

the Effect of Guide Blade Angle on the Performance of a Reaction Type Steam Turbine Prototype [Pengaruh Sudut Sudu Pengarah Pada Performa Prototipe Turbin Uap Tipe Reaksi]

M. Ridho Aries Setiawan¹⁾, A'rasy Fahrudin²⁾, Iswanto³⁾, Mulyadi⁴⁾

¹⁾ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

*Email Penulis Korespondensi: arasy.fahrudin@umsida.ac.id

Abstract. Electrical energy is essential to human activity, particularly when it comes from coal-fired power plants. Steam energy is transformed into mechanical energy using steam turbines. This study demonstrates how changes in the guide blade angle affect reaction-type steam turbine torque, speed, and thermal efficiency. It is anticipated that the findings will serve as the foundation for improving turbine performance through guide blade design optimization. The torque and efficiency of a reaction-type steam turbine with a 5-liter boiler capacity are investigated in this study in relation to changes in the guide blade angle (30°, 40°, and 50°) and steam pressure (40–60 psi). The test system is equipped with a pressure gauge, flowmeter, tachometer, and brake. Calculations include mass flow rate, turbine power, steam power, torque, and efficiency to determine the optimal blade angle. The results show that variations in the guide blade angle affect the torque, efficiency, and power of the reaction-type steam turbine. Performance is best when the angle is 30°; performance is best when it is 40°. With a torque of 0.027 Nm, an efficiency of 61%, and a power of 1,667 Watts at a pressure of 60 psi, the 50° angle yields the best performance and the most efficient distribution of steam flow. The test findings demonstrate that the reaction type steam turbine's power, torque, and efficiency are significantly impacted by the guide vane angle. With an efficiency of 61%, a torque of 0.027 Nm, and a power of 1,667 Watts at a pressure of 60 psi, the 50° angle offers the best performance. Because the steam flow is poorly directed and less energy is converted to mechanical energy, a smaller angle is less ideal.

Keywords - Guide blade angle, Turbine torque, Turbine efficiency

Abstrak. Energi listrik sangat penting bagi kehidupan manusia, terutama dari PLTU. Turbin uap menghasilkan energi mekanik dari uap. Studi ini menunjukkan bagaimana perubahan sudut sudu pengarah berdampak pada torsi, kecepatan, dan efisiensi termal turbin uap tipe reaksi. Hasilnya diharapkan dapat menjadi dasar optimalisasi desain sudu pengarah untuk meningkatkan kinerja turbin. Penelitian ini menguji pengaruh variasi sudut sudu pengarah (30°, 40°, 50°) dan tekanan uap (40–60 psi) pada torsi dan efisiensi turbin uap tipe reaksi berkapasitas boiler 5 liter. Sistem uji dilengkapi pressure gauge, flowmeter, tachometer, dan pengerem. Perhitungan meliputi laju aliran massa, daya turbin, daya uap, torsi, dan efisiensi untuk menentukan sudut sudu optimal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi sudut sudu pengarah memengaruhi torsi, efisiensi, dan daya turbin uap tipe reaksi. Sudut 30° menghasilkan kinerja terendah, sedangkan 40° meningkatkan performa. Sudut 50° memberikan hasil optimal dengan torsi 0,027 Nm, efisiensi 61%, dan daya 1,667 Watt pada tekanan 60 psi, menunjukkan distribusi aliran uap paling efektif. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sudut sudu pengarah berpengaruh signifikan terhadap efisiensi, torsi, dan daya turbin uap tipe reaksi. Sudut 50° memberikan performa terbaik dengan efisiensi 61%, torsi 0,027 Nm, dan daya 1,667 Watt pada tekanan 60 psi. Sudut lebih kecil kurang optimal karena aliran uap tidak terarah baik, menurunkan konversi energi menjadi mekanik.

Kata Kunci - Sudut Sudu pengarah, Torsi turbin, Efisiensi turbin

I. PENDAHULUAN

Listrik menjadi sumber energi yang paling sering digunakan manusia di era ini untuk mendukung kehidupan sehari-hari. Manusia membutuhkan energi listrik untuk berbagai aktivitas, termasuk industri, layanan publik, dan rumah tangga. Energi listrik dihasilkan dari bermacam-macam kategori pembangkit, dan yang umumnya adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).[1]

Turbin uap adalah mesin konversi energi yang dapat menghasilkan energi listrik.[2] Dalam kategori mesin konversi energi yang menggunakan nosel pada turbin impuls dan bilah penggerak pada turbin reaksi untuk mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik, yang diubah menjadi energi mekanik pada poros turbin.[3] Turbin ini dihubungkan melalui mekanisme penggunaan roda gigi reduksi. Turbin uap dapat digunakan sebagai pembangkit listrik di berbagai industri dan sektor transportasi, tergantung pada jenis mekanismenya.[4]

Turbin uap memiliki dua komponen utama, yaitu stator dan rotor, yang berperan sebagai bagian inti dari sistem. Untuk meningkatkan performanya, turbin dilengkapi dengan berbagai komponen pendukung seperti bantalan, kopling, serta sistem bantu lainnya.[5] Kenaikan temperatur pada fluida kerja di dalam turbin akan meningkatkan energi kinetiknya. Pada suatu pabrik, uap yang dihasilkan dari proses pembakaran berperan sebagai fluida penggerak turbin. Uap tersebut dialirkan melalui sistem perpipaan untuk menunjang tiga tahap utama proses produksi, yaitu

pengepresan, peminyakan, dan perebusan. Mekanisme kerja turbin memanfaatkan energi kinetik dari uap kering atau uap super panas yang keluar melalui nosel, sehingga bilah turbin terdorong dan menyebabkan poros berputar.[6]

Transformasi energi potensial uap menjadi energi mekanis dapat dilakukan dengan beberapa cara berbeda. Secara umum, turbin uap dikelompokkan ke dalam tiga tipe utama: impuls, reaksi, dan kombinasi impuls-reaksi. Selama tahap ekspansi uap, terdapat dua sumber kerugian energi, yaitu kerugian internal dan kerugian eksternal.[7] Pada kedua jenis turbin tersebut, pola aliran uap umumnya mengikuti arah aksial, di mana uap masuk ke turbin hampir sejajar dengan porosnya.[8]

