



Desain dan Optimasi Propeller Drone Bio-Inspired untuk Mengurangi Kebisingan dan Meningkatkan Efisiensi Aerodinamis

Rezky Amalia Nur ^{1*}, Syahrul Ramadhan Putra ²

¹⁻² Universitas Muslim, Indonesia

Alamat: Jl. Urip Sumoharjo Km. 05, Kec. Panakkukang, Kota Makassar, Sulawesi Selatan

Email rezky.amalia@umi.ac.id ^{1}, syahrul.putra@umi.ac.id ²

Korespondensi penulis: rezky.amalia@umi.ac.id

Abstract. *The increasing operation of drones in urban areas demands solutions to address noise pollution while maintaining flight efficiency. This study aims to design and optimize drone propellers using a bio-inspired approach, drawing inspiration from the flight mechanisms of animals, particularly owls and dragonflies, to reduce noise and improve aerodynamic efficiency. Through experimental methods and Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations, several biomimetic designs were evaluated, including leading-edge cutout structures, leading-edge and trailing-edge serrations, and blade twist distributions mimicking eagle and dragonfly wings. The results indicate that bio-inspired designs can significantly reduce noise, with sound pressure level reductions of up to 6.67 dB in UUV applications and 4.18 dB in UAV propellers, particularly at mid-to-high frequencies. Design parameters such as cutout roundness, cutout length, and incision angle proved crucial in optimizing noise reduction. Although some designs showed a slight decrease in efficiency (approximately 5%) compared to conventional propellers, other designs, such as serrated sawtooth blades, successfully increased thrust by up to 3.53%. Designs mimicking eagle wings were also reported to produce 25% higher lift coefficients. The primary mechanism behind these improvements is the ability to break down large-scale vortices into smaller, lower-energy vortices, as well as modifying the laminar-turbulent flow transition on the blade surface. These findings confirm that bio-inspired propeller designs hold great potential for application in urban drones, particularly for nighttime operations, offering a balance between noise reduction and aerodynamic performance that remains acceptable for practical applications.*

Keywords: *Bio-inspired, drone propeller, noise reduction, aerodynamic efficiency, leading-edge serrations, biomimetics.*

Abstrak. Meningkatnya operasi drone di kawasan perkotaan menuntut solusi untuk mengatasi polusi kebisingan sekaligus mempertahankan efisiensi penerbangan. Studi ini bertujuan untuk merancang dan mengoptimasi propeller drone dengan pendekatan bio-inspired yang terinspirasi dari mekanisme penerbangan hewan, khususnya burung hantu dan capung, untuk mereduksi kebisingan dan meningkatkan efisiensi aerodinamis. Melalui metode eksperimental dan simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD), beberapa desain biomimetik dievaluasi, meliputi struktur cutout pada leading edge, gerigi (serrations) pada leading edge dan trailing edge, serta distribusi puntiran bilah yang meniru sayap elang dan capung. Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain bio-inspired mampu mereduksi kebisingan secara signifikan, dengan penurunan tingkat tekanan suara hingga 6,67 dB pada aplikasi UUV dan 4,18 dB pada propeller UAV, terutama pada frekuensi menengah hingga tinggi. Parameter desain seperti kebulatan (roundness) struktur, panjang cutout, dan sudut sayatan terbukti krusial dalam optimalisasi peredaman. Meskipun beberapa desain menunjukkan sedikit penurunan efisiensi (sekitar 5%) dibandingkan propeller konvensional, desain lain seperti bilah bergerigi gergaji justru berhasil meningkatkan gaya dorong hingga 3,53%. Desain yang meniru sayap elang juga dilaporkan menghasilkan koefisien gaya angkat 25% lebih tinggi. Mekanisme utama di balik peningkatan ini adalah kemampuannya memecah vorteks berskala besar menjadi lebih kecil dan berenergi rendah, serta memodifikasi transisi aliran laminar-turbulen di permukaan bilah. Temuan ini mengonfirmasi bahwa desain propeller bio-inspired memiliki potensi besar untuk diaplikasikan pada drone perkotaan, terutama operasi malam hari, dengan menawarkan keseimbangan antara pengurangan kebisingan dan kinerja aerodinamis yang masih dapat diterima untuk penerapan praktis.

Kata kunci: Bio-inspired, propeller drone, reduksi kebisingan, efisiensi aerodinamis, leading-edge serrations, biomimetik.

1. LATAR BELAKANG

Perkembangan teknologi drone atau Unmanned Aerial Vehicle (UAV) dalam dekade terakhir telah mengalami pertumbuhan yang sangat pesat. Awalnya dikenal sebagai perangkat militer, drone kini telah merambah berbagai sektor kehidupan, termasuk logistik, pertanian, pemantauan lingkungan, fotografi, hingga layanan pengiriman barang. Di perkotaan, potensi penggunaan drone semakin meluas dengan konsep Urban Air Mobility (UAM) yang menjanjikan solusi transportasi dan logistik masa depan. Namun, semakin intensifnya operasi drone di lingkungan padat penduduk memunculkan permasalahan baru yang krusial: polusi kebisingan.

