



Pengaruh Variasi Sudut *Inlet Nozzle* terhadap Performa Turbin Tesla pada Analisis Eksperimen, Teoritis, dan Simulasi CFD

Danur Riswanto

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Brebes, Indonesia

*Penulis Korespondensi: danurriswanto@ums.ac.id

Abstract. The bladeless Tesla turbine, which converts fluid momentum into rotary motion through viscous boundary-layer interaction with smooth parallel discs, has attracted renewed interest for micro-scale renewable energy applications. Despite this promise, optimizing the inlet nozzle geometry remains crucial to enhancing turbine performance under limited pressure and flow conditions. This study investigates the effect of varying nozzle inlet angles (10°, 20°, and 30°) on the performance of a Tesla turbine with a 19-disc rotor (95 mm diameter, 1.28 mm thickness, 0.6 mm spacing) operating with water at 5 PSI and a maximum flow rate of 4 LPM. A tri-method approach was adopted, combining physical experiments, analytical calculations based on rotational dynamics, and Computational Fluid Dynamics simulation using SolidWorks Flow Simulation. Results consistently demonstrate that the smallest nozzle angle (10°) delivers the highest performance: experimental efficiency of 0.147% and power of 0.140 Watt; theoretical efficiency of 0.23% and power of 0.34 Watt; and CFD-simulated efficiency of 0.340% and power of 0.748 Watt, with an average torque of 0.252 Nm. The findings confirm that a smaller nozzle angle extends the boundary-layer growth along the disc surface, thereby enhancing momentum transfer efficiency. This research provides a validated methodology for nozzle optimization applicable to pico-hydro renewable energy systems.

Keywords: Bladeless Turbine; Boundary Layer; Nozzle Inlet Angle; Renewable Energy; Tesla Turbine.

Abstrak. Turbin Tesla tanpa sudu, yang mengubah momentum fluida menjadi gerak rotasi melalui interaksi lapisan batas viskos dengan cakram halus paralel, menarik minat baru untuk aplikasi energi terbarukan skala mikro. Meskipun menjanjikan, optimalisasi geometri *nozzle inlet* tetap krusial untuk meningkatkan performa turbin pada kondisi tekanan dan aliran terbatas. Penelitian ini mengkaji pengaruh variasi sudut *nozzle inlet* (10°, 20°, dan 30°) terhadap performa turbin Tesla dengan rotor 19 cakram (diameter 95 mm, ketebalan 1,28 mm, spasi 0,6 mm) menggunakan fluida kerja air pada tekanan 5 PSI dan laju aliran maksimum 4 LPM. Pendekatan dengan 3 metode diterapkan secara terintegrasi yang mencakup eksperimen fisik, perhitungan analitis berbasis dinamika rotasi, dan simulasi *Computational Fluid Dynamics* menggunakan *SolidWorks Flow Simulation*. Hasil secara konsisten menunjukkan bahwa sudut *nozzle* terkecil (10°) menghasilkan performa terbaik, efisiensi eksperimen 0,147% dan daya 0,140 Watt, efisiensi teoritis 0,23% dan daya 0,34 Watt, serta efisiensi simulasi 0,340% dan daya 0,748 Watt dengan torsi rata-rata 0,252 Nm. Temuan ini mengonfirmasi bahwa sudut *nozzle* yang lebih kecil memperluas pertumbuhan lapisan batas di permukaan cakram sehingga meningkatkan efisiensi transfer momentum. Penelitian ini memberikan kontribusi berupa metodologi tervalidasi untuk optimasi *nozzle* yang dapat diaplikasikan pada sistem energi terbarukan *pico-hydro*.

Kata kunci: Energi Terbarukan; Lapisan Batas; Sudut Masuk Nosel; Tesla Turbin; Turbin Tanpa Bilah.

1. LATAR BELAKANG

Krisis energi global dan meningkatnya kebutuhan akan transisi menuju energi bersih memicu pencarian teknologi konversi energi yang efisien, murah, dan berkelanjutan (Erinofiardi et al., 2017). Indonesia sebagai negara kepulauan dengan kekayaan sumber daya air yang melimpah, terutama pada sungai-sungai kecil, irigasi, dan air terjun di pedesaan, memiliki peluang besar untuk mengembangkan pembangkitan listrik skala kecil berbasis sumber air (Hakim et al., 2020). Namun, tantangan muncul ketika turbin air konvensional berskala kecil menunjukkan efisiensi yang menurun drastis dengan menyusutnya dimensi rotor sehingga biaya produksi per watt menjadi tidak ekonomis (Deam et al., 2008). Pada skala kecil

inilah teknologi *bladeless turbine* berpotensi mengisi celah yang belum terlayani oleh turbin bersudu.

Turbin Tesla, yang dipatenkan oleh Nikola Tesla pada tahun 1913, merupakan mesin *rotary* tanpa sudu yang bekerja berdasarkan prinsip *boundary layer effect*, yaitu transfer momentum antara fluida viskos dan permukaan cakram halus melalui gaya geser dan adhesi (Raje et al., 2015). Berbeda dengan turbin konvensional yang mengandalkan impuls atau reaksi pada sudu, turbin Tesla mengandalkan *inter Newtonian* yang dimediasi oleh lapisan batas, menjadikannya unggul pada aplikasi *small-shaft power*, fluida kental, fluida *non-Newtonian*, dan sistem energi terdistribusi (Capata & Calabria, 2026). Lebih jauh, konsep *bladeless* mengeliminasi risiko kegagalan sudu akibat kelelahan material, erosi, dan getaran pada putaran tinggi sehingga menjanjikan keandalan operasional jangka panjang (Talluri et al., 2018).

