

The Effect of the Number of Second-Stage Steam Turbine Blades on Performance and Efficiency [Pengaruh Jumlah Sudu Turbin Uap Bertingkat Kedua Terhadap Performa dan Efisiensi]

Luthfi Frans Setiawan¹⁾, A'rasy Fahrudin^{*2)}

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. A performance analysis of a small-scale steam turbine was conducted by varying the number of blades, steam pressure, and rotational speed to determine the optimal configuration. The results showed that increasing the number of blades consistently improved power, efficiency, and torque. The best configuration used 9 blades, producing a maximum power of 1.46 watts, efficiency of 53%, and torque of 0.024 Nm. A steam pressure of 60 psi yielded the highest performance across all parameters. Optimal rotational speed also played a crucial role, with each blade configuration having its own ideal point: 430 rpm for 5 blades, 540 rpm for 7 blades, and 580–590 rpm for 9 blades. Exceeding these speeds caused a sharp decline in performance, with efficiency potentially dropping to 0%. Therefore, optimal performance depends heavily on balancing blade number, steam pressure, and rotational speed. The recommended combination is 9 blades, 60 psi steam pressure, and 580–590 rpm speed..

Keywords – Turbine efficiency, number of blades, torque

Abstrak. Analisis kinerja turbin uap skala kecil dilakukan dengan memvariasikan jumlah sudu, tekanan uap, dan kecepatan putar untuk menentukan konfigurasi optimal. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan jumlah sudu secara konsisten meningkatkan daya, efisiensi, dan torsi. Konfigurasi terbaik adalah 9 sudu dengan daya maksimum 1,46 watt, efisiensi 53%, dan torsi 0,024 nm. Tekanan uap 60 psi menghasilkan kinerja tertinggi pada semua parameter. Kecepatan putar optimal juga berperan penting, dengan titik optimal masing-masing untuk setiap jumlah sudu: 430 rpm untuk 5 sudu, 540 rpm untuk 7 sudu, dan 580–590 rpm untuk 9 sudu. Melebihi kecepatan tersebut menyebabkan penurunan kinerja drastis, termasuk efisiensi yang bisa turun hingga 0%. Oleh karena itu, performa optimal sangat bergantung pada keseimbangan antara jumlah sudu, tekanan uap, dan kecepatan putar. kombinasi terbaik yang direkomendasikan adalah 9 sudu, tekanan 60 psi, dan kecepatan 580–590 rpm.

Kata Kunci – Efisiensi turbin, jumlah sudu, torsi

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

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].

Permintaan akan energi adalah kebutuhan dasar yang esensial untuk meningkatkan kualitas hidup masyarakat. Seiring dengan peningkatan kualitas hidup dan jumlah populasi, dan seiring meningkatnya kebutuhan energi, salah satu alat konversi energi yang mampu menghasilkan listrik adalah turbin uap. Turbin uap bekerja dengan mengubah energi potensial dari uap menjadi energi kinetik melalui nozzle (pada jenis turbin impuls) atau melalui sudu gerak (pada turbin reaksi). Energi kinetik tersebut kemudian dikonversi menjadi energi mekanik yang diteruskan ke poros turbin.[2].

Turbin uap adalah jenis mesin penggerak utama yang banyak digunakan dalam berbagai industri, seperti untuk menggerakkan generator listrik, pompa, kompresor, dan dalam industri proses [3]. Hal ini didasarkan pada beberapa pertimbangan berikut: efisiensi dan kinerja yang tinggi, fleksibilitas dalam penggunaan bahan bakar, kemampuan untuk memodifikasi sudu turbin, kemudahan dalam perawatan, serta tingkat keandalan yang tinggi.

Sebagai salah satu mesin pengubah(konversi) energi, turbin uap dapat merubah energi potensial uap menjadi energi mekanik pada poros turbin. Ini membuat turbin uap menjadi alternatif yang bagus[4]. Turbin uap dapat diklasifikasikan menjadi berbagai kategori berdasarkan posisi silinder, arah aliran uap, jumlah tingkat tekanan, teknik untuk mengatur prinsip aksi uap, proses penurunan kalor, dan tekanan uap di sisi masuk. Selain itu, turbin uap dapat digunakan dalam berbagai industri[5].

Turbin uap tingkat kedua, juga dikenal sebagai "second stage steam turbine", adalah komponen dari turbin uap multi-tahap. Dalam proses ini, uap yang keluar dari turbin tahap pertama diarahkan ke turbin tahap kedua untuk menghasilkan lebih banyak tenaga, yang memungkinkan penggunaan energi uap yang lebih efisien. Keuntungan

menggunakan turbin uap tingkat kedua yaitu memungkinkan penggunaan energi uap secara lebih optimal dan mampu menghasilkan daya yang lebih besar dibandingkan turbin satu tahap.

Sebuah penelitian sebelumnya menemukan apabila penggunaan variasi jumlah sudu 4, 6, 12 dan pergerakan sudu berengsel dan sudu tetap, jumlah sudu 12 memberikan hasil terbaik. Dengan kecepatan putar 89,9 rpm dan output energi 29,25 Watt, sistem mencapai efisiensi terbaik 0,47%.[6]. "Pengaruh Variasi Jumlah Sudu Terhadap Daya Output Listrik Pada Turbin Vortex," 8 sudu memiliki efisiensi tertinggi sebesar 6,02%. Tetapi turbin pada penelitian tersebut tidak efisien.[7].

Turbin uap terdapat dua bagian yang utama yaitu: stator dan juga rotor, yang keduanya adalah bagian inti. Untuk meningkatkan kinerjanya, ada juga komponen pendukung seperti contohnya yaitu bantalan, kopling, dan sistem bantu lainnya. Penambahan energi termal meningkatkan energi kinetik fluida kerja turbin uap.[8]. Pabrik kelapa sawit atau pabrik lainnya menghasilkan bahan bakar dari turbin uap sebagai fluida kerja. Tenaga uap yang dihasilkan dari turbin uap kemudian didistribusikan ke tiga bagian melalui pipa-pipa: pengepresan, peminyakan, dan perebusan. Pada dasarnya, turbin uap beroperasi dengan menyerap energi kinetik dari uap kering (vapor yang terlalu panas) yang dilepaskan oleh nosel. Akibatnya, bilah turbin terdorong secara angular atau berputar.

Ada berbagai cara untuk merubah energi potensial uap menjadi energi mekanis. Oleh karena itu, turbin uap termasuk dalam tiga kategori utama: turbin uap tipe impuls, turbin uap tipe reaksi, dan turbin campuran/gabungan (impuls-reaksi). Kerugian utama yang terjadi selama proses ekspansi uap dalam turbin dibagi menjadi dua kategori: kerugian dalam dan kerugian luar[9]. Pada dasarnya baik turbin impuls maupun turbin reaksi bekerja dengan aliran aksial, artinya uap masuk turbin mendekati sejajar dengan poros turbin[10]. Adapun penunjang turbin uap yaitu *Feedwater heater* adalah alat dalam sistem pembangkit uap regeneratif yang berfungsi meningkatkan suhu air sebelum masuk ke boiler. Terdapat dua jenis: *open feedwater heater* (deaerator) untuk menghilangkan oksigen dari kondensat turbin tekanan rendah, dan *closed feedwater heater*, yaitu *low pressure heater* dan *high pressure heater*, yang memanaskan air pengisi pada tekanan berbeda sebelum masuk ke boiler[11].

