

Perancangan Turbin Angin Berskala Kota: Analisis Sudu Savonius Tipe-L untuk Area Perkotaan Berkecepatan Angin Rendah

Sebuah Model Rekayasa SKEA Mikro-Urban Berbasis Kajian Eksperimental, Simulasi Struktur, dan Integrasi Manufaktur Nasional

Disusun oleh:

Muhammad Nazhir Muflih, Hendrawan Adi Laksono, Galih Taufiq Rahman Pamungkas, Anastia, Muhammad Aji Setyonugroho, Ifa Ferdinand Pranidhana, Muhammad Sjahrul Annas*)

Jurusan Teknik Mesin, Universitas Trisakti, Jakarta Barat

Email: sjahrul@trisakti.ac.id

Abstrak— Ketergantungan global pada bahan bakar fosil telah mendorong urgensi transisi energi ke sumber energi terbarukan (EBT). Indonesia berkomitmen mencapai target bauran energi baru terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025. Di area perkotaan (urban), tiupan angin umumnya bersifat fluktuatif dengan kecepatan rendah, berkisar antara 2,0 m/s hingga 4,5 m/s. Kondisi ini kurang menguntungkan bagi turbin angin sumbu horizontal (HAWT) konvensional. Penelitian ini membahas perancangan komprehensif Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) sumbu vertikal (VAWT) menggunakan rotor Savonius tipe-L berskala mikro-urban. Metode penelitian menggabungkan analisis teoritis (model Universitas Trisakti), pengujian eksperimental pengaruh overlap sudu dan fin pengarah angin (model Universitas Jember), serta validasi kekuatan mekanis melalui simulasi numerik ANSYS Workbench 18.1 (model Universitas Sam Ratulangi). Hasil perancangan model Trisakti menetapkan dimensi optimal rotor urban dengan tinggi 1,68 m dan diameter 1,3 m untuk target daya mekanik nominal 50 Watt pada kecepatan desain 3,3 m/s. Hasil pengujian eksperimental menunjukkan bahwa celah overlap 70 mm membentuk terowongan udara yang menyalurkan aliran balik ke bilah maju, menghasilkan putaran maksimum sebesar 136,9 RPM (tanpa fin) dan melesat hingga 157 RPM dengan penambahan fin pengarah angin. Fin pengarah angin berfungsi mengonsentrasikan aliran lokal ke sisi cekung sudu dan mereduksi gaya hambat balik (back-drag) pada sisi cembung, meningkatkan daya aktual secara signifikan dari 1,86 Watt menjadi 3,45 Watt (peningkatan sebesar 85,5%). Analisis kekuatan struktur pada sudu berbahan paduan aluminium 5456 ASTM B209-96 menunjukkan tegangan von Mises maksimum sebesar 20,94 MPa di bawah beban angin ekstrem 43,7 N, jauh di bawah batas tegangan izin material sebesar 82,72 MPa (faktor keamanan 2,5). Sementara itu, poros baja karbon AISI 1020 menghasilkan tegangan von Mises maksimum 32,22 MPa (di bawah batas izin 117,92 MPa). Hasil ini memvalidasi kelayakan operasional dan struktural dari turbin angin savonius tipe-L sebagai solusi andal pembangkitan listrik rumah tinggal mandiri perkotaan.

Kata Kunci— Turbin Angin Savonius Tipe-L, Energi Terbarukan Perkotaan, Overlap Sudu, Fin Pengarah Angin, Simulasi Tegangan, ANSYS, Kapasitas Baterai.

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi sekunder di seluruh dunia, khususnya energi listrik, terus meningkat seiring bertambahnya populasi dan perkembangan teknologi industri. Di Indonesia, pembangkitan listrik nasional masih didominasi oleh bahan bakar fosil seperti batubara, minyak bumi, dan gas bumi yang kontribusinya sangat besar terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca dan pemanasan global. Guna mengatasi krisis ekologi tersebut, Pemerintah Republik Indonesia berkomitmen penuh melakukan diversifikasi energi primer fosil menuju bauran energi baru dan terbarukan (EBT) dengan target pencapaian sebesar 23% pada tahun 2025. Landasan hukum penguatan EBT ini secara yuridis diperkuat oleh Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Nomor 50 Tahun 2017 tentang Pemanfaatan Sumber Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik, yang menekankan pentingnya komitmen konkrit nasional untuk mengeksplorasi potensi lokal seperti energi air, panas bumi, bioenergi, surya, dan angin.