Studi terkini menunjukkan bahwa performa turbin Tesla bergantung pada beberapa parameter kritis, antara lain jumlah cakram, spasi antar cakram, diameter cakram, dan geometri *nozzle inlet* (Thomazoni et al., 2022). *Disk spacing* menjadi salah satu faktor paling dominan, dengan eksperimen terbaru menunjukkan rentang efisiensi 32%-70% pada spasi optimal 0,9 mm dengan cakram berdiameter 150 mm yang dicetak menggunakan 3D printing (Yadav et al., 2025). Pada sisi *inlet*, desain *nozzle* menentukan arah dan karakteristik aliran fluida yang memasuki celah antar cakram sehingga secara langsung memengaruhi proses transfer momentum dan pengembangan lapisan batas (Halim, et al., 2021). Karakteristik *nozzle* menjadi semakin menentukan mengingat kompleksitas dinamika fluida di celah antar cakram yang dibentuk oleh kombinasi kecepatan tangensial, kecepatan radial, dan interaksi dengan dinding casing (Qi et al., 2023).

Berbagai penelitian terbaru telah mengkaji pengaruh desain *nozzle* terhadap performa turbin Tesla. Kajian *convergent-divergent nozzle* menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada ekspander mikro berskala 200 W sampai 3 kW menunjukkan bahwa pemilihan profil *nozzle* secara langsung mengendalikan *losses* dan karakteristik *output* (Renuke et al., 2019). Studi lain menguji empat desain *nozzle* berbeda menggunakan *CATIA* dan *SolidWorks Flow Simulation* untuk menentukan geometri paling efisien, di mana desain keempat menghasilkan putaran tertinggi 7.940 RPM dan tegangan 13,56 V (Halim, et al., 2021). Pada eksperimen Tesla ekspander, ditemukan bahwa tekanan inlet 90 Psi masih dapat diterima oleh rotor empat cakram, namun pada tekanan lebih tinggi muncul ketidakstabilan karena ketidakseimbangan *shaft* dan transisi laminar ke turbulen, sehingga disarankan membatasi tekanan operasional (Bhattacharyya et al., 2015).

Meskipun capaian tersebut menggembirakan, masih terdapat celah penelitian yang perlu diisi. Sebagian besar studi *nozzle* terdahulu berfokus pada perubahan jumlah, jenis konvergen/divergen, atau diameter *nozzle*, sementara pengaruh variasi sudut inlet *nozzle* secara sistematis dengan pendekatan multimetode yang triangulasi masih terbatas dieksplorasi (Traum et al., 2017). Di sisi lain, perbandingan antara hasil eksperimen, teoritis, dan CFD untuk kasus *nozzle* sudut yang sama masih jarang dilaporkan sehingga validitas komparatif menjadi lemah dan sulit menarik kesimpulan yang robust (Thomazoni et al., 2022). Permasalahan ini menjadi semakin penting karena pada aplikasi *pico-hydro* dengan debit rendah dan tekanan terbatas, pengaruh sudut *nozzle* terhadap performa menjadi sangat sensitif sehingga pemahaman multimetode menjadi kebutuhan mendasar (Qi et al., 2023).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh variasi sudut inlet *nozzle* (10° , 20° , dan 30°) terhadap performa turbin Tesla melalui pendekatan terintegrasi tiga metode, yaitu eksperimen fisik, perhitungan teoritis berbasis dinamika rotasi dan teori lapisan batas, serta simulasi CFD dengan *SolidWorks Flow Simulation*. Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan akan metode optimasi *nozzle* yang tervalidasi secara multimode untuk aplikasi turbin Tesla pada sistem *pico-hydro* di Indonesia.

2. KAJIAN TEORITIS

Prinsip Kerja Turbin Tesla

Turbin Tesla terdiri atas serangkaian cakram paralel yang terpasang pada poros dan dikelilingi oleh casing (Raje et al., 2015). Fluida kerja masuk secara tangensial melalui *nozzle*, bergerak di celah antarcakram dengan lintasan spiral sentripetal, lalu keluar secara aksial pada radius dalam (Talluri et al., 2018). Energi kinetik fluida ditransfer ke cakram melalui gaya viskos dan adhesi yang dimediasi oleh lapisan batas yang terbentuk pada permukaan halus cakram (Capata & Calabria, 2026). Prinsip kerja *Newtonian* viskos ini menjadikan turbin Tesla sebagai *friction turbine* yang berbeda secara fundamental dari *impulse turbine* maupun *reaction turbine* konvensional (Variava & Bhavsar, 2017).

Konsep fundamental yang diperkenalkan oleh Rice pada tahun 1965 menjadi pijakan analitis, dengan temuan bahwa turbin berskala kecil pada laju aliran rendah mencapai efisiensi terbaik, berbeda dengan tren konvensional yang menunjukkan penurunan efisiensi saat *downscaling* (Talluri et al., 2018). Penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa efisiensi tertinggi turbin viskos justru diperoleh pada skala milimeter karena *conventional scaling laws* kehilangan validitasnya pada *regime viskos-dominated* (Deam et al., 2008). Hal ini menjadikan

turbin Tesla sangat relevan untuk aplikasi *microscale* seperti *MEMS devices* dan *microfluidic systems* (Capata & Calabria, 2026).