Adanya bilah tetap dan bergerak pada jenis turbin ini sangat penting untuk operasinya. Pada turbin reaksi, ekspansi fluida kerja terjadi baik di sudu tetap maupun sudu bergerak. [9] Turbin jenis ini juga dikenal sebagai turbin Parson. Selama proses ini, sudu tetap dan sudu gerak bertindak seperti nosel, sehingga kecepatan relatif uap meningkat saat keluar dari setiap sudu dibandingkan dengan saat masuk.[10] Prinsip reaksi ini bekerja dengan cara uap mengalami ekspansi baik di nosel maupun di sudu gerak, yang menyebabkan penurunan tekanan uap dan entalpi uap, kecepatan uap meningkat. Penurunan tekanan ini menghasilkan kenaikan energi kinetik, yang mencerminkan konversi energi panas menjadi energi mekanik. Akibatnya, sudu tetap dan sudu gerak, meskipun memiliki fungsi yang berbeda, menghasilkan efek penurunan tekanan yang serupa.[11]

Sebuah penelitian dilakukan dengan sudut aliran 5, 10, dan 15, serta perubahan debit aliran 50, 70 dan 90 m³/jam. Hasilnya menunjukkan bahwa debit 90 m³/jam dengan sudut aliran 15° dapat menghasilkan daya keluaran 1,53 watt, dan pada laju aliran 50 m³/jam, sudut aliran 18° dapat dicapai. Dalam hal daya, turbin poros horizontal sedikit lebih besar daripada turbin poros vertikal.[12]

Salah satu penyebab utama erosi berat pada sudu turbin uap adalah tabrakan partikel padat. Ini menyebabkan biaya perawatan dan perbaikan yang tinggi serta menurunkan efisiensi dan keamanan sumber daya listrik. [13] Dalam sistem aliran turbin, banyak variabel memengaruhi tingkat erosi; ini termasuk kecepatan atau laju aliran massa partikel padat, ukuran partikel, sudut tumbukan, dan distribusi partikel. Studi terhadap berbagai kondisi aliran menunjukkan bahwa variabel dalam aliran turbin dapat secara signifikan meningkatkan atau mengurangi tingkat erosi. [14] Secara umum, erosi cenderung lebih parah pada area dengan perubahan arah aliran yang cepat dibandingkan dengan aliran yang lebih lurus. Namun, tingkat erosi juga dapat meningkat akibat turbulensi lokal yang disebabkan oleh permukaan kasar atau ketidaksejajaran poros.[15]

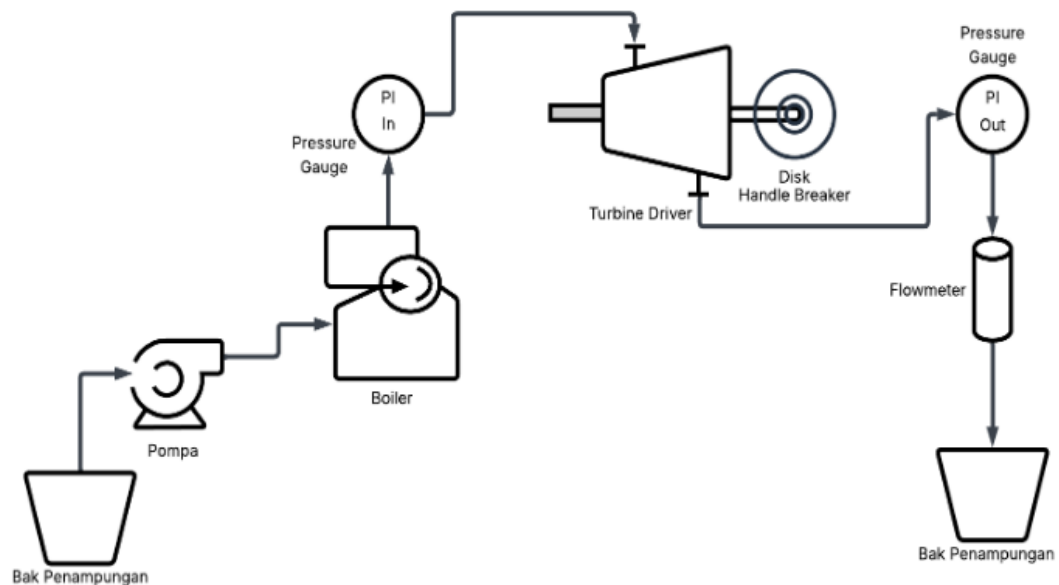
Dari penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kondisi aliran uap berpengaruh pada variasi sudu pada turbin uap tipe reaksi akan tetapi pada sudut sudu pengarah turbin uap tipe reaksi belum diteliti. Sehingga perlu diteliti tentang pengaruh sudut sudu pada performa prototipe turbin uap tipe reaksi.

Rumusan masalah penelitian ini mencakup dua hal utama, yaitu bagaimana sudut sudu pengarah memengaruhi torsi dan kecepatan turbin, serta bagaimana efisiensi termal dipengaruhi oleh perubahan sudut sudu pengarah pada prototipe turbin uap tipe reaksi. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menyarankan desain sudut sudu pengarah yang optimal guna meningkatkan kinerja turbin uap tipe reaksi. Tujuan ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai pengaruh sudut sudu pengarah terhadap performa turbin, sekaligus menjadi landasan dalam upaya penyempurnaan desain turbin di masa mendatang.