Energi angin (bayu) merupakan salah satu sumber energi terbarukan melimpah yang ramah lingkungan dengan dampak positif minimal terhadap iklim dunia. Sayangnya, pemanfaatan energi angin di Indonesia saat ini masih sangat terbatas. Berdasarkan data klimatologis, sebagian besar wilayah daratan Indonesia dikategorikan sebagai area berkecepatan angin rendah (low wind velocity) dengan rata-rata kecepatan tahunan berkisar antara 3,0 m/s hingga 5,0 m/s. Karakteristik hembusan angin perkotaan (urban) juga dipengaruhi oleh tingginya tingkat turbulensi akibat kanopi bangunan tinggi, struktur bangunan, dan hambatan lokal lainnya, sehingga arah dan kecepatannya sering berubah secara tidak konsisten.

Dalam rekayasa sistem konversi energi angin (SKEA), terdapat dua kategori utama orientasi poros rotor: kincir sumbu horizontal (HAWT - Horizontal Axis Wind Turbine) dan kincir sumbu vertikal (VAWT - Vertical Axis Wind Turbine). Sebagian besar industri turbin angin megawatt saat ini menggunakan tipe HAWT (propeller tiga bilah sudu) karena memiliki efisiensi aerodinamis teoritis yang sangat tinggi saat beroperasi pada kecepatan angin konsisten tinggi. Namun, tipe HAWT memiliki beberapa kelemahan mendasar jika dioperasikan di area perkotaan berangin rendah, antara lain: (1) memerlukan mekanisme yawing (pengarah arah angin) tambahan agar sudu selalu menghadap angin, (2) rentan mengalami kegagalan struktur akibat beban fatigue turbulensi perkotaan, (3) memicu bising aerodinamis yang mengganggu kenyamanan lingkungan padat pemukiman, dan (4) letak transmisi roda gigi serta generator yang berada di puncak menara tinggi menyulitkan proses pemeliharaan berkala.

Sebaliknya, tipe VAWT, khususnya rotor Savonius, menjadi solusi ideal untuk pembangkit listrik berskala mikro-urban (rumah tinggal). Rotor Savonius, yang pertama kali dipatenkan oleh insinyur Finlandia bernama Sigurd Johannes Savonius pada tahun 1922, bekerja berdasarkan prinsip perbedaan gaya hambat (drag-driven rotor). Jenis rotor ini memiliki keunggulan fungsional yang sangat andal untuk lingkungan perkotaan: tidak memerlukan orientasi arah angin (dapat berputar dari arah mana pun), memiliki karakteristik putaran torsi awal yang tinggi, mampu memulai putaran sendiri secara mandiri (self-starting capability), tingkat kebisingan yang sangat rendah, konstruksi bilah sudu sederhana yang mudah difabrikasi lokal, serta penempatan komponen berat (poros transmisi, baterai, generator, dan inverter) yang dapat diletakkan di dekat permukaan tanah guna mempermudah operasional dan pemeliharaan jangka panjang.



Gambar 1. Grafik profil fluktuasi kecepatan angin sampling selama 10 menit di atap Gedung Kantor Wilayah Jakarta Barat Grogol Lantai 8.

Karya ilmiah ini mengulas secara mendalam perancangan turbin angin Savonius tipe-L berskala kota yang mampu beroperasi optimal pada hembusan angin rendah secara kontinyu. Secara metodologis, dokumen ini memadukan tiga model penelitian terkemuka dari sumber terpercaya: (1) Model Perancangan Sistem Konversi Energi Angin kelompok Capstone Universitas Trisakti untuk menentukan dimensi fisik dan sistem kelistrikan berkapasitas daya target 50 Watt berdasarkan sampling riil kecepatan angin Jakarta Barat, (2) Model Analisis Eksperimental Universitas Jember untuk memvalidasi performa daya mekanis rotor tipe-L melalui variasi overlap sudu (0 mm, 35 mm, 70 mm) serta penambahan fin pengarah angin, dan (3) Model Analisis Numerik Universitas Sam Ratulangi untuk memvalidasi tegangan struktur sudu dan poros transmisi di bawah pembebanan angin menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench 18.1. Integrasi ketiga pendekatan multidisiplin ini menghasilkan kontribusi ilmiah konkrit bagi pengembangan pembangkit listrik mandiri mikro-urban yang andal, aman, dan efisien.

