangkan pada putaran menengah hingga tinggi bergeser konsisten ke GV 40°–45°; dengan kata lain, sudut optimum bersifat bergeser mengikuti kondisi operasi turbin.

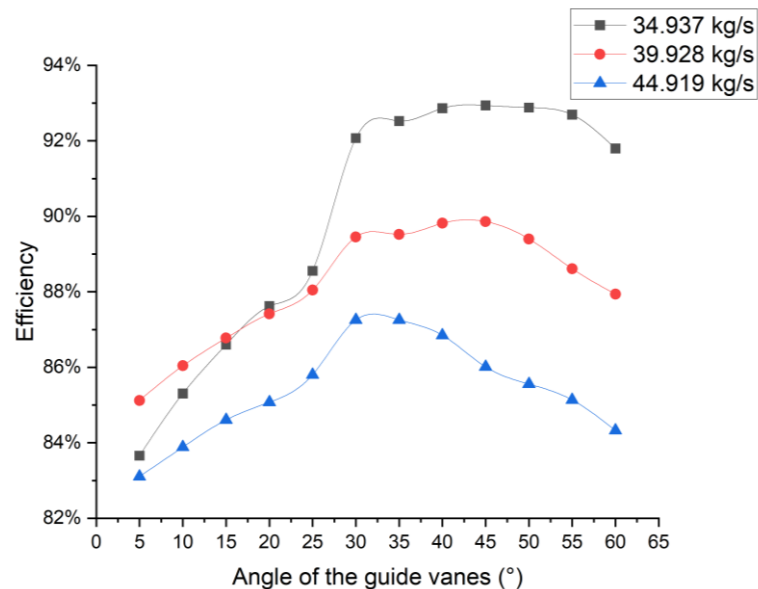
Pada variasi head, kecenderungan yang terbentuk relatif seragam. Seperti terlihat pada Gambar 4.3, efisiensi awal pada GV kecil (5°–20°) berada di kisaran 85–88%, kemudian meningkat secara bertahap menuju titik optimum.



Gambar 4. 3 Grafik Efisiensi Variasi Sudut *Guide vane* pada Variasi *Head*

Puncak efisiensi dicapai pada GV 40°–45°, dengan nilai sekitar 89,8–89,9% pada semua variasi head (2,09 m; 6,09 m; dan 10,09 m). Menariknya, perubahan head tidak menggeser posisi sudut optimum, yang menandakan bahwa pengaturan GV lebih dominan dalam memengaruhi efisiensi dibandingkan variasi head.

Sementara itu, variasi debit massa menunjukkan sensitivitas yang lebih tinggi. Pada Gambar 4.4, terlihat bahwa peningkatan debit massa memengaruhi pergeseran titik optimum GV.



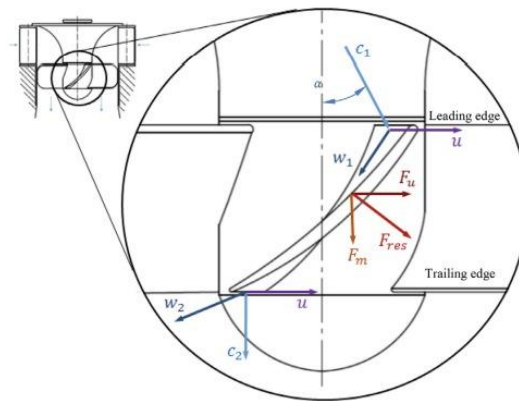
Gambar 4. 4 Grafik Efisiensi Variasi Sudut *Guide vane* pada Variasi Putaran *Massflow*

Pada debit rendah (34,94 kg/s), GV 45° menghasilkan efisiensi tertinggi yakni 92,94%. Namun pada debit menengah (39,93 kg/s), nilai optimum menurun menjadi 89,86%, sedangkan pada debit tinggi (44,92 kg/s), titik optimum bergeser ke GV 35° dengan capaian 87,25%. Hal ini mengindikasikan bahwa debit berlebih dapat memicu ketidakstabilan aliran dan separasi, sehingga sudut optimum berpindah ke nilai yang lebih kecil.

Temuan penelitian ini sejalan dengan Tran et al. (2021) yang melaporkan peningkatan efisiensi signifikan pada GV 30° sebagai sudut transisi menuju kondisi optimum, serta Krzemianowski & Kaniecki (2023) yang menekankan bahwa bentuk dan sudut guide vane berperan penting dalam menjaga kestabilan efisiensi, terutama pada kondisi operasi bervariasi. Selain itu, studi numerik Kaplan turbine

oleh Khoddami et al. (2025) juga menegaskan bahwa pengaturan sudut GV yang optimal dapat meningkatkan efisiensi lebih dari 40%, sedangkan Abeykoon (2022) menunjukkan bahwa optimasi sudut bilah mampu meningkatkan efisiensi dari 59,98% hingga 93,01%.

Fenomena ini dapat dijelaskan melalui teori distribusi arah aliran dan vektor gaya seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Diagram Vektor Kecepatan dan Gaya Sudu Turbin Kaplan

Efisiensi maksimum dicapai ketika kecepatan masuk fluida (c_1) sejajar dengan sudut masuk sudu (*leading edge*) sehingga menghasilkan komponen gaya tangensial (F_u) yang besar. Pada GV kecil, arah aliran terlalu tegak terhadap bidang sudu sehingga sebagian energi hilang. Sebaliknya, GV yang terlalu besar (50° – 60°) menyebabkan aliran terlalu sejajar, berpotensi menimbulkan *flow-through* atau aliran melewati sudu tanpa menghasilkan momen putar optimal, terutama pada putaran tinggi. Kondisi ini sesuai dengan temuan Krzemianowski & Kaniecki (2023) yang menunjukkan bahwa GV besar cenderung menurunkan efisiensi akibat *flow misalignment* dan *flow separation*. Hal serupa dikonfirmasi oleh Tran et al. (2021), bahwa konfigurasi GV lebih dari 30° mulai mengalami penurunan efisiensi karena aliran tidak lagi optimal dalam menghasilkan energi.

4.3 Variasi Putaran

4.3.1 Set-up Parametric Variasi Putaran

Dapat dilihat pada Tabel 4.3 bahwa simulasi dilakukan dengan memvariasikan kecepatan putaran dari 1200 hingga 1700 rpm. Parameter lain seperti *hydraulic diameter*, *intensitas turbulensi*, dan *mass flow outlet* dijaga tetap untuk menjaga konsistensi kondisi simulasi.

Tabel 4. 3 *Set-up Parametric Variasi Putaran*

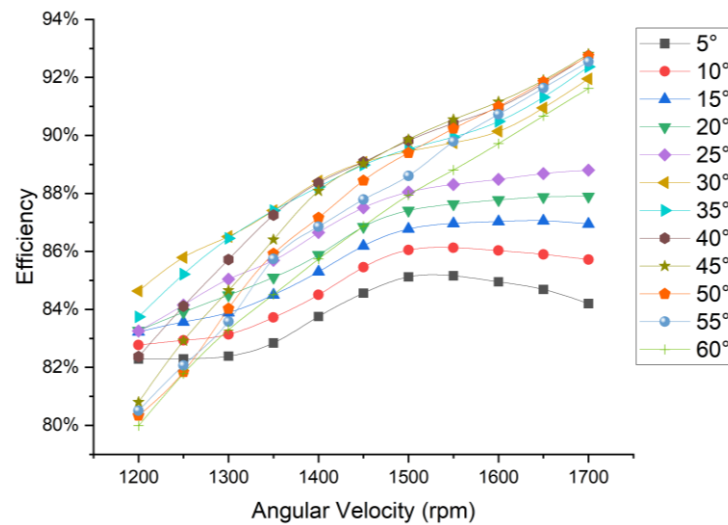
Name	hydraulic diameter	intensitas turbulensi	massflow outlet in	pstat inlet in	ptot inlet in	rpm
Units	[m]		[kg/s]	[Pa]	[Pa]	[rev/min]
Base DP	0.1524	0.0326	39.928	20465.99478	22868.30103	1200
1	0.1524	0.0326	39.928	20465.99478	22868.30103	1250
2	0.1524	0.0326	39.928	20465.99478	22868.30103	1300
3	0.1524	0.0326	39.928	20465.99478	22868.30103	1350
4	0.1524	0.0326	39.928	20465.99478	22868.30103	1400
5	0.1524	0.0326	39.928	20465.99478	22868.30103	1450
6	0.1524	0.0326	39.928	20465.99478	22868.30103	1500
7	0.1524	0.0326	39.928	20465.99478	22868.30103	1550
8	0.1524	0.0326	39.928	20465.99478	22868.30103	1600
9	0.1524	0.0326	39.928	20465.99478	22868.30103	1650
10	0.1524	0.0326	39.928	20465.99478	22868.30103	1700

Nilai *pstat inlet* dan *ptot inlet* juga dipertahankan konstan guna memastikan bahwa variasi efisiensi murni disebabkan oleh perubahan putaran.

4.3.2 Post Processing *Variasi Putaran*

4.3.2.1 Grafik Efisiensi Variasi Putaran

Tren efisiensi terhadap variasi putaran (*RPM*) ditunjukkan pada Gambar 4.6, yang menggambarkan kinerja sistem turbin untuk sudut *guide vane* (GV) antara 5° hingga 60°.