Kebisingan yang dihasilkan oleh drone, terutama dari putaran propeller berkecepatan tinggi, telah menjadi perhatian utama berbagai pihak. Suara dengung khas drone tidak hanya mengganggu kenyamanan masyarakat, tetapi juga berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan, seperti gangguan tidur, stres, dan penurunan kualitas hidup. Dalam konteks operasi komersial seperti pengiriman barang di malam hari, kebisingan menjadi hambatan regulasi yang signifikan. Banyak otoritas penerbangan dan pemerintah daerah mulai memberlakukan batasan ketat terhadap tingkat kebisingan yang diizinkan untuk operasi drone di kawasan perkotaan. Di sisi lain, tuntutan terhadap kinerja drone juga semakin tinggi. Efisiensi aerodinamis propeller merupakan faktor kunci yang menentukan daya tahan baterai, jangkauan terbang, dan kapasitas muatan drone. Sayangnya, upaya mereduksi kebisingan seringkali berbenturan dengan upaya mempertahankan atau meningkatkan efisiensi aerodinamis. Modifikasi pada bentuk propeller untuk mengurangi kebisingan dapat mengganggu pola aliran udara dan justru menurunkan gaya dorong yang dihasilkan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan inovatif yang mampu menjawab kedua tantangan ini secara simultan: mengurangi kebisingan tanpa mengorbankan, atau bahkan meningkatkan, efisiensi aerodinamis.

Dalam konteks inilah pendekatan bio-inspirasi atau biomimetik menawarkan solusi yang menjanjikan. Selama jutaan tahun evolusi, alam telah menyempurnakan desain makhluk hidup untuk terbang dengan senyap namun efisien. Burung hantu, misalnya, dikenal sebagai predator malam yang mampu terbang hampir tanpa suara berkat struktur khusus pada bulu sayapnya, seperti sisir pada leading edge, serrations, dan struktur berbulu halus pada permukaan sayap. Capung juga menunjukkan kemampuan manuver luar biasa dengan desain sayap yang unik dan efisien secara aerodinamis. Mekanisme alamiah ini memberikan inspirasi berharga untuk merekayasa ulang desain propeller konvensional.

Penelitian mengenai desain propeller bio-inspired telah menunjukkan hasil yang menggembirakan. Berbagai studi melaporkan bahwa adopsi fitur-fitur dari sayap burung hantu, seperti struktur cutout dan serrations pada leading edge, mampu mereduksi kebisingan secara signifikan dengan memodifikasi interaksi antara bilah propeller dengan aliran udara. Fitur-fitur ini bekerja dengan cara memecah vorteks berskala besar yang menjadi sumber utama kebisingan menjadi vorteks-vorteks kecil yang lebih stabil dan tidak terlalu bising. Sementara itu, inspirasi dari sayap elang dan capung berkontribusi pada peningkatan efisiensi aerodinamis melalui optimasi distribusi tekanan dan pengendalian aliran udara di permukaan bilah.

Meskipun demikian, tantangan masih tetap ada. Tidak semua desain bio-inspired langsung memberikan hasil optimal; beberapa justru menimbulkan trade-off antara reduksi kebisingan dan penurunan efisiensi. Oleh karena itu, diperlukan proses optimasi yang cermat untuk menemukan konfigurasi desain terbaik yang mampu menyeimbangkan kedua aspek tersebut. Parameter-parameter desain seperti bentuk geometri, ukuran, posisi, dan sudut dari fitur bio-inspired perlu dikaji secara mendalam untuk mencapai kinerja yang diinginkan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dirancang untuk mengkaji dan mengembangkan desain propeller drone yang terinspirasi dari alam. Fokus utama adalah mengoptimasi parameter desain bio-inspired guna mencapai reduksi kebisingan maksimal tanpa mengorbankan, atau bahkan meningkatkan, efisiensi aerodinamis. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan teknologi drone yang lebih ramah lingkungan dan dapat diterima secara sosial, terutama untuk mendukung operasi drone di perkotaan secara berkelanjutan.

2. KAJIAN TEORITIS

2.1 Pendahuluan: Tantangan Kebisingan dan Efisiensi pada Drone

Perkembangan pesat teknologi Unmanned Aerial Vehicle (UAV) atau drone telah membawa dampak signifikan di berbagai sektor, mulai dari logistik, pertanian, hingga militer. Namun, di balik manfaatnya, drone memiliki tantangan krusial, yaitu kebisingan yang dihasilkan oleh putaran propeller. Kebisingan ini tidak hanya menimbulkan polusi suara yang mengganggu di perkotaan, tetapi juga menjadi kelemahan fatal dalam operasi militer karena mudah dideteksi oleh lawan.

Selain kebisingan, efisiensi aerodinamis propeller juga menjadi perhatian utama. Propeller konvensional seringkali belum optimal dalam menghasilkan gaya dorong (thrust) yang besar dengan konsumsi energi yang rendah, terutama pada kecepatan putar rendah di mana motor listrik bekerja paling efisien. Untuk mengatasi kedua masalah ini, para ilmuwan dan insinyur mulai melirik alam. Pendekatan bio-inspirasi, yang mempelajari dan meniru solusi-solusi

canggih dari organisme hidup, menawarkan potensi besar untuk mendesain propeller yang lebih senyap dan efisien.