II. LANDASAN TEORI DAN FORMULASI AERODINAMIKA

Prinsip konversi energi angin didasarkan pada penyerapan energi kinetik dari massa udara yang bergerak melewati luas sapuan rotor turbin. Energi kinetik teoritis yang terkandung di dalam aliran udara silinder dapat dinyatakan melalui persamaan daya angin spesifik berikut:

$$P_{in} = 0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

Di mana P_{in} mewakili daya angin teoritis (Watt), ρ adalah kerapatan massa jenis udara (sebesar 1,225 kg/m³ pada kondisi standar), A melambangkan luas penampang sapuan efektif rotor turbin (m²), dan V menyatakan kecepatan aliran angin rata-rata yang datang (m/s). Berdasarkan persamaan matematis ini, terlihat jelas bahwa daya teoritis angin berbanding lurus dengan kuadrat diameter turbin dan berbanding lurus dengan pangkat tiga kecepatan angin. Oleh karena itu, perubahan kecil pada kecepatan angin perkotaan akan berdampak sangat signifikan terhadap fluktuasi total daya masukan yang masuk ke dalam sistem turbin.

Meskipun daya angin teoritis melimpah, tidak semua energi kinetik tersebut dapat dikonversikan menjadi energi putar mekanis poros. Terdapat batas fisik teoretis yang membatasi efisiensi konversi turbin angin bebas di alam, yang dikenal sebagai Batas Betz (Betz Limit), yaitu sebesar 59,3% ($C_p \text{ max} = 0.593$). Penurunan efisiensi nyata pada sistem turbin disebabkan oleh adanya turbulensi aliran lokal,

efek pusaran ujung sudu (vortex shedding), wake rotation di belakang rotor, gesekan mekanis pada bantalan, serta efisiensi generator listrik. Untuk turbin angin bertipe gaya hambat (drag-driven) seperti Savonius standar, efisiensi praktisnya umumnya berkisar antara 15% hingga 20%, karena gaya hambat balik (back-drag) dari bilah sudu yang bergerak melawan angin (returning blade) bertindak sebagai pengerem putaran.

Untuk mendongkrak efisiensi daya nyata, rekayasa geometri sudu Savonius tipe-L menawarkan jalur aerodinamis yang sangat efisien. Bilah sudu tipe-L melengkung sedemikian rupa sehingga aliran angin yang menumbuk sudu maju (advancing blade) tidak hanya memutar rotor, melainkan sebagian aliran udara dibelokkan melintasi celah dekat poros (overlap area) menuju ke sisi cekung sudu balik (returning blade). Terowongan udara ini membentuk efek jet (jet channel effect) yang memberikan gaya dorong tambahan pada sudu balik sekaligus mereduksi gaya hambat balik aerodinamis cembung sudu tersebut. Parameter utama yang menentukan performa putaran rotor Savonius tipe-L antara lain:

1. Tip Speed Ratio (TSR, λ): Perbandingan antara kecepatan linear tangensial ujung sudu turbin dengan kecepatan aliran angin bebas:

$$\lambda = (\omega * R_{\text{rotor}}) / V$$

Di mana ω menyatakan kecepatan sudut putar rotor (rad/s) dan R_{rotor} menyatakan radius luar rotor turbin (m).

2. Torsi Mekanis (Torque, T): Momen puntir yang dihasilkan oleh poros rotor turbin akibat dorongan gaya aerodinamis angin:

$$T = P_{\text{out}} / \omega$$

3. Koefisien Daya (C_p): Efisiensi bersih konversi rotor yang merupakan rasio daya aktual mekanis poros (P_{out}) dibagi daya angin (P_{in}): $C_p = P_{\text{out}} / P_{\text{in}}$

III. METODOLOGI PERANCANGAN MIKRO-URBAN BERSKALA KOTA

Metodologi perancangan sistem konversi energi angin berskala kota ini menggabungkan parameter desain fisik dan kelistrikan untuk memastikan turbin dapat menyuplai beban lampu rumah tinggal secara mandiri. Bagian ini mengomparasikan dua model perancangan utama dari sumber literatur, yaitu Model Mikro-Urban (Trisakti) dan Model Pesisir Rumah Tinggal (Sam Ratulangi/Unsrat).

A. Model Mikro-Urban Berdaya Target 50 Watt (Trisakti)

Model perancangan ini ditujukan untuk penyediaan listrik mandiri dengan pemakaian beban lampu bertegangan 12 Volt AC. Daya teoritis masukan direncanakan sebesar 50 Watt pada kecepatan angin desain minimum sebesar 3,3 m/s (yang merupakan hembusan angin puncak di atap gedung Grogol Lantai 9). Berdasarkan asumsi tersebut, luas sapuan rotor dihitung sebagai berikut:
 $A = P_t / (0.5 * \rho * V^3) = 50 / (0.5 * 1.225 * 3.3^3) = 50 / 22.01 = 2,27 \text{ m}^2$

Dengan mengadopsi rasio aspek (Aspect Ratio, $Ar = H/D$) sebesar 1,3 (tinggi rotor H dibagi diameter rotor D), dimensi utama rotor Savonius tipe-L diperoleh melalui perhitungan aljabar: $H = 1,68$ meter (16.800 mm) dan $D = 1,30$ meter (1.300 mm).