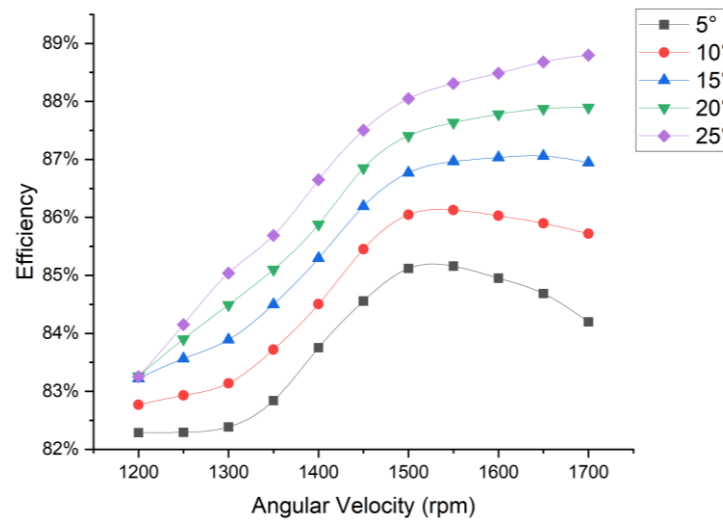


Gambar 4. 6 Grafik Efisiensi Variasi Putaran

Secara umum, efisiensi meningkat dengan bertambahnya putaran. Namun, grafik ini mengindikasikan dua kelompok utama:

1. GV kecil (5° – 25°), yang menunjukkan peningkatan efisiensi hingga titik optimum lalu menurun.
2. GV besar (30° – 60°), yang umumnya menunjukkan peningkatan efisiensi lebih konsisten. Pola ini menunjukkan bahwa sudut GV berpengaruh signifikan terhadap arah aliran fluida masuk ke sudu *runner*, yang pada akhirnya memengaruhi performa energi yang dikonversi.

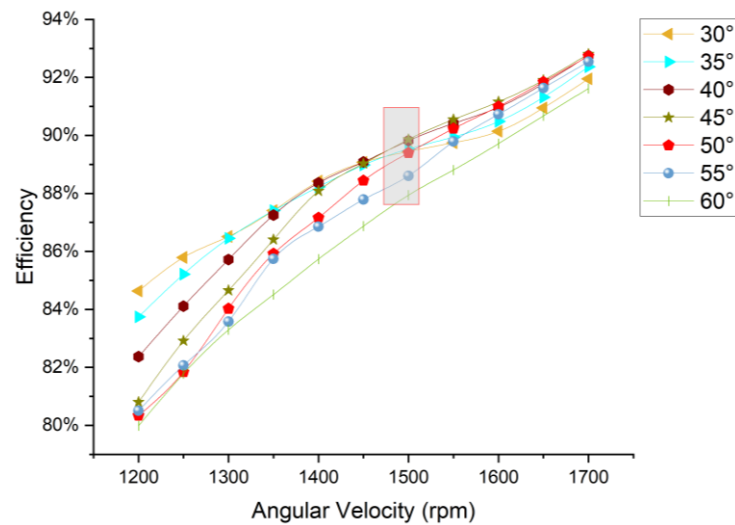
Gambar 4.7 secara khusus menampilkan tren efisiensi untuk sudut GV 5° hingga 25° .



Gambar 4. 7 Grafik Efisiensi Variasi Putaran pada Sudut *Guide vane* 5°-25°

Pada konfigurasi ini, efisiensi cenderung meningkat. Untuk sudut 5°, 10°, dan 15°, efisiensi mencapai puncaknya di kisaran 1500-1600 RPM sebelum sedikit menurun. Sementara itu, untuk sudut 20° dan 25°, efisiensi terus meningkat hingga putaran 1700 RPM, di mana GV 25° mencapai efisiensi 88.80%. Penurunan ini dapat disebabkan oleh terbatasnya sudut aliran masuk, yang menyebabkan ketidaksesuaian arah fluida terhadap bidang sudu *runner*, sehingga menghasilkan *flow misalignment* dan kerugian energi akibat *recirculation* atau *flow separation* pada kecepatan tinggi

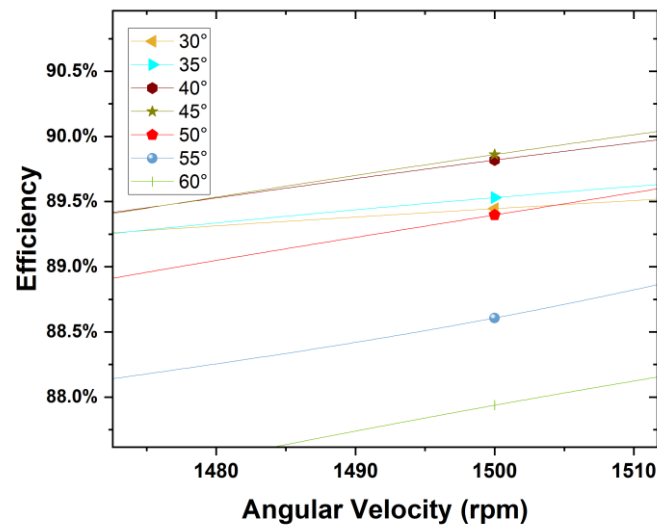
Sebaliknya, Gambar 4.8 menampilkan kinerja efisiensi GV besar (30°–60°). Grafik menunjukkan pola peningkatan efisiensi yang lebih stabil hingga putaran 1700 RPM.



Gambar 4. 8 Grafik Efisiensi Variasi Putaran pada Sudut *Guide vane* 30°-60°

Puncak efisiensi sistem dicapai pada sudut GV 45° dengan nilai 92.81% di 1700 RPM, diikuti oleh GV 50° (92.73%) dan GV 40° (92.75%). Meskipun sudut yang lebih besar seperti 55° dan 60° masih menunjukkan peningkatan efisiensi pada RPM tinggi, performanya tidak seoptimal sudut 45°. Sebagai contoh, efisiensi pada GV 60° meningkat dari 90.67% pada 1650 RPM menjadi 91.62% pada 1700 RPM. Namun, nilai akhir ini tetap berada di bawah efisiensi puncak yang dicapai pada sudut 45°. Hal ini mengindikasikan bahwa sudut GV yang terlalu besar mulai kurang efektif dalam mengarahkan aliran fluida untuk menghasilkan konversi energi yang maksimal pada profil sudu.

Untuk memberikan gambaran praktis, Gambar 4.9 menampilkan penekanan khusus pada performa efisiensi turbin pada putaran 1500 RPM.



Gambar 4. 9 Grafik Efisiensi Variasi Putaran 1500RPM

Pemilihan putaran ini relevan karena pada umumnya generator listrik yang tersedia di pasaran dirancang beroperasi pada 1500 RPM (frekuensi 50 Hz). Dari grafik terlihat bahwa efisiensi optimum pada 1500 RPM tercapai pada GV 45° dengan nilai 89,86%.

Secara rinci, Tabel 4.4 memperlihatkan bahwa konfigurasi optimum diperoleh pada GV 45° dengan putaran 1700 RPM, menghasilkan efisiensi maksimum 92,81%. Kondisi ini menjadi titik operasi paling efektif karena memadukan arah aliran yang selaras dengan sudu dan distribusi tekanan yang stabil.

Tabel 4. 4 Efisiensi Variasi Putaran

VARIASI SUDUT GUIDEVANE TERHADAP VARIASI PUTARAN RUNNER													
Putaran Runner (RPM)	1700	84.20%	85.72%	86.95%	87.89%	88.80%	91.95%	92.36%	92.75%	92.81%	92.73%	92.54%	91.62%
	1650	84.69%	85.90%	87.06%	87.88%	88.68%	90.95%	91.32%	91.78%	91.91%	91.85%	91.64%	90.67%
	1600	84.95%	86.03%	87.03%	87.78%	88.49%	90.14%	90.48%	90.97%	91.16%	91.00%	90.73%	89.72%
	1550	85.16%	86.13%	86.96%	87.63%	88.31%	89.75%	89.94%	90.41%	90.55%	90.23%	89.79%	88.81%
	1500	85.12%	86.04%	86.77%	87.41%	88.05%	89.45%	89.53%	89.82%	89.86%	89.40%	88.61%	87.94%
	1450	84.56%	85.45%	86.19%	86.85%	87.50%	89.07%	88.98%	89.08%	89.03%	88.44%	87.79%	86.87%
	1400	83.75%	84.50%	85.30%	85.88%	86.65%	88.42%	88.23%	88.36%	88.09%	87.16%	86.86%	85.74%
	1350	82.84%	83.72%	84.50%	85.10%	85.69%	87.41%	87.41%	87.25%	86.41%	85.92%	85.75%	84.51%
	1300	82.39%	83.14%	83.89%	84.49%	85.04%	86.51%	86.45%	85.72%	84.65%	84.03%	83.58%	83.30%
	1250	82.29%	82.93%	83.57%	83.90%	84.15%	85.79%	85.22%	84.11%	82.92%	81.84%	82.07%	81.78%
1200	82.29%	82.77%	83.22%	83.27%	83.25%	84.63%	83.74%	82.37%	80.80%	80.34%	80.51%	79.99%	
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Sudut Guidevane (°)													

