

The Effect of Curving Angle on the Performance of Impulse Type Steam Turbine Prototype [Pengaruh Sudut Lengkung pada Perfoma Prototipe Turbin Uap Tipe Impuls]

Muhammad Iqbal Nur Fadillah¹⁾, Dr.A'rasy Fahrudin, S.T., M.T.²⁾Mulyadi³⁾ Rachmat Firdaus

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. *This study aims to analyze the influence of the angle of the curve of the blade on the performance and efficiency of the impulse type steam turbine prototype. The variables tested included three variations of the angle of the blade curve (60°, 40°, and 20°) as well as three steam pressure levels (70, 60, and 50 psi). The test was carried out using tools such as tachometers, flowmeters, and data loggers at the Mechanical Engineering Laboratory, University of Muhammadiyah Sidoarjo. The test results show that a 60° blade angle at 70 psi pressure results in the highest torque, power, and efficiency, with a maximum efficiency of up to 16%. In contrast, smaller spoon angles show a significant decrease in performance. Although the 20° angle produces higher steam power at fixed pressure, the overall efficiency of the turbine is better at a 60° angle. This study confirms that the combination of large spoon angle and high pressure is very influential in optimizing the performance of impulse steam turbines.*

Keywords – Turbine impulse, spoon angle, turbine efficiency, steam pressure

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh sudut lengkung sudu terhadap kinerja dan efisiensi prototipe turbin uap tipe impuls. Variabel yang diuji meliputi tiga variasi sudut lengkung sudu (60°, 40°, dan 20°) serta tiga tingkat tekanan uap (70, 60, dan 50 psi). Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat bantu seperti tachometer, flowmeter, dan data logger di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sudut sudu 60° pada tekanan 70 psi menghasilkan torsi, daya, dan efisiensi tertinggi, dengan efisiensi maksimum mencapai 16%. Sebaliknya, sudut sudu yang lebih kecil menunjukkan penurunan kinerja secara signifikan. Meskipun sudut 20° menghasilkan daya uap lebih tinggi pada tekanan tetap, efisiensi turbin secara keseluruhan lebih baik pada sudut 60°. Penelitian ini menegaskan bahwa kombinasi sudut sudu besar dan tekanan tinggi sangat berpengaruh dalam mengoptimalkan kinerja turbin uap impuls.

Kata Kunci – Turbin impuls, Sudut turbin, Efisiensi turbin, Tekanan uap

I. PENDAHULUAN

Listrik menjadi energi yang banyak digunakan manusia pada zaman ini dalam menunjang kehidupan sehari-hari. Manusia memerlukan energi listrik untuk berbagai kegiatan sehari-hari baik itu dalam industri, layanan publik, hingga rumah tangga. Energi listrik diproduksi dari berbagai macam pembangkit, salah satunya adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)[1]. Saat ini, energi listrik merupakan kebutuhan utama bagi kehidupan manusia. Baik rumah tangga maupun bisnis sangat membutuhkannya. Salah satu faktor penting yang mendukung kelancaran produksi industri adalah jumlah energi yang diperlukan bagi turbin uap untuk menghasilkan produk yang lebih banyak [2].

Turbin uap bekerja dengan mengubah energi uap potensial menjadi energi kinetik, yang kemudian melalui putaran poros turbin diubah menjadi energi mekanis[3]. Roda gigi reduksi dapat digunakan untuk menghubungkan mekanisme penggerak ke poros turbin ini secara langsung. Bergantung pada jenis mekanisme yang digerakkan, turbin uap dapat digunakan dalam berbagai jenis bisnis, seperti pembangkit listrik dan transportasi[4]. Turbin uap menggunakan uap panas untuk menghasilkan energi putar (mekanik). Poros turbin ini terhubung ke poros generator, yang berarti generator berputar bersamaan dengan turbin[5].

Di antara berbagai jenis teknologi pembangkit tenaga listrik, terdapat dua jenis utama turbin: turbin impuls dan turbin reaksi[6]. Namun, penggunaan kedua jenis teknologi pembangkit listrik ini harus mempertimbangkan efisiensi dan efektivitas, serta kondisi alam tempat pembangkit listrik berada. Pertimbangan penting lainnya termasuk sumber energi yang digunakan untuk menggerakkan pembangkit listrik. Secara umum, turbin reaksi memiliki keluaran daya yang lebih besar dibandingkan turbin impuls[7]. Namun, pada tekanan yang sangat rendah, turbin impuls dapat memberikan keunggulan tertentu[8].

Turbin impuls merupakan turbin yang proses pemuain (pengurangan tekanan) media kerjanya hanya terjadi pada barisan sudut tetap. Turbin impuls dapat berupa turbin impuls sederhana (satu tahap), turbin impuls kecepatan multi tahap (turbin Curtis), dan turbin impuls tekanan multi tahap (turbin Lantau) [9].

Salah satu jenis turbin impuls yang mendekati daya dan efisiensi tinggi adalah turbin De Laval. Turbin ini merupakan jenis turbin impuls yang mengubah energi potensial menjadi energi kinetik. Carl G.P. merancang turbin De Laval pertama kali, dan pada tahun 1888, De Laval membangunnya. Turbin De Laval menggunakan baling-baling berbentuk mangkuk, sehingga disebut turbin impuls karena memanfaatkan gaya dorong dari sumber tenaga, yang merupakan salah satu fitur uniknya dibandingkan dengan turbin lain. Turbin De Laval ditenagai oleh uap yang dihasilkan dengan memanaskan air dalam boiler. Sumber pembakaran untuk boiler dapat berasal dari berbagai bahan seperti batu bara, panas bumi, gas alam, biogas, kayu bakar, dan limbah yang dibakar. Ini mendorong kita untuk mempelajari efisiensi turbin impuls bertenaga uap agar dapat beroperasi secara optimal dan maksimal [10].

Rais dkk telah merancang turbin uap impuls sebagai bagian dari PLTSa. Turbin uap ini memiliki diameter 40 cm dan berputar pada 1500 Rpm dengan tekanan 5 Bar. Hasil pengujian alat PLTSa menunjukkan bahwa turbin uap ini memiliki efisiensi 49,6 persen dan efisiensi internal relatifnya adalah 1,337 persen. Turbin ini menghasilkan 26 volt tanpa beban dan 12,6 volt ketika terhubung ke baterai [11].