Di dalam penelitian ini, penulis akan memodifikasi jumlah sudu reaksi pada turbin uap. Sudu ini berputar dengan memanfaatkan gaya reaksi yang dihasilkan oleh uap terhadap sudu geraknya. Prinsip kerja sudu reaksi mirip dengan sistem penyiraman otomatis (automatic sprinkler system) di mana sprinkler bergerak karena gaya reaksi air. Sudu reaksi terdiri dari dua jenis, yaitu sudu gerak (moving blade) dan sudu diam (fixed blade), mirip dengan sudu impuls. Namun, prinsip kerja sudu-sudu ini berbeda dengan sudu gerak dan sudu diam pada sudu impuls. Pada sudu reaksi, baik sudu gerak maupun sudu diam memiliki respon yang sama; uap mengalami penurunan tekanan dan peningkatan kecepatan saat melewati keduanya (seperti pada nosel). Fungsi tambahan nosel (sudu diam) pada jenis ini adalah mengarahkan laju aliran uap.

Hal ini penting karena volume uap di bagian belakang turbin meningkat, sehingga dibutuhkan pengarah dan diameter sudu yang lebih besar untuk mengoptimalkan konversi energi menjadi putaran turbin. Beberapa faktor dapat menyebabkan turunnya performa turbin. Salah satu penyebab utama yang memicu penurunan tersebut adalah laju aliran uap, diikuti oleh faktor lain seperti suhu, tekanan, dan entalpi. [12] dan faktor-faktor seperti celah ujung (tip clearance), geometri sudu, dan tekanan keluar yang tinggi memiliki dampak signifikan pada efisiensi dan kinerja sistem[13]. Meningkatkan jumlah sudu akan menambah kecepatan putar serta gaya tangensial yang dihasilkan, sehingga berdampak pada peningkatan daya dan efisiensi turbin kinetik [14]. Untuk mencapai efisiensi turbin yang optimal, kecepatan uap yang keluar dari sudu gerak terakhir harus ditekan serendah mungkin, sehingga energi kinetik yang tersisa dapat dimanfaatkan secara maksimal dan mengurangi kehilangan energi.[15].

Melalui proses optimasi terhadap efisiensi (η), kerja netto (W-net), dan work ratio, dapat dirancang sebuah turbin uap yang tidak hanya memenuhi kriteria teknis, tetapi juga memberikan keuntungan secara ekonomis. Efisiensi yang tinggi memungkinkan penghematan bahan bakar secara signifikan, yang berdampak langsung pada pengurangan biaya operasional dan peningkatan keberlanjutan sistem. Kerja netto yang besar memungkinkan perancangan turbin dengan ukuran fisik yang lebih kecil, sehingga dapat mengurangi kebutuhan ruang, material konstruksi, serta biaya manufaktur dan pemeliharaan. Sementara itu, work ratio yang stabil menunjukkan bahwa turbin mampu mempertahankan performa yang konsisten dalam berbagai kondisi beban dan gangguan, yang sangat penting dalam sistem tenaga yang menuntut keandalan tinggi. Dengan demikian, hasil dari proses optimasi ini tidak hanya meningkatkan performa teknis turbin uap, tetapi juga mendukung efisiensi biaya dan keandalan operasional jangka panjang, menjadikannya solusi yang unggul untuk kebutuhan pembangkitan energi modern.[16]

B. Rumusan Masalah

Merujuk pada latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, maka perumusan masalah dapat disampaikan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh perubahan jumlah sudu turbin uap tingkat kedua terhadap performa keseluruhan turbin uap?

2. Seberapa signifikan pengaruh variasi jumlah sudu turbin uap tingkat kedua terhadap efisiensi termal dan mekanis turbin uap?

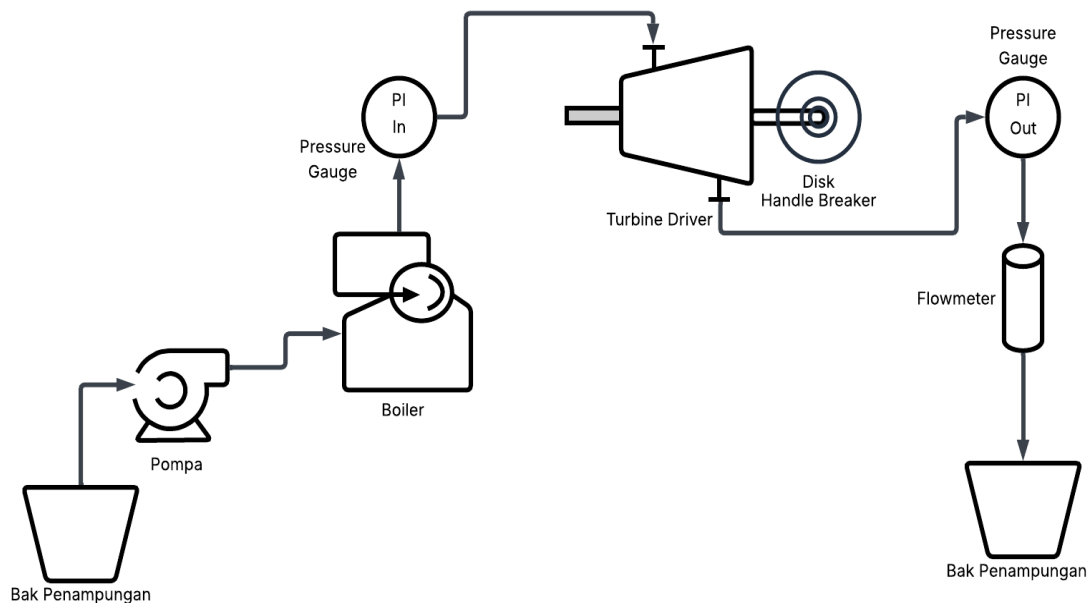
C. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi jumlah sudu pada turbin uap bertingkat kedua terhadap performa dan efisiensi sistem turbin secara keseluruhan. Penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan konfigurasi optimal jumlah sudu yang mampu menghasilkan daya maksimum, efisiensi tertinggi, serta torsi paling besar pada tekanan dan kecepatan putar tertentu. Dengan demikian, hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam desain dan pengembangan turbin uap skala kecil yang lebih efisien dan memiliki performa tinggi.

II. METODE

A. Metode Penelitian

Tujuan untuk mengetahui efisiensi dan performa pada turbin uap bertingkat kedua yang jumlah sudunya bervariasi dan pemanasan uap menggunakan boiler kapasitas 5 liter. Dalam penelitian ini diperlukan alat pengukur seperti tachometer, flowmeter, dan pressure gauge untuk mengukur Rpm, mengukur debit, tekanan uap dengan variasi jumlah sudu (5, 7, dan 9) dan tekanan (60, 50, dan 40). Adanya konsep penelitian pada benda kerja yakni bertujuan untuk mempermudah saat perancangan menggunakan proses permesinan dan dapat membuat benda kerja yang mempunyai nilai efisiensi tinggi.

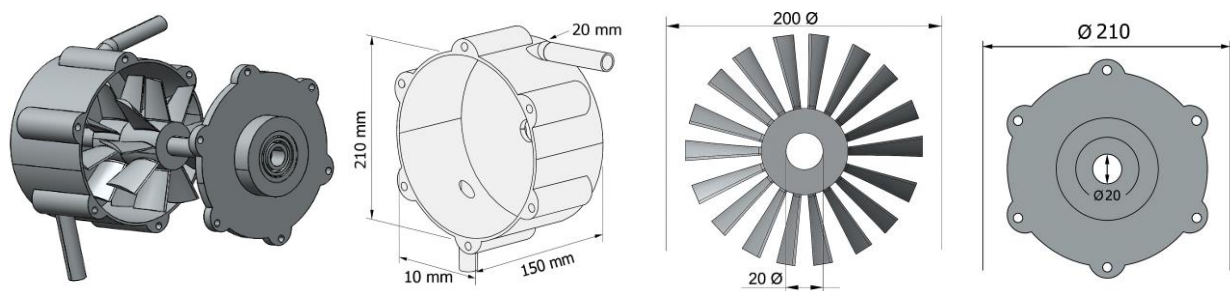


Gambar 1. Rangkaian Alat Uji

Gambar di atas menunjukkan diagram sistem pembangkit uap skala kecil yang digunakan untuk menggerakkan turbin uap. Sistem ini dimulai dari bak penampungan yang berfungsi sebagai tempat penyimpanan air sebelum dipompa. Air dari bak penampungan kemudian dialirkan ke pompa yang bertugas menyalurkan air dengan tekanan lebih tinggi ke boiler. Dalam boiler air dididihkan hingga berubah menjadi uap bertekanan tinggi. Uap yang dihasilkan kemudian mengalir menuju turbin, di mana tekanan masuknya diukur menggunakan pressure gauge (PI In).