II. METODE

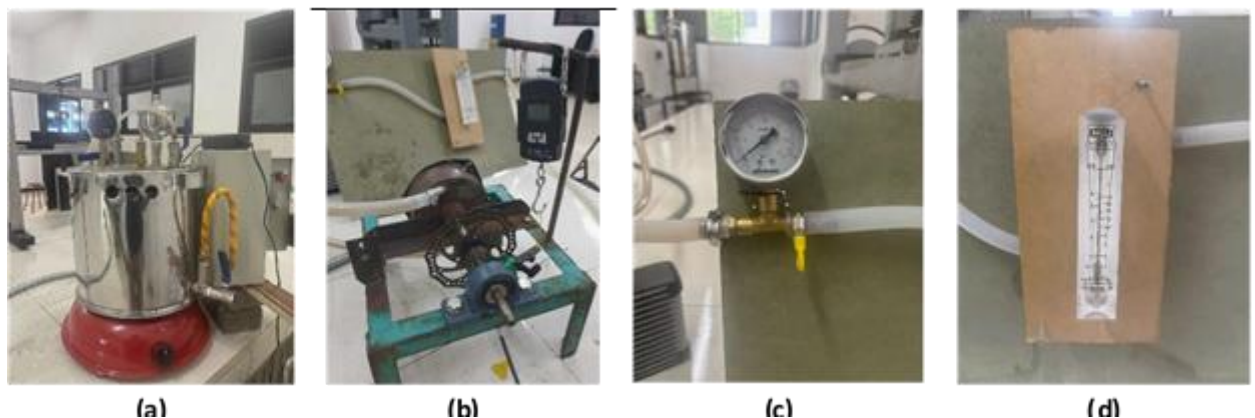
A. Metode Penelitian

Tujuan untuk mengetahui torsi dan efisiensi pada turbin uap tipe reaksi yang memiliki variasi pada sudut sudu pengarah dan pemanasan uap menggunakan alat boiler kapasitas 5 liter. Dalam penelitian ini memerlukan alat pengukur seperti pressure gauge, tachometer, flowmeter yakni untuk mengukur tekanan uap, Rpm, mengukur debit menggunakan variasi sudut sudu pengarah (30,40,dan50) menggunakan tekanan (60,50,dan40). Konsep penelitian pada benda kerja bertujuan untuk mempermudah proses perancangan melalui metode permesinan serta menghasilkan benda kerja yang memiliki tingkat efisiensi tinggi.

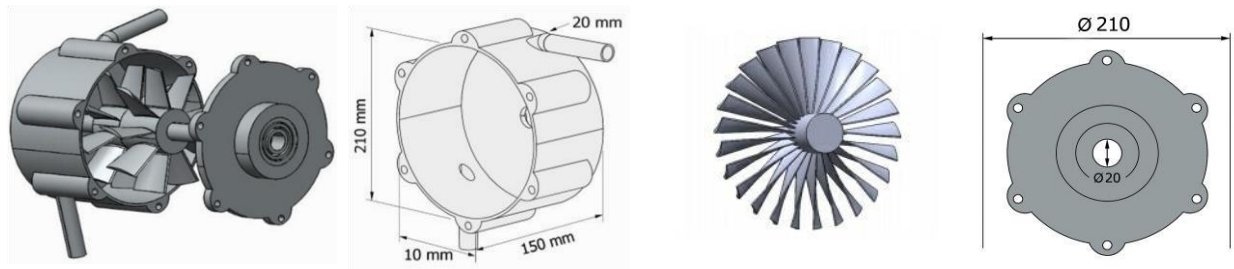


Gambar 1. Rangkaian Alat Uji

Gambar diatas menggambarkan alur lengkap sistem uji turbin uap skala kecil, dari air masuk → pemanasan → turbin → pengukuran tekanan dan aliran → penampungan akhir. Sistem ini digunakan untuk menguji pengaruh desain turbin (seperti sudut sudu) terhadap torsi dan efisiensi, dengan memanfaatkan data dari alat ukur seperti manometer, flowmeter, dan sistem pengerem.



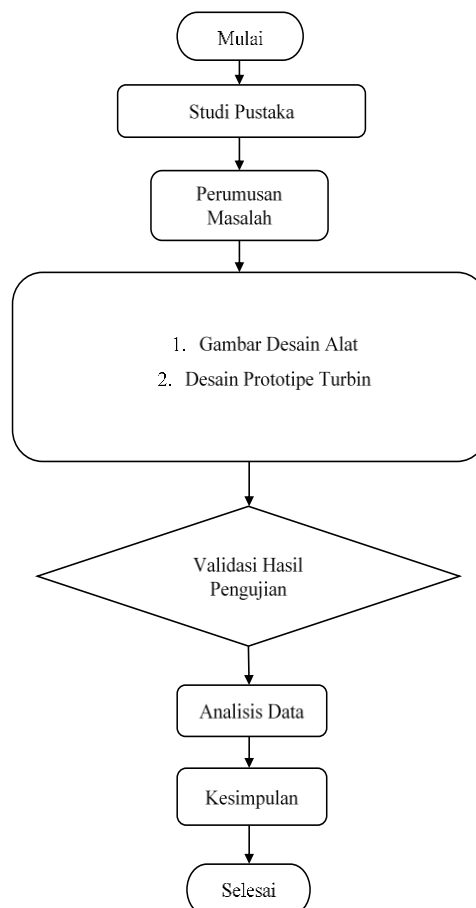
Gambar 2. (a) Mini boiler, (b) Turbin Driver, (c) Pressure gauge, (d) Flow meter



Gambar 3. Prototipe Desain Turbin

Gambar diatas menunjukkan sebuah prototipe turbin uap tipe reaksi yang dirancang dengan dimensi presisi dan komponen modular, rumah turbin (casing) dengan diameter luar sekitar 210 mm, rotor dengan sudu berjumlah 6 (mengindikasikan distribusi sudu tiap 50°), Piringan tatakan bilah tempat sudu dipasang secara radial, lubang tengah berdiameter 20 mm untuk poros turbin. Desain turbin pada gambar menunjukkan piringan sudu dengan distribusi radial dan orientasi sudu yang dapat divariasikan sudutnya. Sudut sudu pengarah ini adalah parameter utama yang diuji dalam penelitian karena secara langsung memengaruhi arah aliran uap, torsi, dan efisiensi konversi energi. Optimasi sudut ini penting untuk meningkatkan performa turbin secara keseluruhan.