Menurut Hariri dan Tony, tumbukan partikel padat telah menimbulkan erosi yang cukup besar pada bagian bawah sudu turbin uap. Akibatnya, diperlukan biaya perawatan dan perbaikan yang tinggi, serta timbul risiko terhadap keselamatan dan penurunan efisiensi dalam pembangkitan tenaga listrik [12]. Dalam berbagai kondisi aliran dalam sistem, terdapat banyak faktor yang dapat mempengaruhi tingkat erosi dan dapat diteliti lebih lanjut. Faktor-faktor tersebut mencakup kecepatan partikel padat, laju aliran massa partikel, ukuran diameter partikel, sudut tumbukan, serta distribusi partikel padat [13]. Studi kasus menunjukkan bahwa perubahan dalam kondisi aliran dapat berpengaruh besar terhadap peningkatan atau penurunan tingkat erosi. Secara umum, tingkat erosi cenderung lebih tinggi ketika arah aliran berubah secara tiba-tiba dibandingkan dengan aliran yang lurus. Selain itu, adanya turbulensi lokal akibat permukaan yang kasar atau ketidaksesuaian dalam struktur juga dapat memperparah kerusakan akibat erosi [14].

Sementara itu, menurut Yani dan rekan-rekannya, desain atau bentuk sudu turbin sangat berpengaruh terhadap kecepatan putaran turbin. Pemilihan bentuk sudu yang tepat dapat meningkatkan kecepatan tangensial yang memutar roda turbin, sehingga berdampak positif terhadap peningkatan kinerja turbin. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada penentuan bentuk sudu yang paling sesuai untuk menghasilkan performa turbin yang optimal [15].

Dari penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa turbin uap tipe impuls telah menunjukkan performa yang cukup baik. Akan tetapi sudut lengkung sudu turbin uap tipe impuls perlu diteliti lebih lanjut. Sehingga perlu diteliti tentang pengaruh sudut lengkung pada performa prototipe turbin uap tipe impuls.

A. Rumusan masalah

1. Bagaimana sudut lengkung yang berbeda mempengaruhi output daya dari prototipe turbin uap tipe impuls?
2. Bagaimana pengaruh variasi sudut lengkung pada sudu-sudu turbin uap tipe impuls terhadap efisiensi termal prototipe turbin?

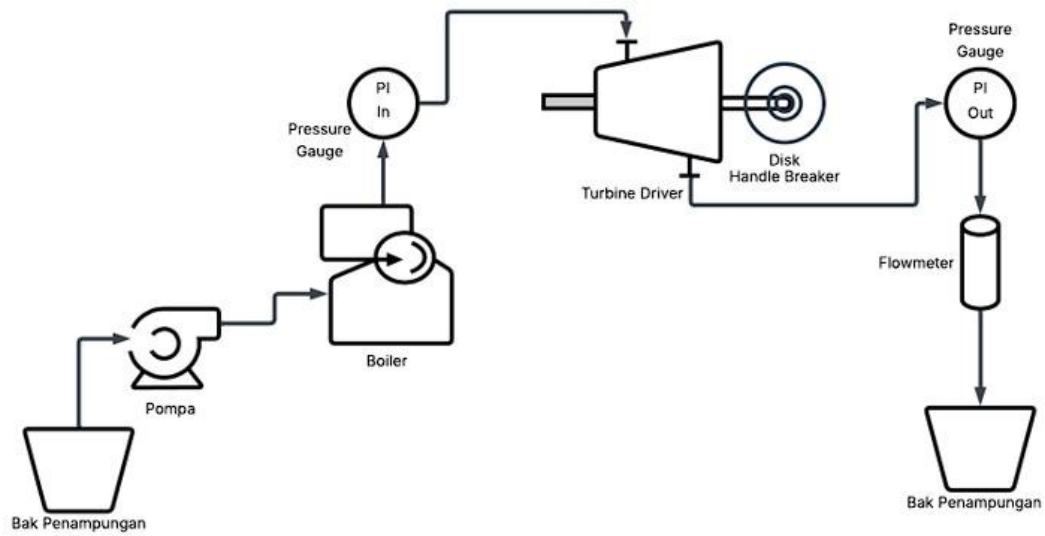
B. Tujuan penelitian

1. Penelitian ini dibatasi pada turbin uap tipe impuls. Variasi sudut lengkung yang diterapkan hanya akan diuji pada turbin dengan desain impuls, bukan turbin reaksi atau tipe lainnya.
2. Evaluasi kinerja difokuskan pada beberapa parameter utama: efisiensi termal, output daya, laju aliran uap, distribusi tekanan, dan ketahanan material sudu. Parameter lainnya, seperti emisi atau getaran, tidak akan menjadi fokus utama penelitian ini.
3. Pengujian dilakukan dalam durasi tertentu yang telah ditentukan untuk memastikan kestabilan hasil. Pengaruh sudut lengkung pada kinerja jangka panjang tidak akan dianalisis dalam penelitian ini.

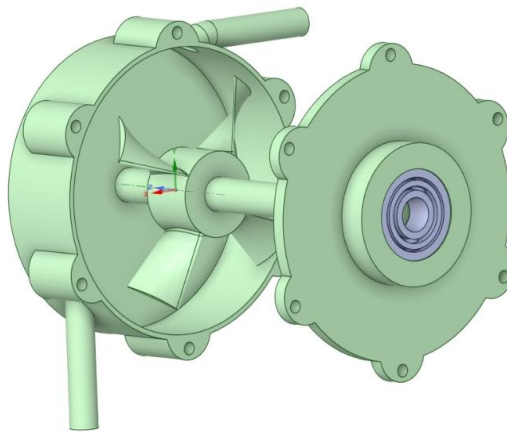
II. METODE

A. Metode Penelitian

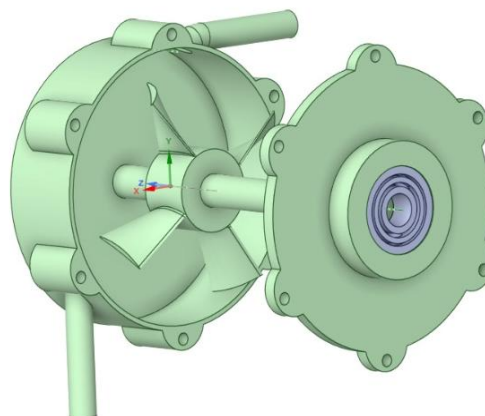
Tujuan untuk mengetahui sudut lengkung terhadap performa dan efisiensi uap pada turbin. Dalam penelitian ini diperlukan alat pengukur seperti tacometer, flowmeter, dan data timbangan digital untuk memantau putaran rpm dan laju aliran fluida dengan variasi sudut lengkung (60, 40, dan 20 °C). Adanya konsep penelitian pada benda kerja yakni bertujuan untuk mempermudah saat perancangan menggunakan proses permesinan dan dapat membuat benda kerja yang mempunyai nilai efisiensi tinggi. Pengujian dilakukan di Laboratorium FDM Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo.