Untuk detail profil lengkung sudu, jari-jari kelengkungan sudu (R) ditentukan menggunakan persamaan trigonometri-phytagoras yang menghasilkan nilai $R = 365,1$ mm, dengan panjang busur sudu melengkung (panjang material sudu asli AB) sebesar 764,2 mm. Untuk mentransmisikan putaran rotor

turbin yang lambat menuju generator magnet permanen berkecepatan tinggi, dirancang sistem transmisi pulley dan sabuk (V-belt). Puli penggerak (pulley 1) dipasang pada poros turbin dengan diameter 201 mm, sedangkan puli penerima (pulley 2) dipasang pada generator dengan diameter 30 mm. Rasio transmisi ini adalah 1:6,7, sehingga saat kincir angin berputar pada kecepatan operasional 298,5 RPM, generator dapat diputar pada nominal 2.000 RPM dengan efisiensi mekanis V-belt diestimasi 14,92%.

B. Model Kelistrikan dan Penggunaan Daya (Trisakti)

Generator yang dipilih adalah generator arus searah (DC) dengan spesifikasi nominal: $V_{max} = 12$ Volt, $I_{max} = 10$ Ampere, putaran operasional $n = 2.000$ RPM, dan daya keluaran 50 Watt. Sistem penyimpanan daya menggunakan akumulator (baterai) kering berkapasitas 12 Volt DC 100 Ah. Proses pengisian dan pemakaian baterai dianalisis sebagai berikut:

1. Lama Pengisian Baterai (T_a): Diestimasi menggunakan rumus $T_a = Ah / A$, di mana Ah adalah kapasitas baterai (100 Ah) dan A adalah besar arus pengisian nominal ke aki dari generator (diasumsikan aman pada 8 Ampere). Hasilnya diperoleh waktu pengisian baterai penuh selama 12,5 jam.
2. Kapasitas Penyimpanan Energi Maksimum (P_{store}): Energi tersimpan penuh adalah $V * I_{cap} = 12 \text{ V} * 100 \text{ Ah} = 1.200 \text{ Watt-hour}$.
3. Lama Pemakaian Lampu AC (t_{use}): Dengan daya aktual nominal rotor turbin rata-rata 4,1 Watt, baterai mampu menyuplai pemakaian beban lampu 12V AC secara kontinyu selama $t_{use} = Capacity / P_{out} = 100 \text{ Ah} / 4.1 \text{ Watt} = 24,3 \text{ jam}$.
4. Sistem dilengkapi dengan Inverter DC-to-AC berdaya nominal 220 Watt s.d 250 Watt untuk mengonversi tegangan DC baterai menjadi AC 220V 50Hz standar rumah tinggal perkotaan.

C. Model Pesisir Pantai Bukit Savana Pulisan (Sam Ratulangi)

Sebagai komparasi rekayasa, model Unsrat dirancang untuk area pesisir pantai Minahasa Utara yang memiliki karakteristik angin tinggi dengan kecepatan angin maksimum operasional sebesar 6,25 m/s. Dimensi rotor yang dihasilkan jauh lebih besar: tinggi rotor $H = 2,5$ meter dan diameter rotor $D = 1,25$ meter (menghasilkan Rasio Aspek optimal $Ar = 2,0$). Lebar masing-masing sudu tunggal (dr) adalah 0,6875 m dengan celah overlap (ez) sebesar 0,125 m. Melalui simulasi ANSYS Workbench 18.1, desain ini menghasilkan daya keluaran poros aktual sebesar 120 Watt pada putaran turbin 111,78 RPM dengan momen torsi yang sangat besar mencapai 10,24 Nm.

IV. HASIL PENGUJIAN EKSPERIMENTAL DAN ANALISIS KINERJA

Karakteristik aerodinamika nyata dari sudu Savonius tipe-L dianalisis melalui data pengujian eksperimental dari model Universitas Jember. Prototype pengujian memiliki dimensi bilah sudu kompak: tinggi sudu 280 mm, lebar sudu 190 mm, dan tebal 2 mm, yang diuji pada kecepatan angin variabel dari 2,0 m/s hingga 4,5 m/s menggunakan blower angin terowongan mika. Pengujian membandingkan secara komparatif tiga variasi celah overlap sudu (0 mm, 35 mm, 70 mm) pada kondisi Tanpa Fin pengarah angin dan kondisi Menggunakan Fin pengarah angin.