Untuk fluida dengan viskositas dinamis μ dan rapat massa ρ , gaya tangensial yang bekerja pada cakram diakibatkan oleh gradien kecepatan dalam lapisan batas yang diselesaikan dari persamaan *Navier-Stokes* dalam koordinat silinder (Onanuga et al., 2020). Persamaan umum yang digunakan adalah hubungan daya, torsi, dan kecepatan sudut:

$$P = \tau \cdot \omega \dots\dots\dots (i)$$

Di mana P adalah daya output, τ adalah torsi, dan ω adalah kecepatan sudut (rad/s).

Pengaruh Geometri dan Sudut Nozzle

Geometri *nozzle inlet* menentukan distribusi kecepatan dan arah aliran fluida pada saat masuk ke celah antar-cakram. Persamaan kontinuitas untuk *nozzle rectangular* adalah:

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot (w \cdot h) \dots\dots\dots (ii)$$

Di mana $\dot{m}$ adalah laju aliran massa, ρ adalah rapat massa fluida, v adalah kecepatan aksial, w adalah lebar *nozzle*, dan h adalah tinggi *nozzle* (Talluri et al., 2018). Pada *nozzle* subsonik, reduksi luas penampang menghasilkan *favorable pressure gradient* yang mempercepat fluida tanpa separasi dinding, sehingga efisiensi *nozzle* dapat melebihi 96% (Talluri et al., 2018).

Studi perbandingan *convergent* dan *convergent-divergent nozzle* menunjukkan bahwa pemilihan jenis *nozzle* secara signifikan memengaruhi distribusi tekanan, kecepatan tangensial, dan *losses* pada turbin (Renuke et al., 2019). Untuk ukuran *nozzle* kecil dengan *throat width* kurang dari 3 mm, lapisan batas dapat menempati bagian signifikan dari luas penampang sehingga efisiensi *nozzle* menurun (Talluri et al., 2018). Pada penelitian ini, variasi sudut *inlet nozzle* dieksplorasi sebagai parameter desain tambahan yang sebelumnya kurang dikaji secara sistematis dalam konteks multimode.

Boundary Layer Effect dan Momentum Transfer

Boundary layer pada permukaan cakram terbentuk akibat interaksi antara fluida viskos dan permukaan padat yang bergerak relatif terhadap fluida. Ketebalan lapisan batas δ berbanding lurus dengan $\sqrt{\nu/U_r}$, di mana ν adalah viskositas kinematik dan U_r adalah kecepatan relatif fluida terhadap cakram (Bhattacharyya et al., 2015). Pada turbin Tesla, *boundary layer effect* menjadi fondasi kerja mesin dan bukan sebagai fenomena merugikan seperti pada sayap pesawat, melainkan sebagai mekanisme transfer energi utama (Capata & Calabria, 2026).

Studi interaksi *inlet-rotor* menunjukkan bahwa jumlah *nozzle*, kecepatan putar, dan celah radial antara *rotor* dan *shroud* secara signifikan memengaruhi dinamika fluida dan performa turbin (Sengupta & Guha, 2018). Kecepatan putar secara langsung menentukan profil kecepatan radial, termasuk bentuk fundamental *Z-profile* yang dapat berupa parabolik, datar, atau *W-shaped* tergantung pada kondisi operasi (Sengupta & Guha, 2018). Faktor dominan pengembangan lapisan batas juga dipengaruhi oleh tekanan dan laju aliran massa pada internal turbin, sehingga pada sudut *nozzle* kecil, konstruksi geometris mempertahankan transfer momentum antara fluida dan cakram secara lebih ideal (Halim, et al., Analysis on Inlet Nozzle Design Geometry of Tesla Turbine, 2021).

Kajian CFD dan Triangulasi Metode pada Turbin Tesla

Simulasi CFD telah menjadi alat penting untuk menganalisis dinamika fluida pada turbin Tesla tanpa biaya fabrikasi berulang (Renuke et al., 2019). Pendekatan multimode yang menggabungkan eksperimen, teori, dan CFD memberikan validasi silang yang lebih kuat dibandingkan dengan studi tunggal (Thomazoni et al., 2022). *Systematic literature review* menunjukkan bahwa simulasi umumnya melaporkan efisiensi 40%-60%, sementara eksperimen maksimum mencapai 20% (Thomazoni et al., 2022), sehingga diperlukan kehati-hatian dalam interpretasi hasil numerik.

Studi CFD terbaru menggunakan *k-kl-omega turbulence model* menangkap dinamika transisi laminar ke turbulen dengan akurat sehingga mampu memprediksi kecepatan tangensial yang lebih mendekati data eksperimen (Talluri et al., 2018). Pada konvergensi *mesh*, analisis sensitivitas menunjukkan bahwa minimal 800.000 *nodes* diperlukan untuk memastikan *grid independence* (Talluri et al., 2018).

Konteks Aplikasi Pico-Hydro dan Energi Terbarukan

Indonesia memiliki potensi hidro yang tersebar luas di Sumatera, Sulawesi, Kalimantan, dan Papua, dengan sungai-sungai kecil, irigasi, dan air terjun pedesaan menjadi sumber *pico-hydro* yang belum dimanfaatkan secara optimal (Erinofiardi et al., 2017). Teknologi turbin mikro yang mampu beroperasi pada tekanan dan debit rendah menjadi kebutuhan spesifik untuk wilayah dengan karakteristik hidrolik terbatas (Sivaramakrishnaiah, et al., 2023). Turbin Tesla dengan kemampuan beroperasi pada fluida *non-Newtonian* dan tekanan rendah memiliki potensi besar untuk diaplikasikan sebagai komponen utama instalasi *pico-hydro* di Indonesia (Erinofiardi et al., 2017).