B. Diagram Alir



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian

C. Proses perhitungan melibatkan :

1. Menghitung *mass flow rate* ($\dot{m}$) :

$$\dot{m} = \rho \cdot V \dots\dots\dots [1]$$

2. Menghitung Daya Turbin (watt):

$$P_{turbin} = \frac{2\pi \cdot N \cdot T}{60} \dots\dots\dots [2]$$

3. Menghitung Daya Uap (watt) :

$$P_{Uap} = \dot{m} (h_{in} - h_{out}) \dots\dots\dots [3]$$

4. Menghitung Torsi (N.m) :

$$T = F \cdot l \dots\dots\dots [4]$$

5. Menghitung Efisiensi :

$$\eta = \frac{P_{turbin}}{P_{Uap}} \times 100\% \dots\dots\dots [5]$$

Keterangan :

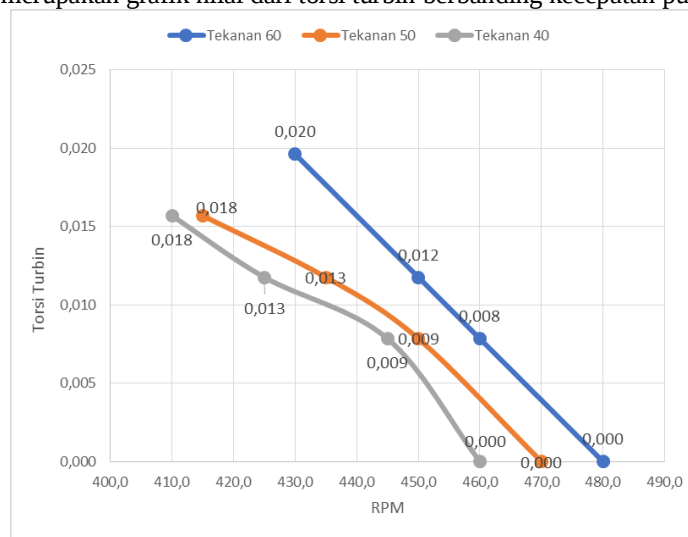
- $\dot{m}$ = mass flow rate(kg/s)
- ρ = density(kg/m³)
- $\dot{v}$ = debit (m³/s)
- T = Torsi (N. m)
- N = Kecepatan Putar (N)
- h = entalpy (kj/kg)
- P_{turbin} = daya turbin (watt)
- P_{Uap} = daya uap (watt)
- η = efesiensi turbin (%)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

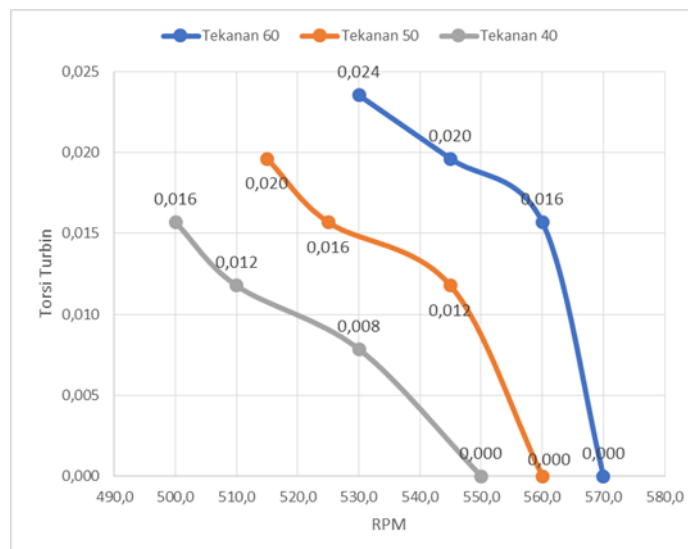
A. Hasil Eksperimen

Sudut sudu	Tekanan Masuk	Kecepatan Putar	Gaya Tarik Rem	Mass Flow	H in	H out	Daya Uap	Torsi Turbin	Daya Turbin	Efisiensi
	Psi	RPM	N	kg/s	kJ/kg	kJ/kg	watt	N.m	watt	
30	60	480,0	0,000	0,000343	2748,91	2742,5	2,203	0,000	0,000	0 %
		460,0	0,098	0,000343	2748,91	2742,5	2,203	0,008	0,378	17 %
		450,0	0,147	0,000343	2748,91	2742,5	2,203	0,012	0,554	25 %
		430,0	0,245	0,000343	2748,91	2742,5	2,203	0,020	0,883	40 %
	50	470,0	0,000	0,000259	2742,48	2734,9	1,974	0,000	0,000	0 %
		450,0	0,098	0,000259	2742,48	2734,9	1,974	0,008	0,370	19 %
		435,0	0,147	0,000259	2742,48	2734,9	1,974	0,012	0,536	27 %
		415,0	0,196	0,000259	2742,48	2734,9	1,974	0,016	0,682	35 %
	40	460,0	0,000	0,000187	2734,86	2725,6	1,730	0,000	0,000	0 %
		445,0	0,098	0,000187	2734,86	2725,6	1,730	0,008	0,366	21 %
		425,0	0,147	0,000187	2734,86	2725,6	1,730	0,012	0,524	30 %
		410,0	0,196	0,000187	2734,86	2725,6	1,730	0,016	0,674	39 %
40	60	570,0	0,000	0,000386	2748,91	2742,5	2,479	0,000	0,000	0 %
		560,0	0,196	0,000386	2748,91	2742,5	2,479	0,016	0,920	37 %
		545,0	0,245	0,000386	2748,91	2742,5	2,479	0,020	1,119	45 %
		530,0	0,294	0,000386	2748,91	2742,5	2,479	0,024	1,306	53 %
	50	560,0	0,000	0,000296	2742,48	2734,9	2,256	0,000	0,000	0 %
		545,0	0,147	0,000296	2742,48	2734,9	2,256	0,012	0,672	30 %
		525,0	0,196	0,000296	2742,48	2734,9	2,256	0,016	0,862	38 %
		515,0	0,245	0,000296	2742,48	2734,9	2,256	0,020	1,058	47 %
	40	550,0	0,000	0,000218	2734,86	2725,6	2,018	0,000	0,000	0 %
		530,0	0,098	0,000218	2734,86	2725,6	2,018	0,008	0,435	22 %
		510,0	0,147	0,000218	2734,86	2725,6	2,018	0,012	0,628	31 %
		500,0	0,196	0,000218	2734,86	2725,6	2,018	0,016	0,821	41 %
50	60	640,0	0,000	0,000428	2748,91	2742,5	2,754	0,000	0,000	0 %
		620,0	0,245	0,000428	2748,91	2742,5	2,754	0,020	1,273	46 %
		600,0	0,294	0,000428	2748,91	2742,5	2,754	0,024	1,479	54 %
		580,0	0,343	0,000428	2748,91	2742,5	2,754	0,027	1,667	61 %
	50	620,0	0,000	0,000333	2742,48	2734,9	2,537	0,000	0,000	0 %
		605,0	0,196	0,000333	2742,48	2734,9	2,537	0,016	0,994	39 %
		590,0	0,245	0,000333	2742,48	2734,9	2,537	0,020	1,212	48 %
		575,0	0,294	0,000333	2742,48	2734,9	2,537	0,024	1,417	56 %
	40	600,0	0,000	0,000249	2734,86	2725,6	2,306	0,000	0,000	0 %
		585,0	0,147	0,000249	2734,86	2725,6	2,306	0,012	0,721	31 %
		570,0	0,196	0,000249	2734,86	2725,6	2,306	0,016	0,936	41 %
		555,0	0,245	0,000249	2734,86	2725,6	2,306	0,020	1,140	49 %