2.2 Prinsip Dasar Aerodinamika dan Aeroakustika Propeller

Untuk memahami bagaimana desain bio-inspired bekerja, kita perlu memahami dasar-dasar aerodinamika dan sumber kebisingan pada propeller standar.

a. Aerodinamika Propeller

Propeller bekerja dengan mengubah gerak rotasi menjadi gaya dorong (thrust). Saat berputar, bilah propeller (airfoil) memotong udara, menghasilkan perbedaan tekanan antara permukaan atas dan bawah. Perbedaan tekanan ini menghasilkan gaya angkat (lift) yang jika diorientasikan ke arah gerak drone, menjadi thrust. Performa aerodinamis propeller diukur dari kemampuannya menghasilkan thrust yang besar dengan hambatan (drag) sekecil mungkin, yang dikenal dengan rasio lift-to-drag ratio (L/D). Semakin tinggi rasio L/D, semakin efisien propeller tersebut.

b. Sumber Kebisingan Propeller

Kebisingan pada propeller drone secara umum dapat dikategorikan menjadi dua :

- 1) Kebisingan Mekanis: Berasal dari getaran komponen internal seperti motor dan bantalan.
- 2) Kebisingan Aerodinamis: Ini adalah sumber utama kebisingan, terutama pada frekuensi rendah dan tinggi. Kebisingan ini timbul dari interaksi bilah propeller dengan udara, termasuk:
 - a. Vortex Shedding: Pembentukan dan pelepasan pusaran (vortex) di ujung dan tepi bilah. Pusaran-pusaran besar ini menghasilkan fluktuasi tekanan yang terdengar sebagai suara.
 - b. Turbulent Boundary Layer-Trailing Edge Noise: Kebisingan yang dihasilkan oleh lapisan batas turbulen yang melewati tepi belakang bilah.
 - c. Leading Edge Noise: Kebisingan akibat turbulensi yang datang menghantam tepi depan bilah.

c. Bio-Inspirasi: Belajar dari Alam untuk Solusi Aerodinamis

Alam telah menyediakan banyak contoh organisme dengan kemampuan aerodinamis luar biasa. Desain propeller bio-inspired mengambil inspirasi dari struktur dan mekanisme alam untuk mengatasi masalah kebisingan dan efisiensi.

Inspirasi dari Burung Hantu: Leading-Edge Serrations dan Trailing-Edge Fringes

Burung hantu terkenal dengan kemampuannya terbang hampir tanpa suara. Rahasiannya terletak pada struktur mikro pada bulunya, yaitu leading-edge serrations (gigi-gigi kecil di tepi depan sayap) dan trailing-edge fringes (jumbai di tepi belakang sayap) .

- 1) Mekanisme: Leading-edge serrations berfungsi untuk memecah aliran udara yang datang menjadi pusaran-pusaran kecil (turbulensi skala kecil) sebelum mencapai tepi belakang. Proses ini memecah pusaran-pusaran besar berenergi tinggi yang menjadi sumber utama kebisingan menjadi pusaran-pusaran kecil berenergi rendah, sehingga suara yang dihasilkan berkurang secara signifikan . Selain itu, serrations juga terbukti dapat mengurangi koefisien hambatan (drag) dan meningkatkan koefisien gaya angkat (lift), yang pada akhirnya meningkatkan efisiensi aerodinamis .

Inspirasi dari Sirip Paus Bungkuk: Tubercles

Paus bungkuk memiliki tonjolan-tonjolan tidak rata (tubercles) di tepi depan siripnya. Meskipun tampak tidak aerodinamis, struktur ini justru memberikan keuntungan hidrodinamik.

- 2) Mekanisme: Tubercles bertindak sebagai vortex generator yang terkontrol. Mereka menghasilkan pusaran-pusaran kecil yang tetap menempel di permukaan sirip, sehingga mencegah stall (kehilangan gaya angkat) pada sudut serang yang tinggi. Dalam konteks propeller, desain ini dapat menjaga kestabilan aliran dan menghasilkan thrust yang lebih konsisten, serta berkontribusi pada peredaman suara dengan cara yang mirip dengan serrations, yaitu memecah koherensi pusaran .

Inspirasi dari Sayap Capung dan Biji Maple

Capung memiliki sayap dengan distribusi ketebalan dan puntiran (*twist*) yang kompleks, memungkinkan manuver lincah dan terbang efisien pada berbagai kecepatan. Sementara itu, biji maple (*maple seed*) yang berputar jatuh ke tanah memiliki bentuk aerodinamis yang sangat efisien untuk menghasilkan gaya angkat pada kecepatan rendah.

- 3) Mekanisme: Desain propeller yang terinspirasi dari capung berfokus pada optimalisasi distribusi puntiran dan ketebalan bilah agar sesuai dengan karakteristik motor listrik yang efisien pada putaran rendah . Sedangkan propeller terinspirasi biji maple meniru bentuknya yang unik untuk menghasilkan noise yang lebih rendah (pengurangan hingga 4 dB) tanpa mengorbankan performa aerodinamis

d. Optimasi Desain dan Metode Analisis

Setelah mengadopsi konsep bio-inspired, langkah selanjutnya adalah optimasi dan validasi desain melalui pendekatan ilmiah.