Turbin berfungsi sebagai pengubah energi panas dari uap menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros. Poros turbin ini terhubung dengan disk handle breaker yang kemungkinan digunakan sebagai pengaman atau kontrol manual. Setelah melalui turbin, uap yang telah kehilangan sebagian tekanannya mengalir keluar dan tekanannya diukur kembali oleh pressure gauge (PI Out). Selanjutnya, uap ini melewati flowmeter yang mencatat laju aliran atau debit uap yang keluar dari sistem. Uap kemudian dibuang atau dikondensasikan ke bak penampungan akhir.

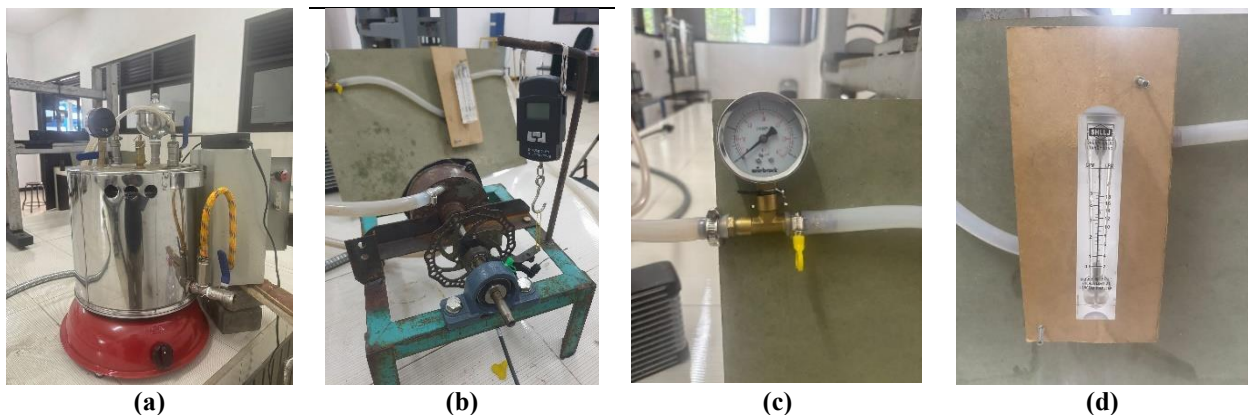
Secara keseluruhan, sistem ini didesain sebagai miniatur pembangkit uap untuk keperluan eksperimen atau pendidikan, guna mempelajari konversi energi dari energi panas menjadi energi mekanik, serta menganalisis kinerja turbin uap berdasarkan tekanan dan debit uap yang masuk dan keluar dari sistem.



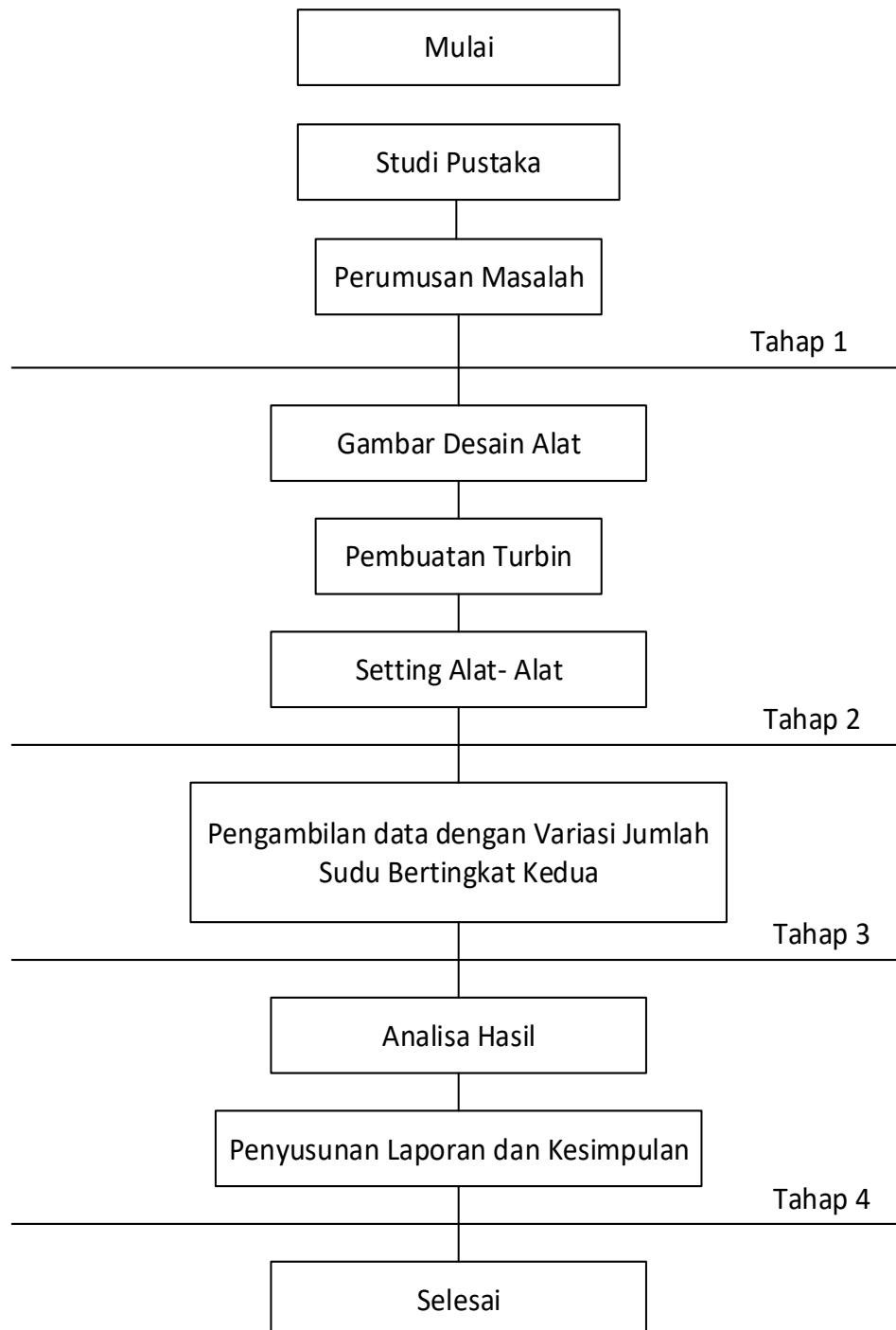
Gambar 2. Desain Turbin

Gambar yang ditampilkan merupakan desain turbin uap bertingkat kedua skala kecil dengan konfigurasi aliran aksial (axial flow). Desain ini terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu rumah turbin (casing), sudu turbin, poros, dan penutup depan yang dilengkapi dengan bantalan (bearing). Rumah turbin berbentuk silinder dan berfungsi sebagai pelindung serta pengarah aliran uap agar tetap terfokus saat melewati sudu-sudu turbin. Sudu turbin (rotor blades) terlihat tersusun dalam dua tingkat yang dipasang pada poros utama. Sudu ini dirancang melengkung untuk menangkap energi kinetik dari aliran uap dan mengubahnya menjadi energi mekanik dalam bentuk rotasi.