Studi terbaru juga menunjukkan bahwa turbin mikro Tesla dengan dimensi semakin kecil justru menunjukkan performa aerodinamis lebih baik karena berkurangnya *casing wall effect* pada *inner disc channel* (Qi et al., 2023). Fenomena ini semakin memperkuat potensi turbin

Tesla untuk aplikasi energi terdistribusi skala kecil yang menjadi kebutuhan mendesak di negara berkembang dengan sumber energi terbarukan lokal (Erinofiardi et al., 2017).

Hipotesis Penelitian

Berdasarkan kajian teoritis dan studi terdahulu, hipotesis dalam penelitian ini menyatakan bahwa sudut *inlet nozzle* berbanding terbalik dengan performa turbin. Semakin kecil sudut *nozzle* maka efek lapisan batas semakin optimal sehingga performa turbin dalam hal daya dan efisiensi akan semakin tinggi ketika putaran juga meningkat.

3. METODE PENELITIAN

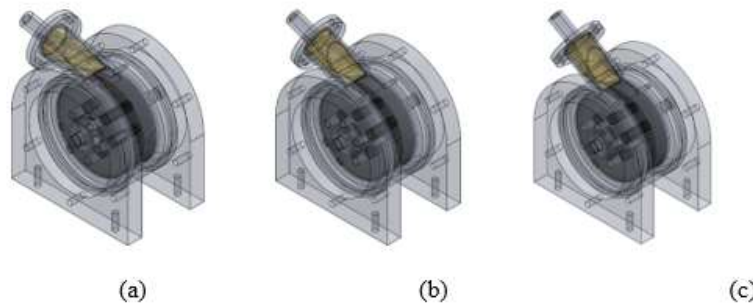
Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan rancangan eksperimental-komparatif dengan tiga pendekatan terintegrasi, yaitu eksperimen fisik, perhitungan analitis, dan simulasi CFD menggunakan *SolidWorks Flow Simulation* (Halim, et al., 2021). Pendekatan ini memungkinkan *cross-validation* hasil dan identifikasi deviasi sistematis antarmetode (Thomazoni et al., 2022). Perangkat lunak berbasis CFD dipilih karena terbukti mampu memprediksi tren performa turbin dengan deviasi rendah terhadap eksperimen (Halim, et al., 2021).

Spesifikasi Turbin dan Variabel Penelitian

Turbin Tesla yang digunakan pada penelitian ini memiliki spesifikasi tetap berupa 19 cakram aktif dengan diameter 95 mm, ketebalan 1,28 mm, dan spasi antar cakram 0,6 mm. Konfigurasi ini didasarkan pada kajian terkini yang menunjukkan bahwa densitas cakram tinggi pada spasi kecil menghasilkan performa optimal, dengan eksperimen *3D-printed* menghasilkan efisiensi 32%–70% pada spasi 0,9 mm (Yadav et al., 2025). Fluida kerja adalah air dengan tekanan kerja 5 PSI dan laju aliran maksimum 4 LPM.

Variabel bebas pada penelitian ini terdiri atas sudut *inlet nozzle* dengan tiga variasi, yaitu 10°, 20°, dan 30°. Variabel terikat meliputi torsi, kecepatan putar poros, daya turbin, dan efisiensi turbin. Pemilihan rentang sudut 10°–30° didasarkan pada kajian *nozzle* yang menyebutkan bahwa sudut kecil menghasilkan konstruksi ideal untuk mempertahankan transfer momentum (Halim, et al., 2021).



Gambar 1. Konfigurasi sudut *nozzle*: (a) 10° , (b) 20° dan (c) 30° .

Prosedur Eksperimen

Eksperimen dilakukan menggunakan rig uji yang terdiri atas pompa air dengan kapasitas maksimum 4 LPM, *pressure gauge*, valve pengatur tekanan, dan turbin Tesla *prototype* yang diproduksi dengan metode *rapid prototyping* (Yadav et al., 2025). Prosedur pengujian dimulai dengan pemeriksaan debit air, kondisi *hose* penghubung, kondisi katup turbin, dan kondisi poros sebelum pengujian dimulai. Setelah penyesuaian sisi hisap pompa agar tidak lebih tinggi dari level fluida, dilakukan monitoring aliran pada tekanan 5 PSI.

Setelah aliran air konstan, pengukuran putaran poros turbin dilakukan menggunakan *Hand Tachometer* dengan akurasi $\pm 0,05\%$ pada rentang 2,5-99.999 RPM. Setiap pengujian pada masing-masing variasi sudut *nozzle* diulang tiga kali untuk menjamin akurasi data. Pengujian pertama dilakukan untuk sudut 10° , kemudian 20° , dan 30° , dengan prosedur identik. Data yang dicatat berupa RPM poros turbin, yang selanjutnya digunakan untuk menghitung kapasitas, torsi, daya, dan efisiensi secara teoritis.

Prosedur Simulasi CFD

Simulasi CFD dilakukan menggunakan *SolidWorks Flow Simulation* untuk masing-masing model sudut inlet *nozzle* (Halim, et al., 2021). Langkah-langkah simulasi mencakup: pembuatan geometri 3D turbin pada software CAD, penentuan *rotating region* pada *rotor pack* dengan kecepatan sudut yang sesuai, penentuan *boundary condition* pada *inlet nozzle* berupa *inlet velocity normal to face*, penentuan *pressure opening* pada *outlet* dengan *environment pressure*, serta *running solver* hingga konvergen (Halim, et al., 2021).