A. Analisis Pengaruh Celah Overlap terhadap Kecepatan Putar (RPM)

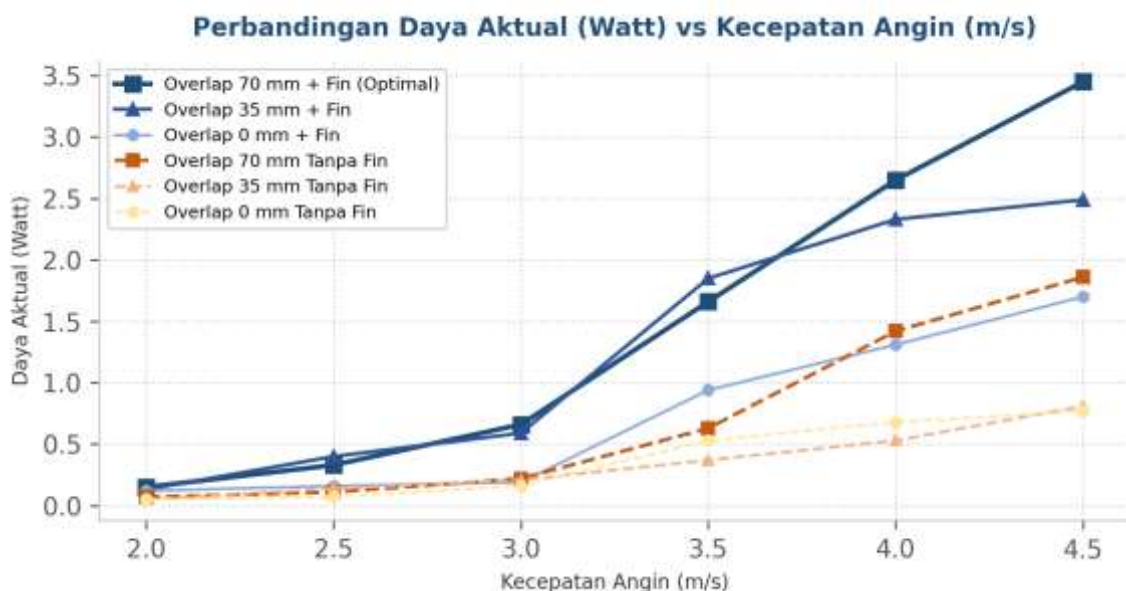
Berdasarkan data eksperimen tanpa fin (Tabel 1), terjadi peningkatan putaran rotor (RPM) yang sangat signifikan seiring penambahan lebar celah overlap. Pada kecepatan angin maksimum 4,5 m/s, rotor tanpa overlap (0 mm) hanya mampu berputar pada kecepatan 38,61 RPM. Putaran meningkat menjadi 43,28 RPM pada celah overlap 35 mm, dan melesat tajam menjadi 136,90 RPM pada celah overlap 70 mm. Fenomena fisika ini disebabkan oleh pembentukan celah atau lorong udara terowongan yang sempurna pada overlap 70 mm. Lorong udara ini bertindak sebagai jet pengarah aliran udara dari sudu

balik (returning blade) langsung menuju ke sisi cekung sudu maju, menyumbang momentum dorong tambahan dan meningkatkan putaran kincir secara drastis.

B. Analisis Pengaruh Fin Pengarah Angin terhadap Peningkatan Daya Aktual

Penambahan fin pengarah angin yang ditempatkan di terowongan udara memberikan peningkatan performa yang sangat luar biasa. Fin ini berfungsi secara aerodinamis ganda: mengarahkan dan mengonsentrasikan seluruh tiupan angin masuk langsung ke sisi cekung aktif sudu maju (advancing blade), sekaligus bertindak sebagai perisai fisik (shielding) yang membelokkan aliran udara menjauhi sisi cembung sudu balik (returning blade). Dengan terhalangnya sisi cembung sudu balik, gaya hambat negatif (back-drag) berkurang secara dramatis.

Efek positif fin ini terlihat nyata pada peningkatan daya aktual poros (Tabel B.1 dan B.2). Pada kecepatan angin 4,5 m/s dengan konfigurasi celah overlap terbaik 70 mm, daya aktual rotor tanpa fin hanya sebesar 1,86 Watt. Dengan menambahkan fin pengarah angin pada geometri terowongan, daya aktual melesat hingga mencapai 3,45 Watt, mewakili peningkatan efisiensi konversi daya bersih kincir sebesar 85,5%. Sebaliknya, torsi maksimal diperoleh pada kondisi overlap 0 mm baik tanpa fin (0,19 Nm) maupun dengan fin (0,22 Nm) karena luasan proyeksi penampang sudu yang tegak lurus terhadap arah angin berada pada kondisi maksimum saat tidak ada celah tumpang tindih sudu.