Antara tingkat-tingkat sudu rotor, biasanya terdapat sudu stator (nozzle guide vanes) yang berfungsi mengarahkan aliran uap ke rotor berikutnya dengan sudut yang sesuai, meskipun tidak tampak secara eksplisit dalam gambar. Poros terhubung langsung dengan sudu-sudu dan berfungsi meneruskan energi rotasi ke beban luar seperti generator atau sistem pengukuran. Pada ujung depan, terdapat penutup (end cap) yang menjadiudukan bearing, yang berfungsi menjaga kestabilan putaran poros dan mengurangi gesekan.



Gambar 3 . (a) Mini boiler, (b) Turbin Driver, (c) Pressure gauge, (d) Flow meter

B. Diagram Alir**Gambar 4.** Diagram alir penelitian

C. Proses perhitungan melibatkan :

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

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

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 :

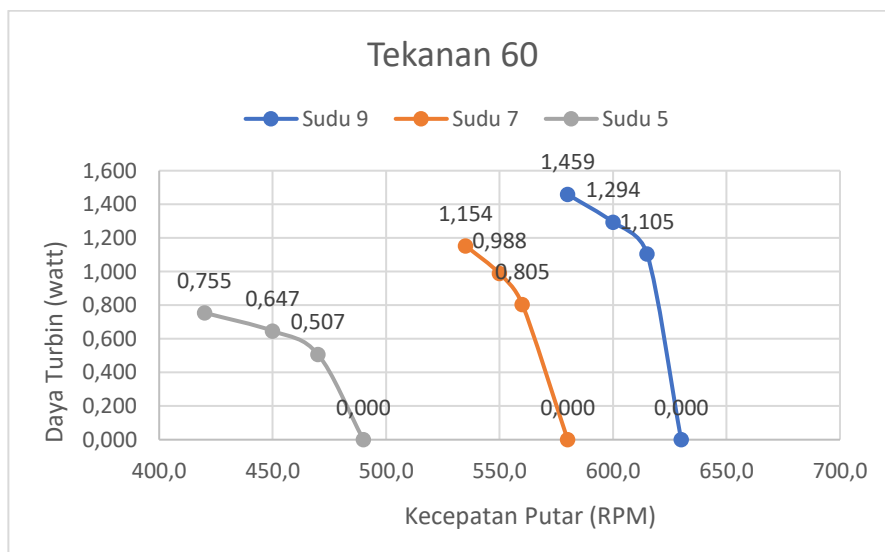
- $\dot{m}$ = mass flow rate(kg/s)
- ρ = density(kg/m³)
- $\dot{V}$ = debit (m³/s)
- T = Torsi (N. m)
- N = Kecepatan Putar (N)
- h = entalpy (kj/kg)
- P_{turbin} = daya turbin (watt)
- P_{Uap} = daya uap (watt)
- η = efesiensi turbin (%)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