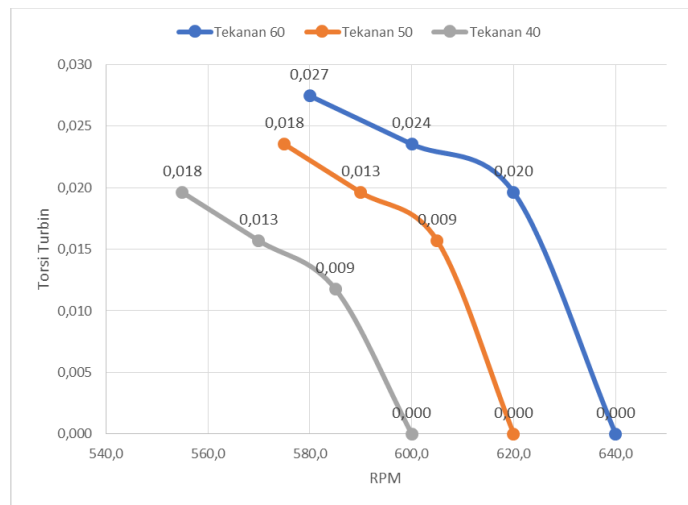
Berikut merupakan grafik nilai dari torsi turbin berbanding kecepatan putar (rpm) :



Gambar 5. Grafik Sudut Sudu 30



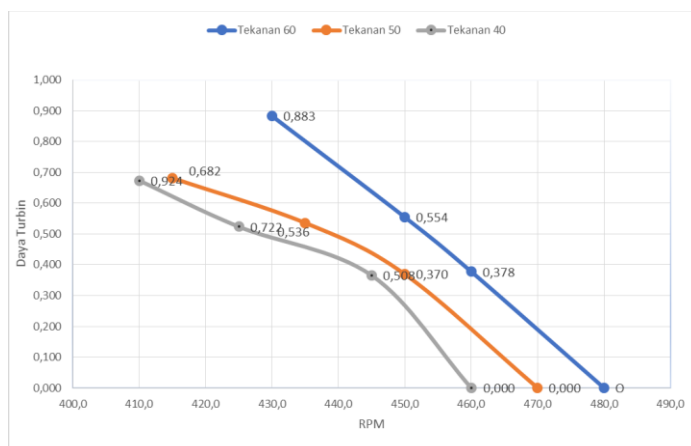
Gambar 6. Grafik Sudut Sudu 40

Gambar 6. Grafik Sudut Sudu 40**Gambar 7. Grafik Sudut Sudu 50**

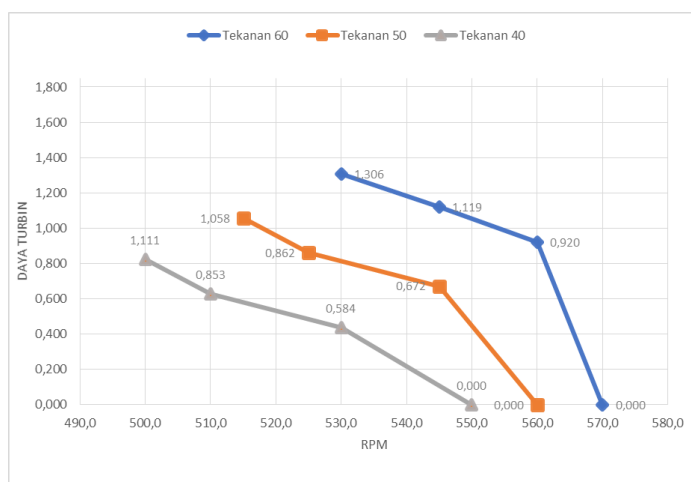
Grafik - grafik diatas menunjukkan bahwa variasi sudut sudu pengarah berpengaruh signifikan terhadap torsi turbin uap tipe reaksi pada berbagai tekanan uap. Pada sudut sudu 30°, torsi maksimum hanya mencapai 0,020 Nm pada tekanan 60 psi dan menurun tajam seiring peningkatan kecepatan putar. Hal yang sama terjadi pada tekanan 50 psi dan 40 psi dengan nilai puncak 0,018 Nm, menunjukkan bahwa sudut ini kurang efektif dalam mengarahkan aliran uap ke sudu gerak, sehingga konversi energi menjadi torsi tidak optimal pada putaran tinggi.

Peningkatan performa terlihat jelas pada sudut 40°, dengan torsi puncak mencapai 0,024 Nm, dan paling optimal pada sudut 50° dengan torsi tertinggi 0,027 Nm pada tekanan 60 psi. Pada sudut ini, aliran uap diarahkan lebih presisi ke sudu gerak, menghasilkan gaya reaksi yang lebih besar dan torsi yang stabil pada rentang RPM yang lebih luas. Perbedaan ini menegaskan bahwa sudut sudu pengarah memiliki peran penting dalam pengaturan momentum aliran uap, di mana penambahan sudut hingga 50° memberikan distribusi aliran yang paling efektif terhadap permukaan sudu turbin.