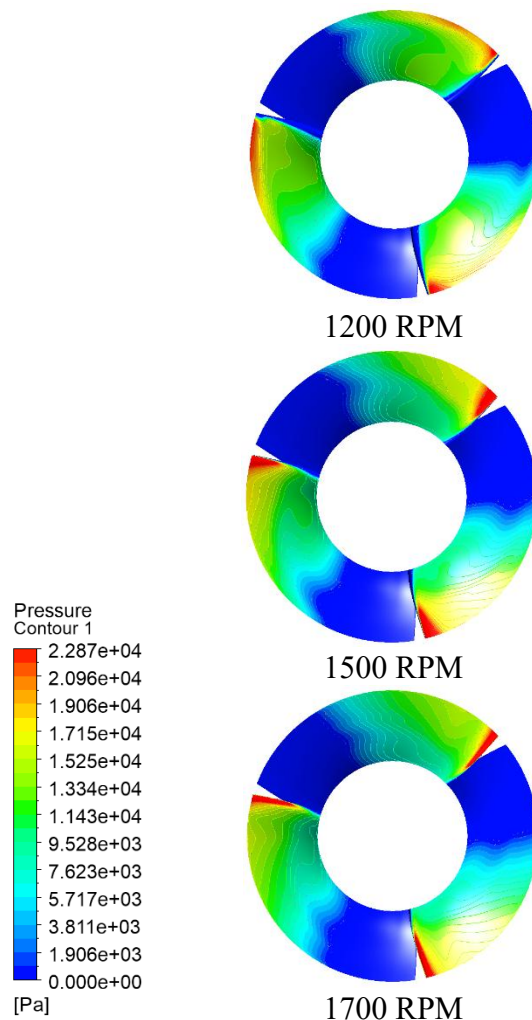
Temuan ini konsisten dengan penelitian Maisuria et al. (2024) yang menunjukkan bahwa meskipun peningkatan laju aliran massa dapat meningkatkan daya keluaran, efisiensi hanya akan meningkat secara signifikan apabila sudut sudu dan arah aliran dikendalikan dengan optimal. Penelitian ini menegaskan bahwa pengaturan sudut sudu dan arah aliran sangat berpengaruh terhadap efisiensi, terutama pada kondisi dengan laju aliran massa yang lebih tinggi. Temuan ini juga didukung oleh Borkowski & Majdak (2020), yang mengidentifikasi bahwa penerapan kecepatan variabel dan penyesuaian sudut sudu yang tepat dapat meningkatkan efisiensi turbin, terutama dalam menghadapi variasi laju aliran massa.

Selain itu, Krzemianowski & Kaniecki (2023) menambahkan bahwa efisiensi maksimum pada turbin Kaplan sangat dipengaruhi oleh keseimbangan antara sudut guide vane (GV) dan kondisi aliran fluida. Deviansi dari kondisi optimum, khususnya pada aliran yang lebih besar, dapat menyebabkan fenomena *flow separation* yang berkontribusi pada penurunan efisiensi. Khoddami et al. (2025) juga menemukan bahwa optimasi desain runner dapat meningkatkan efisiensi lebih dari 40% pada kondisi tertentu, yang menunjukkan bahwa desain yang tepat, serta pengaturan aliran dan kecepatan putaran, sangat mempengaruhi efisiensi turbin pada berbagai variasi mass flow.

Dengan demikian, temuan-temuan tersebut memperkuat bahwa pengaturan sudut guide vane yang tepat, bersama dengan desain yang optimal, sangat penting untuk mempertahankan efisiensi turbin pada kondisi dengan variasi laju aliran massa, terutama pada kondisi aliran tinggi yang dapat menyebabkan penurunan efisiensi secara signifikan.

4.3.2.2 *Contour Pressure Variasi Putaran*

Pada Gambar 4.10 diperlihatkan distribusi tekanan pada sudut guide vane 45° dengan variasi putaran 1200 RPM, 1500 RPM, dan 1700 RPM. Pada 1200 RPM, area sekitar sudu didominasi warna hijau–kuning yang menunjukkan tekanan menengah. Ketika putaran ditingkatkan menjadi 1500 RPM, mulai terbentuk zona oranye hingga merah pada bagian leading edge, yang menandakan adanya peningkatan tekanan lokal akibat bertambahnya kecepatan relatif fluida terhadap permukaan sudu.

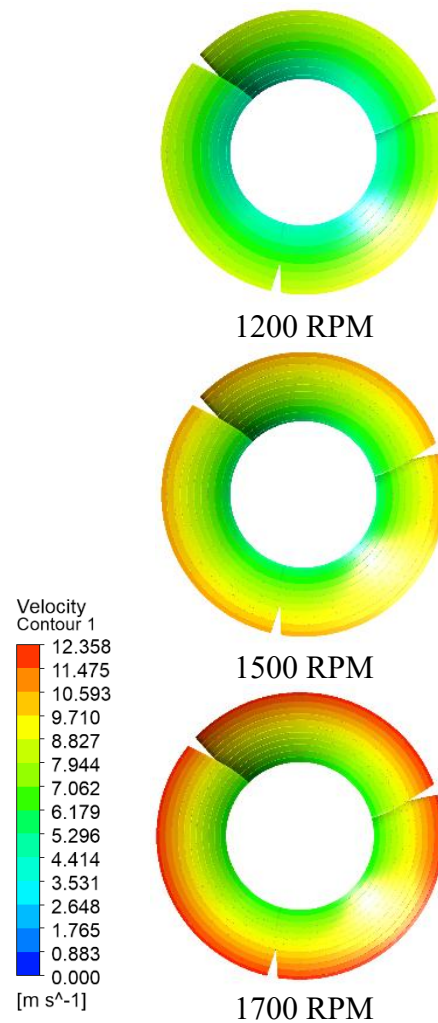


Gambar 4. 10 *Contour Pressure Variasi Putaran pada Sudut Guide vane 45°*

Pada putaran tertinggi, yaitu 1700 RPM, area bertekanan tinggi semakin meluas pada sisi tekan, sedangkan zona bertekanan rendah pada sisi isap relatif tidak mengalami perubahan yang signifikan. Secara teoritis, fenomena ini terjadi karena peningkatan kecepatan rotasi memperbesar energi kinetik fluida dan gaya sentrifugal, sehingga tekanan statis pada sisi tekan cenderung meningkat (Sudsuansee et al., 2025). Sementara itu, sisi isap tetap menunjukkan distribusi tekanan rendah yang relatif stabil karena dipengaruhi oleh geometri sudu dan arah aliran masuk yang tidak banyak berubah. Hasil ini konsisten dengan temuan Binama et al. (2021), yang melaporkan bahwa kenaikan kecepatan impeller memperkuat distribusi tekanan tinggi pada sisi tekan, sedangkan pola tekanan rendah tidak menunjukkan variasi signifikan pada kecepatan yang lebih tinggi.

4.3.2.3 *Contour Velocity Variasi Putaran*

Gambar 4.11 memperlihatkan distribusi kecepatan fluida pada sudut guide vane 45° dengan variasi putaran 1200 RPM, 1500 RPM, dan 1700 RPM. Pada 1200 RPM, area di sekitar runner didominasi warna hijau, menandakan kecepatan sedang. Ketika putaran meningkat ke 1500 RPM, warna kontur berubah menjadi kuning hingga oranye, yang menunjukkan kenaikan kecepatan aliran. Pada 1700 RPM, area dominan berwarna merah dengan nilai kecepatan maksimum mencapai 12,358 m/s, menegaskan bahwa peningkatan putaran secara langsung meningkatkan energi kinetik fluida.



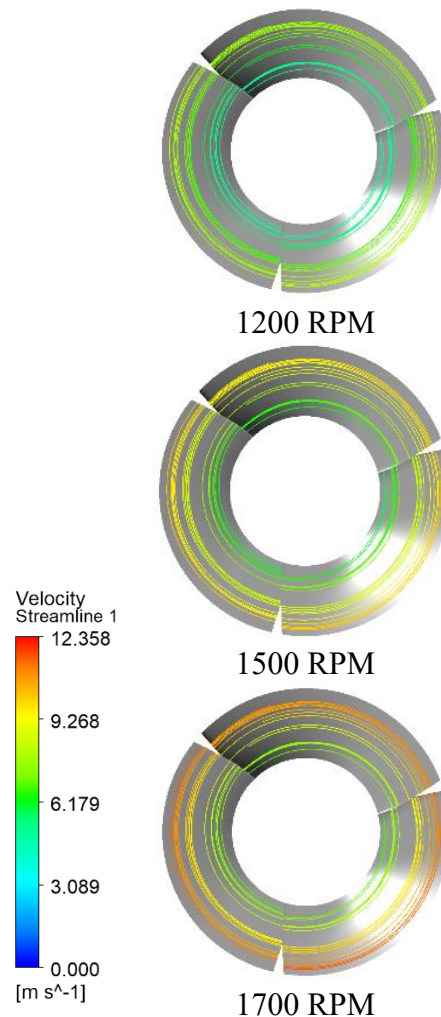
Gambar 4. 11 *Contour Velocity* Variasi Putaran pada Sudut *Guide vane* 45°

Perubahan kontur warna ini membuktikan bahwa semakin tinggi kecepatan putaran runner, semakin besar pula percepatan aliran yang dihasilkan, sehingga mendukung peningkatan performa hidraulik turbin.