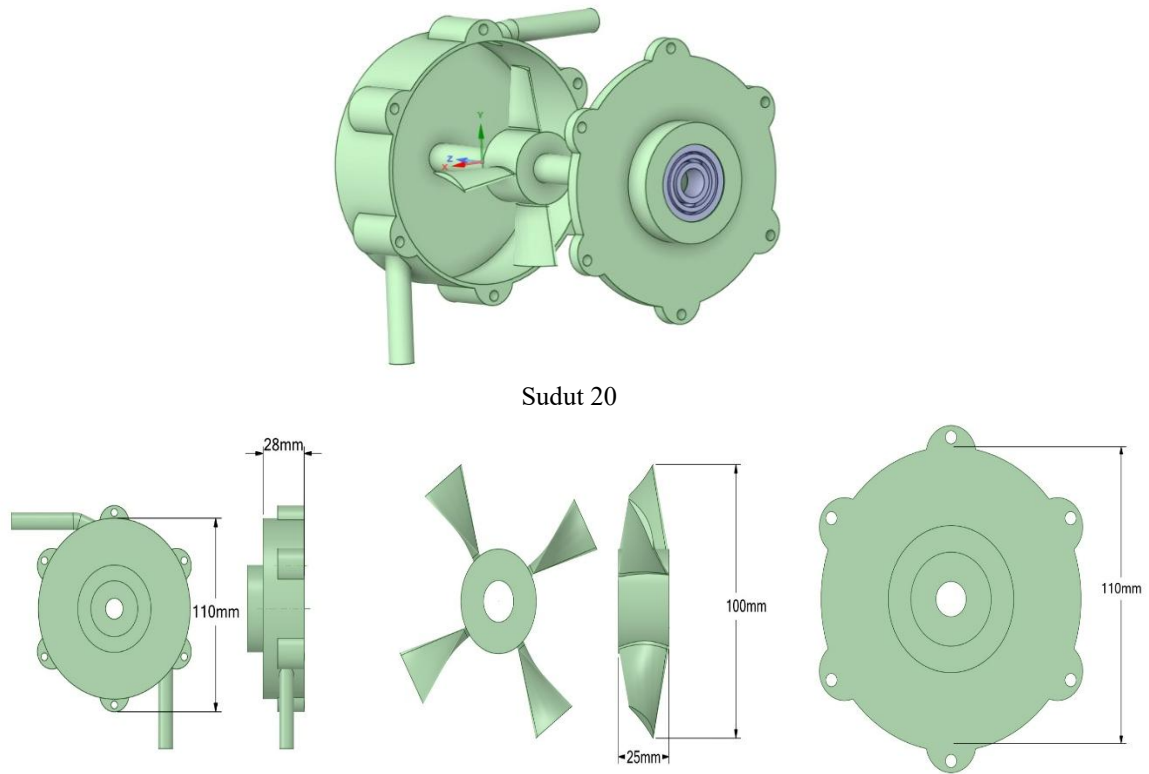
Gambar 1. alat uji kondensor



Sudut 60



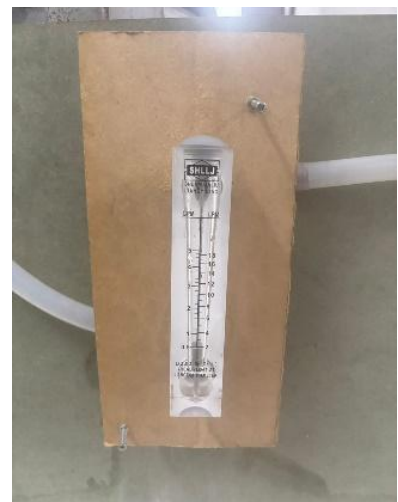
Sudut 40



(a)



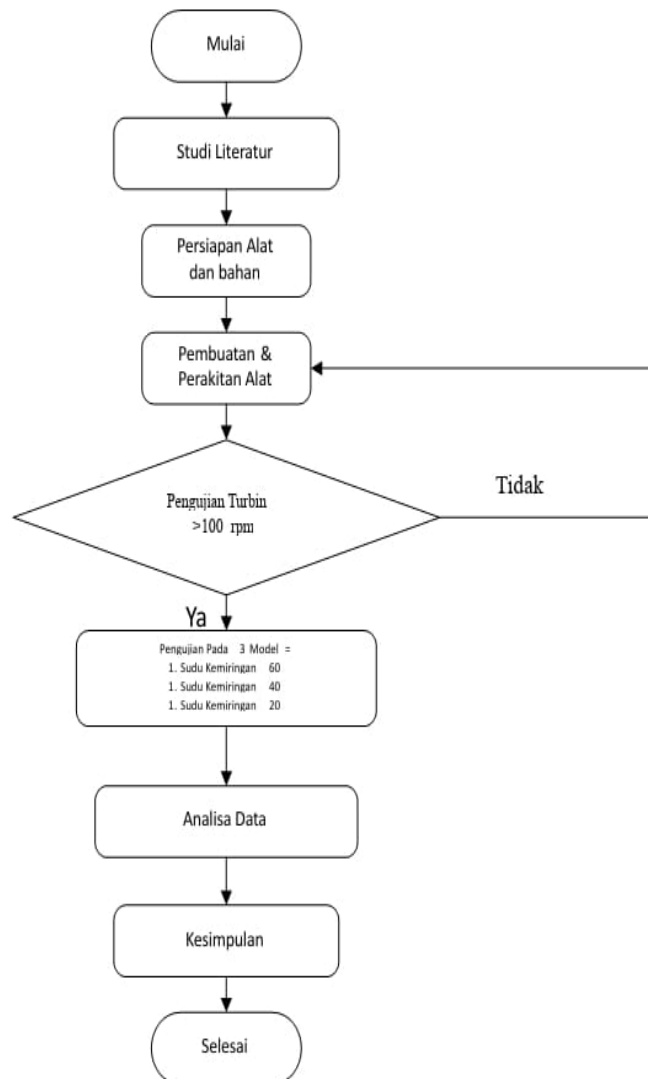
(c)