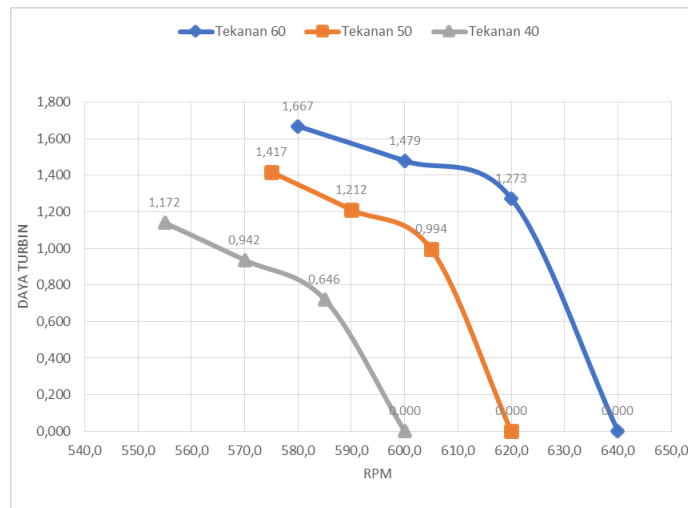
Berikut merupakan grafik nilai dari daya turbin (watt) berbanding kecepatan putar (rpm) :



Gambar 8. Grafik Sudut Sudu 30



Gambar 9. Grafik Sudut Sudu 40

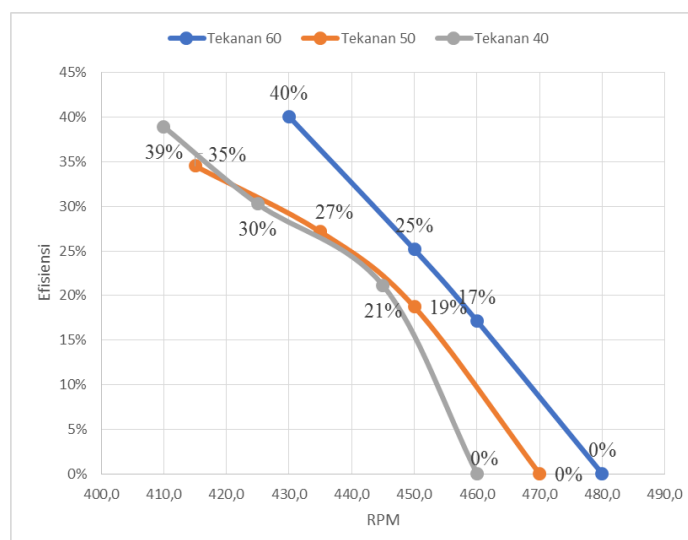


Gambar 10. Grafik Sudut Sudu 50

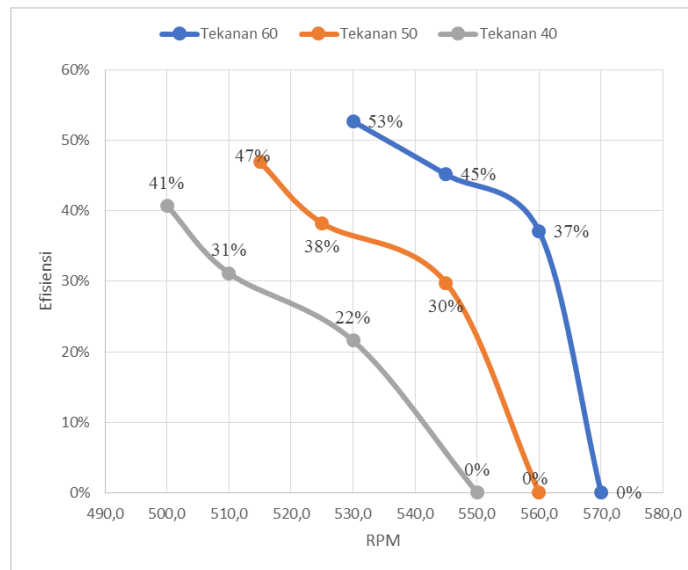
Grafik - grafik diatas menunjukkan bahwa variasi sudut sudu pengarah berpengaruh nyata terhadap daya keluaran turbin uap tipe reaksi. Pada sudut sudu 30°, daya maksimum hanya mencapai 0,883 Watt pada tekanan 60 psi dengan kecenderungan menurun tajam seiring meningkatnya RPM, menunjukkan aliran uap belum optimal diarahkan ke sudu gerak. Performa meningkat pada sudut 40°, dengan daya puncak mencapai 1,306 Watt pada tekanan yang sama dan kestabilan daya lebih baik dibandingkan sudut sebelumnya. Hal ini menandakan bahwa sudut pengarah yang lebih besar mampu memperbaiki arah dan momentum aliran uap, sehingga transfer energi ke rotor meningkat.

Kinerja terbaik dicapai pada sudut sudu 50°, dengan daya maksimum 1,667 Watt pada tekanan 60 psi dan kestabilan daya yang lebih terjaga pada putaran tinggi. Semakin besar sudut sudu pengarah, aliran uap mengenai permukaan sudu dengan sudut serang yang lebih efektif, menghasilkan konversi energi yang lebih efisien.

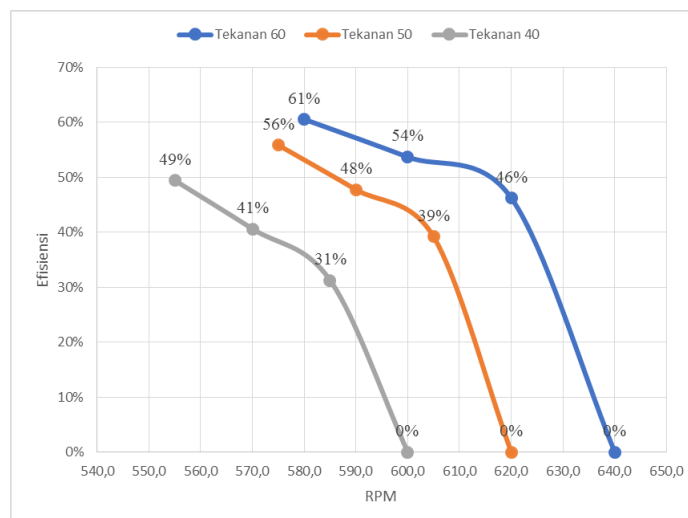
Berikut merupakan grafik nilai dari daya efisiensi berbanding kecepatan putar (rpm) :