Perhitungan Teoritis

Perhitungan analitis dilakukan menggunakan persamaan dinamika rotasi turbin dengan memasukkan parameter operasional seperti tekanan kerja, laju aliran, dan kecepatan sudut. Daya turbin dihitung dari produk torsi dan kecepatan sudut, sedangkan efisiensi dihitung sebagai rasio antara daya *output* dengan energi kinetik fluida masuk (Talluri et al., 2018). Pendekatan ini mengikuti model yang banyak digunakan dalam literatur turbin Tesla untuk

memberikan *baseline* perhitungan sebelum divalidasi dengan eksperimen dan simulasi (Thomazoni et al., 2022).

Diagram Alir Penelitian



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian.

Tahapan penelitian dimulai dari pemodelan geometri dan produksi turbin, dilanjutkan pelaksanaan eksperimen dan simulasi secara paralel, pengambilan data RPM pada kedua metode, pengolahan data, hingga perbandingan hasil ketiga metode dan penarikan kesimpulan. Evaluasi kelayakan data dilakukan dengan membandingkan hasil ketiga metode untuk memastikan konsistensi tren.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Konstruksi dan Operasional Turbin

Turbin dirancang secara fleksibel untuk memungkinkan pergantian variasi *nozzle* tanpa perlu memproduksi ulang seluruh komponen (Yadav et al., 2025). Konstruksi turbin dengan diameter cakram 95 mm dipilih karena memberikan keseimbangan optimal antara luas permukaan transfer momentum dan karakteristik mekanis rotor, di mana diameter yang lebih kecil cenderung meningkatkan efisiensi karena berkurangnya *losses* pada *outer disc channel* (Qi et al., 2023). Penggunaan *rapid prototyping* memungkinkan fabrikasi geometri *nozzle*

dengan variasi sudut secara presisi dan ekonomis tanpa membutuhkan *moulding* yang mahal (Yadav et al., 2025).

Hasil pengujian eksperimental menunjukkan hubungan terbalik antara sudut *nozzle* dan kecepatan putaran. Semakin kecil sudut *nozzle*, semakin tinggi kecepatan sudut yang dihasilkan, diikuti dengan peningkatan torsi dan daya. Karakteristik ini konsisten dengan temuan bahwa *nozzle* dengan area *outlet* terkecil menghasilkan RPM tertinggi pada berbagai variasi kecepatan inlet (Halim, et al., 2021). Pada tekanan kerja 5 PSI dan debit 4 LPM, fluida kerja memiliki bilangan *Reynolds* yang menempatkan dinamika lapisan batas pada *regime* transisi laminar-turbulen, serupa dengan kondisi operasional ekspander mikro pada umumnya (Renuke et al., 2019).

Hasil Simulasi CFD

Simulasi CFD pada masing-masing model sudut *nozzle* menghasilkan data rata-rata yang konsisten. Tabel 1 menyajikan ringkasan hasil simulasi untuk parameter torsi, efisiensi, dan daya pada tiga variasi sudut *nozzle*.

Tabel 1. Data Hasil Simulasi CFD pada Variasi Sudut *Nozzle*.

Sudut Nozzle	Torsi (Nm)	Efisiensi (%)	Daya (Watt)
10°	0,252	0,340	0,748
20°	0,147	0,198	0,254
30°	0,080	0,112	0,080

Pada sudut *nozzle* 10°, diperoleh torsi rata-rata 0,2518631 Nm, efisiensi 0,3401580%, dan daya 0,7479276 Watt. Konstruksi *nozzle* dengan sudut 10° paling ideal dalam mempertahankan transfer momentum antara fluida dan cakram sehingga lapisan batas tumbuh optimal di sepanjang permukaan cakram (Halim, et al., 2021). Hal ini sesuai dengan temuan bahwa geometri *nozzle inlet* menjadi salah satu faktor paling dominan yang menentukan *losses* dan performa turbin pada ekspander mikro (Traum et al., 2017).

Data Perbandingan Tiga Metode

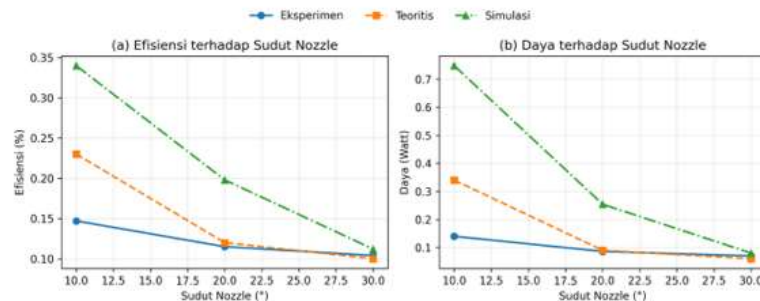
Perbandingan hasil ketiga metode memberikan gambaran validitas dan konsistensi masing-masing pendekatan. Tabel 2 menyajikan matriks perbandingan daya dan efisiensi antarmetode pada seluruh variasi sudut *nozzle*.

Tabel 2. Matriks Perbandingan Daya dan Efisiensi Karakteristik.

Sudut	Efisiensi (%)			Daya (Watt)		
	Eksperimen	Teoritis	Simulasi	Eksperimen	Teoritis	Simulasi
10°	0,147	0,23	0,340	0,140	0,34	0,748
20°	0,115	0,12	0,198	0,086	0,09	0,254
30°	0,104	0,10	0,112	0,070	0,06	0,080

Pembahasan Hubungan Sudut dan Efisiensi

Gambar 3a menampilkan hubungan antara sudut *nozzle* dan efisiensi dari ketiga metode. Pada sudut 10°, efisiensi eksperimen tercatat 0,147%, teoritis 0,23%, dan simulasi 0,340%. Sepanjang variasi sudut 10° hingga 30°, efisiensi secara konsisten menurun dari semua metode.