(d)

Gambar 2. (a) Mini boiler, (b) Kondensor, (c) *Pressure gauge* ,(d) *Flow mete*

B. Diagram alir



Gambar 3. Diagram alir penelitian

C. Langkah – langkah proses perhitungan melibatkan :

a) menghitung *mass flow rate* ($\dot{m}$) :

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

b) menghitung (P_{uap}) :

$$p_{uap} = \dot{m} \cdot \Delta h \dots\dots\dots [2]$$

c) Menghitung (T) :

$$T = F \cdot l \dots\dots\dots [3]$$

d) menghitung (P_{turbin}) :

$$P_{turbin} = 2\pi \cdot N \cdot T \dots\dots\dots [4]$$

e) menghitung efesiensi

$$a) \quad \eta = \frac{p_{turbin}}{p_{uap}} \dots\dots\dots [5]$$

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)
- $P_{turbine}$ = daya turbin (watt)
- P_{Uap} = daya uap (watt)
- η = efesiensi turbin (%)

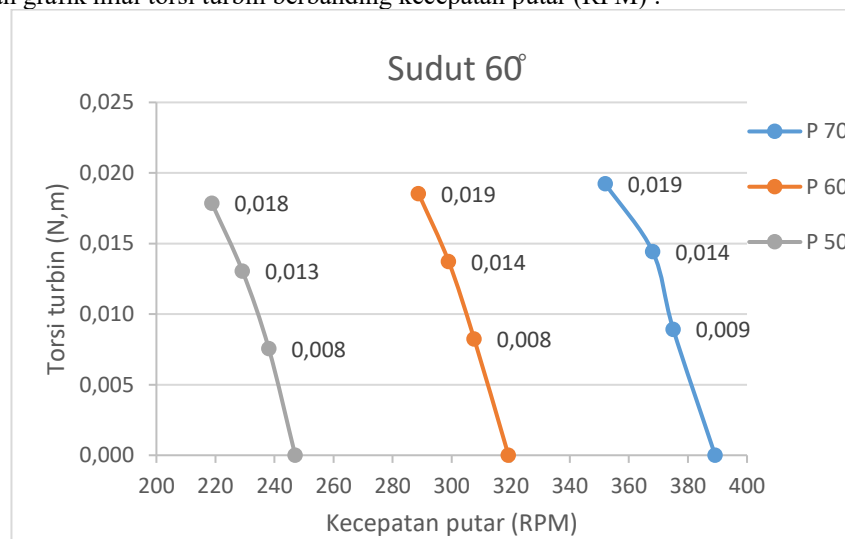
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil eksperimen

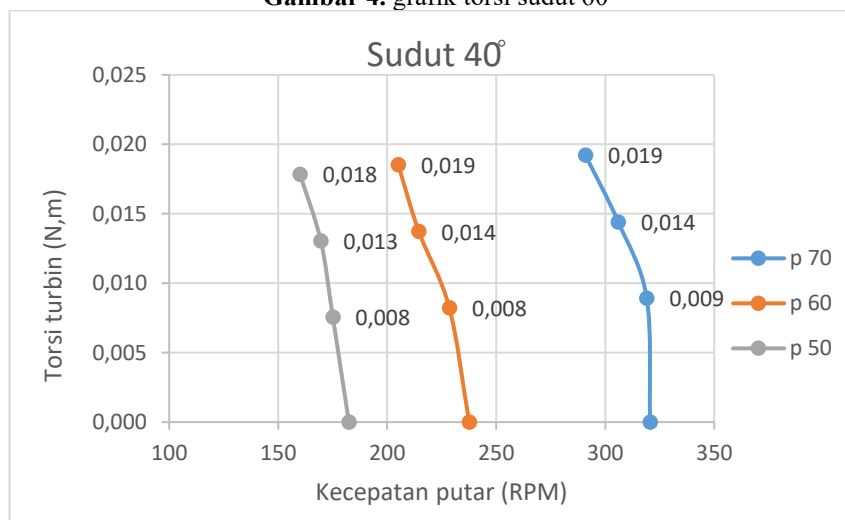
Sudu	Tekanan masuk	Tekanan keluar	Kecepatan putar	Gaya tarik rem	gaya tarik rem	Debit	debit	L	densitas	masflow	H in	H out	Daya uap	Torsi Turbin	Daya TURBIN	EFISIENSI
DERAJAT	psi	psi	rpm	gram	N	liter/menit	m ³ /s	m	kg/m ³	kg/s	kJ/kg	kJ/kg	watt	N.m	watt	
60	70	50	389,21	0	0	8	0,000133	0,07	2,74	0,000365	2754,45	2742,48	4,37	0,000	0,000	0%
			375,02	13	0,13	8	0,000133	0,07	2,74	0,000365	2754,45	2742,48	4,37	0,009	0,350	8%
			368,06	21	0,21	8	0,000133	0,07	2,74	0,000365	2754,45	2742,48	4,37	0,014	0,556	13%
			352,02	28	0,27	8	0,000133	0,07	2,74	0,000365	2754,45	2742,48	4,37	0,019	0,708	16%
	60	40	319,22	0	0,00	7	0,000117	0,07	2,39	0,000279	2748,91	2734,86	3,92	0,000	0,000	0%
			307,62	12	0,12	7	0,000117	0,07	2,39	0,000279	2748,91	2734,86	3,92	0,008	0,265	7%
			298,95	20	0,20	7	0,000117	0,07	2,39	0,000279	2748,91	2734,86	3,92	0,014	0,430	11%
			288,77	27	0,26	7	0,000117	0,07	2,39	0,000279	2748,91	2734,86	3,92	0,019	0,560	14%
	50	30	247,01	0	0,00	6	0,000100	0,07	2,04	0,000204	2742,48	2725,61	3,44	0,000	0,000	0%
			238,07	11	0,11	6	0,000100	0,07	2,04	0,000204	2742,48	2725,61	3,44	0,008	0,188	5%
			229,13	19	0,19	6	0,000100	0,07	2,04	0,000204	2742,48	2725,61	3,44	0,013	0,313	9%
			218,78	26	0,26	6	0,000100	0,07	2,04	0,000204	2742,48	2725,61	3,44	0,018	0,409	12%
40	70	50	320,58	0	0,00	9	0,000150	0,07	2,74	0,000411	2754,45	2742,48	4,92	0,000	0,000	0%
			319,05	13	0,13	9	0,000150	0,07	2,74	0,000411	2754,45	2742,48	4,92	0,009	0,298	6%
			305,94	21	0,21	9	0,000150	0,07	2,74	0,000411	2754,45	2742,48	4,92	0,014	0,462	9%
			290,93	28	0,27	9	0,000150	0,07	2,74	0,000411	2754,45	2742,48	4,92	0,019	0,585	12%
	60	40	237,6	0	0,00	8	0,000133	0,07	2,39	0,000319	2748,91	2734,86	4,48	0,000	0,000	0%
			228,49	12	0,12	8	0,000133	0,07	2,39	0,000319	2748,91	2734,86	4,48	0,008	0,197	4%
			214,47	20	0,20	8	0,000133	0,07	2,39	0,000319	2748,91	2734,86	4,48	0,014	0,308	7%
			205,02	27	0,26	8	0,000133	0,07	2,39	0,000319	2748,91	2734,86	4,48	0,019	0,398	9%
	50	30	182,4	0	0,00	7	0,000117	0,07	2,04	0,000238	2742,48	2725,61	4,02	0,000	0,000	0%
			175,06	11	0,11	7	0,000117	0,07	2,04	0,000238	2742,48	2725,61	4,02	0,008	0,138	3%
			169,53	19	0,19	7	0,000117	0,07	2,04	0,000238	2742,48	2725,61	4,02	0,013	0,232	6%
			159,98	26	0,26	7	0,000117	0,07	2,04	0,000238	2742,48	2725,61	4,02	0,018	0,299	7%
20	70	50	303,11	0	0,00	10	0,000167	0,07	2,74	0,000457	2754,45	2742,48	5,47	0,000	0,000	0%
			290,66	13	0,13	10	0,000167	0,07	2,74	0,000457	2754,45	2742,48	5,47	0,009	0,272	5%
			281,34	21	0,21	10	0,000167	0,07	2,74	0,000457	2754,45	2742,48	5,47	0,014	0,425	8%
			270,08	28	0,27	10	0,000167	0,07	2,74	0,000457	2754,45	2742,48	5,47	0,019	0,544	10%
	60	40	269,33	0	0,00	9	0,000150	0,07	2,39	0,000359	2748,91	2734,86	5,04	0,000	0,000	0%
			257,26	12	0,12	9	0,000150	0,07	2,39	0,000359	2748,91	2734,86	5,04	0,008	0,222	4%
			245,42	20	0,20	9	0,000150	0,07	2,39	0,000359	2748,91	2734,86	5,04	0,014	0,353	7%
			231,49	27	0,26	9	0,000150	0,07	2,39	0,000359	2748,91	2734,86	5,04	0,019	0,449	9%
	50	30	180,98	0	0,00	8	0,000133	0,07	2,04	0,000272	2742,48	2725,61	4,59	0,000	0,000	0%
			170,82	11	0,11	8	0,000133	0,07	2,04	0,000272	2742,48	2725,61	4,59	0,008	0,135	3%
			160,21	19	0,19	8	0,000133	0,07	2,04	0,000272	2742,48	2725,61	4,59	0,013	0,219	5%
			151,05	26	0,26	8	0,000133	0,07	2,04	0,000272	2742,48	2725,61	4,59	0,018	0,282	6%