4.3.2.4 *Streamline Velocity* Variasi Putaran

Gambar 4.12 menunjukkan distribusi kecepatan aliran dalam bentuk streamline pada sudut *guide vane* 45° dengan variasi putaran 1200 RPM, 1500 RPM, dan 1700 RPM. Pada 1200 RPM, warna dominan hijau menunjukkan aliran dengan kecepatan sedang. Pada 1500 RPM, warna kontur bergeser menjadi kuning-oranye, menandakan peningkatan kecepatan aliran. Pada putaran tertinggi 1700

RPM, jalur aliran didominasi warna merah dengan kecepatan maksimum mencapai 12,358 m/s, yang menegaskan percepatan aliran secara signifikan pada kondisi ini.



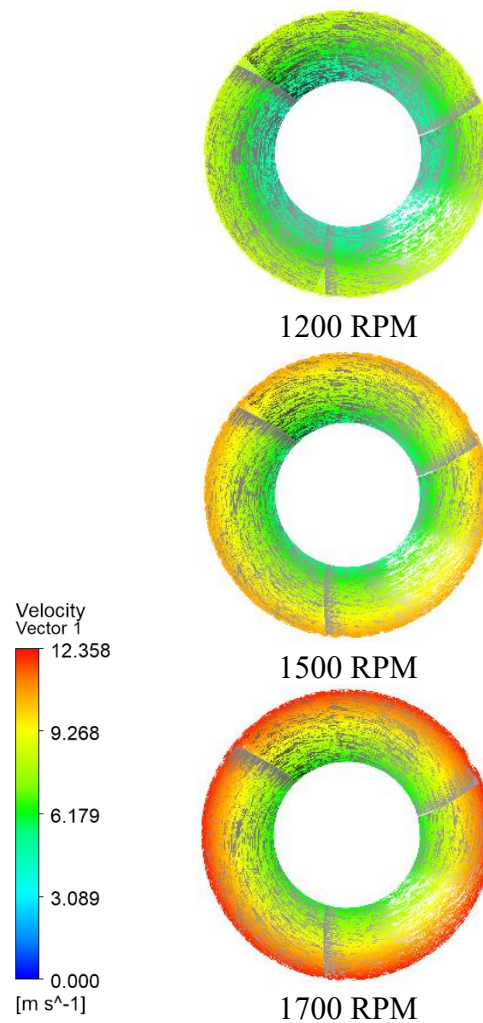
Gambar 4. 12 *Streamline Velocity* Variasi Putaran pada Sudut *Guide vane* 45°

Pola perubahan warna ini membuktikan bahwa kenaikan putaran menghasilkan peningkatan energi kinetik pada fluida, sehingga aliran menjadi lebih cepat dan mendukung kinerja hidraulik turbin.

4.3.2.5 *Vector Velocity* Variasi Putaran

Gambar 4.13 memperlihatkan distribusi vektor kecepatan pada sudut guide vane 45° dengan variasi putaran 1200 RPM, 1500 RPM, dan 1700 RPM. Pada 1200 RPM, vektor di sekitar runner didominasi warna hijau yang menunjukkan kecepatan sedang. Ketika putaran meningkat ke 1500 RPM, warna vektor bergeser

menjadi kuning-oranye, menandakan adanya percepatan aliran. Pada putaran tertinggi 1700 RPM, vektor di area runner didominasi warna merah dengan arah yang seragam, menunjukkan kecepatan maksimum mencapai 12,358 m/s.



Gambar 4. 13 *Vector Velocity* Variasi Putaran pada Sudut *Guide vane* 45°

Perubahan warna dan arah vektor ini menegaskan bahwa peningkatan putaran secara langsung memperbesar energi kinetik fluida yang melewati runner, sehingga mendukung peningkatan performa turbin pada putaran tinggi.

4.4 Variasi *Head*

4.4.1 Set-up Parametric Variasi *Head*

Dapat dilihat pada Tabel 4.5, pengujian dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi *head* terhadap performa turbin dengan parameter putaran *runner* yang dijaga konstan pada 1500 rpm. Tiga skenario disimulasikan, yaitu kondisi dasar (*Base DP*) serta dua variasi *head* dengan peningkatan nilai tekanan statik dan total di inlet. Nilai tekanan statik (*pstat inlet*) bervariasi dari 20465.9948 Pa pada *Base DP* menjadi 59635.3628 Pa (variasi 1) dan 98804.7308 Pa (variasi 2), yang diikuti dengan kenaikan tekanan total (*ptot inlet*) hingga 101207.037 Pa.

Tabel 4. 5 *Set-up Parametric Variasi Head*

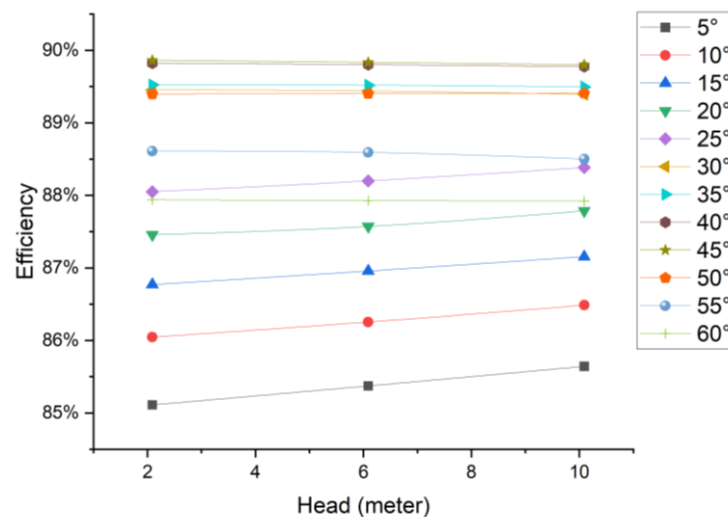
Name	hydraulik_diameter	intensitas_turbulensi	massflow_outlet_in	pstat_inlet_in	ptot_inlet_in	rpm
Units	[m]		[kg/s]	[Pa]	[Pa]	[rev/min]
Base DP	0.1524	0.033197374	39.928	20465.9948	22868.301	1500
1	0.1524	0.032647861	39.928	59635.3628	62037.669	1500
2	0.1524	0.032170712	39.928	98804.7308	101207.037	1500

Meskipun parameter lain seperti diameter hidrolik, intensitas turbulensi, dan laju massa (*mass flow*) dijaga tetap, variasi tekanan ini secara tidak langsung memengaruhi tinggi energi atau *head* fluida yang masuk ke sistem. Dengan mempertahankan laju aliran konstan, variasi tekanan ini dimaksudkan untuk mengevaluasi seberapa besar peningkatan *head* dapat berkontribusi terhadap efisiensi sistem turbin, terutama pada kondisi operasional dengan *RPM* tetap.

4.4.2 Post Processing Variasi *Head*

4.4.2.1 Grafik Efisiensi Variasi *Head*

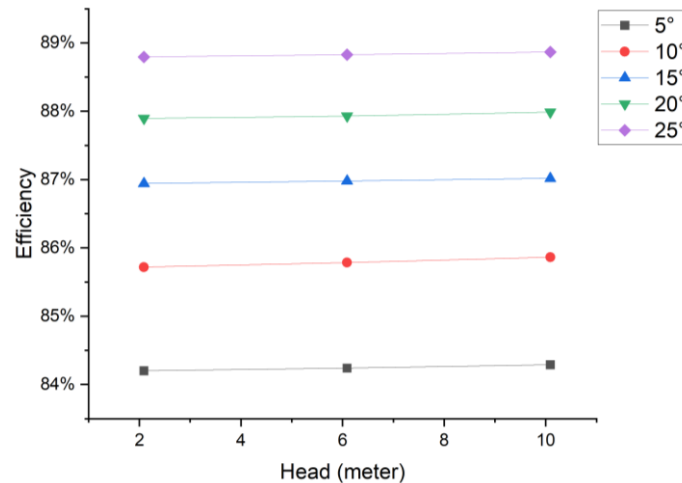
Dapat ditunjukkan pada Gambar 4.14 bahwa variasi *head* memberikan pengaruh terhadap efisiensi sistem turbin pada berbagai sudut *guide vane* (GV), meskipun tren peningkatan yang terjadi relatif kecil.



Gambar 4. 14 Grafik Efisiensi Variasi *Head*

Secara umum, sudut GV menengah hingga besar menunjukkan nilai efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan GV kecil. Efisiensi tertinggi tercapai pada GV 45°, yakni sebesar 89.86% pada *head* 2.09 m, dan tetap konsisten tinggi pada *head* 6.09 m (89.83%) dan *head* 10.09 m (89.80%). Sebaliknya, sudut GV 5° hanya menghasilkan efisiensi sebesar 85.11%–85.64% dalam rentang *head* yang sama, menunjukkan bahwa sudut sempit kurang mampu mengoptimalkan konversi energi dari *head* ke kerja mekanik.

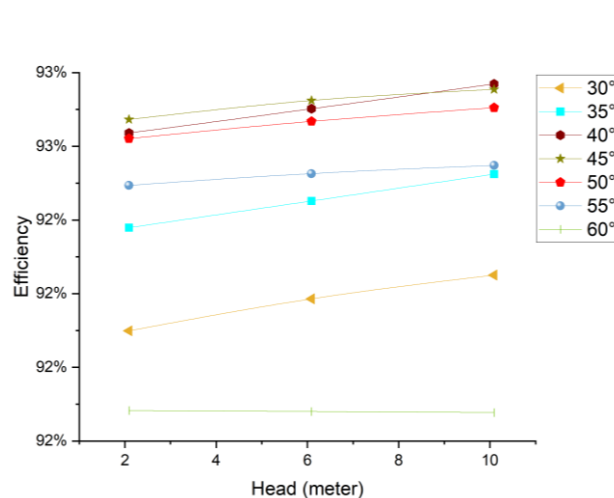
Lebih lanjut, dapat dilihat pada Gambar 4.15 bahwa pada kelompok sudut GV kecil (5°–25°), peningkatan *head* dari 2.09 m ke 10.09 m hanya menghasilkan peningkatan efisiensi sebesar $\pm 0.5\%$ – 0.6% .