Gambar 3. Perbandingan hasil eksperimen, teoritis, dan simulasi terhadap variasi sudut nozzle: (a) efisiensi dan (b) daya keluaran.

Tren penurunan efisiensi seiring bertambahnya sudut *nozzle* menunjukkan bahwa semakin besar sudut *inlet*, semakin berkurang kemampuan konstruksi *nozzle* untuk mempertahankan transfer momentum sehingga lapisan batas tidak tumbuh optimal di sepanjang permukaan cakram (Halim, et al., 2021). Konsistensi tren ini juga dilaporkan pada studi *nozzle* lain yang menemukan bahwa efisiensi *nozzle* menurun seiring meningkatnya kecepatan *inlet* (Halim, et al., 2021).

Efisiensi eksperimen yang rendah (0,104%-0,147%) mencerminkan karakteristik *inherent* turbin Tesla berskala kecil dengan fluida air pada tekanan rendah. Angka ini berada dalam rentang studi eksperimen terkini lainnya yang melaporkan efisiensi turbin Tesla eksperimen maksimum 14,2% pada skala lebih besar dan tekanan 3 barg (Thomazoni et al., 2022), atau 32%-70% pada prototipe *3D-printed* dengan spasi 0,9 mm dan tekanan 2-4 kg/cm² (Yadav et al., 2025). Perbedaan kuantitatif disebabkan oleh variasi dimensi rotor, spasi cakram, tekanan kerja, geometri *nozzle*, dan jenis fluida kerja (Thomazoni et al., 2022).

Pembahasan Hubungan Sudut dan Daya

Gambar 3b menampilkan hubungan antara sudut *nozzle* dan daya dari ketiga metode. Daya tertinggi secara konsisten dicapai pada sudut 10° dengan nilai eksperimen 0,140 Watt, teoritis 0,34 Watt, dan simulasi 0,748 Watt. Pada sudut 20°, daya eksperimen turun menjadi 0,086 Watt, dan pada sudut 30° turun lagi menjadi 0,070 Watt. Tren serupa ditunjukkan oleh hasil teoritis dan simulasi.

Analisis kuantitatif menunjukkan keterkaitan antara sudut *nozzle*, kecepatan cakram (U), kecepatan sudut (ω), dan efisiensi. Sudut *nozzle* memengaruhi kecepatan putar karena *nozzle*

dengan sudut kecil mempertahankan komponen tangensial aliran yang lebih besar, kecepatan putar terkait dengan kecepatan cakram, dan kecepatan cakram berbanding lurus dengan kecepatan sudut. Pada sudut kecil, kecepatan sudut meningkat sehingga dihasilkan efisiensi dan daya yang lebih tinggi secara simultan (Sengupta & Guha, 2018).

Interpretasi Terhadap Fenomena *Boundary Layer*

Tren peningkatan performa pada sudut *nozzle* kecil sesuai dengan hipotesis penelitian dan secara fisik dijelaskan oleh perilaku *boundary layer* sepanjang permukaan cakram. Pada sudut 10° , fluida memiliki komponen tangensial yang lebih dominan sehingga gaya geser viskos bekerja efektif pada cakram, menghasilkan transfer momentum optimal dan pertumbuhan lapisan batas yang terkontrol (Talluri et al., 2018).

Studi tentang interaksi *inlet-rotor* pada turbin Tesla memberikan penjelasan lebih lanjut bahwa *rotational speed* (Ω) secara signifikan memengaruhi distribusi kecepatan radial termasuk *z-Profile* (Sengupta & Guha, 2018). Pada sudut *nozzle* kecil dengan kecepatan putar lebih tinggi, profil kecepatan mendekati kondisi parabolik yang ideal untuk transfer momentum. Pada sudut *nozzle* besar, peristiwa separasi dan *vortex* muncul pada celah antar cakram, mengurangi efektivitas transfer momentum dan menurunkan performa (Talluri et al., 2018). Kondisi transisi laminar-turbulen yang ditemukan pada tekanan operasional tertentu juga dapat memengaruhi stabilitas performa sehingga perlu perhatian khusus dalam desain *nozzle* untuk menghindari perubahan *regime* yang mendadak (Traum et al., 2017).

Validasi Silang Antar Metode

Tampak dengan jelas bahwa hasil simulasi CFD memberikan nilai daya dan efisiensi yang lebih tinggi dibanding eksperimen dan teoritis. Selisih ini terutama disebabkan oleh perbedaan idealisasi dan *losses* yang diperhitungkan oleh masing-masing metode:

Tabel 3. Sumber Deviasi dan Faktor Idealisasi pada Masing-masing Metode.

Metode	Asumsi Ideal	Sumber Losses Aktual
Eksperimen	–	Losses mekanis penuh, kebocoran, ketidakseimbangan
Teoritis	Distribusi kecepatan sederhana	Losses gesekan, dinding casing
CFD	Tanpa kebocoran, tanpa gesekan bearing	Model turbulensi, kualitas mesh

Idealisasi pada CFD menyebabkan hasil simulasi lebih optimis karena tidak memperhitungkan gesekan *bearing* dan *losses* mekanis aktual (Thomazoni et al., 2022). Perhitungan teoritis menggunakan asumsi sederhana tentang distribusi kecepatan sehingga kurang akurat dalam menangkap dinamika lapisan batas kompleks (Talluri et al., 2018). Pengukuran eksperimen paling mendekati kinerja aktual karena memperhitungkan seluruh *losses* mekanis aktual dan operasional sistem yang nyata (Thomazoni et al., 2022).