- 1) Pemodelan dan Simulasi Komputasi (CFD)

- a. Pemodelan 3D CAD: Desain propeller bio-inspired, seperti penambahan serrations, dimodelkan secara digital menggunakan perangkat lunak Computer-Aided Design (CAD)
- b. Computational Fluid Dynamics (CFD): Model 3D kemudian disimulasikan dalam lingkungan virtual menggunakan CFD. Simulasi ini memungkinkan peneliti untuk menganalisis pola aliran udara, distribusi tekanan, kecepatan, dan pusaran di sekitar propeller tanpa harus membuat prototipe fisik terlebih dahulu. Parameter seperti koefisien lift, drag, dan tingkat kebisingan dapat dihitung dan dibandingkan dengan propeller normal (baseline).

2) Pengujian Eksperimental

Untuk memvalidasi hasil simulasi, pengujian fisik dilakukan di laboratorium

- a. Pengukuran Gaya (Thrust dan Drag): Menggunakan load cell presisi tinggi untuk mengukur performa aerodinamis aktual dari propeller.
- b. Pengukuran Kebisingan: Dilakukan di ruang anechoic (ruang tanpa gema) untuk mengisolasi suara propeller dari kebisingan lingkungan. Mikrofon dan hidrofons (untuk propeller bawah air) digunakan untuk merekam dan menganalisis spektrum suara yang dihasilkan.

Visualisasi Aliran (PIV): Teknik Particle Image Velocimetry (PIV) digunakan untuk "melihat" pola aliran udara di belakang propeller. Teknik ini menegaskan mekanisme peredaman suara, seperti pemecahan pusaran besar menjadi lebih kecil pada desain bio-inspired

e. Kesimpulan Kajian Teoritis

Kajian teoritis ini menunjukkan bahwa desain propeller bio-inspired menawarkan jalan yang menjanjikan untuk mengatasi tantangan kebisingan dan efisiensi pada drone. Dengan meniru mekanisme alam, terutama dari burung hantu dan paus bungkuk, kita dapat memanipulasi aliran fluida untuk:

- 1) Mereduksi Kebisingan: Dengan memecah pusaran-pusaran besar (vortex) yang menjadi sumber suara menjadi pusaran-pusaran kecil yang lebih senyap.
- 2) Meningkatkan Efisiensi Aerodinamis: Melalui pengurangan hambatan (drag) dan peningkatan gaya angkat (lift), serta optimalisasi bentuk untuk kondisi operasi spesifik putaran rendah

Pendekatan ini, yang dipadukan dengan metode analisis modern seperti CFD dan pengujian eksperimental, membuka jalan bagi pengembangan generasi drone berikutnya yang tidak hanya lebih canggih, tetapi juga lebih ramah lingkungan dan sulit dideteksi.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif komparatif dengan desain eksperimental berbasis simulasi dan validasi pengujian. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan analisis mendalam terhadap karakteristik aerodinamis dan akustik propeller secara terkontrol dan terukur. Penelitian dilakukan melalui tiga tahap utama: (1) perancangan dan pemodelan desain bio-inspired, (2) simulasi komputasi untuk analisis performa, dan (3) validasi eksperimental untuk memverifikasi hasil simulasi.

Diagram alir penelitian secara ringkas dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Tahapan Penelitian

Tahap	Kegiatan Utama	Output
Tahap 1: Desain dan Pemodelan	Studi literatur bio-inspirasi, pemodelan 3D CAD propeller baseline dan bio-inspired (serrations, tubercles, insect-inspired planforms)	Model 3D propeller siap simulasi
Tahap 2: Simulasi Komputasi (CFD)	Simulasi aliran fluida menggunakan metode MRF, mesh independence study, analisis thrust, torque, efisiensi, dan pola aliran	Data performa aerodinamis dan visualisasi aliran
Tahap 3: Pengujian Eksperimental	Manufaktur prototipe (3D printing), pengujian thrust menggunakan load cell, pengukuran kebisingan di ruang anechoic, validasi hasil simulasi	Data validasi dan kesimpulan performa desain terbaik

3.2 Desain dan Pemodelan Propeller

A. Pemilihan Propeller Baseline

Penelitian ini menggunakan propeller komersial sebagai baseline untuk perbandingan. Propeller DJI Phantom-3 dipilih sebagai referensi utama karena ketersediaan data eksperimental yang lengkap untuk validasi. Spesifikasi propeller baseline adalah sebagai berikut:

- 1) Diameter: 0,24 m (9,4 inci)
- 2) Jumlah bilah: 2

- 3) Airfoil: Eppler E63 (distribusi seragam di sepanjang bilah)
- 4) Rentang putaran: 4000 - 8000 rpm

B. Sumber Bio-Inspirasi dan Parameter Desain

Desain bio-inspired dikembangkan berdasarkan tiga sumber inspirasi utama:

1) Inspirasi dari Serangga (Insect-Inspired Planforms)

Enam spesies serangga dipilih sebagai sumber inspirasi bentuk bilah (planform): Hemiptera, Orthoptera, Neuroptera, Mantodea, Odonata, dan Hymenoptera . Kurva bentuk sayap serangga diadopsi untuk mendefinisikan distribusi chord di sepanjang rentang bilah propeller, dengan mempertahankan airfoil E63 yang sama .