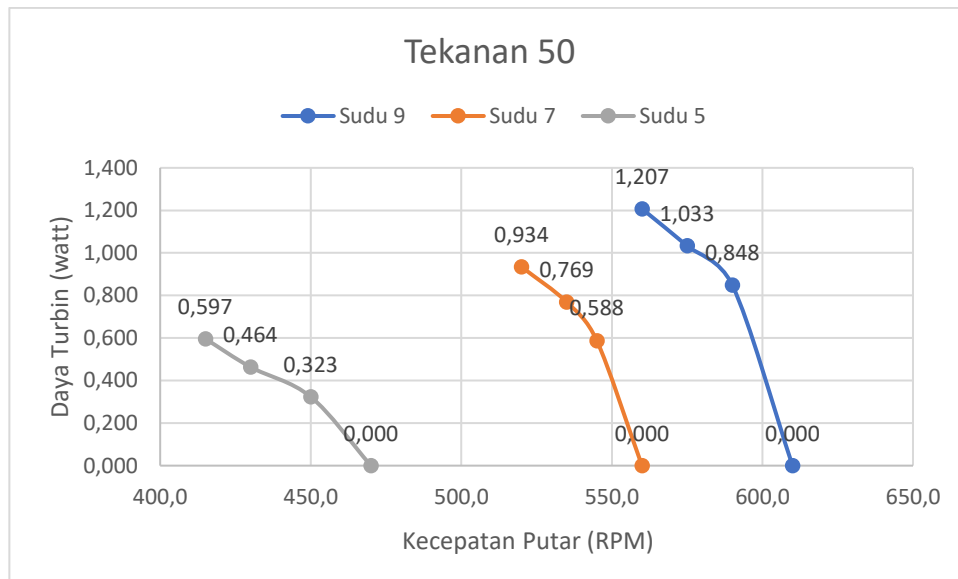
A. Hasil Eksperimen

Jumlah Sudu	Tekanan Masuk	Tekanan Keluar	Kecepatan Putar	Gaya Tarik Rem	Gaya Tarik Rem	Debit	Debit	L	Densitas	Mass Flow	H in	H out	Daya Uap	Torsi Turbin	Daya Turbin	Efisiensi
	Psi	Psi	RPM	Gram	N	l/m	m ³ /s	m	kg/m ³	kg/s	kJ/kg	kJ/kg	watt	N.m	watt	
5	60	50	490,0	0	0,000	8	0,00013	0,07	2,570	0,000343	2748,91	2742,5	2,203	0,000	0,000	0%
			470,0	15	0,147	8	0,00013	0,07	2,570	0,000343	2748,91	2742,5	2,203	0,010	0,507	23%
			450,0	20	0,196	8	0,00013	0,07	2,570	0,000343	2748,91	2742,5	2,203	0,014	0,647	29%
			420,0	25	0,245	8	0,00013	0,07	2,570	0,000343	2748,91	2742,5	2,203	0,017	0,755	34%
	50	40	470,0	0	0,000	7	0,00012	0,07	2,220	0,000259	2742,48	2734,9	1,974	0,000	0,000	0%
			450,0	10	0,098	7	0,00012	0,07	2,220	0,000259	2742,48	2734,9	1,974	0,007	0,323	16%
			430,0	15	0,147	7	0,00012	0,07	2,220	0,000259	2742,48	2734,9	1,974	0,010	0,464	23%
			415,0	20	0,196	7	0,00012	0,07	2,220	0,000259	2742,48	2734,9	1,974	0,014	0,597	30%
	40	30	460,0	0	0,000	6	0,00010	0,07	1,870	0,000187	2734,86	2725,6	1,730	0,000	0,000	0%
			440,0	5	0,049	6	0,00010	0,07	1,870	0,000187	2734,86	2725,6	1,730	0,003	0,158	9%
			420,0	10	0,098	6	0,00010	0,07	1,870	0,000187	2734,86	2725,6	1,730	0,007	0,302	17%
			405,0	15	0,147	6	0,00010	0,07	1,870	0,000187	2734,86	2725,6	1,730	0,010	0,437	25%
7	60	50	580,0	0	0,000	9	0,00015	0,07	2,570	0,000386	2748,91	2742,5	2,479	0,000	0,000	0%
			560,0	20	0,196	9	0,00015	0,07	2,570	0,000386	2748,91	2742,5	2,479	0,014	0,805	32%
			550,0	25	0,245	9	0,00015	0,07	2,570	0,000386	2748,91	2742,5	2,479	0,017	0,988	40%
			535,0	30	0,294	9	0,00015	0,07	2,570	0,000386	2748,91	2742,5	2,479	0,021	1,154	47%
	50	40	560,0	0	0,000	8	0,00013	0,07	2,220	0,000296	2742,48	2734,9	2,256	0,000	0,000	0%
			545,0	15	0,147	8	0,00013	0,07	2,220	0,000296	2742,48	2734,9	2,256	0,010	0,588	26%
			535,0	20	0,196	8	0,00013	0,07	2,220	0,000296	2742,48	2734,9	2,256	0,014	0,769	34%
			520,0	25	0,245	8	0,00013	0,07	2,220	0,000296	2742,48	2734,9	2,256	0,017	0,934	41%
	40	30	540,0	0	0,000	7	0,00012	0,07	1,870	0,000218	2734,86	2725,6	2,018	0,000	0,000	0%
			530,0	10	0,098	7	0,00012	0,07	1,870	0,000218	2734,86	2725,6	2,018	0,007	0,381	19%
			515,0	15	0,147	7	0,00012	0,07	1,870	0,000218	2734,86	2725,6	2,018	0,010	0,555	28%
			500,0	20	0,196	7	0,00012	0,07	1,870	0,000218	2734,86	2725,6	2,018	0,014	0,719	36%
9	60	50	630,0	0	0,000	10	0,00017	0,07	2,570	0,000428	2748,91	2742,5	2,754	0,000	0,000	0%
			615,0	25	0,245	10	0,00017	0,07	2,570	0,000428	2748,91	2742,5	2,754	0,017	1,105	40%
			600,0	30	0,294	10	0,00017	0,07	2,570	0,000428	2748,91	2742,5	2,754	0,021	1,294	47%
			580,0	35	0,343	10	0,00017	0,07	2,570	0,000428	2748,91	2742,5	2,754	0,024	1,459	53%
	50	40	610,0	0	0,000	9	0,00015	0,07	2,220	0,000333	2742,48	2734,9	2,537	0,000	0,000	0%
			590,0	20	0,196	9	0,00015	0,07	2,220	0,000333	2742,48	2734,9	2,537	0,014	0,848	33%
			575,0	25	0,245	9	0,00015	0,07	2,220	0,000333	2742,48	2734,9	2,537	0,017	1,033	41%
			560,0	30	0,294	9	0,00015	0,07	2,220	0,000333	2742,48	2734,9	2,537	0,021	1,207	48%
	40	30	590,0	0	0,000	8	0,00013	0,07	1,870	0,000249	2734,86	2725,6	2,306	0,000	0,000	0%
			575,0	15	0,147	8	0,00013	0,07	1,870	0,000249	2734,86	2725,6	2,306	0,010	0,620	27%
			560,0	20	0,196	8	0,00013	0,07	1,870	0,000249	2734,86	2725,6	2,306	0,014	0,805	35%
			540,0	25	0,245	8	0,00013	0,07	1,870	0,000249	2734,86	2725,6	2,306	0,017	0,970	42%

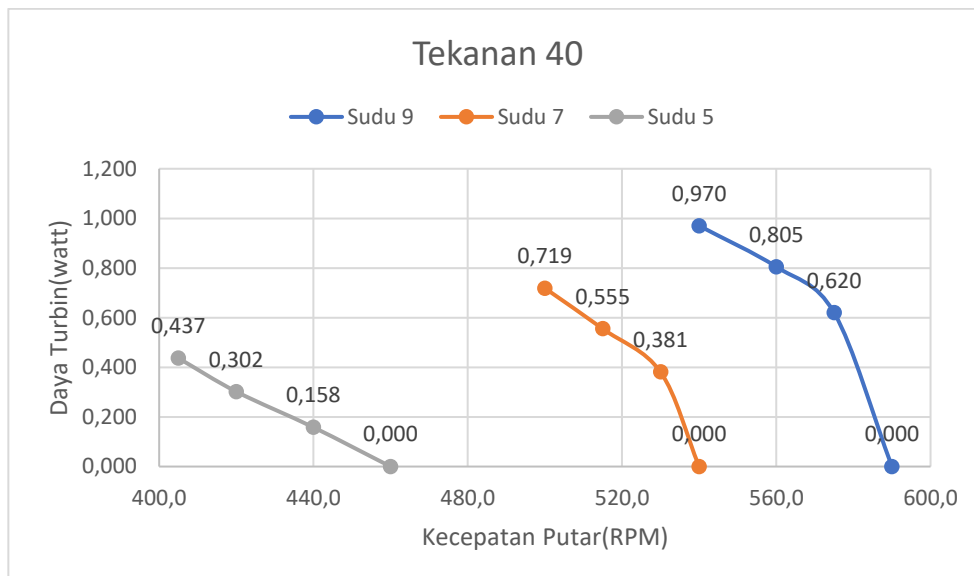
1. Berikut merupakan grafik nilai dari daya turbin(watt) berbanding kecepatan putar (rpm) :