Gambar 4. 15 Grafik Efisiensi Variasi *Head* pada Sudut *Guide vane* 5°-25°

Sebagai contoh, GV 25° meningkat dari 88.05% menjadi 88.38%, sedangkan GV 5° hanya meningkat dari 85.11% menjadi 85.64%. Tren ini menunjukkan bahwa sistem cenderung tidak responsif terhadap peningkatan *head* pada konfigurasi GV sempit, kemungkinan karena arah aliran fluida masuk tidak optimal mengenai bidang sudu *runner*, sehingga sebagian energi potensial tidak dikonversi secara efektif.

Sebaliknya, dapat ditunjukkan pada Gambar 4.16 bahwa efisiensi pada GV besar (30°–60°) cenderung sangat tinggi dan relatif konstan terhadap variasi *head*.



Gambar 4. 16 Grafik Efisiensi Variasi *Head* pada Sudut *Guide vane* 30°-60°

GV 40° dan 45° mampu mempertahankan efisiensi di atas 89,7% pada semua kondisi head. Sebagai contoh, GV 45° menunjukkan fluktuasi sangat kecil, yakni 89,86% pada head 2,09 m dan 89,80% pada head 10,09 m. Hal ini menegaskan bahwa sudut optimum mampu menjaga keselarasan arah aliran dengan bidang sudu, sehingga kerugian hidrolis (hydraulic losses) dapat diminimalkan.

Namun, GV terlalu besar seperti 60° justru mengalami stagnasi dengan efisiensi maksimum hanya 87,94% di semua head. Kondisi ini dapat dikaitkan dengan *flow misalignment* akibat aliran terlalu sejajar yang menyebabkan sebagian fluida melewati sudu tanpa menghasilkan momen putar optimal.

Tabel 4.6 mengonfirmasi bahwa GV optimum berada pada kisaran 40°–45°, dengan efisiensi mendekati 90% bahkan pada head rendah. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi GV optimum tetap efektif meskipun terjadi perubahan energi potensial fluida.

Tabel 4. 6 Efisiensi Vriasi *Head*

VARIASI SUDUT GUIDEVANE TERHADAP VARIASI HEAD PADA PUTARAN 1500 RPM													
Head (m)	10.09	85.64%	86.49%	87.16%	87.79%	88.38%	89.39%	89.50%	89.77%	89.80%	89.41%	88.50%	87.92%
	6.09	85.37%	86.25%	86.96%	87.57%	88.20%	89.44%	89.52%	89.80%	89.83%	89.40%	88.59%	87.93%
	2.09	85.11%	86.05%	86.77%	87.46%	88.05%	89.45%	89.53%	89.82%	89.86%	89.40%	88.61%	87.94%
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Sudut Guidevane (°)													

Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan head hanya memberikan pengaruh terbatas terhadap efisiensi turbin Kaplan, selama sudut GV optimum dipertahankan. Temuan ini sejalan dengan Maisuria et al. (2024) yang meneliti turbin tipe bulb untuk aplikasi *ultra-low head*, di mana peningkatan head memang menambah daya keluaran, tetapi efisiensi tidak meningkat signifikan kecuali jika sudut sudu dan arah aliran dikendalikan secara tepat.

Studi Borkowski dan Majdak (2020) mengenai operasi turbin dengan kecepatan variabel juga menegaskan bahwa faktor operasi dan pengaturan sudu

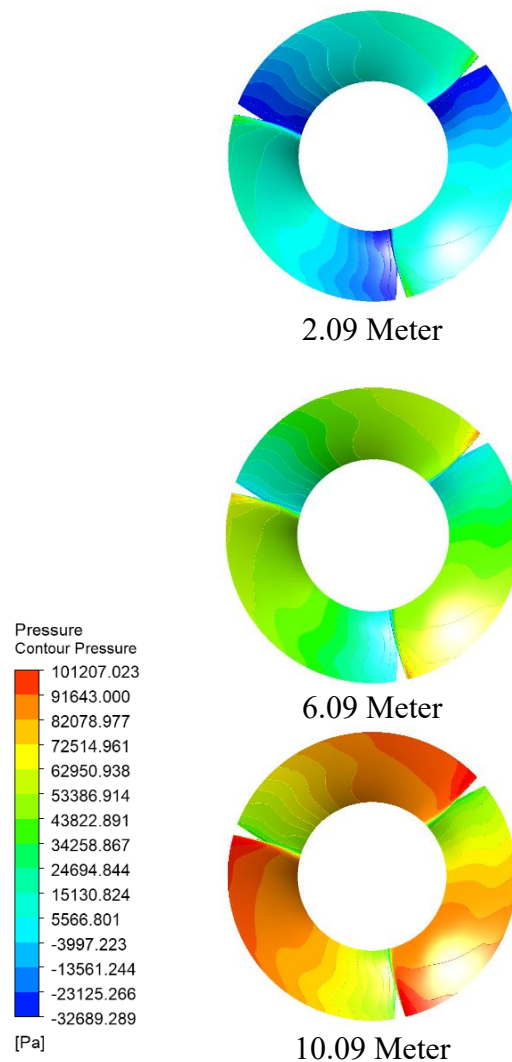
lebih berpengaruh terhadap efisiensi dibandingkan sekadar peningkatan head. Hal ini memperkuat hasil penelitian ini bahwa GV optimum (40° – 45°) tetap mampu menjaga efisiensi tinggi pada berbagai variasi head.

Selain itu, Sudsuansee et al. (2016) melaporkan bahwa kestabilan efisiensi pada turbin Kaplan skala kecil terutama ditentukan oleh keseimbangan antara sudut GV dan kondisi hidrolis, bukan semata-mata oleh besarnya head. Dengan kata lain, kontrol GV lebih dominan dalam mempertahankan efisiensi sistem, sebagaimana tercermin dalam hasil simulasi ini.

Dengan demikian, pada kondisi putaran 1500 rpm, sudut GV 45° dapat disimpulkan sebagai konfigurasi paling optimal untuk berbagai variasi head. Meskipun peningkatan head meningkatkan potensi energi fluida, faktor penentu utama efisiensi tetap terletak pada pengaturan sudut GV yang menjaga keselarasan aliran dengan sudu runner.

4.4.2.2 *Contour Pressure Variasi Head*

ambar 4.17 menunjukkan distribusi tekanan pada blade dengan sudut guide vane 45° untuk variasi head 2,09 m, 6,09 m, dan 10,09 m. Pada head 2,09 m, area blade didominasi warna biru–hijau yang mengindikasikan tekanan relatif rendah. Saat head meningkat ke 6,09 m, kontur tekanan bergeser menjadi kuning–oranye, menunjukkan adanya peningkatan tekanan signifikan. Pada head tertinggi 10,09 m, hampir seluruh area blade didominasi warna merah, yang merepresentasikan tekanan sangat tinggi.



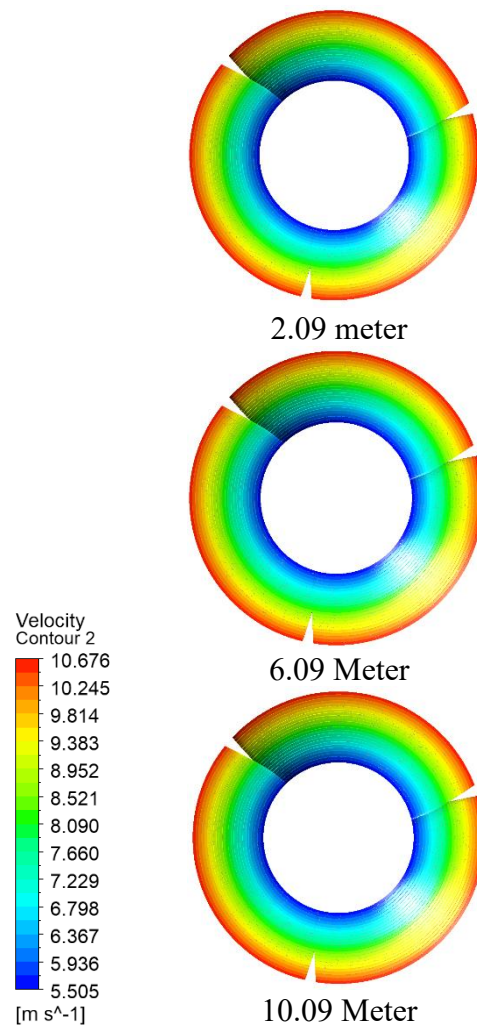
Gambar 4. 17 *Contour Pressure Variasi Head* pada Sudut *Guide vane* 45°

Perubahan gradasi warna ini menegaskan bahwa peningkatan head berbanding lurus dengan kenaikan tekanan pada blade. Transisi dari spektrum biru ke merah menggambarkan peningkatan energi potensial sistem, yang berkontribusi langsung terhadap efisiensi konversi energi fluida pada turbin.