2) Inspirasi dari Burung Hantu (Leading-Edge dan Trailing-Edge Serrations)

Desain ini mengadopsi struktur gigi-gergaji mikro pada tepi depan (leading-edge serrations/LES) dan tepi belakang (trailing-edge serrations/TES) bilah propeller .

Parameter yang divariasikan meliputi:

- a. Panjang serrations
- b. Lebar serrations
- c. Jarak antar serrations
- d. Orientasi/sudut serrations terhadap aliran

C. Inspirasi dari Paus Bungkuk (Leading-Edge Tubercles)

Desain ini menambahkan tonjolan bergelombang (tubercles) pada tepi depan bilah . Parameter yang dioptimasi meliputi:

- 1) Amplitudo gelombang
- 2) Panjang gelombang
- 3) Posisi penempatan (di bagian hub dan/atau tip)

D. Rancangan Optimasi Desain

Optimasi desain dilakukan dengan pendekatan studi parametrik . Parameter desain yang dioptimasi meliputi:

- 1) Untuk Serrations: Variasi panjang (mm), lebar (mm), jarak antar serrations (mm), dan orientasi sudut (derajat).
- 2) Untuk Tubercles: Variasi amplitudo (mm) dan panjang gelombang (mm).
- 3) Untuk Insect-Inspired Planforms: Variasi bentuk kurva distribusi chord berdasarkan spesies serangga.

Kombinasi fitur bio-inspired juga diuji, seperti:

- a. LE (leading-edge serrations saja)
- b. TE (trailing-edge serrations saja)

- c. BL (boundary-layer trips)
- d. Kombinasi LE+TE, TE+BL, dll.

Setiap varian desain disimulasikan pada kondisi operasi yang sama untuk membandingkan performa. Desain dengan performa terbaik (kombinasi thrust tinggi dan efisiensi baik) akan dipilih untuk tahap validasi eksperimental.

E. Pengujian Eksperimental

1) Manufaktur Prototipe

Prototipe propeller desain terpilih diproduksi menggunakan teknologi 3D printing dengan material yang sesuai (misalnya, resin atau filament berkekuatan tinggi) . Akurasi geometri sangat penting untuk memastikan kesesuaian dengan model CAD.

2) Set-up Pengujian Aerodinamika

Pengujian gaya dorong dan torsi dilakukan menggunakan propeller test rig yang terpasang di terowongan angin subsonik . Instrumen utama meliputi:

- a. Load cell 6-axis untuk mengukur thrust dan torque secara simultan
- b. Power analyzer untuk mengukur tegangan dan arus yang dikonsumsi motor
- c. Encoder atau tachometer untuk mengukur kecepatan putaran presisi

Prosedur pengujian :

- a. Memasang prototipe propeller pada motor brushless DC
- b. Mengatur kecepatan putaran (RPM) melalui electronic speed controller (ESC) dengan sinyal PWM
- c. Melakukan pengukuran pada variasi kecepatan putaran (4000 - 8000 rpm)
- d. Untuk pengujian terbang maju, kecepatan aliran terowongan angin divariasikan untuk mendapatkan variasi advance ratio (J)
- e. Mencatat data thrust, torque, tegangan, arus, dan RPM untuk setiap kondisi

3) Set-up Pengujian Akustik

Pengukuran kebisingan propeller dilakukan di ruang anechoic (ruang tanpa gema) untuk mengisolasi suara propeller dari pantulan dan kebisingan lingkungan . Instrumen dan prosedur meliputi:

- a. Mikrofon presisi (kelas 1) yang ditempatkan pada jarak tertentu dari propeller (misalnya 1,5 m) dengan berbagai sudut
- b. Data acquisition system untuk merekam sinyal suara
- c. Software analisis spektrum untuk melakukan FFT (Fast Fourier Transform) dan memperoleh spektrum frekuensi suara

Parameter akustik yang diukur:

- a. Sound Pressure Level (SPL) dalam dB
- b. Frekuensi puncak (*blade passing frequency dan harmoniknya*)
- c. Overall Sound Pressure Level (OASPL)
- d. Perbandingan spektrum kebisingan antara desain bio-inspired dan baseline

Tabel 2. Ringkasan Instrumen dan Parameter Pengukuran

Jenis Pengujian	Instrumen Utama	Parameter yang Diukur	Kondisi Pengujian
Aerodinamika	Load cell 6-axis, power analyzer, tachometer	Thrust (N), Torque (Nm), Daya (W), RPM	Rentang 4000-8000 rpm, variasi kecepatan aliran (0-10 m/s)
Akustik	Mikrofon presisi kelas 1, DAQ, ruang anechoic	SPL (dB), spektrum frekuensi (Hz), OASPL	Jarak mikrofon 1-2 m, multiple sudut pengukuran

F. Validasi dan Analisis Data

1) Validasi Hasil Simulasi

Hasil simulasi CFD divalidasi dengan membandingkannya terhadap:

- a. Data eksperimental propeller baseline (DJI Phantom-3) dari literatur
- b. Hasil pengujian eksperimental prototipe yang dilakukan dalam penelitian ini
- c. Kriteria validasi yang digunakan adalah error thrust < 3% dan error torque < 8% antara simulasi dan eksperimen .

2) Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan metode statistik deskriptif dan komparatif:

- a. Perbandingan performa antar varian desain bio-inspired
- b. Perbandingan dengan propeller baseline
- c. Identifikasi desain dengan performa terbaik berdasarkan kriteria

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Berdasarkan sintesis dari berbagai studi eksperimental dan simulasi terkini, penerapan desain bio-inspired pada propeller drone menunjukkan hasil yang signifikan dalam mereduksi

kebisingan dan meningkatkan performa aerodinamis. Tabel 3 berikut merangkum temuan utama dari beberapa pendekatan bio-inspired yang telah diteliti.

Tabel 3. Ringkasan Hasil Penelitian Propeller Bio-Inspired

Jenis Desain Bio-Inspired	Sumber Inspirasi	Reduksi Kebisingan	Perubahan Efisiensi Aerodinamis
Kombinasi Serrations (LE+TE)	Burung Hantu	3.1 dB (uji lab) 2.6–3.8 dB (uji lapangan)	+7.9% (peningkatan thrust efficiency)
Leading-Edge Serrations (LES)	Burung Hantu	Hingga 3 dB	-4% s.d. -8% (penurunan figure of merit)
Leading-Edge Tubercles	Paus Bungkuk	Tidak diukur secara khusus	+60% s.d. +70% (peningkatan efisiensi propeller)
Bio-Inspired Cutout Shapes	Struktur Alami	Reduksi signifikan pada rentang frekuensi menengah-tinggi	-5% (penurunan efisiensi, namun dianggap praktis)
Insect-Inspired Planforms	Serangga (Neuroptera, dll.)	Reduksi noise harmonik & broadband, -7.9 dBA (Neuroptera)	Daya -5.5 W untuk thrust 3N (lebih efisien)
Serrations Attached Propeller	Burung Hantu	Reduksi noise teramati pada rentang RPM operasional	Koefisien drag turun, koefisien lift & rasio L/D naik

4.2 Pembahasan

1) Efektivitas Desain Bio-Inspired dalam Mereduksi Kebisingan

Hasil penelitian secara konsisten menunjukkan bahwa desain propeller bio-inspired mampu mereduksi kebisingan secara signifikan. Desain yang mengkombinasikan leading-edge serrations (LES) dan trailing-edge serrations (TES) dari burung hantu terbukti paling komprehensif. Penelitian oleh Wei et al. (2025) menunjukkan bahwa desain bio-inspired coupled propeller (BCP) mampu mereduksi kebisingan hingga 3.1 dB di laboratorium dan 2.6–3.8 dB pada uji lapangan. Analisis spektral mengungkap bahwa struktur serrations ini

efektif menekan tonal noise pada frekuensi blade passing frequency (BPF) dan broadband noise, terutama di atas 2 kHz .

Mekanisme peredaman kebisingan ini dapat dijelaskan melalui analisis aliran fluida. Struktur leading-edge serrations berfungsi untuk mengganggu pembentukan pusaran berskala besar di tepi depan bilah . Dengan memecah vortisitas besar menjadi pusaran-pusaran kecil yang lebih terdistribusi, fluktuasi tekanan dan kecepatan intensitas tinggi di dekat ujung bilah dapat direduksi . Studi simulasi CFD oleh peneliti Korea juga mengkonfirmasi bahwa serrations menyebabkan aliran udara terdispersi menjadi turbulensi kecil, sehingga pusaran yang terbentuk menjadi lebih kecil dan mereduksi kebisingan .Menariknya, desain insect-inspired planforms juga menunjukkan kemampuan luar biasa dalam mereduksi kebisingan. Propeller yang terinspirasi dari ordo Neuroptera berhasil mereduksi kebisingan hingga 7.9 dBA pada jarak 1.5 meter dibandingkan propeller baseline . Hal ini menunjukkan bahwa variasi bentuk bilah secara keseluruhan (planform) juga berkontribusi signifikan terhadap profil akustik propeller.

2) Dampak Desain Bio-Inspired terhadap Efisiensi Aerodinamis

Dampak desain bio-inspired terhadap efisiensi aerodinamis bervariasi tergantung pada jenis modifikasi yang diterapkan. Temuan paling menarik datang dari desain kombinasi LES dan TES yang tidak hanya mereduksi kebisingan tetapi juga meningkatkan thrust efficiency sebesar 7.9% . Peningkatan ini menunjukkan bahwa interaksi kompleks antara serrations di tepi depan dan belakang mampu mengoptimalkan aliran fluida dengan cara yang sinergis, memicu pembentukan vorteks, modulasi turbulen, dan dissipasi pusaran yang lebih terkendali .

Hasil yang sangat impresif juga ditunjukkan oleh desain tubercles terinspirasi paus bungkuk. Studi parametrik oleh Kesavan et al. (2024) menunjukkan bahwa penempatan flippers (tubercles) di bagian hub dan tip propeller mampu meningkatkan efisiensi propeller hingga 60-70%, tergantung pada konfigurasi pitch yang digunakan . Peningkatan drastis ini disebabkan oleh kemampuan tubercles untuk mencegah stall dengan menghasilkan pusaran-pusaran terkontrol yang mempertahankan aliran tetap menempel pada permukaan bilah pada sudut serang tinggi.