Gambar 3. Hasil dan pembahasan

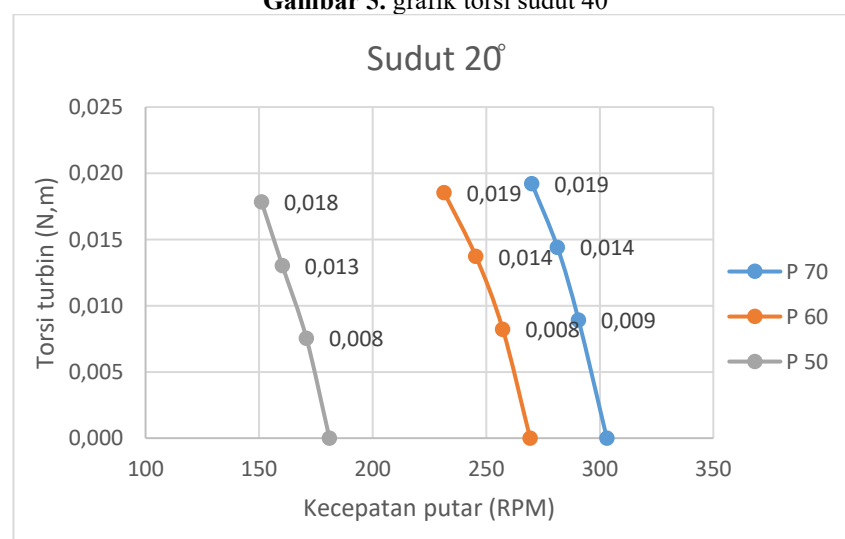
Berikut merupakan grafik nilai torsi turbin berbanding kecepatan putar (RPM) :