4.4.2.3 *Contour Velocity Variasi Head*

Gambar 4.18 memperlihatkan distribusi kecepatan fluida pada sudut guide vane 45° untuk variasi head 2,09 m, 6,09 m, dan 10,09 m. Hasil visualisasi menunjukkan bahwa pola kontur kecepatan pada ketiga kondisi relatif serupa, dengan dominasi warna hijau–kuning hingga oranye di sekitar runner. Nilai

kecepatan maksimum tercatat sekitar 10,676 m/s dan konsisten pada setiap variasi head.



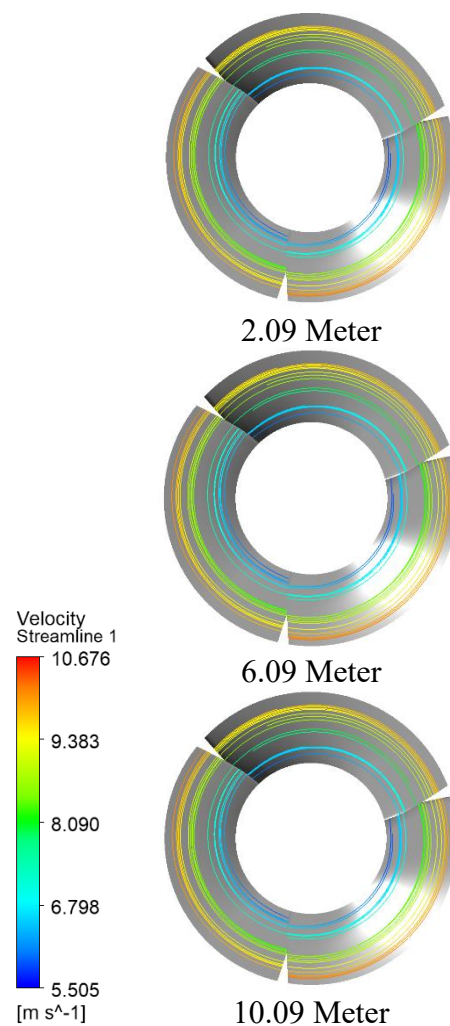
Gambar 4. 18 *Contour Velocity Variasi Head pada Sudut Guide vane 45°*

Kecenderungan ini mengindikasikan bahwa perubahan head tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap distribusi kecepatan fluida pada kondisi putaran dan debit yang dijaga konstan. Dengan demikian, karakteristik aliran cenderung stabil dan tidak terlalu sensitif terhadap variasi energi potensial yang diberikan.

4.4.2.4 *Streamline Velocity Variasi Head*

Gambar 4.19 menunjukkan distribusi kecepatan aliran dalam bentuk streamline pada sudut guide vane 45° dengan variasi head 2,09 m, 6,09 m, dan 10,09

m. Visualisasi memperlihatkan bahwa pola warna kontur pada ketiga kondisi relatif sama, dengan dominasi hijau–kuning yang merepresentasikan kecepatan sedang hingga tinggi. Pada beberapa area terjadi pergeseran warna menuju oranye, namun nilai kecepatan maksimum tetap konstan di sekitar 10,676 m/s pada seluruh variasi head.

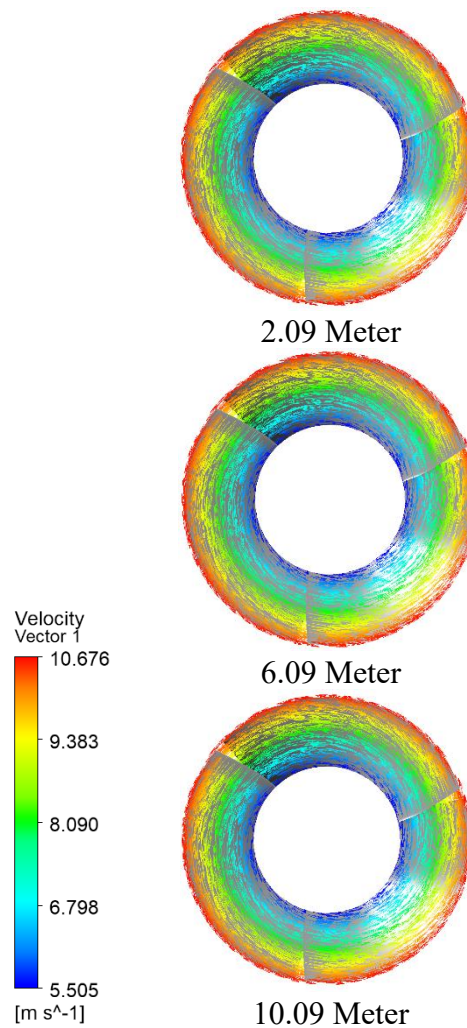


Gambar 4. 19 *Streamline Velocity Variasi Head pada Sudut Guide vane 45°*

Konsistensi ini menegaskan bahwa peningkatan head tidak memberikan perubahan signifikan terhadap distribusi kecepatan fluida. Aliran tetap stabil dan terarah dari guide vane menuju runner, sehingga desain turbin mampu menjaga karakteristik kinematika fluida meskipun energi potensial sistem ditingkatkan.

4.4.2.5 *Vector Velocity Variasi Head*

Gambar 4.20 memperlihatkan distribusi vektor kecepatan pada sudut guide vane 45° dengan variasi head 2,09 m, 6,09 m, dan 10,09 m. Hasil visualisasi menunjukkan bahwa arah dan distribusi kecepatan di sekitar runner relatif seragam pada semua kondisi. Warna vektor didominasi hijau–kuning hingga oranye, dengan nilai kecepatan maksimum konsisten sekitar 10,676 m/s.



Gambar 4. 20 *Vector Velocity Variasi Head* pada Sudut *Guide vane* 45°

Keseragaman pola vektor ini menegaskan bahwa peningkatan head tidak menyebabkan perubahan berarti pada arah maupun intensitas aliran. Fluida tetap mengalir terarah melewati runner dengan pola yang stabil, menunjukkan bahwa

performa turbin lebih dipengaruhi oleh perbedaan tekanan dibandingkan variasi distribusi kecepatan akibat perubahan head.

4.5 Variasi Debit (*Massflow*)

4.5.1 Set-up Parametric *Variasi Debit (Massflow)*

Dapat ditunjukkan pada Tabel 4.7 bahwa simulasi variasi *head* dilakukan dengan mengubah parameter *mass flow outlet* sambil mempertahankan parameter lainnya tetap konstan. Diameter hidrolik dipertahankan pada 0.1524 m dengan intensitas turbulensi sekitar 0.032–0.033, dan kecepatan putaran *runner* dijaga tetap sebesar 1500 rpm. Nilai tekanan statik (*pstat inlet*) juga dikondisikan tetap sebesar 20465.99478 Pa untuk seluruh kasus.

Tabel 4. 7 Set-up Parametric Variasi *Head*

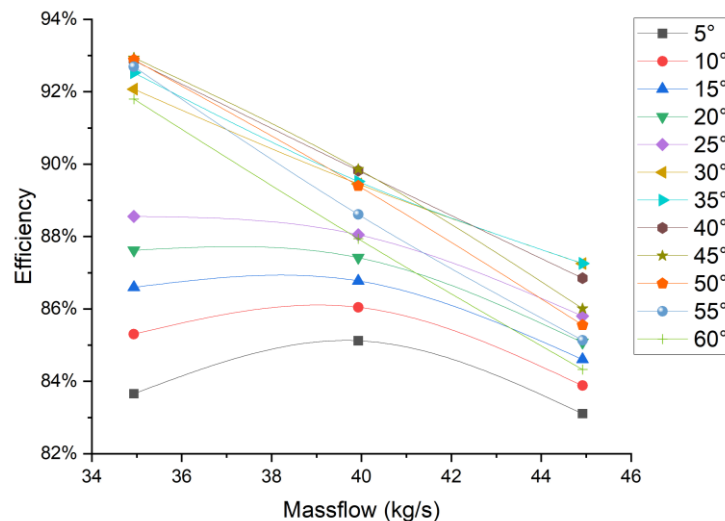
Name	hydraulik diameter	intensitas turbulensi	massflow outlet in	pstat inlet in	ptot inlet in	rpm
Units	[m]		[kg/s]	[Pa]	[Pa]	[rev/min]
Base DP	0.1524	0.033197374	34.937	20465.99478	22305.2605	1500
1	0.1524	0.032647861	39.928	20465.99478	22868.30103	1500
2	0.1524	0.032170712	44.919	20465.99478	23506.41363	1500

Variasi dilakukan dengan menaikkan nilai *mass flow outlet*, yakni dari 34.937 kg/s pada kondisi *Base DP*, menjadi 39.928 kg/s pada variasi 1, dan 44.919 kg/s pada variasi 2. Peningkatan laju aliran massa ini menyebabkan peningkatan tekanan total masuk (*ptot inlet*), yang naik dari 22305.2605 Pa menjadi 22868.30103 Pa dan 23506.41363 Pa. Kondisi ini secara langsung merepresentasikan peningkatan *head* atau energi potensial fluida yang masuk, dengan mempertahankan kondisi geometrik dan kecepatan rotasi, sehingga efek peningkatan *head* terhadap efisiensi sistem dapat dianalisis secara spesifik.