Gambar 11. Grafik Sudut Sudu 30



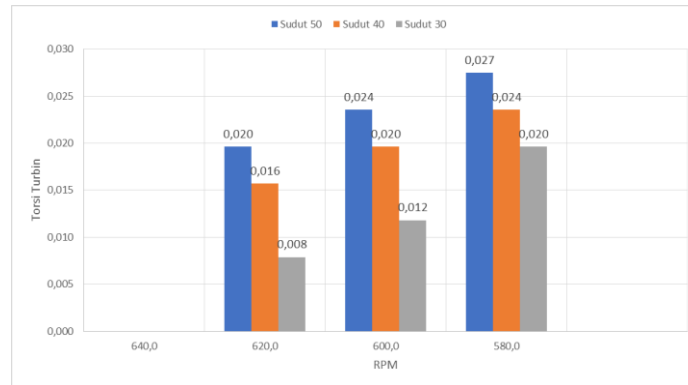
Gambar 12. Grafik Sudut Sudu 40



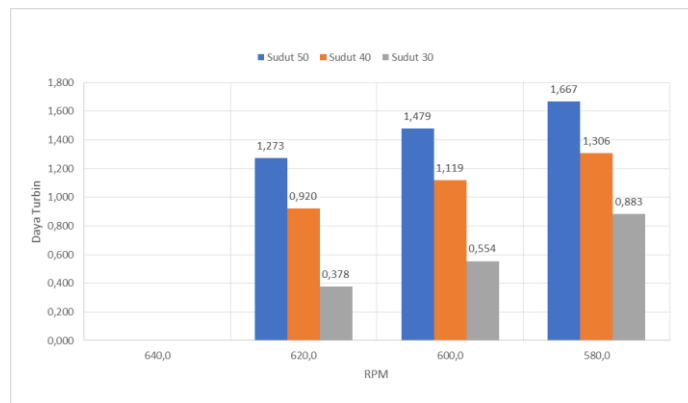
Gambar 13. Grafik Sudut Sudu 50

Grafik - grafik diatas menunjukkan pengaruh signifikan terhadap efisiensi turbin uap tipe reaksi. Pada sudut sudu 30°, efisiensi maksimum hanya mencapai 40% dan menurun tajam seiring peningkatan RPM, menandakan arah aliran uap belum optimal. Efisiensi meningkat secara signifikan pada sudut 40°, mencapai 53% dengan kurva efisiensi yang lebih stabil, menunjukkan aliran uap mulai diarahkan lebih tepat ke sudu gerak sehingga transfer energi menjadi lebih efisien.

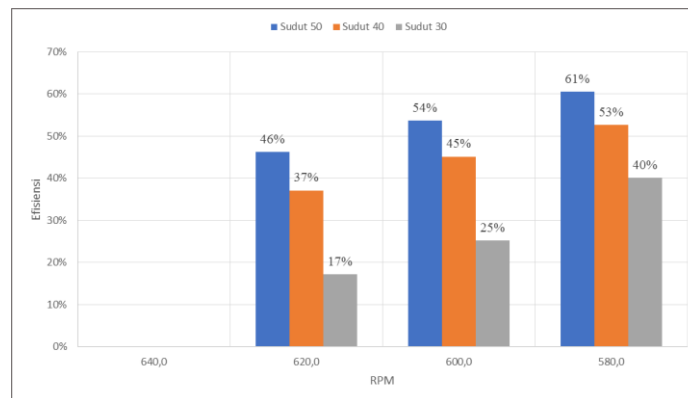
Efisiensi tertinggi diperoleh pada sudut sudu 50°, yakni sebesar 61% pada tekanan 60 psi dan kecepatan putar sekitar 580 RPM. Sudut ini menghasilkan kondisi aliran uap yang paling efektif dalam menciptakan torsi dan efisiensi konversi energi. Secara keseluruhan, semakin besar sudut sudu pengarah, efisiensi meningkat hingga mencapai titik optimum, dengan sudut 50° terbukti sebagai konfigurasi terbaik dalam rentang sudut yang diuji untuk prototipe turbin uap tipe reaksi.



Gambar 14. Diagram Batang Efisiensi Tekanan 60



Gambar 15. Diagram Batang Torsi Turbin Tekanan 60



Gambar 16. Diagram Batang Daya Turbin Tekanan 60

Berdasarkan ketiga grafik, sudut sudu pengarah 50° memberikan kinerja terbaik dari segi torsi, daya keluaran turbin, dan efisiensi pada tekanan 60 psi. Pada kecepatan 580 RPM, sudut ini menghasilkan torsi tertinggi sebesar maksimum 0,027 Nm, daya puncak mencapai 1,667 watt, dan efisiensi maksimum 61%. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan sudut sudu memberikan kontribusi signifikan terhadap performa turbin, khususnya saat beroperasi pada kecepatan yang lebih rendah. Sebaliknya, sudut 30° menghasilkan nilai paling rendah di ketiga parameter, menunjukkan kurang optimalnya pengendalian aliran uap.

Secara umum, penurunan kecepatan dari 620 ke 580 RPM cenderung meningkatkan performa turbin, terutama pada sudut 50° dan 40°. Maka dari itu, konfigurasi tekanan 60 psi dengan sudut sudu 50° dan kecepatan 580 RPM dapat dianggap sebagai kondisi paling efisien untuk mengoptimalkan kinerja turbin uap tipe reaksi.

VII. KESIMPULAN

Hasil pengujian menunjukkan bahwa torsi turbin dipengaruhi oleh variasi sudut sudu dan tekanan uap. Hasil pengujian menunjukkan bahwa torsi meningkat seiring dengan bertambahnya sudut sudu, dengan nilai maksimum 0,027 Nm tercapai pada sudut 50° dan tekanan 60 psi. Pada sudut yang lebih kecil, seperti 30°, torsi menurun lebih cepat pada putaran tinggi karena energi kinetik uap tidak dikonversi secara efektif. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi sudu yang optimal dapat meningkatkan transfer momentum dan gaya reaksi pada turbin uap.