Sementara itu, desain leading-edge serrations saja (tanpa kombinasi dengan trailing-edge) menunjukkan adanya trade-off. Penelitian terbaru oleh Rong et al. (2025) melaporkan bahwa meskipun LES mampu mereduksi kebisingan hingga 3 dB, terdapat penalti aerodinamis sebesar 4-8% dalam figure of merit . Hal serupa ditemukan pada desain cutout shapes oleh Noda et al. (2024), di mana tidak ditemukan peningkatan efisiensi, bahkan terjadi penurunan sekitar 5% . Namun, penurunan kecil ini dianggap masih dapat ditoleransi untuk aplikasi

praktis seperti operasi drone malam hari di perkotaan, mengingat manfaat reduksi kebisingannya yang signifikan .

Menariknya, studi berbasis CFD dari Korea justru melaporkan bahwa model Serrations Attached Propeller (SAP) menunjukkan penurunan koefisien drag, peningkatan koefisien lift, dan peningkatan rasio lift-to-drag (L/D) . Hal ini mengindikasikan bahwa optimalisasi parameter geometri serrations (seperti ukuran, bentuk, dan orientasi) sangat krusial untuk mencapai keseimbangan optimal antara kebisingan dan efisiensi.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan kajian teoritis, analisis hasil penelitian, dan pembahasan yang telah dilakukan mengenai desain dan optimasi propeller drone bio-inspired, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

a. Desain Bio-Inspired Terbukti Efektif Mereduksi Kebisingan Propeller Drone

Penerapan struktur mikro yang terinspirasi dari alam, terutama dari burung hantu (leading-edge serrations dan trailing-edge fringes), telah terbukti secara ilmiah mampu menekan tingkat kebisingan propeller secara signifikan. Mekanisme utamanya adalah dengan memecah pusaran udara berskala besar (vortex) yang menjadi sumber utama kebisingan aerodinamis menjadi pusaran-pusaran kecil berenergi rendah. Hasil eksperimental menunjukkan reduksi kebisingan hingga 3.8 dB pada uji lapangan dan 7.9 dBA pada desain insect-inspired planforms, yang merupakan peningkatan signifikan untuk kenyamanan akustik di perkotaan maupun kemampuan siluman (stealth) di sektor militer.

b. Efisiensi Aerodinamis Dapat Ditingkatkan Secara Simultana tau dengan Trade-Off Minimal

Desain bio-inspired tidak hanya bermanfaat untuk mereduksi kebisingan, tetapi juga berpotensi besar meningkatkan efisiensi aerodinamis. Desain tubercles terinspirasi paus bungkuk menunjukkan peningkatan efisiensi propeller hingga 60-70%, sementara kombinasi leading-edge dan trailing-edge serrations mampu meningkatkan thrust efficiency sebesar 7.9%. Meskipun beberapa desain sederhana seperti cutout shapes atau leading-edge serrations saja masih menunjukkan trade-off berupa penurunan efisiensi kecil (4-8%), penurunan ini masih dapat ditoleransi mengingat manfaat reduksi kebisingan yang diperoleh.

c. Optimasi Parameter Geometri dan Kombinasi Multi-Fitur Adalah Kunci Keberhasilan

Keberhasilan desain propeller bio-inspired sangat bergantung pada proses optimasi yang cermat. Faktor-faktor seperti ukuran, bentuk, orientasi, dan posisi penempatan fitur bio-inspired (serrations, tubercles, cutout) terbukti mempengaruhi performa akhir. Desain yang mengkombinasikan multiple bio-inspired features (misalnya LES dan TES secara simultan) menunjukkan hasil yang lebih unggul dibandingkan fitur tunggal. Hal ini menegaskan bahwa pendekatan optimasi multidisiplin yang mengintegrasikan aspek aerodinamika, aeroakustika, dan struktural sangat diperlukan.

d. Terdapat Kesesuaian Desain dengan Tujuan Aplikasi Spesifik

Tidak ada satu desain bio-inspired yang "sempurna" untuk semua kondisi. Pemilihan desain terbaik harus disesuaikan dengan prioritas aplikasi:

- 1) Untuk operasi perkotaan dengan prioritas utama kenyamanan akustik, desain cutout shapes atau LES saja dengan penalti efisiensi minimal adalah pilihan tepat.
- 2) Untuk misi militer siluman yang menuntut kebisingan serendah mungkin, desain kombinasi LES+TES atau insect-inspired planforms dengan kemampuan reduksi noise terbaik adalah yang paling direkomendasikan.
- 3) Untuk aplikasi jangka panjang yang membutuhkan daya tahan baterai maksimal, desain tubercles dengan peningkatan efisiensi drastis adalah solusi unggulan.

5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan di atas, berikut adalah saran-saran yang dapat diberikan untuk penelitian lanjutan dan pengembangan aplikasi praktis:

A. Saran untuk Penelitian Mendatang

1) Eksplorasi Sumber Bio-Inspirasi Baru

Penelitian mendatang disarankan untuk mengeksplorasi sumber bio-inspirasi dari organisme lain yang belum banyak dikaji, seperti:

- a. Sayap capung: Dengan struktur venasi kompleks yang memungkinkan manuver lincah dan redaman getaran alami.
- b. Sirip ikan lumba-lumba: Dengan kemampuan hydro/aerodinamis luar biasa pada berbagai kecepatan.
- c. Bulu burung kolibri: Yang memungkinkan terbang statis (hovering) dengan efisiensi tinggi.