Gambar 4. grafik torsi sudut 60



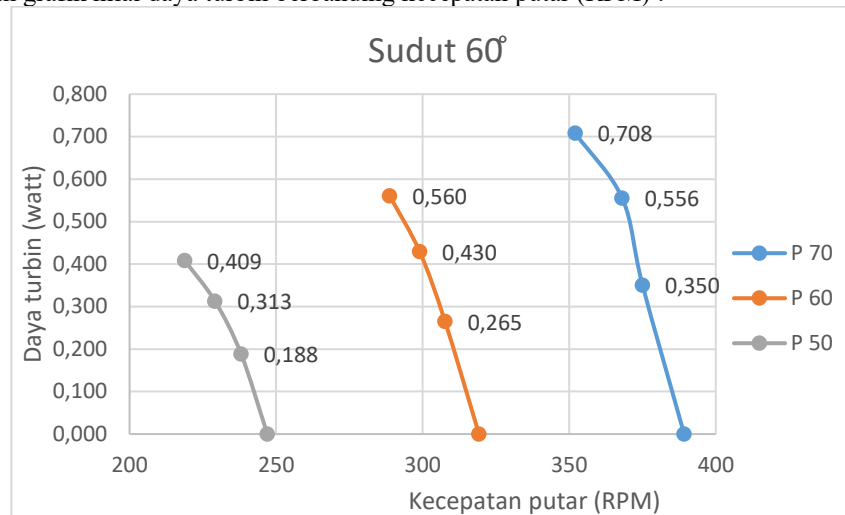
Gambar 5. grafik torsi sudut 40



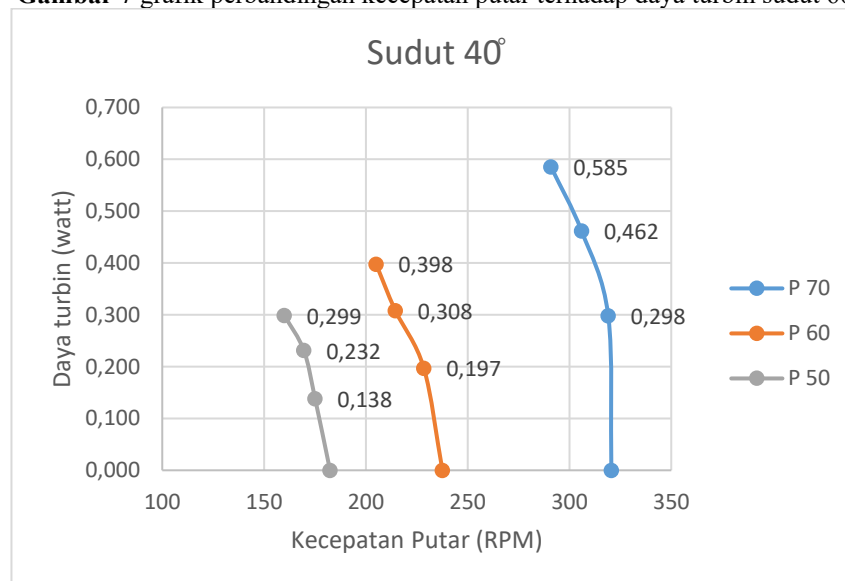
Gambar 6. grafik torsi sudut 20.

Grafik di atas menunjukkan hubungan antara kecepatan putar (RPM) dan torsi turbin pada tiga sudut sudu berbeda (60° , 40° , dan 20°) serta tiga tekanan berbeda (Tekanan 70, 60, dan 50). Secara umum, terlihat bahwa peningkatan tekanan menghasilkan torsi turbin yang lebih tinggi pada semua sudut sudu. Selain itu, sudut sudu yang lebih besar (60°) menghasilkan torsi yang lebih besar pada kecepatan putar yang lebih tinggi dibandingkan dengan sudut yang lebih kecil (40° dan 20°). Semakin kecil sudut sudu, grafik bergeser ke arah kecepatan putar yang lebih rendah dan torsi yang dihasilkan juga cenderung menurun. Dengan demikian, sudut sudu dan tekanan merupakan faktor penting yang mempengaruhi performa turbin, di mana sudut sudu 60° dan tekanan 70 menghasilkan performa terbaik dalam hal torsi maksimum dan rentang kecepatan kerja.

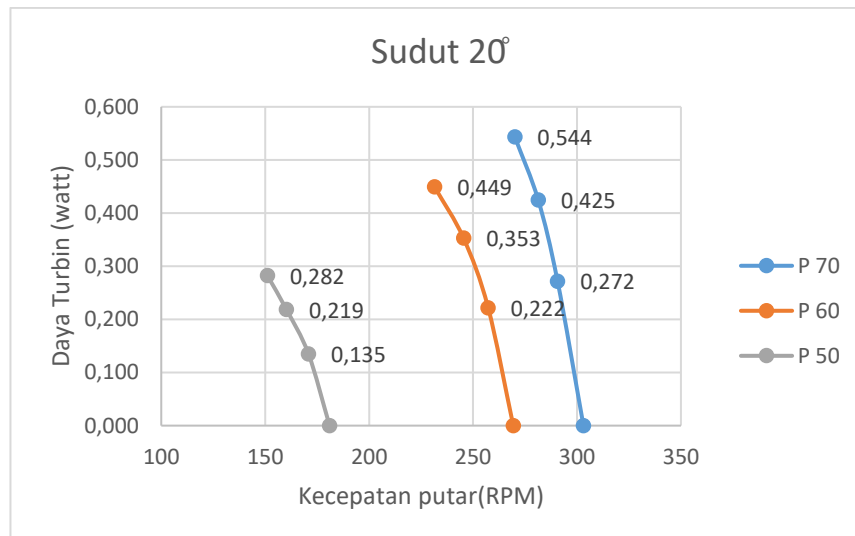
Berikut merupakan grafik nilai daya turbin berbanding kecepatan putar (RPM) :



Gambar 7 grafik perbandingan kecepatan putar terhadap daya turbin sudut 60°



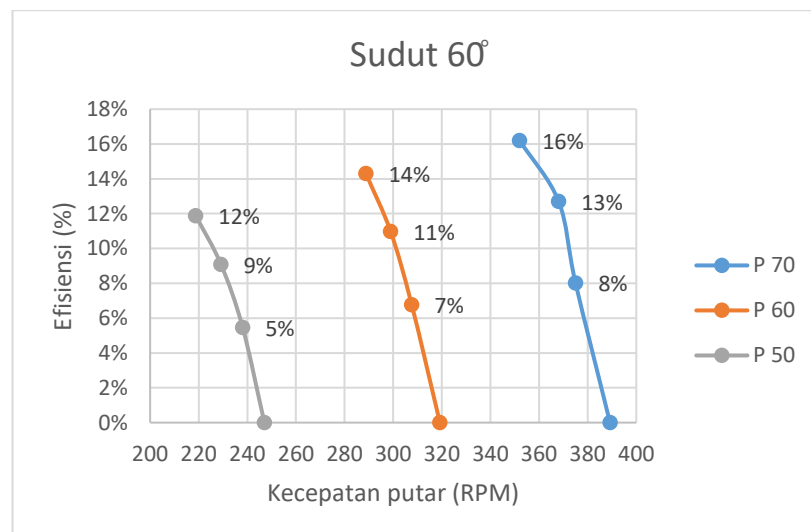
Gambar 8 grafik perbandingan kecepatan putar terhadap daya turbin sudut 40°