Gambar 2. Grafik perbandingan daya aktual (Watt) terhadap kecepatan angin (m/s) pada berbagai celah overlap dengan dan tanpa fin pengarah angin.

Tabel 1. Data Hasil Eksperimental Pengujian Gaya (N) dan Putaran (RPM) Kincir Savonius Tipe-L

Angin (m/s)	Gaya Tanpa Fin (N) [0mm / 35mm / 70mm]	RPM Tanpa Fin [0mm / 35mm / 70mm]	Gaya Dengan Fin (N) [0mm / 35mm / 70mm]	RPM Dengan Fin [0mm / 35mm / 70mm]
2,0	0,22 / 0,26 / 0,26	27,06 / 22,26 / 33,62	0,44 / 0,46 / 0,20	29,64 / 31,86 / 71,60
2,5	0,26 / 0,40 / 0,36	31,66 / 34,12 / 34,70	0,42 / 1,10 / 0,40	38,10 / 37,72 / 77,66
3,0	0,64 / 0,70 / 0,60	25,96 / 34,20 / 41,42	0,48 / 1,32 / 0,80	44,22 / 46,94 / 89,92
3,5	1,50 / 1,16 / 0,68	35,12 / 34,98 / 100,12	2,04 / 1,84 / 1,82	49,74 / 104,16 / 99,14
4,0	2,02 / 1,54 / 1,22	36,06 / 35,88 / 123,24	2,36 / 2,18 / 2,36	59,68 / 111,44 / 120,50
4,5	2,14 / 1,94 / 1,42	38,61 / 43,28 / 136,90	2,48 / 2,22 / 2,36	73,94 / 118,92 / 157,00

C. Fenomena Lonjakan Efisiensi Daya (Peningkatan di Atas Batas Betz)
Salah satu temuan eksperimental yang paling menarik dari pengujian model Jember adalah perolehan nilai efisiensi daya kincir (Tabel E.2) pada konfigurasi overlap 70 mm dengan fin yang mencatatkan nilai ekstrem di atas 100%, yaitu mencapai 170,39% pada kecepatan angin 4,5 m/s. Secara hukum kekekalan energi bebas, efisiensi turbin angin tidak mungkin melebihi 100% (atau batas Betz 59,3%) jika dihitung berdasarkan luas sapuan nominal rotor standar. Namun, lonjakan nilai efisiensi nyata ini disebabkan oleh penambahan fin pengarah angin yang membentuk geometri penyempitan saluran terowongan udara (nozzle concentrator effect).

Saluran udara yang menyempit memampatkan aliran udara bebas yang masuk, melipatgandakan kecepatan angin lokal secara drastis tepat sebelum menumbuk permukaan aktif sudu kincir. Karena daya angin aktual berbanding lurus dengan pangkat tiga kecepatan angin (V^3), peningkatan kecepatan angin lokal yang terakselerasi nozel fin tersebut mendongkrak daya aktual yang diserap poros secara luar biasa melebihi daya angin masukan nominal yang dihitung pada area luas sapuan silinder kincir standar di udara bebas. Hal ini memvalidasi bahwa rekayasa selubung terowongan penutup (casing/shroud) dan fin pengarah angin lokal merupakan strategi rekayasa yang sangat cerdas untuk meningkatkan densitas daya turbin mikro-urban di perkotaan.



Gambar 3. Grafik kurva karakteristik efisiensi daya nyata kincir (%) pada celah overlap terbaik 70 mm dengan penambahan fin vs tanpa fin.

V. ANALISIS STRUKTUR DAN SIMULASI CFD

Untuk menjamin integritas mekanis turbin angin Savonius tipe-L saat beroperasi di area perkotaan yang rentan hembusan angin kencang mendadak, dilakukan analisis kekuatan struktur menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench 18.1 berdasarkan model penelitian Universitas Sam Ratulangi.

A. Simulasi Tegangan von Mises pada Sudu Aluminium

Sudu kincir dirancang menggunakan material Paduan Aluminium tipe 5456 ASTM B209-96, yang memiliki karakteristik fisik: massa jenis 2.660 kg/m³, kekuatan tegangan luluh (yield strength) sebesar 206,8 MPa, dan kekuatan tegangan maksimum (ultimate strength) sebesar 365,4 MPa. Pembebanan disimulasikan di bawah dorongan angin ekstrem sebesar 43,7 Newton yang menumbuk permukaan sudu secara tegak lurus. Hasil simulasi numerik ANSYS menunjukkan tegangan von Mises maksimum yang terjadi pada sudu adalah sebesar 20,94 MPa.