Meskipun terdapat perbedaan kuantitatif, ketiga metode menunjukkan tren yang konsisten, yaitu performa tertinggi pada sudut 10° dan menurun seiring bertambahnya sudut. Konsistensi tren ini menjadi bukti validitas metodologi dan keandalan hasil (Thomazoni et al., 2022). Perbandingan ini menunjukkan bahwa hasil eksperimen dan simulasi sepakat dalam menunjukkan pola perilaku yang sama walaupun terdapat perbedaan nilai absolut (Thomazoni et al., 2022). Pendekatan triangulasi multimode ini memberikan *confidence* yang lebih tinggi dibandingkan dengan studi yang hanya mengandalkan satu metode numerik atau eksperimental saja.

Implikasi Teoritis dan Terapan

Temuan penelitian ini memiliki implikasi teoritis berupa konfirmasi bahwa desain sudut *nozzle inlet* merupakan variabel kritis yang menentukan performa turbin Tesla, dengan sudut kecil (10°) menjadi rekomendasi desain awal untuk aplikasi tertentu. Hasil ini memperluas pemahaman tentang peran *nozzle* pada turbin Tesla di mana selama ini lebih banyak ditekankan pada jumlah, jenis *convergent/divergent*, atau dimensi *outlet* (Renuke et al., 2019).

Secara terapan, hasil ini dapat diaplikasikan pada desain sistem *pico-hydro* di Indonesia yang memiliki karakteristik debit rendah dan tekanan terbatas, sehingga dibutuhkan turbin yang mampu beroperasi secara efisien pada kondisi hidraulik spesifik (Erinofiardi et al., 2017). Optimalisasi sudut *nozzle* menjadi cara sederhana dan murah untuk meningkatkan performa tanpa memerlukan perubahan besar pada dimensi rotor atau jumlah cakram (Yadav et al., 2025). Teknologi *3D printing* sebagai metode produksi semakin mendukung fleksibilitas desain *nozzle* untuk aplikasi energi terbarukan skala kecil (Yadav et al., 2025).

Namun, efisiensi absolut yang dihasilkan masih rendah sehingga belum kompetitif untuk aplikasi skala besar. Inovasi *nozzle* dengan profil melengkung khusus, penambahan jumlah *nozzle*, atau kombinasi dengan *multi-stage configuration* menjadi arah pengembangan potensial (Renuke et al., 2019). Pendekatan CFD lanjutan dengan model turbulensi transisi k- ω mampu menangkap dinamika lapisan batas secara lebih akurat dan memberikan prediksi yang lebih mendekati eksperimen (Talluri et al., 2018). Studi terbaru juga menunjukkan bahwa miniaturisasi turbin justru meningkatkan performa aerodinamisnya pada *regime* viskos (Qi et al., 2023), sehingga strategi *scale-down* menjadi alternatif masa depan untuk peningkatan efisiensi.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa variasi sudut *inlet nozzle* secara signifikan memengaruhi performa turbin Tesla dengan rancangan rotor 19 cakram, diameter 95 mm, dan fluida kerja air pada tekanan 5 PSI. Perbandingan tiga metode, yaitu eksperimen, teoritis, dan simulasi CFD, secara konsisten menunjukkan bahwa sudut *nozzle* 10° menghasilkan performa terbaik, yaitu efisiensi eksperimen 0,147% dan daya 0,140 Watt, efisiensi teoritis 0,23% dan daya 0,34 Watt, serta efisiensi simulasi 0,340% dan daya 0,748 Watt dengan torsi rata-rata 0,252 Nm. Hasil ini mengonfirmasi hipotesis awal bahwa semakin kecil sudut *nozzle* maka semakin optimal performa turbin karena konstruksi *nozzle* pada sudut 10° paling ideal dalam mempertahankan transfer momentum antara fluida dan cakram serta memaksimalkan pertumbuhan lapisan batas sepanjang permukaan cakram. Seiring bertambahnya sudut *nozzle* menjadi 20° dan 30°, baik daya maupun efisiensi menurun secara konsisten pada ketiga metode, dengan selisih kuantitatif yang mencerminkan perbedaan asumsi ideal dan sumber *losses* yang dipertimbangkan oleh masing-masing pendekatan.

Keterbatasan utama penelitian ini meliputi efisiensi absolut yang masih rendah pada tekanan kerja 5 PSI dan debit 4 LPM, terbatasnya variasi sudut *nozzle* hanya pada tiga titik (10°, 20°, 30°), idealisasi pada simulasi CFD yang tidak memperhitungkan *losses* mekanis aktual, serta generalisasi hasil yang hanya berlaku pada konfigurasi *rotor* tertentu dan belum mencakup fluida kerja alternatif. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan variasi tambahan pada sudut *nozzle* di bawah 10° atau di atas 30° guna menentukan sudut optimal secara lebih presisi, menguji konfigurasi *multi-nozzle* dengan jumlah *nozzle* lebih dari satu, menerapkan model turbulensi transisi k-kl-omega untuk menangkap dinamika lapisan batas secara lebih akurat, melakukan studi parametrik pada spasi cakram dan diameter cakram yang lebih luas, serta mengintegrasikan hasil optimasi *nozzle* ke dalam prototipe sistem *pico-hydro* untuk uji lapangan langsung di Indonesia dengan karakteristik hidraulik spesifik.