Gambar 5. Grafik pada tekanan 60



Gambar 6 Grafik Pada Tekanan 50

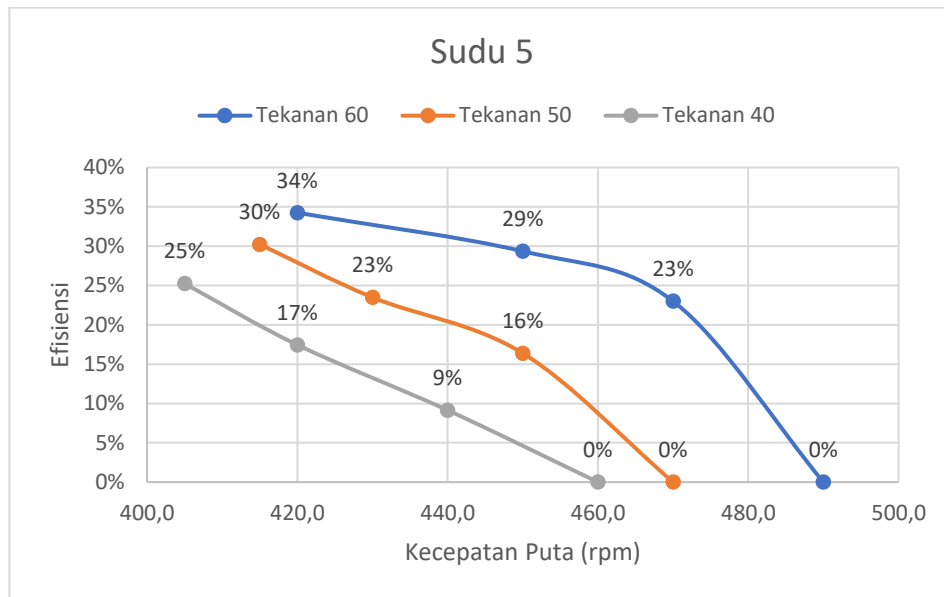


Gambar 7 Grafik Pada Tekanan 40

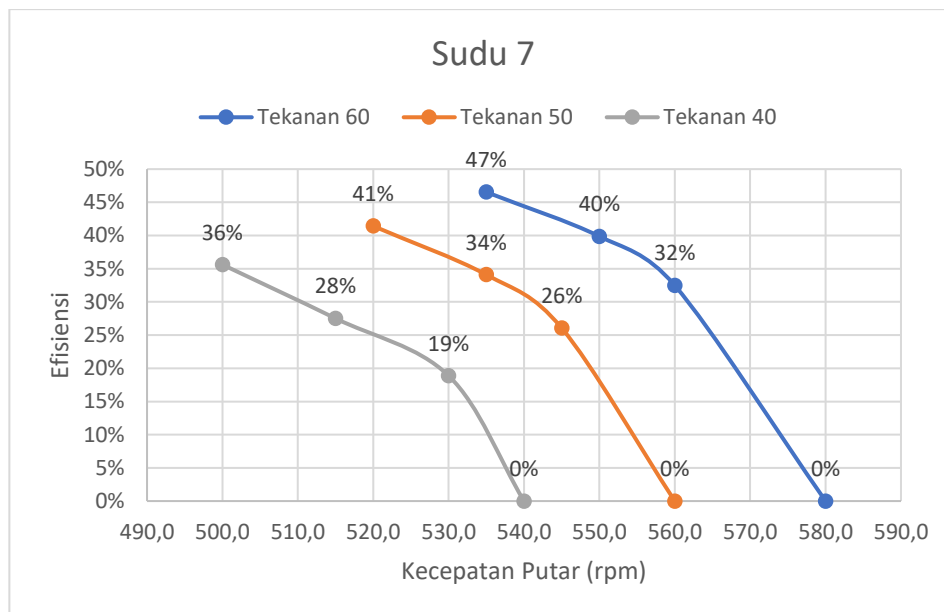
Berdasarkan grafik hubungan antara daya turbin (watt) terhadap kecepatan putar (RPM) pada tekanan uap 60 psi, 50 psi, dan 40 psi untuk variasi jumlah sudu 5, 7, dan 9, dapat disimpulkan bahwa jumlah sudu dan tekanan uap memiliki pengaruh yang signifikan terhadap performa turbin. Pada tekanan 60 psi, sudu 9 menghasilkan daya maksimum tertinggi sebesar 1,459 watt pada kecepatan sekitar 590 RPM, diikuti oleh sudu 7 sebesar 1,158 watt pada 540 RPM, dan sudu 5 hanya mencapai 0,755 watt pada 430 RPM. Pola serupa terlihat pada tekanan 50 psi, di mana sudu 9 menghasilkan daya 1,207 watt, sudu 7 sebesar 0,934 watt, dan sudu 5 sebesar 0,597 watt. Pada tekanan 40 psi, sudu 9 tetap unggul dengan daya 0,970 watt, disusul sudu 7 sebesar 0,719 watt, dan sudu 5 hanya 0,437 watt.

Secara umum, semakin besar jumlah sudu dan semakin tinggi tekanan uap, maka semakin besar pula daya yang dihasilkan turbin. Selain itu, setiap konfigurasi jumlah sudu memiliki titik kecepatan putar optimum di mana daya maksimum tercapai; melebihi titik tersebut justru menyebabkan penurunan daya. Oleh karena itu, kombinasi terbaik untuk menghasilkan daya maksimum adalah menggunakan 9 sudu, tekanan 60 psi, dan kecepatan putar sekitar 580 RPM.

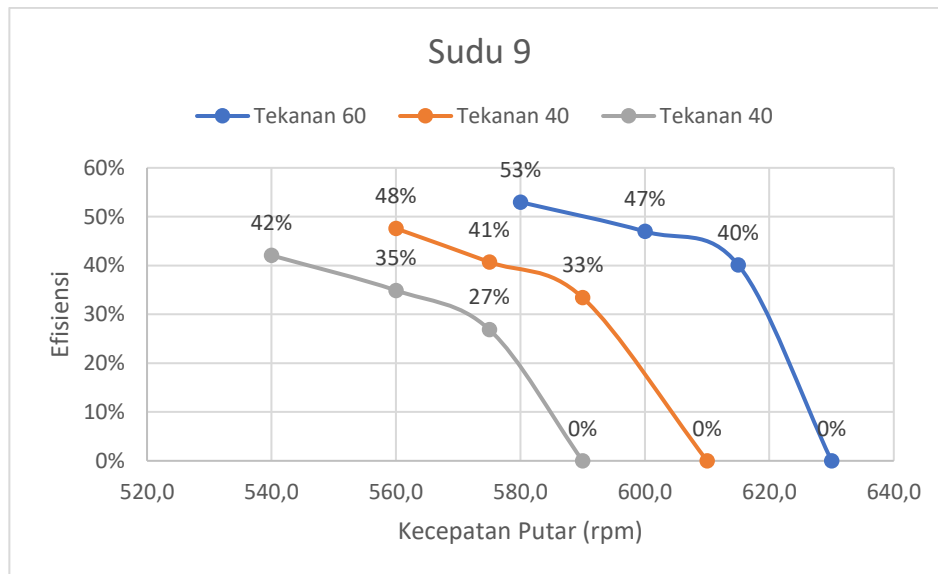
2. Berikut merupakan grafik nilai dari Efisiensi turbin berbanding dengan kecepatan putar (rpm):



Gambar 8 Grafik Efisiensi Sudu 5



Gambar 9 Grafik Efisiensi Sudu 7



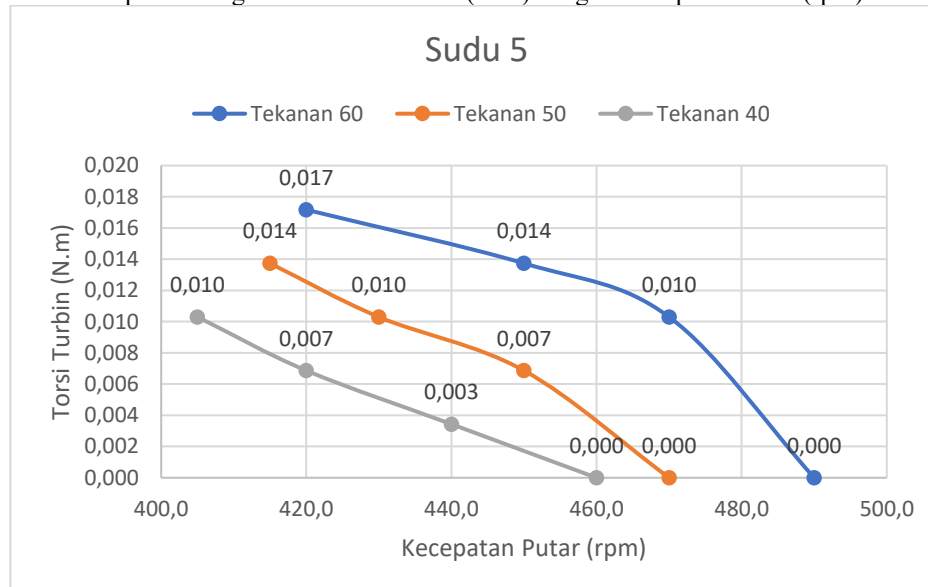
Gambar 10 Grafik Efisiensi Sudu 9

Grafik-grafik ini menunjukkan bagaimana efisiensi turbin berubah tergantung jumlah sudu, tekanan uap, dan kecepatan putar. Secara umum, efisiensi meningkat seiring bertambahnya jumlah sudu dan tekanan uap, serta mencapai nilai maksimum pada kecepatan tertentu sebelum akhirnya turun.