B. Studi pada Kondisi Operasional Dinamis dan Multi-Rotor

Sebagian besar penelitian saat ini terbatas pada kondisi hover statis dengan rotor tunggal. Penelitian lanjutan sangat diperlukan untuk:

- 1) Mengkaji performa desain bio-inspired pada kondisi terbang maju (*forward flight*) dengan berbagai kecepatan dan sudut serang.
- 2) Menganalisis interaksi antar-rotor pada konfigurasi multi-rotor (*quadcopter, hexacopter*) dan dampaknya terhadap kebisingan serta efisiensi total.
- 3) Menguji robustitas desain pada berbagai kondisi lingkungan seperti angin silang (*crosswind*), turbulensi, dan variasi suhu.

C. Pengembangan Metode Optimasi Multidisiplin

Diperlukan pengembangan kerangka kerja optimasi yang mengintegrasikan:

- 1) CFD (*Computational Fluid Dynamics*) untuk analisis aerodinamika.
- 2) CAA (*Computational Aeroacoustics*) untuk prediksi kebisingan.
- 3) FEA (*Finite Element Analysis*) untuk analisis struktural dan getaran.
- 4) Algoritma optimasi cerdas seperti genetic algorithm atau machine learning untuk mengeksplorasi ruang desain yang luas secara efisien.

D. Validasi Eksperimental Skala Penuh

Hasil simulasi dan optimasi perlu divalidasi dengan:

- 1) Pengujian terowongan angin dengan instrumentasi akustik presisi.
- 2) Uji terbang lapangan pada berbagai skenario operasional nyata untuk memverifikasi performa dalam kondisi sebenarnya.
- 3) Pengukuran psikoakustik untuk mengevaluasi persepsi kebisingan oleh manusia, bukan hanya level desibel semata.

DAFTAR REFERENSI

- Noda, R., et al. (2024). Effect of Bio-Inspired Cutout Shapes at the Leading Edge of Propellers on Noise and Flight Efficiency. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 36(5), 1010-1018. [DOI: 10.20965/jrm.2024.p1010]
- Rong, J., & Liu, H. (2022). Aeroacoustic interaction between owl-inspired trailing-edge fringes and leading-edge serrations. *Physics of Fluids*, 34(1), 011907.
- Moslem, F., Masdari, M., Fedir, K., & Moslem, B. (2023). Experimental investigation into the aerodynamic and aeroacoustic performance of bioinspired small-scale propeller planforms. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 237(1), 75-90.
- Wang, L., & Liu, X. (2022). Aeroacoustic investigation of asymmetric oblique trailing-edge serrations enlightened by owl wings. *Physics of Fluids*, 34(1).
- Cao, H., Zhou, T., Zhang, Y., & Zhang, M. (2022). An experimental investigation of aerodynamic and aeroacoustic performance of a wind turbine airfoil with trailing edge serrations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 152(2), 1211-1222.
- Rong, J., & Liu, H. (2022). Effects of owl-inspired leading-edge serrations on tandem wing aeroacoustics. *AIP Advances*, 12(11).

- Celik, A., Bowen, L., & Azarpeyvand, M. (2022). Experimental investigation on the unsteady surface pressure fluctuation patterns over an airfoil. *Physics of Fluids*, 34(10).
- Arif, I., Lam, G. C., Leung, R. C., & Naseer, M. R. (2022). Distributed surface compliance for airfoil tonal noise reduction at various loading conditions. *Physics of Fluids*, 34(4).
- Masud, M. H., et al. (2025). Translating marine biology into engineering: A review of biomimicry and its applications. *Ocean Engineering*, 339(2), 122108.
- Lin, L., Deng, Z., Chen, W., Li, H., & Gao, D. (2022). Flow control of a circular cylinder by self-adaptive furry microfibers. *Physics of Fluids*, 34(10).
- Kesavan, A. K. (2024). Effects of leading edge tubercles on drone propeller performance [Master's thesis, Politecnico di Torino]. Politecnico di Torino Institutional Repository.
- Mariani, R. (2024). CFD Analysis of UAV propeller [Project report]. NAISS Small Compute, Kungliga Tekniska högskolan.
- Peneliti Lain (2022). Numerical Study of B-Screw Ship Propeller Performance: Effect of Tubercle Leading Edge. *IPTEK Journal of Engineering*, 8(2).
- Anderson, J. D. (2017). *Fundamentals of Aerodynamics* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- Brès, G. A., & Colonius, T. (2008). Direct numerical simulations of the sound from a hovering propeller. *AIAA Journal*, 46(11), 2748-2760.
- Drela, M. (2014). *Flight Vehicle Aerodynamics*. MIT Press.
- Ffowcs Williams, J. E., & Hawkings, D. L. (1969). Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 264(1151), 321-342.
- Glegg, S., & Devenport, W. (2017). *Aeroacoustics of Low Mach Number Flows: Fundamentals, Analysis, and Measurement*. Academic Press.
- Leishman, J. G. (2006). *Principles of Helicopter Aerodynamics* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Vogel, S. (2013). *Comparative Biomechanics: Life's Physical World* (2nd ed.). Princeton University Press.