4.5.2 Post Processing Variasi Debit (*Massflow*)

4.5.2.1 Grafik Efisiensi Variasi *Massflow*

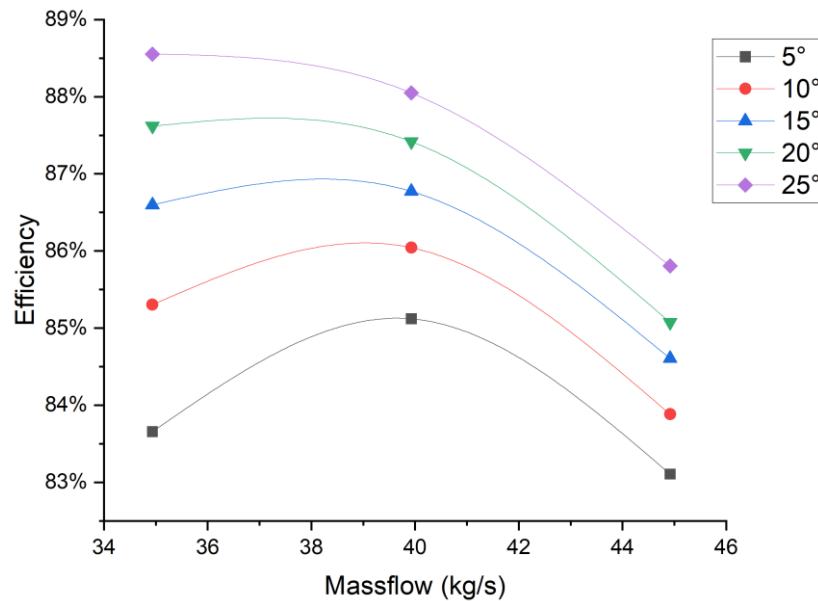
Dapat ditunjukkan pada Gambar 4.21 bahwa efisiensi sistem turbin mengalami penurunan seiring meningkatnya laju aliran massa (*mass flow*) dari 34.937 kg/s ke 44.919 kg/s, untuk hampir seluruh konfigurasi sudut *guide vane* (GV).



Gambar 4. 21 Grafik Efisiensi Variasi *Massflow*

Efisiensi tertinggi terjadi pada *mass flow* 34.937 kg/s, dengan nilai maksimum sebesar 92.94% pada GV 45°, diikuti GV 40° (92.86%) dan GV 50° (92.88%). Pada *mass flow* tertinggi (44.919 kg/s), seluruh konfigurasi menunjukkan penurunan efisiensi, terutama GV besar yang cenderung lebih sensitif terhadap kelebihan debit fluida.

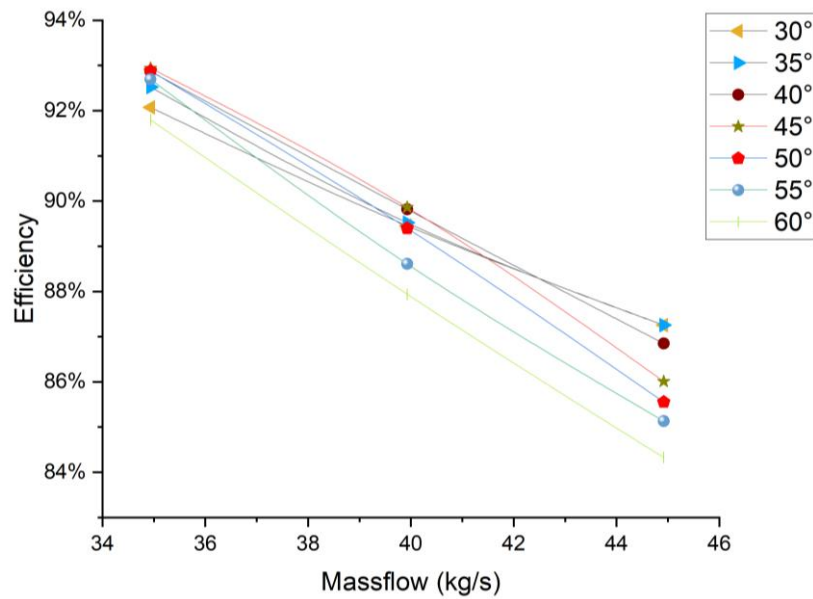
Dapat dilihat pada Gambar 4.22, grafik yang menyoroti sudut GV kecil (5°–25°), bahwa efisiensi tertinggi hanya mencapai 88.55% pada GV 25° dan *mass flow* 34.937 kg/s.



Gambar 4. 22 Grafik Efisiensi Variasi *Massflow* pada Sudut *Guide vane* 5°-25°

Ketika *mass flow* ditingkatkan hingga 44.919 kg/s, efisiensi GV 25° menurun menjadi 85.80%, sementara GV 5° turun drastis hingga 83.11%. Hal ini menunjukkan bahwa sudut GV kecil tidak cukup mampu mengarahkan aliran fluida secara stabil dalam kondisi debit besar, sehingga menghasilkan kerugian aliran yang signifikan (*head losses* dan *recirculation*), yang pada akhirnya menurunkan efisiensi konversi energi.

Sebaliknya, dapat ditunjukkan pada Gambar 4.23 bahwa sudut GV besar (30°–60°) memberikan efisiensi yang jauh lebih tinggi pada *mass flow* rendah, dan meskipun terjadi penurunan saat *mass flow* meningkat, nilainya tetap lebih tinggi dibandingkan GV kecil.



Gambar 4. 23 Grafik Efisiensi Variasi *Massflow* pada Sudut *Guide vane* 30°-60°

GV 45° mencatat efisiensi tertinggi sistem, yaitu 92.94% pada 34.937 kg/s, namun menurun menjadi 86.01% pada 44.919 kg/s. Penurunan yang lebih tajam terjadi pada GV 60°, yang turun dari 91.80% menjadi 84.33%. Ini menunjukkan bahwa GV besar memang efektif pada debit rendah, namun menjadi kurang efisien saat aliran terlalu besar karena potensi *flow separation* dan distribusi tekanan yang tidak merata pada sudu *runner*.

Data dalam Tabel 4.8 mendukung pola tersebut, dengan konfigurasi optimal sistem terjadi pada GV 45° dan *mass flow* 34.937 kg/s, menghasilkan efisiensi puncak 92.94%.

Tabel 4. 8 Efisiensi Variasi *Massflow*

VARIASI SUDUT GUIDEVANE TERHADAP VARIASI MASSFLOW PADA PUTARAN 1500 RPM													
Massflow (Kg/s)	44.919	83.11%	83.88%	84.61%	85.08%	85.80%	87.25%	87.26%	86.85%	86.01%	85.56%	85.13%	84.33%
	39.928	85.12%	86.04%	86.77%	87.42%	88.05%	89.46%	89.52%	89.82%	89.86%	89.40%	88.61%	87.94%
	34.937	83.66%	85.30%	86.60%	87.62%	88.55%	92.07%	92.52%	92.86%	92.94%	92.88%	92.69%	91.80%
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Sudut Guidevane (°)													

Tren umum menunjukkan bahwa efisiensi sistem mencapai nilai tertinggi pada debit rendah, lalu menurun secara progresif seiring kenaikan debit. Hal ini

sesuai dengan prinsip dasar hydraulic loading, di mana peningkatan mass flow di luar kondisi desain akan memperbesar turbulensi, tekanan balik (back pressure), serta memperburuk kualitas interaksi antara fluida dan sudu. Oleh karena itu, konfigurasi optimal yang direkomendasikan adalah sudut GV 45° dengan debit mendekati 35 kg/s pada putaran 1500 RPM.

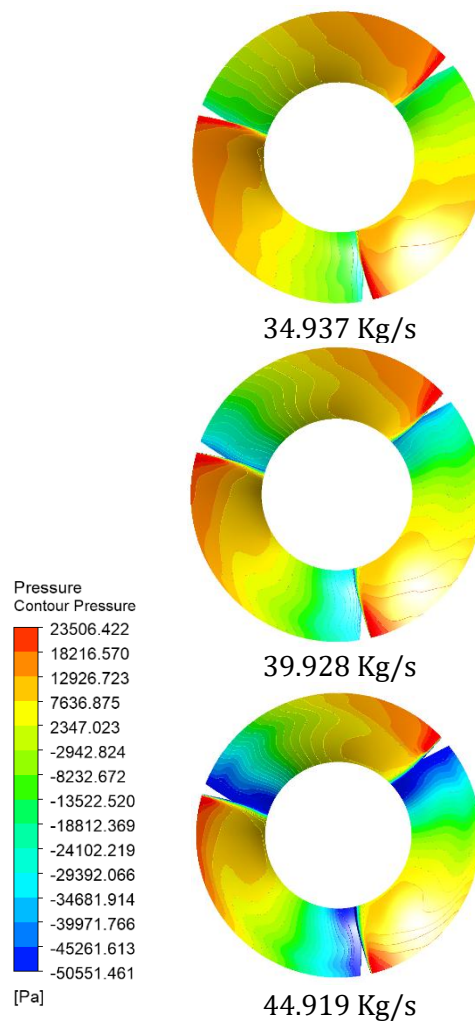
Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa efisiensi sistem turbin dapat ditingkatkan secara signifikan dengan mempertahankan konfigurasi sudut GV yang optimal pada mass flow yang lebih rendah, dan bahwa penurunan efisiensi terjadi dengan meningkatnya mass flow, terutama pada sudut GV besar. Temuan ini sejalan dengan penelitian Maisuria et al. (2024) yang meneliti turbin tipe bulb untuk aplikasi ultra-low head, yang menunjukkan bahwa meskipun peningkatan aliran dapat meningkatkan daya keluaran, efisiensi hanya meningkat secara signifikan apabila sudut sudu dan arah aliran dikendalikan dengan tepat.