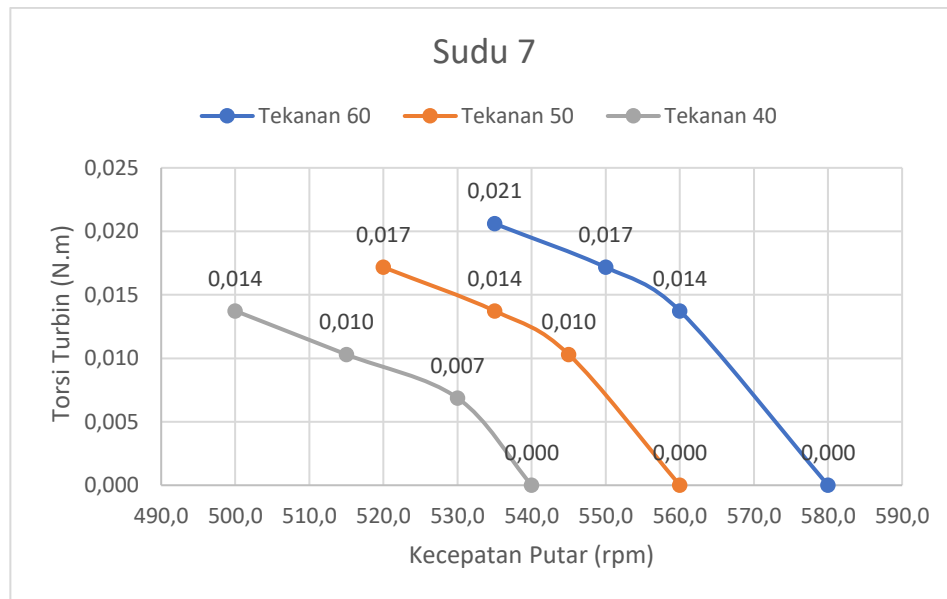
Untuk sudu 5, efisiensi tertinggi tercapai pada tekanan 60 psi yaitu 34% di sekitar 420 rpm. Saat jumlah sudu ditingkatkan menjadi 7, efisiensi maksimum naik menjadi 47% di tekanan 60 psi dan kecepatan sekitar 530 rpm. Kemudian pada sudu 9, efisiensi tertinggi mencapai 53% pada tekanan 60 psi di kecepatan sekitar 580 rpm.

Semakin tinggi tekanan dan semakin banyak sudu, efisiensi cenderung meningkat, namun tetap bergantung pada kecepatan yang tepat. Efisiensi turun drastis jika kecepatan melebihi titik optimal, bahkan bisa jatuh ke 0%. Kesimpulannya, konfigurasi terbaik untuk efisiensi adalah menggunakan 9 sudu dengan tekanan 60 psi pada kecepatan putar sekitar 580 rpm. Ini menunjukkan bahwa baik daya maupun efisiensi bekerja optimal dengan tekanan tinggi, jumlah sudu yang lebih banyak, dan pengaturan kecepatan putar yang tepat.

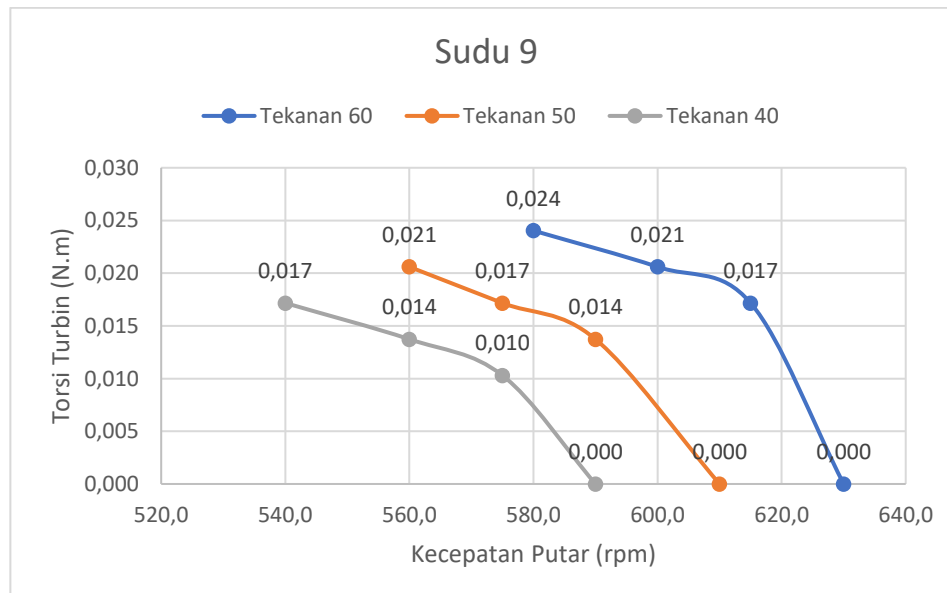
3. Berikut adalah data perbandingan antara torsi turbin(N.m) dengan Kecepatan Putar (rpm):



Gambar 11 Perbandingan torsi dengan kecepatan putar pada sudu 5.



Gambar 12 Perbandingan torsi dengan kecepatan putar pada sudu 7.

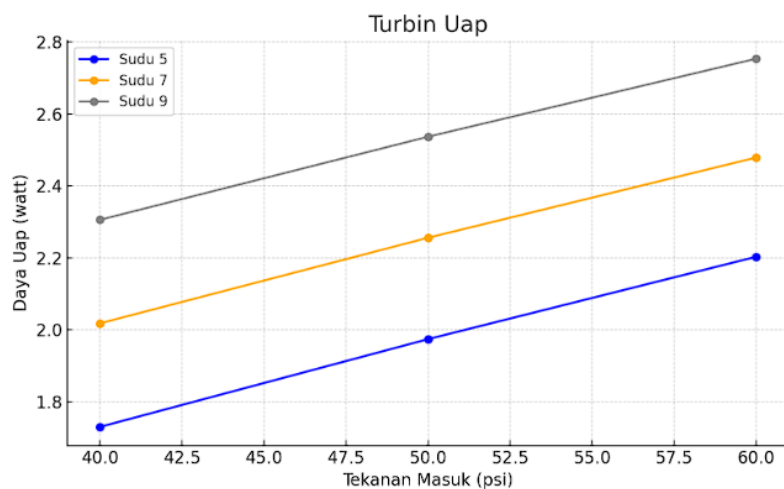


Gambar 13 Perbandingan torsi dengan kecepatan putar pada sudu 9.

Grafik-grafik ini menunjukkan torsi (gaya puntir) yang dihasilkan turbin pada berbagai jumlah sudu, tekanan uap, dan kecepatan putar. Secara umum, makin banyak jumlah sudu dan makin tinggi tekanannya, makin besar torsi yang bisa dihasilkan. Torsi ini juga punya titik maksimal di kecepatan tertentu, lalu turun jika kecepatannya terus dinaikkan.

Untuk sudu 5, torsi tertinggi ada di tekanan 60 psi dengan nilai sekitar 0,017 Nm di kecepatan 430 rpm. Saat sudu ditambah jadi 7, torsi maksimum naik menjadi 0,021 Nm, juga di tekanan 60 psi pada kecepatan sekitar 550 rpm. Pada sudu 9, torsi paling tinggi tercapai di tekanan 60 psi dengan nilai 0,024 Nm pada kecepatan sekitar 580 rpm. Jadi, bisa dilihat bahwa semakin banyak jumlah sudu dan makin tinggi tekanannya, torsi yang dihasilkan juga lebih besar, asalkan kecepatannya pas.

Kesimpulannya, jika ingin mendapatkan torsi yang paling besar dari turbin, pilihan terbaiknya adalah memakai 9 sudu, tekanan 60 psi, dan jalankan di kecepatan sekitar 580 rpm. Jika kecepatannya terlalu tinggi atau terlalu rendah dari titik itu, torsi akan turun lagi. Jadi, semua faktor harus seimbang untuk hasil maksimal.



Gambar 14 Perbandingan Daya uap(watt) dengan Tekanan(psi).

Berikut adalah grafik perbandingan Daya Uap terhadap Tekanan Masuk untuk tiga variasi jumlah sudu (Sudu 5, Sudu 7, dan Sudu 9). Grafik ini menggambarkan tren daya uap meningkat seiring dengan kenaikan tekanan, dan menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah sudu (hingga 9), semakin tinggi daya uap yang dihasilkan.