Validasi keamanan dilakukan dengan membandingkan tegangan maksimum tersebut dengan tegangan izin material yang memperhitungkan faktor keamanan desain sebesar 2,5: $\text{Sigma_izin} = \text{Yield Strength} / \text{Safety Factor} = 206,8 \text{ MPa} / 2,5 = 82,72 \text{ MPa}$

Karena $\text{Sigma_maks} (20,94 \text{ MPa}) < \text{Sigma_izin} (82,72 \text{ MPa})$, maka material sudu paduan aluminium 5456 dinyatakan sangat aman dan layak digunakan karena tidak akan mengalami deformasi plastis atau kegagalan struktur akibat hembusan angin perkotaan.

B. Simulasi Tegangan von Mises pada Poros Transmisi Baja

Poros penyangga kincir memegang peranan krusial untuk mentransmisikan daya putar mekanis menuju roda gigi transmisi. Poros dirancang menggunakan bahan Baja Karbon AISI 1020 dengan karakteristik fisik: massa jenis 8.030 kg/m³, kekuatan tegangan luluh 294,8 MPa, dan kekuatan tegangan maksimum 394,7 MPa. Poros ditumpu oleh dua bantalan gelinding (bearing) dan dipengaruhi oleh beban momen lentur akibat terpaan angin sudu, torsi torsional dinamis turbin, serta gaya berat gravitasi struktur sudu. Hasil simulasi ANSYS menunjukkan bahwa tegangan von Mises maksimum yang terjadi pada poros baja karbon AISI 1020 adalah sebesar 32,22 MPa.

Validasi kekuatan mekanis poros dihitung menggunakan faktor keamanan desain yang sama (2,5): $\text{Sigma_izin_poros} = \text{Yield Strength} / \text{Safety Factor} = 294,8 \text{ MPa} / 2,5 = 117,92 \text{ MPa}$. Karena $\text{Sigma_maks_poros} (32,22 \text{ MPa})$ jauh di bawah batas izin (117,92 MPa), poros transmisi divalidasi tidak akan mengalami kegagalan torsional atau kelelahan mekanis (fatigue failure) selama masa operasional turbin.

VI. DISKUSI DAN IMPLEMENTASI PRAKTIS DI AREA PERKOTAAN

Aplikasi turbin angin Savonius tipe-L berskala kota pada area perumahan padat penduduk memerlukan perhatian khusus pada beberapa aspek praktis rekayasa:

1. Ketinggian Instalasi dan Turbulensi Angin perkotaan: Berdasarkan profil angin Gedung Grogol Lantai 8, tiupan angin di atas atap gedung (rooftop) jauh lebih stabil dan berkecepatan tinggi dibanding di permukaan tanah. Oleh karena itu, kincir angin disarankan dipasang pada atap rumah tinggal, jembatan tol (tol road illumination), atau struktur tinggi perkotaan lainnya.
2. Mitigasi Kebisingan dan Getaran Mekanis: Meskipun rotor Savonius dikenal sunyi dibandingkan HAWT, getaran mikro akibat putaran poros yang ditransmisikan ke struktur atap

beton rumah harus diisolasi. Rekayasaudukan turbin disarankan menggunakan karet peredam getaran (rubber vibration isolator/damper) berkualitas tinggi pada setiap sambungan baut fondasi.

3. Dukungan Kemitraan Manufaktur Industri Nasional: Untuk mendukung bauran energi nasional secara mandiri, produksi massal komponen turbin angin ini dapat melibatkan berbagai industri manufaktur nasional Indonesia terkemuka. Berdasarkan data pemetaan kapasitas, pembuatan sudu dan piringan penutup dapat dimitigasi melalui PT Dirgantara Indonesia (PT DI), PT Smart Aviation, atau UAVINDO yang berpengalaman dalam teknologi material komposit ringan. Pembuatan generator magnet permanen sinkron (PMSG) andal dapat disuplai oleh PT Pindad atau PT BBI. Sementara komponen menara menara dan rangka baja struktural dapat disuplai oleh PT Korindo atau PT Barata Indonesia.