Penelitian Sudsuansee et al. (2016) mengenai kestabilan efisiensi pada turbin Kaplan skala kecil juga menegaskan bahwa kontrol sudut GV lebih dominan dalam mempertahankan efisiensi, dibandingkan hanya dengan meningkatkan aliran. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pada kondisi putaran 1500 rpm, sudut GV 45° merupakan konfigurasi yang paling optimal untuk berbagai variasi mass flow.

4.5.2.2 Contour Pressure Variasi Massflow

Gambar 4.24 memperlihatkan distribusi tekanan pada blade dengan sudut guide vane 45° untuk variasi debit massa 34,937 kg/s, 39,928 kg/s, dan 44,919 kg/s. Pada debit terendah (34,937 kg/s), area blade didominasi warna hijau–kuning yang menunjukkan tekanan menengah hingga tinggi. Saat debit meningkat ke 39,928

kg/s, kontur tekanan mulai bergeser dengan munculnya zona biru pada bagian tertentu, menandakan penurunan tekanan lokal. Pada debit tertinggi (44,919 kg/s), area biru semakin meluas, menunjukkan tekanan rendah yang semakin dominan di sekitar blade.

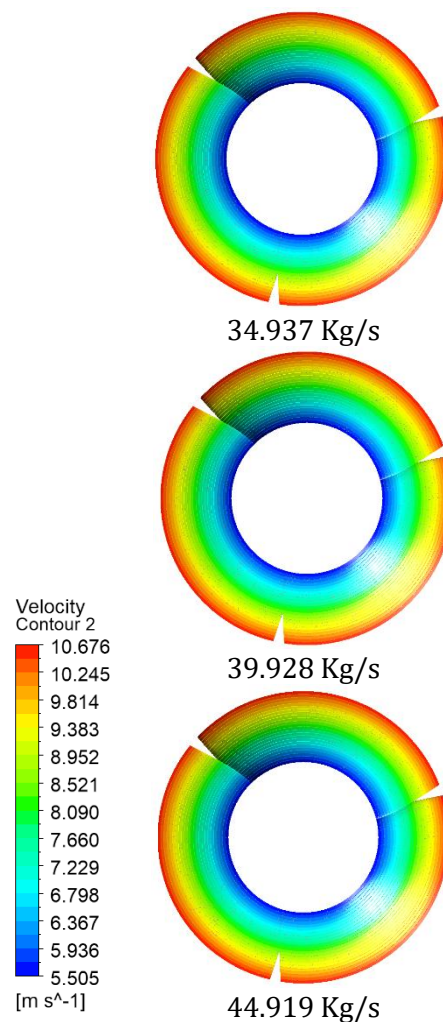


Gambar 4. 24 *Contour Pressure Variasi Massflow pada Sudut Guide vane 45°*

Perubahan distribusi warna ini menegaskan bahwa peningkatan debit massa menghasilkan penurunan tekanan pada area tertentu di blade. Semakin besar debit aliran, semakin tinggi efek hisap yang ditimbulkan, sehingga perbedaan tekanan antara sisi bertekanan tinggi dan rendah semakin signifikan. Fenomena ini menunjukkan adanya peningkatan intensitas aliran yang berkontribusi langsung pada proses konversi energi di runner.

4.5.2.3 Contour Velocity Variasi Massflow

Gambar 4.25 menunjukkan distribusi kecepatan fluida pada sudut guide vane 45° dengan variasi debit massa 34,937 kg/s, 39,928 kg/s, dan 44,919 kg/s. Hasil visualisasi memperlihatkan bahwa pola kontur kecepatan pada ketiga kondisi relatif serupa, dengan dominasi warna hijau–kuning hingga oranye di sekitar runner. Nilai kecepatan maksimum tercatat konstan di sekitar 10,676 m/s pada seluruh variasi massflow.



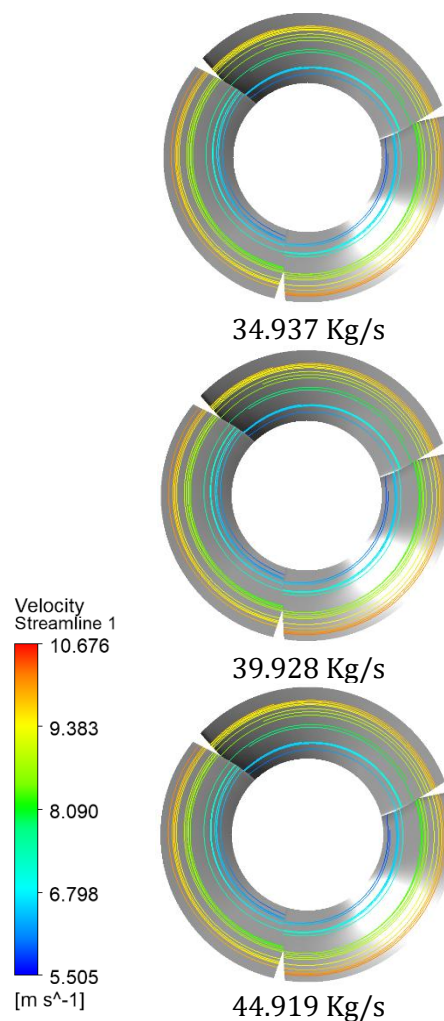
Gambar 4. 25 *Contour Velocity Variasi Massflow* pada Sudut *Guide vane* 45°

Hal ini menegaskan bahwa perubahan massflow tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap percepatan aliran. Kecepatan fluida tetap stabil,

sehingga kinerja hidrodinamik turbin pada kondisi ini lebih banyak dipengaruhi oleh putaran dan sudut sudu, bukan oleh besarnya debit massa.

4.5.2.4 *Streamline Velocity Variasi Massflow*

Gambar 4.26 menunjukkan distribusi kecepatan aliran dalam bentuk streamline pada sudut guide vane 45° untuk variasi debit massa 34,937 kg/s, 39,928 kg/s, dan 44,919 kg/s. Visualisasi memperlihatkan bahwa pola warna di sepanjang jalur aliran relatif sama pada ketiga kondisi, dengan dominasi hijau–kuning hingga oranye yang menandakan kecepatan sedang hingga tinggi. Nilai kecepatan maksimum tercatat konstan sekitar 10,676 m/s pada semua variasi massflow.

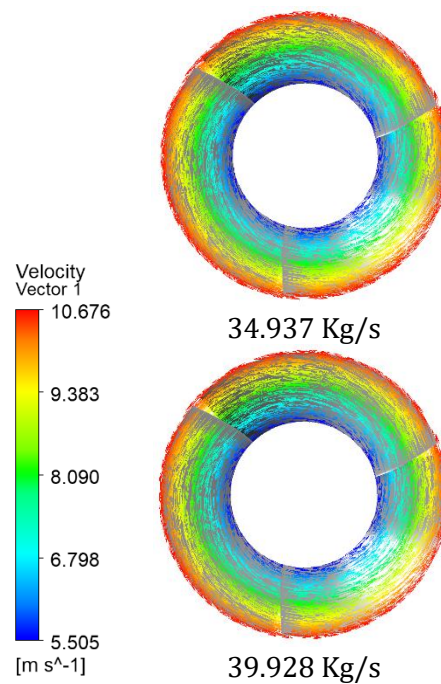


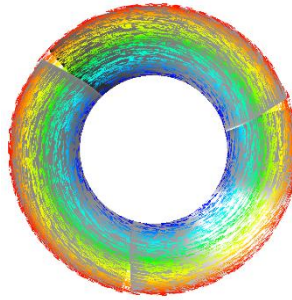
Gambar 4. 26 *Streamline Velocity Variasi Massflow* pada Sudut *Guide vane* 45°

Konsistensi ini menegaskan bahwa peningkatan debit massa tidak banyak memengaruhi distribusi kecepatan aliran. Aliran tetap stabil dan terarah dari guide vane menuju runner, sehingga kinerja turbin lebih ditentukan oleh putaran dan sudut sudu, bukan oleh variasi debit massa.

4.5.2.5 *Vector Velocity Variasi Massflow*

Gambar 4.27 memperlihatkan distribusi vektor kecepatan pada sudut guide vane 45° untuk variasi debit massa 34,937 kg/s, 39,928 kg/s, dan 44,919 kg/s. Visualisasi menunjukkan bahwa arah vektor aliran pada ketiga kondisi relatif seragam dan terarah sepanjang jalur aliran. Warna vektor didominasi hijau–kuning hingga oranye, dengan nilai kecepatan maksimum konstan sekitar 10,676 m/s pada semua variasi massflow.





44.919 Kg/s

Gambar 4. 27 *Vector Velocity Variasi Massflow* pada Sudut *Guide vane* 45°

Keseragaman ini menegaskan bahwa peningkatan debit massa tidak memberikan perubahan signifikan terhadap pola maupun intensitas aliran. Fluida tetap mengalir terarah melalui runner dengan distribusi kecepatan yang stabil, sehingga menunjukkan bahwa pengaruh debit massa terhadap karakteristik vektor kecepatan relatif kecil dibandingkan faktor putaran dan sudut sudu.