VII. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis grafik daya, efisiensi, dan torsi terhadap variasi jumlah sudu, tekanan uap, dan kecepatan putar, dapat disimpulkan bahwa performa turbin uap sangat dipengaruhi oleh keseimbangan ketiga parameter tersebut. Dengan jumlah *blade* (sudu) dari 5 menjadi 7, dan kemudian ke 9, secara konsisten meningkatkan daya, efisiensi, dan torsi yang dihasilkan. Hal ini karena semakin banyak sudu yang digunakan, semakin besar luas permukaan interaksi dengan uap, sehingga lebih banyak energi kinetik yang bisa diubah menjadi energi mekanik. Pada konfigurasi 9 sudu, turbin menghasilkan daya maksimum sekitar 1,46 watt, efisiensi tertinggi mencapai 53%, dan torsi maksimum sekitar 0,024 Nm.

Selain jumlah sudu, tekanan uap juga memainkan peran penting. Tekanan tertinggi yang digunakan dalam pengujian, yaitu 60 psi, terbukti menghasilkan nilai tertinggi untuk semua parameter kinerja turbin. Tekanan yang lebih tinggi membawa lebih banyak energi, namun tetap membutuhkan kecepatan putar yang sesuai agar energi tersebut bisa ditransfer secara efektif ke turbin. Kecepatan putar juga memiliki pengaruh signifikan. Masing-masing konfigurasi jumlah sudu memiliki kecepatan optimal di mana daya, efisiensi, dan torsi mencapai titik maksimum. Misalnya, pada sudu 5 titik optimal terjadi di sekitar 430 rpm, pada sudu 7 di sekitar 540 rpm, dan pada sudu 9 di sekitar 580–590 rpm. Melebihi titik kecepatan ini justru menyebabkan penurunan kinerja, bahkan efisiensi bisa turun hingga 0% karena energi uap tidak dapat dimanfaatkan secara maksimal.

Daya dihasilkan dari torsi dikalikan dengan kecepatan putar, efisiensi mencerminkan seberapa efektif energi uap diubah menjadi energi mekanik, dan torsi menunjukkan kemampuan turbin menghasilkan gaya puntir. Untuk menghasilkan performa optimal, tidak cukup hanya menaikkan salah satu faktor seperti tekanan atau jumlah sudu; seluruh sistem harus diatur dengan seimbang. Oleh karena itu, konfigurasi terbaik untuk turbin uap skala kecil adalah penggunaan 9 sudu, tekanan uap 60 psi, dan kecepatan putar sekitar 580–590 rpm. Kombinasi ini menghasilkan daya, efisiensi, dan torsi tertinggi secara bersamaan, menjadikannya pilihan paling ideal untuk mencapai performa maksimal turbin.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan segenap kerendahan hati, penulis panjatkan puji dan syukur ke hadirat Allah SWT, Sang Pemilik Ilmu dan Waktu, yang telah menuntun setiap langkah dalam menyelesaikan skripsi ini. Perjalanan panjang ini bukan sekadar rangkaian kata dan angka, tetapi buah dari doa yang tak pernah henti dan semangat yang tak pernah padam. Terima kasih yang tulus penulis sampaikan kepada kedua orang tua tercinta, pelita hidup yang selalu menyinari dalam gelap dan meneduhkan dalam gelisah, atas cinta, doa, dan dukungan tanpa syarat.

Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada seluruh dosen dan staf pengajar di Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo atas ilmu, bimbingan, dan keteladanan yang telah diberikan selama ini. Tak terlupa, kepada sahabat-sahabat seperjuangan dan semua pihak yang telah mengulurkan bantuan, menyisipkan semangat, atau sekadar hadir sebagai penyemangat di kala lelah melanda, terima kasih dari lubuk hati yang paling dalam. Semoga skripsi ini menjadi amal ilmu yang bermanfaat dan menjadi bagian kecil dari perubahan yang lebih besar..

REFERENSI

- [1] F. Gani Setiawan And A. Apridialianti Melkias, “Analisis Kinerja Turbin Uap Unit 1 Di Cirebon Power,” 2022.
- [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,” 2014.
- [3] Jenne Syarif, “Perancangan Turbin Uap Impuls,” *Jurnal Polimesin*, Vol. 7, No. 2, Pp. 638–647, 2009.
- [4] R. Bangun Turbin Uap Pada Pembangkit Listrik Tenaga Sampah, R. Darmawan, M. Marno, N. Fauji, P. Studi Teknik Mesin, And F. Teknik Universitas Singaperbangsa Karawang, “Rancang Bangun Turbin Uap Pada Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (Pltsa) Kapasitas 1,45 Kw Di Lingkungan Kampus Unsika,” *Jurnal Teknik Mesin Dan Pembelajaran*, Vol. 4, No. 1, Pp. 29–40, Jun. 2021, [Online]. Available: <Http://Journal2.Um.Ac.Id/Index.Php/Jtmp>
- [5] Wahyudi Banu, “Analisis Efisiensi Turbin Uap Terhadap Kapasitas Listrik Pembangkit,” 2019.
- [6] E. Pengaruh *Et Al.*, “Eksperimental Pengaruh Variasi Rasio Sudu Berpenampang Datar Terhadap Daya Dan Efisiensi Turbin Reaksi Crossflow Poros Horizontal.”
- [7] P. H. A. S. T. ,M. T. Muhammad Farid Rahman, “Uji Eksperimental Kinerja Turbin Reaksi Aliran Vortex Tipe Sudu Berpenampang Lurus Dengan Variasi Tinggi Sudu,” *Jtm*, Vol. 06, No. 01, Pp. 85–95, 2018.
- [8] R. Apriandi And A. Mursadin, “Analisis Kinerja Turbin Uap Berdasarkan Performance Test Pltu Pt.Indocemen Tp-12 Tarjun,” 2016.
- [9] A. Sutrisno And R. M. Yunus, “Analisis Sudu Dan Gigi Penerus Turbin Uap Penggiling Tebu Di. Pt. Pg. Rajawali Ii Jatitujuh Kabupaten Majalengka,” *Jurnal Universitas Majalengka*, Pp. 150–154, 2019.
- [10] “Perancangan Turbin Uap Sebagai Penggerak Generator Kapasitas 1000kva Tugas Akhir,” 2011.
- [11] W. M. Yasin, R. P. Wardhani, R. Simanjuntak, M. Prodi, T. Mesin, And D. Prodi, “Analisa Penggunaan Turbin Uap Pltu Muara Jawa Dengan Kapasitas Daya 27.5 Mw,” *Mecha Jurnal Teknik Mesin*, Vol. 4, No. 2, Pp. 16–21, Apr. 2022.
- [12] I. Suriaman, A. Suprayitno, And A. Hermanto, “Analisis Pengaruh Laju Uap Terhadap Efisiensi Turbin Uap Condensing Pada Pltu Pt. Xxx Analysis Of The Effect Of Steam Rate On The Efficiency Of Steam Condensing Turbine At Pltu Pt. Xxx,” Doi Xxxx.
- [13] Ł. Witanowski, “Numerical Investigation Of Multi-Stage Radial Turbine Performance Under Variable Waste Heat Conditions For Orc Systems,” *Applied Sciences (Switzerland)*, Vol. 14, No. 24, Dec. 2024, Doi: 10.3390/App142411600.
- [14] R. Pietersz, R. Soenoko, And S. Wahyudi, “Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Optimalisasi Kinerja Turbin Kinetik Roda Tunggal,” 2013.
- [15] R. Apriandi And A. Mursadin, “Analisis Kinerja Turbi Nuap Berdasarkan Performance Test Pltu Pt.Indocemen Tp-12 Tarjun,” 2016.
- [16] H. Santoso And J. Selatan, “Optimalisasi Untuk Menghasilkan Efisiensi Ideal Turbin Uap Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa Kapasitas 20 Mw,” 2018.

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.