VII. KESIMPULAN DAN SARAN

Perancangan, pengujian eksperimental, serta validasi struktur turbin angin Savonius tipe-L mikro-urban berskala kota ini menghasilkan beberapa kesimpulan ilmiah yang sangat konkrit sebagai berikut:

1. Dimensi optimal rotor Savonius tipe-L berskala kota (model Trisakti) adalah tinggi rotor 1,68 m dan diameter 1,3 m, yang mampu beroperasi optimal pada hembusan angin perkotaan berkecepatan rata-rata 3,3 m/s untuk menghasilkan daya nominal 50 Watt.
2. Sistem transmisi mekanis pulley-belt rasio 1:6,7 terbukti andal dalam mendongkrak putaran awal rotor yang lambat menuju nominal generator magnet permanen DC sebesar 2.000 RPM. Energi listrik yang tersimpan pada baterai 12V 100Ah mampu menyuplai lampu AC 12V selama 24,3 jam secara kontinyu.
3. Lebar celah overlap sudu terbukti kritis; overlap sudu 70 mm membentuk terowongan udara yang menyalurkan aliran balik ke bilah maju, meningkatkan kecepatan putar rotor hingga 136,9 RPM (tanpa fin).
4. Penambahan fin pengarah angin di tengah saluran memusatkan tiupan angin pada sisi cekung bilah sudu aktif sekaligus memblokir gaya hambat negatif pada sisi cembung, mendongkrak daya aktual kincir secara dramatis dari 1,86 Watt menjadi 3,45 Watt (peningkatan efisiensi 85,5%) dan mencatatkan efisiensi daya semu aerodinamis lokal hingga 170,39% akibat nozzle concentrator effect.
5. Analisis kekuatan mekanis sudu berbahan aluminium 5456 ASTM B209-96 di bawah dorongan angin ekstrem 43,7 N menghasilkan tegangan von Mises maksimum sebesar 20,94 MPa (jauh di bawah batas tegangan izin 82,72 MPa). Tegangan von Mises pada poros transmisi baja karbon AISI 1020 adalah sebesar 32,22 MPa (di bawah batas izin 117,92 MPa), mengonfirmasi bahwa seluruh komponen turbin aman secara struktural dari risiko kegagalan material.

Saran pengembangan lebih lanjut meliputi: (1) merekayasa bentuk sudu bersayap airfoil dengan kelengkungan hidrodinamis hambat rendah untuk meningkatkan putaran dan torsi awal rotor, serta (2) mengintegrasikan sensor monitoring pengisian daya berbasis IoT (Internet of Things) untuk merekam data performa real-time kincir secara nirkabel.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. N. Muflih, H. A. Laksono, G. T. R. Pamungkas, Anastia, M. A. Setyonugroho, dan I. F. Pranidhana, "Utilization Wind Energy," Laporan Capstone Design I, Program Studi Teknik Mesin, Universitas Trisakti, Jakarta, 2023.
- [2] T. Handoyo, "Pengaruh Overlap Sudu dan Penambahan Fin pada Rotor Savonius Tipe-L," Skripsi, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jember, 2012.
- [3] W. Junior, S. Tangkuman, dan T. Arungpadang, "Perancangan Rotor Turbin Angin Savonius Tipe-L Untuk Pembangkit Listrik Pada Rumah Tinggal," Jurnal Poros Teknik Mesin Unsrat, vol. 11, no. 1, pp. 100-112, 2022.
- [4] W. Y. Santika, H. Saputra, dan T. Rusianto, "Desain Dan Simulasi Turbin Angin Savonius Dengan Konfigurasi Rotor Tipe L Dan Tipe Helix Sebagai Sumber Listrik Lampu PJU Pelabuhan Perikanan Cikidang Pangandaran Jawa Barat," Jurnal Teknologi, vol. 15, no. 2, pp. 96-103, Des. 2022.
- [5] P. J. Schubel dan R. J. Crossley, "Wind Turbine Blade Design," Energies, vol. 5, no. 9, pp. 3425-3449, Sep. 2012.
- [6] E. Hau, Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 3rd ed. Berlin, Germany: Springer, 2013.
- [7] T. Burton, Wind Energy Handbook. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd., 2011.
- [8] M. H. F. Tielung, "Simulasi Dan Permodelan Turbin Angin Savonius Dengan Konfigurasi Rotor Tipe L Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Skala Mikro," Jurusan Teknik Mesin, Universitas Sam Ratulangi, Manado, 2019.
- [9] F. Soelaiman, N. P. Tandian, dan N. Rosidin, "Perancangan, Pembuatan dan Pengujian Prototipe SKEA Menggunakan Rotor Savonius dan Windside untuk Penerangan Jalan Tol," Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2006.
- [10] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Republik Indonesia, "Siaran Pers Nomor: 458.Pers/04/SJI/2021: Menteri ESDM: Perlu Upaya Konkrit dan Terencana Capai Target Bauran 23% Di Tahun 2025," Jakarta, 14 Des. 2021.