DAFTAR REFERENSI

- Bakogianni, A., Anselmi, E., Rajendran, D. J., Bufalari, L., Talluri, L., Ungar, P., & Fiaschi, D. (2024). Multidisciplinary design and manufacturing of a Tesla pump prototype. *Applied Thermal Engineering*, 255, 123973. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123973>
- Bhattacharyya, S., Haldar, A. G. A., & Saha, S. K. (2015). Design and experiment of rotating fluid flow in a Tesla disc turbine. *Proceedings of the International Conference*, 1(1), 70–74.

- Capata, R., & Calabria, A. (2026). The Tesla turbine—Design, simulations, testing and proposed applications: A technological review. *Eng—Advances in Engineering*, 7(1), 30. <https://doi.org/10.3390/eng7010030>
- Deam, R., Lemma, E., Mace, B. R., & Collins, R. A. (2008). On scaling down turbines to millimeter size. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 130(5). <https://doi.org/10.1115/1.2938516>
- Erinofiardi, Gokhale, P., Date, A., Akbarzadeh, A., Bismantolo, P., Suryono, A. F., Mainil, A. K., & Nuramal, A. (2017). A review on micro hydropower in Indonesia. *Energy Procedia*, 110, 316–321. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.146>
- Hakim, M. L., Yuniarti, N., Sukir, S., & Damarwan, E. S. (2020). Pengaruh debit air terhadap tegangan output pada pembangkit listrik tenaga picohydro. *Jurnal Edukasi Elektro*, 4(1). <https://doi.org/10.21831/jee.v4i1.32607>
- Halim, S., Rahman, M. T. A., Rahman, A. A., Amin, N. A. M., Roslan, N. S., & Ghazali, M. F. (2021). Analysis on inlet nozzle design geometry of Tesla turbine. *Journal of Physics: Conference Series*, 2129(1), 012073. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2129/1/012073>
- Onanuga, O. K., Erusiafe, N., Olopade, M. A., & Chendo, M. A. C. (2020). Experimental and analytical analysis of a bladeless turbine of an incompressible fluid in a confined cylinder. *Results in Engineering*, 6, 100130. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100130>
- Qi, W., Deng, Q., Yuan, S., & Chen, B. (2023). Advantages of the aerodynamic performance of micro-Tesla turbines. *Energy Science & Engineering*, 11(5), 1734–1752. <https://doi.org/10.1002/ese3.1417>
- Raje, A., Singh, B., Churai, R., & Borwankar, P. (2015). A review of Tesla turbine. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*.
- Renuke, A., Traverso, A., & Pascenti, M. (2019). Performance assessment of bladeless micro-expanders using 3D numerical simulation. *E3S Web of Conferences*, 113, 03016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911303016>
- Sengupta, S., & Guha, A. (2018). Inflow-rotor interaction in Tesla disc turbines: Effects of discrete inflows, finite disc thickness, and radial clearance on the fluid dynamics and performance of the turbine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 232(8), 971–991. <https://doi.org/10.1177/0957650918764156>
- Sivaramakrishnaiah, M., Nasan, D. S., Sharma, P., Le, T. T., Tran, M. H., Nguyen, T. B. N., Nguyen, P. Q. P., & Trần, V. D. (2023). Numerical and experimental investigations on a bladeless turbine: Tesla's cohesion-type innovation. *International Journal of Renewable Energy Development*, 13(1), 110–121. <https://doi.org/10.14710/ijred.2024.55455>
- Sivaramakrishnaiah, M., Reddy, R. M., Reddy, A. D., Ravitheja, A., Paramasivam, P., Yusuf, M., & Kanti, P. K. (2025). Numerical analysis of energy dynamics in a bladeless turbine nozzle. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 20, 1383–1391. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaf093>
- Talluri, L., Fiaschi, D., Neri, G. C., & Ciappi, L. (2018). Design and optimization of a Tesla turbine for ORC applications. *Applied Energy*, 226, 300–319. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.057>

- Thomazoni, A. L. R., Ermel, C., Schneider, P. S., Vieira, L. W., Hunt, J. D., Ferreira, S. B., Rech, C., & Gouvêa, V. S. (2022). Influence of operational parameters on the performance of Tesla turbines: Experimental investigation of a small-scale turbine. *Energy*, 261, 125159. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125159>
- Traum, M. J., Hadi, F., & Akbar, M. (2017). Extending “Assessment of Tesla Turbine Performance” model for sensitivity-focused experimental design. *Journal of Energy Resources Technology*, 140(3). <https://doi.org/10.1115/1.4037967>
- Umar, H., Kashogi, T. M., Sofyan, S. E., Thaib, R., & Akram. (2022). CFD simulation of Tesla turbines performance driven by flue gas of internal combustion engine. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, 98(1), 1–11. <https://doi.org/10.37934/aram.98.1.111>
- Variava, J. M., & Bhavsar, A. S. (2017). Evaluation of Tesla turbo machine as turbine. *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, 3(2), 3670–3682.
[https://ijariie.com/AdminUploadPdf/"EVALUATION_OF_TESLA_TURBO_MACHINE_AS_TURBINE"_ijariie4690.pdf](https://ijariie.com/AdminUploadPdf/)
- Yadav, G. P. K., Bandhu, D., Saxena, K. K., Chatterjee, S., Brabazon, D., & Chandrashekhar, R. (2025). Experimental study on the performance of a 3D-printed model of a Tesla turbine. *Results in Engineering*, 27, 106304. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106304>