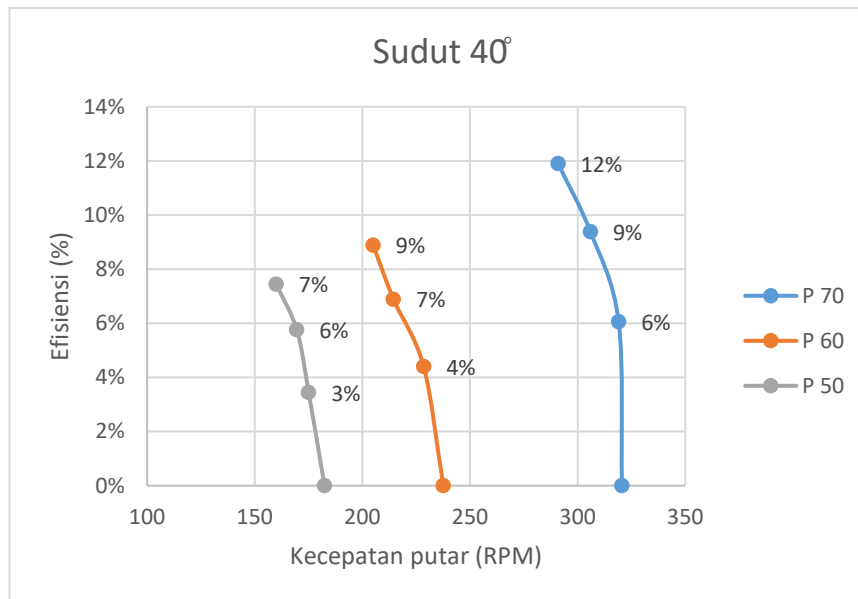
Gambar 9. grafik perbandingan kecepatan putar terhadap daya turbin sudut 20°

Dari haril Grafik di atas menunjukkan hubungan antara kecepatan putar (RPM) dan daya turbin pada tiga sudut sudu (60°, 40°, dan 20°) dengan tiga variasi tekanan (Tekanan 70, 60, dan 50). Secara umum, terlihat bahwa peningkatan tekanan menghasilkan daya turbin yang lebih besar pada setiap sudut sudu. Sudut sudu 60° menghasilkan daya maksimum tertinggi (hingga 0,708) dan mencakup rentang kecepatan yang lebih luas dibandingkan sudut lainnya. Penurunan sudut sudu menjadi 40° dan 20° mengakibatkan daya maksimum yang lebih rendah serta area kerja turbin yang lebih sempit. Dengan demikian, performa daya turbin optimal dicapai pada sudut sudu 60° dengan tekanan 70, sementara sudut dan tekanan yang lebih rendah mengurangi efisiensi dan output daya dari turbin.

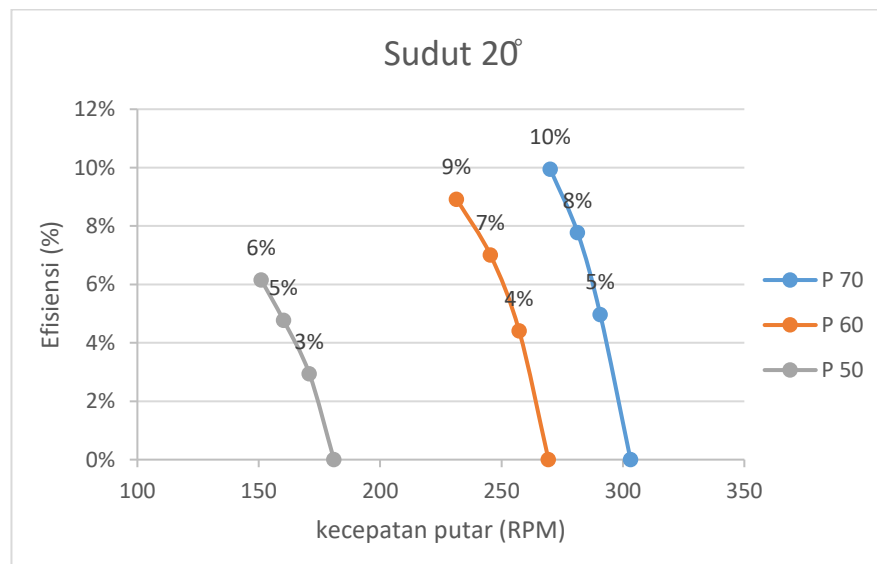
Berikut merupakan grafik nilai Efisiensi berbanding kecepatan putar (RPM):



Gambar 10. grafik efisiensi sudut 60°



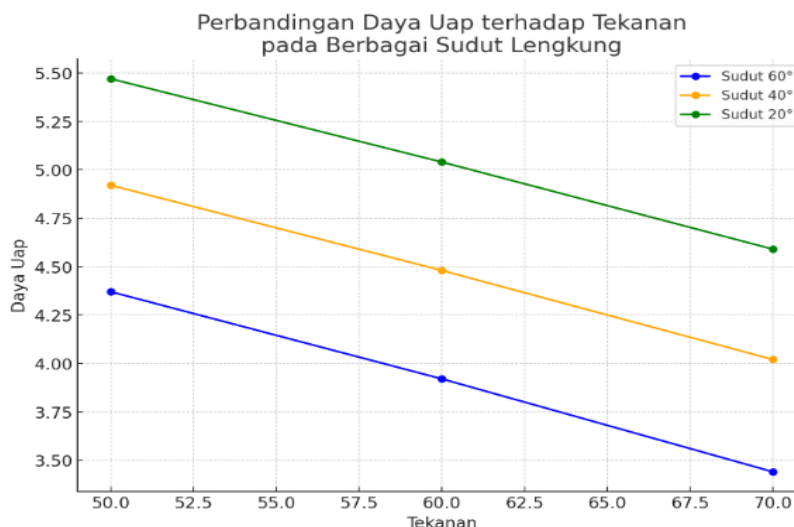
Gambar 11. grafik efisiensi sudut 40



Gambar 12. grafik efisiensi sudut 20

Dari hasil grafik di atas menampilkan hubungan antara kecepatan putar (RPM) dan efisiensi turbin pada tiga sudut sudu berbeda (60°, 40°, dan 20°) serta tiga tingkat tekanan (70, 60, dan 50). Secara keseluruhan, efisiensi tertinggi dicapai pada sudut sudu 60°, khususnya pada tekanan 70, dengan nilai maksimum mencapai 16%. Seiring penurunan sudut sudu menjadi 40° dan 20°, efisiensi maksimum juga menurun, masing-masing hanya mencapai 12% dan 10% pada tekanan 70. Selain itu, tekanan yang lebih tinggi secara konsisten menghasilkan efisiensi yang lebih baik pada semua sudut sudu. Rentang kecepatan kerja juga terlihat lebih luas pada sudut sudu 60° dibandingkan dengan sudut yang lebih kecil. Dengan demikian efisiensi turbin paling optimal dicapai pada konfigurasi sudut sudu 60° dan tekanan 70, menunjukkan bahwa kombinasi sudut sudu yang besar dan tekanan tinggi sangat berpengaruh terhadap kinerja efisiensi turbin.