Selain torsi, parameter daya keluaran turbin juga menunjukkan pola yang sama, di mana sudut sudu yang lebih besar memberikan daya tertinggi, mencapai 1,667 Watt pada sudut 50° dan tekanan 60 psi. Peningkatan tekanan uap berkontribusi terhadap peningkatan daya pada semua sudut, tetapi sudut pengarah tetap menjadi faktor kunci dalam mengoptimalkan konversi energi termal menjadi energi mekanik. Bahwa pengaturan sudut sudu pengarah yang tepat mampu meningkatkan performa turbin skala kecil melalui distribusi aliran uap yang lebih efisien ke rotor.

Variasi sudut sudu pengarah sangat memengaruhi efisiensi turbin uap tipe reaksi. Efisiensi cenderung meningkat seiring bertambahnya sudut sudu pengarah, di mana sudut 50° memberikan nilai efisiensi tertinggi sebesar 61% pada tekanan 60 psi dan kecepatan putar sekitar 580 RPM. Sudut yang lebih kecil, seperti 30°, menghasilkan efisiensi rendah karena aliran uap tidak terarah optimal menuju sudu gerak. Bahwa peningkatan sudut sudu pengarah dapat memperbaiki arah aliran dan meningkatkan efisiensi energi pada turbin reaksi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis berterima kasih kepada Allah SWT atas rahmat, hidayah, dan karunia-Nya yang telah memungkinkan penulis menyelesaikan penelitian dan penyusunan skripsi ini dengan baik. Setiap langkah dalam proses penyelesaian karya ilmiah ini tidak mungkin dilakukan dengan lancar tanpa bantuan dan ridha-Nya. Selain itu, penulis berterima kasih kepada kedua orang tua tercinta atas doa, dukungan moral, kasih sayang, dan pengorbanan yang tak terbatas yang mereka berikan selama perjalanan pendidikan ini. Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada sahabat-sahabat terdekat yang telah memberi semangat, dukungan, dan bantuan secara langsung maupun tidak langsung selama proses menyelesaikan penelitian ini.

Penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, serta seluruh dosen, staf pengajar, dan tenaga kependidikan di kampus yang telah memberikan pengetahuan, bimbingan, arahan, dan dukungan selama kuliah hingga selesainya penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada semua orang yang membantu dalam proses pengumpulan data, menggunakan fasilitas laboratorium, dan memastikan bahwa penelitian ini berjalan lancar. Semoga segala bantuan, pengetahuan, dan kebajikan yang diberikan mendapatkan balasan yang berlipat ganda dari Allah SWT.

REFERENSI

- [1] M. Luther, "Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications Steam Power Plants and the Operation of Rankine Cycle," vol. 13, no. 1000303, pp. 10–11, 2023, doi: 10.35248/2090-4541.23.13.303.
- [2] H. Dwi Kusuma and M. T. Su, "Analisa Pengaruh Laju Aliran Partikel Padat Terhadap Sudu-Sudu Turbin Reaksi Pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap Menggunakan Cfd," *J. Tek. Mesin S-1*, vol. 2, no. 4, pp. 488–495, 2014.
- [3] W. Wisnaningsih, "Perencanaan Turbin Uap Penggerak Generator Dengan Daya 100 Mw Pada 3000 Rpm," *Tek. Sains J. Ilmu Tek.*, vol. 4, no. 1, pp. 33–40, 2019, doi: 10.24967/teksis.v4i1.637.
- [4] B. Wahyudi, "Analisis Efisiensi Turbin Uap terhadap Kapasitas Listrik Pembangkit," *J. Tek. Elektro*, vol. 2–9, no. 2, pp. 33–36, 2019.
- [5] M. Fadil *et al.*, "Pemeliharaan Sistem Pelumasan Pada Turbin Uap Di PLTU XYZ," *Perwira J. Sci. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 58–63, 2024, doi: 10.54199/pjse.v4i2.309.
- [6] I. Hadi, "Analisis efisiensi turbin uap sebagai penggerak generator pada pabrik kelapa sawit," *J. Tek. Mesin*, pp. 1–42, 2021.
- [7] Milahussholihah, "Analisa Perbandingan Performa Turbin Uap Sebelum Dan Setelah Overhaul Pada Beban 175 MW Di PLTU Unit 4 PT. PJB Up Gresik," *Inst. Teknol. Sepuluh Nop.*, 2018.
- [8] M. F. UJUNG, "ANALISIS KINERJA TURBIN UAP MINI DENGAN TEKANAN UAP 500 kPa," *Tek. mesin*, 2020.
- [9] R. Gunawan, "ANALISIS KINERJA PEMBANGKIT LISTRIK JENIS TURBIN WHIRLPOOL MENGGUNAKAN 5 BILAH SUDU," *Tek. mesin*, 2023.
- [10] W. D. Prasetyo, *Rancang Bangun Turbin Vortex Skala Kecil Dan Pengujian Pengaruh Bentuk Penampang Sudu Terhadap Daya*. 2018.
- [11] K. Rogowski and J. Pawlicki, "Numerical analysis of the steam flow past the turbine blade stage," *J. Mach. Eng.*, vol. 17, no. 2, pp. 103–110, 2017.
- [12] Y. S. Pramesti, "Analisa pengaruh sudut sudu terhadap kinerja turbin kinetik poros horisontal dan vertikal," *J. Mesin Nusantara*, vol. 1, no. 1, p. 51, 2018, doi: 10.29407/jmn.v1i1.12296.
- [13] A. Mehta *et al.*, "Processing and Advancements in the Development of Thermal Barrier Coatings-12-01318-V2 (1).Pdf," *Coatings*, vol. 12, no. 1318, pp. 1–31, 2022.
- [14] T. Bai, J. Liu, W. Zhang, and Z. Zou, "Effect of surface roughness on the aerodynamic performance of turbine blade cascade," *Propuls. Power Res.*, vol. 3, no. 2, pp. 82–89, 2014, doi: 10.1016/j.jprr.2014.05.001.
- [15] G. Bzymek, M. Bryk, S. Kruk-Gotzman, and P. J. Ziolkowski, "Computational Fluid Dynamics Study of Erosion on 900 MW Steam Turbine ND-45 Blades Using 3D Scanning," *Materials (Basel)*, vol. 17, no. 19, 2024, doi: 10.3390/ma17194884.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.