Berikut merupakan grafik nilai dari daya uap berbanding tekanan:



Gambar 13. Daya uap berbanding tekanan

Grafik di atas menunjukkan hubungan antara tekanan dan daya uap pada tiga variasi sudut lengkung (60° , 40° , dan 20°). Terlihat bahwa di setiap sudut, peningkatan tekanan menghasilkan penurunan daya uap. Selain itu, sudut lengkung yang lebih kecil menghasilkan daya uap yang lebih tinggi pada tekanan yang sama. Ini menunjukkan bahwa semakin kecil sudut lengkung, semakin efisien sistem dalam menghasilkan daya uap, meskipun tekanan meningkat. Dengan demikian, sudut lengkung memainkan peran penting dalam optimalisasi kinerja sistem, di mana sudut 20° memberikan kinerja terbaik dibandingkan sudut 40° dan 60° dalam kondisi tekanan yang sama.

VII. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan grafik kinerja turbin uap tipe impuls dengan variasi sudut sudu dan tekanan uap, dapat disimpulkan bahwa tekanan yang lebih tinggi memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan daya dan efisiensi turbin. Sudut sudu 60° terbukti paling optimal dalam menghasilkan daya dan efisiensi maksimum, terutama pada tekanan 70 psi dan kecepatan putar menengah hingga tinggi. Meskipun sudut 40° dan 20° menunjukkan kestabilan kinerja pada tekanan rendah hingga sedang, efisiensinya lebih rendah dibandingkan sudut 60° . Oleh karena itu, pemilihan sudut sudu dan tekanan operasi yang tepat sangat krusial untuk mengoptimalkan kinerja turbin. Hasil penelitian ini dapat dijadikan referensi dalam pengembangan desain turbin uap impuls yang lebih efisien dan handal untuk aplikasi pembangkitan energi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan penuh hormat, penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, khususnya Program Studi Teknik Mesin, atas kesempatan, fasilitas, dan dukungan yang telah diberikan selama proses pelaksanaan penelitian ini. Penghargaan setinggi-tingginya juga ditujukan kepada Dr. A'razy Fahrudin, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing, atas bimbingan, arahan, serta kontribusi berharga yang diberikan selama penelitian dan penulisan artikel ini.

Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh staf Laboratorium Teknik Mesin atas bantuan teknis dalam pengoperasian peralatan, seperti turbin uap berkapasitas 5 liter, serta atas dukungan dalam penyediaan perlengkapan yang dibutuhkan selama eksperimen berlangsung. Bantuan tersebut sangat berperan dalam kelancaran proses penelitian. Selain itu, apresiasi yang mendalam diberikan kepada rekan-rekan mahasiswa dan teman-teman atas saran dan dukungan moral yang diberikan selama penyusunan penelitian ini. Tak lupa, rasa terima kasih yang tulus juga disampaikan kepada keluarga tercinta atas doa, semangat, dan dukungan emosional yang tak pernah putus selama proses ini berlangsung. Penulis berharap, hasil dari penelitian ini dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan ilmu terkait turbin, meningkatkan nilai efisiensi, dan mendukung kemajuan teknologi secara global.

REFERENSI

- [1] f. Gani setiawan and a. Apridialianti melkias, “analisis kinerja turbin uap unit 1 di Cirebon power,” 2022.
- [2] a. M. Edy Saputro, “analisis efisiensi turbin uap unit 1 di PT. PJB Objom PLTU Pulang Pisau Kalimantan Tengah,” 2021.
- [3] n. Dodi, “pengaruh jumlah sudu terhadap kinerja turbin angin sumbu vertikal tipe Darrieus-H,” 2020.
- [4] i. Yopi Riyanto, “pengaruh sudut sudu keluar turbin terhadap efisiensi sistem pada turbin cross-flow,”
- [5] t. Mesin and p. Negeri Medan, “unjuk kerja turbin uap Jieneng dengan daya 15 MW di PLTU Growth Asia,” 2015. [online]. Available: <http://ojs.polmed.ac.id/index.php/sinergi/index>
- [6] e. Koswara, e. Dewi Jannati, a. Rachmat, a. Fudholi, and a. Zauhari, “pengaruh variasi sudut nozzle dan jumlah sudu terhadap kinerja turbin Pelton,” *J-ensitec*, vol. 11, no. 01, pp. 10147–10151, Dec. 2024, doi: 10.31949/jensitec.v11i01.11912.
- [7] e. Pengaruh variasi jumlah sudu berpenampang segitiga terhadap daya dan efisiensi turbin Pelton, m. Riko Juliano, and p. Heru Adiwibowo, “studi eksperimental pengaruh variasi jumlah sudu berpenampang segitiga terhadap daya dan efisiensi turbin Pelton.”
- [8] k. A. Syahrul and m. A. Sahbana, “pengaruh jenis sudu terhadap daya dan efisiensi turbin air kinetik poros horizontal,” 2018.
- [9] j. Vokasi Teknik, a. Laju perpindahan kalor pada alat penukar panas kondensor, and e. Pardede, “attribution-sharealike 4.0 international some rights reserved teknik mesin,” doi: 10.12345/xxxxx.
- [10] a. Budiman Sri Endah Susilowati, “rancang bangun prototipe pembangkit listrik tenaga uap dengan turbin impuls diameter 70 cm,” 2023.
- [11] 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,” [online]. Available: <http://journal2.um.ac.id/index.php/jtmp>
- [12] “analisis pengaruh jumlah sudu terhadap efisiensi turbin Pelton dengan tekanan konstan”.
- [13] 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: xxx.
- [14] 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.
- [15] a. Yani, r. Erianto, j. Teknik, m. Fakultas, t. Universitas, and t. Bontang, “pengaruh variasi bentuk sudu terhadap kinerja turbin air kinetik (sebagai alternatif pembangkit listrik daerah pedesaan)”.